

THE FAURE

THÈSE

présentée devant

L'UNIVERSITÉ Claude BERNARD (LYON I)

pour obtenir

Le DOCTORAT de TROISIÈME CYCLE

GÉOLOGIE DES ENSEMBLES SÉDIMENTAIRES

par

Guy FAURE

ETUDE HYDROGÉOLOGIQUE DU BASSIN MIOCÈNE DE CARPENTRAS

(VAUCLUSE)

Relation entre l'aquifère molassique et le substratum
(Evaporites triasiques, Urgonien karstifié, gypses paléogènes)
Exploitabilité

Soutenue le 26 juin 1982 devant la Commission d'examen :

M. Cotillon P.	Président
M. Truc G.	} Examineurs
M. Fontes J.C.	
M. Rio M.	
M. Siwertz E.	
M. Pellenc G.	Invités
M. Rochette M.	

- UNIVERSITE CLAUDE BERNARD - LYON I -

Président honoraire : M. le Pr J. BOIDIN

Président : M. le Pr L. DAVID

Premier Vice-Président : M. le Pr R. MORNEIX

Deuxième Vice-Président : Mme A. VARAGNAT, M.A.

Troisième Vice-Président : M. DUGNAT, Etudiant

Secrétaire Général de l'Université : M. F. MARIANI

UNITES D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE (U.E.R.)

U.E.R. de Médecine GRANGE-BLANCHE : M. le Pr Paul ZECH
U.E.R. de Médecine ALEXIS-CARREL : M. le Pr René MORNEIX
U.E.R. de Médecine LYON-NORD : M. Yves MINAIRE, M.C.A.
U.E.R. de Médecine LYON-SUD : M. le Pr Jean NORMAND
U.E.R. Faculté de Pharmacie : M. le Pr C.A. BIZOLLON
U.E.R. de Techniques de Réadaptation : M. le Pr ^{M. EXSETTE.} ~~Alain MORGON~~
U.E.R. de Biologie Humaine : M. Jean-Pierre REVILLARD, MCA
U.E.R. E.P.S. : M. Albert MILLON, Pr d'E.P.S.
U.E.R. Faculté d'Odontologie de Lyon : M. le Pr Jean PARRET
U.E.R. de Mathématiques : M. le ^{BRAEMER, M.A.} ~~Pr Maurice PLAMANT~~
U.E.R. de Physique : M. le Pr Jean DELMAU
U.E.R. de Chimie et Biochimie : Mme Annick VARAGNAT, M.A.
U.E.R. des Sciences de la Nature : M. le Pr Yves LEMOIGNE
U.E.R. des Sciences Physiologiques : Mle le Pr J.F. WORBE
U.E.R. de Physique Nucléaire : M. le Pr E. ELBAZ
I.U.T. I : M. le Pr Albert VILLE
I.U.T. II : M. le Pr P. MICHEL
Observatoire de Lyon : M. G. MONNET, Astronome
U.E.R. de Mécanique : Mle le Pr. G. COMTE-BELLOT

R E M E R C I E M E N T S

A tous les membres du Jury qui ont accepté de juger cet ouvrage, j'adresse mes plus vifs remerciements.

Ma reconnaissance va tout d'abord à Monsieur Pierre COTILLON qui m'a enseigné les premières notions d'hydrogéologie. Il a bien voulu, malgré ses nombreuses préoccupations, accepter de présider ce Jury.

Il était fondamental de bénéficier de l'avis d'un hydrochimiste de grande renommée, spécialisé dans les problèmes isotopiques, c'est à ce titre et pour s'être déplacé malgré un emploi du temps très chargé que je remercie Monsieur Charles FONTES.

Je remercie tout spécialement Monsieur Georges TRUC qui après m'avoir proposé le sujet et pourvu à sa réalisation m'a dévoilé avec simplicité une partie de ses grandes connaissances sur la géologie vauclusienne. Avec efficacité il a su résoudre les différents problèmes matériels qui n'ont cessé de se poser tout au long de ces deux années ; enfin il s'est attaché, avec beaucoup de gentillesse, à être le coordinateur entre les différentes Entreprises et les diverses Administrations

A Monsieur Gilbert PELLENC, Président du syndicat des eaux de la région Rhône-Ventoux, je tiens à présenter ma plus vive et respectueuse reconnaissance. Par ses nombreuses idées et l'efficacité de ses décisions, par son accueil toujours bienveillant malgré la surcharge permanente des tâches qu'il doit assumer, il a puissamment contribué à forger le cadre de ce travail, et à suivre son bon déroulement au cours des deux années pendant lesquelles je fus plus vauclusien que lyonnais.

Que la D.D.A... en la personne de son directeur Monsieur M. ROCHETTE, et M. J.P. LEGROUX, Ingénieur du Génie rural, trouve dans ces lignes l'expression de mes remerciements empressés pour l'aide financière mise en place par ses soins, aide sans laquelle une étude de cette ampleur n'aurait pu voir le jour, et pour l'action pleine d'opiniâtreté, porteuse de succès, qu'elle mène dans le département de Vaucluse depuis tant d'années.

Je remercie sincèrement Erik SIWERTZ qui m'a fait découvrir une autre géologie, plus appliquée, plus axée sur les besoins actuels. Son dynamisme et ses connaissances hydrogéologiques m'ont été d'un très grand secours. Une étroite collaboration s'est établie et un très grand travail a été accompli tant pour les sondages électriques sur le terrain que pour leurs interprétations.

Que le Cabinet Merlin en la personne de Monsieur J.P. CLET se trouve aussi remercié pour sa présence constante dans le département de Vaucluse et le travail effectué pour le syndicat Rhône-Ventoux.

Mes remerciements vont ensuite à Monsieur Pierre GRANGER, sa famille, ses compagnons : Jean-Luc et René qui m'ont fourni une somme considérable de renseignements. Ils m'ont fait découvrir les multiples facettes du département de Vaucluse et sans eux il m'aurait été impossible de mener à bien ce travail.

Je remercie également toutes les personnes qu'i m'ont aidé d'une façon ou d'une autre : Franck LENCLUD de la C.P.G.F. avec qui j'ai passé de longues et agréables semaines sous le soleil, Messieurs FALANGA et VAN DE WELDE de la S.D.E.I., M. BRIFFA de la SIFRACO, Madame PERRON Maire de Loriol et son mari : extrêmement hospitaliers et d'une très grande largesse d'esprit, Madame BOURGEOIS de la D.A.S.S., Monsieur COSTAT maraicher à Aubignan, tout le personnel de la Faculté de Lyon : Monsieur DUIVON, Madame PELLAT et Madame DRAY qui a du user de beaucoup de calme et de gentillesse pour déchiffrer et dactylographier ce manuscrit, ainsi que des amis : Frédérique, Bake, Marcel, Ghali, Bernard, Louis, Catherine...

Je tiens enfin à dédier ce travail à ma famille, témoignage de toute l'affection que je leur porte, pour l'aide qu'elle n'a cessé de me prodiguer tout au long de ces années d'étude.

R E S U M E

A la demande du Syndicat Rhône-Ventoux, pour une meilleure connaissance et une diversification des ressources en eau dans le Vaucluse, il a été décidé d'étudier dans un premier temps le bassin miocène de Carpentras. Plusieurs techniques d'investigations ont permis d'améliorer les connaissances de cet aquifère : forages, géophysique, géochimie, pompages d'essai...

Le bilan climatique montre que l'alimentation locale du réservoir miocène est très faible. Par contre l'eau disponible à partir des Monts de Vaucluse permet d'envisager à elle seule une réalimentation de l'aquifère.

Les nombreuses coupes lithologiques ont mis en évidence la nature du sédiment, sa répartition spatiale, ses rapports sédimentaires avec l'encaissant.

Les pompages d'essai et une carte piézométrique précise ont défini les qualités hydrodynamiques (perméabilité - transmissivité - coefficient d'emmagasinement - alimentation par le karst urgonien).

Les sondages électriques ont permis de préciser la structure du bassin, et, en parallèle avec les coupes lithologiques de corrélérer, résistivité et nature du sédiment.

Les caractéristiques chimiques et isotopiques de l'aquifère ont prouvé les relations entre l'encaissant et le Miocène, la présence d'accidents majeurs, l'influence de l'aquifère karstique, l'âge de cet aquifère ainsi que la protection naturelle contre toutes agressions de causes humaines.

Longtemps considéré comme dérisoire pour un syndicat, bien qu'intensément prospecté pour l'irrigation, cet aquifère semble prédestiné à un tout autre avenir justifié par : son volume, la qualité des eaux et leur protection naturelle, des débits d'exhaure intéressants.

SOMMAIRE

	Pages
INTRODUCTION	
1. Cadre géographique	8
2. Position du problème	9
3. But et conduite de l'étude	11
PREMIERE PARTIE - <u>CADRE GEOLOGIQUE</u>	
1. DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES	13
A - COLONNE LITHO-STRATIGRAPHIQUE GENERALE	13
B - ELEMENTS STRUCTURAUX	17
2. TRAVAUX REALISES DANS LE CADRE DE CETTE THESE	21
A - LITHOLOGIE	21
B - ETUDE GEOPHYSIQUE	31
A) Principe de la méthode	31
B) Etalonnage	33
C) Résultats des mesures	33
1) Structure du bassin	
a. le panneau Sorgues-Bédarrides	
b. le panneau Entraigues-Loriol	
c. le panneau de Carpentras-Montoux	
d. le panneau Mazan-Pernes	
2) Implications hydrogéologiques	
a. Corrélation entre la coupe lithologique	
du forage de Loriol et le sondage	
électrique 9 ter.	
b. Carte d'isorésistivité	
3. CONCLUSIONS PARTIELLES	41
SECONDE PARTIE - <u>HYDRODYNAMIQUE</u>	
1. HYDROCLIMATOLOGIE	47
A - RESEAU DE MESURES ET CRITIQUES DES DONNEES	47
B - PLUVIOMETRIE	48
C - EVAPORATION - EVAPOTRANSPIRATION - DEFICIT	
D'ECOULEMENT	50
1) Evaporation	
2) Facteurs influents	
3) Evapotranspiration et déficit d'écoulement	
a. Méthodes de calcul	
b. Résultats	
4) Eaux utilisables	

2. ECOULEMENT	56
A - RELATION ENTRE LES DIFFERENTS AQUIFERES	56
B - ECOULEMENT SUPERFICIEL	57
1) Nappe phréatique	57
2) Réseau hydrographique	59
C - ECOULEMENT SOUTERRAIN	66
1) Le magasin aquifère	66
a. géométrie	
b. alimentation	
c. qualité	
2) Piézométrie	74
a. généralités	
b. principaux résultats	
c. fluctuations	
d. évolution des températures	
3) Hydrodynamique	81
a. généralités	
b. choix des méthodes	
c. essais de pompage	
4) Carte des Q/	96
D - CONCLUSION PARTIELLE - ESSAI DE BILAN	101
1) Bilan global des infiltrations dans la nappe phréatique	101
2) Conclusions partielles	103
3) Essai de bilan chiffré	103

TROISIEME PARTIE - HYDROCHIMIE

1. CARACTERISTIQUES CHIMIQUES GENERALES	105
A - DIAGRAMME DE PIPER - ANALYSES COMPLETES	106
1) Généralités.....	106
2) Résultats	106
B - QUELQUES PHENOMENES OBSERVES A PARTIR DE CERTAINS ELEMENTS	109
1) Teneur en silice	109
2) Rôle des évaporites	111
3) Rapport r Mg/ca	113
C - DIAGRAMME DE PIPER - ANALYSES PARTIELLES	
1) Généralités	113
2) Résultats	113
a. Pôle sulfaté	
b. Pôle carbonaté	
2. DONNEES PARTICULIERES	117
A - CONCENTRATION EN SULFATES	117
1) Importance des sulfates	117

2) Carte des sulfates	120
3) Réaction physico-chimique produite par les sulfates	120
B - CONCENTRATIONS EN CHLORURES	125
1) Région de Beaumes-de Venise.....	125
2) Région de Courthézon	127
C - LE FER	129
D - AUTRES ELEMENTS	129
E - CHIMIE DES EAUX SUPERFICIELLES	130
F - CONCLUSION PARTIELLE	130
3. GEOCHIMIE ISOTOPIQUE	130
A - GENERALITES	130
1) L'oxygène 18	130
2) Le Tritium	133
3) Le Carbone 14	136
B - RESULTATS	137
1) Tableau des valeurs	137
2) Concentration en tritium	137
3) Concentration en oxygène 18	140
4) Conclusions partielles	142
5) Résultats de l'activité en carbone 14	144
a. résultats anciens	
b. résultats 1981/1982	
CONCLUSION	149
1. Rappel des principaux résultats	149
a. géologiques	
b. hydrodynamiques	
c. géochimiques	
2. Cycle de l'eau	150
3. Potentiel de l'aquifère miocène	152
4. Perspective de développement	152
5. Exploitation	153
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	154
LISTE DES FIGURES	157

INTRODUCTION

I N T R O D U C T I O N

1. Cadre géographique

Les limites de la région étudiée ont été fixées en fonction de plusieurs critères :

- zone où affleure le Miocène,
- secteur géré par le syndicat des eaux Rhône-Ventoux,
- région plus ou moins intensément prospectée par les Entreprises de forages.

choix arbitraire

L'intégration de ces différents facteurs a conduit à l'étude d'une région appelée communément : le bassin de Carpentras ou bassin du Comtat venaissin. Géographiquement il est limité :

- à l'Est par les Monts de Vaucluse qui forment une ceinture calcaire continue ;
- au Nord-Est et au Sud-Est, il comporte :
 - . le diapir triasique de Suzette, les dentelles jurassiques de Montmirail,
 - . le massif oligocène de Pernes-les-Fontaines, le Beaucet;
- à l'Ouest, le miocène vient buter contre les calcaires crétacés de Villeneuve-les-Avignon - Châteauneuf du Pape ;
- au Nord et au Sud : il existe une continuité géologique et les limites ont été fixées arbitrairement à une ligne
 - Vacqueyras - Joncquières au Nord,
 - Velleron - Vedènes au Sud.

2. Position du problème

L'alimentation en eau dans le Vaucluse est gérée par 4 grands syndicats auxquels s'ajoutent certaines communes et quelques grosses agglomérations urbaines indépendantes. Une multitude d'agriculteurs qui n'ont pas la possibilité de se brancher sur un réseau de distribution dispose de moyens individuels (forages, captages, puits...). Ces syndicats sont du Sud au Nord :

- Durance - Luberon
- Durance - Ventoux
- Rhône - Ventoux sur le bassin de Carpentras.
- Rhône - Aigues - Ouvèze.

Créé en 1947, le syndicat Rhône-Ventoux regroupe plus de trente communes et doit assurer l'alimentation de plus de 100 000 habitants. Son rôle est double : assurer tout d'abord la répartition des ressources disponibles et d'autre part, rechercher systématiquement toutes les ressources potentielles (fig. 1).

A) Formations aquifères

Les principales formations sur notre zone d'étude sont les nappes alluviales du Rhône et de l'Ouvèze (zone Ouest et Nord-Ouest), la nappe du miocène ou molasse au sens large dans le centre du bassin et la nappe des "sables blancs" crétacée à l'Est. Leur exploitation est la suivante :

a. Formations aquifères sollicitées actuellement

par le syndicat Rhône-Ventoux

Aquifère	débit prélevé (m ³ /h)	% du total utilisé	Localisation des Prélèvements
nappe du Rhône	1600 14.10 ⁶ m ³ /an	69	Sorgues
nappe de l'Ouvèze	550 4,8.10 ⁶ m ³ /an	24	Sorgues
Sables blancs	129 1,1.10 ⁶ m ³ /an	5	Bédoin Flassan
Sablons (sables ocres)	54 0,77.10 ⁶ m ³ /an	2	Villes/Auzon Malemort Methamis

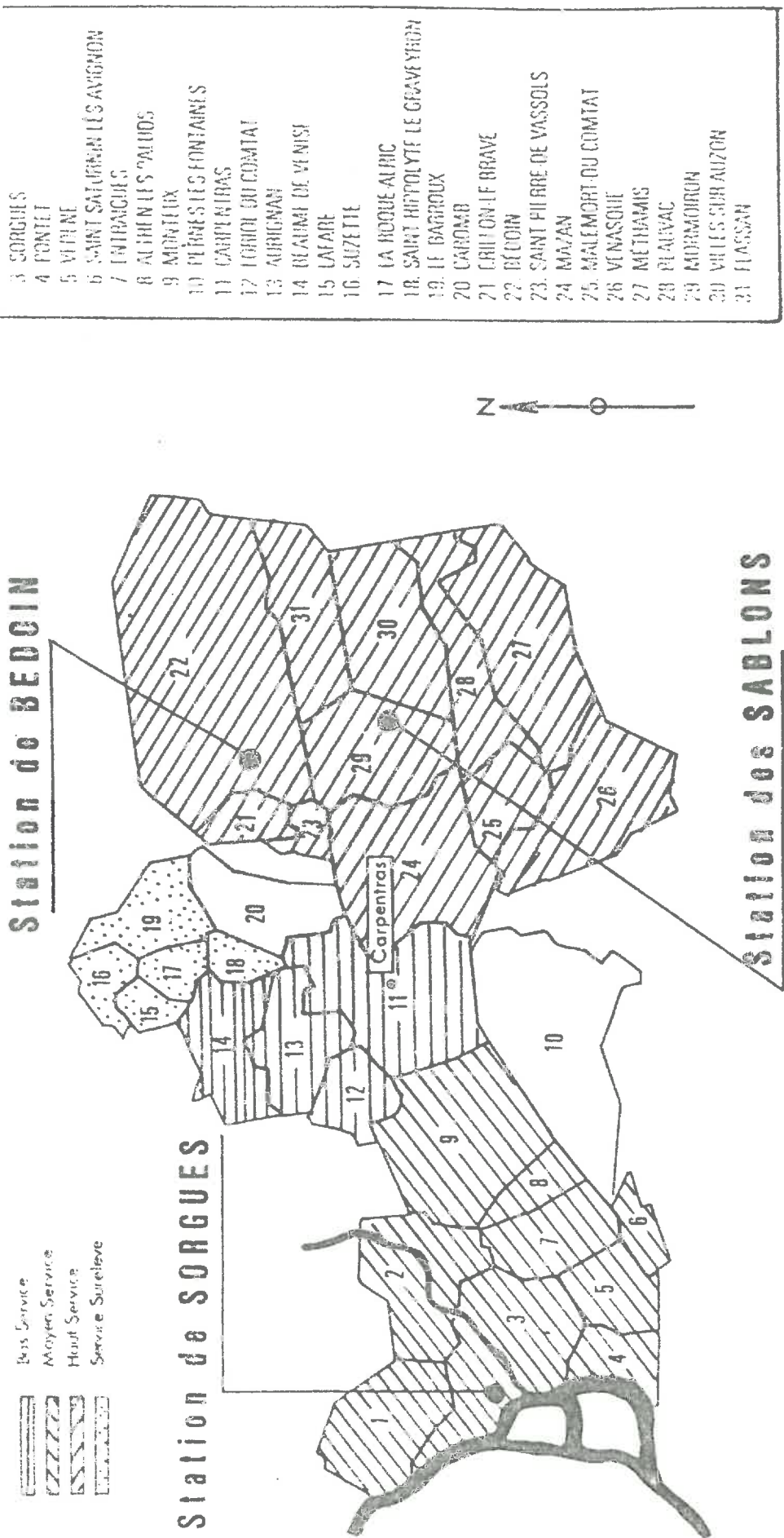


Fig. 3 - Secteur géré par le syndicat Rhône Ventoux

Au vu de ces chiffres, on s'aperçoit que près de 95 % des ressources du syndicat repose sur les nappes alluviales du Rhône et de l'Ouvèze avec tous les risques que cela comporte (baisse de niveau - pollution possible). Il était donc nécessaire de s'attacher à la recherche systématique de toutes les ressources potentielles sur le territoire syndical.

!

120.000
en 84
sur tous les
pays
à
un
si
font
5
action
diffé

- par les agriculteurs : les données très fragmentaires ont permis d'évaluer à plusieurs milliers, le nombre d'ouvrages existants (puits dans la nappe superficielle.)

Ces ouvrages prélèvent des quantités d'eau importantes surtout dans l'aquifère miocène.

On peut remarquer qu'il n'existe aucune concertation au niveau de l'exploitation de cette aquifère (ni des autres d'ailleurs).

Dans le cas du réservoir miocène, cet état de fait est critique ; en effet le débit prélevé de cette façon correspond à près de $20 \cdot 10^5$ m³/an, soit, pour ce seul réservoir, les mêmes quantités d'eau que l'ensemble des prélèvements du syndicat.

Il devenait donc fondamental de faire un inventaire complet de toutes les ressources et de mettre en place un système de protection des aquifères susceptibles d'être détériorés (pollution, utilisation prolongée ou abusive de la nappe...).

3. But et conduite de l'étude

Les besoins croissants du syndicat qui au rythme actuel doublent tous les vingt ans, les nombreux problèmes auquel il se heurte dans la recherche de nouvelles ressources nous ont conduit à nous intéresser à l'aquifère miocène.

En effet, cette formation n'est pas sollicitée par le syndicat qui pourrait maîtriser son exploitation alors qu'actuellement elle est pratiquement gaspillée par des prélèvements anarchiques.

mont de
sur la table

L'étude a été conduite de la façon suivante :

. une connaissance du bassin : volume, répartition du sédiment, structure (tout cela à partir de 120 sondages électriques et plusieurs centaines de descriptions lithologiques de forages).

. une mise en relief de ses qualités hydrodynamiques à partir d'essais de pompages répartis de façon homogène sur toute l'étendue du bassin et de forages de reconnaissance axés sur une exploitation à long terme.

. géochimie de l'aquifère : 150 analyses chimiques ont permis de dresser une carte de la qualité des eaux et de compléter la connaissance sur les relations entre le miocène et son substratum. A cela s'est ajouté une partie plus expérimentale pour une exploitation future en utilisant les techniques isotopiques C14 - Tritium - Oxygène 18.

CADRE GEOLOGIQUE

1 - BONNES BIBLIOGRAPHIQUES

A - COLONNE LITHO-STRATIGRAPHIQUE GENERALE

Depuis les terrains les plus anciens, formant une auréole complexe autour du bassin de Carpentras, jusqu'aux terrains miocènes, objet de l'étude, la succession litho-stratigraphique montre une très grande variété de dépôts qui présentent des caractéristiques hydrogéologiques extrêmement différentes. Il est donc nécessaire de procéder à la présentation de chaque unité pour connaître les relations qui peuvent exister entre les sédiments miocènes et leur substratum.

Terrains anté-miocène

. Barrémien : essentiellement de faciès urgonien ; calcaire à rudistes, de 600 à 800 m d'épaisseur. Ensemble assez homogène et massif, qui forme l'ossature du Mt-Ventoux, du Mt-Luberon, des Monts de Vaucluse et de la Montagne de Lure. C'est une formation récifale, de caractère littoral à infralittoral. Elle change de faciès au Nord immédiat d'une ligne "Châteauneuf-du-Pape-Mollans" et passe très très rapidement à un ensemble alternant (calcaire argileux gris-bleu - marnes) non aquifère. Cette ligne constitue la limite paléogéographique entre une zone profonde, appelée communément "fosse vocontienne", au Nord, et un domaine récifal au Sud.

Une altération d'âge paléocène a provoqué la naissance de phénomènes karstiques affectant la totalité de cet ensemble lithologique, à l'échelle de tout le Sud-Est de la France. Le karst urgonien est devenu une entité familière aux vauclusiens en raison de la nappe aquifère qu'il contient et qui possède à la Fontaine-de-Vaucluse son plus célèbre exutoire.

Une tectonique post-barrémienne a provoqué la formation de rides anticlinales, ou encore d'un ensemble en "touches de piano" montrant une succession de horsts et de grabens modérément décalés. Les point hauts (anticlinaux ou horsts) sont balayés par les courants, ce qui fait apparaître quelques lacunes de sédimentation.

Les synclinaux (rias ou golfes) sont le lieu de dépôt des séries calcaréo-argileuses ou des marnes bleues.

L'accentuation du bombement au Cénomaniens inférieur entraîne l'émergence du domaine Sud-Provençal. On parle alors "d'Isthme durancien" (Masse et Philip, 1976). Ces auteurs ont dénombré trois rides majeures :

- l'anticlinal comtadin situé à l'emplacement du Vaucluse
- l'anticlinal médio-provençal (secteur d'Aix-en-Provence)
- l'anticlinal sud-provençal.

Ces rides, toujours suivant les auteurs, subissent un abaissement du plan axial d'E en W. L'inflexion maximale se situerait à l'aplomb de la vallée du Rhône actuelle. Il y aurait au-delà une remontée du même plan axial en direction du Gard.

Ce modelé structural est d'importance majeure ; il s'agit en effet de l'organisation de tous les dépôts postérieurs au Crétacé et, en fonction du panneau considéré, les relations hydrogéologiques Miocène-substratum seront très différentes.

- Bédoulien - Gargasien : calcaire argileux à céphalopodes, peu épais (30 - 40 m) surmonté de marnes bleues pyriteuses (80 m). Ces dépôts correspondent à une brusque augmentation de la profondeur du bassin.

Cette formation se comporte comme un écran imperméable au-dessus de l'Urgonien karstique, mais il peut contribuer par drainance à l'alimentation des sédiments surincombants.

- Albien - Cénomaniens : 180 m de sables et grés glauconieux comportant des passées de sables rouges altérés, de sables blancs et de sables ocres visibles en carrière sur les bordures du bassin ; ils contiennent une nappe aquifère importante, exploitée au lieu-dit les Sablons (commune de Mormoiron) et à Bédoin.

Le Cénomanién inférieur correspond au maximum de la déformation et le "bombement durancien" se trouve alors à son amplitude maximum. Les zones émergées se trouvent donc soumises à des phénomènes d'altération continentale d'une exceptionnelle importance, qui aboutissent :

- dans le domaine sud-provençal, à la formation de bauxite
- dans le domaine nord-provençal, au passage grés glauconieux -sables rouges-sables ocres-sables blancs- suivant le degré d'altération (Triat, 1974).

. Eocène (s.1) : 50 m de sables argileux, d'argiles vivement colorées, de calcaires en lentilles discontinues, le tout très faiblement aquifère.

. Oligocène : 180 m de marnes vertes sableuses et de gypse, visibles surtout à Normoiron. Ces marnes sableuses constituent le deuxième écran imperméable de la série. Il existe quelques niveaux plus sableux agissant comme des drains très localisés, sans aucune importance hydrogéologique. La masse gypseuse fissurée et faillée, dont la répartition spatiale est encore mal connue, contient une nappe aquifère sans doute irrégulière et de qualité médiocre. Reconnue en quelques points, elle se trouve malheureusement en communication directe avec le Miocène.

Comme nous le constaterons par la suite, l'Oligocène sous faciès gypseux, par sa position structurale, revêt une importance primordiale et pose un problème hydrogéologique délicat que nous retrouverons tout au long de l'étude.

Le reste de l'Oligocène (marnes, calcaires à gypses, sables du stampien et du Chattien) affleure à Pernes-les-Fontaines et constitue une partie du substratum anté-miocène dans la partie méridionale du bassin de Carpentras.

Terrains miocènes

. Burdigalien : avec cet étage, on assiste au retour d'une mer dont le premier dépôt est un conglomérat à galets verdis dont l'épaisseur peut atteindre une dizaine de mètres.

Deux types de sédiments comblent alors les bassins, selon la morphologie préexistante :

- zone de plateforme : le dépôt est une "molasse" calcaire à Chlamys, Pecten, Bryozoaires, lithothamnifères, de milieu littoral. L'épaisseur peut avoisiner 80 m et montrer après fracturation (tectogénèse alpine) une perméabilité en grand non négligeable. On trouve ce Burdigalien en position subverticale à Notre Dame d'Aubane, au Nord-Ouest de Beaumes-de-Venise ; il affleure également à 344 m d'altitude dans le village de Crillon-de-Brave, et constitue les replats de Vénasque, Saint-Didier et la Roque-sur-Fernes.

- zone de bas-fonds : G. Demarcq a insisté sur le passage graduel d'un Burdigalien molassique calcaire, contenant une faune burdigalienne "classique" sur les hauts fonds, à des dépôts conglomératiques et marneux sur la pente bordière de ces hauts fonds puis à des dépôts vaseux dans les bas-fonds (Demarcq, 1970, p.133).

. Helvétien : 300 à 700 m de sables consolidés, alternants avec des marnes sableuses bleues micacées formant le support de la nappe aquifère dite Miocène. G. Demarcq qui a bien étudié cette formation, la décrit en ces termes : "sables jaunâtres plus ou moins marneux, plus ou moins grésifiés, localement un peu grossiers ou peu zoogènes. Ils constituent une formation monotone donnant des reliefs mous mais variés dans le détail". Il ajoute d'un point de vue paléogéographique : "L'hétérogénéité lithologique et structurale du substratum anté-miocène, si importante pour des différenciations et la localisation des faciès du Burdigalien et de l'Helvétien, était due à une vieille structure morphologique de la région, acquise pendant la période continentale du Tertiaire... ; c'est un jeu complexe d'effondrements régionaux qui a achevé de donner à une partie du bassin rhodanien sa physionomie structurale anté-miocène. La plupart des îlots crétacés actuels de la plaine du Comtat sont des compartiments restés sous forme de horst... ". Ces horsts forment des seuils et interfèrent dans la répartition des sédiments.

La régression helvétique marque l'arrêt du régime marin.

Au Miocène supérieur, le remplissage du bassin s'achève par des sédiments continentaux d'origine fluviatile, non conservés dans le bassin de Carpentras et le retour de la mer, au Pliocène, marque faiblement cette région, sauf à l'Ouest (Jonquières, Bédarrides, Sorgues) où des argiles et marnes bleues tapissent localement la molasse miocène.

Terrains quaternaires

Pendant les 3 derniers millions d'années de l'histoire géologique régionale, les cours d'eau qui allaient devenir, Rhône, Durance, Lez, Aygues, Ouvèze... ont déposé des masses de cailloutis et de limons disposées en terrasses étagées facilement reconnaissables dans le paysage.

Dans les régions de Montoux, Sarrians, Jonquières, ces alluvions contiennent une nappe phréatique très exploitée pour les cultures maraichères, mais de médiocre qualité (épandage d'engrais, présence de matière organique...).

B - ELEMENTS STRUCTURAUX

C'est localement R. Brasseur (1962) qui, par son étude géologique du massif de Suzette, su le mieux retracer l'ensemble des phases tectoniques ayant affecté le bassin de Carpentras et ses bordures depuis le Crétacé inférieur jusqu'au Pliocène.

- a - phase tectonique embryonnaire anté-valangivienne qui donne naissance à des zones de faiblesse dans le bassin ;
- b - Gargasien - Albien : mouvements tectoniques (bombements, fracturation) peu intenses déjà mentionnés ;
- c - Eocène : phase majeure pyrénéo-provençale induisant des plis de plan axial Est-Ouest ;
- d - Eocène supérieur : intense fracturation Nord-Nord-Est-Sud-Sud-Ouest, ou Nord-Est-Sud-Ouest, à l'origine des panneaux élevés et effondrés parfaitement reconnaissables sous les dépôts miocènes du bassin de Carpentras ;

- e - Post-Oligocène - anté-Burdigalien : 1ère phase
alpine peu intense avec rejeu de plissements et anciennes fractures.
- f - Post-Miocène - anté-Pliocène : 2ème phase
alpine intense provoquant le redressement des différentes assises et le rejeu des fractures et des plis antérieurs.

. Eléments structuraux de bordure

Les différentes unités structurales extérieures au bassin de Carpentras sont :

- a - Le massif diapirique de Lafare-Suzette, extrêmement faillé qui doit son existence d'une part à l'extrusion de sédiments évaporitiques (gypse pour l'essentiel) et d'autre part à un accident crustal dirigé Sud-Ouest-Nord-Est "la faille de Nîmes" que l'on peut suivre de la Catalogne au Pelvoux.
- b - L'anticlinal chevauchant du Mont-Ventoux, structure à plan axial Est-Ouest, déversé en direction du Nord vers la vallée du Toulourenc et la montagne de Bluye.
- c - La retombée occidentale des Monts de Vaucluse qui s'enfonce avec vigueur vers l'Ouest, sous le bassin de Carpentras.
- d - Vers le Sud et le Sud-Ouest, le bassin de Carpentras s'ouvre sans discontinuité en direction de la plaine avignonnaise et cavaillonaise dont les limites sont situées outre Rhône (massif des Angles) ou bien dans le domaine durancien (Alpilles, Montagnes du Luberon).

. Eléments structuraux profonds

Entre le secteur de l'étang de Pujaut et le massif diapirique de Suzette, la faille de Nîmes passe en profondeur sous le remplissage miocène du bassin de Carpentras, selon une transversale Bédarrides -Sarrians- Beaumes de Venise. Naguère, on ne connaissait que très imparfaitement l'importance de cet accident sous le Miocène.

Les travaux de la S.N.P.A.* aussi bien géophysiques que mécaniques (sondages profonds) ont montré que non seulement la faille de Nîmes était caractérisée par un décalage du substratum anté-miocène de 200 m environ, mais que des accidents parallèles et aussi importants existaient vers l'Est.

Ainsi apparaissait clairement un élément structural élevé, le "horst de Loriol du Comtat" bordé de failles majeures.

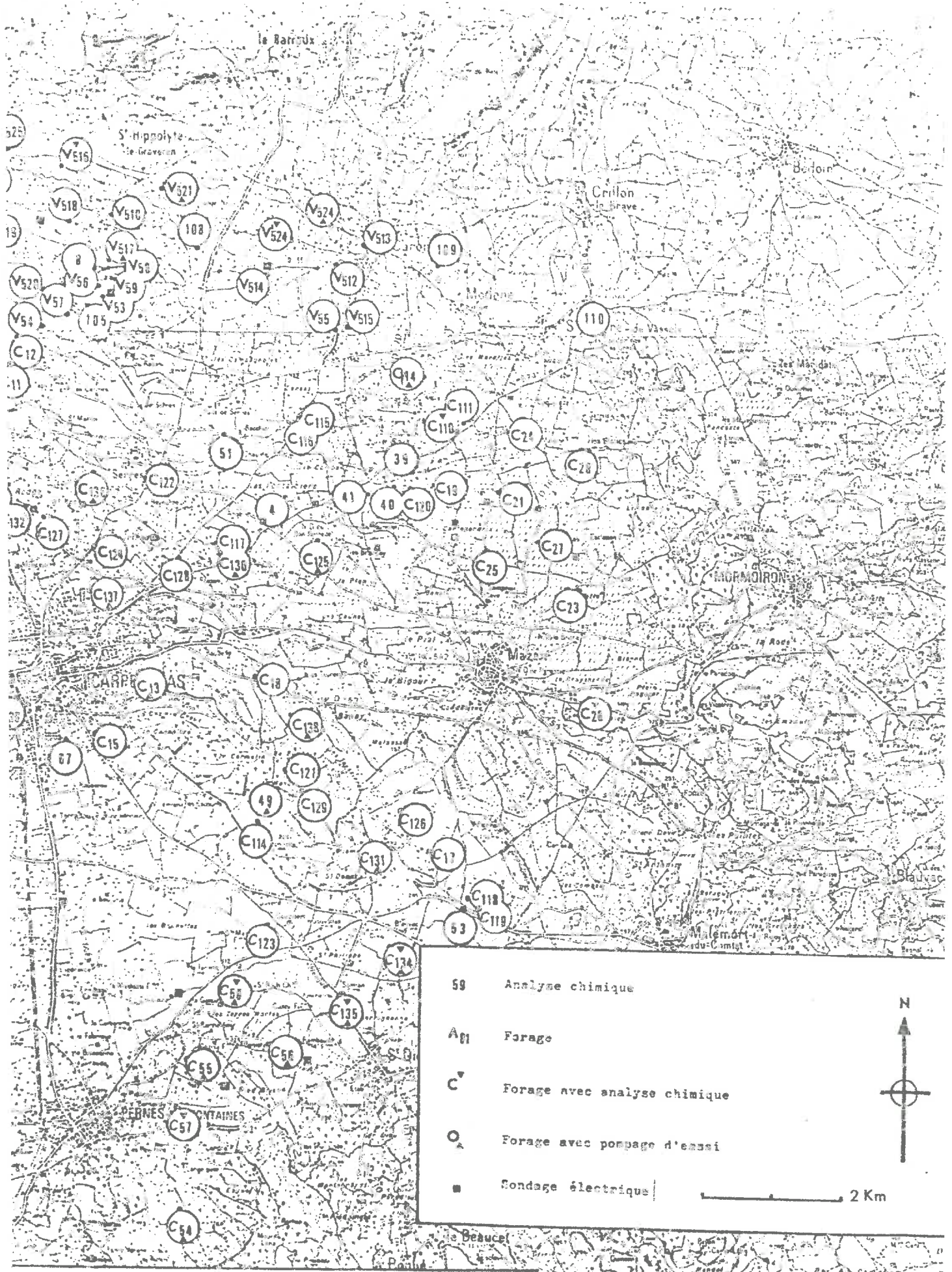
Le sondage de Loriol (DLO 1)** venait alors confirmer ces déductions géophysiques, mais en faisant surgir d'autres problèmes fondamentaux. En effet, le Miocène une fois traversé sur 325 m, la sonde a rencontré directement l'urgonien karstifié et aquifère***.

Ce contact met en évidence une disparition de tous les termes litho-stratigraphiques compris entre l'Urgonien et le Miocène, soit plus de 500 m de sédiments. En quel lieu, et selon quelles modalités structurales, cette épaisseur considérable de sédiments disparaît-elle entre Mormoiron et Loriol ? La réponse est d'importance primordiale car l'alimentation induite par la nappe en charge de l'Urgonien se fait beaucoup plus rapidement si les écrans argileux sont absents.

* S.N.P.A. Société nationale des Pétroles d'Aquitaine.

** AVIGNON n° 4, I.G.N. XXX-41, x = 813,640, y = 199,420

*** La nappe était en charge et débitait au sol, sans pompage, 3 à 4 m³/h, sa minéralisation très faible était de 180 mg/l.



59	Analyse chimique
A61	Forage
C	Forage avec analyse chimique
○	Forage avec pompage d'eau
■	Sondage électrique

2 Km

2 - Carte d'implantation des sondages mécaniques et des sondages électriques

2 - TRAVAUX REALISES DANS LE CADRE DE CETTE THESE

A. LITHOLOGIE

L'essentiel des documents utilisés lors d'une première phase de dépouillement provient des archives soigneusement classées de M. P. Granger, entrepreneur de forages à Aubignan (Vaucluse) que je tiens à remercier une nouvelle fois pour son aide, de même que son père, dont l'accueil fut toujours très cordial.

En effet, depuis plus d'un siècle, le père et le grand-père de M. P. Granger ont tenu à jour des carnets de terrain qui contiennent de très précieux renseignements. Cette entreprise a accumulé des renseignements précieux concernant la succession lithologique et le niveau de l'eau dans les forages, les débits exhaurés, ainsi que les réactions de la nappe aquifère.

Ce contact avec le monde de l'entreprise locale m'a permis de mieux comprendre une certaine terminologie, les techniques de forage utilisées, et enfin de traduire en termes hydrogéologiques une expérience quotidienne de terrain.

Une deuxième phase d'investigations a été rendue nécessaire pour parvenir à une meilleure image du remplissage molassique du bassin de Carpentras. Cela m'a conduit à effectuer des enquêtes auprès des particuliers, démarche dont les résultats ont été décevants (données insuffisantes ou déformées, longueur des recherches...).

La position de tous les ouvrages utilisés est indiquée sur la fig. 2: Sur le millier ayant pu faire l'objet d'un examen, 350, parmi les plus fiables, ont été répertoriés ; leur profondeur varie de 50 à 300 m, mais la majorité d'entre eux ne traverse qu'une partie de la série helvétique ; sans jamais toucher le substratum anté-miocène.

Le langage descriptif utilisé par les différents auteurs des travaux s'est avéré très homogène ; il a permis de mettre en évidence plusieurs catégories de sédiments :

- le saffre jaune (perméable, sableux),

- le saffre jaune argileux,
- le saffre gris (perméable sableux)
- le saffre gris argileux
- = l'argile bleue.

Ce terme de "saffre" désigne localement un faciès, totalement indépendant de notion stratigraphique (Eurdigalien, Helvétien, Tortonien). Il peut même se rapporter à des sédiments aussi variés que des sables plus ou moins consolidés, des marnes sableuses compactées et quelquefois des conglomérats. L'analyse systématique de chaque sondage, puis les synthèses des différentes catégories désignées ci-dessus, conduisent à montrer que les sédiments argileux ou argilo-sableux représentent 58 % de la masse totale du "saffre" helvétien jusqu'à 300 m de profondeur (limite habituelle des forages, due à la puissance des engins utilisés.)

Si l'on considère par ailleurs que certains sables peuvent être cimentés (poronécrose et perte de perméabilité consécutive) il faut ramener à 30 m ou 40 % le volume de la masse réellement perméable. Il est par ailleurs évident que les sédiments aquifères sensu stricto possèdent des coefficients de perméabilité différents, et que leur répartition est loin d'être homogène dans le remplissage du bassin de Carpentras.

A partir des coupes lithologiques (fig. 3 à 6) localisées sur la fig. 7, il a été possible de tracer une carte de répartition des faciès (fig. 7) selon trois catégories :

- secteur où domine le saffre jaune,
- secteur où domine le saffre gris,
- secteur où domine l'argile bleue.

coupe n° II : au centre une zone de saffre jaune séparée par deux discontinuités.

. à l'est entre les forages V515 et V514 (fig.7)

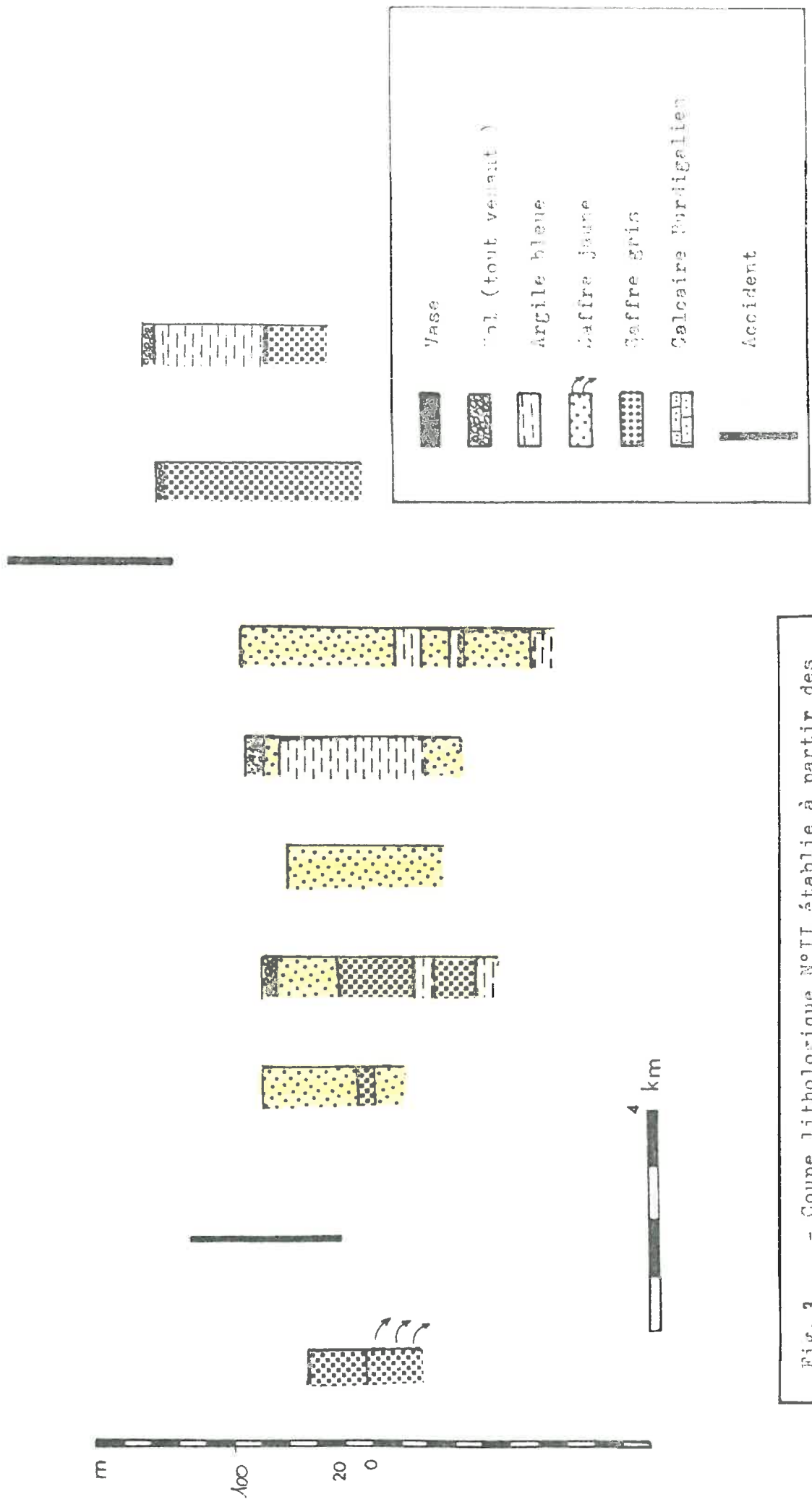


Fig. 3 - Coupe lithologique N°II établie à partir des données de sondages mécaniques

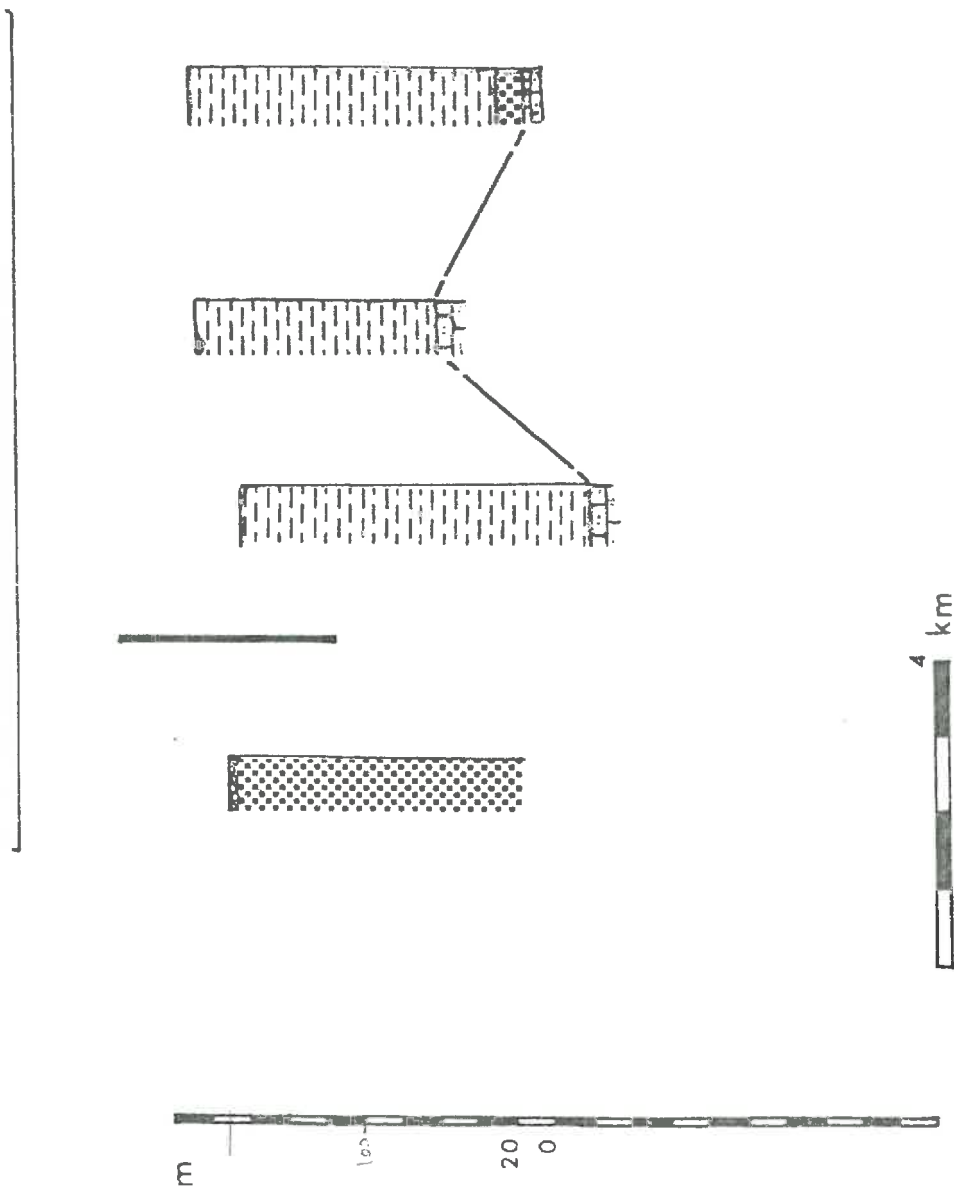


Fig. 5 - Coupe lithologique N°VI établie à partir des données de sondages mécaniques

A'424 A 310 A 313 A 433 A 429 C 121 C 26

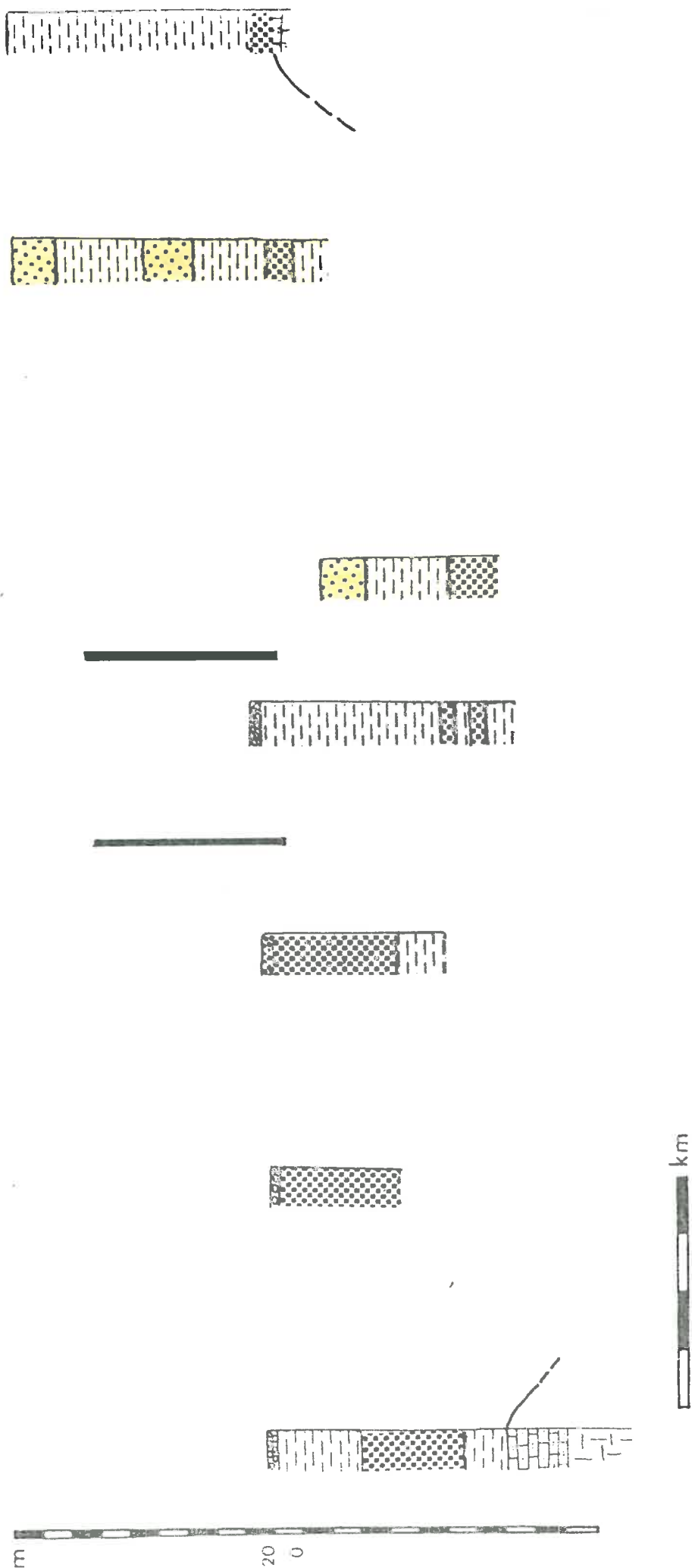


Fig. 6 - Coupe lithologique N°VIII établie à partir des données de sondages mécaniques

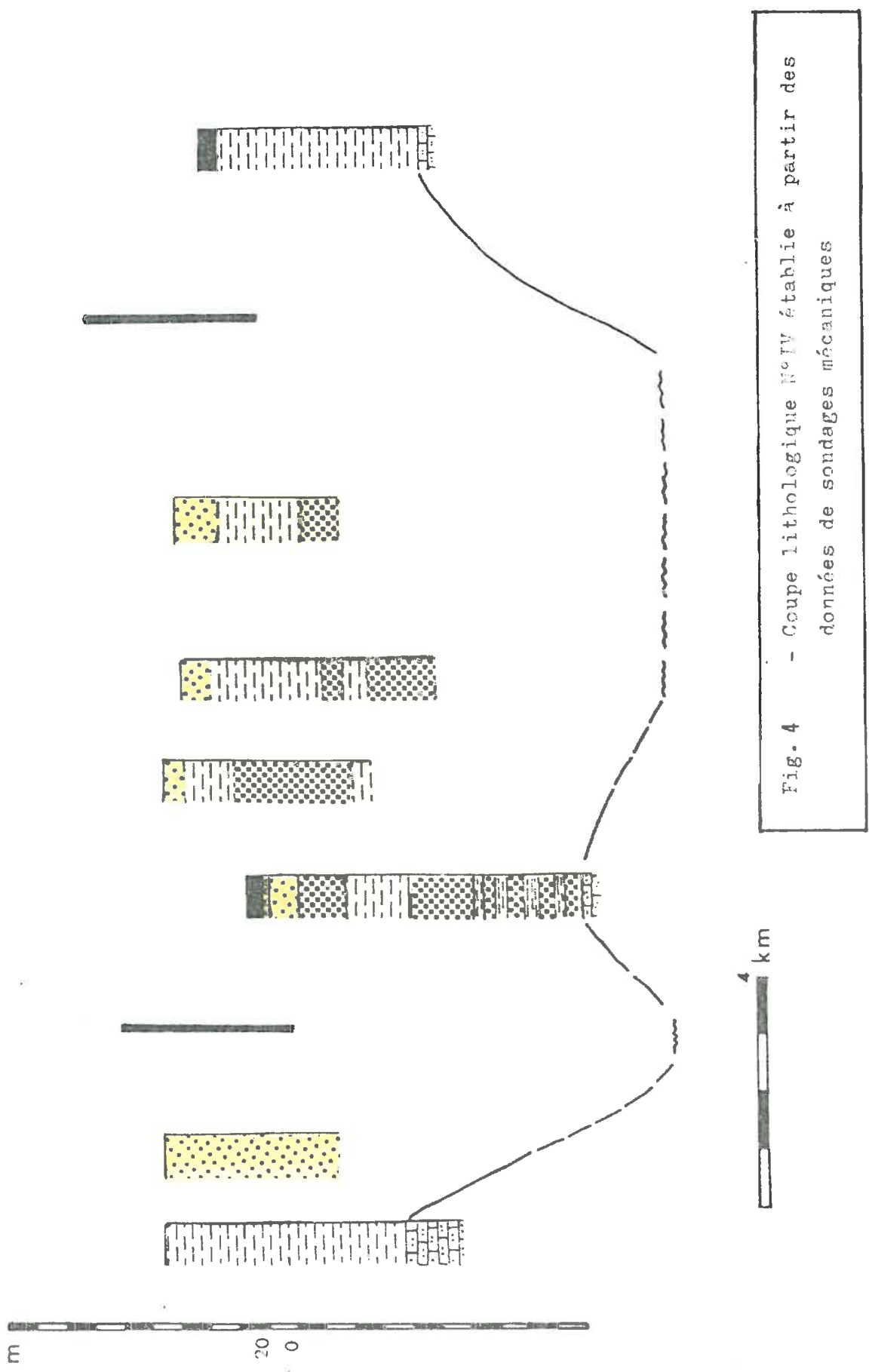
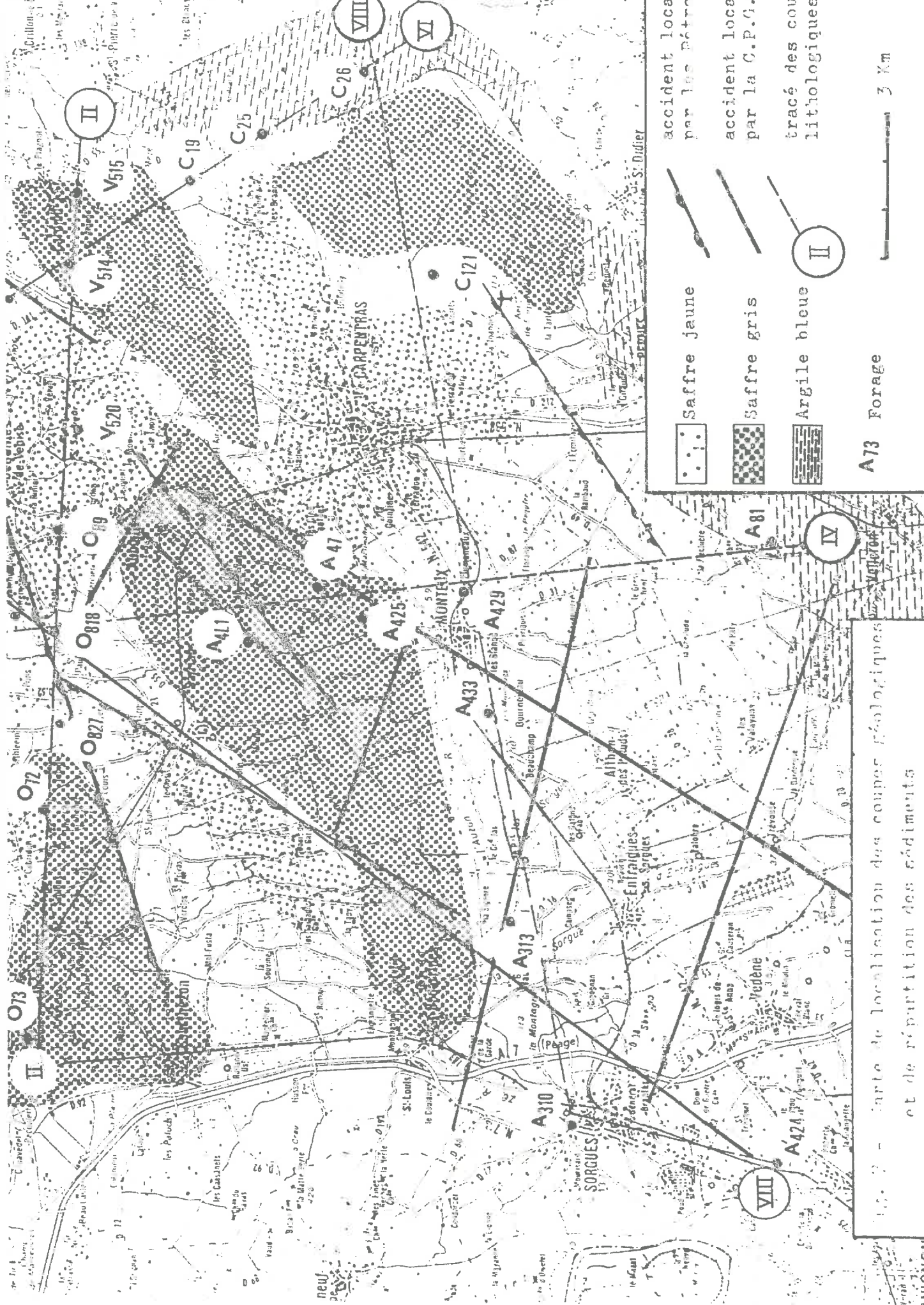
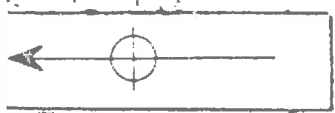


Fig. 4 - Coupe lithologique N°IV établie à partir des données de sondages mécaniques



Saffre jaune
 Saffre gris
 Argile bleue

accident localisé par les pétroliers
 accident localisé par la C.P.G.F.
 tracé des coupes lithologiques

A73 Forage



Carte de localisation des coupes géologiques et de répartition des sédiments

. à l'ouest entre les forages 072* et 075

coupe n° IV : Par la lithologie, il est difficile de distinguer des différences significatives. Par contre, 3 ouvrages situés sur cette même coupe ont rencontré le substratum burdigalien calcaire. Les ouvrages 0835 et A31 appartiennent respectivement aux bordures Nord et Sud du bassin ; la sédimentation y est argileuse (milieu calme de bordure du golfe). Dans le forage 0841, la proportion d'argile est faible ; le sédiment est un saffle gris grossier. Il est donc impossible de relier directement ces trois ouvrages lithologiquement. Cela provient du fait qu'ils sont séparés par des accidents bien identifiés grâce aux travaux de la C.P.G.F.**

coupe n° VI : Au Nord-Ouest, la faille mentionnée dans la coupe précédente semble se prolonger et passe entre V521 et V514. Dans toute la partie Ouest, Nord-Ouest, et Sud-Ouest de Mazan, existe une épaisse série argileuse (100 à 200 m) qui repose invariablement sur un substratum calcaire burdigalien identifié sans ambiguïté grâce à l'examen du micro-faciès en lame mince (forage C19). Dans certains forages situés plus à l'Est, les foreurs indiquent une roche fracturée (?) qui pourrait être du gypse (les analyses chimiques comportent des valeurs allant jusqu'à 1500 mg/l de SO₄). Mais je n'ai jamais eu l'occasion de pouvoir recueillir des "cuttings" provenant de ces ouvrages.

* la numérotation des forages a été faite de la façon suivante : la lettre indique la carte à 1/50 000^e sur laquelle se trouve l'ouvrage (O : Orange ; V : Vaison-la-Romaine ; C : Carpentras ; A : Avignon). Le premier chiffre indique le n° de la feuille à 1/20 000^e ; le 3^e et le 4^e chiffre sont des numéros de recensements (nième forage examiné sur une feuille à 1/20 000^e donnée).

** Compagnie de prospection géophysique française.

coupe n° VIII : Il existe une discontinuité entre A313 et A429, marquée par la réapparition de saffre jaune que l'on identifie également par géophysique.

À partir de la lithologie, il est donc possible de mettre en évidence certains accidents. Cela est bien net pour les accidents majeurs, mais reste hypothétique pour bien d'autres. Je pense qu'une approche structurale plus fine aurait pu être réalisée, à condition de disposer de toutes les données existantes pour chaque ouvrage situé dans le bassin de Carpentras. Ce travail de longue haleine ne pouvait aboutir, car le plus souvent les entreprises de forages ne conservent pas les données. Il faudrait éventuellement les intéresser à de telles opérations.

Grâce à une analyse "sédimentologique" pratiquée sur tous les ouvrages connus, il m'a paru intéressant de calculer les pourcentages de sables, silts et argiles, de tracer ensuite des courbes d'isoteneur, puis de tirer des conclusions sur la sédimentogénèse (sensu lato) afin de mieux percevoir où se trouvent les zones d'épaisseur maximale en saffre gris (très bon aquifère). Le résultat a pu être interprété uniquement dans la zone d'Aubignan, où l'on possède un maximum de données (fig. 9).

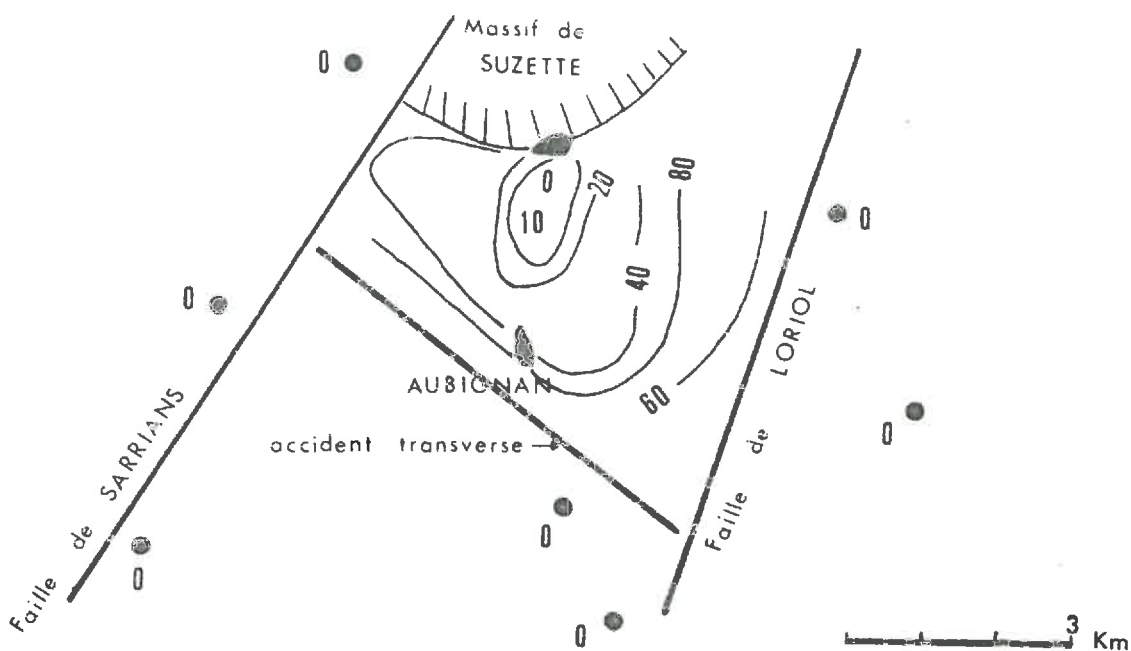


Fig. 9a - Pourcentage de saffre jaune

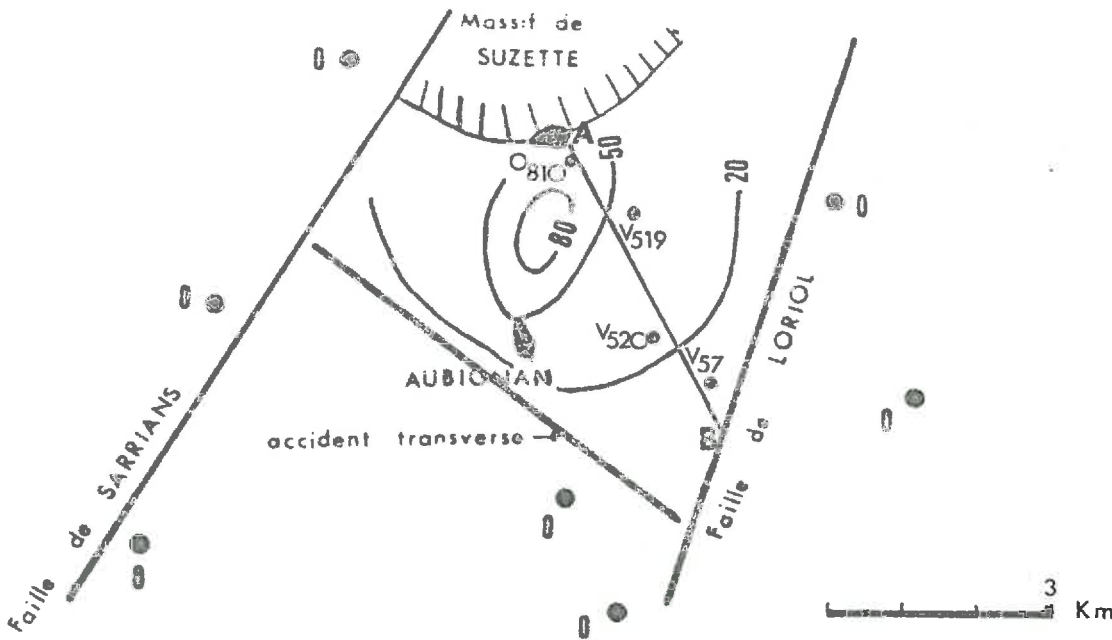


Fig. 9b - Pourcentage de saffre jaune argileux

Dans ce panneau, limité par deux accidents majeurs, existe une aire à sédimentation régulière. Au centre, une zone déprimée a collecté préférentiellement le matériel argileux. Si l'on effectue une coupe AB, on constate une certaine rythmicité du dépôt, qui peut être interprétée comme le résultat de pulsations climatiques mineures, ou comme la conséquence d'une tectogenèse active synsédimentaire.

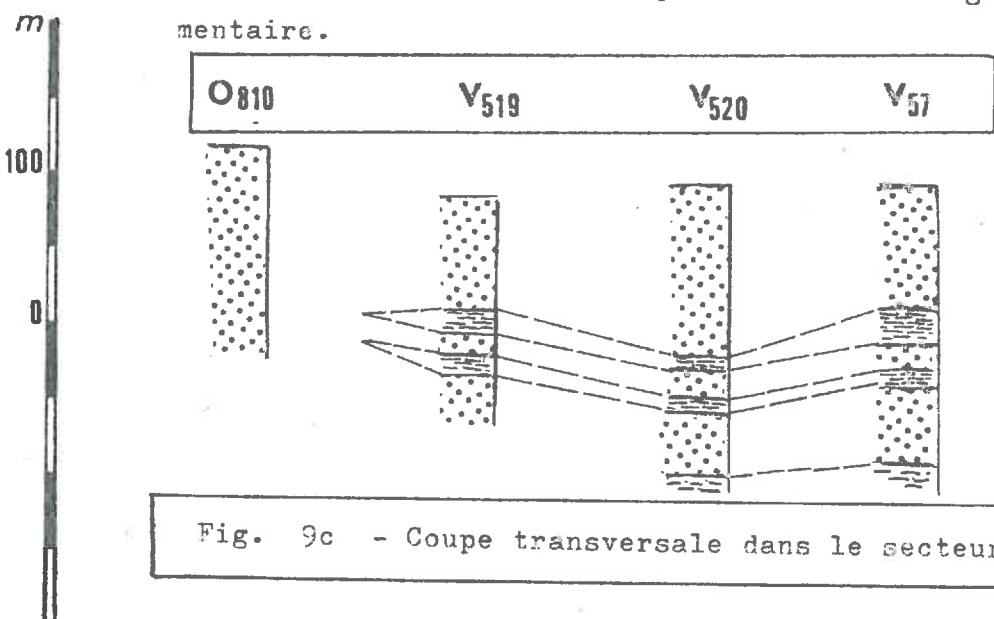


Fig. 9c - Coupe transversale dans le secteur d'Aubignan

Ce qui a pu être réalisé avec succès dans ce secteur a été facilité par la très nette identification du saffre jaune et de l'argile bleue. Mais, entre un saffre gris et un saffre gris argileux, ou une argile bleue silteuse, le passage est souvent très graduel ; obtenir des corrélations intéressant mériterait l'emploi systématique des diagraphies (Gamma Ray, Neutron...).

B - ETUDE GEOPHYSIQUE

Dans le cadre de cette étude 105 sondages électriques de grande longueur de ligne d'émission ($1500 < AB \leq 2700$ m) ont été réalisés par la Compagnie de Prospection Géophysique française.

A) Principe de la méthode

Rappelons brièvement le principe de ces mesures :

On a réalisé des sondages électriques avec le dispositif quadripôle de Schlumberger. On mesure donc la résistivité apparente d'une tranche de terrain de plus en plus épaisse en fonction de l'écartement des électrodes d'émission de courant AB.

L'interprétation des sondages électriques, réalisée dans un premier temps à partir d'abaques a été reprise avec les programmes C.F.G.F. ELECTRA 00 et 05 (CDC 7600 et VAX 11/750). En effet l'interprétation d'un sondage électrique (SE) profond est rendue délicate par plusieurs facteurs :

- non conformité avec les hypothèses de départ : formations homogènes et isotropes, extension infinie, structure horizontale, etc...
- loi d'équivalence qui peut se traduire par la relation : $e \cdot x = \text{constante}$, ce qui veut dire pratiquement que "la réponse électrique" d'une couche de 100 m à $20 \Omega\text{m}$ est la même que celle d'une couche de 40 m à $50 \Omega\text{m}$.
- le rôle de la minéralisation de l'eau contenue dans une formation aquifère qui peut modifier très sensiblement la résistivité d'un même horizon lithologique.
- enfin la nécessité d'un contraste de résistivité suffisant, contraste d'autant plus important que la profondeur du phénomène à identifier est importante.

Dans le contexte géologique local, la méthode a pu être envisagée car le contraste entre le tertiaire globalement conducteur (10 à 50 Ωm) et le substratum crétacé ($\rho \geq 300 \text{ m}$) est suffisant pour conclure même à des profondeurs de l'ordre de 400 - 500 m. De plus la géologie du bassin avec des unités de plusieurs kilomètres permettrait d'envisager une structure homogène à l'échelle d'un sondage électrique.

La série géologique du bassin de Carpentras est, nous l'avons déjà vu, très complexe. Sur le tableau ci-dessous, nous avons schématisé les correspondances entre la stratigraphie, la lithologie et les résistivités électriques.

Quaternaire	alluvions sablo-graveleuses	résistant
Helvétien	sableux	moyennement résistant
	sablo-argileux	" conducteur
	argileux	conducteur
Burdigalien	grès et/ou calcaire	moyennement résistant
Oligocène (Ludien ?)	marneux	conducteur
	gypse	résistant à très résistant
	argile verte	très conducteur
Crétacé	calcaire	très résistant

On a donc cherché d'une part à identifier le résistant profond qui peut être suivant le cas, du gypse oligocène, du Burdigalien ou le crétacé sous le faciès urgonien, et d'autre part à caractériser la nature de l'Helvétien sus-jacent.

B) Etalonnage

Afin d'étalonner ces mesures qui se sont déroulées en plusieurs phases, on a disposé des renseignements suivants :

- forages atteignant le substratum.

Citons particulièrement le forage pétrolier ELO1 (Burdigalien à -245 m) C19 (Burdigalien à -180 m) C25 (Oligocène à -120 m) A ($x = 817,2$ $y = 200,9$ Burdigalien ? à - 170 m) C118 (Burdigalien à 155 m), Forage de Loriol 1 (Burdigalien ? à -250 m) A 418 (rocher à -350 m), A 310 (rocher à -197 m) etc...

- campagne de géophysique S.N.P.A. (1960-1968)

On utilise particulièrement la campagne de 1963 -Sorgues-

- carnet de forage des entreprises locales.

Les figures 8a et b illustrent 2 étalonnages sur les forages Loriol 1 et C118.

C) Résultats des mesures

Dans un premier temps (septembre 1980) on a localisé un profil Est-Ouest du Nord de Carpentras entre Mormoiron et Sarrians afin de tester la validité de la méthode et ses limites. Le résultat de cette phase préliminaire est illustré par la coupe schématique 8c. La reconnaissance a été élargie à l'ensemble du Bassin en juin 1981 et le forage de Loriol 1 ayant confirmé les résultats, une reconnaissance plus détaillée a été réalisée en décembre 1981.

1) Structure du bassin

La figure 8d synthétise les résultats. Il convient de préciser qu'il s'agit là d'une image, le tracé des "accidents" étant fonction de la maille de mesure avec l'indétermination liée à la méthode. Toutefois on constate un très bon accord tout d'abord avec les documents pétroliers en ce qui concerne les "accidents" majeurs : faille de Sarrians et faille de Loriol-Montoux et avec l'interprétation sur l'épaisseur de la série miocène.

C.P.G.F

DIAGRAMME DE SONDAGE ELECTRIQUE

solution ELECTRA

courbe électrique de terrain

courbe reconstituée

substratum

coupe lithologique

zone de captage

Fig. 8 a Corrélations entre la coupe lithologique (A41I) et le sondage électrique (9 ter)

longueur de ligne
AB (mètres)
2

2 3 4 5 6 7 8 9 10

2 3 4 5 6 7 8 9 10²

2 3 4 5 6 7 8 9 10³

ETALONNAGE

ivité en cm^2/m

SONDAGE: SE I

CHANTIER: CARPENTRAS

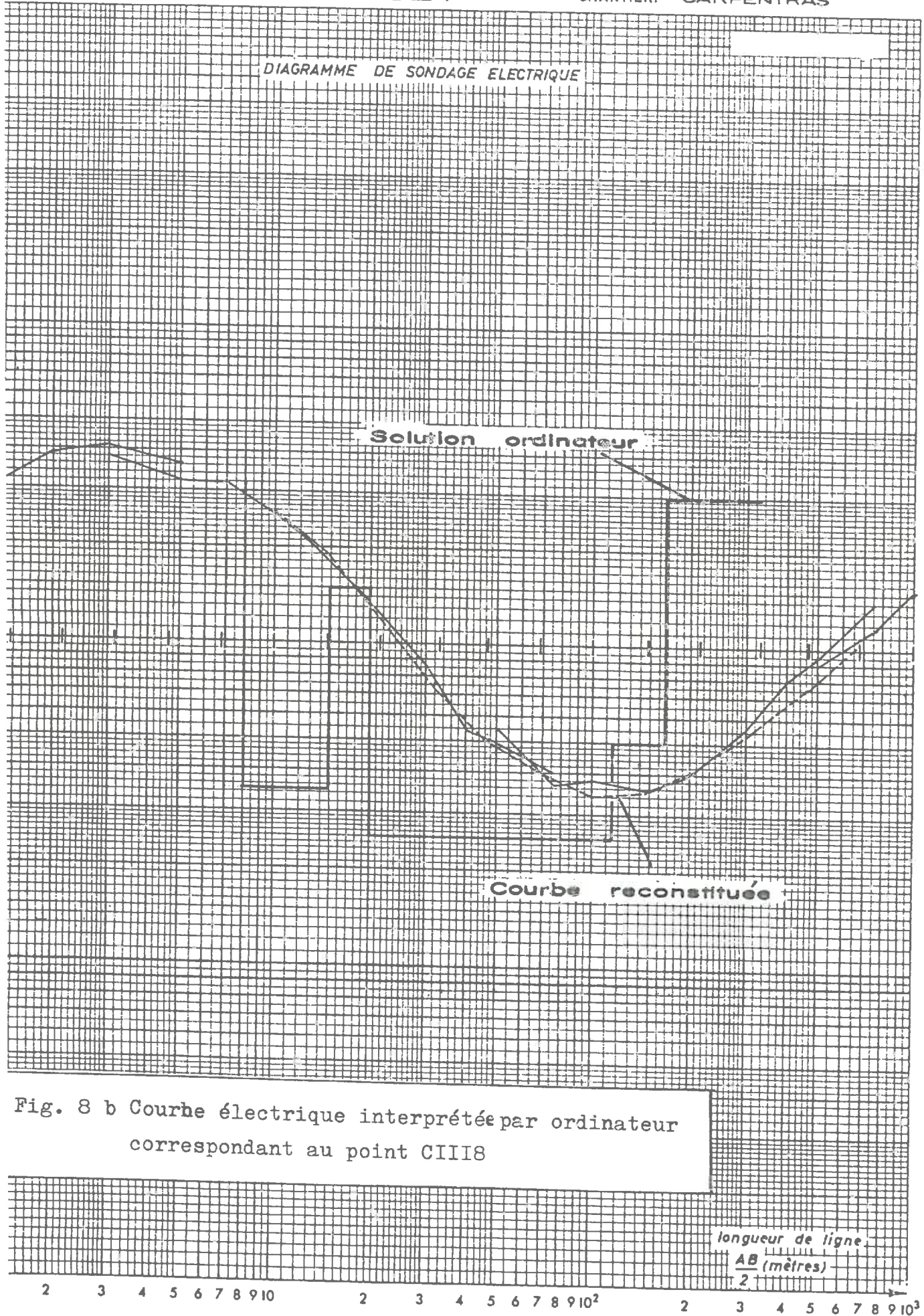


Fig. 8 b Courbe électrique interprétée par ordinateur correspondant au point CIII8

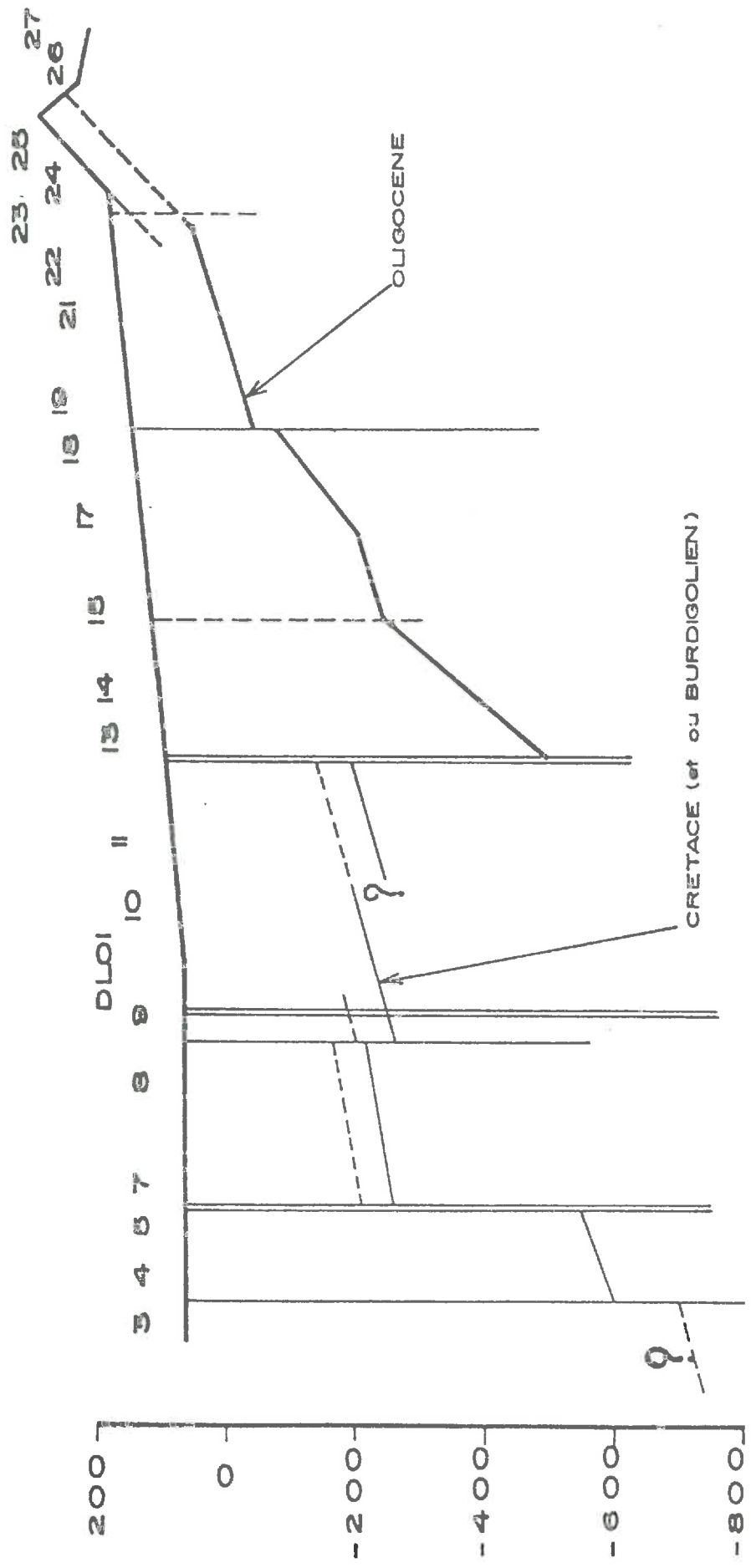


Fig. 8 c Coupe stucturale très schématique

ECHELLES- h=1/100 000
v=1/10 000

La structure du bassin semble conditionnée par l'existence d'un système d'accidents NE-SO (N-50°).

Ce système est associé à des accidents sensiblement E-O dans le secteur occidental de la zone étudiée, en passant à NO - SE dans le secteur oriental. Ces accidents limitent des panneaux dans le substratum anté-helvétien. On emploiera à dessein le terme "accident" car il ne s'agit pas forcément de failles mais de décrochements brutaux de la topographie anté-miocène : faille, falaise d'érosion, flexure...

On peut ainsi définir d'Ouest en Est (cf. figure 3d)

a. le panneau Sorgues-Bédarrides

avec un fort plongement en direction du N-NE : la profondeur du substratum passe de 200 m environ à Sorgues à plus de 600 m à l'Ouest de Sarrians. Ce panneau est limité à l'Est par l'accident de Sarrians.

b. le panneau Entraigues - Loriol

Cette unité est plus complexe et on peut différencier 4 ensembles limités par des accidents est-ouest :

* au nord : la zone de Loriol est relativement "haute" avec remontée du substratum vers le N-NE et un accident secondaire à Loriol même.

* au centre : un bloc relativement bas avec des profondeurs de 300 à 400 m.

Plus au Sud le panneau d'Entraigues avec semble-t-il une structure basculée en direction du N-E le substratum passant de près de 100 m au SE à plus de 600 m au NE.

et enfin au Sud, le panneau de Vedène, compliqué par un accident NE-SW à l'Ouest même de Vedène mais caractérisé par une forte remontée du substratum.

c. le panneau de Carpentras-Montoux

On est en présence d'un ensemble assez dissymétrique avec un secteur à fort plongement vers l'Ouest au Nord de Carpentras. Limité au Nord par un accident probable mais non vérifié, on trouve le secteur de Montoux avec une zone profonde au Sud de la ville et une remontée rapide en direction Sud vers St-Saturnin.

d. le panneau Mazan-Pernes

où le substratum résistant (ici l'Oligocène) remonte rapidement. Il semble malgré tout exister 2 ensembles séparés par une faille NO-SE (elle affecte le substratum crétacé au Nord de Fontaines-de-Vaucluse), l'ensemble nord étant plus profond que l'ensemble sud. Cette structure a été précisée lors de la phase de détail dans le panneau limité par la faille de Sarriens et faille de Loriol (fig. 8e).

2) Implications hydrogéologiques

a. Corrélation entre la coupe lithologique du forage de Loriol et le sondage électrique 9 ter.

On a représenté sur la figure 8a le sondage électrique 9 ter avec son interprétation automatique issue du programme S.P.C.F. Electra et la coupe lithologique décrite précédemment.

On observe les correspondances suivantes :

- le 1er aquifère représenté dans la lithologie par les sables jaunes compris entre 15 et 34 m correspond avec un certain décalage à un horizon électrique interprété à $45 \Omega m$ compris entre 22 et 42 m.
- le 2ème aquifère compris entre 46 et 85 m figuré dans la lithologie par des sables gris correspondant à une zone à $40 \Omega m$ de 52 à 76 m.
- le 3ème aquifère compris entre 120 et 177 m doit être mis en relation avec l'horizon à $30 \Omega m$ compris entre 122 et 150 m.
- le substratum calcaire Burdigalien est situé rigoureusement à 250 m de profondeur avec une résistivité $\geq 150 \Omega m$.

Compte tenu des conditions pratiques de la mise en oeuvre de la prospection électrique (longueur de ligne importante 1500 m ; variations latérales des horizons...), la corrélation entre la lithologie du forage Loriol n° 1 et la coupe probable prévue par l'interprétation électrique est très satisfaisante.

b. carte d'isorésistivité

On a donc cherché à élargir ces résultats à l'ensemble du panneau situé à l'Ouest de la faille de Loriol. On a utilisé pour cela des cartes d'isorésistivité. En effet, toute remontée ou approfondissement du substratum, ou toute variation importante de faciès au sein des horizons miocènes vont se traduire, sur le diagramme du sondage électrique, par des variations de la résistivité apparente du sondage pour une longueur de ligne d'émission $\frac{AB}{2}$

judicieusement choisie.

On a adopté ici 2 longueurs de ligne $\frac{AB}{2} = 200$ m, et $\frac{AB}{2} = 500$ m,

et déterminé, pour chaque diagramme électrique, la résistivité apparente correspondante.

Les courbes d'isorésistivité sont établies par interpolation entre chaque point. Cette façon de procéder, purement objective, reste sommaire et qualitative. Elle permet cependant de dégager des grandes entités qu'il convient ensuite d'interpréter en fonction des profondeurs calculées, des critères morphologiques et de la structure géologique régionale.

La carte 8d illustre le résultat de ce traitement.

- courbe d'isorésistivité par $AB/2 = 500$ m.

On a souligné les secteurs où la résistivité apparente est inférieure à $50 \Omega m$. En effet une valeur de cet ordre peut être liée à 2 phénomènes :

- . soit un substratum résistant "haut"
- . soit un ensemble tertiaire profond résistant donc à priori de bonne qualité hydrogéologique.

La comparaison de cette carte avec la carte structurale permet de trancher entre ces 2 solutions. Par exemple, le secteur de Corgues et celui entre Aubignan et Loriol correspondent à un substratum haut, alors que la zone au Nord d'Entraigues où le substratum est profond, correspondrait plutôt à un secteur où le Miocène est très sableux donc plus résistant.

- courbe d'isorésistivité par $AD/2 = 200$ m

Cette courbe traduit bien la qualité globale du Miocène sur les 100 à 200 premiers mètres, soit les profondeurs les plus courantes pour les forages de cette région. On a souligné les plages où la résistivité apparente pour cette longueur de ligne est supérieure à 30 Ω m. En effet ceci implique une résistivité moyenne du "saffre" supérieure ou égale à cette valeur. Rappelons que les formations aquifères captée a été interprétée à 30 Ω m.
On peut donc penser que les résistivités de 30 Ω m au moins correspondent à des horizons hydrogéologiquement intéressants.

Remarques :

On peut cependant faire un certain nombre de réserves :

Cette interprétation ne tient pas compte du rôle de la minéralisation de l'eau. Une eau plus minéralisée (en sulfate par exemple) fera baisser la résistivité globale de l'aquifère pour une qualité hydrogéologique similaire

Le tracé des courbes a été interpolée entre les sondages électriques dont l'écartement est souvent important.

Une même valeur de résistivité apparente peut correspondre à plusieurs schémas géologiques en fonction du type de courbe électrique dont elle est tirée.

5 - CONCLUSIONS PARTIELLES

A partir du schéma structural qui montre une série de panneaux élevés ou effondrés sur lesquels se calque assez facilement la lithologie dans la zone NE du bassin (avec plus d'incertitudes dans la zone Sud-Est), il est possible de donner une série de conclusions sur la sédimentation miocène dans le bassin de Carpentras.

1). Un examen de surface des collines comtadines ne pouvait permettre à l'observateur d'élaborer un modèle structural cohérent. La connaissance de la direction des accidents majeurs, grâce aux investigations géophysiques, offre la possibilité de mieux interpréter certains dispositifs de surface ou de subsurface, en particulier après dépouillement des sondages.

- zone à l'Ouest d'Aubignan : sédiment molassique dur de couleur jaune, gréseux avec une forme particulièrement abondante : pectens, bryozoaires, dents de squales... Nous avons là un sédiment de plateforme ; il s'agit du faciès d'ensablement défini par G. Demarcq (1970, p. 224).

- à l'Ouest de Caromb : la sédimentation passe plus ou moins graduellement d'un pôle siffre gris et à un pôle argile bleue, qui traduit des conditions de milieu très différentes, sans doute plus profondes. De manière générale, il existe une tectogenèse post-burdigalienne et anté-helvétienne, donc typiquement intra-sédimentaire dans les bassins miocènes qui entourent les reliefs vauclusiens tel que le Mont-Ventoux, et le massif de Suzette. Ce phénomène est responsable de la répartition différentielle des sédiments helvétiques "molassiques" ; les secteurs effondrés se comportent comme des réceptacles de matériaux fins, essentiellement argileux, tandis que les panneaux élevés, comme le très typique horst de Loriol, vraisemblablement balayés par des courants, ne conservent que les fractions sableuses et zoogènes.

2). Les dépôts de saffre gris ou de saffre jaune ne résultent pas d'une différence constitutive, mais d'une différence liée à la répartition spatiale. Là encore, interviennent les paléostructures miocènes. Ces sédiments peuvent être l'un et l'autre de très bons aquifères. Ils montrent les mêmes courbes granulométriques et possèdent les mêmes proportions de calcaire. Une seule chose les sépare :

- le saffre jaune est oxydé tandis que le saffre gris ne l'est pas.

On ne peut envisager une oxydation de la série sous l'effet de la circulation de l'eau, car le saffre jaune et le saffre gris sont porteurs du même aquifère et caractérisés par de semblables perméabilités.

L'hypothèse émise est la suivante :

- le saffre jaune résulte d'une oxydation au moment même du dépôt
 - . soit par la lenteur du phénomène de sédimentation (panneau haut, stable, subsidence faible ou nulle) ;
 - . soit par les qualités très oxydantes du milieu marin (panneau balayé par les courants, ne subissant aucun confinement). Cette éventualité est en fait liée à la première car un panneau haut a beaucoup plus de chance d'être soumis à l'influence des courants.

Cela est vérifié dans la zone d'Aubignan, panneau élevé armé de saffre jaune, qui pourrait être facilement balayé par les courants, car il domine à l'Est et à l'Ouest des zones plus basses.

- le saffre gris s'est déposé en milieu réducteur ; sa vitesse d'enfouissement a été suffisamment rapide pour éviter l'oxydation du sédiment.

Nous connaissons certaines séries d'argile bleue analogue à celles du bassin de Carpentras qui ont une teneur en Fe_2S_3 , importante résultat d'une évolution diagénétique en milieu réducteur. Nous verrons ce qu'il en est dans le chapitre consacré à l'hydrochimie.

Dans ces zones particulièrement calmes où les apports détritiques proviennent de l'arrière pays émergé, la répartition des sédiments est fonction de la vitesse et de l'orientation des courants ainsi que de la position des seuils déterminant des zones abritées

La fig. 10 très schématique indique quel pourrait être le mode de répartition des sédiments à l'Helvétien.

Ces matériaux détritiques ne paraissent pas provenir de l'Est. On ne trouve aucun conglomérat comparable à ceux de Nyons, mis en place il y a 12 Millions d'années par le paléo Aygues.

Les arrivées se faisaient par l'axe rhodanien, par l'Ouvèze ou par l'Aygues. Cette couverture au Nord est très nette ; nous le vérifierons plus tard par l'examen de la carte piézométrique.

Les courants ont redistribué ces particules dans le "golfe de Carpentras" ; c'est pourquoi on retrouve sur toute la bordure du bassin une épaisse couche d'argile bleue (150 à 200 m).

Au Sud, les quelques forages qui existent semblent traverser la série argileuse ce qui semble indiquer une fermeture du bassin matérialisée également par la carte piézométrique.

Au Centre, la répartition est impossible à ordonner, la morphologie est celle de lentilles épaisses de 5 à 50 m, très allongées se relayant horizontalement et verticalement. La nappe aquifère du bassin de Carpentras est donc cloisonnée par des alternances de coupes détritiques (sables, sables argileux, marnes) mais aucune discontinuité ne tient compte de l'homogénéité globale du système.

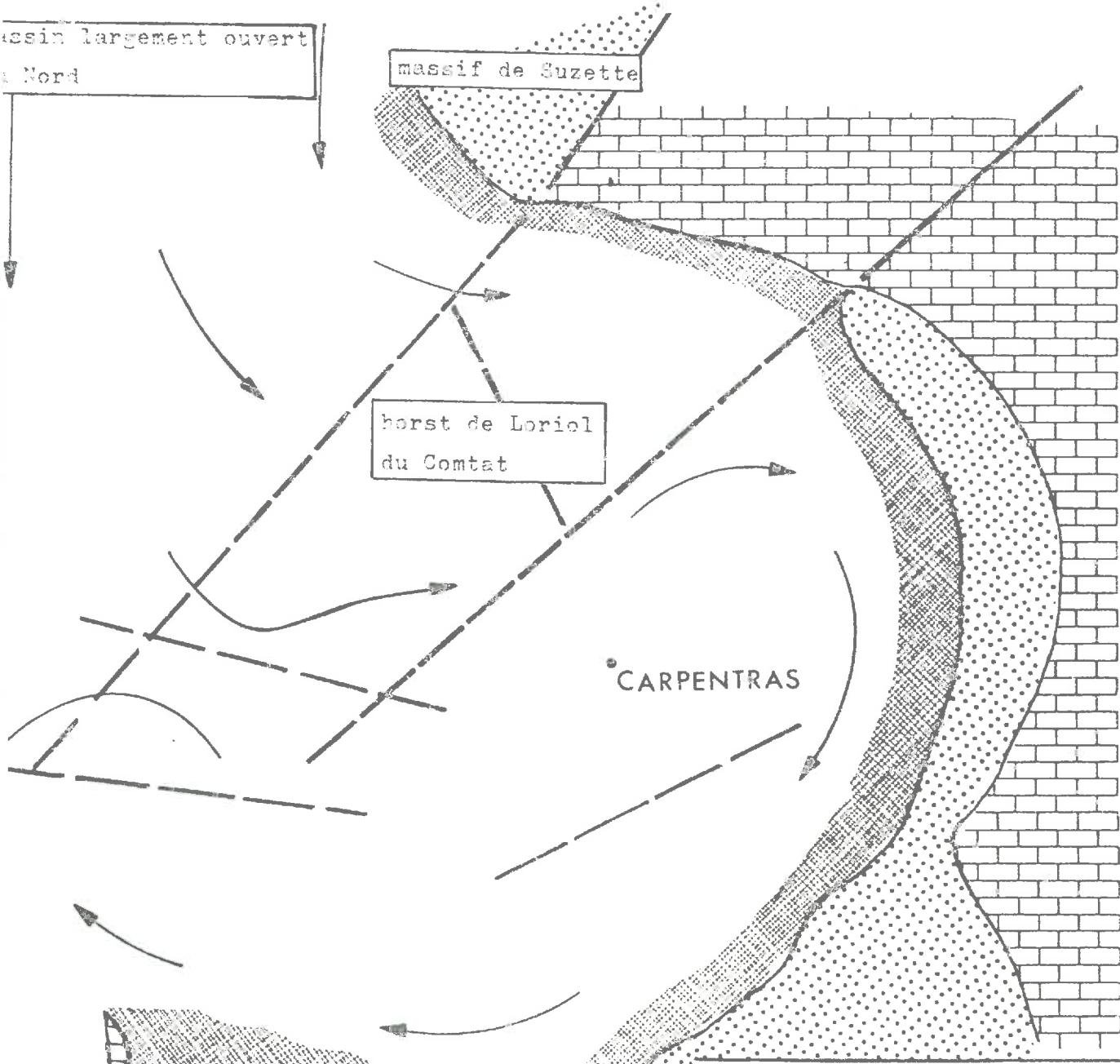
3). La répartition du sédiment se fait différemment suivant chaque panneau. Les zones basses recouvrent plus de particules détritiques. Alors intervient le phénomène de subsidence : si la zone est instable, limitée par faille, la surcharge va entraîner un réajustement tectonique. On peut penser qu'il y a reprise des anciens accidents durant tout le Miocène. Autre fait qui confirme cette hypothèse : dans tout le bassin on trouve de nombreuses figures de courants, ou encore des slumpings (écoulement gravitaire d'un sédiment peu consolidé)

massif largement ouvert
à Nord

massif de Suzette

horst de Loriol
du Comtat

CARPENTRAS



Calcaire Urgonien



Sédiment ante Miocène



Auréole argileuse



Accident



ligne de courant
hypothétique

?

?

?

Fig. 10 - Schéma hypothétique des paléocourants pendant le Miocène

4). La phase alpine majeure, fini-miocène, entraîne un relèvement de la série helvétique, visible sur les bordures du bassin (pendage de 20 à 30° entre Aubignan et Vacqueyras).

5). Quelques forages en bordure du bassin ont rencontré le substratum (voir localisation fig. 2).

C19 : après 120 m de marnes bleues, calcaire burdigalien.

A 81: après 155 m de marnes bleues, s'intercale une lentille de saffre (0,5 à 1 m) puis on rencontre le calcaire burdigalien (faciologiquement identique à C 19).

0815: après 155 m de marnes bleues, l'outil a traversé une lentille de saffre (1 à 3 m) puis 50 m de calcaire burdigalien non fissuré.

DLC1: forage pétrolier - après 250 m d'alternances (argile-saffre) la sonde a recoupé le calcaire burdigalien sur 80 m, puis elle a touché l'Urgonien.

Le passage graduel d'un Burdigalien à faciès calcaire à un Burdigalien à faciès marneux entre la bordure et le coeur du bassin indiqué par G. Demarcq (1970, p.133) ne semble pas être vérifié. On peut même supposer que l'intercalation de saffre que l'on retrouve dans les forages A81 et A835 à la base de la série argileuse correspond au début de la transgression helvétique.

Il existe une exception dans la zone de Pernes-les-Fontaines, où le Burdigalien calcaire n'a pas été retrouvé en forages. Voici la lithologie pour des différents forages de ce secteur (voir la localisation fig. 2).

C 58: 220 m de marnes bleues et vertes.

C'58: 180 m de marnes grises

40 m de saffre vert (interprété comme du Burdigalien mais sans engagement faunistique).

C134: 158 m d'argiles grises plus ou moins sableuses, reposant sur des calcaires beiges avec lignite (Oligocène).

C135: 229 m d'argiles grises plus ou moins sableuse ensuite argile grise bariolée (Oligocène) puis calcaire à lignite (Oligocène).

C 57: 170 m d'argile bleue, puis 3 m de "roches" et 15 m de sables blancs (Oligocène).

A partir de toutes ces coupes, il apparait difficile dans autres renseignements que la lithologie (analyses de faune, de minéraux lourds) de dire si le Burdigalien existe sous une forme argileuse ou s'il y a lacune de sédimentation.

On ne retrouve de toute façon aucune discontinuité dans les séries argileuses pouvant suggérer un début de transgression helvétique.

6). Sur la carte de répartition des sédiments (fig. 9) on s'aperçoit que le saffre jaune envahit tout le bassin de Carpentras à la fin de l'Helvétien, ce qui avait permis à G. Demarcq de supposer que tout le bassin était comblé de saffre jaune. On peut donc penser qu'à la fin de l'Helvétien, le bassin avait acquit une certaine stabilité

HYDRODYNAMIQUE

1. HYDROCLIMATOLOGIE

A - RESEAU DE MESURES ET CRITIQUES DES DONNEES

La station météorologique de Serres - Carpentras par son directeur, a mis à notre disposition le recueil des données climatiques du département de Vaucluse.

Sur le tableau ci-dessous sont notés les stations prises en compte, les paramètres mesurés et le nombre d'années de mesures.

Stations	Carpentras	Orange	St-Christol	Sault
Altitude (m)	39,3	53	829,4	790
Précipitations	x	x	x	x
Température	x	x	x	x
Rayonnement	x	x	-	-
Insolation	x	x	-	-
Evaporation	x	x	-	-
Vent	x	x	x	x
Mise en fonction	1964	1952	1971	1961
x : Paramètre mesuré		- : Pas de mesure		

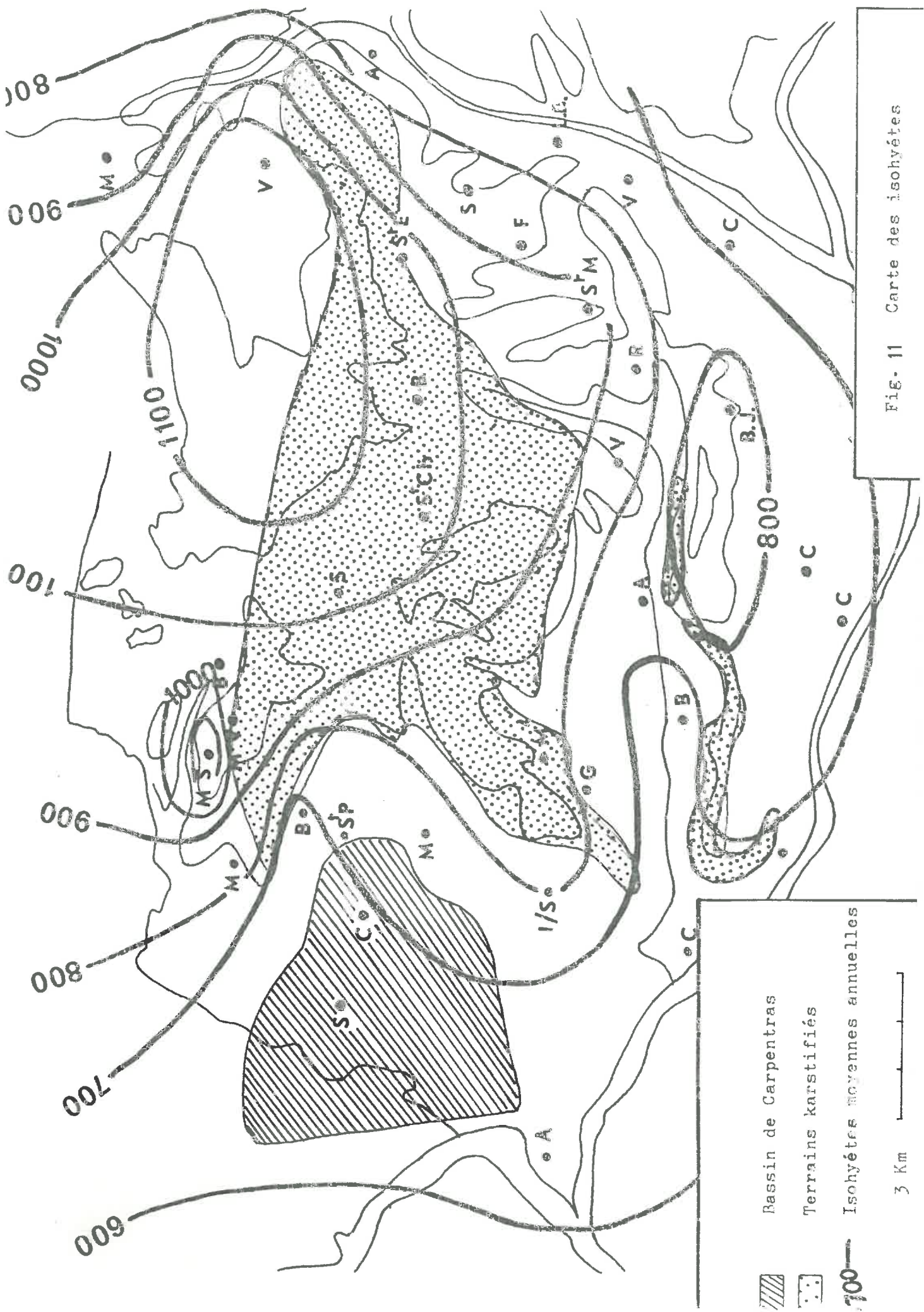
Les résultats seront beaucoup plus précis pour les stations situées sur le bassin de Carpentras (ou l'on possède tous les paramètres) que pour celles localisées sur les Monts de Vaucluse.

B - PLUVIOMETRIE

La carte des isohyètes (fig.11) laisse apparaître une zone de forte pluviosité sur le plateau de Vaucluse, le Mt Ventoux, la Montagne de Lure et le Luberon. Les isohyètes s'incurvent et dessinent dans leurs contours la forme générale du relief.

Sur le tableau qui suit sont notées quelques informations concernant la pluviosité dans le département.

Stations mètre	Carpentras 66-75	St-Christol 71-75	Sault 61-75	Orange 56-75
Altitude (m)	99	829	790	53
Janvier	39,1	108	78	40
Février	59	132	102	64
Mars	47	96	66	70
Avril	50	100	71	54
Mai	61	86	73	60
Juin	59	80	74	56
Juillet	25	61	41	26
Août	43	53	59	64
Septembre	75	105	100	96
Octobre	74	90	84	77
Novembre	61	76	104	66
Décembre	47	124	82	58
Janvier	640	1112	1009	696
Total des précipitations 1981 (mm)	511,1	915	840	570
Écart 1981/ rapport à la moyenne	-21 %	-18 %	-17 %	-19 %
Nombre de jours pluvieux	78	101	91	90
Nombre de jours secs	2	20	12	4



Bassin de Carpentras

Terrains karstifiés

Isohyètes moyennes annuelles

3 Km

Fig. 11 Carte des isohyètes

Remarques :

Le bassin de Carpentras reçoit entre 650 et 750 mm/an.

Les Monts de Vaucluse entre 1000 et 1100 mm/an.

L'année 1981 a été marquée par un net déficit pluviométrique; il fluctue selon les stations entre 17 et 21 %.

C - EVAPORATION - EVAPOTRANSPIRATION - DEFICIT D'ECOULEMENT

1. Evaporation :

C'est le pouvoir évaporant de l'atmosphère. Il est mesuré à l'aide de l'évaporomètre Piche. Pour l'année 1981, à la station de Carpentras, nous obtenons les valeurs suivantes :

MOIS	F	M	A	M	J	Ju	A	S	O	N	D	J	Total
1ère décade	x	11,6	17,9	34,1	38,1	39,1	45,2	31,2	19,6	x	x	x	
2ème décade	x	19,3	25,6	18,6	57,2	54,7	43,3	30,2	18,4	x	x	13,8	
3ème décade	x	16,2	20,2	26,1	40,0	43,7	52,5	28,3	21,1	x	x	x	
TOTAL		47,1	63,7	78,8	135,3	137,5	141	89,7	59,1	-	-	-	752,2
Valeur de l'évaporation en mm par décade													

L'évaporation est largement supérieure aux précipitations.

2. Facteurs influents :

- température : les valeurs sont données pour les différentes stations.
- rayonnement global (Rg : en Joule/cm² - Paramètre mesuré).
- insolation (Ig : en heures - Paramètre mesuré)
- le vent joue un rôle très important dans le Sud-Est de la France, mais il est difficile de mesurer ses effets quantitativement.

3. Evapotranspiration et déficit d'écoulement :

a. Méthodes de calcul

Le plus souvent, méthodes expérimentales faisant intervenir tous les paramètres simultanément : vent, Ig, Rg,...

Méthode		Orange	Carpentras	St-Christol	Sault
TURC 1	T	x	x	x	x
TURC 2	T	x	x		
	Ig	x	x		
BROCHET	Rg	x	x		
GERBIER	Ep	x	x		
PENMAN	Ig	x	x		
	Rg	x	x		
	Vent	x	x		

TURC 1
$$E.T.P. = \frac{P}{0,9 + P^2/L^2} \quad L = 300 + 25 T + 0,05 T$$

TURC 2
$$E.T.P. = 0,40 \cdot \frac{t}{t+15} (I_g + 50) \quad I_g = I_gA (0,18 + 0,62 \frac{h}{H})$$

Pour les stations situées sur le bassin, on utilisera préférentiellement TURC 2 ou PENMAN car sur un plan strictement climatologique et au niveau d'une région telle que le Sud-Est de la France, ces formules permettent d'approcher la référence "E.T.P." dans une marge de 10 % (B. Seguin).

b. Résultats

- Carpentras - Méthode de TURC 2
- Orange - Méthode de PENMAN
- Sault - Méthode de TURC 1
- St-Christol- Méthode de TURC 1

Fig. 12 (station de Carpentras)

L'excédent disponible est en moyenne de 25 mm/an. L'année 1981 est excédentaire de 3 mm, quand on sait que la marge d'erreur peut atteindre 10 %, il n'est pas possible dans cette région d'envisager l'alimentation de la nappe par les précipitations.

CARPENTRAS	J	F	M	A	M	J	Ju	A	S	O	N	D	
P. (mm)	18,2	23,19	34,03	84	102,7	154,4	155,5	144,5	91,17	55,60	32,60	16,02	1981
	22,77	31,80	54,10	88	120	143,7	162,5	140	95	57,50	31,30	20,60	Moyenne
Evap (mm)	25,10	8,8	56,70	40	65,9	36,4	23,70	3,0	103,4	36,0	2,2	110,1	1981
	52,10	68,7	57,80	64,0	66,7	58,6	28,70	40,5	86,50	67,20	51,20	53,90	Moyenne
Excédent	29,5	36,9	3,7	-24	-53,3	-85,1	-133,8	-99,5	-8,1	+10	+20	+33,3	
Evap (mm)	100	85,6	88,3	44,3	7,3	0	0	0	+12,3	0	0	+94	1981
(.U.)	+84	100	100	76	23	0	0	0	0	+10	+30	+54	Moyenne
Evaporation		-14,4	+2,7	-44	-37	-118			+12,3	-19		+94	1981
(mm)	+30	+37		-24	-53	-85				+10	+20	+24	Moyenne
Excédent ou	2,9												1981
Evaporation	0	21	4										Moyenne
Excédent 1981	Total annuel = 3 mm												
Excédent moyenne	Total annuel = 25 mm												

Fig. 12 Calcul de l'eau disponible (Moyenne - Année 1981)
(Méthode de TURC - THORNTHWAITE).

- Fig. 13 - Station d'Orange.

La valeur moyenne de 34 mm/an s'accorde assez bien à celle trouvée pour Carpentras-Serres. Il y a donc une bonne corrélation entre les formules de TURC et de PENMAN.

- Fig. 14 - Station St-Christol-Sault

Le réseau d'équipement du secteur Ventoux-Lure ne recueille que températures et précipitations. L'E.T.P. calculée à partir des abaques de TURC reste très approximative. A cela s'ajoute la présence de terrains karstifiés où l'infiltration est immédiate; de ce fait, nous obtiendrons une valeur d'E.T.P. surestimée.

4. Eaux utilisables

Le bassin de Carpentras a une surface de 350 km² ce qui donne pour des précipitations de 30 mm/an, un volume de :

$$V = 0,030 \times 350 = 10.10^6 \text{ m}^3/\text{an}$$

Les Monts de Vaucluse, pour une surface de 1 230 km², ont un excédent avoisinant les 500 mm :

$$V = 0,5 \times 1230.10^6 = 615.10^6 \text{ m}^3/\text{an}$$

Le déficit d'écoulement se répartit en :

- . eau de ruissellement
- . eau d'infiltration.

Dans le bassin de Carpentras, le ruissellement est pratiquement nul et sur les Monts de Vaucluse, aucune véritable rivière pérenne ne draine les massifs. L'infiltration dans ces terrains karstifiés est très rapide.

La majeure partie s'infiltré et alimente les nappes.

ORANGE 1953/1974	J	F	M	A	M	J	Ju	A	S	O	N	D	Total
E.T.P. (E) (mm)	27,2	36,9	68,7	104,9	144	161,1	190,8	157,9	95,8	51,8	30	27,7	1096,7
Précipita- tions (P) (mm)	42,5	61,5	67,3	52,2	55,9	62,6	25,8	61,7	98,3	80,7	62,9	57,6	729
P - E	+15,3	+24,6	-1,4	-52,7	-88,1	-98,5	-165	-96,2	+2,5	+28,9	+32,9	+29,9	-361,3
Réserves (mm)	100	100	98,6	45,9	0	0	0	0	12,5	31,4	64,3	94,2	
Variations (mm)	+15,3	+24,6	-1,4	-52,7	-88,1				+2,5	+28,9	+32,9	+29,9	
Excédent ou alimenta- tion dispo- nible (mm)	+9,5	+24,6											
Total pour période 1953/1974				TOTAL	=	34,1	mm						

Fig. 13 Calcul de l'eau disponible (moyenne 1953-1974)
méthode de PENMAN

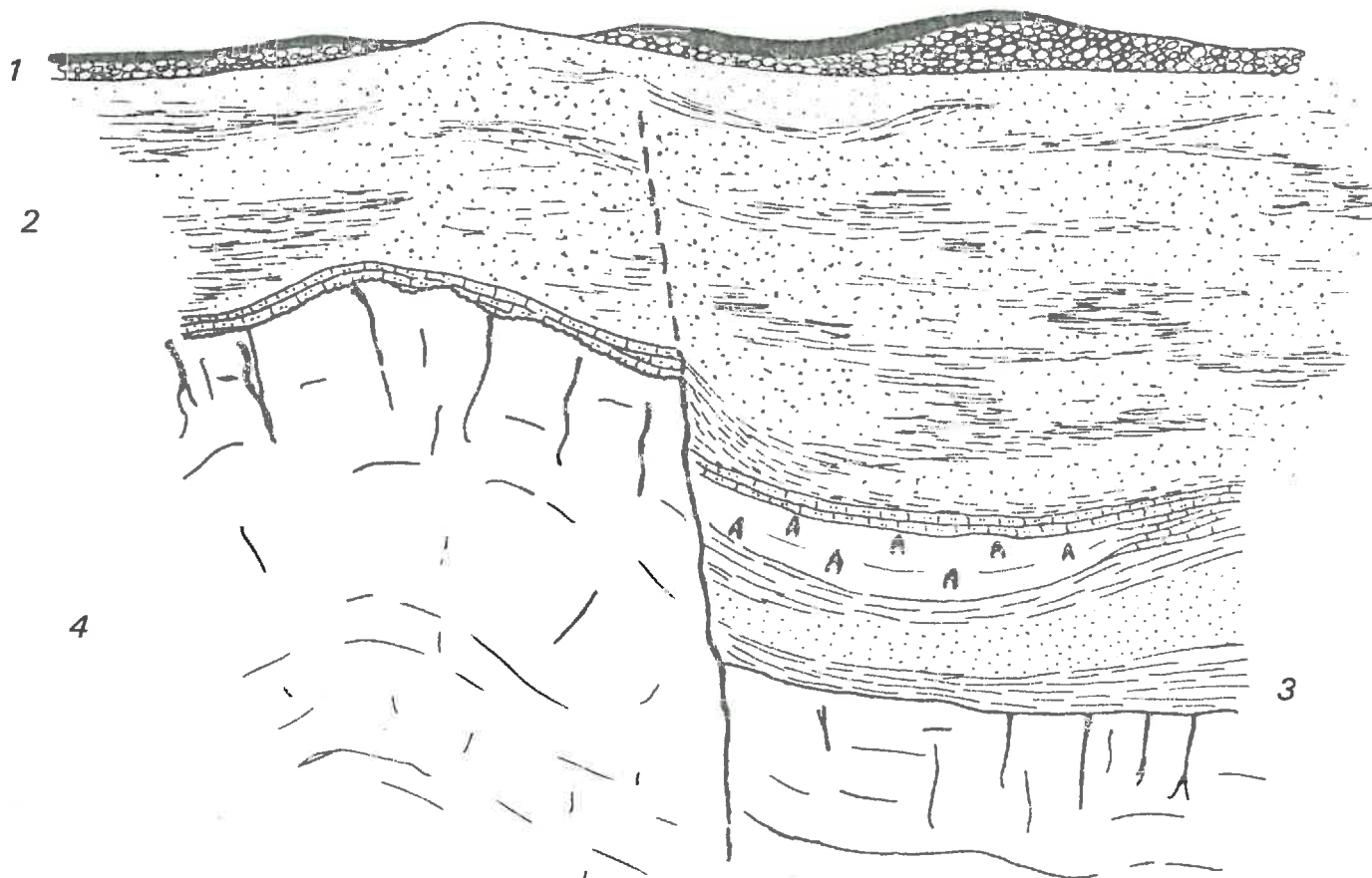
St-Christol (1981)	J	F	M	A	M	J	Ju	A	S	O	N	D	Total
St-Christol (moyenne)													
Sault (moyenne)													
(E)	25	20	37	41	45	40	42	20	65	38	10	25	1981
E.T.P. (mm)	29	30	31	37	45	50	40	51	56	40	34	30	Moyenne
	29	30	31	38	46	53	40	51	58	44	35	29	Moyenne
(P)	42,7	27,3	110,	81,7	81,3	45	47	2	129	57,5	3,3	282,4	1981
Précipitations (mm)	89	113	76	76	82	71	43	60	111	86	109	83	Moyenne
	78	102	66	71	73	74	41	59	100	84	104	82	Moyenne
P - E	+17,7	+7,3	+73,2	+46,2	+36,3	+5	+5	-18	+64	+19,5	-6,7	+257,4	1981
Réserve (R.F.U.)	100	100	100	100	100	100	100	82	100	100	100	100	1981
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	1100	100	1100	Moyenne
	100	100	100	100	100	1100	100	100	100	100	100	100	Moyenne
Variation réserves (mm)								-18	+64		-7		1981
													Moyenne
													Moyenne
Excédent ou alimentation disponible (mm)	+17,7	7,3	73	46,7	36,3	5	5		46	19,5		+250	1981
	+46,3	85,7	45	39	37	21	3	11	555	46	75	53	Moyenne
	49	72	35	33	27	21	1	8	42	40	69	53	Moyenne
Année 1981 - Saint-Christol : excédent = 507 mm													
Moyenne - Saint-Christol : excédent = 517 mm													
Moyenne - Sault : excédent = 450 mm													

Fig. 14 Calcul de l'eau disponible (méthode de TURC)

2. ECOULEMENT

A - RELATIONS ENTRE LES DIFFERENTS AQUIFERES

BASSIN de CARPENTRAS



- (1)- Alluvions de surface en répartition discontinue sur lesquelles s'écoule le réseau hydrographique - ces alluvions renferment une nappe phréatique ou superficielle.
- (2)- Miocène sablo-argileux : "saffre". Contient une nappe : nappe profonde ou nappe miocène. Elle est discontinue séparée par des niveaux argileux comme le montre le schéma ci-dessus. Cette nappe est en général captive, quelquefois artésienne. Le mouvement de l'eau se fait donc de la nappe "2" vers la nappe "1."
- (3)- Série oligocène (évaporites), Crétacé (sables blancs). Cette série contient plusieurs nappes qui, de par leur volume, ne peuvent contribuer de façon notable à l'alimentation de la nappe miocène.

- (4) - L'Urgonien qui se trouve soit en contact avec la série argileuse, soit en contact direct avec le Miocène, peut alors, et nous verrons comment, alimenter la nappe miocène.

B - ECOULEMENT SUPERFICIEL

Nous distinguerons :

1. la nappe phréatique
2. le réseau hydrographique
 - . les rivières
 - . les canaux
 - . les sources.

1. nappe phréatique (fig. 15)

a. généralités

L'ensemble des dépôts quaternaires : terrasses emboîtées, alluvions de l'Aigues de l'Ouvèze, du Rhône, contient une nappe. Sa discontinuité spatiale (elle entoure des îlots de saffre), son épaisseur variable (de 0 à 15 m), ses qualités (hydrodynamiques, chimiques), conditionnent l'existence de forages profonds.

b. descriptions (fig. 15)

- Zone Nord aubignagnaise (I)

On ne trouve pas de nappe superficielle. L'alimentation en eau réside dans la construction d'ouvrage dans le Miocène.

- Zone Est et Nord-Est (II)

Il existe une nappe discontinue, élevée topographiquement au rendement très médiocre. Ces raisons justifient le nombre croissant de forages.

- Zone Sud (III)

La nappe superficielle est importante, régulière, bien alimentée (débits d'exhaure souvent supérieur à 100 m³/h). Corrélativement, le nombre d'ouvrages profonds est limité.

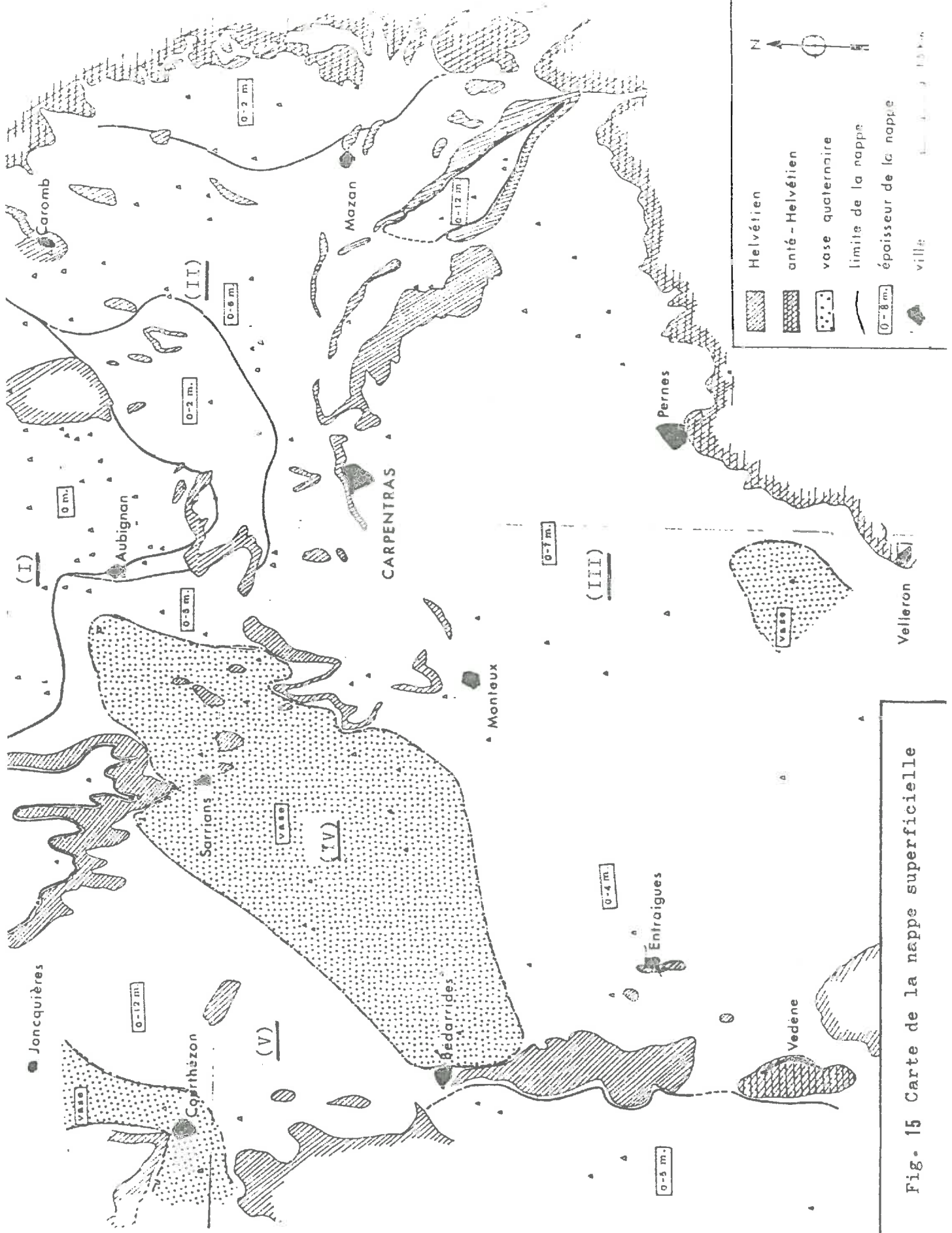


Fig. 15 Carte de la nappe superficielle

- Zone centrale (IV)

Une épaisse couverture de vase (10-15 m) recouvre la nappe phréatique. Et si les puits restent moins onéreux, les forages augmentent en nombre pour les raisons suivantes :

- . servent aussi bien à l'alimentation en eau potable qu'à l'irrigation ;
- . peuvent être artésiens et à l'aspect pratique s'ajoute alors le charme d'une fontaine.

- Zone Ouest et Nord-Ouest (V)

La nappe de l'Ouvèze constitue une excellente ressource

2. réseau hydrographique (fig. 16)

Les mesures de débits ont été effectuées respectivement par :

- Le S.R.A.E. * : pour le canal de Carpentras et les quelques rivières qui traversent le bassin (Brégoux - Auzon - Méde - Grande Levade - Ouvèze -
- RAMBAUD A. : pour la Sorgue.
- moi-même : pour les mesures faites en micromoulinet.

a. les rivières

L'interprétation des résultats donnés par le S.R.A.E. d'Aix-en-Provence, a été possible pour l'année 1977. Les limnigraphes placés sur des ruisseaux à faible débit ne permettent pas toujours l'obtention de résultats valables.

* S.R.A.E. = Service Régional d'Aménagement des Eaux

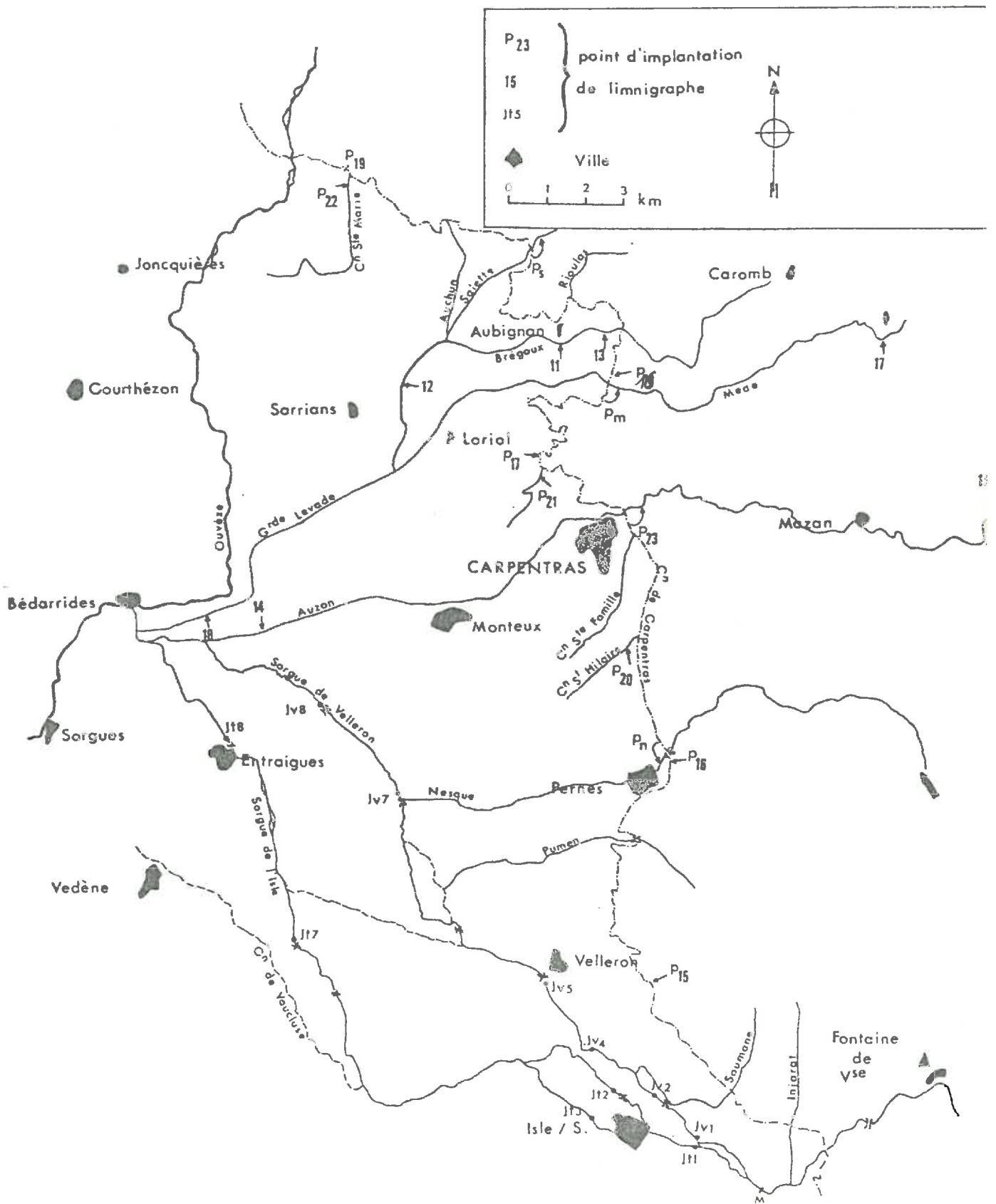


Fig. 16 Carte du réseau hydrographique

Mois	J	F	M	A	M	J	Ju	A	S	O	N	D	Moyenne
LE BREGOU :													
n° 13	0,09	0,14	0,195	0,146	0,259	0,170	0,05	0,048	0,03	0,095	0,095	0,184	0,126
n° 11	0,169	0,221	0,189	0,154	0,256	0,231	0,129	0,11	0,12	0,193	0,172	0,295	0,187
n° 12	0,485	0,628	0,775	0,632	1,35	0,73	0,438	0,378	0,257	0,70	0,394	0,581	0,615
LE MEDE :													
n° 17	0,142	0,199	0,260	0,221	0,295	0,357	0,163	0,151	0,101	0,586	0,228	0,3	0,217
n° 16	0,306	0,436	0,392	0,286	0,462	0,364	0,242	0,228	0,154	0,229	0,243	0,30	0,303
n° 18	1,77	1,88	2,22	1,87	3,38	2,20	1,91	1,69	1,48	2,15	1,77	2,20	2,05
L'AUZON :													
n° 15	0,278	0,314	0,321	0,187	0,359	0,378	0,166	0,156	0,09	0,16	0,242	0,392	0,251
n° 14	0,649	0,809	1,48	0,749	1,41	1,40	0,834	1,18	0,764	1,27	0,785	0,7	1,00
14 → P15	0	0	0,064	0,09	0,11	0,114	0,12	0,116	0,088	0,08	0,01	0	

Débit mensuel des rivières et moyenne annuelle (m³/s)
: (Fig. 17a)

Les débits de ces rivières sont très faibles. Ils augmentent régulièrement d'amont en aval.
exemple : Le Mède : n°17 : 0,295 ; n°16 : 0,462 ; n°18 : 2,03
(entre le n° 16 et le n°18, on a déduit les débits du Brégoux (n°12) qui est l'affluent du Mède).

On peut envisager deux solutions : ou la nappe miocène alimente les cours d'eau par drainance, ou la nappe superficielle est en équilibre avec eux, ou les deux phénomènes agissent simultanément, mais dans quelles proportions ?

A partir des données (fig.17), on s'aperçoit que les débits varient plus ou moins irrégulièrement avec une pointe au mois de Mai. Il semble donc improbable que des variations si brutales soient en rapport avec des mouvements de la nappe profonde qui subit des variations très lentes. Il semble par contre que ces mouvements soient dûs : d'une part à une alimentation par la nappe superficielle et d'autre part aux précipitations. L'estimation de la drainance par cette méthode n'est pas possible. Nous verrons dans le chapitre Hydrochimie, comment il a été possible de la mettre en évidence

b. les canaux

Le canal de Carpentras : Jusqu'à ces dernières années, le canal de Carpentras déversait gravitairement une partie des eaux prélevées dans la Durance sur le bassin de Carpentras. Cette irrigation commence au mois de Mars et elle s'interrompt brusquement en Novembre. La figure 16 représente le trajet de ce canal. Jusqu'à ces dernières années, seule la partie Ouest pouvait être irriguée, la partie Est se trouve surélevée et non accessible à l'irrigation.. Mais depuis deux ans le Syndicat qui gère le canal de Carpentras met au point une distribution de l'eau sous pression qui rendrait les zones hautes irriguables. Nous pouvons espérer en l'avenir proche une diminution du nombre d'ouvrages ou tout au moins une diminution des débits prélevés dans la nappe miocène.

Les résultats fournis par le S.R.A.E. m'ont permis de faire un bilan pour les années 1974-1975. Les résultats sont inscrits sur la fig. 18 . Le volume déversé dans le bassin en 9 mois est de :

$$\underline{90.10^6 \text{ m}^3/\text{an}}$$

c'est-à-dire près de 100 fois supérieur aux précipitations de l'année 1981.

Débits (m³/s)

Année 1977

Fig. 17b Evolution des débits mensuels des rivières

Le grande Levade

L'Auzon

Le Brégoux

J

F

M

A

M

J

Ju

A

S

O

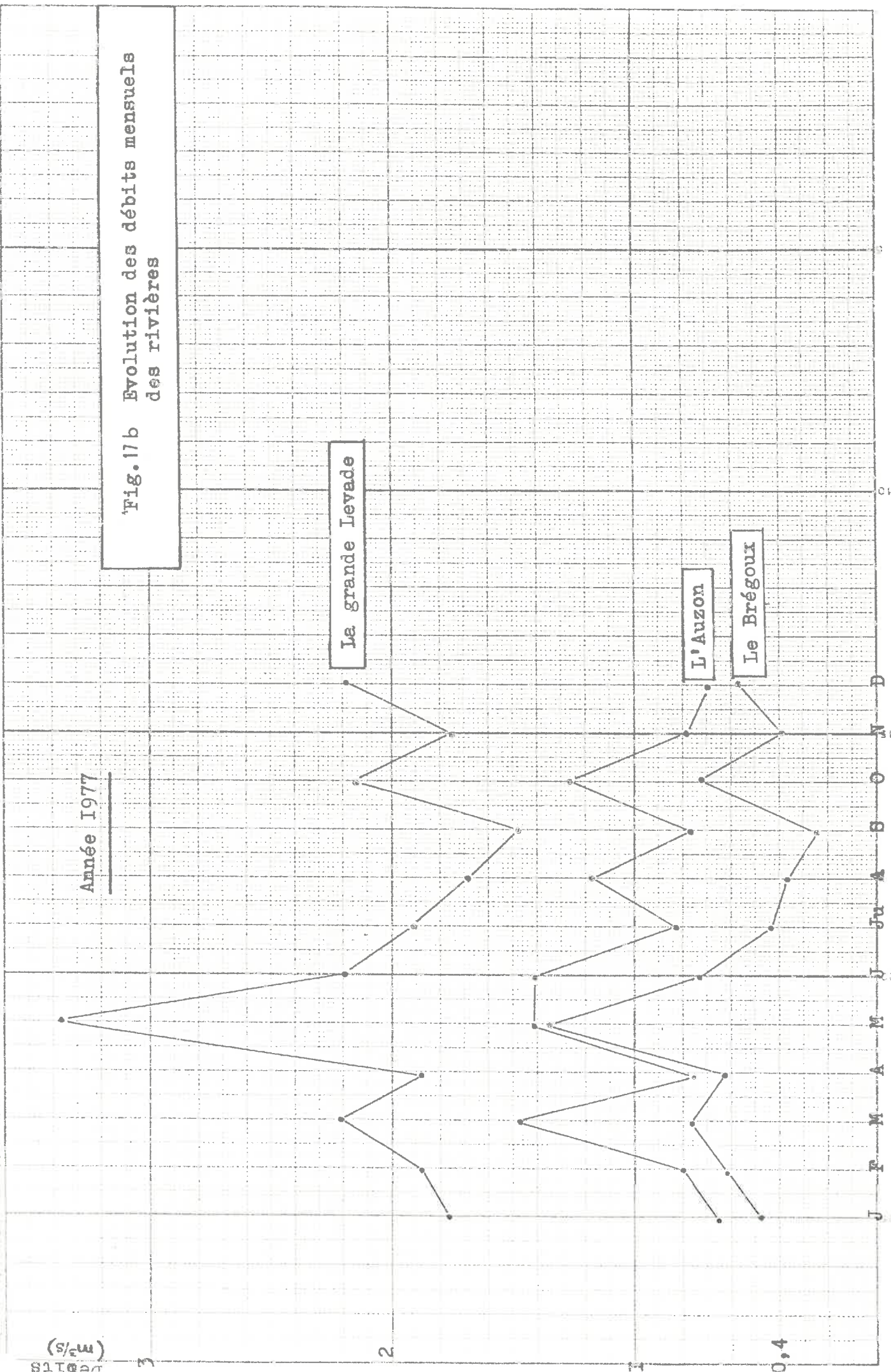
N

D

0,4

2

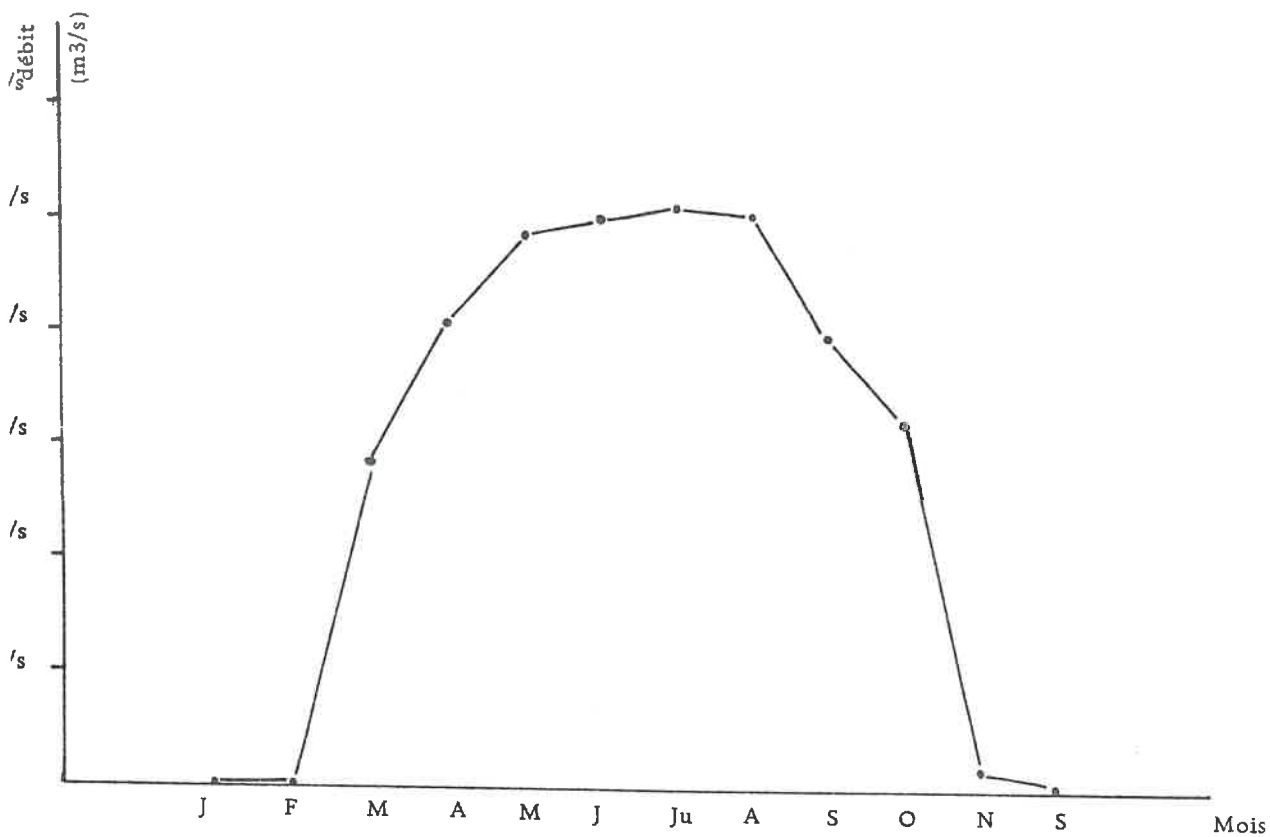
3



année 1975	J	F	M	A	M	J	Ju	A	S	O	N	D	Total
dit au 15	0	0	3,352	4,76	5,66	5,63	5,98	5,86	4,45	4,23	0,76	0	40,682 m3/s Mars à Octobre
dit au 22	0	0	0,544	0,684	0,73	0,71	0,70	0,66	0,56	0,61	0,16	0	
es (m3/s)	0	0	2,81	4,08	4,93	4,92	5,28	5,20	3,89	3,62	0,6	0	35,33 m3/s
Rejet total pour l'année 1975 = $93,10^6$ m3													

année 1974	J	F	M	A	M	J	Ju	A	S	O	N	D	Total
dit au 15	0	0	3,134	4,74	5,22	5,72	5,90	5,78	4,37	3,686	0,15	0	38,7 m3/s
dit au 22	0	0	0,49	0,613	0,608	0,70	0,753	0,75	0,466	0,516	0,046	0	
es (m3/s)	0	0	2,65	4,12	4,61	5,02	5,147	5,03	7,9	3,17	0,10		33,74 m3/s
Rejet total pour l'année 1974 = $88,7.10^6$ m3/s													

Débits injectés par le canal de Carpentras entre Velleron (P15) et Vacqueyras (P22)



-Schéma de la progression des débits injectés mensuellement par le canal-

Fig. 18 Débit du canal de Carpentras

Le réseau de Sorgues : (fig. 16) Formé à partir de la résurgence de la Fontaine de Vaucluse; c'est un réseau complexe qui sert à la fois à l'irrigation et au drainage. Il se divise en deux branches à la station de partage des eaux.

- La Sorgue de Velleron : Prélèvement = 7/12
- La Sorgue de l'Isle : Prélèvement = 5/12

La Sorgue de Velleron reçoit comme affluents : le Valat de Saumane, le Pumen, la Nesque, la Sorguette, l'Auzon.

La Sorgue de l'Isle se partage en deux après le Thor

- la branche d'Entraigues,
- le canal de Vaucluse.

Ce dernier par convention prélève 7 à 8 m³/s (c'est-à-dire pour un débit de la fontaine inférieur à 20 m³/s, la Sorgue de l'Isle se déverse entièrement dans le canal de Vaucluse. Puis c'est tout un treillis de canaux qui shunte les bras principaux et qui empêche d'établir un bilan précis. Selon le Président du Canal de Vaucluse, le seul résultat tangible est le suivant :

d'Avril à Septembre, les Sorgues servent à l'irrigation (les débits à Bédarrides sont pratiquement nuls).

d'Octobre à Mars, elles servent au drainage.

A partir de cette hypothèse on va établir quels peuvent être les prélèvements. Cette méthode reste très arbitraire et pour avoir des valeurs quantitatives, il faudrait disposer de toute une série de limnigraphes.

Mois	J	F	M	A	M	J	Ju	A	S	O	N	D	Moyenne
1967/1971													
Débit moyen	20	20,35	22,92	22,56	22,26	19,56	13,44	9,25	8,59	7,63	13,9	11,27	16 m3/s
Débites prélevés en %	0	0	50	70	90	95	100	95	90	70	0	0	
Débites prélevés en m3/s	0	0	10	16	20	18,5	13,44	9	8	6	0	0	8,4 m3/s
Quantité d'eau prélevée mensuellement sur le réseau de Sorgues													

Le volume pour l'année est égal à 265.10^6 m³/an, c'est-à-dire de deux à trois fois le volume distribué par le canal de Carpentras et 250 fois le volume représenté par les précipitations.

c. les sources

- Il existe deux émergences à la limite des calcaires Urgonien
- la Fontaine de Vaucluse (au Sud) débit voisin de 16 m³/s
 - la source du Paty (au Nord) débit faible, voisin de 12.10^{-3} m³/s

Quelques sources aux débits négligeables sourdent à la limite Crétacé (sables blancs) et l'Oligocène.

Pour établir le bilan, nous ne tiendrons compte que des débits à Fontaine de Vaucluse.

C. ECOULEMENT SOUTERRAIN

1. Le magasin aquifère

a. géométrie

A partir des documents fournis par la S.N.P.A. (carte des isobathes en mur du Miocène) par la C.P.G.F. (carte structurale établie à partir de 120 sondages électriques) par l'Entreprise Granger (coupes lithologiques des forages atteignant le substratum), il a été possible de calculer un volume de sédiment potentiellement aquifère.

$$\underline{\text{Volume d'Helvétien} = 125 \cdot 10^9 \text{ m}^3.}$$

b. alimentation

Elle peut se faire soit par la surface, soit par le fond (drainance), soit latéralement.

- par la surface : nous avons déjà précisé que la nappe était en charge et que l'eau circulait de bas en haut. Cela exclut les infiltrations de surface.

- par le fond : le sondage pétrolier de Loriol a montré l'existence d'un contact anormal entre le Miocène et l'Urgonien plus ou moins karstifié. De cette façon, il peut y avoir alimentation directe par le fond dans les zones où existe cette discontinuité. Rappelons que 600.10⁶ m³ d'eau s'infiltrent chaque année sur l'ensemble -Mt-Ventoux-Mt-de-Vaucluse-Lubéron-

- latéralement : c'est la géologie régionale qui permet d'envisager les différentes possibilités d'alimentation.

Les contacts latéraux se font entre :

- Miocène - Trias : au N.E.
- Miocène - Crétacé : E et S.E.
- Miocène - Miocène : en N.W.

Le Trias, l'Oligocène, de par leur nature essentiellement argileuse ne contiennent pas de nappes importantes et ne peuvent contribuer à l'alimentation du Miocène. A cela s'ajoute la mauvaise qualité du saffre sur toute la périphérie du bassin. Cette série argileuse a un rôle de facteur limitant dans les échanges d'eau entre l'Oligocène et le Miocène.

Il n'existe aucune discontinuité entre la nappe de Ste-Cécile au Nord et Carpentras au Sud. La séparation est arbitraire et pour l'élaboration d'un modèle de simulation d'écoulement, il faudrait considérer un flux d'alimentation à cette limite.

c. qualité

On utilisera des méthodes de Hallen Hazen pour évaluer les perméabilités ;

$$K = 100 d^2 10 \text{ (cm/s)}$$

* inconvénients de cette méthode :

1 - Les techniques mises en service par le forage (M.F.T.* ou rotation sous fluide) entraîne une désorganisation dans la nature et le classement du sédiment.

2 - Il y a séparation tout au long de la remontée entre les particules de formes et de densité différentes en suspension dans l'eau. Ce phénomène s'accroît avec la profondeur et le diamètre de l'ouvrage.

3 - L'ajout de bentonite dans le fluide entraîne une augmentation de la teneur en argile.

4 - L'analyse granulométrique s'applique à quelques dm³ de matériau et n'intègre pas toute la colonne lithologique.

* résultats

Nous avons analysé 15 échantillons sur les ouvrages suivants :
C58 - C15 - C16 - C121 - C127 - C13 - A429 - A441 - A312 - O822 - O826.

La Fig. 19 met en parallèle: la nature lithologique donnée par le maître de sonde, la profondeur de l'ouvrage, la perméabilité de l'échantillon, ainsi que les paramètres So, IA, U:

So = Indice de classement

IA = Indice d'assymétrie

U = coefficient d'uniformité

$$So = \frac{Q_{75}}{Q_{25}}$$

$$IA = \frac{Q_{25} \times Q_{75}}{(\text{médiane})^2}$$

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

* marteau fond de trou

N° FORAGE	PROFONDEUR	NATURE LITHOLOGIQUE	PERMEABILITE (m/s)	So	Ja	U = d 60/d10
C58	180	saffre gris-vert argileux	1.10^{-4}	-	-	-
A312	30	saffre gris	$7,4.10^{-3}$	1,33	0,91	2,27
"	80	saffre gris	$9,6.10^{-3}$	1,5	0,83	1,8
A441	188	saffre gris	$1,6.10^{-2}$	1,44	0,97	1,7
O822	80	saffre jaune	2.10^{-3}	-	-	-
O826	-	saffre gris argileux	1.10^{-4}	-	-	-
C'13	surface	saffre jaune argileux	1.10^{-4}	-	-	-
C127	-	saffre gris	$6,4.10^{-3}$	-	-	-
C121	190	saffre gris	$2,3.10^{-3}$	1,6	0,82	5,6
"	100	saffre jaune argileux	1.10^{-4}	-	-	-
C16	30	saffre gris argileux	1.10^{-4}	-	-	-
"	45	saffre jaune	$2,3.10^{-3}$	1,83	0,86	-
"	70	saffre jaune argileux	1.10^{-4}	-	-	-
C15	30	saffre jaune	$6,4.10^{-3}$	-	-	-

P.S. Pour les argiles et saffres argileux, on n'a pas pu calculer les paramètres So, Ja, U.

Fig. 19 Calcul de la perméabilité par la méthode de Hallen Hazen

* remarques d'ordres sédimentologiques

1 - La présence de sable "classé à bien classé" indique un transport par un courant régulier aux variations peu importantes.

2 - Le sédiment suit une répartition unimodale, qui témoigne d'un dépôt ayant subi un transport important. A partir des figures 20a-b on a mis en évidence le phénomène de différenciation du sédiment pendant la remontée.

Fig. 20 a courbe cummulative dont la partie argileuse ($< 0,05$ mm) a été enlevée.

Les sédiments se répartissent par ordre décroissant de perméabilité

A312 (30 m) - A4L1 (190 m) - A312 (80 m)

Fig. 20 b courbe cummulative avec la fraction argileuse, on observe des permutations

A4L1 (190 m) - A312 (80 m) - A312 (30 m)

Il y a inversion des perméabilités entre A312 (30) et A312 (80 m). Cela traduit le fait suivant :

- le saffre en lui-même est de meilleure qualité à 30 m.
- le sédiment (saffre + argile) a une perméabilité plus faible à 30 m qu'à 80 m. On peut penser qu'au cours de la remontée, la fraction argileuse s'est séparée et la quantité d'argile n'est plus proportionnelle entre les deux échantillons.

* implications hydrogéologiques

La construction d'ouvrages importants et durables nécessite l'équipement du forage. Cela consiste en la pose d'un tubage crépiné et d'un massif filtrant. Il existe une série de conditions qui lient cet équipement et la granulométrie.

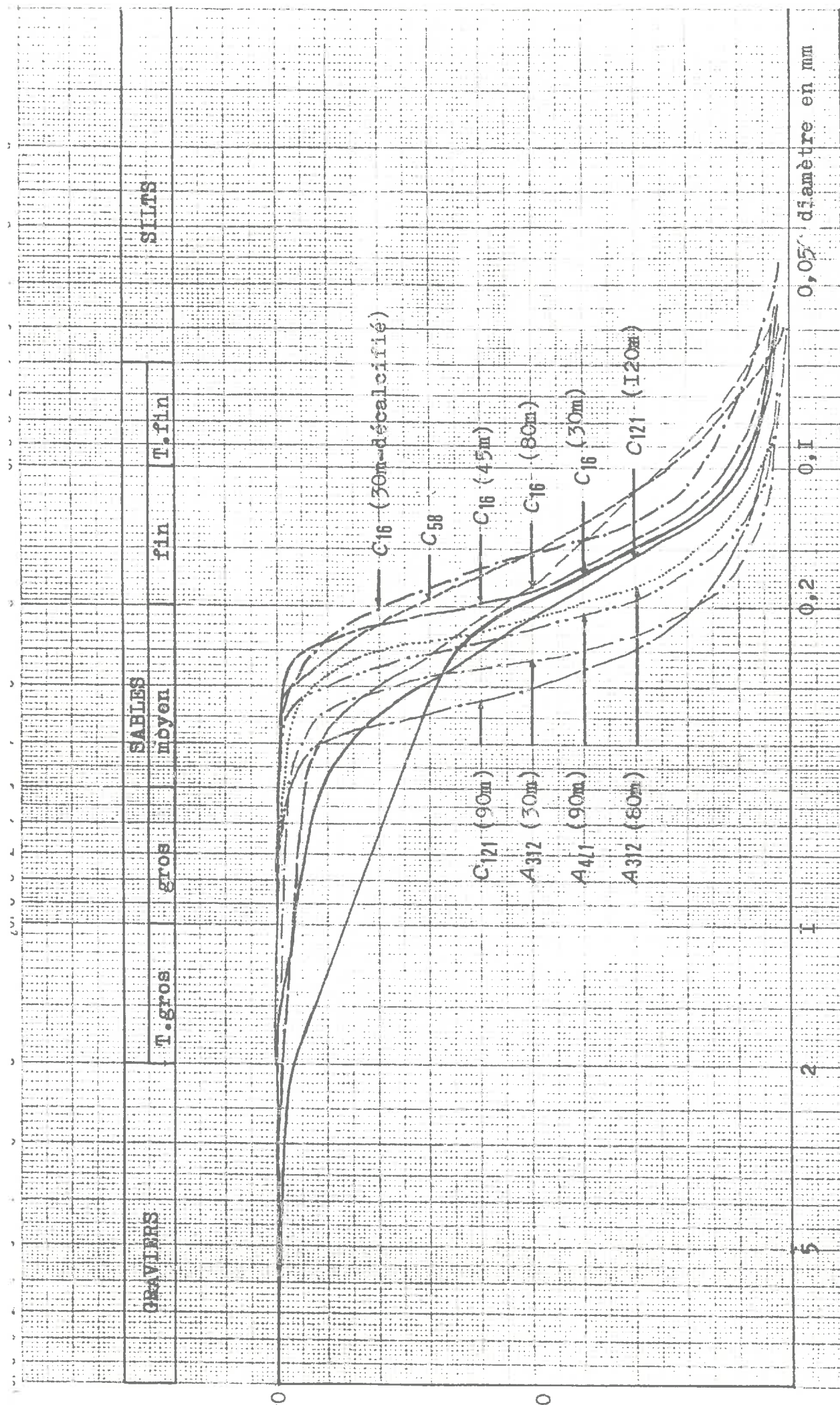


Fig. 20 a Courbe cummulative sur la fraction non argileuse du sédiment

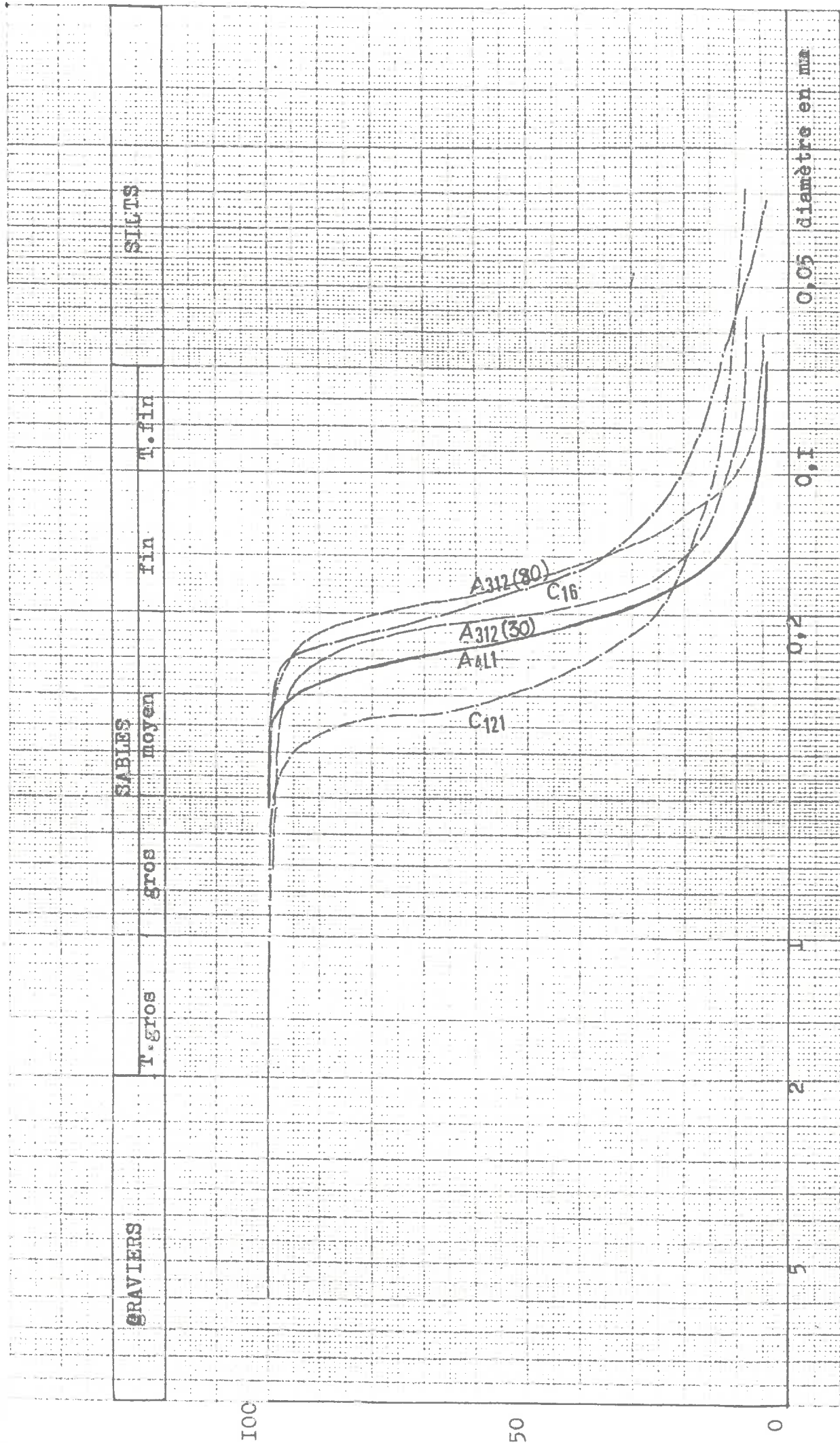


Fig. 20 b Courbe cummulative sur la totalité du sédiment

1 - Il faut $U < 2,5$ (fig. 19)

Le coefficient reste inférieur à 2,5 pour le "saffre gris" ou "saffre jaune" (A312 - A4L1). Mais il peut augmenter avec la teneur en argile, cela rendra nécessaire l'obturation des horizons argileux.

2 - Il faut $d_{60} < 0,5$ mm

Cette condition est toujours réalisée dans nos exemples; on a pour tous les échantillons $d_{60} < 0,4$ mm.

3 - Il faut $d_{10} > 0,03$ mm

Il demeure toujours supérieur à 0,05 mm.

4 - Le diamètre du gravier est calculé à partir de la formule de Johnson et pour $U < 2,5$, la courbe granulométrique du massif filtrant admettra les valeurs suivantes :

$$\begin{aligned}d_{0} &= 7 d_{10} = 0,7 \\d_{10} &= 8 d_{10} = 0,8 \\d_{30} &= 6 d_{30} = 1,2\end{aligned}$$

5 - Les crépines sont fonction de la dimension des particules et du débit que l'on veut pomper.

Exemple : Pour un sable fréquent dans le Miocène ($\varnothing = 0,25$ à $0,5$ mm) la vitesse de circulation ne doit pas dépasser $0,04$ à $0,07$ m/s afin que les particules ne soient pas entraînées. La surface d'ouverture des crépines est tirée de la formule $S = Q/V$.

pour $Q = 100$ m³/h on a $S = \frac{100}{0,05 \times 3600} = 5500$ cm²

Comme la partie crépinée ne doit pas être dénoyée, il sera nécessaire de tuber la partie supérieure de l'ouvrage. Ce qui, pour un débit spécifique de 2 m³/h/m et pour un débit de 100 m³/h, condamne les 50 premiers mètres et par conséquent l'aquifère contenu dans ces 50 mètres.

2. Piézométrie (fig. 21 1/50 000ème)

a. généralités

Cette piézométrie de la nappe profonde a été établie à partir de documents archivés. Afin de disposer de données actuelles, une série de mesures sur 180 ouvrages a été effectuée pendant l'hiver 1980-1981. Nous avons maintenu l'écart entre les isohydrohysses de 10 m pour les raisons suivantes :

1. les forages n'atteignent pas tous la même profondeur et il peut exister des différences de charge entre deux ouvrages.
2. Les ouvrages anciens non gravillonnés subissent un colmatage qui engendre aussi une perte de charge.
3. Les mesures peuvent avoir été faites peu après utilisation de l'ouvrage et avant reprise du niveau d'équilibre.

b. Principaux résultats

1. L'écoulement général représenté par les lignes de courant (fig. 21) est dirigé Est-Ouest à l'Est du bassin puis la nappe semble converger vers un exutoir unique entre Sorgues et Bédarrides. La direction devient Nord-Est - Sud-Ouest et se calque parfaitement sur le réseau d'accidents majeurs Nord-50 qui affecte tout le Sud-Est de la France.

2. Les accidents reconnus par les méthodes géophysiques sont portés sur la carte piézométrique. On constate que les courbes sont déformées au contact des accidents. Ce fait peut indiquer l'influence de la fracturation sur l'hydrodynamisme. Les lignes de perméabilité les plus fortes paraissent se trouver à l'aplomb des accidents majeurs (accidents de Sarrians - Loriol).

3. L'équation du débit unitaire ou équation de Darcy lie le gradient de la nappe à la qualité de l'aquifère.

Cette relation s'écrit $Q_u = T_i (m^2/s) = K_{hi} (m^2/s)$

Il en résulte que pour de faibles valeurs du gradient, on peut avoir en fonction du flux transitant dans la nappe soit :

- une transmissivité faible : zone des Valayans - Velleron

- une transmissivité élevée : Zone de Sarrians - Lorient.
 Comme cette zone correspond à une épaisseur réduite de Miocène,
 une augmentation simultanée de la transmissivité ne peut que
 traduire une suralimentation.

La connaissance du flux se fait à partir d'essais de pompage.

4. L'artésianisme est un argument supplémentaire à cette hypothèse de suralimentation. On ne peut que constater l'alignement Sud-Est-Nord-Ouest situé sur le panneau haut en contact direct avec l'Urgonien. S'il est certain que la topographie intervient dans le cas de points isolés (Mozan - Caromb), il est difficile de ne pas invoquer un accroissement de la charge favorisé par une meilleure alimentation.

5. La fig. 22 représente la terminaison occidentale de la nappe miocène et la piézométrie de la nappe superficielle de l'Ouvèze dans la région de Sorgues. Il y a superposition entre les isopièzes 20 et 25 ; cela laisse supposer une mise en charge de la nappe phréatique par la nappe miocène. Cette constatation tirée directement de la piézométrie a été confirmée par l'étude géochimique.

6. La nappe miocène, depuis la connaissance des premières mesures piézométriques, voilà bientôt un siècle, a subi une baisse de niveau de quelques mètres (5 à 10). Nous pouvons invoquer, soit une utilisation de plus en plus importante et une multiplication des ouvrages, soit une perturbation climatique, qui bien que minime, affecte incontestablement notre hémisphère.

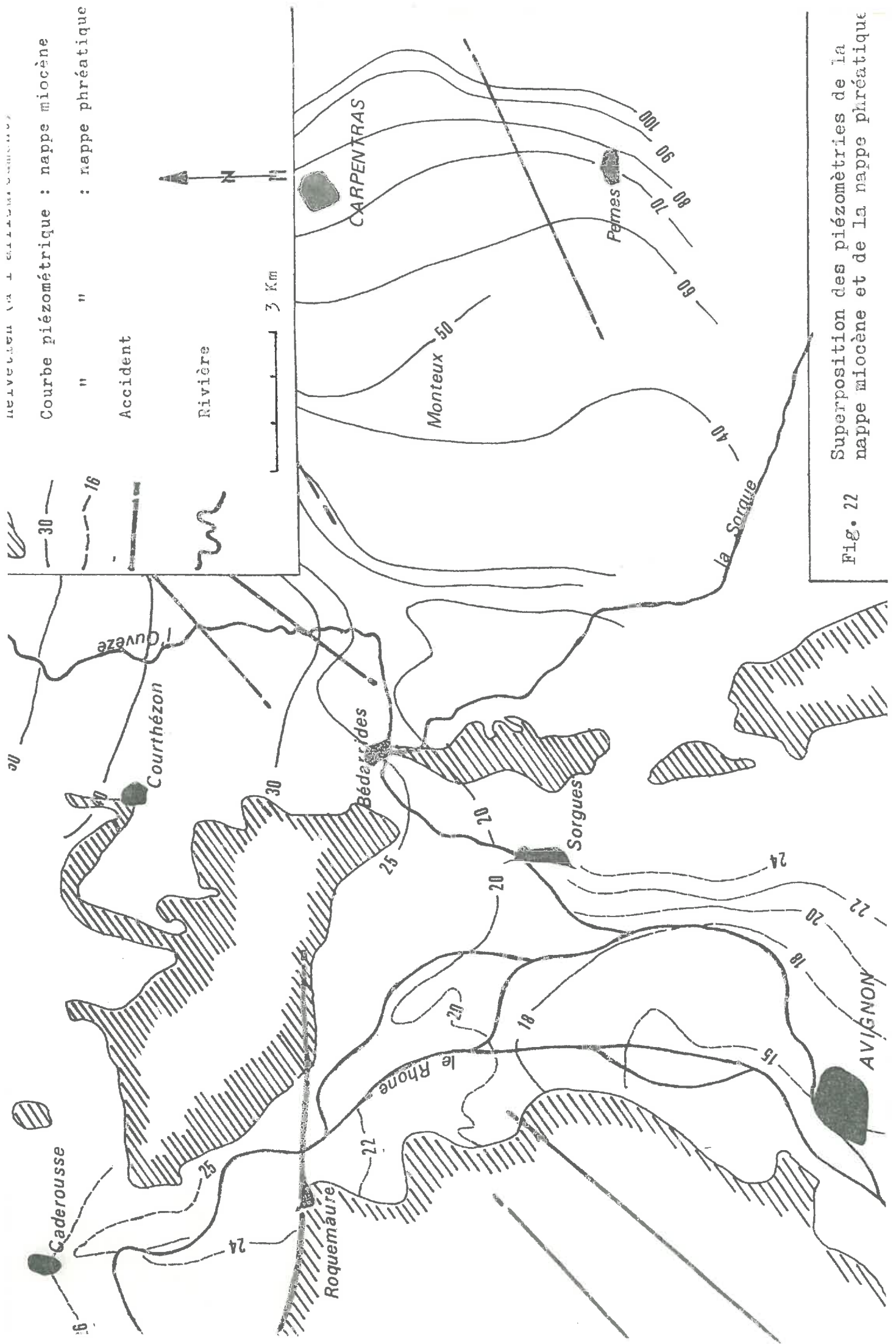


Fig. 22 Superposition des piézométries de la nappe miocène et de la nappe phréatique

c. fluctuations

Pour observer les fluctuations de la nappe, j'ai choisi de prendre trois piézomètres répartis sur une transversale Nord-Sud et de suivre leurs variations par pas hebdomadaire.

Forage C110 : les pompages deviennent trop fréquents, nous devons abandonner les mesures ; car la nappe n'est jamais au repos. Cet ouvrage, sur lequel est branché un compteur horaire, nous a permis d'avoir une courbe annuelle d'utilisation.

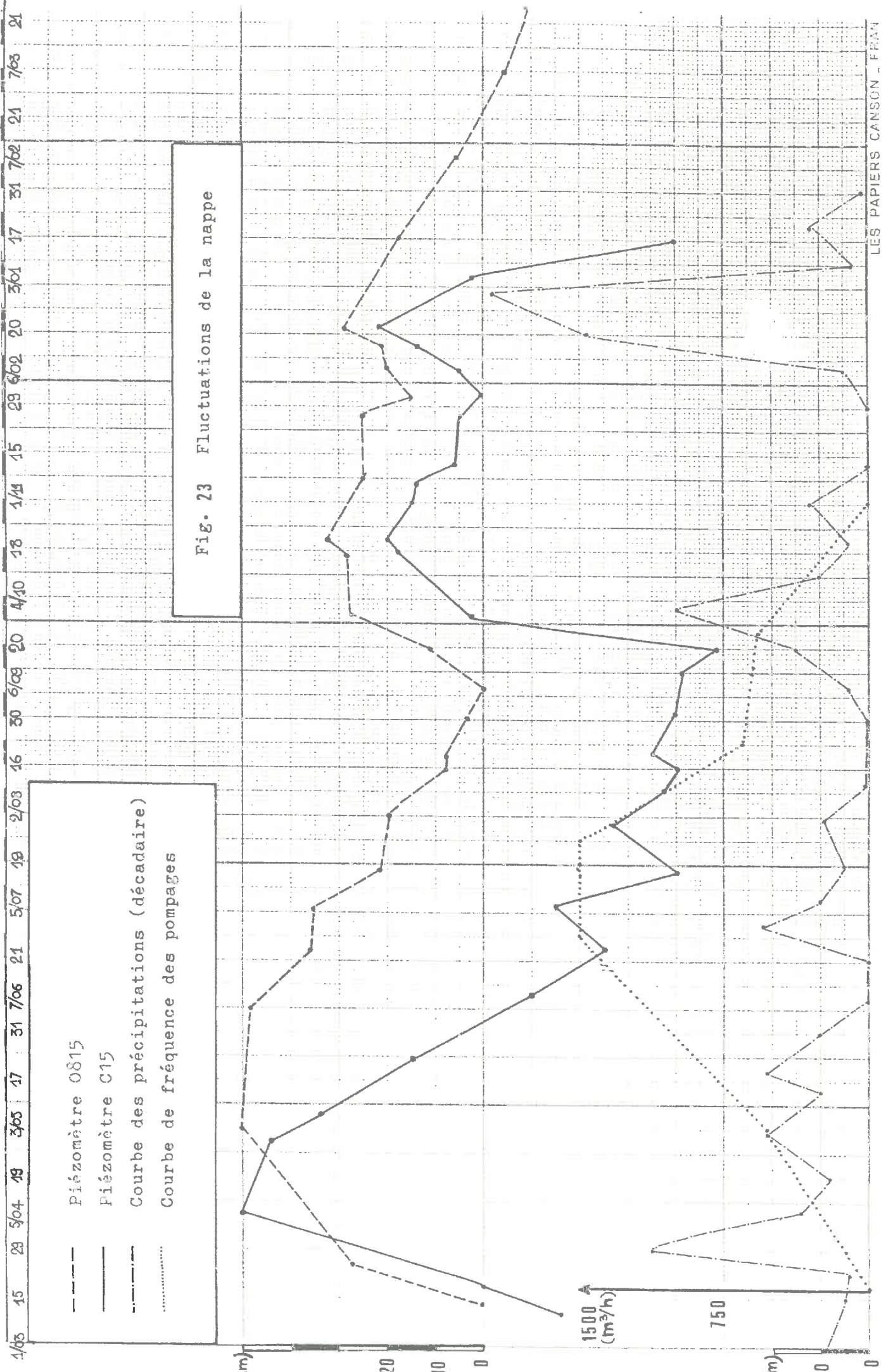
Forage O815 : a été surveillé du 1er Mars 1981 au 30 Mars 1982. Situé sur la zone aubignanaise où le sédiment miocène est très argileux ($K = 1.10^{-6} \text{ m/s}$) cet ouvrage de 134 m n'atteint pas le toit des calcaires burdigaliens, il n'est ni tubé, ni gravillonné, ni équipé de pompe. Il aura servi pendant toute l'année de parfait piézomètre.

Forage C15 : situé au Sud-Est de Carpentras, il est profond de 130 m ; la coupe lithologique donne une alternance de sable et d'argile dans l'ensemble assez perméable. Ce forage artésien a servi de piézomètre jusqu'au 17 Janvier 1982, date à laquelle un autre ouvrage débitant 5 m³/s pendant 24 H a été construit à moins de 100 m et a entraîné une baisse de plusieurs centimètres.

*Interprétation

A partir de la fig. 23 représentant les fluctuations des piézomètres, les précipitations à la station de St-Christol, les débits prélevés dans le bassin de Carpentras, on s'aperçoit que :

1. Les fluctuations interannuelles ne dépassent pas 1 m, et entre le 1er mars 1981 et le 1er mars 1982, la nappe n'a pas baissé.
2. Les niveaux piézométriques varient dans le même sens. Les fluctuations se déclenchent plus rapidement et sont plus accentuées pour "C15". On peut attribuer ces différences à une teneur en argile plus importante dans le "O815", et par conséquent un temps de transfert de charge plus long.



3. Au cours de l'année 1981, la nappe subit des variations majeures :
- une remontée jusqu'au mois d'Avril-Mai,
 - une descente plus ou moins régulière de Mai à Septembre,
 - une remontée rapide suivie d'une période stable de septembre à fin décembre,
 - une descente régulière jusqu'à fin mars.

La première descente (mai-septembre) correspond très exactement à la période des pompages. A la fin de la période d'irrigation correspond le niveau minimum de la nappe (septembre 1981). La remontée en octobre est synchrone de l'arrêt des irrigations.

La baisse hivernale est difficile à expliquer, on s'aperçoit que les fortes précipitations du 3 janvier 1982 n'entraîne pas de remontée. L'eau reste-t-elle stockée ?

4. Les variations mineures : 5/07/81 - 2/08/81 sont synchrones de fortes précipitations. Il y aurait alors un transfert de l'eau et non un transit.

5. La remontée piézométrique de Mars 1981 se retrouve en Mars 1982 sans que l'on puisse invoquer le paramètre "précipitations".

d. Evolution des températures

Il est communément admis que la terre subit une augmentation de température : "gradient géothermique" de la surface vers le centre. La valeur de ce gradient est fonction de sa position géographique.

Une zone tectoniquement stable donne un gradient relativement faible, une zone volcanique donne un gradient très fort. La valeur la plus commune est de $3^{\circ}/100\text{m}$; nous allons voir ce qu'il en est pour le bassin du miocène : (Fig. 24).

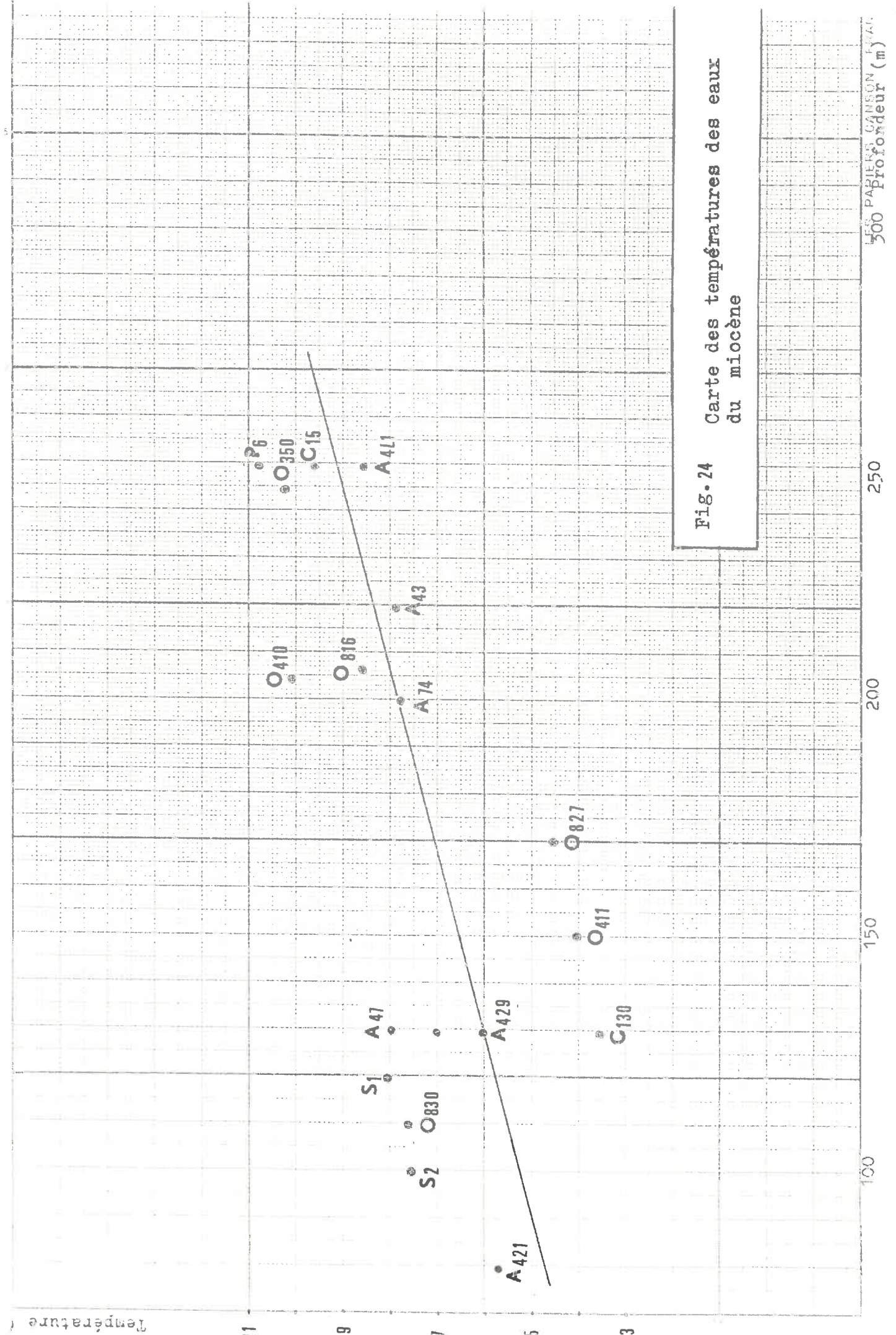


Fig. 24 Carte des températures des eaux du miocène

500 PAPIERS GANSON F. A. C.

*Résultats

1. Les eaux miocènes ne subissent pas de variations de températures au cours des saisons : il ne s'agit donc pas d'eau de surface.
2. Les eaux de surface ont une température de 13-14°, variable suivant les saisons ; l'eau du Miocène a une température variant entre 15 et 20° en fonction de la profondeur du forage.
La figure 24 permet de calculer le gradient : 3°/100m

3. Hydrodynamique

a. généralités

Nous n'avons malheureusement pas pu disposer de données suffisamment fiables sur les essais de débits. Les entrepreneurs locaux ne réalisent que des essais très succincts et il a fallu intervenir directement auprès des propriétaires d'ouvrages. Au total une vingtaine d'essais de durée variable ont pu être réalisés.

L'aquifère testé a été en majorité le saffre miocène, mais nous avons pu observer des réactions dans des nappes adjacentes.

b. choix des méthodes

On dispose actuellement de toute une série de méthodes assorties de leurs conditions d'utilisation sur lesquelles l'hydrogéologue peut baser son interprétation selon une procédure assez bien établie. Les auteurs ont toujours dû définir très strictement des schémas d'aquifère impliquant des conditions plus ou moins simplificatrices par rapport aux cas réels.

Après un résumé de la méthode, nous dégagerons les conditions de validité dans le cadre de l'aquifère miocène.

*Méthode bi-logarithmique de Theiss conditionnée par les hypothèses suivantes : nappe homogène, isotrope; d'extension infinie, aux épontes imperméables, puits parfait, elle peut être remplacée par la méthode semi-logarithmique de Jacob quand le temps de pompage est assez long. On a alors des équations :

$$T = \frac{0,183 Q}{i} \quad S = \frac{2,25 T t_0}{r^2}$$

Validité : la nappe miocène n'est pas homogène. Les épontes ne sont pas imperméables ni infinies. Le temps de pompage n'est pas assez long. Mais la méthode de Jacob est facile à appliquer, c'est pourquoi nous l'utiliserons en la confrontant à d'autres méthodes.

*Méthodes de Walton et Hantusch définies pour des nappes semi-captives ou des puits incomplets. Les conditions portent sur les épontes semi-perméables. Il s'en suit que la forme des solutions est évidemment plus complexe. Les représentations graphiques ne peuvent plus se faire par une courbe unique mais par des abaques ou des catalogues d'abaques.

Pour Walton...

$$T = \frac{0,08 Q}{S} F(U', r/B) \quad S = \frac{4Tt}{r^2 U'}$$

Pour Hantusch....

$$T = \frac{0,08 Q}{S} H(U', B) \quad S = \frac{4Tt}{r^2 U'}$$

$F(U', r/B)$ = fonction de puits pour les nappes semi-captives avec drainance.

$H(U', B)$ = fonction de puits pour les nappes semi-captives.

Validité : Nous n'avons pas une seule mais plusieurs limites semi-perméables. De plus elles sont discontinues dans l'espace. Là aussi le schéma théorique ne convient pas parfaitement.

*Méthode de Boulton : Boulton donne une interprétation pour des nappes libres. Il distingue :

- une libération instantanée de l'eau par suite du phénomène de décompression du milieu aquifère et de l'eau ;

- une libération progressive de l'eau due au drainage de la hauteur dénoyée, ce phénomène est appelé "égouttement".

On aura :

$$T = \frac{0,08 Q}{S} \quad \mathcal{E} (U', U'1, r/B) \quad S = \frac{4Tt}{r^2 U'} \quad S' = \frac{4Tt}{r^2 U'1}$$

$\mathcal{E} (U', U'1, r/B)$ = fonction de puits pour les nappes libres.

Validité : L'aquifère subit un égouttement, mais dans quelle proportion intervient-il par rapport au facteur décompression ? Là aussi il faut considérer la discontinuité horizontale de l'aquifère. De plus la nappe peut être en charge et la méthode n'est plus applicable.

*Méthode de Porchet : définie empiriquement, il a admis à partir de la formule de Dupuit que $\ln R/r = \text{constante} = 4,651$

$$Q = \pi k \frac{H^2 - h^2}{\ln (R-r)}$$

$$Q = \frac{2 k}{3} (H^2 - h^2)$$

mais dans l'aquifère miocène $\ln R/r$ est différent de la constante définie par Porchet.

On peut estimer que le rayon d'influence se situe entre 1000 et 2000 m, tandis que le rayon de l'ouvrage ne dépasse jamais 0,5 m

$$\text{Ln } \frac{1000}{0,5} = 7,6 \quad \text{et } \text{Ln } \frac{2000}{0,5} = 8,3$$

La valeur de la constante dans cet aquifère sera comprise entre 7,6 et 8,3. Nous utiliserons pour les calculs Constante = 8

$$Q = \frac{\pi k (H^2 - h^2)}{8} = 0,4 k (H^2 - h^2)$$

Validité : L'hypothèse de Porchet est utilisée en régime permanent et si elle est pratique quand on connaît le débit et le rabattement. Pour des essais de courtes durées, le régime stabilisé n'est pas atteint.

Conclusion : Aucune solution théorique ne correspond de façon entièrement satisfaisante à notre modèle de nappe. C'est pour chaque test qu'il faudra envisager un schéma hydrogéologique, tracer les courbes "bi-log", "semi-log", tester chaque méthode et voir laquelle semble la plus adaptée.

c - Essais de pompage

Les raisons émises dans le paragraphe précédent m'ont amené à classer les différents essais en trois catégories.

AIR LIFT		courte durée		longue durée	
		n°	temps (h)	n°	temps (h)
P3	P39	P1	1	P7	13
P4	P40	P2	3	P13	120
P8	P41	P5	2	P14	30
P9	P42	P6	2	P15	10
PI7	P43	P10	5	P16	24
PI9	P44	P11	3,30	P'24	32
P20	P45	P12	1	P22	41
P21	P46	P18	1		
P24	P47	P23	48		
P25	P48	P29	1		
P26	P49	P57	1		
P27	P50				
P28	P51				
P30	P52				
P32	P53				
P33	P54				
P34	P55				
P35	P56				
P36	P57				
P37	P58				
P38	P59				

Les localisations des essais de pompages sont indiqués sur la Fig. 31

• air lift

Par le train de tige, l'air comprimé expulse l'eau du forage et l'on obtient une valeur du débit d'exhaure.

Forage	P2	P5	P9	P10	P26	P29	P57
Débit spécifique (Air lift)	1	0,5	0,16	0,8	1	0,2	0,5
Débit spécifique	1,7	0,67	0,3	2,58	2,8	0,27	1,16

*résultats : pour des zones à forte perméabilité, le débit est limité par la puissance du compresseur.

Pour de faibles perméabilités, la valeur obtenue donne une estimation satisfaisante.

. essais de courte durée

La connaissance de la coupe lithologique est acquise. Pour certains essais, nous avons suivi le rabattement en fonction du temps (régime transitoire) pour d'autres essais, nous avons simplement pu avoir une valeur du débit spécifique. L'absence de piézomètre ne nous a pas permis de calculer le coefficient d'emménagement.

La fig.25a et la fig.25b résument les différents essais.

Fig. 25a : la correspondance avec les courbes de Theiss ou les abaques de Hantusch n'est pas réalisée. Seul pour les essais, P1 - P2 - P5 - P6 - P10 - P11, la superposition existe avec les abaques de Boulton ; mais les temps d'essai de pompage trop courts et l'absence de piézomètre ne permettent pas de corréler la partie terminale de la courbe.

Fig. 25b L'approximation semi-logarithmique aboutit à une droite. Cette droite admet, dans le cas de l'aquifère miocène, de nombreux changements de pentes. On les explique par l'hétérogénéité du sédiment.

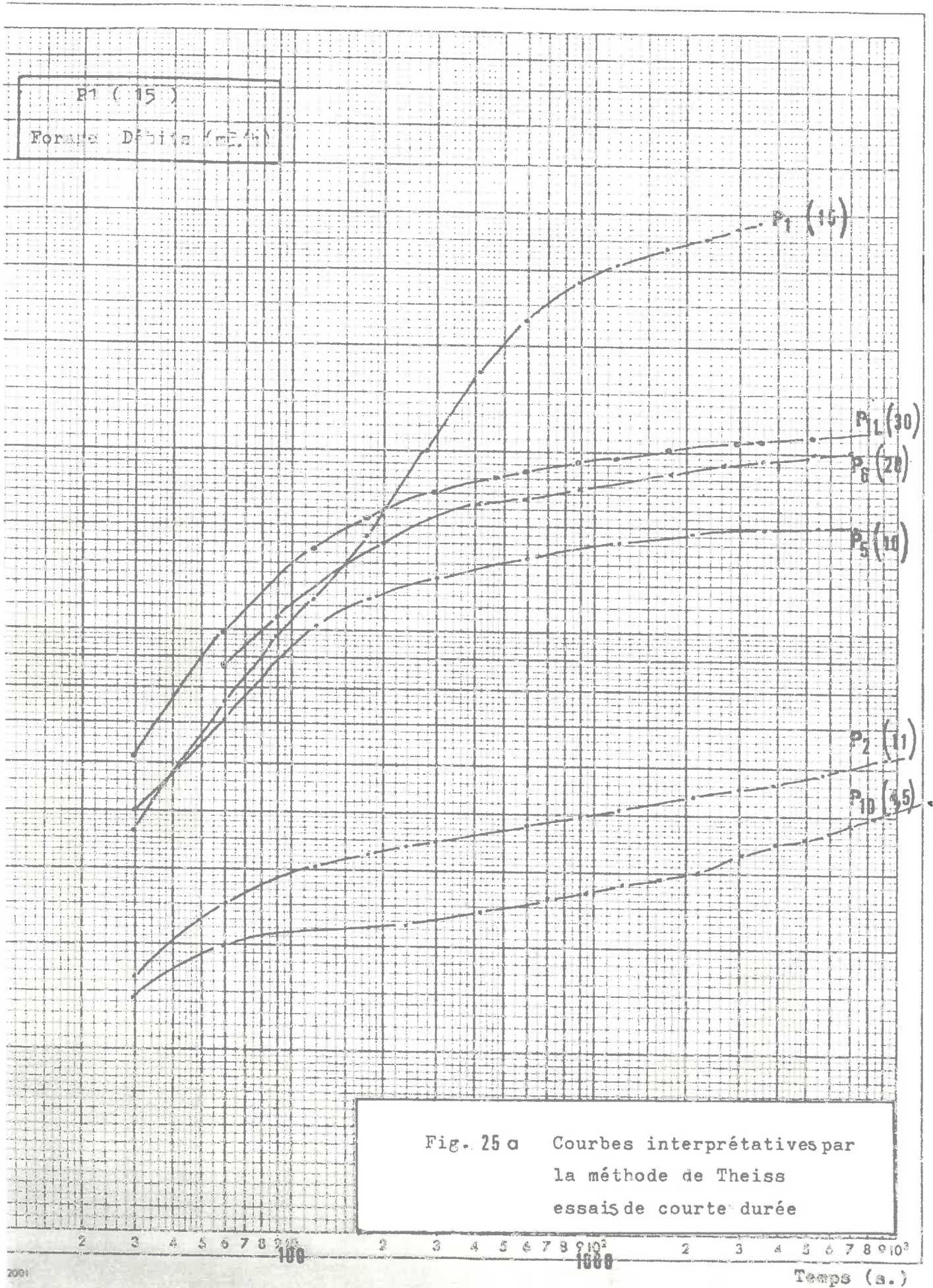
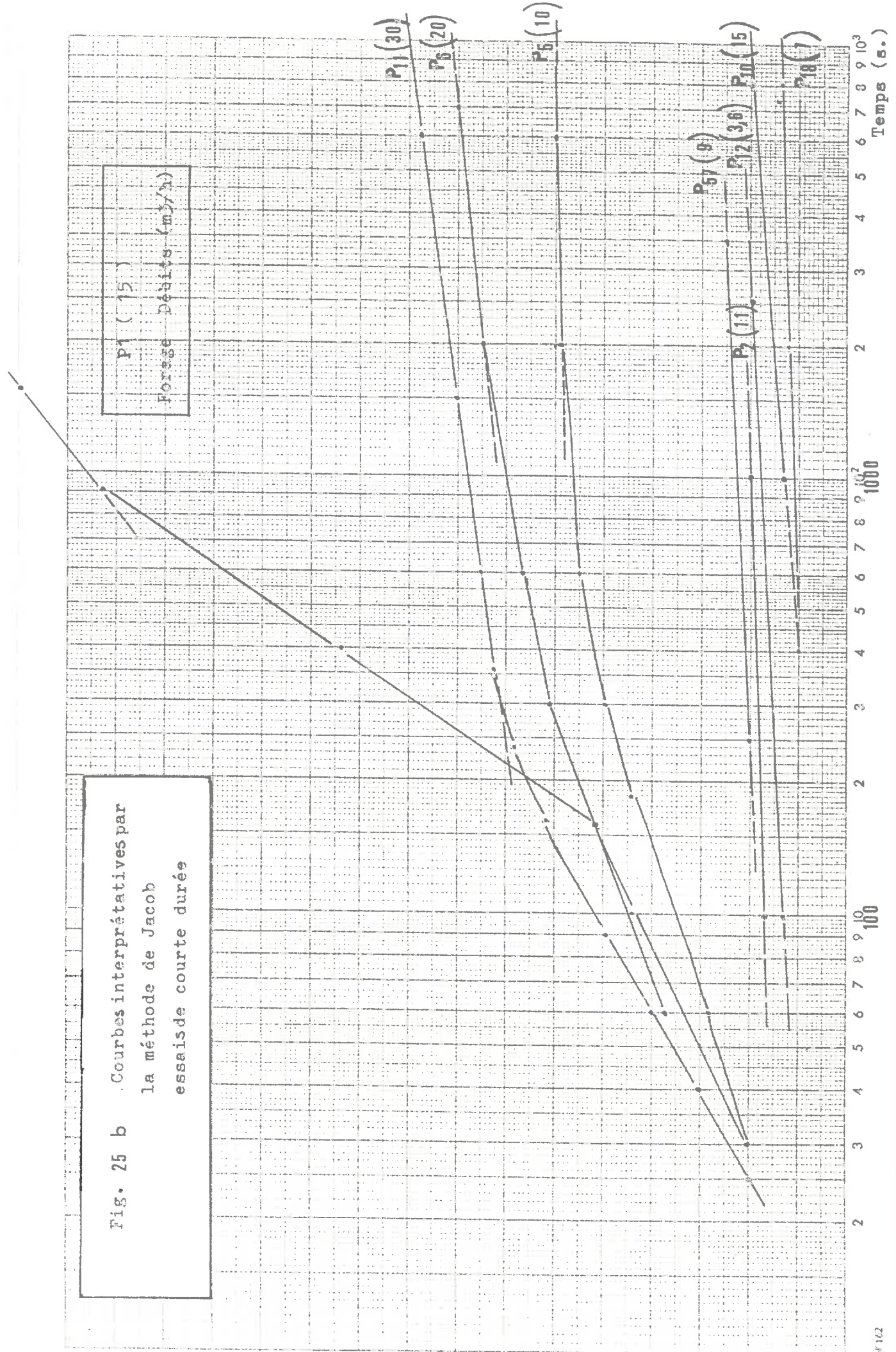


Fig. 25 a Courbes interprétatives par la méthode de Theiss essais de courte durée

Rabattements (m.)

Fig. 25 b
Courbes interprétatives par
la méthode de Jacob
essais de courte durée

$P_1 (15)$
Forage Débits (m³/h)



- une lentille perméable située à quelque distance du puits de pompage se comporte comme une ligne de réalimentation partielle et entraîne une diminution de la pente de la droite, ce phénomène s'inverse pour des lentilles argileuses.

La valeur de la pente a toujours été mesurée en fin d'essai et a permis le calcul de la transmissivité.

. essais de longue durée

Sept essais ont été réalisés, les temps de pompage s'étalent entre 10 et 120 heures. Nous allons reprendre chaque système individuellement en se référant aux figures 26a et 26b ..

P7 : La coupe lithologique n'est pas connue, le forage est trop ancien. La valeur de la transmissivité par la méthode de Hantusch donne $T = 3,2 \cdot 10^{-4}$ m²/s, par la méthode de Jacob : $T = 5 \cdot 10^{-4}$ m²/s et avec celle de Porchet (constante = 8) $T = 7 \cdot 10^{-4}$ m²/s seul forage équipé d'un piézomètre situé à 100 m du puits. Il permet l'estimation du coefficient d'emmagasinement.

$$S = 0,2 \% = 2 \cdot 10^{-3}$$

Cette valeur parait élevée pour une nappe captive, il est possible qu'il y ait passage de l'état captif à l'état libre dans l'aquifère supérieur.

P13 : Ce forage est profond de 250 m, le temps de pompage a été de 120 h et malgré tout, la stabilisation n'était toujours pas atteinte. Le géologue qui a suivi l'exécution de l'ouvrage a communiqué uniquement les résultats (interprétés par deux méthodes différentes).

- Méthode de Pouchan (caractérise les nappes hétérogènes)

$$T = 7,61 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

- Méthode de Jacob

$$T = 8,70 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

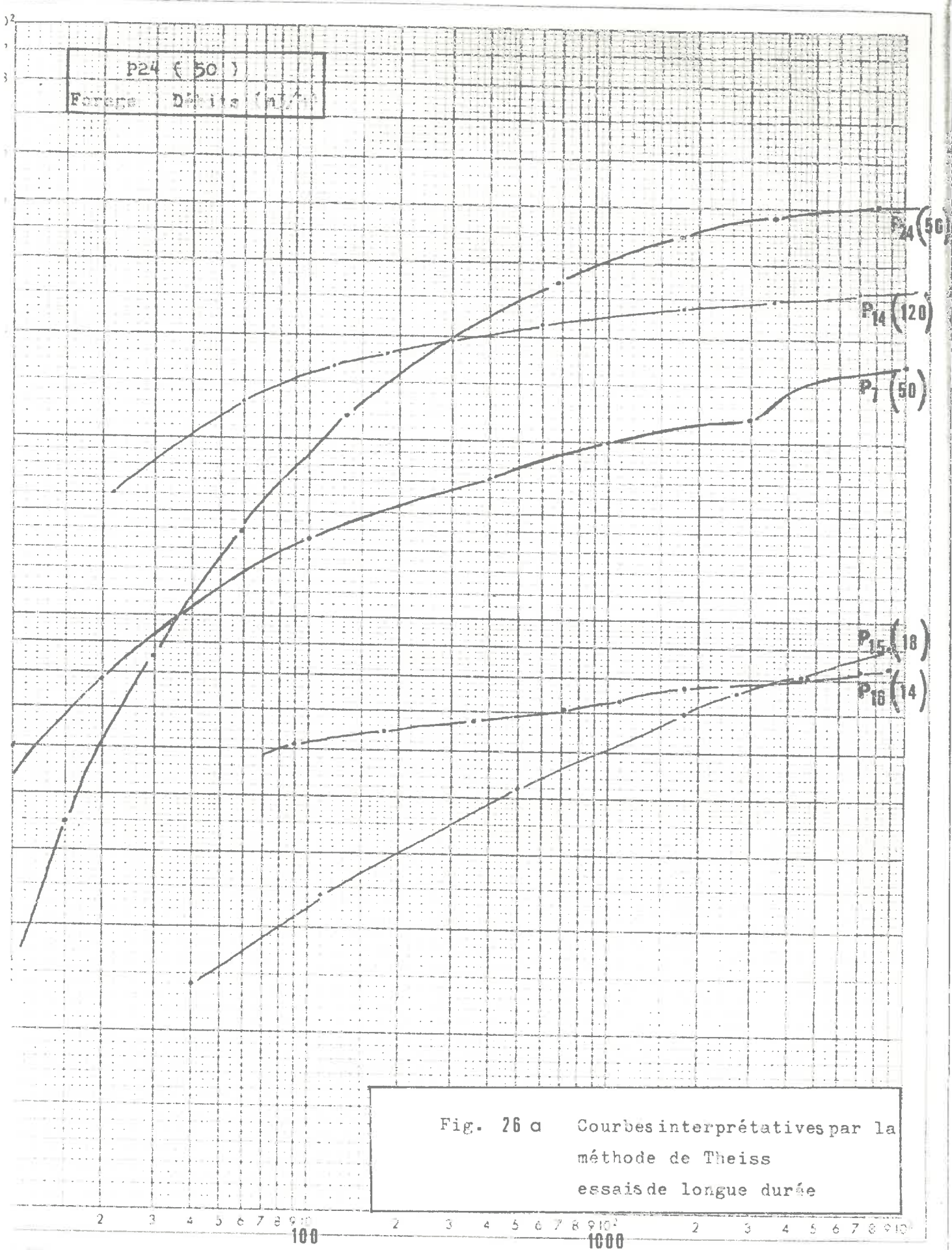


Fig. 26 a Courbes interprétatives par la méthode de Theiss essais de longue durée

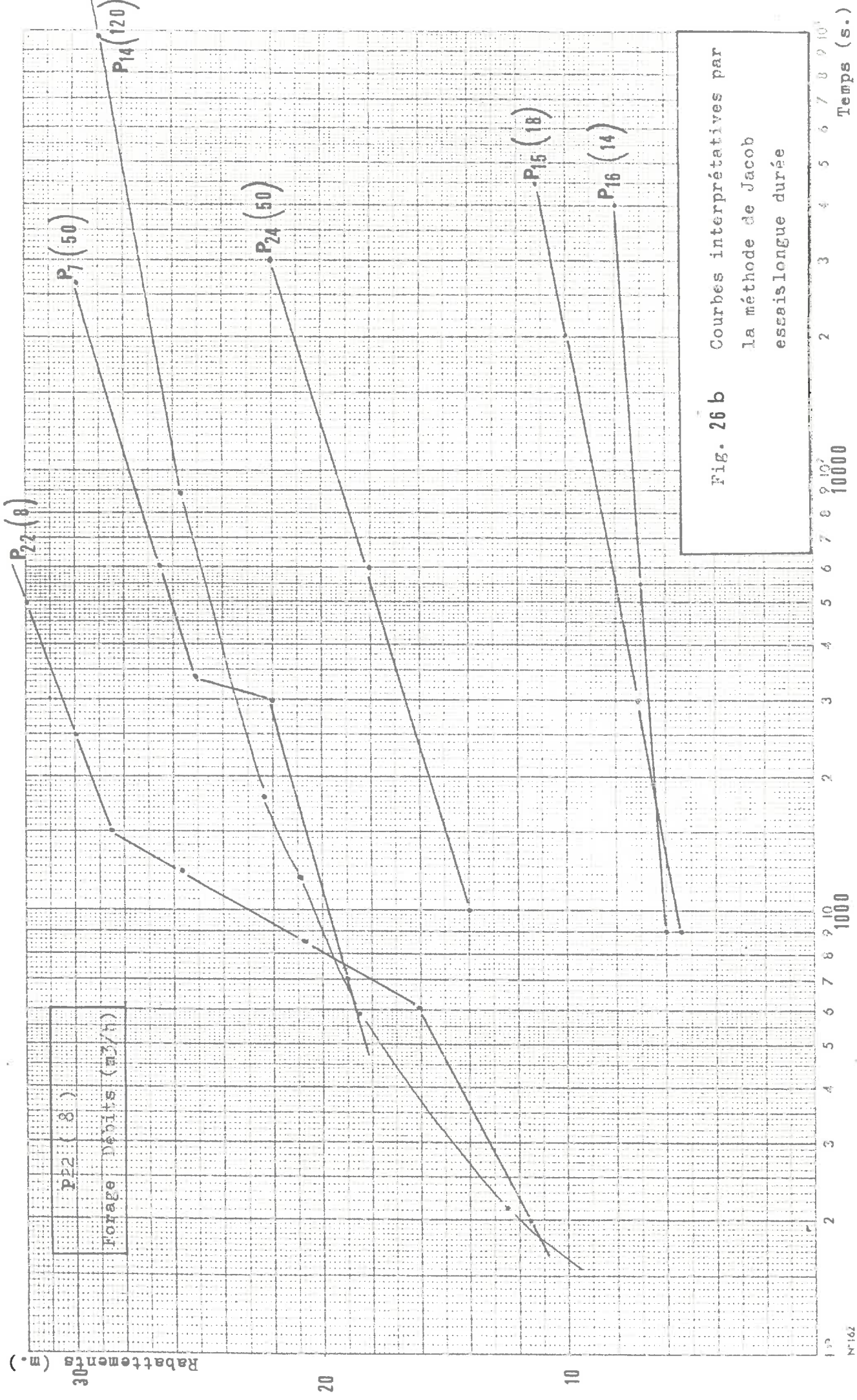


Fig. 26 b Courbes interprétatives par la méthode de Jacob essais longue durée

P14 : Ce forage de 250 m de profondeur atteint le substratum calcaire. Une coupe lithologique succincte a été dressée

- de 0 à 15 m : Vase
- de 15 à 85 m : saffre gris avec quelques niveaux argileux (aquifère)
- de 85 à 131 m : argile bleue et saffre gris argileux
- de 175 à 177 m : saffre gris (aquifère)
- de 177 à 252 m : saffre gris avec de nombreux lits argileux (aquifère)
- de 252 m : substratum calcaire.

Un tubage des 100 premiers mètres a été mis en place dans le but de :

- protéger le 1er horizon miocène de la nappe (15 - 80 m)
- favoriser un comportement de nappe captive.

Pendant les 31 heures de pompage, nous avons suivi le régime de la nappe profonde ce qui nous a permis de calculer la transmissivité :

$$T = 7.10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

La nappe superficielle est restée malgré tout dépendante de l'aquifère sous-jacente. Son niveau était directement fonction du temps de pompage et du débit. Cela constitue une preuve évidente de la non continuité des couches argileuses.

P15 : Forage de 250 m de profondeur. Le niveau piézométrique a été suivi en continu. L'essai s'est déroulé par pallier à débits croissants, mais sans atteindre la stabilisation. L'interprétation se borne à l'utilisation des méthodes simplificatrices en utilisant le premier pallier (3^h)

$$T = 2.10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

P16 : Le problème est le même que pour l'essai P15. Le résultat n'est pas très rigoureux

$$T = 4.10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

P22 : La coupe lithologique de ce forage donne :

- de 0 à 125 : argile bleue
- 125 à 138 : argile sableuse
- 138 à 144 : argile bleue

Nous avons une couche argileuse très épaisse de transmissivité négligeable mais recelant la réserve d'eau en quasi totalité et une strate d'eau conductrice peu épaisse détentrice de la transmissivité mais au coefficient d'emmagasinement presque nul.

Cela explique l'aspect de la droite de Jacob : on calcule la transmissivité à partir du dernier segment qui traduit une pseudostabilisation.

$$T = 1.10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

P'24 : La coupe lithologique peut se résumer ainsi :

- 0 à 70 m : saffre gris vert
- 130 à 160 m : argile bleue
- 160 à 200 m : saffre alternant avec des lits argileux
- 200 à 300 m : calcaire blanc (Barrémien)

Ce sondage et les travaux effectués par la suite ont montré :
- la discontinuité du Miocène sur le Barrémien.
- la présence d'un Barrémien très peu fracturé (les essais de pompages, ne sont que très légèrement améliorés quand on garde la série barrémienne).
- la qualité des eaux du Barrémien dans la position structurale qui est la leur ne peut servir à l'alimentation du syndicat (voir : hydrochimie). Cela a nécessité l'obturation de l'ouvrage à 200 m.

La transmissivité obtenue correspond uniquement à l'aquifère miocène.

$$\underline{T = 2.10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}}$$

Tous les résultats sont consignés sur les figures 27 et 28 selon les différentes méthodes.

Forage et temps de pompage \ Méthode	JACOE	HANTUSCH	BOULTON	Débit spécifique (m ³ /h/m)
P1 (1 h)	5,6 . 10 ⁻⁵	1,9 . 10 ⁻⁵	1,7 . 10 ⁻⁵	0,3
P2 (3 h)	3,6 . 10 ⁻⁴	-	2,8 . 10 ⁻⁴	1,7
P5 (2 h)	6,3 . 10 ⁻⁴	-	7,2 . 10 ⁻⁵	0,67
P6 (2 h)	3,1 . 10 ⁻⁴	-	1,0 . 10 ⁻⁴	0,99
P10 (5 h 12 mn)	4,8 . 10 ⁻⁴	-	2,9 . 10 ⁻⁴	2,58
P11 (3 h 15 mn)	5,9 . 10 ⁻⁴	-	8,8 . 10 ⁻⁵	1,31
P12 (1 h)	1,8 . 10 ⁻⁴	-	-	1,28
P18 (1 h)	8,9 . 10 ⁻⁴	-	-	2,33
P23 (48 h)	-	-	-	0,08
P29 (1 h)	1 . 10 ⁻⁴	-	-	0,27
P57 (1 h 15)	4,2 . 10 ⁻⁴	-	-	1,16
P7 (12 h 30)	5 . 10 ⁻⁴	3,2 . 10 ⁻⁴	-	1,85
P13 (120 h)	8,7 . 10 ⁻⁴	-	-	3,54
P14 (30 h)	1,2 . 10 ⁻³	-	-	3,33
P15 (10 h)	3,0 . 10 ⁻⁴	1,3 . 10 ⁻⁴	2,5 . 10 ⁻⁴	1,5
P16 (24 h)	5,4 . 10 ⁻⁴	3,1 . 10 ⁻⁴	3,6 . 10 ⁻⁴	1,65
P22 (41 h)	1,2 . 10 ⁻⁵	-	-	0,24
P'24 (32 h)	2,4 . 10 ⁻⁴	-	1,0 . 10 ⁻⁴	1

Fig. 27 Valeurs comparatives des transmissivités (m²/s) calculées par différentes méthodes (quand elles ont pu être appliquées).

Forages	Profondeur (m.)	Perméabilité (m/s)	Transmissivité (m ³ /s)
P1	150	$8,6.10^{-7}$	$1,23.10^{-4}$
P2	150	$4,3.10^{-6}$	$6,46.10^{-4}$
P5	130	$1,89.10^{-6}$	$2,53.10^{-4}$
P6	130	$2,92.10^{-6}$	$3,89.10^{-4}$
P10	206	$4,99.10^{-6}$	$1,04.10^{-3}$
P11	170	$3,09.10^{-6}$	$5,23.10^{-4}$
P12	85	$2,24.10^{-6}$	$1,93.10^{-4}$
P18	100	$8,43.10^{-6}$	$8,5.10^{-4}$
P22	230	$3,44.10^{-7}$	$9,46.10^{-5}$
P23	140	$3,44.10^{-7}$	$3,75.10^{-5}$
P29	120	$6,88.10^{-7}$	$7,9.10^{-5}$
P57	120	$4,3.10^{-6}$	$5,23.10^{-4}$
P7	170	$4,64.10^{-6}$	$7,9.10^{-4}$
P13	250	$5,33.10^{-6}$	$1,32.10^{-3}$
P14	250	$5,16.10^{-6}$	$1,29.10^{-3}$
P15	250	$2,23.10^{-6}$	$5,75.10^{-4}$
P16	230	$2,41.10^{-6}$	$5,68.10^{-4}$
P'24	200	$2,06.10^{-6}$	$4,13.10^{-4}$

Fig.28 Résultats obtenus à partir de la méthode de PORCHET.

. Valorisation des résultats

1. Quelle que soit la méthode employée, il est toujours possible de trouver une valeur de la transmissivité. Il était important de savoir s'il existait un hiatus entre les différentes méthodes, et si de tels modèles théoriques étaient suffisamment spécifiques pour ne correspondre qu'à un seul type d'aquifère. Par la fig. 29 on met en évidence :

- un écart réduit entre les valeurs trouvées par les différentes méthodes (facteur 0 à 5) ;
- une méthode de Boulton, qui de façon relative, sous-estime la transmissivité ;
- les méthodes de Jacob et Porchet donnent des résultats du même ordre de grandeur.

2. Rousselot a proposé une loi de distribution des perméabilités et des transmissivités (Log-normal) ; à partir de nombreux exemples pris dans toutes sortes d'aquifères, il s'est avéré que la loi s'applique lorsque le nombre de données est assez grand. J'ai utilisé cette méthode (fig. 30). On met en évidence :

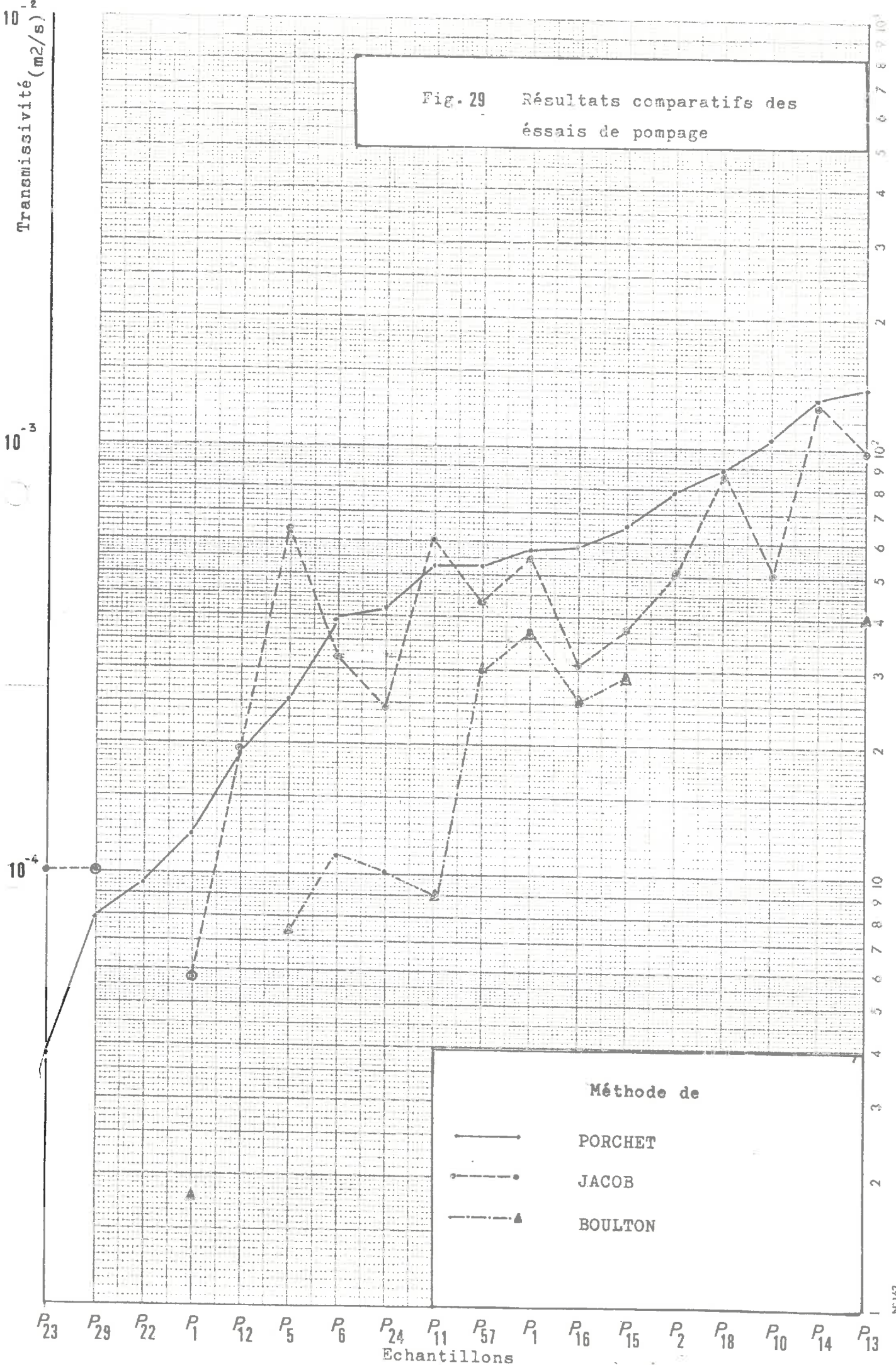
a - la présence de deux ensembles de points admettant chacun une droite de corrélation. Serait-ce deux aquifères différents ? Si l'on souligne les forages construits dans la zone du "horst de Loriol du Comtat", on s'aperçoit qu'ils sont tous dans la deuxième partie de la courbe. Cela tend à prouver que le Miocène en contact direct avec l'Urgonien a tendance à se comporter comme un aquifère. On peut à nouveau parler de suralimentation par les calcaires karstifiés.

4. Carte des Q/s^* (fig. 31)

Cette carte a été établie à partir de 60 essais qui ont pu être interprétés. Il a été préférable de créer un ensemble de classes plutôt que de chercher à tracer une carte d'iso-débit spécifique.

* Q/s = débit spécifique

Fig. 29 Résultats comparatifs des essais de pompage



13* pompage d'essai sur le horst de Loriol

5 pompage d'essai pour un substratum profond

nombre de valeurs = 18

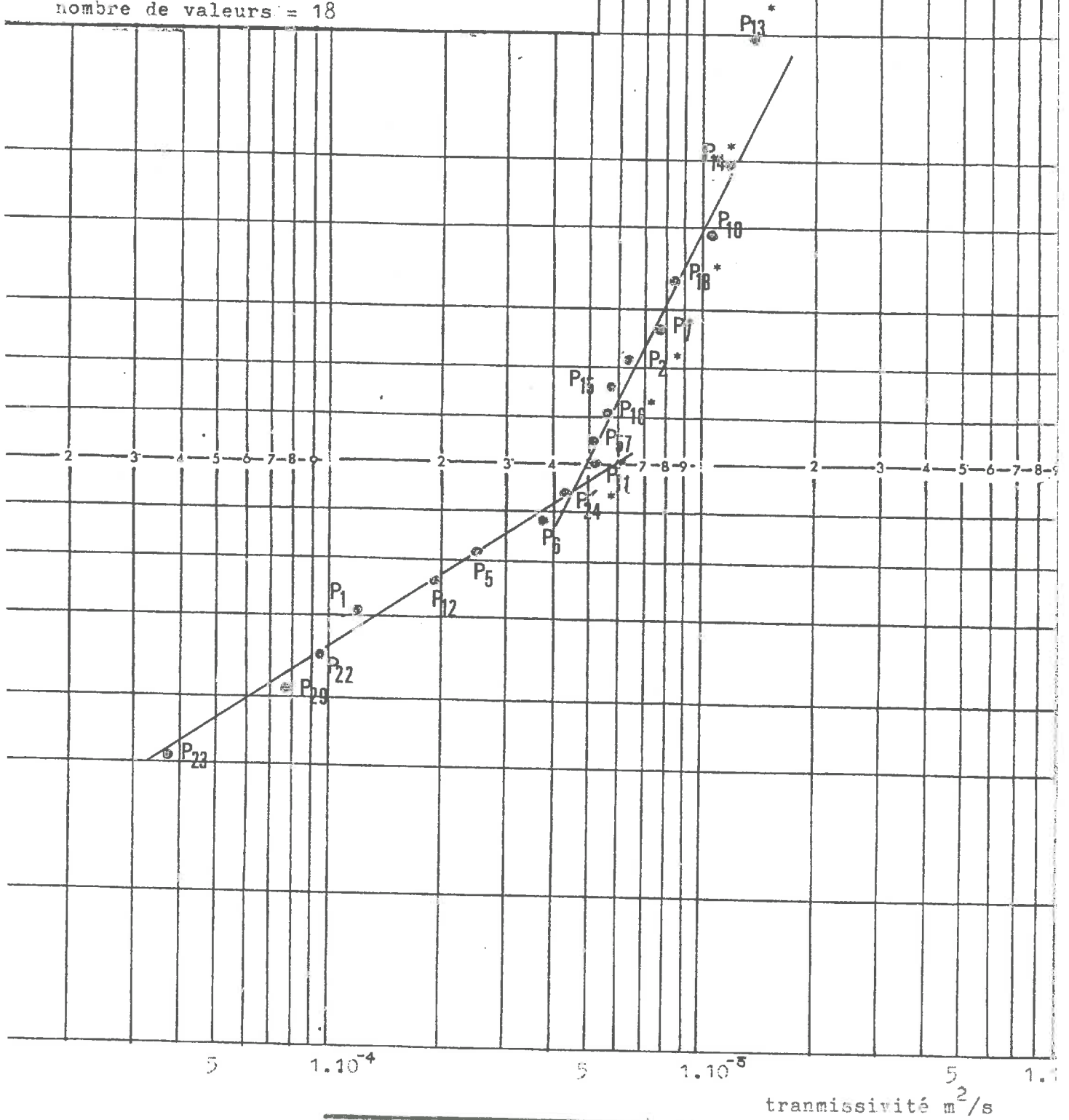


Fig. 30 Distribution des transmissivités suivant une loi Log normal dans l'aquifère miocène de Carpentras. Mise en évidence d'une alimentation par le karst.

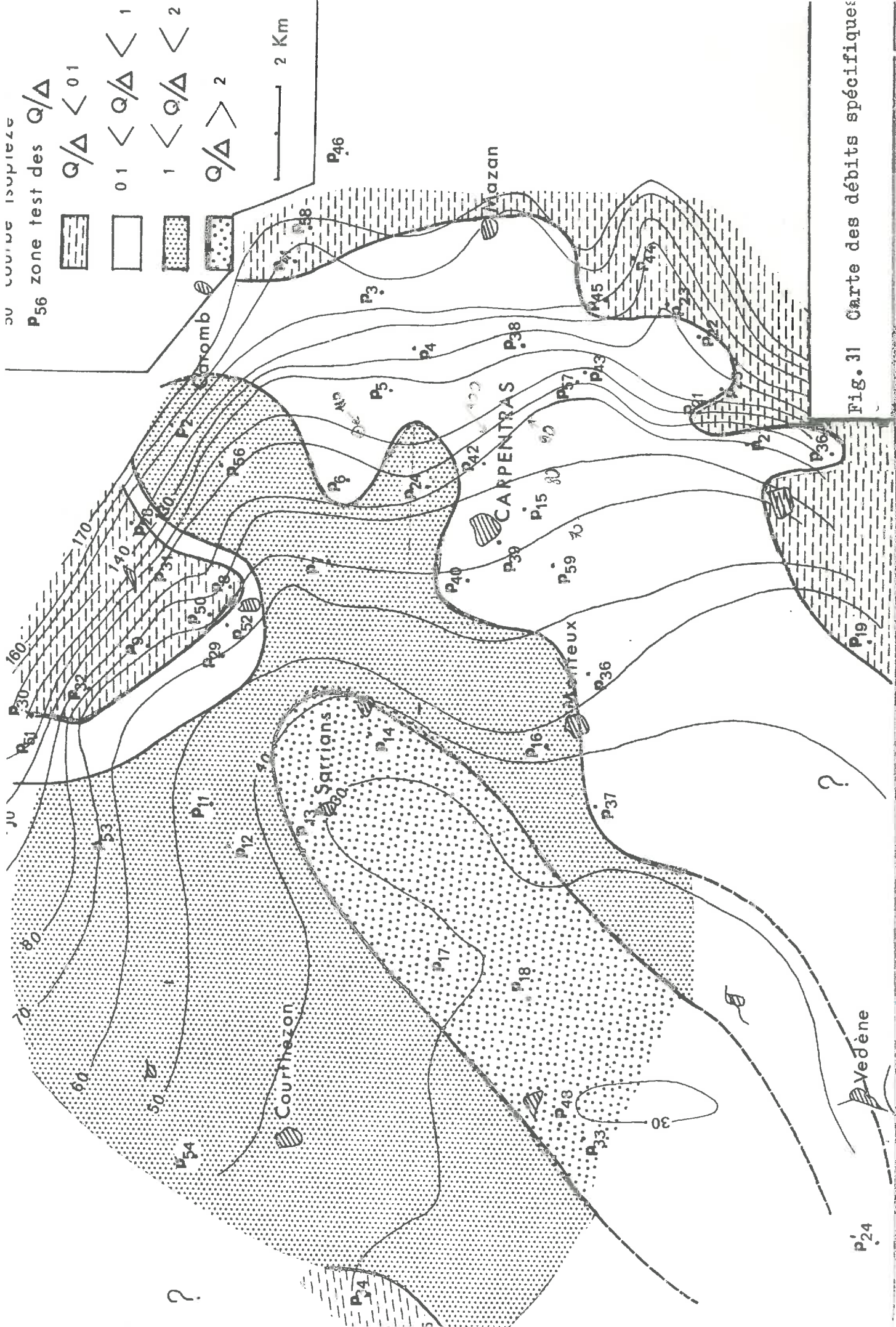


Fig. 31 Carte des débits spécifiques

On distingue :

- une zone centrale orientée N45 aux $Q/s > 2$. La partie Sud n'a pu être prolongée par manque de données. Les limites ne sont pas définitivement fixées, (la dimension des mailles reste grande). Plus qu'une illusoire précision dans les mesures, nous nous sommes attachés à bâtir un ensemble homogène synthétisable à l'échelle du bassin. L'orientation N45 retrouvée sur cette carte est la même que les directions des filets d'eau de la carte piézométrique; c'est aussi la même que la direction des accidents majeurs. Les courbes piézométriques déformées interprétées comme un axe de drainage sont incluses dans cette zone à fort débit spécifique. La relation piézométrique - perméabilité est frappante.

- une zone aux $1 < Q/s < 2$. La limite est assez floue : elle entoure la zone précédente et une digitation de direction N45 se prolonge jusqu'à l'extrémité N.E. du bassin. Sur la fig.10 où est représenté sommairement la géologie, on s'aperçoit que sur la partie NE du bassin les calcaires crétacés ne sont pas recouverts par la série Eocène-Oligocène. On peut avancer l'hypothèse d'une continuité du Horst de Loriol jusqu'à cette limite Nord-Est. Sur ce horst, on a une alimentation directe du saffre helvétique par l'Urgonien, ce qui se traduit sur la carte des Q/s par :

- la zone centrale : très bonne alimentation dans un sédiment miocène possédant une bonne perméabilité : $Q/s > 2$
- la digitation : très bonne alimentation mais dans un sédiment miocène plus argileux (nous sommes en bordure du bassin) $1 < Q/s < 2$. Pour un éventuel forage dans le horst, il serait donc préférable de s'installer le plus au Nord de façon à traverser la série miocène sur son épaisseur la plus faible.

• une zone aux $0,1 < Q/s < 1$ s'étalant en direction de l'Est et du Sud-Est. Elle marque la fermeture du bassin. Comme nous l'avons mentionné, les isopièzes espacés ne laissaient pas prévoir un tel résultat. Mais les débits d'exhaure restent très faibles et par conséquent la transmissivité sera d'autant plus faible.

Un total de 2,7 m prouve que cette zone entièrement consacrée aux cultures maraichères a une nappe superficielle très bien alimentée, se rechargeant en période estivale. L'utilité des forages profonds ne se fait pas sentir.

b. Zone Nord-Ouest (fig. 16) (surface évaluée à 120 km²)

L'alimentation de la nappe par l'ouvrage ne sera pas envisagée car je ne possède aucune donnée. Malgré tout, il y a relation, prouvée par une baisse de niveau de la nappe phréatique depuis que le lit de l'Ouvèze sert à l'extraction de granulats.

Mois / Paramètre	J	F	M	A	M	J	Ju	A	S	O	N	D
Précipitation	52,1	68,7	57,8	64	66,7	58,6	28,7	40,5	86,9	67,2	51,2	53,9
Canal de Carpentras	0	0	38	59,5	71,5	76,9	75,5	56,6	52,2	8,7	0	0
Total	52,1	68,7	95,6	123,5	138,2	135,5	104,2	97,1	139,1	76	51,2	53,9
E.T.P.	22,77	31,77	54,06	88	120	143,7	162,5	140	95	57,5	31,26	20,6
Eau disponible	+29,4	+36,9	+41,5	+35,5	+18,2	91,8	33,5	-9,4	34,7	53,2	73,2	+5,2
TOTAL DE L'EAU DISPONIBLE = 166,7 mm												

Un total de 166mm montre que la nappe a une alimentation indépendante des précipitations dans la sens où le débit prélevé par le canal de Carpentras à la Durance est constant. Dans cette région, quand la nappe existe, elle est assez bien alimentée et ne nécessite que rarement l'usage de forages.

- une dernière zone aux $Q/s < 0,1$ caractérise les sédiments essentiellement argileux. Elle se localise à la périphérie du bassin, là où les courbes isopièzes sont le plus resserrées : région Aubignan, Pernes, St-Didier, Châteauneuf du Pape. C'est aussi là qu'ont été reconnus par forage les plus épaisses séries argileuses. 150 à 180 m d'argiles bleues en couches continues.

Il y a donc un mimétisme parfait entre géologie - piézométrie et la carte des Q/s.

D. CONCLUSION PARTIELLE - ESSAI DE BILAN

1 - Bilan global des infiltrations dans la nappe phréatique

Il était nécessaire d'individualiser 3 zones en fonction des différentes alimentations :

- zone Sud : précipitations + canal de Carpentras + réseau des Sorgues
- zone N.O : " + canal de Carpentras
- zone Est : "

L'eau infiltrée sera le résultat de la différence entre :

- la somme des différents modes d'alimentation et l'E.T.P.. (valeur potentielle pour une région donnée, elle n'est pas fonction des précipitations).

a. Zone Sud (fig. 10) (surface évaluée à 110 km²)

Mois / Paramètres	J	F	M	A	M	J	Ju	A	S	O	N	D
Précipitation	52,1	68,7	57,8	64	66,7	58,6	28,7	40,5	86,9	67,2	51,2	53,9
Canal de Carpentras	0	0	19	27	33	33	36	35	26	24,5	4	0
Sorgues	0	0	243	438	535	487	316	219	195	170	0	0
Total	52,1	68,7	319,6	525	634,7	578	380,7	294,5	307,5	262	55,2	53,9
E.T.P.	22,77	31,77	54,06	88	120	143,7	162,5	140	95	57,5	31,26	20,6
Eau disponible	29,33	36,93	373,6	437	514,7	434,3	218,2	154,2	212,5	204,5	23,9	33,9
TOTAL DE L'EAU DISPONIBLE = 2690 mm												

c. zone Est (fig. 16) (surface voisine de 120 km²)

Elle est alimentée uniquement par les précipitations (25 mm/an). La baisse du niveau est immédiate pour une année déficitaire (phénomène ressenti depuis 1979). Cela a pour conséquence un accroissement des forages dans le Miocène, et on peut supposer que l'eau de ces forages sert à alimenter l'eau de la nappe phréatique.

2 - Conclusions partielles

- l'homme, par ses canaux, alimente directement la nappe phréatique, les précipitations n'ont qu'un rôle mineur. La preuve est donnée par une baisse du niveau piézométrique dans les puits en période hivernale alors que les précipitations sont maximales.
- cette nappe superficielle selon sa potabilité, son épaisseur, sa perméabilité conditionne directement la construction d'ouvrages profonds.
- Il existe une analogie entre la piézométrie , la répartition des débits spécifiques et la géologie. Chaque graphique met en valeur l'auréole argileuse : (argile, transmissivités faibles, gradients hydrauliques élevés) et le horst de Loriol du Comtat (saffre, transmissivités élevées, gradients hydrauliques faibles).
- Mise en évidence d'une suralimentation par l'Urgonien (piézométrie-Loi Log-normal).

3 - Essai de bilan chiffré

a - Précipitations

- . Bassin de Carpentras : $9 \cdot 10^6$ m³/an
- . Monts de Vaucluse : $600 \cdot 10^6$ m³/an

b - Canal de Carpentras : $90 \cdot 10^6$ m³/an

c - Réseaux des Sorgues : $500 \cdot 10^6$ m³/an

Ce débit correspond à celui de la fontaine de Vaucluse qui est le principal exutoir des Monts de Vaucluse. On s'aperçoit que l'eau disponible sur les Monts de Vaucluse est du même ordre de grandeur que celle de la source.

d - Prélèvements

Sur trois territoires de 3,14 km², nous avons systématiquement dénombré tous les forages ainsi que les débits pompés. A partir de cela on a extrapolé une valeur globale du débit d'exhaure.

$$Q = 20 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$$

e - Écoulement de la nappe

La seule sortie se fait au niveau de Bédarrides-Sorgues

$$Q = T i l$$

$$T = 1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$i = 10/2,5 \cdot 10^3$$

$$l = 8 \text{ km}$$

$$Q = 0,1 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$$

f - drainance

Simple à calculer pour un schéma théorique , elle devient approximative pour un aquifère aussi compartimenté. Nous donnerons une valeur estimative :

$$Q = K S \frac{AH}{Ab}$$

$$K = 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$S = 100 \cdot 10^6 \text{ m}^2 \text{ (valeur arbitraire)}$$

$$AH = 5 \text{ (arbitraire)}$$

$$Ab = 250 \text{ (moyenne)}$$

$$Q = 6 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$$

HYDROCHIMIE

Les méthodes géochimiques permettent de construire une fiche d'identité pour chaque type d'eau. A l'origine, à un âge relatif, s'ajoutent de nombreux renseignements sur les modes et les temps de circulation.

Des temps de circulation suffisamment longs permettent à l'eau de se mettre en équilibre avec le milieu dans lequel elle circule (calcaire, sable, argile ...) et des échanges s'effectuent tout au long de son trajet. Pour une interprétation cohérente, il était nécessaire de posséder une quantité importante d'analyses réparties de façon homogène : la D.A.S.S.* et le C.R.G.* de Thonon nous les ont fournies.

Cependant, si l'aspect scientifique est important, il ne faut pas oublier que le chimisme est aussi et surtout le principal critère de potabilité d'une eau, point essentiel pour un syndicat des eaux.

1. CARACTERISTIQUES CHIMIQUES GENERALES

Le nombre d'analyses chimiques que nous avons pu acquérir a guidé notre classification.

C'est au total 150 analyses chimiques qui ont été réalisées, dont :

. 30 analyses faites par le C.R.G. de Thonon avec :

- un examen physique : PH - résistivité

- une analyse chimique : SiO_2 , Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+ ,

NH_4^+ , Sr^{++} , Cl^- , SO_4^{--} , HCO_3^- ,

NO_3^- ; NO_2^-

* D.A.S.S. : Direction des affaires Sanitaires et Sociales

* C.R.G. : Centre de Recherche géodynamique

. 120 analyses type II de la D.A.S.S. ou analyses de surveillance avec :

- un examen physique : Turbidité, résistivité, pH, couleur, odeur, saveur.
- une analyse chimique : oxydabilité en milieu alcalin, D.T. , T.A.C. , NH_4^+ , Fe^{++} , NO_3^- , NO_2^- , Cl^- , SO_4^{--}
- une analyse bactériologique : dénombrement des germes sur gélose, colimétrie, dénombrement des streptocoques fécaux, dénombrement des clostridium sulfito-réducteurs.

Le seul diagramme qui permet d'avoir une vision globale des eaux de la nappe est celui de Piper (U.S. Geological Survey). Les diagrammes de Schoeller et Berkoloff qui, s'ils sont plus précis, manquent de souplesse et deviennent rapidement limitatifs.

A - DIAGRAMME DE PIPER - ANALYSES COMPLETES (fig.32)

1. Généralités

Pour les 30 premières analyses , nous avons construit un diagramme triangulaire* avec aux trois pôles, les radicaux suivants :

- un pôle carbonaté calcique : Ca^{++} , HCO_3^-
- un pôle sulfaté magnésien : Mg^{++} , Sr^{++} , SO_4^{--}
- un pôle chloruré sodique : Na^+ , K^+ , Cl^- , N

Le résultat est illustré par la Fig.32

Les commentaires suivants s'imposent :

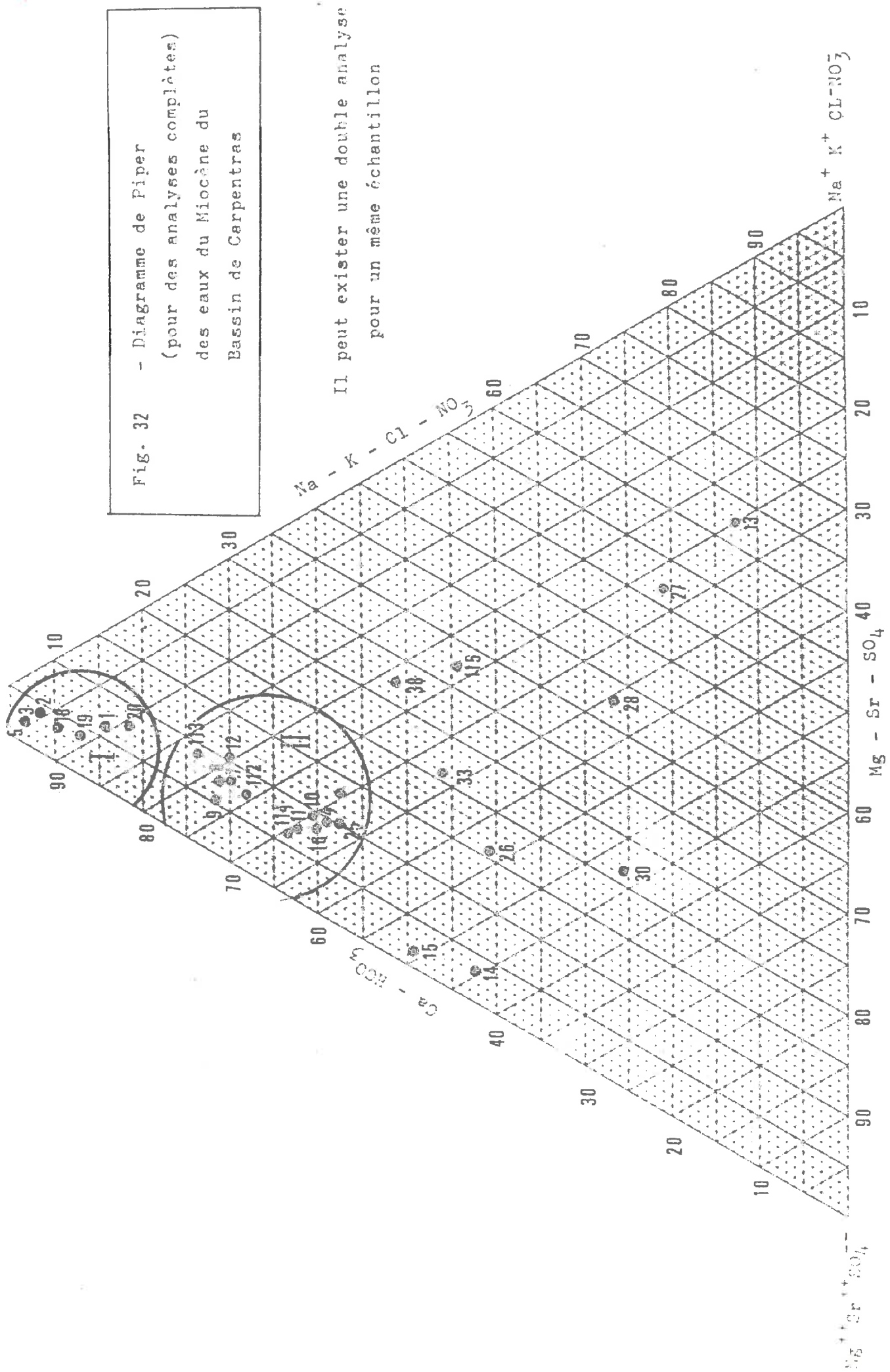
2. Résultats

La grande majorité des échantillons se positionnent sur une ligne Mg - Ca, avec une participation du pôle sodique inférieure ou égale à 20 % et une participation du pôle magnésien inférieure à 50 %.

* chaque analyse a été numérotée et positionnée sur la fig. 37 et 43b

*° les pourcentages se font à partir des concentrations établies en meq/l

Fig. 32 - Diagramme de Piper
 (pour des analyses complètes)
 des eaux du Miocène du
 Bassin de Carpentras



Dans cet ensemble, deux groupes s'individualisent et traduisent l'évolution d'un pôle calcique vers un pôle magnésien. Cette évolution est classique, elle est liée au temps de séjour dans l'aquifère.

Le calcium est en partie fixé par la matrice argileuse de l'aquifère qui libère une quantité équivalente de magnésium (au même titre que les teneurs en Silice qui croissent conjointement). Dans un second temps, l'aboutissement des échanges de base entraîne la fixation des alcalinos terreux : (Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Sr⁺⁺) par les argiles qui libèrent les calcalins faisant évoluer l'eau vers un pôle (Na - K).

Dans le bassin de Carpentras se superposent d'autres phénomènes liés, soit à la nature géologique du substratum, soit à l'activité humaine.

. Le gypse oligocène connu sur la bordure du bassin ne peut qu'entraîner de façon proportionnelle un décalage vers le pôle (Mg, Sr, SO₄).

. La présence de chlorure (n° 13 - 27) permet de supposer la présence du Trias salifère (connu à quelques kilomètres à l'affleurement : massif de Suzette) à faible profondeur.

Deux groupes d'eaux sont bien individualisés sur ce graphique.

Les autres valeurs se répartissent de façon beaucoup plus anarchique.

Cela est normal dans le cadre d'un échantillonnage qui n'a pas été laissé au hasard : les échantillons (13 - 26 - 27 - 28 - 30) ont été choisis en fonction de leur position structurale.

a - le groupe I

Il est le plus proche du pôle bicarbonaté calcique et pose un problème intéressant. Il comprend à la fois des eaux issues du karst crétacé : N° 3 et 5 et des eaux issues des sables siliceux du Crétacé supérieur (sables blancs n° 2 - 9 - 18) et Sablons (n° 1 - 20). Les seules différences significatives concernent la silice, le sodium et les sulfates.

N°	SiO ₂	Na	SO ₄
1 - 20	10,21	6,12	27,4
18	8,68	2,47	18,3
2 - 19	9,18	3,44	23,1
3	6,32	1,19	3,14
5	5,72	1,37	7,22
eau de pluie	—	—	10

Il est tentant d'établir une liaison entre les deux systèmes d'autant que les sables siliceux du Crétacé sont totalement décarbonatés et décalcifiés).

b - le groupe II

Il ne comprend que des eaux du Miocène. Cette concentration de points correspond-elle à un groupe bien individualisé caractérisant un aquifère homogène ou reflète-t-elle le résultat de données trop fragmentaires ?

c - valeurs dispersées

On peut dire que l'échantillonnage ne peut occasionner une discussion valable sur la répartition et peut être l'évolution des différentes valeurs.

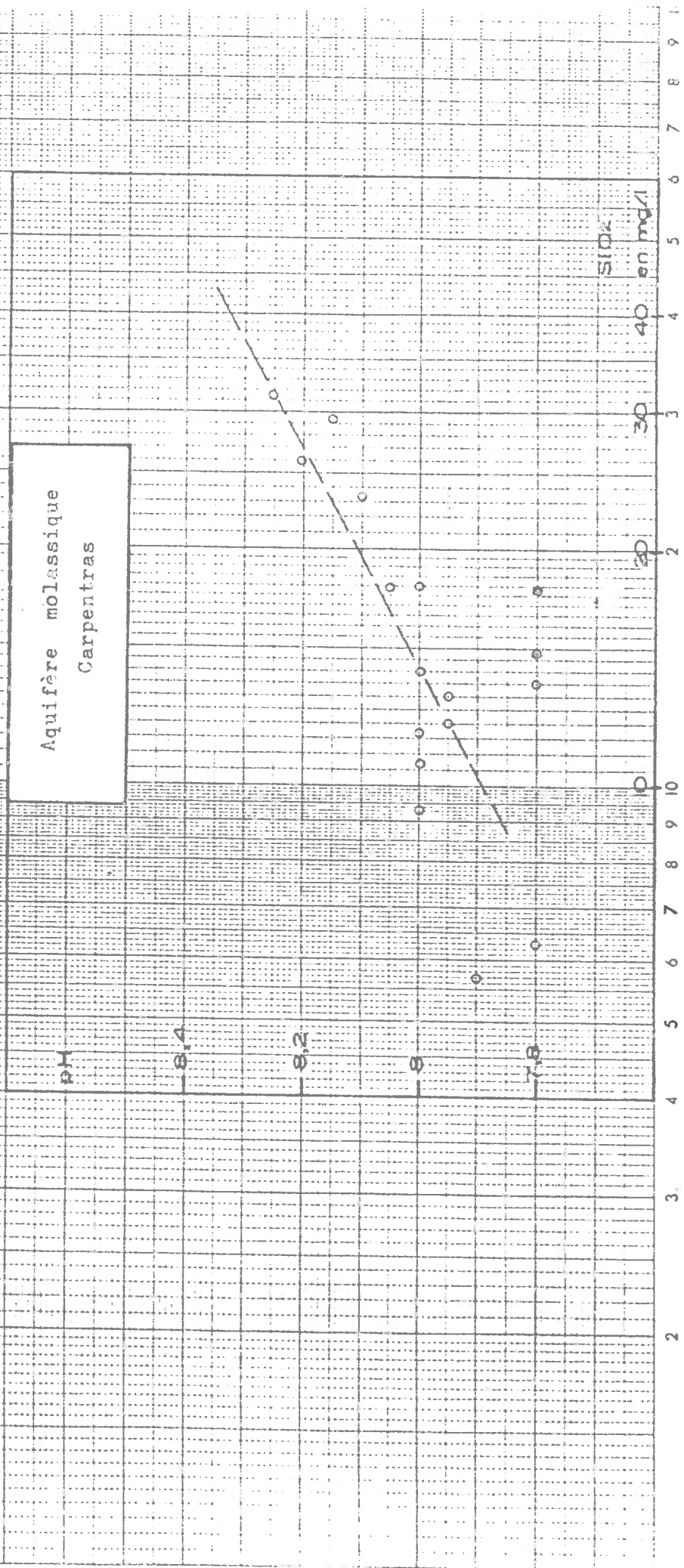
B - QUELQUES PHENOMENES OBSERVES A PARTIR DE CERTAINS ELEMENTS

1. Teneur en silice

Les teneurs en silice sont très variables (minimum 6,32 mg/l n°3 maximum 31,4mg n°14) . Sur la figure 33 on a reporté la relation entre la silice et le pH, la corrélation est évidente ($r = 0,81$) et une mesure sur place du pH devrait améliorer encore cette relation.

Par contre si cette relation existe, elle ne correspond pas à un phénomène fréquent ; généralement pour des pH inférieurs à 9 la concentration en SiO₂ ne subit pas de changements importants.

Fig.33 - Relation entre le PH et la teneur en silice



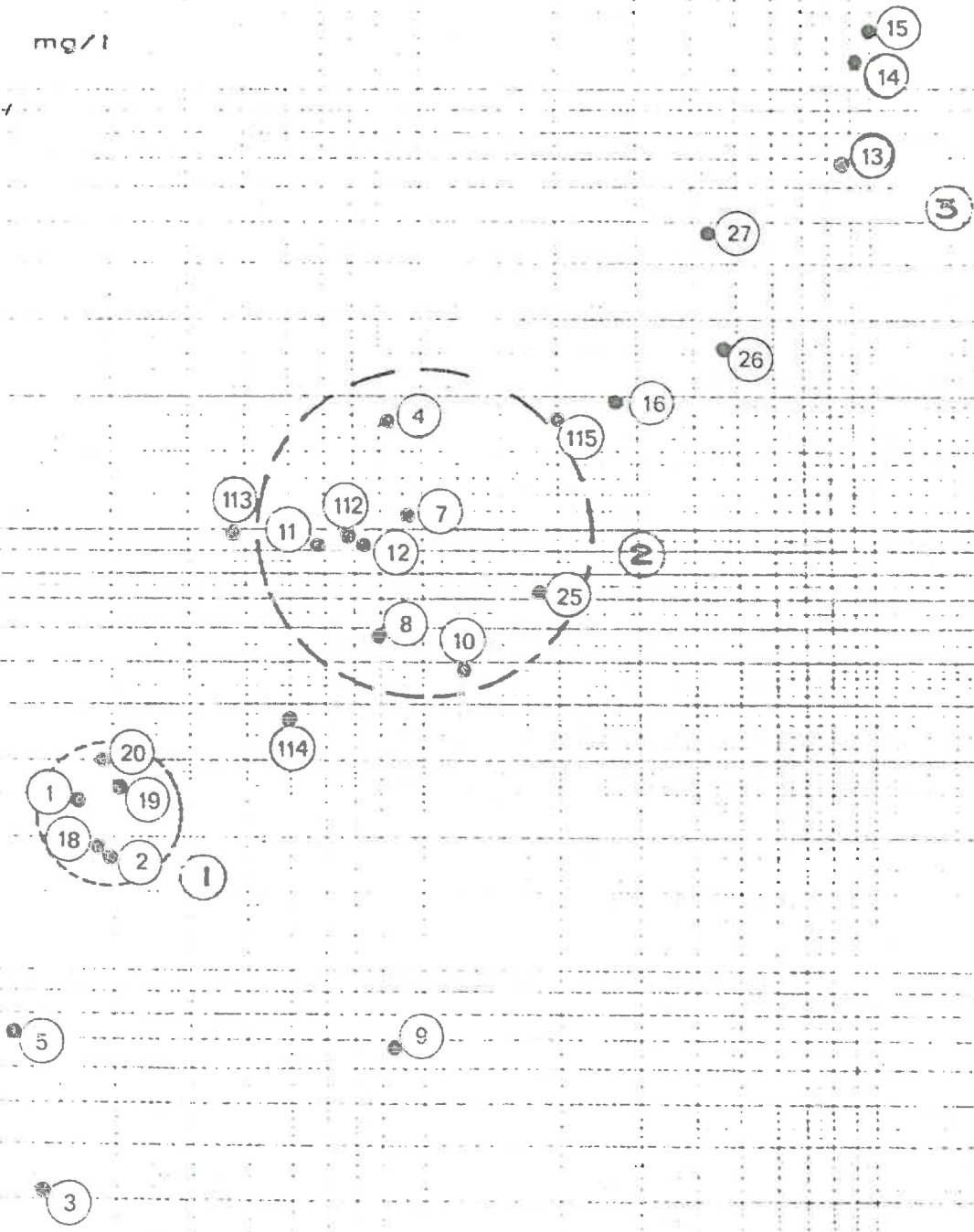
2 - Rôle des évaporites

Les évaporites de l'Oligocène sont caractérisées par des concentrations élevées en Strontium et une corrélation entre les sulfates et le strontium devrait permettre de différencier nettement nos trois groupes d'eau : la figure 34 illustre cette corrélation. On peut faire les remarques suivantes :

- les groupes I et II sont parfaitement individualisés mais l'eau n° 16 (forage Costat) se détache légèrement en direction du groupe 3 traduisant peut-être une contamination par le gypse oligocène ou une pollution des eaux de surface.
- dans le groupe I l'ensemble constitué par les sables blancs, les sablons et la source de Vacquières se distingue assez nettement de celui formé par les eaux du karst (n° 5 et n° 3) essentiellement à cause d'une augmentation de la teneur en sulfates.
- l'échantillon 9 pose un problème particulier avec une teneur en sulfates de 6,76 mg/l (confirmée par le bon équilibre de la balance ionique: $\sum \text{még}^+ = 5,783$ $\sum \text{még}^- = 5,693$). Cette concentration en sulfates, de même que celle en chlorures, se rapproche des concentrations à la sortie du karst.

	SO ₄	Cl
n° 9	6,76	5,47
n° 3	3,14	2,70
n° 5	7,22	3,34

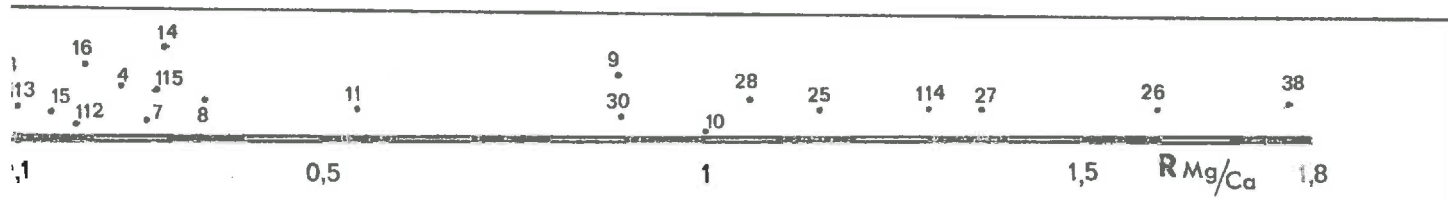
mg/l



1 10 Sr⁺⁺ en mg/l

Fig. 34 - Relation entre la teneur en sulfates et en ions Sr⁺⁺

3 - Le rapport $R_{Mg/Ca}$ permet de différencier des eaux "profondes" d'eaux plus "superficielles" et de mettre en évidence des mélanges.



- * eaux superficielles $R_{Mg/Ca} \approx 0,165$ (3,4,5,7,12,20,19,1,2)
- * eaux profondes $R_{Mg/Ca} \approx 0,715$ (8,9,10,11,13,25,26,27)
- * eaux miocènes ayant un $R_{Mg/Ca}$ se rapprochant de celles des eaux superficielles

(16) - Ce nouvel argument vient confirmer l'hypothèse d'une pollution par les eaux de surface.

(14 - 15) - l'eau provient en majeure partie de karst oligocène, et pour cette raison, les échanges peuvent être réduits.

(112 - 113 - 115) - un mélange est peut être possible avec des eaux de surface, mais une confirmation serait nécessaire par des mesures de tritium.

C - DIAGRAMME DE PIPER - ANALYSES PARTIELLES

1. Généralités

Les 120 analyses de type II sont représentées sur un diagramme de Piper à trois pôles (fig.35)

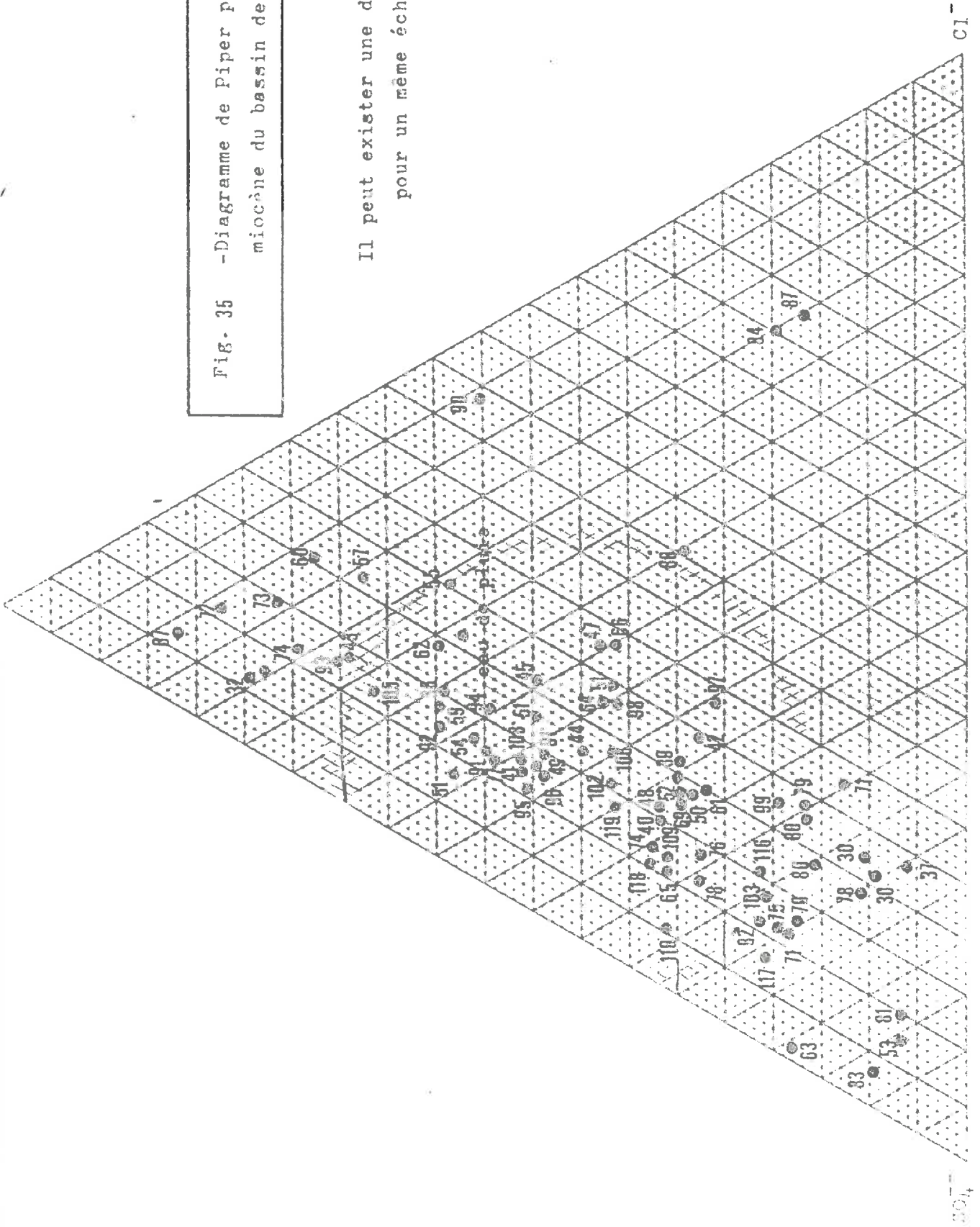
- un pôle sulfaté : SO_4^{--}
- un pôle carbonaté : HCO_3^-
- un pôle chloruré : Cl^-

2. Résultats

Les valeurs se répartissent sur une ligne HCO_3^- , SO_4^{--} sans qu'on ne puisse retrouver les groupes analogues à ceux de la fig.32

Fig. 35 - Diagramme de Piper pour des eaux
miocène du bassin de Carpentras

Il peut exister une double analyse
pour un même échantillon



La géologie tout d'abord, le bilan climatologique puis la piézométrie et la distribution des transmissivités ont mis en évidence l'alimentation du miocène par le karst urgonien. C'est de cette optique que nous expliquerons la fig. 35 .

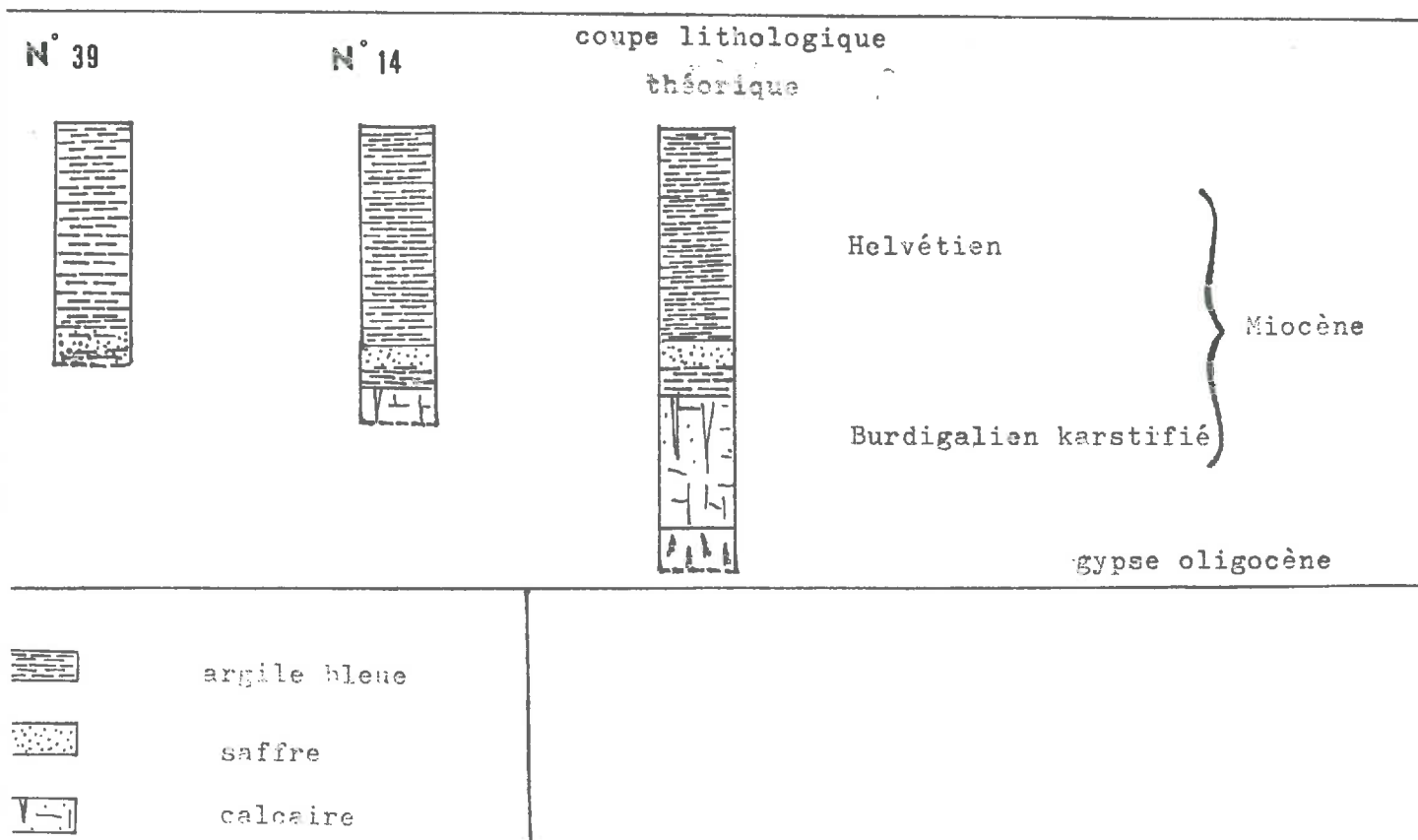
L'évolution se fait d'un pôle carbonaté (eau du karst) vers un pôle sulfaté. Quel en est le mécanisme générateur ?

a. Pôle sulfaté

- des échanges de base plus ou moins importants en fonction du temps de séjour dans l'aquifère avec les épaisses séries d'argile bleue (on connaît certaines séries d'argile bleue qui renferment des quantités non négligeables de soufre à l'état réduit).

- la présence d'évaporite : nous avons vu précédemment le rapport étroit entre la teneur en strontium et la concentration en sulfate. Cette hypothèse est plus vraisemblable, elle est confirmée par l'exemple qui suit.

Deux forages ont été construits à 500 m l'un de l'autre. La coupe lithologique est donnée sur le schéma qui suit.



La concentration en sulfate est la suivante :

n° 14 : 1120 mg/l

n° 39 : 170 mg/l

Dans l'ouvrage n° 14: Le karst burdigalien a été traversé (les sondes sont tombées dans des cavités avec perte du liquide injecté). De plus la proportion d'eau provenant du saffre helvétique est pratiquement nulle (pour une telle série argileuse, elle ne doit pas dépasser 1 à 2 m³/h) par rapport à celle provenant du Burdigalien qui est en contact avec le gypse oligocène (source des sulfates). On trouve 1120 mg de sulfate par litre (la concentration dans la norme française ne doit dépasser 250 mg/l).

Dans l'ouvrage n° 39: L'eau provient uniquement du miocène (donc de la série argileuse) avec possibilités d'échanges de base importants, la concentration en sulfate ne dépasse pas 170 mg/l.

L'influence des évaporites semble donc prépondérante et seule capable de faire passer la concentration en sulfate de quelques dizaines de mg/l à plus de 1 g/l. Les échanges de base influent dans des limites plus restreintes (quelques dizaines de mg/l).

De plus les échantillons du pôle sulfaté replacés dans un contexte géologique permettent de confirmer l'énoncé précédent. Les n° 83 - 53 - 37 - 63 se situent à la périphérie du bassin, près du contact Miocène-Oligocène.

b. Pôle carbonaté

Comme pour le pôle sulfaté en replaçant les échantillons dans leur contexte géologique, on s'aperçoit que les ouvrages correspondants aux n° 73 - 72 - 105 - 43 - 32 - 57 et 60, se répartissent sur la zone haute que nous avons nommé "horst de Loriol du Comtat", là où le miocène est en contact avec l'urgonien. Il semble bien que l'eau provienne directement du karst et par drainage alimente toute la série miocène : sur ce secteur on ne trouve que des valeurs faibles en sulfate mais égales quelle que soit la profondeur de l'ouvrage.

Les forages n° 43 - 32 - 60 qui sont en contact avec l'urgonien (profonds de 250 à 300 m) ne sont pas moins minéralisés.

Pour cet ensemble de points, on retrouve des analogies avec les eaux du karst n° 3 et 5 : la résistivité voisine de 2500 Ω/cm témoigne d'une faible minéralisation, d'un temps de parcours assez rapide dans le miocène (marqué par 1 R Mg/Ca se rapprochant des valeurs des eaux superficielles).

Sur la fig. 35a ont été reportés tout d'abord les teneurs en ions bicarbonatés en fonction du nombre d'individus.

L'histogramme est dissymétrique. Le mode se trouve à gauche (dissymétrie positive). 80 % de la population a une concentration en bicarbonate compris entre 20 et 30°F. (T.A.C.).

Sur la fig. 35a une relation pH, teneur en HCO_3^- a été tentée. Par rapport à la zone d'équilibre, la répartition des valeurs est symétrique, certaines eaux sont agressives, d'autres incrustantes.

2. DONNEES PARTICULIERES

A - CONCENTRATION EN SULFATES

1. Importance des sulfates

Nous avons vu l'importance du pôle sulfaté dans notre aquifère grâce au diagramme de Piper. Par la fig. 36, on s'aperçoit que la résistivité des eaux du bassin de carpentras est une fonction exponentielle de la concentration en sulfate.

.A.C. : Titre Alcamétrique Complet = 5 (HCO_3^- / en meq/l)

Histogramme des fréquences pour
un échantillon de 76 individus

26 36 46 56 TAC

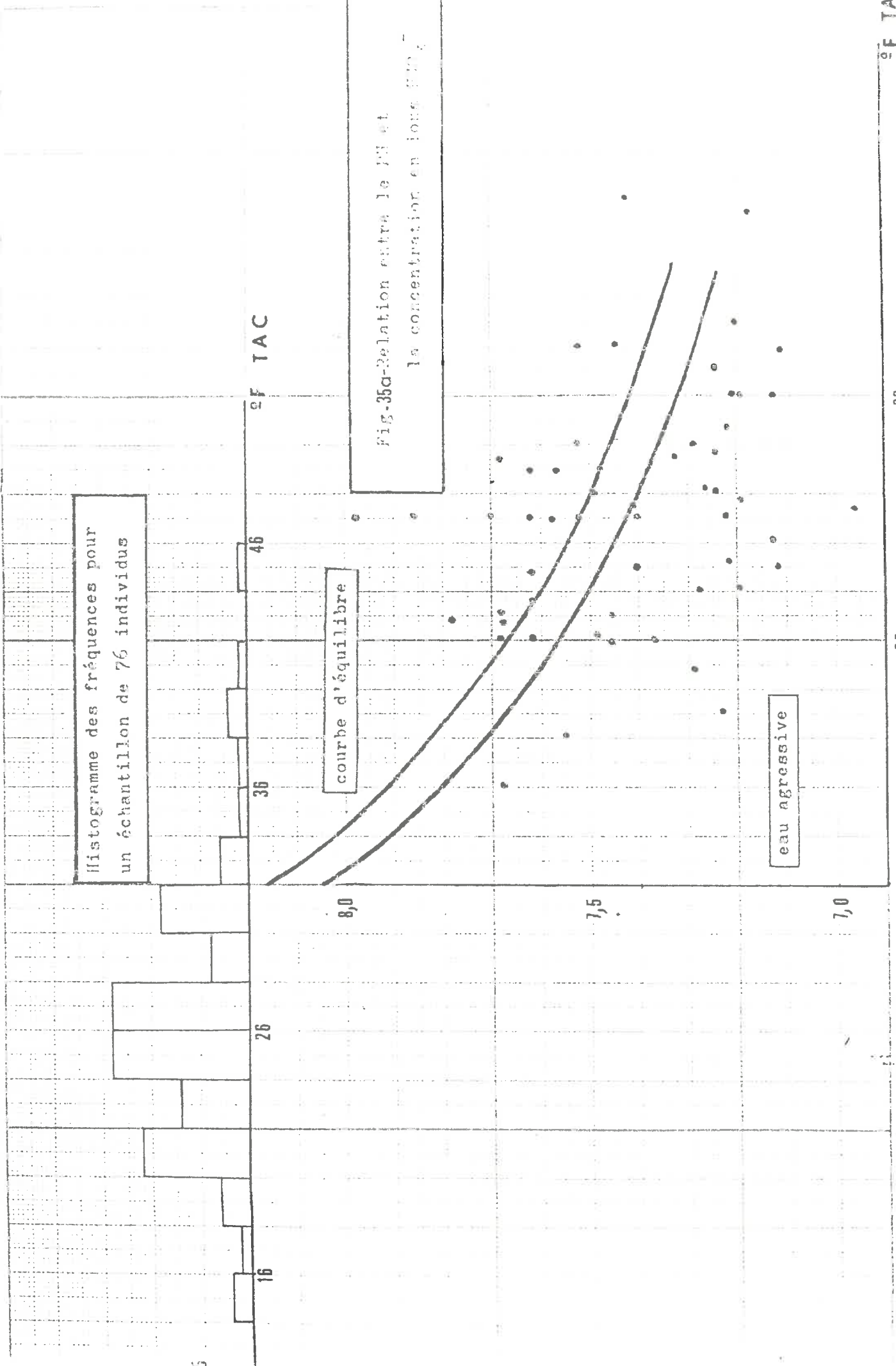
8,0
7,5
7,0

Fig.35a-Relation entre le PI et
la concentration en ions Ca^{2+}

eau agressive

20 30

20 30 TAC



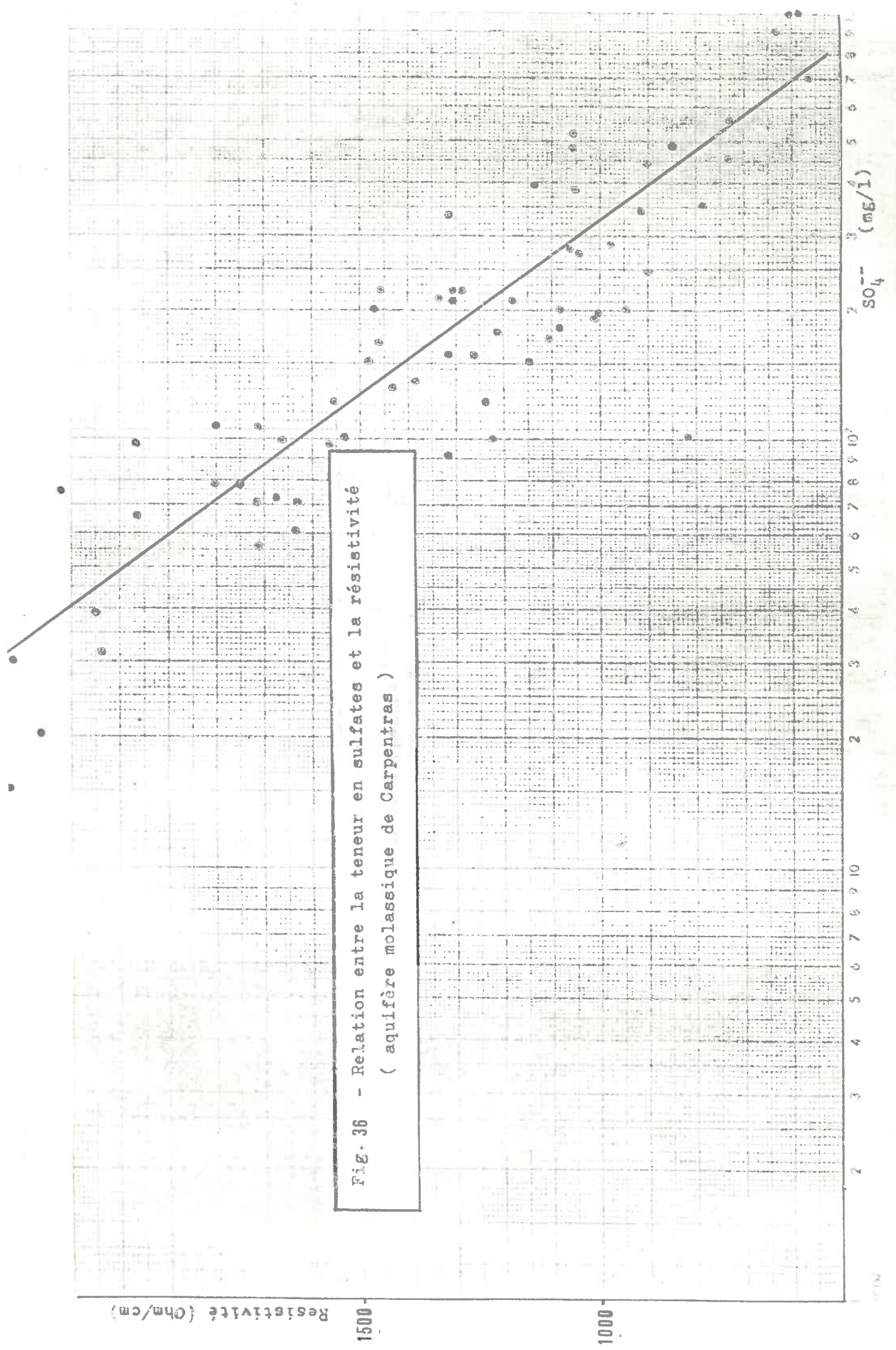


Fig. 36 - Relation entre la teneur en sulfates et la résistivité
 (aquifère molassique de Carpentras)

Un point s'écarte légèrement, nous verrons par la suite qu'il appartient à une zone où la concentration en chlorure est importante

2. Carte des sulfates (Fig. 37)

Les fortes concentrations nous ont amené à dessiner une carte de la répartition des teneurs en sulfates. On peut distinguer plusieurs zones.

. un secteur oriental qui cartographiquement se trouve superposé directement aux gypses oligocènes. Les teneurs dépassent fréquemment 1000 mg/l.

. plusieurs secteurs où les concentrations s'étalent entre 250 et 1000 mg/l sans qu'il soit possible de tracer des courbes d'isoteneur : différences dans la profondeur des forages, différences dans les perméabilités, nombreux découpages pouvant entraîner au grès d'une paléogéographie changeante, des différences dans la sédimentation du gypse oligocène, série argileuse pouvant avoir des concentrations importantes en sulfure et par oxydation donner des sulfates. Il est tout de même intéressant de remarquer un alignement entre les concentrations en sulfates et les accidents cela tend à prouver que ces accidents sont des axes de drainage.

. un secteur central avec des concentrations inférieures à 250 mg/l qui se calque d'une part avec le "horst de Loriol du Comtat" et d'autre part avec les zones de Carpentras et de Bédarrides là où les épaisseurs d'Helvétien sont importantes (600 à 700 m) ce qui conduit à un isolement de la série évaporitique.

3. Réaction physico-chimique produite par les sulfates

Dans certains forages (n° 104 - 81 - 38), on note la présence d'hydrogène sulfuré.

On sait que les sulfates peuvent être réduits, mais l'opération nécessite la présence de bactéries sulfato-réductrices anaérobies (Desulfovibrio desulfuricans - groupe des Spirillacées). A elle seule la matière organique ne peut réduire les sulfates si la température ne dépasse pas 900° C, ce qui ne peut être le cas dans notre bassin tertiaire.

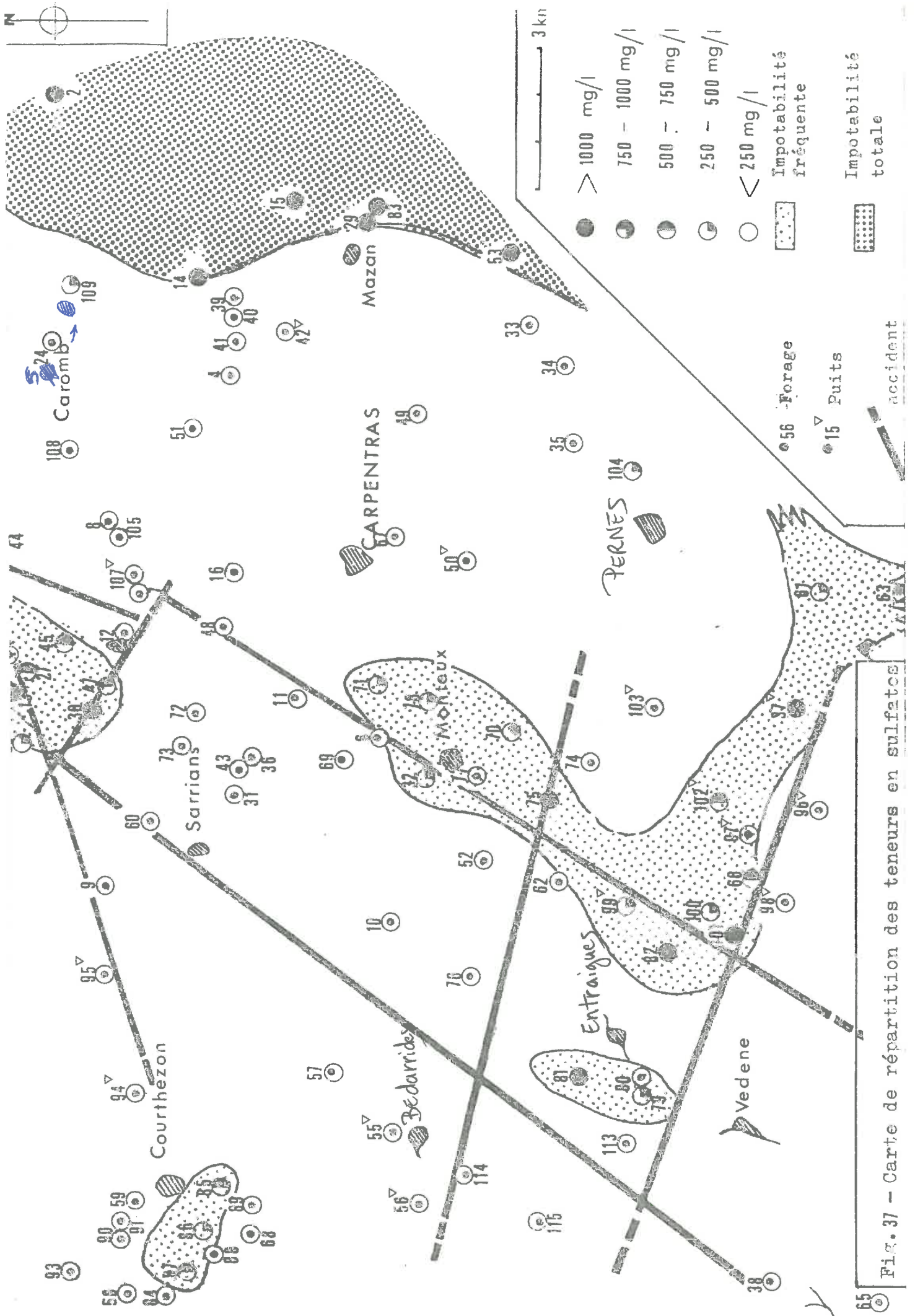


Fig. 37 - Carte de répartition des teneurs en sulfates

mais les premières conditions peuvent être réunies à la limite Miocène-Oligocène

1. Présence de sulfate dans l'Oligocène. Le n° 104 se trouve près du contact méridional Miocène-Oligocène.
2. Importance de la matière organique dans certains niveaux : sables blancs oligocènes par exemple.
3. Milieu anaérobie permettant le développement des bactéries ainsi qu'une température de 18° et un pH de 7,5 qui favorise leur développement.

Le mécanisme de la réaction est le suivant : au départ un donneur d'hydrogène : composé organique ou hydrogène moléculaire, puis l'activation de cet hydrogène se fait grâce à une déshydrogénase, ensuite il se combine successivement à l'oxygène dissous dans l'eau puis à SO_4 , SO_3 , SO_2 , SO .

La réaction diminuera la teneur en ions SO_4^{--} mais apportera des ions S^{--} , HCO_3^- et aussi H_2S .

Nous allons prendre deux exemples situés l'un à l'Ouest du bassin n° 81 et l'autre sur la bordure Sud-Est du bassin n° 104 (le forage a traversé la série miocène puis l'Oligocène sous la forme de sables blancs).

	ESPENON L. N° 104		BAUDRAN M. N° 81	
	Forage 150 m	Puits de surface	Forage 80 m	Puits de surface
Résist.	1500	1000	590	820
pH	7,39	7,24	7,43	7,40
D.T.	34,2	57,2	56,3	58
TAC	32,3	30,2	20,9	25
Cl	18,3	49,1	17,4	111
SO_4	120	300	320	1250
Fer	0,2	0,18	0,05	1,80
NH_4	0,39	0,06	1,7	0,3
NO_2	0,02	0,05	0,03	-
NO_3	4	24	4	-
	SH_2		SH_2	
		non potable	non potable	non potable

Les deux forages dégagent de fortes quantités de SH_2 ce qui rend l'eau imbuvable, malgré la potabilité chimique pour le n° 104.

La concentration en sulfate qui est de 120 mg/l pour le n° 104 et de 320 mg/l pour le n° 81, passe pour les eaux de surface respectivement à 300 et 1250 mg/l, c'est-à-dire à des valeurs trois à quatre fois plus fortes. Il ne semble pas possible d'expliquer de telles proportions dans les eaux de surface par une pollution superficielle (on retrouverait de telles valeurs plus régulièrement), mais la formation de H_2S se ferait au dépend des ions SO_4^{--} .

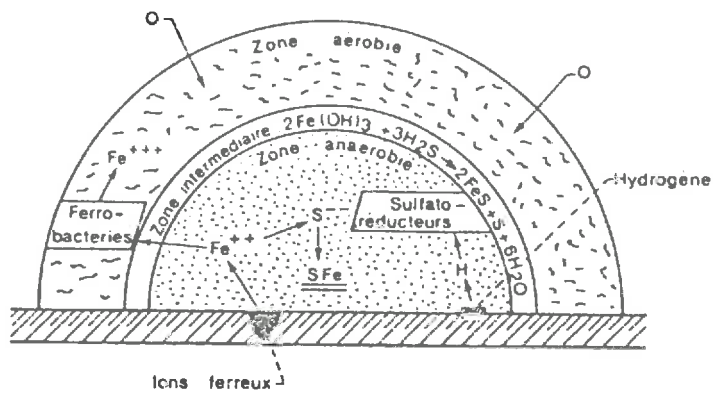
Ce phénomène est fréquent pour les eaux des champs pétrolifères ou les sulfures et l' H_2S apparaissent dans les eaux près de l'horizon où les sulfates commencent à décroître.

L'analyse de l'eau du forage n° 81 a montré l'existence de nombreuses bactéries qui ressemblent au Desulfovibrio desulfuricans (bactéries sulfato-réductrices), elles sont en nombre très important .

A la sortie du forage, l'oxydation entraîne la formation de vésicules gélatineuses de couleur blanc-jaunâtre à jaunâtre. Les masses visqueuses dégagent une forte odeur de SH_2 . Le phénomène quoique très rare à l'échelle du bassin (seul cas observé) admet une explication théorique . (Chantereau J., 1980).

Au départ des ions ferreux Fe^{++} (se trouvant en quantité suffisante dans les argiles bleues) se transforment par oxydation en hydroxyde ferrique $\text{Fe}(\text{OH})_3$: rouille qui s'imprènera petit à petit de sels ferreux qui sont diffuser vers la surface (fig.38 a et b). Ces sels ferreux pris en charge par les ferrobactéries se transformeront en hydroxyde ferrique (conditions d'anaérobiose) et la masse augmentera de volume (c). L'oxygène aura de plus en plus de difficulté à pénétrer vers l'intérieur et il va y avoir des conditions d'anaérobiose stricte favorable au développement de bactéries sulfatoréductrices (d).

Les sulfates seront réduits en hydrogène sulfuré.



VESICULE GELATINEUSE

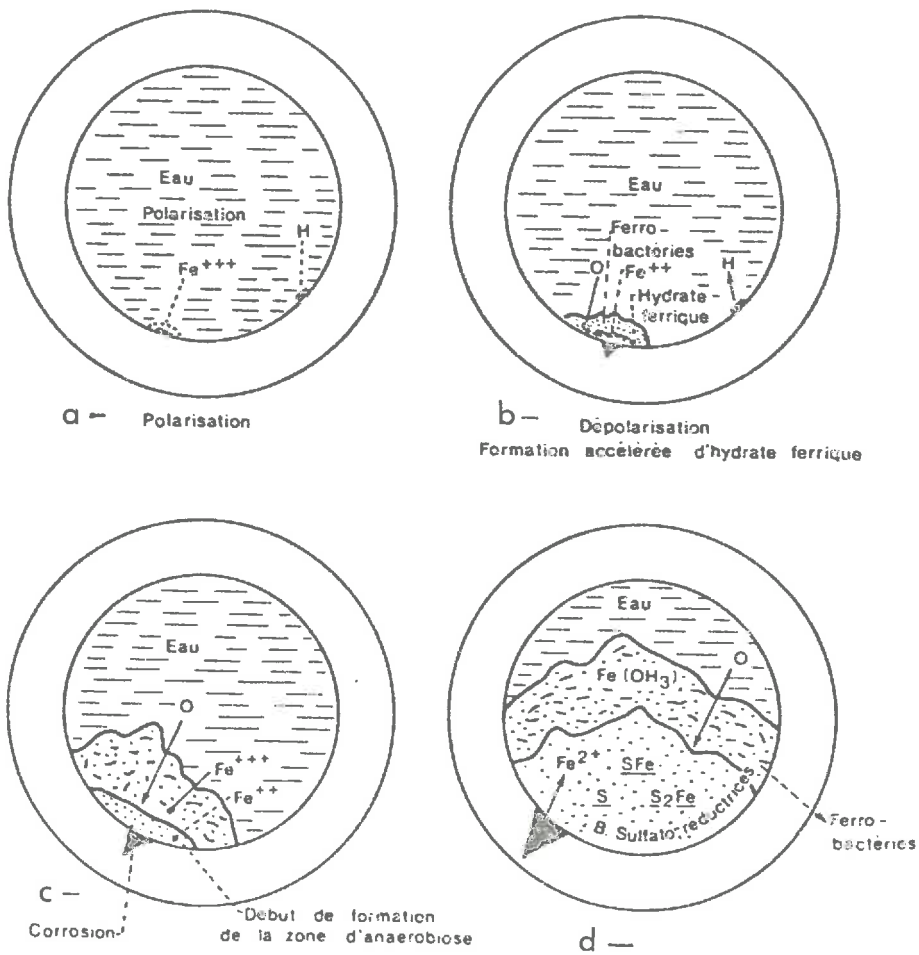


Fig. 38 Etapes de la formation d'une vésicule gélatineuse
 Chantereau J. - 1990

- Pour le n° 38, le problème est différent. On note la présence de H_2S uniquement dans le karst crétacé. La teneur est de 4 mg/l. Dans ce forage le miocène est directement en contact avec le Barremien.

On peut donc penser que le karst s'il n'est pas actif peut devenir le lieu de concentrations excessives sans en être l'investigateur.. Il sera donc important de choisir les zones structurellement hautes pour d'éventuels forages de reconnaissance dans ce calcaire qui lorsqu'il est karstifié, peut contenir une nappe d'eau très importante.

E - CONCENTRATIONS EN CHLORURES

Elles ne jouent pas un rôle majeur dans la minéralisation de l'eau, mais en deux zones bien précises on assiste à une augmentation importante des concentrations.

1. Région de Beaumes-de-Venise (fig.39)

Dans ce secteur l'augmentation de la concentration en chlorure est souvent accompagnée d'un accroissement des sulfates. Il semble probable que le diapir de Suzette avec son cortège triasique (chlorure-sulfate) soit responsable de cette augmentation. Mais quelles en sont les modalités ? La S.N.P.A. a mis en évidence des accidents; leurs présence ont été confirmés par l'étude géochimique de la C.P.G.F. Par ces fractures, de l'eau chargée en sel triasique ($NaCl/CaSO_4$) se mélangerait aux eaux du miocène. La perméabilité très faible du miocène à cet endroit limite l'effet de dilution ; la proximité du diapir confirme cette hypothèse. La délimitation est très précise. Entre les échantillons 0822-086 et 47 localisés dans un cercle de 500 m de diamètre, les concentrations en sel sont totalement différentes. Une augmentation de la perméabilité du miocène, un éloignement du socle triasique, ne nous permettent pas de suivre cet accident à travers tout le bassin.

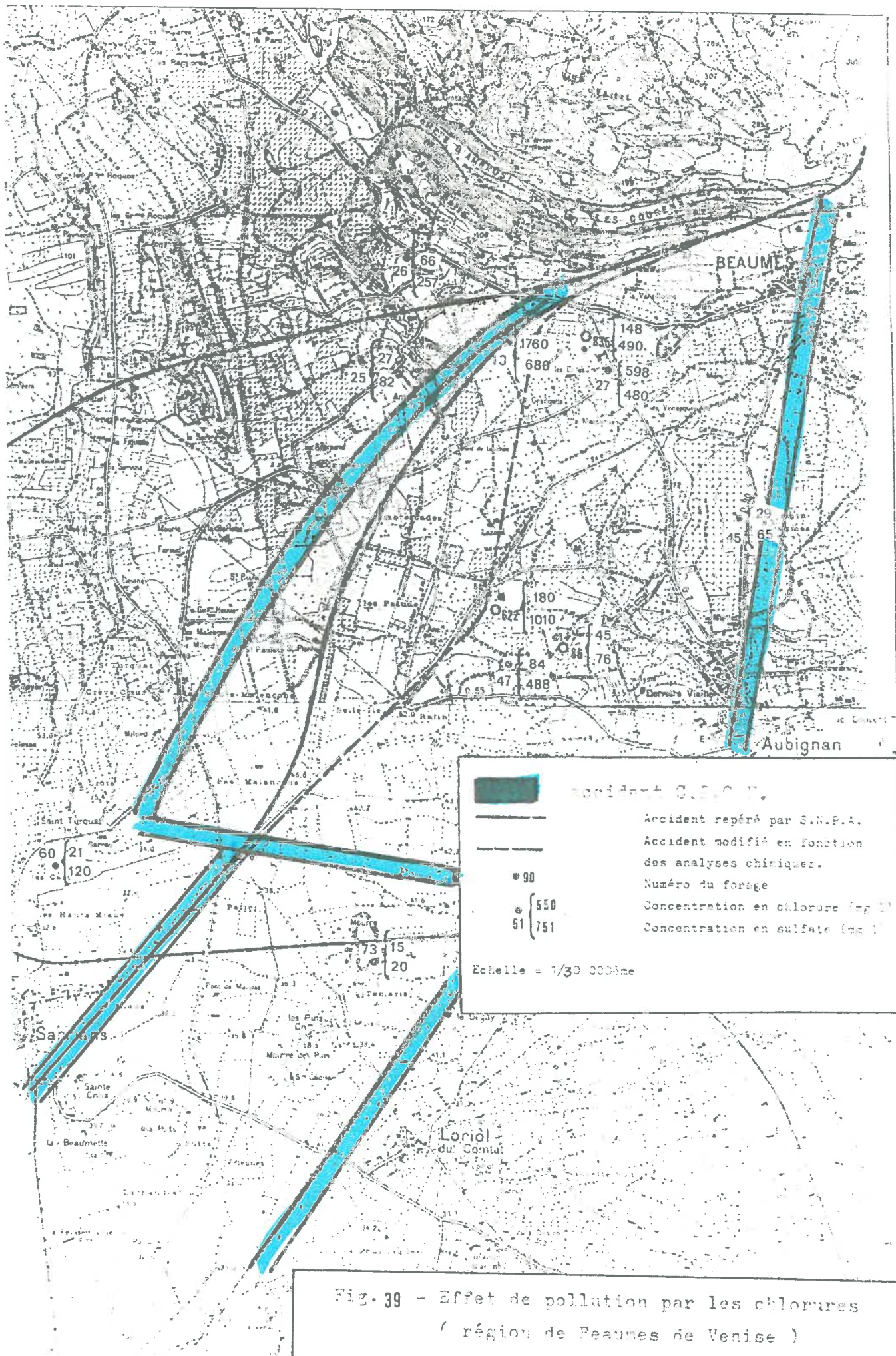
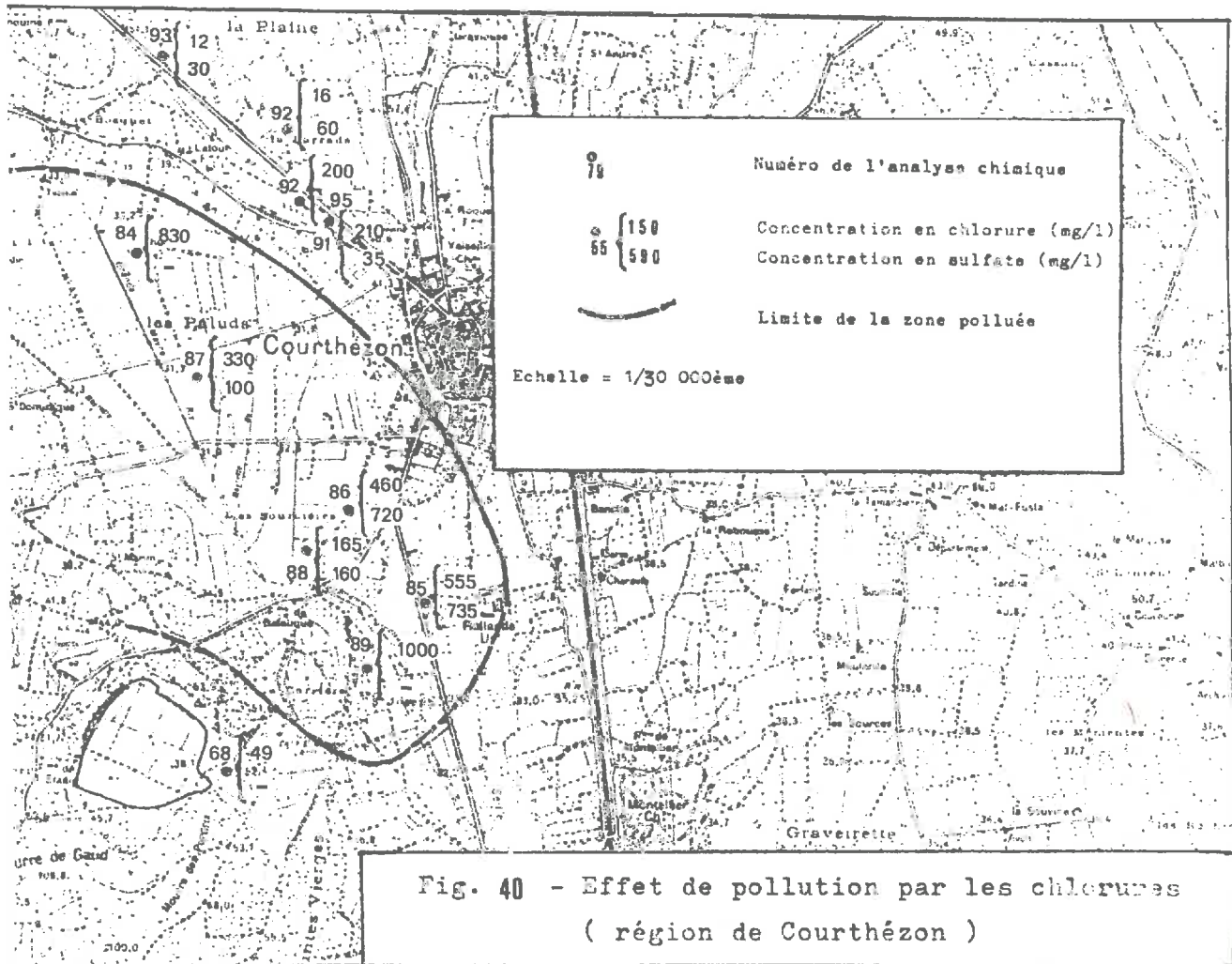


Fig. 39 - Effet de pollution par les chlorures
(région de Beaumes de Venise)

2. Région de Courthézon (fig. 40)



Comme pour la région de Beaumes-de-Venise, les fortes concentrations en chlorures s'accompagnent de teneurs élevées en sulfates. Il a été montré qu'une augmentation de la concentration en ions chlorures entraînait dans le même temps une dissociation plus importante des sulfates (Schoeller H., 1962).

Une zone aux limites assez floues a été tracée, dans laquelle la pollution n'intéresse qu'un seul des différents aquifères superposés caractérisant le sédiment miocène (nappe comprise entre 50 et 70 m).

Il est tentant de tracer un accident de Beaumes à Courthézon et d'envisager le trias apportant une quantité non négligeable de chlorures.

- Arguments positifs

. La S.N.P.A. a repéré un accident passant par Courthézon et par Beaumes-de-Venise de direction N.45°, il s'agit d'une composante de la faille de Nîmes.

. Une carte des isochrones montre une remontée du réflecteur profond (base du tertiaire) au niveau de Courthézon. Mais quelles sont les modalités qui régissent cette remontée ? et la moindre épaisseur du Miocène est-elle due à une structure haute conséquente d'une phénomène diapirique ?

- Arguments négatifs

. La teneur anormalement élevée en chlorures n'intéresse qu'une seule nappe située entre 50 et 70 m. La nappe supérieure comprise entre 20 et 30 m semble échapper à de telles concentrations. Est-ce le fait d'une différence dans la répartition des perméabilités ?

Ce problème mériterait une étude plus détaillée, avec :

- une analyse chimique des éléments caractérisant spécifiquement le trias.
- un maillage plus serré des points d'analyse.
- une série d'analyses des sulfates et chlorures en fonction de la profondeur.
- un forage de reconnaissance situé au point d'amplitude maximale de la remontée.

C - LE FER (la limite pour les normes françaises est de
0,2 mg/l)

C'est un élément très fréquent, il intervient dans un grand nombre de réactions chimiques. Les teneurs mesurées pour le bassin miocène varient rapidement et de façon importante. Mais on sait que de nombreux forages sont équipés de tubages métalliques et qu'ils peuvent céder à l'eau des quantités plus ou moins importantes du fer. Dans le cadre d'un forage de reconnaissance, il sera important de doser le fer régulièrement au cours du pompage.

D - AUTRES ELEMENTS

Dans cet aquifère miocène, on ne relève qu'exceptionnellement des teneurs dépassant les normes pour les éléments suivants : NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- . Dans des cas extrêmement rares, il s'est avéré suffisant de modifier la construction de l'ouvrage (un tubage non hermétique peut entraîner une contamination des eaux du miocène par les eaux superficielles).

L'exemple du forage n° 79 où les concentrations anormales en amoniacque témoignent d'un lessivage des couches superficielles formées de vases, tourbes (données du maître de sonde).

Les eaux du Miocène sont toujours potables bactériologiquement (pour les éléments recherchés par la D.A.S.S.), et il faudrait une contamination des eaux de surface pour causer une pollution.

Le forage n° 49 (120 m) avait, après une première analyse, donné de mauvais résultats bactériologiques et au vu du cadre géologique il ne semblait pas y avoir possibilité de pollution de surface. Une deuxième analyse faite stérilement a donné de très bons résultats. De mauvaises conditions de prélèvements, des manipulations nombreuses peuvent entraîner une pollution bactérienne.

Je précise que les bactéries sulfato-réductrices ne sont pas recherchées par le laboratoire de la D.A.S.S. ne pouvant occasionner chez l'homme des troubles pathologiques.

E - CHIMIE DES EAUX SUPERFICIELLES

Elle n'a pas été étudiée en détail. Mais les quelques résultats que nous possédons permettent de tirer plusieurs conclusions.

- Il existe une très grande hétérogénéité dans la qualité de ces eaux.

- Les normes en sulfates, nitrates, ammoniacque sont souvent dépassées spécialement dans la région Sud à Sud-Ouest.

- La présence de tourbes, vases (voir fig. 15) rend l'eau impropre à la consommation.

F - CONCLUSION PARTIELLE

- L'eau du miocène est de bonne qualité bactériologique.

- La teneur en sulfate régit la qualité de l'eau du bassin miocène.

- La chimie peut (si le nombre d'analyses est suffisamment important) permettre de localiser les accidents.

- Les eaux de surface ne peuvent qu'exceptionnellement constituer une réserve potentielle : volume faible, chimie de qualité médiocre.

3. GEOCHIMIE ISOTOPIQUE

Après avoir donné quelques explications sur les méthodes isotopiques appliquées à l'hydrogéologie, nous analyserons les résultats.

A. GENERALITES

On a procédé à l'analyse des variations isotopiques suivantes :

1. L'oxygène 18

Isotopes	Fréquence %	Nature
Oxygène banal (¹⁶ O)	99,76	stable
Oxygène 17 (¹⁷ O)	0,04	stable
Oxygène 18 (¹⁸ O)	0,20	stable

L'eau à analyser est mise en équilibre, à 25°C, avec un CO₂ de composition isotopique connue. Le CO₂ est ensuite analysé par spectrométrie de masse.

Les résultats sont exprimés en valeurs relatives de concentration par rapport à un standard international de référence qui, pour les eaux, est le S.M.O.W., défini par CRAIG (1961).

$$\delta = \frac{R \text{ échantillon} - R \text{ standard}}{R \text{ standard}} \times 1000$$

$$\text{avec } R = \frac{{}^{18}\text{O}}{{}^{16}\text{O}}$$

le S.M.O.W (standard, mean, ocean, water) est un étalon représentant la composition isotopique moyenne des eaux océaniques : 98 % de l'hydrosphère : son $\delta = 0$ par définition.

L'océan étant le point de départ et d'aboutissement de tous les cycles hydrologiques, on compare la teneur en ¹⁸O d'une eau météorique ou continentale à ce réservoir d'origine. Une eau dont le δ est égal à -5 est appauvrie en isotope lourd de 5 pour mille par rapport au S.M.O.W. : elle est légère. Inversement une eau dont le δ est égal à +2 est enrichie en isotope lourd de 2 pour mille par rapport au S.M.O.W. : elle est plus lourde.

Les molécules $^{16}\text{OH}_2$ et $^{18}\text{OH}_2$ présentent des tensions de vapeur et des vitesses de diffusion dans l'air différentes.

La vapeur s'élevant d'un réservoir est appauvrie en isotopes lourds.

La condensation d'une fraction vapeur donne un liquide plus riche en isotopes lourds.

Au cours de sa progression sur un continent, une masse d'air océanique subit plusieurs stades de refroidissement et de condensation notamment au passage des barrières montagneuses. On doit donc s'attendre à ce que les précipitations soient de plus en plus pauvres en ^{18}O vers l'intérieur des terres : effet de continentalité.

Le degré de condensation de la masse nuageuse et le facteur de fractionnement dépendent de la température, une relation doit exister entre la teneur isotopique de la pluie et la température de condensation.

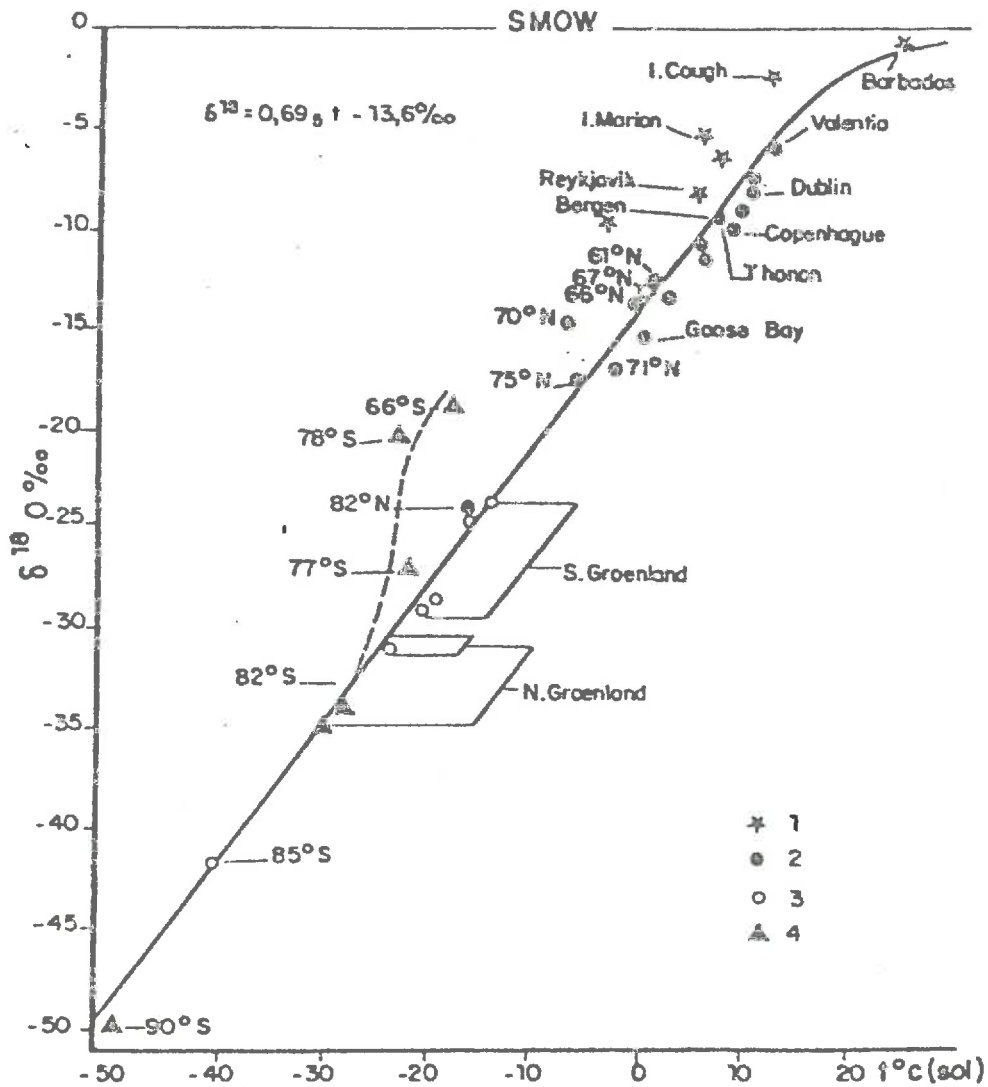
On peut généralement et surtout à l'échelle des moyennes, établir une relation simple entre la température de condensation à la base du nuage et la température au sol. Cette double dépendance est le fondement du traçage en ^{18}O , car elle permet de relier la composition isotopique de la pluie à la température du sol.

La conséquence de cette thermo-dépendance est un marquage des précipitations en ^{18}O

- dans l'espace ou géographique en fonction de la latitude et de l'altitude.

- dans le temps ou climatique en fonction de la saison ou des paléoclimats.

La variation géographique est illustrée par la fig. 41



1. Stations insulaires - $4 < t < 25^{\circ}\text{C}$
2. Stations continentales atlantiques - $17 < t < 11^{\circ}\text{C}$
3. Stations hautes latitudes - $41 < t < 14^{\circ}\text{C}$
4. Stations Groënland et Antarctique - $50 < t < -19^{\circ}\text{C}$

Fig. 41 - Variation de la composition isotopique moyenne des précipitations (^{18}O) en fonction de la température annuelle moyenne au sol : d'après DANSGAARDS (1964)

2. Le Tritium

Isotopes	Fréquence %	Nature
H_2 banal ^1H	99,985	stable
Deutérium (D) = ^2H	0,015	stable
Tritium (T) = ^3H	10^{-12} à 10^{-15}	radioactif

La molécule contenant l'atome de Tritium est d'un grand intérêt car cet émetteur de β^- est détecté de façon très sensible par les compteurs, grâce à la réaction



Le tritium est un émetteur bêta faible (18 Kev), il est analysé par comptage en scintillation liquide après enrichissement électrolytique préalable.

Les teneurs sont exprimés en Unité tritium (U.T.). 1. U.T. correspond à la présence d'un atome de tritium pour 10^{18} atomes d' H_2 .

Le tritium présent dans l'atmosphère, et donc dans les précipitations a deux origines :

.l'une naturelle, en liaison avec le rayonnement cosmique (également à l'origine du C^{14} et du S^{32}) entraîne une concentration moyenne de 10 U.T. dans les précipitations.

.l'autre artificielle, est de loin la plus importante et voit son origine dans les essais thermonucléaires effectués depuis 1952, dans l'atmosphère, singulièrement en 1961 et 1962. A la suite de ces essais, les concentrations en tritium ont atteint en Europe occidentale 10 000 U.T. Depuis 1963 la concentration en Tritium diminue à la suite de la vidange du réservoir atmosphérique et de son renouvellement par de l'eau océanique de faible concentration : 5 à 10 U.T.

Les essais français et chinois depuis 1968 contribuent à maintenir la concentration moyenne annuelle en France autour de 100 U.T.

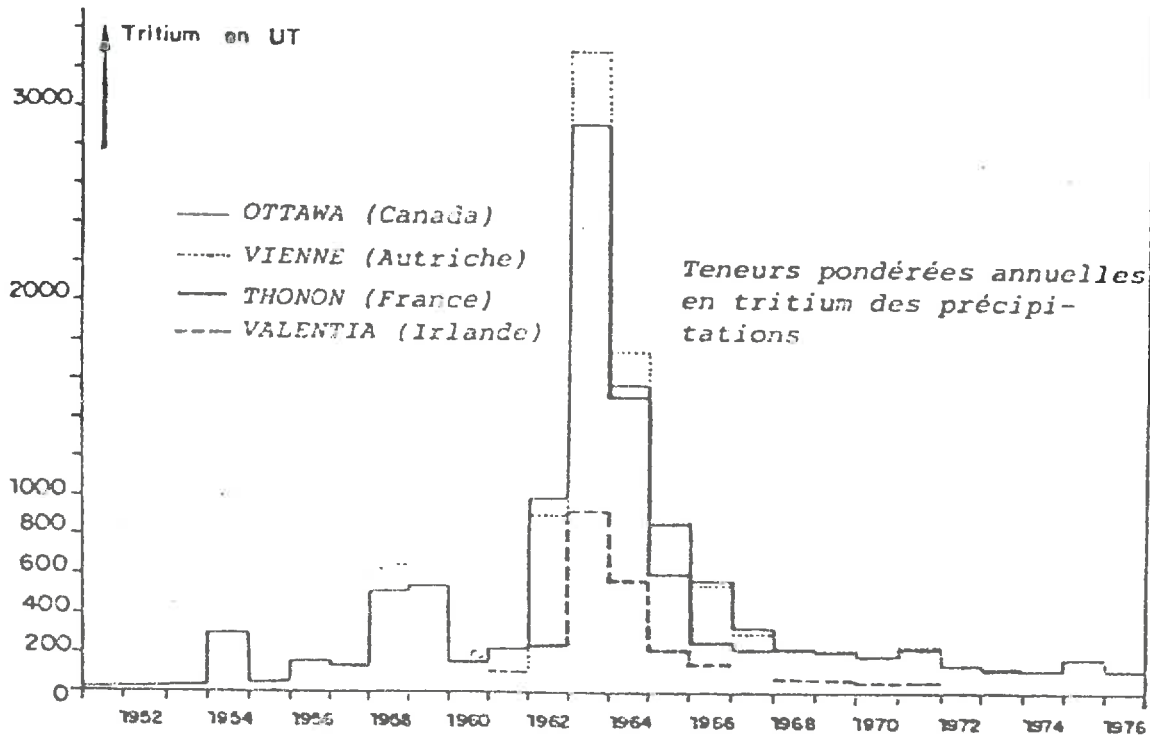


Fig. 42 - Evolution des teneurs en ^3H des pluies pour quatre stations de l'hémisphère Nord

A l'échelle de l'année, on observe une variation saisonnière avec un pic estival lié à un transport entre la stratosphère et la troposphère.

A ces variations dans le temps s'ajoutent des variations dans l'espace et pour une même latitude, on observe un effet de continentalité, résultat de la dilution de précipitations tritiées à proximité de l'océan.

Enfin l'industrie nucléaire est à l'origine des "bouffées" de tritium plus ou moins importantes et aléatoires qui peuvent maintenant perturber localement le schéma naturel.

3. Carbone 14

C'est en 1957 que K.O. Munnich fut amené à étudier la concentration en ^{14}C du carbone dissous dans les eaux souterraines.

Le C^{14} est produit par la haute atmosphère par action des rayons cosmiques sur l'azote de l'air. Sous forme de $^{14}\text{CO}_2$, il se mélange en $^{12}\text{CO}_2$ atmosphérique banal. Généralement, après un bref séjour dans la biosphère*, il pénètre et s'infiltré avec l'eau dans le sol. Dès ce moment, il s'isole du réservoir atmosphérique et la teneur en ^{14}C du carbone dissous dans l'eau ne va plus diminuer que par décroissance radioactive.

Si A_0 est l'activité en ^{14}C dans l'atmosphère et A_t est l'activité mesurée en ^{14}C du carbone dissous dans l'eau d'une nappe profonde, le temps t qui s'est écoulé depuis l'infiltration, c'est-à-dire depuis le début de l'isolement sera, sachant que la période du ^{14}C est 5568 ans de :

$$t : 8033 \times \ln \frac{A_0}{A_t} \quad (t \text{ en années})$$

L'équation sommée de tous les équilibres donne



De plus l'activité en ^{14}C du CO_2 biogénique du sol (CB) est égale à celle du CO_2 atmosphérique soit, par convention, 100 %, ce que nous noterons

$$A^{14}_{\text{CB}} = 100 \%$$

Par contre l'activité en ^{14}C du calcaire de l'aquifère (C.C.M.) est nulle, car après une dizaines de périodes, il n'y a plus d'activité ^{14}C mesurable d'où

$$A^{14}_{\text{CM}} = 0 \%$$

Les bicarbonates des eaux auront, au départ une activité de 50 %. Des échanges isotopiques existant entre le pôle biogénique et le pôle minéral, entraînent une remontée jusqu'à 80 - 85 %.

* son entrée a lieu lors de la photosynthèse : $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow (\text{CH}_2\text{O}) + \text{O}_2$
et sa sortie lors de la décomposition de la matière organique.

Il existe d'autres corrections : correction isotopique, correction chimique, correction mixte : chimique et isotopique.

Une interprétation sérieuse nécessite de réunir un certain nombre de paramètres et particulièrement sur le lieu même du prélèvement. Sur le terrain on mesurera : température, pH, CO_2 dissous, bicarbonates, de plus un échantillon sera envoyé en Laboratoire pour l'analyse des éléments majeurs suivants : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^- ; NO_3^- .

B. RESULTATS

Les calculs ont été effectués par le C.R.G. de Thonon-les-Bains. Les résultats sont notés sur la Fig. 43a. L'implantation est donnée par la Fig. 43b.

1. Tableau des valeurs (fig. 43)

2. Concentration en tritium

On peut dans un premier temps distinguer 3 groupes d'eaux :

a) concentration en tritium proche du bruit de fond : 1 UT , $1,8 \pm 0,6$ et $2 \pm 0,6 \text{ UT}$.

Il s'agit sans aucune ambiguïté d'eau ancienne dont l'âge est en toute rigueur supérieur à 30 ans. La contamination par des eaux superficielles est nulle ou extrêmement faible ($1,8$ ou $2 \pm 0,6 \text{ UT}$).

Dans cette catégorie entre la majeure partie des eaux du Miocène.

b) concentration en tritium de $57 \pm 10 \text{ UT}$: il s'agit d'une eau "actuelle" avec un âge moyen de 1 à 2 ans. Cette valeur est en effet proche de celle des précipitations moyennes actuelles.

On constate par ailleurs qu'il s'agit essentiellement d'eau "superficielle" : écoulement karstique, ou sources ou rivières. La seule exception est le forage n° 16 exploitant théoriquement le miocène. En fait cet ouvrage semble alimenté surtout par le quaternaire alluvial. Les fortes concentrations en nitrates et sulfates observées dans ce forage sont un argument supplémentaire.

n° échantillon	H-3 (UT)	O-18 (‰)	Identité de l'eau
1	1	-7.05	sables ocres crétacés
2	1	-7.40	sables blancs crétacés
9	1	-6.80	forage miocène
10	1	-6.70	forage miocène
13	1	-7.35	forage miocène
8	$1.8^{+0.6}$	-6.70	forage miocène
11	$2.0^{+0.6}$	-9.35	forage miocène
14	20^{+1}	-7.10	forage miocène-oligocène
15	28^{+1}	-6.55	forage oligocène
7	47^{+2}	-7.50	eau de surface
6	46^{+2}	-	eau de surface
5	50^{+2}	-8.90	source karstique
4	51^{+2}	-6.90	eau de surface
12	55^{+2}	-9.95	eau de surface
3	59^{+3}	-9.10	source karstique
16	67^{+3}	-8.40	forage miocène

Fig. 43 : Résultats isotopiques

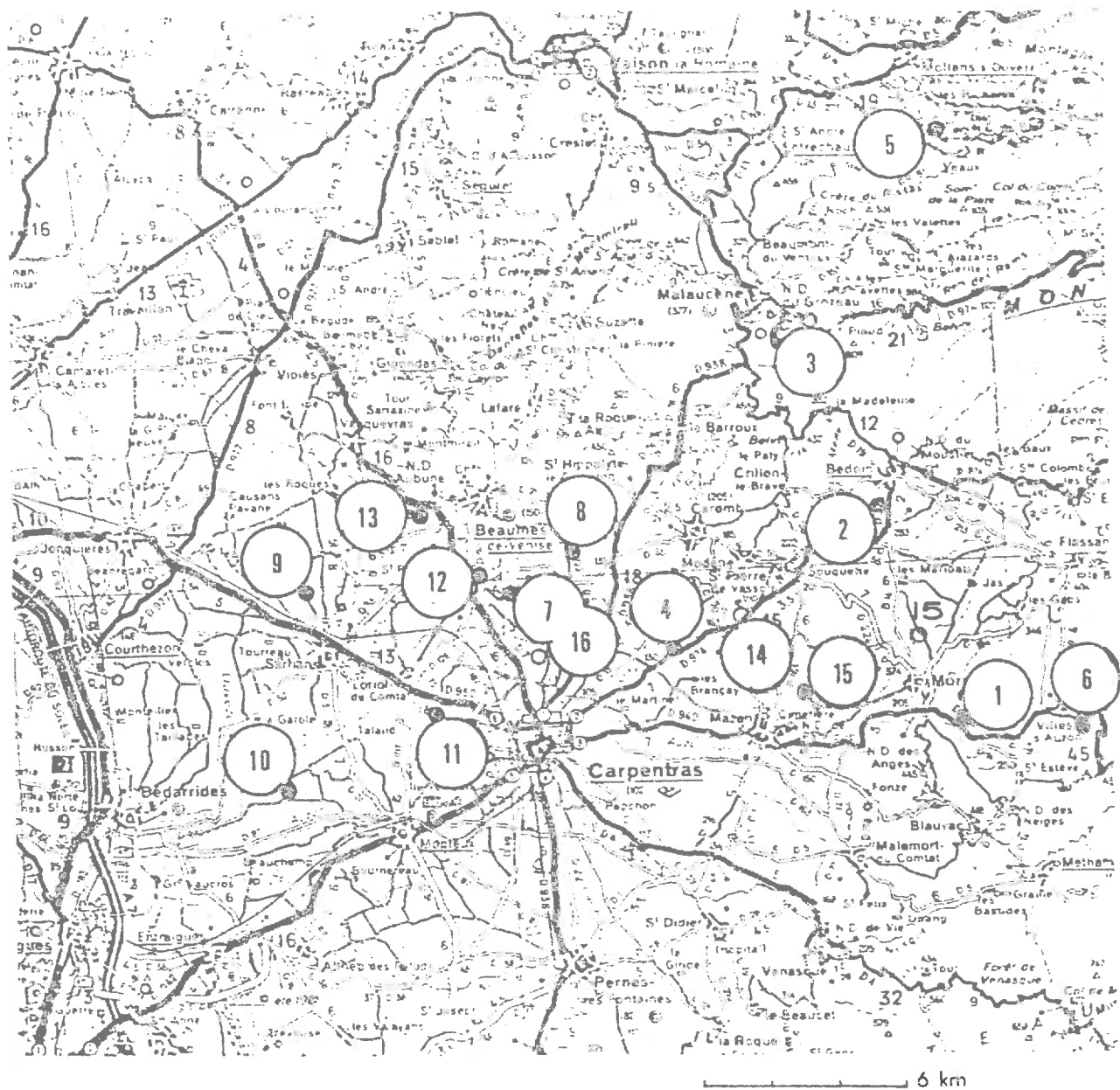


Fig. 43 b - Implantation des mesures

c) concentration en tritium de 20 à 30 UT. Il pourrait s'agir d'un mélange entre des eaux anciennes et des eaux actuelles. Dans le cas des 2 échantillons concernés (n° 14 et n° 15) un mélange à 50 % pourrait être envisagé. Cette hypothèse qui demanderait à être confirmée par des mesures complémentaires est fondée sur l'existence dans le gypse oligocène de circulations à priori rapides liées à la fracturation .

d) conclusions partielles.

La majeure partie des eaux de l'aquifère miocène ont une concentration en tritium proche de la limite de détection ($C < 1$ UT). Les résultats de C-14 dont nous disposons permettront d'aller plus loin dans l'évaluation de leur "âge".

3. Concentration en oxygène 18

On peut distinguer 2 groupes de valeurs, l'un centré sur -7‰ (moyenne -7,01 ‰ 0,33‰) (échantillons n° 1, 2, 4, 7, 8, 9, 13, 14 et 15) et l'autre beaucoup plus dispersé de -8,39 à -9,97 ‰ (n° 3, 5, 11, 12 et 16).

Cette répartition des concentrations en oxygène 18 traduit l'impact des 2 phénomènes qui conditionnent le rapport isotopique $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$: le fractionnement isotopique lié à la température (effet d'altitude et/ou saisonnier) et l'effet tampon lié au mélange dans le réservoir.

1er Groupe :

a) teneur en oxygène 18 relativement positive : de -6,5 à -7,5 ‰.

Il convient de distinguer 2 cas :

. soit la concentration en tritium est faible (1 à 2 UT) et implique donc, un temps de renouvellement long -et un bon mélange- de l'aquifère.

On constate pour cet ensemble que les valeurs sont très groupées : de -6,71 à -7,70. On peut émettre plusieurs hypothèses pour expliquer ce phénomène :

-il s'agit de la résultante du "bon mélange" liée au temps de renouvellement long (référence modèle de mélange : Kusakabe et al., 1970).

-cette homogénéité traduit un bassin d'alimentation avec une altitude très homogène.

Il est difficile d'évaluer cette altitude compte tenu d'un effet de paléoclimat très probable puisqu'on est en présence d'eau ancienne.

Cette deuxième hypothèse correspond assez mal au schéma théorique que l'on s'est fait sur les modalités de la circulation de l'eau dans le bassin miocène.

. soit la concentration en tritium est proche de celles des précipitations actuelles et deux phénomènes peuvent jouer conjointement : bassin versant plus "bas" et effet saisonnier (précipitations chaudes (et positives) d'été). C'est probablement le cas des échantillons n° 4 et 7.

2ème groupe :

b) teneur en oxygène 18 relativement négative : de -8,4 à 10‰. Ces valeurs concernent essentiellement des eaux avec des concentrations en tritium notables. Elles sont donc liées soit à l'altitude élevée connue du bassin versant : cas des n° 3 et 5 : sources "karstiques", soit à l'effet saisonnier n° 16 ou 12. Rappelons que le forage 16 est surtout alimenté par des eaux superficielles.

- le cas du prélèvement n° 11 est plus complexe. La concentration en O-18 de -9,34 ‰ est proche de celle des eaux du karst actif -8,91 et -9,11 ‰ mais la concentration en H-3 du n° 11 est de $2 \pm 0,6$ UT, soit très proche de celle des "eaux profondes". Il semble raisonnable d'envisager pour ce forage une participation importante d'eau provenant du "karst profond" (du type de celle observée à Salignan) (cf. résultats Carbone 14). En effet une eau de ce type devrait avoir une concentration en oxygène 18 négative (bassin versant élevé).

4. Conclusions partielles

Sur la figure 44 nous avons reporté la relation entre la concentration en O-18 et celle en H-3. Cette figure explicite clairement les relations qui existent entre ces divers types d'eau : En considérant 2 pôles : un pôle "eau profonde" (et ancienne) =E.P. caractérisé par sa très faible concentration en tritium et un pôle "eau superficielle" (et sub-actuelle) : E.S. caractérisé par des concentrations en tritium de 50 à 60 UT, on peut imaginer le schéma suivant :

- eau de type molasse sens stricte: pas de tritium et O-18 \sim -6,75 ‰ : n° 8, 9 et 10.
- eau de type bassin molassique ou molasse sens large : pas de tritium mais O-18 très légèrement plus négative -7 à -7,5 ‰ (notons qu'il s'agit de forages situés à la périphérie du bassin) : n°1, 13 et 2.
- eau à dominante superficielle d'origine locale : tritium \sim 55 UT O-18 de -7 à -10 ‰ : n° 4, 7, 16 et 12.
- eau de type karst superficielle: tritium \sim 55 UT et O-18 $-9 \pm 0,1$ ‰ : n° 3 et n° 5.

Dans ce schéma, les relations et mélanges sont bien entendu possibles (fig. 44)

- relation A : eau de karst ancienne
- relation B : eau provenant de la nappe du Miocène avec une contamination par les pluies)
- relation C : mélange entre des eaux profondes et des eaux superficielles d'origine locale : il s'agit là de 2 forages exploitant l'aquifère miocène au contact avec les gypses oligocènes où existe un karst actif, siège de circulation relativement rapide (n° 17 et 15).

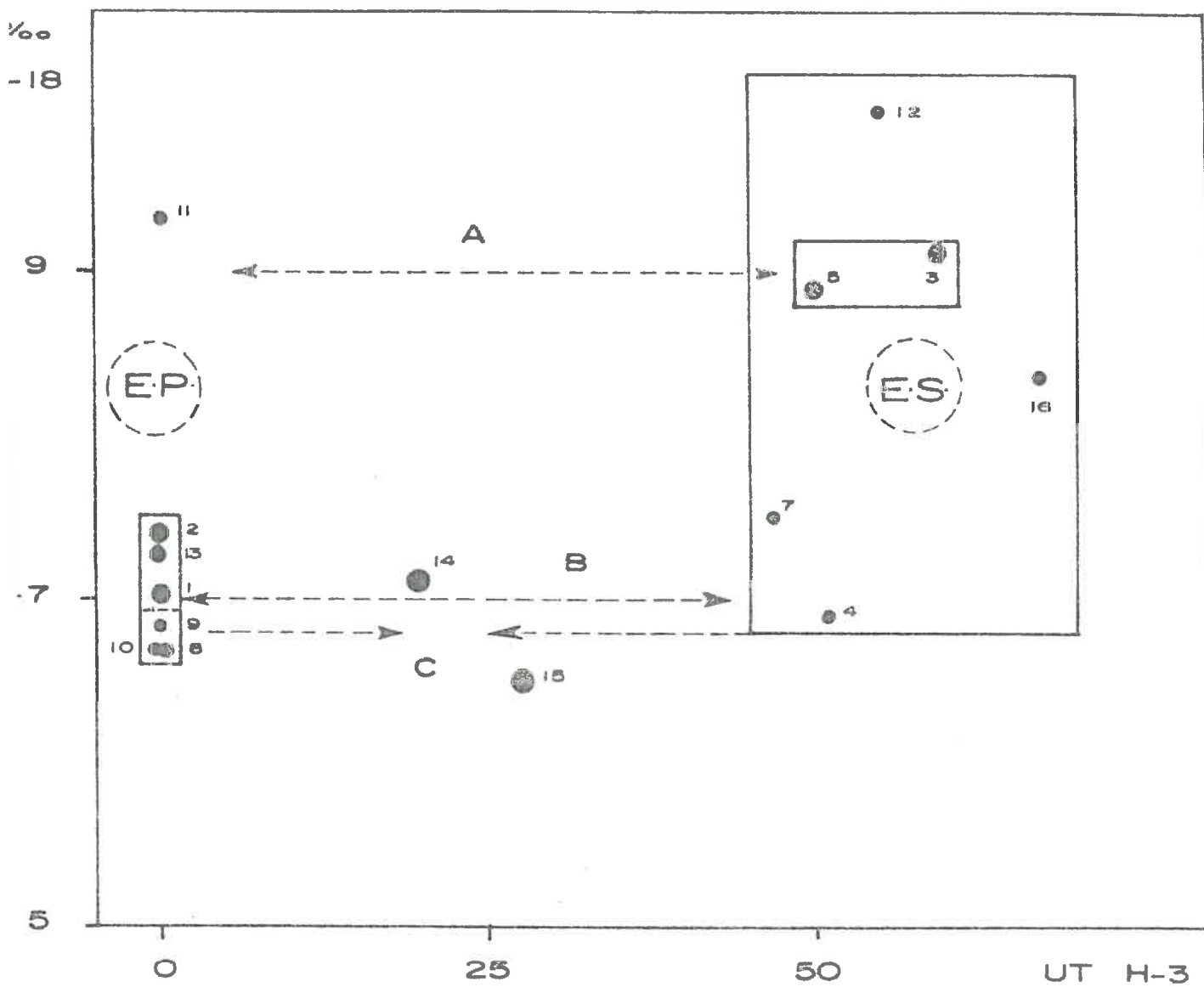


Fig. 44 - Relation entre la concentration en tritium et en oxygène 18

Notons bien que cette analyse a été réalisée à partir d'une seule série de prélèvements et les conclusions avancées pourraient être précisées à la suite d'une nouvelle série de mesures.

5. Résultats de l'activité en Carbone 14 (C-14)

a) résultats anciens

On dispose dans la bibliographie de résultats sur des forages profonds dans le substratum anté-miocène : forage de Pernes dans l'Oligocène et le Burdigalien, forage du Chêne et de Salignan dans l'urgonien; (vallée du Calavon au sud du bassin de Carpentras)

Les tableaux ci-dessous résument les résultats obtenus :

Forage de Salignan (Evin et al. 1967)

date	7.7.66	20.7.67
H-3	3 UT	3 UT
A C-14	57,1 %	55,3 %
C-13	?	-23,16 ‰ ?

Forage du Chêne (Margrita et al. 1976)

date	17.4.68	13.11	5.3.69	30.4	9.7	28.10	17.11
H-3 UT	10,5	30	30	35	50	40	14
A C-14	35,5 à 48,5	39,9 à 49,3	48,8	44,1	43,7	46,8	45,1
C-13 ‰	-8,80		-9,19				

Forage de Pernes les Fontaines (Evin com. pers.)

date	2.11.69	21.11.69	9.12.69
H - 3 UT	8	57	36
A - C-14	3,5 %		
δ C-13	?		

L'interprétation de ces résultats est assez délicate.

On peut toutefois faire les remarques suivantes : dans les 3 cas on est en présence d'eau relativement ancienne. En effet, les mesures sur la Fontaine de Vaucluse à la même époque donnent une activité C-14 de 91,5 et 93,7 % et une concentration en tritium de 150 à 200 UT (avril à septembre 1967). On peut donc supposer que l'activité à l'origine de l'eau de ces forages était supérieure à celle mesurée à savoir 55 % pour Salignan et 75 % pour le Chêne.

Dans le cas du forage de Fernes, l'activité en C-14 de 3,5 % traduit une eau très ancienne d'autant plus qu'une contamination par du C-14 moderne est certaine au regard des concentrations en tritium.

b) résultats de 1981-1982

Le tableau ci-dessous donne les principaux résultats

n° analyse	date	nom	A C-14	H-3 UT	C-13
y2430	6/81	n°11 RICHEMON	66,5 \pm 1,5	2 \pm 0,6	-9,8 ‰
y2435	6/81	n°1 Sables blancs	95,5 \pm 2,3	1	-12,1 ‰
y2436	6/81	n°2 Sablons	89,5 \pm 2,1	1	-15,5 ‰
ERG 310		n°1 Sables blancs	85,06 \pm 0,91	1	-10,9 ‰
ERG 309		Loriol	18,12 \pm 0,79	1	-7,3 ‰

Les remarques suivantes sont immédiates :

- les échantillons 1 et 2 présentent des activités en C-14 proches de celles du carbone moderne (cf. analyse de 1967 sur Fontaine-de-Vaucluse).

- le forage de Loriol sans atteindre la très basse activité observée dans le forage de Pernes (3,5 %) traduit indubitablement une eau ancienne.

- le forage Bichemon (n° 11) avec une activité de 66,5 % pourrait résulter d'un mélange avec une eau assez récente : ceci est confirmé par une concentration tritium de $2,0 \pm 0,6$ UT alors que celui de Loriol est au niveau du bruit de fond.

- Malgré leur activité en C-14 traduisant une eau "moderne", les eaux des échantillons n° 1 et n° 2 : sables blancs et Sablons, ont une concentration en tritium au niveau du bruit de fond. Leur "âge" est donc supérieur à 30 ans mais trop "jeune" pour être dans le domaine d'application du Carbone 14.

A N N E X E

Après la dactylographie de la thèse, nous avons pu disposer de nouvelles analyses :

	A C-14 %	5 C-13 ‰	UT	Age corrigé
Sables Blancs n°2	85,1	-10,9	< 1	~ 300
Sablons n°1	96,8	-11,1	< 1	moderne
Bichemon n°11	66,5	- 9,8	2 ⁺ 0,6	?
Carrichon n° 9	48,5	- 8,8	< 1	~ 1000
Loriol	18,1	- 7,3	< 1	~ 10000
Ratel n° 10	10,5	- 6,6	< 1	~ 14000

Ces résultats confirment les premiers, à savoir que l'eau est plus ancienne dans le centre du Bassin où l'épaisseur de molasse est importante (n° 10).

Une interprétation quantitative réalisée rapidement par Monsieur FONTES permet d'évaluer l'âge de l'eau de Loriol à près de 10 000 ans et celle de Ratel (n° 10) à 14 000 ans.

Les eaux dont l'activité en C-14 sont supérieures à 50 % posent toujours un problème d'interprétation.

La traduction en âge des résultats demande en effet une parfaite connaissance de tous les paramètres physico-chimiques ayant une influence sur cette teneur : C-13 du Carbone biologique, C-13 du Carbone minéral, pH mesuré in situ, teneur HCO_3^- et CO_2 à l'équilibre, etc...

Rappel : Le forage Bichemon avec une activité C-14 de 66,6 % et surtout $2 \pm 0,6$ UT paraît contaminée par des eaux récentes et son interprétation est très aléatoire.

On peut remarquer pour conclure que le δ C-13 diminue quand l'âge augmente, il y a bien équilibre entre l'activité de départ estimée à 20 ‰ et l'activité de la roche qui est de 0‰.

CONCLUSION

C O N C L U S I O N

1. Rappel des principaux résultats

a. géologiques :

On a mis en évidence :

- une relation étroite entre la nature, la couleur du sédiment et la structure du bassin ;

- la fermeture du bassin miocène au Sud marquée par une épaisse série argileuse ;

- une tectonique anté-miocène (détermination des accidents majeurs), post-burdigalienne (relèvement des bordures, reprises des accidents anciens), intra-miocène (slumpings).

b. hydrodynamiques :

- le bassin de Carpentras comprend deux nappes : l'une superficielle alimentée artificiellement (canaux, irrigation), l'autre profonde alimentée par le karst urgonien ;

- Les particularités de la piézométrie et de la répartition des débits spécifiques ont permis la mise en évidence du horst de Loriol du Comtat. La présence de cette structure a été confirmée par des études géophysiques et par deux forages de reconnaissance.

- la répartition des perméabilités répond à une loi Log-normal et met en évidence une suralimentation au niveau du horst urgonien de Loriol du Comtat.

c. géochimiques

- la qualité des eaux est étroitement liée à la valeur de l'encaissant (sulfates - chlorures) ;

- la géochimie peut permettre de détecter des accidents majeurs ;

- les techniques isotopiques ont mis en évidence des eaux fossiles (plusieurs milliers d'années).

2. Cycle de l'eau (Fig. 44)

Cycles Méthodes	Cycle court	Cycle long
Géologie	Nappe superficielle, peu régulière	Structure : horst de Loriol du Comtat
Hydrodynamique	-	Bilan climatique : pas d'alimentation directe par le bassin de Carpentras. Piézométrie et essais de pompage traduisent une suralimentation par le Karst.
Géochimie	- Les valeurs de l'oxygène.18 sont "négatives", et dispersées. - Pollution bactériologique. - Eau tritiée.	Pas de Tritium. Eau dépendante du substratum (SO ₄ - NaCl - Calcaire)
Divers	nappe réalimentée artificiellement, se vidange l'hiver. - Température variable entre l'hiver et l'été.	Température stable

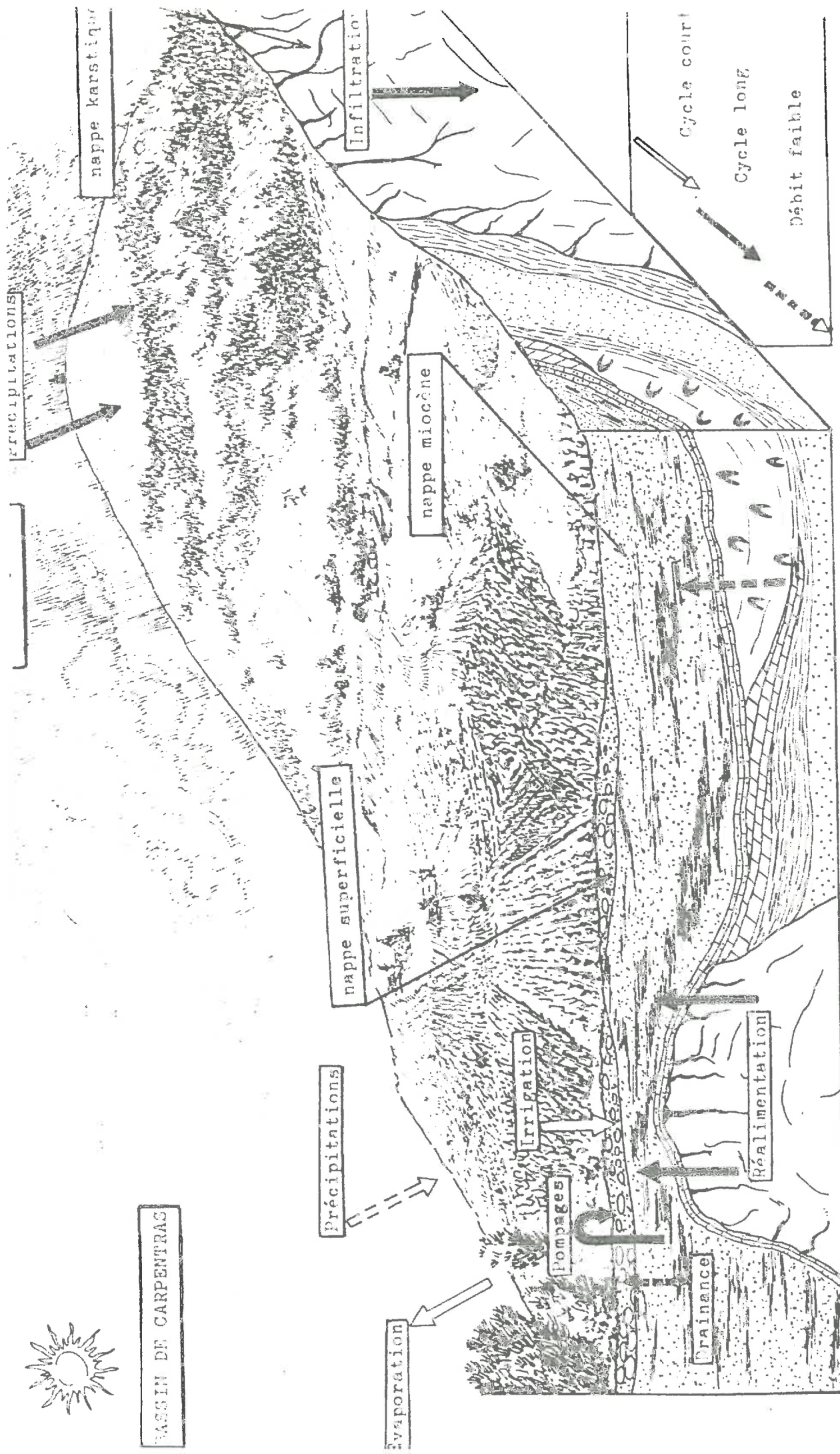


Fig. 45 Schéma représentatif des différents modes de circulation de l'eau dans le bassin de CARPENTRAS

3. Potentiel de l'aquifère miocène

a. débit

La figure 31 illustre la répartition des débits spécifiques. La zone aux $Q/\Delta > 2 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ située entre Loriol et Bédarrides représente le secteur le plus avantageux pour le syndicat Rhône-Ventoux. Elle s'étend du Nord-Est au Sud-Ouest et partage le bassin selon une diagonale, ainsi il devient facile d'éviter une trop grande concentration d'ouvrages qui affolerait la population locale (très sensible à ce genre de problèmes). Dans ce secteur, on peut compter sur des débits d'exhaure ponctuels de 100 à 150 m^3/h avec possibilité de compléter l'alimentation du syndicat que ce soit pour :

- le bas service : ouvrages dans les zones de Bédarrides - Sorgues,
- le moyen " : " " " de Loriol - Sarrians,
- le Haut " : " " " de St-Hyppolyte - Le Graveron

Les autres secteurs peuvent présenter un intérêt pour des besoins plus locaux : débits voisins de 50 m^3/h , qui admettent de nombreuses variations en fonction de la situation géographique. Il est nécessaire de se reporter à la fig. 31

b. qualité

Si la zone centrale aux $Q/\Delta > 2 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ comporte une eau d'excellente qualité, sans risque pour une exploitation syndicale, les zones périphériques sont susceptibles de subir des augmentations importantes de leur teneur en sulfate, (en bordures de massifs oligocènes, le long d'accidents...). Il sera nécessaire de se référer à la carte des sulfates (fig. 37).

4. Perspectives de développement

Les différents résultats obtenus : géométrie de l'aquifère, caractéristiques hydrodynamiques, géochimie et temps de renouvellement, illustrent l'intérêt fondamental de ce réservoir aquifère. En effet, le volume d'eau existant peut être évalué pour une teneur en eau de 40 % à $40 \cdot 10^9 \text{ m}^3$. En admettant que seulement 1 % de cette eau soit exploitable, on obtient un volume de 400 millions de m^3 . Les prélèvements actuels voisins de $20 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$, conduisent à épuiser cette réserve en moins de 20 ans.

Déjà depuis environ 50 ans, l'artésianisme de la nappe a baissé de 10 m environ dans le secteur d'Aubignan. Le problème essentiel est donc celui du renouvellement de l'aquifère. On dispose actuellement de quelques éléments de réponse :

- teneur en Tritium < 1 U.T., ce qui implique un "âge" inférieur à 30 ans.
- teneur en C.14 : au forage de Loriol = $18,12 \pm 0,8$ ‰ de Carbone moderne, ce qui correspond, quelles que soient les corrections, à un âge de l'ordre du millier d'années.
- concentration en Oxygène 18 - remarquablement groupée autour de 7 ‰ dans tout le réservoir.

Depuis une centaine d'années, l'équilibre de ce système a été modifié : mise en place du réseau de canaux (drainage en hautes eaux, et irrigation en basses eaux, réalisations de forages artésiens et de pompages). Il en résulte que localement le réservoir pourrait subir une certaine réalimentation : par les bordures (cf. analyse C.14 des sables blancs et des sablons) ou par le karst profond (cf. forage Bichemon n° 11).

Il est clair cependant que cette réalimentation n'intéresse pas encore l'ensemble du bassin.

5. Exploitation

Afin de préserver la qualité de cette eau, il est donc urgent de prendre toutes les mesures afin de gérer au mieux son exploitation et de préserver ainsi une réserve d'eau pour la consommation humaine dans le futur.

Des études géochimiques complémentaires associées à un bilan plus rigoureux et à un modèle d'exploitation devrait permettre d'arrêter les modalités de cette gestion.

B I B L I O G R A P H I E

- B.R.G.M. : Bureau de recherche géologique et minière
I.A.E.A. : International Atomic Energy Agency
C.P.G.F. : Compagnie de Prospection géophysique française
- APOLITO J.P. (d'), (1972).- Contribution à l'étude de l'aménagement de Caderousse, géologie et hydrogéologie. Thèse 3ème cycle, Univ. Grenoble, 103 p., 32 fig., 3 tabl., 14 pl. h.t. (inédit).
- ARNAUD J.L. (1972).- Etude géologique et hydrogéologique de la vallée du Rhône entre Aramon et Tarascon-Beaucaire. Thèse 3ème cycle, Univ. Grenoble, 182 p., 60 fig., 3 tabl. (inédit).
- BELLEGARDE B. de, & LAFOSSE J. (1977).- La nappe du Miocène du Nord de la Drôme. Colloque sur l'approvisionnement en eau de la France, Nice, tome I, p. 115-130.
- BRASSEUR R. (1968).- Etude géologique du massif de Suzette (Vaucluse). Thèse Fac. Sc. Lyon, 195 p., 2 cartes, 20 pl. (inédit).
- CARIDROIT Y. (1968).- Etude géologique et hydrogéologique de la région d'Avignon. Thèse 3ème cycle, Univ. Grenoble, 137p., 32fig. (inédit).
- CHANTEREAU J. (1980).- Corrosion bactérienne, bactéries de la corrosion. Technique et documentation, Paris, 264 p.
- COLLIN J.J. (1976).- Les eaux souterraines de la plaine Saône - Doubs. Thèse doct. ès Sc. Univ. Lyon, 318 p., 133 fig., 10 cartes h.t., 6 annexes.
- CRAIG H. (1961).- Isotopic variations in meteoric waters. Sciences, Washington, 133, p. 1702-1703.
- DANSGAARD D.W. (1964).- Stable isotopes in précipitations, Tellus, Stockholm, 16, p. 436-468.
- DEMARCO G. (1970).- Etude stratigraphique du Miocène rhodanien. Mém. B.R.G.M., Paris, n° 61, 257 p., 56 fig., 4 tabl., 4 pl., et thèse Fac. Sci. Paris, n° 4723, 1962.
- DEMARCO G. & TRUC G. (1967).- Etude stratigraphique et structurale du bassin tertiaire de Malaucène. Bull. Soc. géol. Fr., Paris, sér. 7, t.9, p. 537-542, 1 fig.

- DEVUN Ph. (1967).- Etude pluviométrique de l'impluvium de la Fontaine-de-Vaucluse. B.R.G.M., DS.67.A137, Lyon, 33 p., 17 cartes, 4 tabl.
- DOMINICI R. (1968).- Hydrogéologie du bassin du Coulon (Vaucluse - Basses-Alpes). B.R.G.M./S.G.R. Languedoc-Roussillon, Montpellier, 77 p., 22 fig.
- EVIN J. & alii. (1967).- Contribution des analyses chimiques, des colorations et des mesures isotopiques à l'étude des circulations souterraines ou réservoirs karstiques. Mém. Ass. Internat. Hydrogéol., Congrès d'Istanbul, vol. VIII, tome VIII, p.228-308.
- FONTANNES F. (1883).- Note sur les terrains traversés par quelques sondages de l'Isère, de la Drôme et du Vaucluse. Ann. Soc. Agri. Lyon, sér.5, t.5, p. 73-94, 2 pl.
- GELIS E. de (1956).- Eléments d'hydraulique souterraine. Notes et mém. Serv. Géol. Maroc, Rabat, n°136, 84 p., 44 fig.
- GIGNOUX M. (1929).- Forages artésiens et rivages pliocènes sur la rive gauche du Rhône entre Carpentras et Valréas. Et. rhod. Rev. Géogr. région. lyon., vol. 5, p. 27-39, 1 carte.
- HUBERT P. & alii. (1970).- Etude par le tritium de la dynamique des eaux souterraines. C.R. Acad. Sci., Paris, tome 270, p. 908-911.
- JOLEAUD L. (1907-1912).- Géologie et paléontologie de la plaine du Comtat et de ses abords. Fasc. I et 2 : description des terrains néogènes. Seguin édit., Avignon, 285 p., 11 pl.
- KUSAKABE M. & alii.- Oxygen and hydrogen isotope ratios of monthly collected waters from Nasudoke volcanic area, Japan. Journ. Geophys. Research., 75, 30, p. 5941-5951.
- MARGRITA R. & alii. (1970).- Contribution des mesures isotopiques à l'étude de la Fontaine de Vaucluse. I.A.E.A. Isotope hydrolog., Vienne p. 333-348, 6 fig., 1 tabl.
- MASSE J.P. & PHILIP J. (1976).- Paléogéographie et tectonique du Crétacé moyen en Provence : révision du concept d'isthme durancien. Rev. Géogr. phys. Géol. dynam., Masson édit., Paris, vol. 18, fasc. 1, p. 49-66.
- MUNNICH K.C. & alii. (1967).- Soil water movement and evaporation : change in isotopic composition of water isotopes in hydrology. I.A.E.A. Isotope hydrolog., Vienne, p. 567-586.
- RAMBAUD A. (1974).- Contribution à l'étude des pollutions du réseau hydrographique de la Sorgue (Vaucluse). Thèse doct. Pharm. Univ. Montpellier I, 317 p., 48 fig., 36 tabl., 18 pl.ph. (inédit).

- ROUSSELOT D. (1976).- Proposition pour une loi de distribution des perméabilités et des transmissivités. B.R.G.M., SGR/337 AME, Lyon, 120 p., 83 fig.
- ROUSSELOT D. (1978).- Etude hydrogéologique de la Molasse du Bas-Dauphiné entre le Rhône et l'Isère. B.R.G.M., 78 SGN 225 JAL, Lyon, 46 p. 13 fig.
- SCHOELLER H. (1962).- Les eaux souterraines - Hydrologie dynamique et chimique. Recherche, exploitation et évaluation des ressources. Masson édit., Paris, 642 p., 187 fig.
- SIMERTZ E. (1981).- Interprétations des sondages électriques. C.P.G.F. Rapports internes dactylographiés (confidentiel).
- SEGWIN J. (1977).- Evapotranspiration et bilan hydrique. La Météorologie, Boulogne, VI sér., n° 11, p. 33-39, 4 fig.
- TRIAI J.M. (1974).- Datation du Cénomanién moyen de sédiments continentaux et des phénomènes d'altération réputés éocènes dans le bassin de Mormeiron (Vaucluse). C.R. somm. Soc. géol. Fr., Paris, p. 158-159.
- TURC L. (1953).- Le bilan d'eau des sols : relations entre les précipitations l'évaporation et l'écoulement. Thèse Univ. Paris, Bussière Imprim., (Saint-Amand), 252 p., 72 tabl., 71 graph.

LISTE DES FIGURES

		page
5. 1	- Secteur géré par le syndicat Rhône-Ventoux.	10
5. 2	- Carte d'implantation des sondages mécaniques et électriques.	20
5. 3	- Coupe lithologique n° II	23
5. 4	- " " n° IV	24
5. 5	- " " n° VI	25
5. 6	- " " n° VIII	26
5. 7	- Carte de localisation des coupes géologiques et de répartition des sédiments.	27
5. 8a	- Corrélation entre la coupe lithologique (A4L1) et le sondage électrique (9 ter.)	34
5. 8b	- Courbe électrique interprétée par ordinateur correspondant au point C118.	35
5. 8c	- Coupe structurale très schématique.	36
5. 8d	- Carte structurale au 1/50 000 (hors texte).	
5. 8e	- Carte structurale au 1/25 000 (hors texte).	
5. 9 (a-b-c)	- Carte des isoteneurs en sédiment pour le secteur d'Aubignan.	29-30
5. 10	- Schéma hypothétique des paléocourants pendant le Miocène.	44
5. 11	- Carte des isohyètes.	49
5. 12	- Calcul de l'eau disponible - station de Carpentras.	52
5. 13	- Calcul de l'eau disponible - station de Orange.	54
5. 14	- Calcul de l'eau disponible - station de St-Christol-Sault.	55
5. 15	- Carte de la nappe superficielle.	58
5. 16	- Carte du réseau hydrographique.	60
5. 17 (a-b)	- Débit mensuel des rivières et courbe d'évolution pendant l'année.	61-63
5. 18	- Débit du canal de Carpentras.	64
5. 19	- Calcul de la perméabilité par la méthode de Hallen-Hazen	69
5. 20 (a-b)	- Courbes cummulatives du sédiment miocène.	71-72
5. 21	- Carte piézométrique de l'aquifère miocène (hors texte).	
5. 22	- Carte de superposition des piézométries de la nappe miocène et de la nappe phréatique.	76
5. 23	- Carte des fluctuations de la nappe miocène.	78
5. 24	- Carte des températures des eaux du miocène.	80

g. 25 (a-b)	- Courbes interprétatives par la méthode de Theiss et celle de Jacob pour des essais de courtes durées.	87-88
g. 26 (a-b)	- Courbes interprétatives par la méthode de Theiss et celle de Jacob pour des essais de longue durée.	90-91
g. 27	- Valeurs comparatives des transmissivités calculées par différentes méthodes.	94
g. 28	- Résultats des transmissivités obtenus à partir de la méthode de Porchet.	95
g. 29	- Résultats comparatifs des essais de pompage.	97
g. 30	- Distribution des transmissivités suivant 1 loi Log-normal dans l'aquifère miocène de Carpentras. Mise en évidence de l'alimentation par le karst.	98
g. 31	- Carte des débits spécifiques.	I00
g. 32	- Diagramme de Piper (pour des analyses complètes) des eaux du miocène du bassin de Carpentras.	I07
g. 33	- Relation entre le Ph et la teneur en silice	I10
g. 34	- Relation entre la teneur en ions SO_4^{--} et en ions Br^{++}	I12
g. 35	- Diagramme de Piper (pour des analyses partielles) des eaux du miocène du bassin de Carpentras.	I14
g. 35a	- Histogramme des fréquences et relation entre le Ph et la concentration en ions HCO_3^- .	I18
g. 36	- Relation entre la teneur en sulfates et la résistivité de l'aquifère molassique de Carpentras.	I19
g. 37	- Carte de répartition des teneurs en sulfates.	I21
g. 38	- Etapes de la formation d'une vésicule gélatineuse.	I24
g. 39	- Effet de pollution par les chlorures (zone de Beaumes-de-Venise)	I26
g. 40	- " " " " (zone de Courthézon).	I27
g. 41	- Variation de la composition isotopique moyenne des précipitations (oxygène 18) en fonction de la température annuelle moyenne au sol.	I33
g. 42	- Evaluation des teneurs en tritium des pluies à quatre stations de l'hémisphère Nord.	I35
g. 43 (a-b)	- Résultats isotopiques et localisation géographique des échantillons.	I38-I39
g. 44	- Relation entre la concentration en tritium et en oxygène 18.	I43
g. 45	- Schéma représentatif des différents modes de circulation de l'eau dans le bassin de Carpentras.	I51

Aquifère Miocène du Bassin de Carpentras

Etude Géochimique

Note technique préliminaire

Etude n° 2184
Octobre 1980-Juin 1981

Bureau de Lyon Sud-Est
Zone Industrielle
Chemin de Chassieu
69800 SAINT-PRIEST



CPGF

**Compagnie de Prospection
Géophysique Française**

77-79 Avenue Victor-Hugo 92500 Rueil-Malmaison

/ SOMMAIRE /

I - PREAMBULE Page 2

II - MESURES EFFECTUEES Page 3

III - RESULTATS DES MESURES Page 4
A - Chimie
B - Isotopes

IV - POURSUITE DE L'ETUDE Page 15

I - / PREAMBULE /

A la demande du Syndicat Rhône Ventoux, en accord avec la Direction Départementale de l'Agriculture du Vaucluse et dans le cadre des reconnaissances sur le Bassin de Carpentras entreprises en collaboration avec l'Université de Lyon (Mrs TRUC et FAURE), la Compagnie de Prospection Géophysique Française a entrepris une étude géochimique des eaux du réservoir miocène.

Les eaux ont été prélevées en Octobre, Novembre 1980 et Février 1981, le programme ayant été arrêté en commun avec l'Université de Lyon.

Les analyses ont été réalisées au Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon (Université Paris VI).

L'interprétation et la rédaction de cette note préliminaire ont été assurées par Monsieur E. SIWERTZ, Ingénieur Hydrogéologue.

II - / MESURES EFFECTUEES /

La liste des prélèvements fait l'objet du tableau 1, et l'implantation des mesures figure sur la plan 2184-01.

On a dosé les éléments chimiques suivants :

Elément		Méthode	Sensibilité	
Calcium	Ca	Absorption atomique	0,07	ppm
Magnésium	Mg	"	0,01	ppm
Sodium	Na	"	0,02	ppm
Potassium	K	"	0,02	ppm
Strontium	Sr	"	0,05	ppm
Amoniaque	NH4	Absorption moléculaire	0,001	ppm
Chlorures	Cl	"	0,01	ppm
Sulfates	SO4	"	0,05	ppm
Bicarbonates	HCO3	Titrimétrie	0,1	ppm
Nitrates	NO3	Absorption moléculaire	0,01	ppm
Nitrites	NO2	"	0,0001	ppm
Phosphates	PO4	"	0,001	ppm
Phosphore total	P	"	0,001	ppm
Silice	Si	"	0,01	ppm

On a également déterminé la concentration en tritium (H-3) et le rapport isotopique O-18/O-16.



C.P.GF - 2184 - 01

IMPLANTATION DES MESURES

E = 1 / 200 000

III - / RESULATS DES MESURES /

A - Chimie

Le tableau 2 résume les principaux résultats obtenus.

1 - Caractéristiques générales

Dans un premier temps, nous avons classé tous les échantillons en utilisant 6 critères :

Les chlorures, les sulfates, la silice, le sodium, le magnésium et le strontium. Les concentrations ont été classées de la plus faible (1^e rang), à la plus forte (16^e rang).

On a défini 4 classes relatives :

A du 1^{er} au 5^e rang

B du 6^e au 9^e rang

C du 10^e au 13^e rang

D du 14^e au 16^e rang

Le tableau 3 donne les résultats de cette compilation.

On définit ainsi 3 ensembles :

le groupe 1 comprenant les échantillons 2, 3, 5, 9 et 18 (+ 19 et 20) dont tous les critères sont dans la classe A (sauf 2 dans B pour les n° 1 et 20).

Le groupe 2 dont la majorité des critères se trouve dans les classes B et C. On pourrait distinguer 2 sous-groupes, suivant que certains critères sont ou ne sont pas dans la classe D (cas des n° 11, 4, 16 et 10).

Tableau III : nombre de critères dans chacune des classes

rang	Classe				groupe
	A (1 - 5)	B (6 - 9)	C (10 - 13)	D (14 - 16)	
N° échantillon					
2	6	0	0	0	1
3	6	0	0	0	
5	6	0	0	0	
18	6	0	0	0	
1	4	2	0	0	
9	2	2	2	0	2a
7	0	3	3	0	
8	0	3	3	0	
12	0	3	3	0	2b
11	0	3	2	1	
4	0	2	3	1	
16	0	2	3	1	
10	0	2	2	2	
15	0	1	1	4	3
14	0	1	0	5	
13	0	0	1	5	

le groupe 3 dont la majorité des critères se trouve dans les classes C et surtout D (cas du n° 13).

2 - Interprétation

Afin de préciser la signification géochimique de ce classement sommaire, on a reporté les résultats de ces analyses sur un diagramme de PIPER (U.S. Geological Survey) avec 3 pôles : un pôle carbonaté calcique ($\text{Ca}^{++} \text{HCO}_3^-$), un pôle sulfaté magnésien ($\text{Mg}^{++} \text{Sr}^{++} \text{SO}_4^-$) et un pôle chloruré sodique ($\text{Na}^+ \text{K}^+ \text{Cl}^-$ et N).

Le résultat est illustré par la figure 2.

On peut faire les commentaires suivants :

- A) La grande majorité des échantillons se positionnent sur une ligne Mg - Ca avec une participation du pôle sodique inférieure ou égale à 10 %.
- Dans cet ensemble les groupes définis plus haut sont très bien individualisés, traduisant l'évolution d'un pôle calcique vers un pôle magnésien. Cette évolution est classique, elle est liée au temps de séjour dans l'aquifère : le calcium est en partie fixé par la matrice argileuse de l'aquifère qui libère une quantité équivalente de magnésium (au même titre que les teneurs en silice qui croissent conjointement). Dans un second temps, l'aboutissement des échanges de base entraîne une fixation des alcalino-terreux par les argiles qui libèrent des alcalins faisant évoluer l'eau vers le pôle Na-K.
- Ces phénomènes sont particulièrement significatifs si on considère uniquement les eaux "anciennes" (cf. chapitre isotopes) : figure 2186-03.
- B) Dans le cas du Bassin de Carpentras se superposent d'autres phénomènes liés soit à la nature géologique du substratum, soit à l'activité humaine :
- Echantillon 14 et 15 l'aquifère sollicité est au contact du gypse oligocène qui entraîne le décalage vers le pôle Mg Sr SO₄.

Echantillon 16

A une teneur en sulfates relativement élevée (196 mg/l) s'ajoute un pôle Na Cl N fort en raison de 24 mg/l d'azote minérale sous la forme de nitrates (environ 106,3 mg/l de NO₃). Cette contamination par les nitrates est probablement agricole.

Echantillon 13

Cette analyse est extrêmement intéressante et traduit la présence du Trias salifère. L'intrusion de Na Cl (2,46 g/l) est sans doute liée à un accident tectonique reliant le diapir de Trias de Montmirail aux étangs salés de Courthèzon.

Groupe 1

Le groupe 1 qui est le plus proche du pôle bicarbonaté calcique pose un problème très intéressant. Ce groupe comprend à la fois des eaux issues du karst crétacé : n° 3, 5 et des eaux issues des sables siliceux Crétacé supérieur (sables blancs et sablons), n° 1 et 2 (19 et 20) et 18. Les seules différences significatives entre ces deux groupes concernent la silice, le sodium et les sulfates.

N°	Si O ₂	Na	SO ₄
1 - 20	10,21	6,12	27,4
18	8,68	2,47	18,3
2 - 19	9,18	3,44	23,1
3	6,32	1,19	3,14
5	5,72	1,37	7,22

Il est tentant d'établir une liaison entre les 2 systèmes (d'autant que les sables siliceux du Crétacé sont totalement décarbonatés et décalcifiés).

Teneur en silice

Les teneurs en silice sont très variables et généralement fortes (minimum 6,32 mg/l n° 3 maximum 31,4 mg/l n° 14) ces concentrations anormalement élevées sont la conséquence d'un pH relativement basique qui favorise la mise en solution du Si O₂. Sur la figure 2186-04 on a reporté la relation entre la silice et le pH, la corrélation est évidente ($r \approx 0,81$) et une mesure sur place du pH devrait améliorer encore cette relation.

Rôle des évaporites

Les évaporites de l'Oligocène sont caractérisées par des concentrations élevées en Strontium et une corrélation entre les sulfates et le strontium devrait permettre de différencier nettement nos trois groupes d'eau : la figure 2186-05 illustre cette corrélation. On peut faire les remarques suivantes :

- les groupes 2 et 3 sont parfaitement individualisés mais l'eau n° 16 (forage Costat) se détache légèrement en direction du groupe 3 traduisant peut-être une contamination par le gypse oligocène.
- dans le groupe 1 l'ensemble constitué par les sables blancs, les sablons et la source de Vaguières se distingue assez nettement de celui formé par les eaux du karst (n° 5 et n° 3) essentiellement à cause d'une augmentation des sulfates.
- l'échantillon 9 pose un problème particulier avec une teneur en sulfates de 6,76 mg/l (confirmée par le bon équilibre de la balance ionique $\Sigma \text{ még}^+ = 5,783$ $\Sigma \text{ még}^- = 5,693$). Cette concentration en sulfates, de même que celle en chlorures, se rapproche des concentrations à la sortie du karst

	S04	Cl
n° 9	6,76	5,47
n° 3	3,14	2,70
n° 5	7,22	3,34

Mais ceci est en contradiction avec certains autres éléments.
Une nouvelle analyse de cette eau sera réalisée pour vérifier ce point.

C) Les rapports chimiques caractéristiques : $r \text{ Mg/Ca}$ et i.e.b (indice d'échange de base) confirment les résultats précédents et apportent des éléments d'interprétation complémentaires :

- le rapport $r \text{ Mg/Ca}$ permet de différencier des eaux "profondes" d'eaux plus "superficielles" et de mettre en évidence des mélanges.

* eaux superficielles (3, 4, 5, 7, 12) $r \overline{\text{Mg/Ca}} \simeq 0,165$

* eaux profondes (8, 9, 10, 11, (13)) $r \overline{\text{Mg/Ca}} \simeq 0,715$

mais dans ces deux ensembles il est possible de faire des distinctions : ainsi les n° 4 et 7 ont un $r \text{ Mg/Ca}$ qui se rapproche des valeurs les plus basses du groupe "profond" (8 et 11) et un mélange est donc possible, (cf. tableau 2). De même le $r \text{ Mg/Ca}$ des échantillons n° 14, 15 et 16 (0,215 en moyenne) se rapproche du pôle superficiel.

- le phénomène est encore plus net en analysant l'i.e.b. Les échantillons 4 et 7 d'une part et 14, 15 et 16 d'autre part ont un i.e.b. négatif (le n° 13 aussi mais cette eau sort de notre classification).

- un autre élément très intéressant est donné par l'i.e.b : il s'agit de la similitude de l'i.e.b pour les échantillons n° 3 et 5 (karst) et le n° 11, forage Richemon.

3 - Conclusions partielles

Il est donc possible de différencier 3 groupes d'eau dans le système hydrogéologique du bassin de Carpentras :

- un groupe à dominante bicarbonatée calcique (origine karstique et sables Crétacé supérieur).
- un groupe à dominante sulfaté calcique et magnésien (contamination par les évaporites tertiaires).
- un groupe "moyen", avec de légères tendances vers l'un ou l'autre des groupes précédents, caractéristique des eaux du réservoir miocène sens strict mais aussi des eaux superficielles de la région (n° 4, n° 7, n° 12).

2 eaux sortent de ce schéma : le n° 13 largement dominé par les évaporites du Trias, et le n° 16 contaminé à la fois par le gypse oligocène mais surtout par des nitrates d'origine agricole (?).

B - Isotopes

On trouvera en annexe une note technique concernant les méthodes isotopiques et définissant méthodes analytiques et unités. Rappelons simplement que le Tritium est l'isotope radioactif de l'hydrogène H-3 et qu'il n'a été introduit massivement dans le cycle hydraulique que depuis les expériences thermonucléaires (1952). L'oxygène 18 (O-18) est l'un des isotopes stables de l'oxygène. Ces deux isotopes sont combinés dans la molécule d'eau sous la forme de $^1\text{H}^3\text{H}^16\text{O}$ ou de $^1\text{H}_2^18\text{O}$. Les résultats des mesures figurent sur le tableau 4.

1 - Concentration en tritium.

On peut dans un premier temps distinguer 3 groupes d'eaux :

- a) concentration en tritium proche du bruit de fond : $\leq 1 \text{ uT}$ $1,8 \pm 0,6$ et $2 \pm 0,6 \text{ uT}$.

Il s'agit sans aucune ambiguïté d'eau ancienne dont l'âge est en toute rigueur supérieur à 30 ans. La contamination par des eaux superficielles est nulle ou extrêmement faible ($1,8$ ou $2 \pm 0,6 \text{ uT}$).

- b) concentration en tritium de $57 \pm 10 \text{ uT}$: il s'agit d'une eau "actuelle" avec un âge moyen de 1 à 2 ans. Cette valeur est en effet proche de celle des précipitations moyennes actuelles.

- c) concentration en tritium de 20 à 30 uT. Il s'agit d'un mélange entre des eaux anciennes et des eaux actuelles. Dans le cas des 2 échantillons concernés un mélange à 50 % pourrait être envisagé.

- d) Discussion.

En fait les eaux du groupe "a" sont très probablement beaucoup plus anciennes que 30 ans. En effet une analyse sur un forage profond, celui de Salignan (Evin et al 1967) a donné une concentration en tritium $< 3 \text{ uT}$ et une activité en C-14 de 56,2 % N.B.S. (moyenne de prélèvements en Avril 1966 et Juillet 1967). En appliquant une correction statistique (VOGEL 1970) et sans tenir compte de corrections chimiques ou isotopiques ($^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$) on aboutit à un âge de l'ordre de 3500 ans.

Les mesures réalisées sur le forage de PERNES (Evin et al 1976) donnent une activité en C-14 encore plus faible : 3,5 % (17/1/70) mais difficilement interprétable en raison d'une contamination certaine par des eaux superficielles : 8 uT le 2/11/69, 57 uT le 21/11/69 et 36 uT le 9/12/69. (MARGRITA , C.E.N.G. com. pers.).

Des mesures de C-14 en cours permettront de mieux cerner l'âge de l'eau de ces formations profondes.

2 - Concentration en oxygène 18

On peut distinguer 2 groupes de valeurs, l'un centré sur -7 ‰ (moyenne $-7,01 \pm 0,33 \text{ ‰}$) (échantillons n° 1, 2, 4, 7, 8, 9, 13, 14 et 15) et l'autre beaucoup plus dispersé de $-8,39$ à $-9,97 \text{ ‰}$ (n° 3, 5, 11, 12 et 16).

Cette répartition des concentrations en oxygène 18 traduit l'impact des 2 phénomènes qui conditionnent le rapport isotopique $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$: le fractionnement isotopique lié à la température (effet d'altitude et/ou saisonnier) et l'effet tampon lié au mélange dans le réservoir.

a) teneur en oxygène 18 relativement positive : de $-6,5$ à $-7,5 \text{ ‰}$.

Il convient de distinguer 2 cas :

- soit la concentration en tritium est faible (1 à 2 uT) et implique donc, un temps de renouvellement long (et un bon mélange) de l'aquifère : dans ce cas la concentration en oxygène 18 reflète l'altitude du bassin d'alimentation. Dans ce groupe on constate que les valeurs sont très groupées de $-6,71$ à $-7,40 \text{ ‰}$ (avec une seule anomalie l'échantillon n° 11 avec $-9,34 \text{ ‰}$). On peut considérer dans un premier temps que ces valeurs reflètent l'altitude du bassin versant molassique soit environ 70 à 80 m NGF (notons que cette évaluation ne tient pas compte d'un effet de paléoclimat possible ?).

- soit la concentration en tritium est proche de celles des précipitations actuelles et deux phénomènes peuvent jouer conjointement : bassin versant "bas" et effet saisonnier (précipitations chaudes (et positives) d'été).

C'est probablement le cas des échantillons n° 4 et 7.

c) teneur en oxygène 18 relativement négative : de $-8,4$ à 10‰ .

Ces valeurs concernent essentiellement des eaux avec des concentrations en tritium notables. Elles sont donc liées soit à l'altitude élevée connue du bassin versant : cas des n° 3 et 5 sources "karstiques", soit à l'effet saisonnier n° 16 ou 12.

- le cas du prélèvement n° 11 est plus complexe. La concentration en O-18 de $-9,34\text{‰}$ est proche de celle des eaux du karst : $-8,91$ et $-9,11\text{‰}$ mais la concentration en H-3 du n° 11 est de $2 \pm 0,6\text{ uT}$, soit très proche de celle des "eaux profondes". Il semble raisonnable d'envisager pour ce forage une participation importante d'eau provenant du "karst profond" (du type de celles observées à Salignan). En effet une eau de ce type devrait avoir une concentration en oxygène 18 négative (bassin versant élevé).

Rappelons par ailleurs la similitude entre l'indice d'échange de base (i.e.b) du n° 11 et des n° 3 et 5 (eau du karst, cf. chimie).

3 - Conclusions partielles

Sur la figure 2186-06 nous avons reporté la relation entre la concentration en O-18 et celle en H-3. Cette figure explicite très clairement les relations qui existent entre ces divers types d'eau :

en considérant 2 pôles : un pôle "eau profonde" (et ancienne) = E.P. caractérisé par une très faible concentration en tritium et un pôle "eau superficielle" (et actuelle) : E.S. caractérisé par des concentrations en tritium de 50 à 60 uT, on peut imaginer le schéma suivant :

eau de type molasse sens strict : pas de tritium et O-18 $\sim -6,75\text{‰}$: n° 8, 9 et 10.

eau de type molasse sens large : pas de tritium mais O-18 légèrement plus négative -7 à $-7,5\text{‰}$ (participation d'eau provenant de la périphérie du bassin) : n° 1, 13 et 2.

eau à dominante superficielle d'origine locale : tritium $\sim 55\text{ uT}$ O-18 de -7 à -10‰ : n° 4, 7, 16 et 12.

eau de type karst superficielle : tritium $\sim 55\text{ uT}$ et O-18 $-9 \pm 0,1\text{‰}$.

Dans ce schéma, les relations et mélanges suivants sont possibles (cf. figure 2186-07).

- Relation A : eau de karst ancienne
- Relation B : eau alimentant actuellement la nappe du Miocène (ou bien provenant d'elle mais avec une contamination par les pluies).
- Relation C : mélange entre des eaux profondes et des eaux superficielles d'origine locale : il s'agit là de 2 forages exploitant l'aquifère miocène au contact avec les gypses oligocènes où existe un karst actif, siège de circulation relativement rapide.

IV - / POURSUITE DE L'ETUDE /

L'étude géochimique des eaux du bassin tertiaire de Carpentras se poursuit actuellement par de nouvelles mesures afin de préciser soit l'origine des eaux (zone des sables blancs et sablons, zone du n° 13, source de Caromb), soit leur temps de renouvellement (mesure de l'activité C-14 dans les échantillons n° 1, 2, 9, 10 et 11).

Par ailleurs une mesure systématique des teneurs en fer dissous est en cours.

Erik SIWERTZ
Ingénieur Hydrogéologue.

Erik

Toulon L

Géochimie Miocène Vaucluse

LISTE DES PRELEVEMENTS (première série)

1	- Galeries Sablons (en surface)	23/10/80
2	- Forages Sables blancs (en surface)	23/10/80
3	- Source du Groseau (a l'émergence)	23/10/80
4	- Les Fontainiers (pro parte en surface)	23/10/80
5	- Source N.D. des Anges (à l'émergence)	19/11/80
6	- Fontaine de Ville d'Auzon	"
7	- Ruisseau du Brégoux (Aubignan)	"
8	- Forage Saint Verand (prof. 200 m)	"
9	- Forage Garrichon (A 421 Prof. 85 m)	"
10	- Forage Ratel (A 43 prof. 220 m)	"
11	- Forage Bichemon Réssuréno (A 47 prof. 125 m)	"
12	- Fontaine d'Aubignan	"
13	- Forage N.D. d'Aubune (prof ...)	"
14	- Forage Mazon (C 110 prof . 164 m)	"
15	- Limon de Mormoiron	"
16	- Forage Costat (C 16)	"
18	- Source Vaquières (Mormoiron)	18/02/81
19	- Forage sables blancs	"
20	- Forage Sablons	"

No	pH	Conducti.	SiO ₂ mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	K mg/l	sr mg/l	Cl mg/l	SO ₄ mg/l	HCO ₃ mg/l	NO ₃ (as N) mg/l	$\frac{Mg}{Ca}$	i.e.b. X10	Tritium (H-3) UT	Oxygen 18 (O-18) ‰	Type
1	8.0	365	10.7	70.1	2.61	6.12	1.38	0.17	6.96	24.1	188.4	2.42	0.061	.71	< 1	- 7.07	SUR
2	8.0	405	9.36	76.7	2.61	3.57	1.07	0.20	3.78	18.4	221.1	0.99	0.056	.39	< 1	- 7.40	SUR
3	7.8	351	6.32	67.3	3.00	1.19	0.33	0.14	2.70	3.14	210.6	0.22	0.073	.14	59	- 9.11	KARST
4	7.8	747	13.5	128.8	18.5	12.4	1.64	0.85	32.1	173.7	190.1	4.84	0.246	-.27	51	- 6.91	SUP(1)
5	7.9	418	5.72	84.9	3.53	1.37	0.22	0.12	3.34	7.22	255.0	0.20	0.069	.12	50	- 8.91	KARST
7	8.0	739	11.6	129.9	20.3	11.8	1.41	0.94	23.6	104.9	338.9	1.58	0.258	-.10	47	- 7.52	SUP(1)
8	8.1	621	23.4	92.0	22.1	13.2	1.52	0.80	12.2	57.2	325.0	1.06	0.396	.51	1.8 ± 0.6	- 6.68	FOR 200
9	8.05	496	17.8	56.1	31.3	8.14	1.41	0.84	5.47	(6.76)	325.3	0.05	0.919	.47	< 1	- 6.81	FOR 85
10	8.20	544	25.9	53.2	33.3	18.5	1.71	1.21	10.6	48.8	291.6	0.01	1.031	.84	< 1	- 6.71	FOR 220
11	8.0	631	14.2	88.3	27.6	9.23	1.33	0.57	20.2	91.0	256.7	1.56	0.515	.18	2 ± 0.6	- 9.34	FOR 125
12	7.95	662	12.1	112.4	11.8	13.5	4.75	0.73	22.2	92.1	261.8	4.10	0.173	.39	55	- 9.97	SUP(1)
13	7.95	6238	17.9	257	347	700	24	8.70	1760	683	325.3	0.01	2.225	- 205	< 1	- 7.35	FOR
14	8.25	2177	31.4	387	73	19.0	3.54	9.20	16.4	1120	241.1	1.02	0.311	-1.22	20	- 7.12	FOR 164
15	8.15	2465	29.9	556	44.5	10.0	1.47	9.92	19.3	1340	269.9	9.44	0.132	-1.49	28	- 6.55	SUP
16	7.95	978	13.1	159.8	18.5	13.7	2.20	2.70	35.5	196.0	180.1	24.0	0.191	-2.35	67	- 8.39	FOR170
18	7.8	387	8.68	68.5	1.55	2.47	0.61	0.18	3.62	18.3	192.3	1.37	0.037	.35			SUR
19	7.9	440	9.00	75.9	2.42	3.30	1.06	0.21	4.82	27.7	208.9	1.51	0.052	.29			FOR S
20	7.9	398	9.72	70.3	2.60	6.13	1.32	0.19	7.48	30.6	186.9	2.00	0.061	.68			FOR S

n° échantillon	H-3 (UT)	O-18 (‰)
1	< 1	- 7.05
2	< 1	- 7.40
9	< 1	- 6.80
10	≤ 1	- 6.70
13	< 1	- 7.35
8	1.8±0.6	- 6.70
11	2.0±0.6	- 9.35
14	20 ± 1	- 7.10
15	28 ± 1	- 6.55
7	47 ± 2	- 7.50
6	46 ± 2	
5	50 ± 2	- 8.90
4	51 ± 2	- 6.90
12	55 ± 2	- 9.95
3	59 ± 3	- 9.10
16	67 ± 3	- 8.40

Tableau 4 : Résultats Isotopiques

DIAGRAMME DE PIPER

C.P.G.F.-2186-02

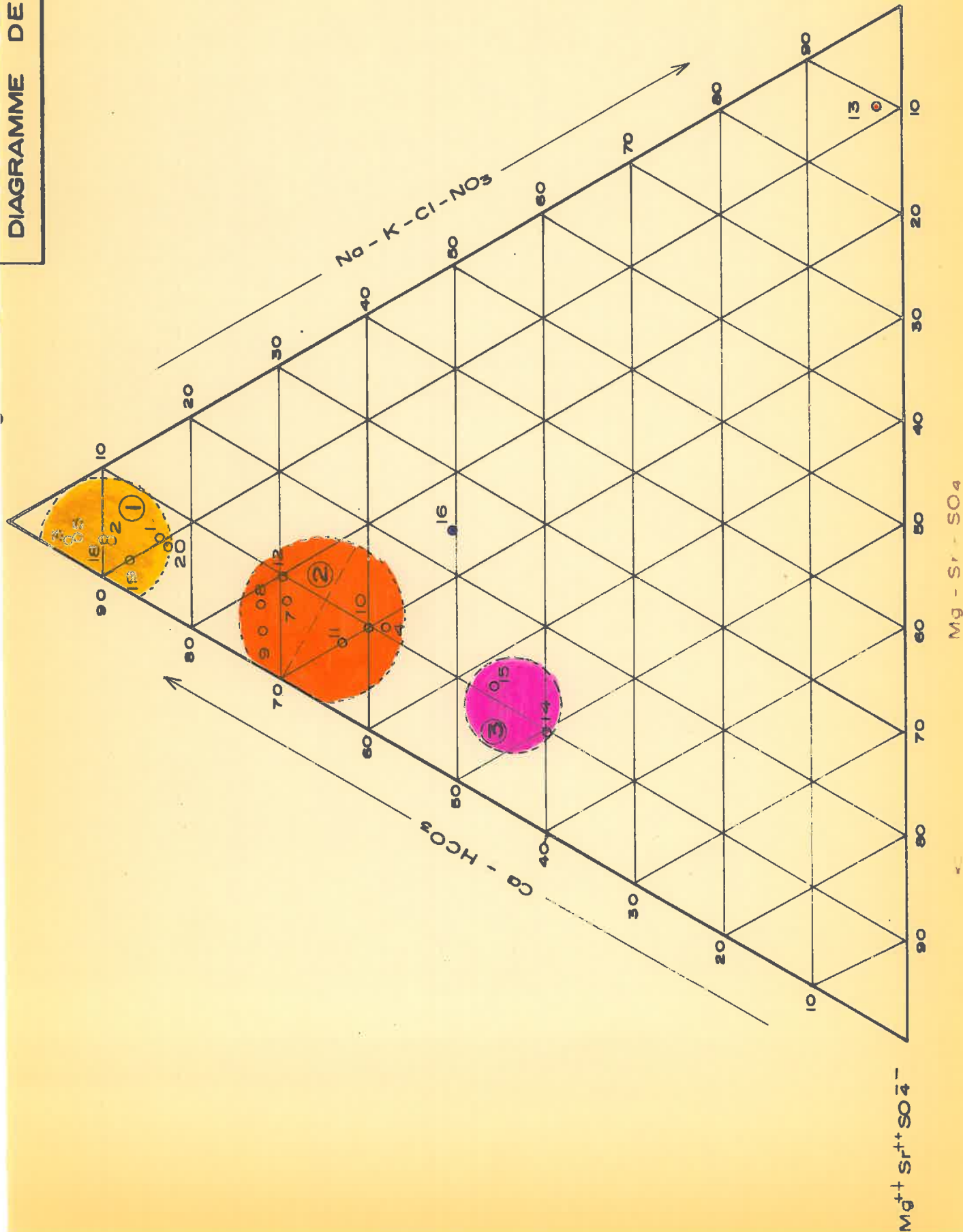
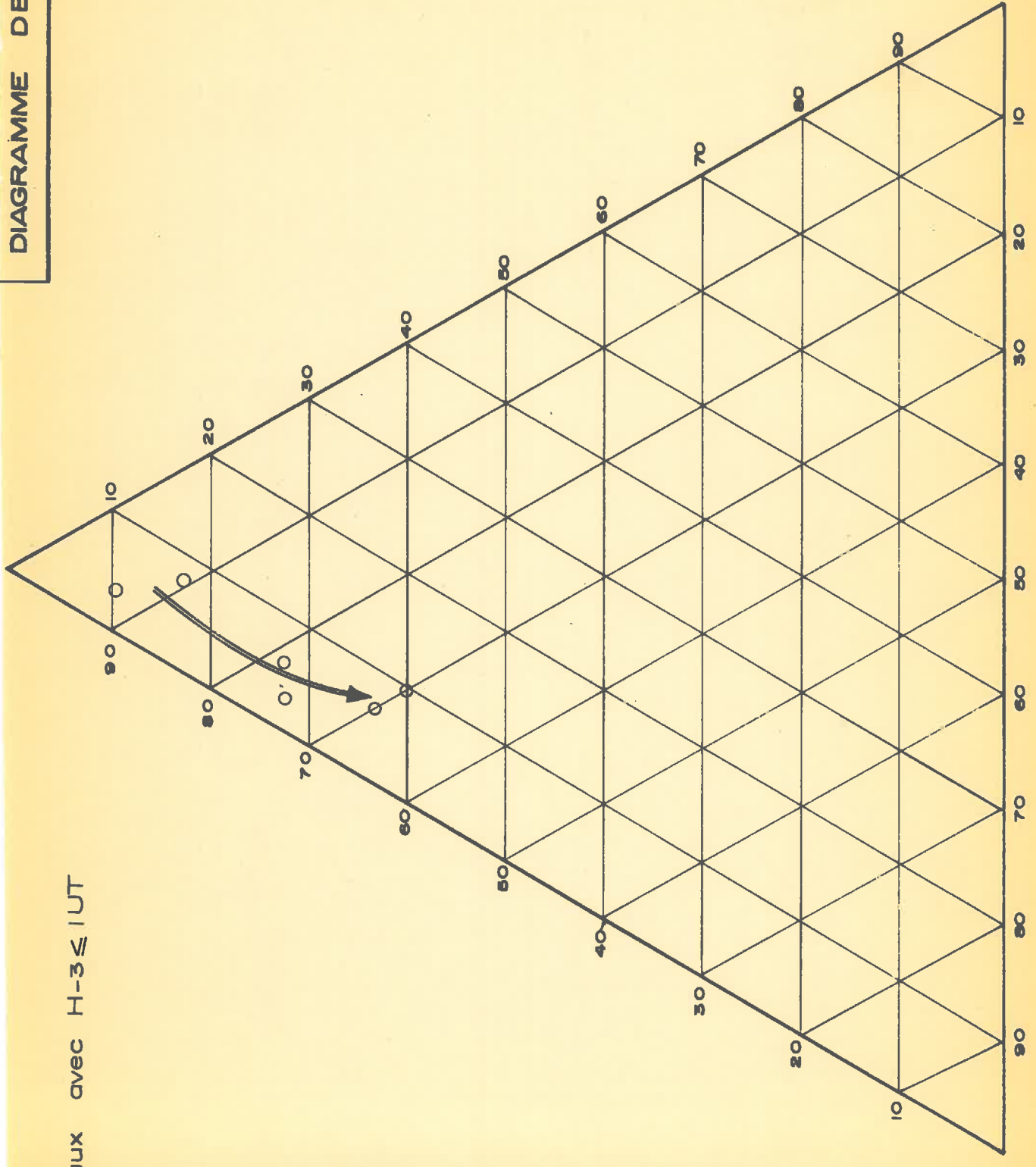


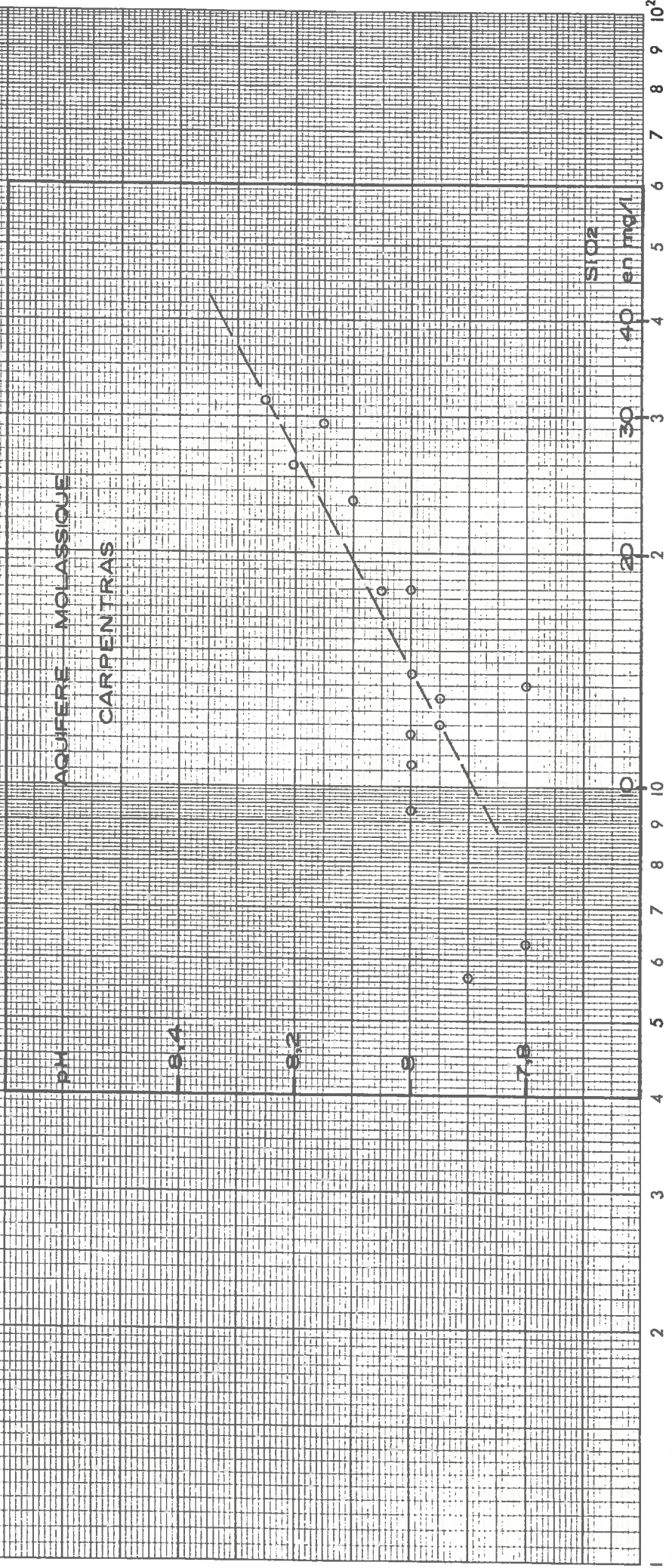
DIAGRAMME DE PIPER

Eaux avec $H-3 \leq 1UT$

CPGF-2186-C3

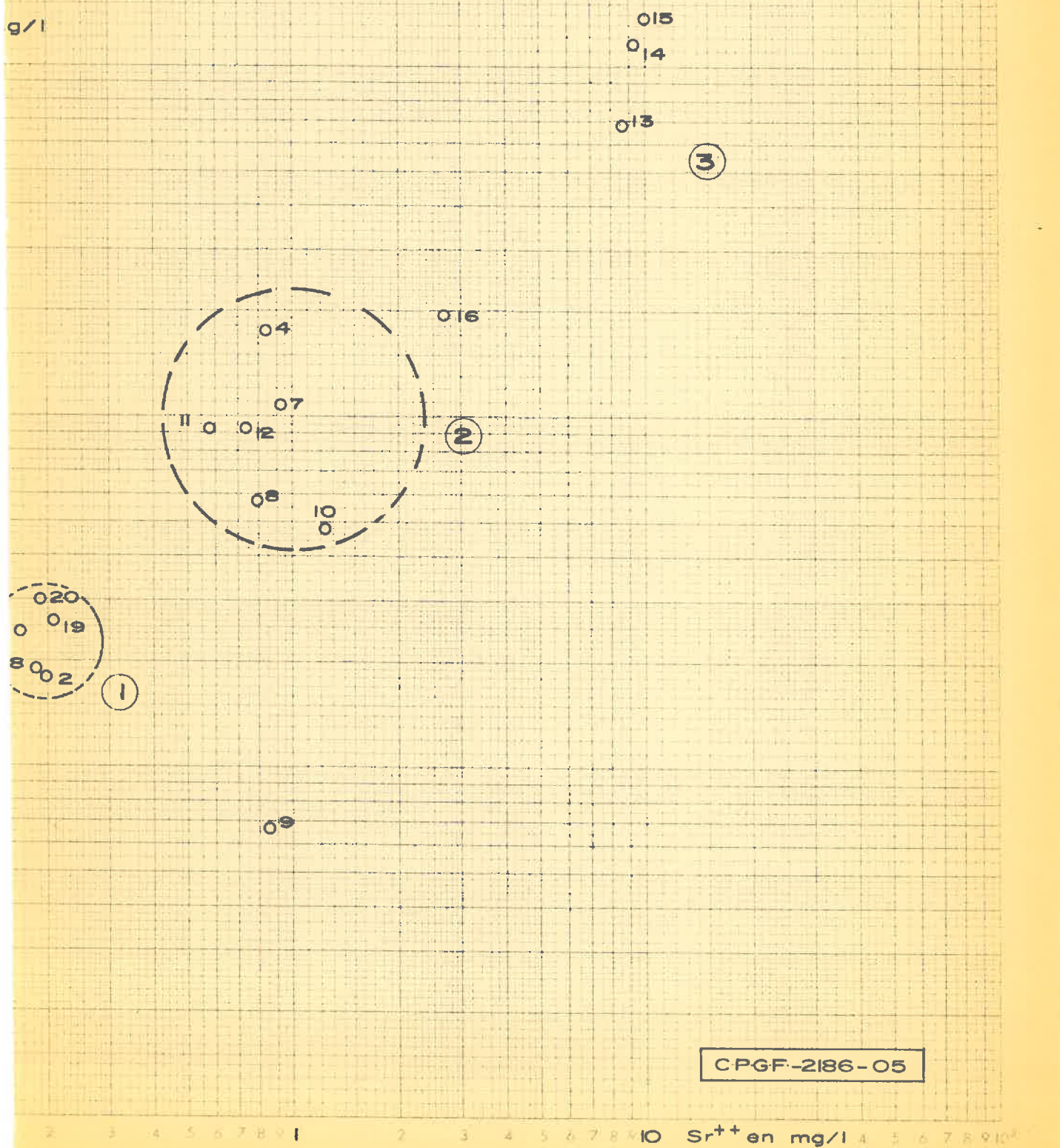


RELATION ENTRE LE PH ET LA TENEUR EN SILICE

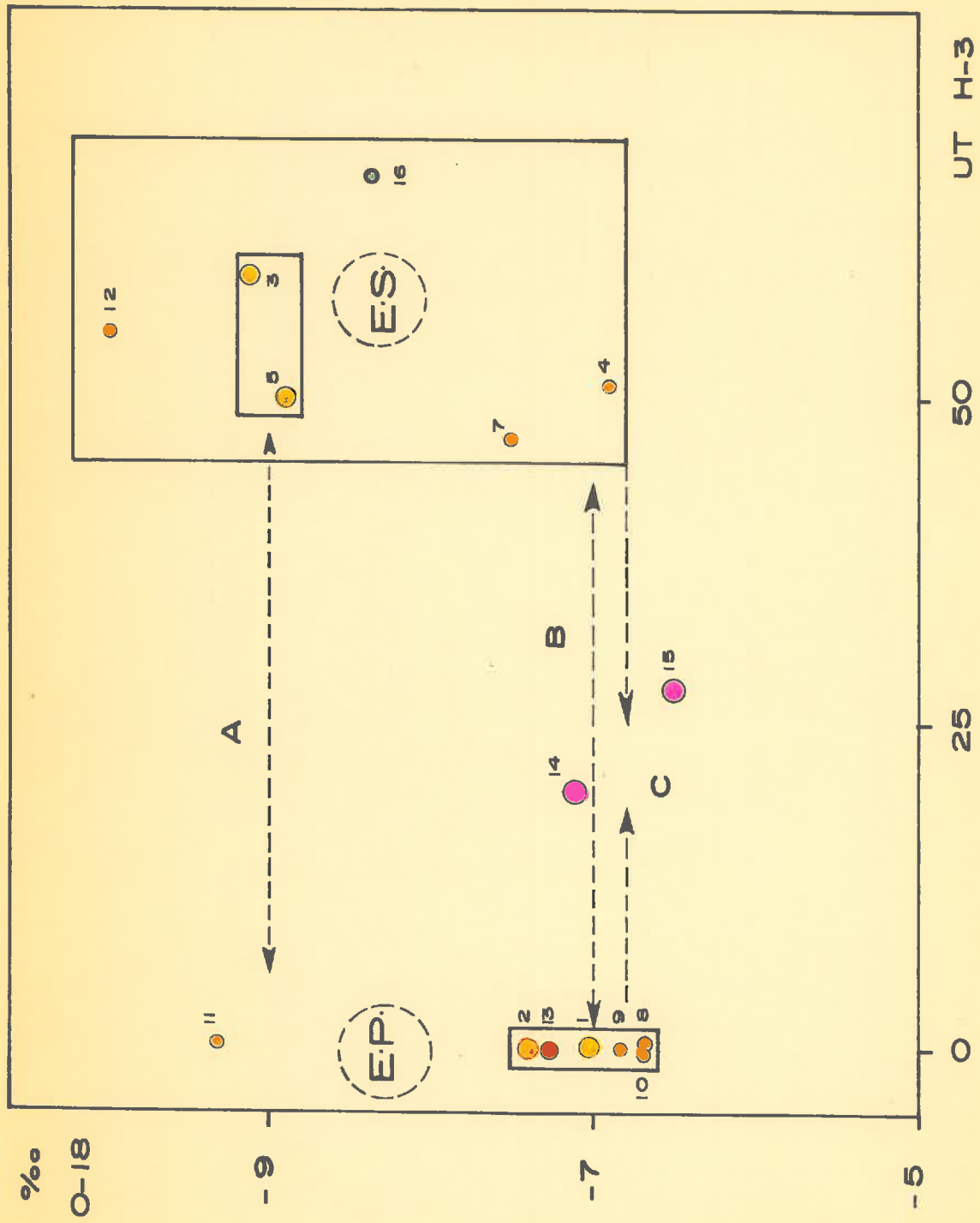


CORRELATION ENTRE LA CONCENTRATION
EN STRONTIUM ET EN SULFATES

g/l



CPGF-2186-05



RELATION ENTRE LA CONCENTRATION
EN TRITIUM ET EN OXYGENE 18

reau Lyon Sud-Est
venue de Chassieu

. 69800 - ST PRIEST

J 890 - 64 - 56

RECHERCHES D'EAU SOUTERRAINE

METHODES ISOTOPIQUES

NOTE TECHNIQUE



CPGF

Compagnie de Prospection
Geophysique Française

77-79 Avenue Victor-Hugo 92500 Rueil-Malmaison

I. - INTRODUCTION

1 - GENERALITES

Les techniques isotopiques, utilisant les isotopes de l'environnement, sont relativement récentes et ne sont mises en oeuvre de façon "classique" que depuis les années 1970. Il convient de distinguer les isotopes de l'environnement dont il sera question ici des divers radionucléides qui sont utilisés dans les techniques de traçage artificiel.

Il ne sera fait mention ici de façon détaillée que des variétés isotopiques existant naturellement dans la molécule d'eau. Pour mémoire, on peut citer d'autres isotopes de l'environnement dont l'intérêt hydrogéologique ne fait pas de doute : carbone 14 (^{14}C) ou azote 15 (^{15}N), silicium 32 (^{32}Si , en cours d'étude).

2 - ABONDANCES NATURELLES DES ISOTOPES DE LA MOLECULE D'EAU

L'atome d'oxygène et l'atome d'hydrogène existent tous deux dans la nature sous forme d'isotopes dont les caractéristiques et proportions sont rappelées dans le tableau ci-dessous :

Isotopes	Fréquence (%)	Nature
Oxygène banal ^{16}O	99,76	stable
Oxygène 17 ^{17}O	0,04	stable
Oxygène 18 ^{18}O	0,20	stable
Hydrogène banal ^1H	99,985	stable
Deutérium D ou ^2H	0,015	stable
Tritium T ou ^3H	$10^{-15} \rightarrow 10^{-12}$	radioactif β^- période 12,26 ans

En ce qui concerne les *isotopes stables*, parmi les 9 combinaisons possibles pour la molécule d'eau, seules sont d'un intérêt pratique $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ - $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$ et $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$ réparties approximativement dans l'hydrosphère en 997 680, 2 000 et 320 parts par million.

La molécule d'eau qui contient un atome de tritium ($^1\text{H}^3\text{H}^{16}\text{O}$), bien que rarissime, est d'un grand intérêt car cet émetteur β^- est détecté de façon très sensible par les compteurs, grâce à la réaction :



3 - METHODE ANALYTIQUE, UNITES UTILISEES ET PRECISION DES ANALYSES

Le tritium est un émetteur bêta faible (18 Kev), il est analysé par comptage en scintillation liquide après enrichissement électrolytique préalable.

Les teneurs sont exprimées en Unités Tritium (UT). 1 UT correspond à la présence d'un atome de tritium pour 10^{18} atomes d'hydrogène. Ceci représente une activité de $3,24 \cdot 10^{-3}$ pCi/ml. L'erreur expérimentale totale, préparation de l'échantillon et comptage, est généralement de ± 10 %.

Pour l'oxygène -18, il est plus précis du point de vue des mesures et plus explicite du point de vue du cycle hydrologique, de donner les valeurs relatives des concentrations au lieu des valeurs absolues. Les résultats s'expriment donc en parts pour mille de différence ou δ par rapport à un standard international de référence qui, pour les eaux, est le SMOW défini par CRAIG (1961).

$$\delta = \frac{R \text{ échantillon} - R \text{ standard}}{R \text{ standard}} \times 1\,000 \text{ avec } R = \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}$$

Cette notation est transposable à tous les isotopes stables et en particulier au deutérium. Le SMOW (Standard Mean Ocean Water) est un étalon devant représenter la composition isotopique moyenne des eaux océaniques, soit 98 % de l'hydrosphère. Son delta est zéro par définition.

L'océan étant le point de départ et d'aboutissement de tous les cycles hydrologiques, on compare la teneur en ^{18}O d'une eau météorique ou continentale à ce réservoir d'origine. Une eau dont le δ est égal à - 5 est appauvrie en isotope lourd de 5 pour mille par rapport au SMOW. On dit souvent qu'elle est plus légère. Inversement, une eau dont le δ est égal à + 2 est enrichie en isotope lourd de 2 pour mille par rapport

au SMOW. Elle est plus lourde.

L'appareil utilisé pour la mesure est un spectromètre de masse à double collecteur équipé d'un système d'introduction permettant une comparaison rapide standard - échantillon (LETOLLE et al., 1965).

L'échantillon d'eau doit subir une préparation avant son passage au spectromètre. Pour l'oxygène-18, c'est en fait du CO_2 , préalablement équilibré avec de l'eau à analyser, que l'on compare à un CO_2 étalon. L'erreur expérimentale sur δ est de $\pm 0,1 \text{ ‰}$.

II. - MARQUAGE ISOTOPIQUE DES EAUX NATURELLES

1 - GENERALITES

Les eaux naturelles présentent des variations dans leurs teneurs isotopiques à la fois dans le temps et dans l'espace. Ces différences sont dues, d'une part aux *circulations* des flux de vapeur entre le réservoir océanique et les masses d'eau continentale et, d'autre part, au "*fractionnement isotopique*" qui régit les changements de phase (vapeur → liquide → vapeur). Ce dernier phénomène est fondamentale et dépend fortement de la température.

Ces deux phénomènes conditionnent les variations dans la composition isotopique *des eaux de pluie*, source unique des eaux continentales.

2 - MARQUAGE DES PRECIPITATIONS EN TRITIUM

Le tritium présent dans l'atmosphère, et donc dans les précipitations, a 2 origines :

- L'une naturelle, en liaison avec le rayonnement cosmique (qui également à l'origine de carbone-14 et du silicium-32, LAL et al., 1962) entraîne une concentration moyenne de l'ordre de 10 UT dans les précipitations.

- L'autre artificielle, est de loin la plus importante et voit son origine dans les essais thermonucléaires effectués depuis 1952, dans l'atmosphère, singulièrement en 1961 et 1962. A la suite de ces essais, les concentrations en tritium dans les pluies sur l'Europe occidentale ont atteint 10 000 UT. Depuis 1963, la concentration en tritium dans les pluies diminue à la suite de la *vidange du réservoir atmosphérique* et de son renouvellement par de l'eau océanique de faible concentration (5 à 10 UT). Les essais chinois et français depuis 1968 contribuent à maintenir la concentration moyenne annuelle en France autour de 100 UT (figure 1).

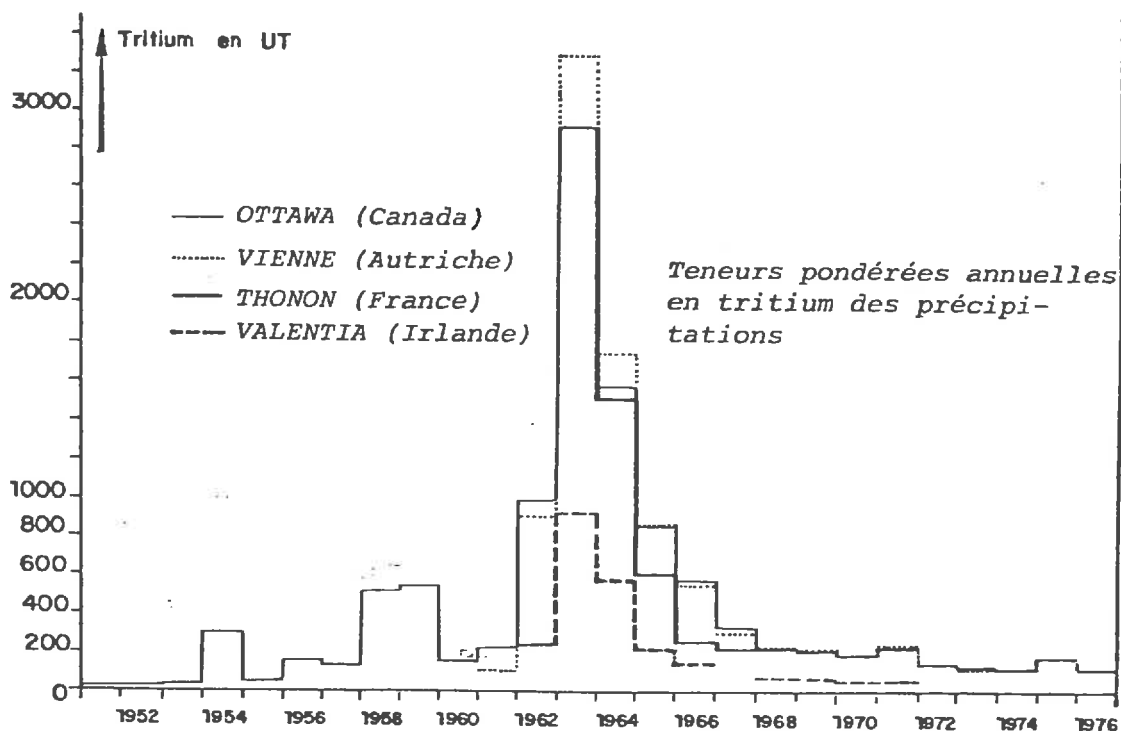


Figure 1 - EVOLUTION DES TENEURS EN ^3H DES PLUIES A QUATRE STATIONS DE L'HEMISPHERE NORD

A l'échelle de l'année on observe une variation saisonnière avec un "pic estival" particulièrement net sous nos latitudes lié à un transfert entre la stratosphère et la troposphère durant le printemps et l'été. Le tableau ci-dessous illustre ce phénomène avec les moyennes mensuelles des précipitations sur la région lémanique depuis 1972.

Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
UT	82	106	170	253	298	203	166	164	86	99	54	43

A ces variations dans le temps s'ajoutent des variations dans l'espace et pour une même latitude on observe un effet de continentalité qui résulte de la dilution des précipitations tritiées à proximité de l'océan (car la vapeur marine est très pauvre en ^3H). Ainsi les zones cotières peuvent recevoir des précipitations 2 à 3 fois plus diluées que les zones continentales.

Enfin l'industrie nucléaire est à l'origine de "bouffées" de tritium plus ou moins importantes et aléatoires qui peuvent maintenant perturber localement le schéma naturel.

En ce qui concerne les isotopes stables et en particulier l'oxygène-18, le facteur essentiel de variation est la *thermodépendance* du fractionnement isotopique.

Les molécules $H_2^{16}O$ et $H_2^{18}O$ présentent des tensions de vapeur et des vitesses de diffusion dans l'air différentes. On conçoit facilement que les molécules lourdes sont moins volatiles que les espèces légères. Elles se trouvent donc concentrées dans les phases liquides. La vapeur qui s'élève au-dessus d'un réservoir est toujours appauvrie en isotopes lourds par rapport au liquide qui lui donne naissance.

Inversement, la condensation d'une fraction de vapeur donne un liquide plus riche qu'elle en isotopes lourds. Elle laisse par effet de bilan une vapeur résiduelle appauvrie.

Ainsi, des précipitations successives issues de la même masse de vapeur seront de moins en moins riches en isotopes lourds.

Au cours de sa progression sur un continent, une masse d'air océanique subit plusieurs stades de refroidissement et de condensations, notamment au passage des barrières montagneuses. On doit donc s'attendre à ce que les précipitations soient de plus en plus pauvres en ^{18}O vers l'intérieur des terres. *C'est un effet de continentalité.*

Puisque le degré de condensation de la masse nuageuse et le facteur de fractionnement dépendent tous deux de la température, une relation doit exister entre la teneur isotopique de la pluie et la température de condensation. On peut généralement et surtout à l'échelle des moyennes établir une relation simple entre la température de condensation à la base du nuage et la température au sol. *Cette double dépendance est le fondement du traçage en ^{18}O , car elle permet de relier la composition isotopique de la pluie à la température au sol.*

La conséquence de cette thermodépendance, est un marquage naturel des précipitations en oxygène-18 :

- Dans l'espace ou géographique en fonction de la latitude et de l'altitude.

- Dans le temps ou *climatique* en fonction de la saison ou des *paléoclimats*.

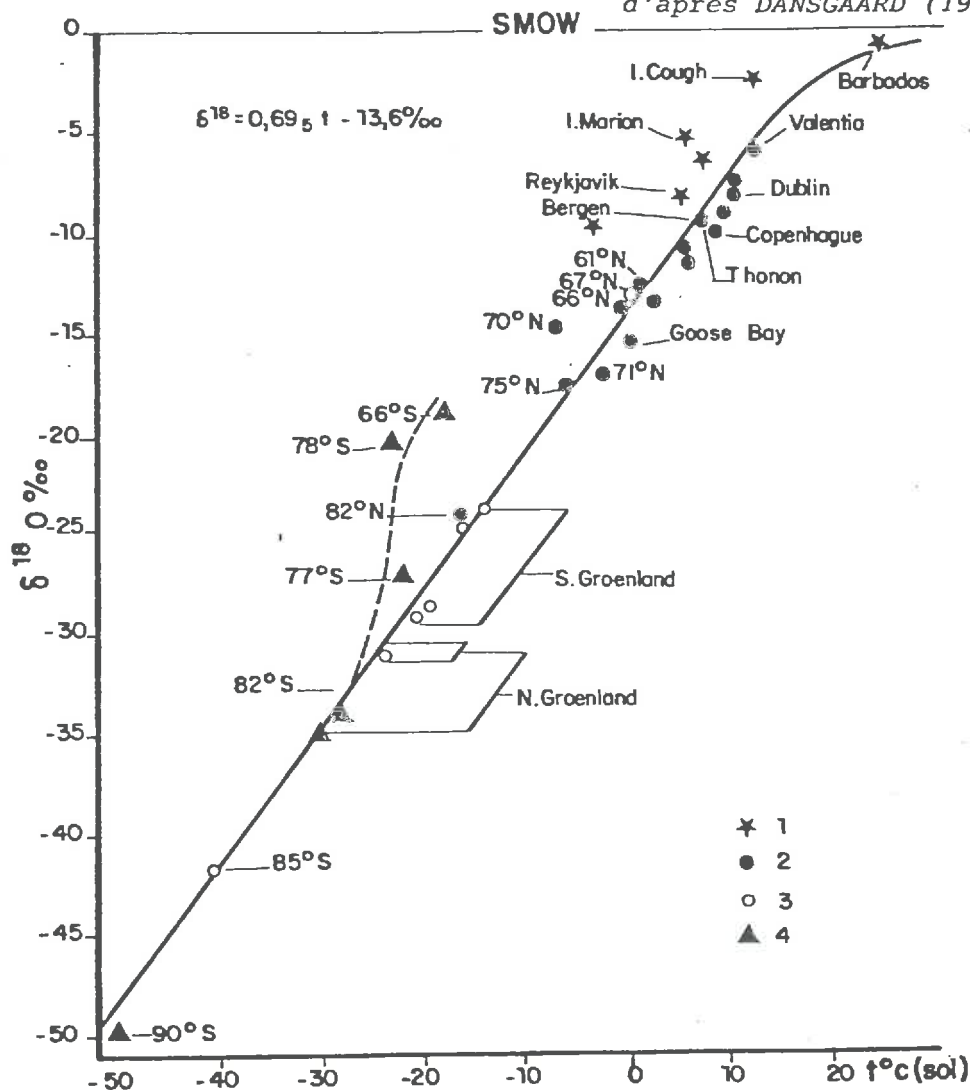
Les variations des teneurs en ^{18}O avec l'altitude (diminution des teneurs quand l'altitude augmente) et les variations saisonnières (pluies d'hiver appauvries par rapport à celles d'été) sont particulièrement utiles pour les études hydrogéologiques.

Le tableau ci-dessous illustre la variation mensuelle de la concentration en oxygène-18 des précipitations pour une station continentale à 350 m d'altitude (δ vs SMOW, moyenne sur 10 ans).

Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
δ	-12,3	-12,1	-11,3	-9,3	-6,9	-8,1	-5,7	-6,2	-8,3	-8,8	-12,3	-12,0

La variation géographique est illustrée par la figure 2,

Figure 2 - Variation de la composition isotopique moyenne des précipitations (^{18}O) en fonction de la température annuelle moyenne au sol : d'après DANSGAARD (1964)



1. Stations insulaires - $4 < t < 25^\circ\text{C}$
2. Stations continentales atlantiques - $17 < t < 11^\circ\text{C}$
3. Stations hautes latitudes - $41 < t < 14^\circ\text{C}$
4. Stations Groenland et Antarctique - $50 < t < -19^\circ\text{C}$

avec, comme paramètre la liaison température / latitude. On peut également imaginer la liaison température altitude (cf. paragraphe suivant).

C'est donc le cycle évaporation → condensation → évaporation qui conditionne les concentrations en oxygène-18 et la relation, δ oxygène-18 de la pluie - température au sol, est un reflet de la rééquilibration rapide des gouttelettes avec la vapeur ambiante pendant la traversée du profil d'atmosphère.

Le principal avantage du traçage par les isotopes stables de la molécule d'eau sur les traçages chimiques réside dans ses propriétés de conservation. Une exception existe toutefois, qui résulte des échanges de l'oxygène-18 avec la matrice de réservoir. Ce phénomène ne prend vraiment de l'importance qu'aux hautes températures dans le cas des *eaux thermales*. Silicates et carbonates étant très généralement plus riches en ^{18}O que les eaux, les teneurs en ^{18}O de l'eau des circuits géothermiques vont s'élever et tendre vers les teneurs de la roche.

III. - APPLICATIONS A LA DYNAMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES

1 - GENERALITES

Avant de réalimenter les eaux souterraines le "signal pluie" subit donc une transformation liée d'une part à l'évapotranspiration et l'évaporation à la surface du sol, mais aussi un premier mélange dû au transit dans la zone non saturée (SIWERTZ 1973, MUNNICH et al. 1967). Ces phénomènes aboutissent suivant les zones climatiques à une variation de $\pm 0,5 \delta$ en oxygène-18 et à une diminution de l'ordre de 10 à 20 % de la concentration en H-3 par le rôle prépondérant des pluies d'automne et d'hiver de faible concentration dans la recharge annuelle (GAT et al. 1967, BLAVOUX 1978).

2 - LOCALISATION DANS L'ESPACE

On utilise le phénomène de thermodépendance du fractionnement isotopique de l' ^{18}O . Compte-tenu du gradient altimétrique de température et de la liaison entre la concentration en ^{18}O des pluies et la température au sol, on peut déterminer la relation entre la concentration en ^{18}O et l'altitude. La mesure de la concentration moyenne en ^{18}O dans un aquifère permet donc de calculer son aire d'alimentation moyenne.

Le tableau ci-joint donne, à titre d'exemple, les gradients altimétriques calculés pour différentes régions du monde (in BLAVOUX 1978).

Pays	Région - Massif	Différence d'altitude	Gradient (δ / 100m)
FRANCE	Préalpes du Chablais	930 - 385 = 545 800 - 385 = 415	0,32 0,27
	MASSIF CENTRAL Mont - Dore	1640 - 930 = 710	0,15*
	Massif du Mont - Blanc	3900 - 2200 = 1700	0,50 \pm 0,12**
	Pyrénées centrales	1440 - 845 = 595 1250 - 650 = 600 900 - 500 = 400	0,30* 0,29 0,18
SUISSE	ALPES - Vallée de l'Aar JURA - Mont-Soleil	1070 - 600 = 470 1183 - 692 = 491	0,37 0,20
AUTRICHE	ALPES - Innsbruck Tyrol	2260 - 580 = 1680 3000 - 1000 = 2000	0,2 pondéré 0,5 \pm 0,25*
EUROPE CENTRALE	Mts. d'Allemagne centrale	700 - 75 = 625	0,37** 0,25**
TCHÉCOSLOVAQUIE	Modry-Dul-Basin	1410 - 1080 = 380	0,28
ITALIE	versant Thyrrhénien LATIUM versant Adriatique	1450 - mer = 1450	0,34 0,28
GRECE	Vallée de Sperkhios	2050 - 165 = 1885	0,16* 0,22 pondéré
CAMEROUN	Mont - Cameroun	4050 - mer = 4050	0,16
TANZANIE	Mont Kilimandjaro	5700 - 4600 = 1100	0,30**
ALGERIE	Massif du Hoggar	2700 - 1376 = 1324	0,24
MARTINIQUE	Montagne Pelée	600 - mer = 600	0,13
NICARAGUA	Côte Pacifique	1700 - 25 = 1675	0,26
ARGENTINE	Andes Andes - Rio Aboucan	5740 - 5350 = 390	0,30* 0,35**
CHILI	Andes - versant Ouest	4500 - mer = 4500	0,32**

* Gradients calculés d'après les teneurs en ^{18}O de sources.
** Gradients transformés à partir des teneurs en deuterium

3 - LOCALISATION DANS LE TEMPS

Il convient de distinguer 2 cas :

a.- Les eaux dont le temps de renouvellement (mean residence time) est supérieur à 25 ans (elles proviennent de précipitations antérieures aux premiers essais thermonucléaires en 1952) et qui ne contiennent pas de tritium décelable ou de très faibles concentrations : $C \leq 20$ UT (NIR 1964).

On ne peut conclure qu'en disant qu'elles sont "anciennes", leur âge pouvant être compris entre 25 et plusieurs milliers d'années. Une analyse du carbone-14, constituant des bicarbonates dissous, permet alors de différencier les eaux dont l'âge est compris entre 1 000 et - 40 000 ans. Entre 25 ans et 1 000 ans, il n'existe pas à l'heure actuelle de technique utilisable en routine, seule l'analyse du silicium-32 (période - 500 ans) permettra de combler cette lacune, mais elle est encore du domaine expérimental.

b.- Pour les eaux dont le temps de renouvellement est inférieur à 25 ans (en pratique < 10 ans) 2 méthodes sont possibles.

- La première fondée uniquement sur le tritium est un modèle mathématique de plus en plus difficile à mettre en oeuvre en raison des faibles variations dans la recharge depuis 1972. La méthode repose en effet sur la comparaison entre la concentration moyenne de l'année dans l'aquifère (ou à son exutoire) et une série de valeurs théoriques de cette concentration calculées à partir de la concentration en tritium dans les recharges annuelles antérieures. L'expression utilisée est (HUBERT, SIWERTZ et al. 1970) :

$$S_n = \sum_{p=0}^{p=\infty} \alpha(1-\alpha)^p \cdot \lambda^p \cdot E_{n-p}$$

avec : S_n = teneur en tritium de l'exutoire pour l'année n

α = coefficient de recharge

λ = 0,95 facteur de décroissance du tritium pour 1 an

E = teneur en tritium de la recharge annuelle (moyenne pondérée)

p = ordre de chacune des recharges antérieures à l'année n

Le temps de renouvellement étant donné par la relation :

$$T = 2 - \alpha/2\alpha \quad (\text{OLIVE 1970})$$

Cette méthode est très intéressante si on dispose d'échantillons anciens de l'eau à analyser (cas des eaux minérales, par exemple).

- La seconde est actuellement (en l'absence de nouvelles expériences thermonucléaires) plus facile à mettre en oeuvre. Elle repose sur un modèle d'amortissement (KUSAKABE et al. 1970). On peut utiliser les variations à l'échelle de l'année (à fortiori sur plusieurs années) d'un ou plusieurs paramètres : tritium, oxygène-18 ... En effet, la périodicité du "signal pluie" (liée au pic estival en tritium et à la thermodépendance de l'oxygène-18) permet de comparer l'amplitude de la variation dans le signal d'entrée à l'amplitude à la sortie du système. La formulation mathématique de cette comparaison, compte-tenu d'un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, permet de calculer le temps de résidence de l'eau dans le système, par l'expression :

$$\frac{d\delta_v}{dt} + \frac{1}{T} \delta_v = \frac{1}{T} \delta_p$$

δ_v = étant la concentration en isotopes dans l'aquifère

δ_p = celle du signal d'entrée

T = le temps de résidence de l'eau

Enfin, signalons que les techniques isotopiques permettent de différencier entre elles (en dehors de toute référence spatiotemporelle) des eaux dont les caractéristiques chimiques sont très proches. Diverses applications sont alors possibles : différenciation des composants de l'hydrogramme d'une crue, participation d'une rivière à l'alimentation de sa nappe d'accompagnement, etc...

IV. - NOTES PRATIQUES

- Echantillonnage : flacons plastiques de 0,5 litre PLEINS et hermétiquement bouchés.
- Répartition des échantillons : suivant le problème posé, en principe un minimum de 4 sur un cycle hydrologique.

- BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE -

- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY 1969 - 1975, Environmental isotope data n° 1 à n° 5, Tech. Rep. Ser. n° 96 - 117 - 129 - 147 - 165 - IAEA, Vienna.
- BLAVOUX B., 1978. Etude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène-18 et du tritium, Thèse, Paris.
- CRAIG H., 1961. Isotopic variations in meteoric waters. Science, 133, 1702-1703.
- DANSGAARD D.W., 1964. Stable isotopes in précipitations, Tellus, 16, 436 - 468.
- HUBERT P., MARCE A., OLIVE Ph. SIWERTZ E., 1970. Etude par le tritium de la dynamique des eaux souterraines, C.R. Acad. Sc., 270, 908-911.
- KUSAKABE M., WADA H., MATSUO S., HORIBE Y., 1970. Oxygen and hydrogen isotope ratios of monthly collected waters from Nasudake volcanic area, Japan. Jour. Geophys. Research, 75, 30, 5941-5951.
- LAL D., PETERS B., 1962. Cosmic ray produced isotopes and their application to problems in geophysics : Progress in elementary particle and cosmic ray physics. North Holland, 4-74.
- LETOLLE R., MARCE A., FONTES J.Ch., 1965. Un spectromètre de masse pour mesure de précision des abondances isotopiques de l'oxygène et du carbone. Bull. Soc. Franç. Minér. Crist., LXXXVIII, 417-421.
- MUNNICH K.C., et al. 1967. Soil water movement and evaporation : change in isotopic composition of water isotopes in hydrology, AIEA, Vienne 567-586.
- NIR A., 1964. On the interpretation of tritium age measurement of ground water. J. Of Geophy. Res., 69, 2589-2595.

OLIVE Ph., 1970. Contribution à l'étude géodynamique du cycle de l'eau,
Thèse, Paris.

SIWERTZ E., 1973. Etude expérimentale par le tritium et l'oxygène-18 de
l'infiltration sur le bassin de Thonon; Thèse, Paris.

TZUR Y., GAT J.R., 1967. Modification of the isotopic composition of rain-
water by processes which occur before groundwater recharge.
In : "Isotopes in Hydrology", I.A.E.A., Vienna; 49-60.