



HAL
open science

Contribution à l'étude de l'aménagement de Caderousse (Vallée du Rhône-Plaine d'Orange-Vaucluse) : géologie et hydrogéologie

Patrick d' Apolito

► To cite this version:

Patrick d' Apolito. Contribution à l'étude de l'aménagement de Caderousse (Vallée du Rhône-Plaine d'Orange-Vaucluse) : géologie et hydrogéologie. Géologie appliquée. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1972. Français. NNT: . tel-00745844

HAL Id: tel-00745844

<https://theses.hal.science/tel-00745844>

Submitted on 26 Oct 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Doctorat de 3^e cycle
N° d'ordre

THESE

PRÉSENTÉE

A L'UNIVERSITE SCIENTIFIQUE ET MEDICALE
DE
GRENOBLE

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR DE 3^{eme} CYCLE

SPECIALITE : SCIENCES DE LA TERRE
MENTION : GEOLOGIE APPLIQUEE

PAR

Patrick J. d'APOLITO

CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'AMENAGEMENT
DE CADEROUSSE
(VALLEE DU RHONE - PLAINE D'ORANGE - VAUCLUSE)
- GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE -

SOUTENUE LE 1972 , DEVANT LA COMMISSION D'EXAMEN :

MM.	R. BARBIER	Professeur	Président
	R. MICHEL	—	Examinateur
	J. SARROT-REYNAULD	—	—
	P. ANTOINE	Maître assistant	—

Doctorat de 3^e cycle
N° d'ordre

THESE

PRÉSENTÉE

A L'UNIVERSITE SCIENTIFIQUE ET MEDICALE
DE
GRENOBLE

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR DE 3^{eme} CYCLE

SPECIALITE : SCIENCES DE LA TERRE
MENTION : GEOLOGIE APPLIQUEE

PAR

Patrick J. d'APOLITO

CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'AMENAGEMENT DE CADEROUSSE

(VALLEE DU RHONE - PLAINE D'ORANGE - VAUCLUSE)

- GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE -

SOUTENUE LE 1972 , DEVANT LA COMMISSION D'EXAMEN :

MM.	R. BARBIER	Professeur	Président
	R. MICHEL	—	Examineur
	J. SARROT-REYNAULD	—	—
	P. ANTOINE	Maître assistant	—

ETUDE DE L'AMENAGEMENT
DE LA CADREUSE
ET HYDROLOGIE

Les études
de plusieurs parents

Je tiens à remercier
l'Université de Grenoble
pour avoir accepté de
recevoir ce travail.

A la direction de la
cadreuse pour sa
participation.

Que soient
présentés mes
vifs remerciements.

Qu'il me soit
permis de
remercier mes
parents.

Merci
à mes
amis et
à mes
parents
pour leur
encouragement.

Je tiens
à remercier
le directeur
de la
cadreuse.

A mes parents

AVANT-PROPOS

Les études exposées dans ce mémoire n'ont pu être réalisées que grâce à l'intervention ou la collaboration de plusieurs personnes auxquelles il m'est très agréable d'exprimer ici ma profonde gratitude.

Je tiens à assurer Monsieur R. BARBIER - professeur à la Faculté des Sciences et à l'Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique de Grenoble, membre du Comité Technique Permanent des Barrages - de ma plus vive reconnaissance pour avoir accepté de diriger ce travail, et, qui me fait l'honneur de présider le Jury. Je lui dois aussi d'avoir pu réaliser cette étude.

A la Direction de la Compagnie Nationale du Rhône, en la personne de Monsieur SAVEY, directeur de la circonscription sud de la C.N.R. et à Monsieur P. MILLON, directeur du Centre d'Etudes d'Avignon, j'adresse mes plus vifs remerciements pour m'avoir accueilli dans leurs services, pour leur aide et leur compréhension.

Que Monsieur JEANJEAN, ingénieur, et Monsieur VIEILLE, avec qui j'eus de profitables discussions et dont je garde un excellent souvenir, trouvent dans ces lignes l'expression de ma profonde sympathie.

Qu'il me soit permis aussi de remercier Messieurs les professeurs J. SARROT-REYNAULD et R. MICHEL pour leurs conseils et enseignement profitables et l'honneur qu'ils me font en participant à la composition du Jury.

- Monsieur P. ANTOINE, maître-assistant, pour avoir accepté de siéger au Jury.
- Monsieur M. DAYRE, à qui je dois la réalisation des essais géotechniques et qui ne m'a jamais compté ni son temps, ni ses conseils.
- Monsieur R. ANGLADA, maître-assistant à la Faculté des Sciences de Marseille, à qui je dois les déterminations micropaléontologiques.
- Monsieur Y. THOMAS, ingénieur E.C.L., qui m'a permis de mener à bien l'étude hydrodynamique qui termine ce travail.

C'est avec plaisir, enfin, que j'exprime ma gratitude au personnel technique de l'Institut Dolomieu, qui par sa grande compétence a permis la réalisation de ce mémoire. Que Madame TELMAT, Messieurs CHABERT et GRANET soient assurés de ma profonde sympathie.

SOMMAIRE

	<u>Pages</u>
PREFACE	1
INTRODUCTION	3
0.1. - <u>APERCU GEOGRAPHIQUE</u>	3
0.1.1. - Géographie physique	3
0.1.2. - Les ressources	4
0.2. - <u>CARACTERISTIQUES GENERALES DE L'AMENAGEMENT</u>	4
0.2.1. - Dispositions générales du projet	4
0.2.2. - Caractéristiques des principaux ouvrages	5
0.2.3. - Exploitation de la chute	5
CHAPITRE I : ETUDES GEOLOGIQUES	7
1.1. - <u>GEOLOGIE REGIONALE</u>	7
1.1.1. - Historique des études	7
1.1.2. - Histoire géologique régionale	7
1.2. - <u>ETUDE STRATIGRAPHIQUE DES MASSIFS DE BORDURE</u>	8
1.2.1. - Le Crétacé	8
1.2.1.1. - BARREMIEN (n ⁴)	8
1.2.1.2. - APTIEN (n ⁵⁻⁶)	8
1.2.1.3. - CENOMANIEN (c ²)	10
1.2.1.4. - TURONIEN (c ³)	12
1.2.1.5. - SENONIEN	15
1.2.1.5.1. - Le Coniacien (c ⁴)	15
1.2.1.5.2. - Le Santonien (c ⁵)	16
1.2.2. - Le Néogène	16
1.2.2.1. - MIOCENE (m ¹)	16
1.2.2.2. - PLIOCENE	16
1.2.2.2.1. - Plaisancien (p)	17
1.2.2.2.2. - Astien (p ₀)	17
1.2.3. - Conclusions stratigraphiques	17
1.2.4. - Plio-Quaternaire	18
1.2.4.1. - Les alluvions anciennes	18
1.2.4.2. - Les alluvions fluviales récentes (Fz)	20
1.2.4.3. - Eboulis et sols résiduels	20
1.3. - <u>GEOLOGIE DU SUBSTRATUM SOUS-ALLUVIAL</u>	20
1.3.1. - Les méthodes d'investigation	20
1.3.1.1. - Prospection géophysique	21
1.3.1.2. - Sondages mécaniques	21
1.3.2. - Cartographie du substratum	21

	Pages
1.3.3. - Etude stratigraphique du substratum	22
1.3.3.1. - CRETACE	22
1.3.3.2. - LE NEOGENE	23
1.3.3.2.1. - Les sables "astiens"	23
1.3.3.2.2. - Le Plaisancien	24
1.4. - REMARQUES SEDIMENTOLOGIQUES ET PALEO GEOGRAPHIQUES	26
1.5. - REMARQUES TECTONIQUES	29
 CHAPITRE 2 : ETUDE GEOTECHNIQUE DES TERRAINS INTERESSES PAR LES OUVRAGES	
2.1. - ETUDE GEOTECHNIQUE DES MARNES PLAISANCIENNES	32
2.1.1. - Situation des échantillons	32
2.1.2. - Résultats des essais	32
2.1.2.1. - Essais d'identification	32
2.1.2.2. - Essais de stabilité	34
2.1.2.3. - Essais de compressibilité	36
2.2. - ETUDE RADIOCRISTALLOGRAPHIQUE DES MARNES PLAISANCIENNES	42
2.2.1. - Méthode d'étude	42
2.2.2. - Etude des diagrammes	42
2.2.2.1. - Illite	42
2.2.2.2. - Chlorite (et kaolinite)	42
2.2.2.3. - Montmorillonite	44
2.2.3. - Conclusions	44
2.3. - OUVRABILITE DES ALLUVIONS RECENTES	45
2.3.1. - Les parois minces	45
2.3.1.1. - Courbes comparatives PMV -PDS	46
2.3.1.2. - Influence de la granulométrie	46
2.3.1.3. - Influence de la profondeur	46
2.3.1.4. - Conclusions	48
2.3.2. - Rescindements et dragages	48
 CHAPITRE 3 : ETUDE HYDROGEOLOGIQUE	
3.1. - DONNEES GEOGRAPHIQUES	50
3.1.1. - Limites de la plaine alluviale	50
3.1.2. - Climatologie	50
3.1.2.1. - Calcul de l'évapotranspiration	50
3.1.3. - Hydrologie	54
3.1.3.1. - Le Rhône	54
3.1.3.2. - L'Aygues	56
3.1.3.3. - La Cèze	56
3.1.3.4. - Le réseau d'irrigation et de drainage	56
3.2. - DONNEES GEOLOGIQUES	56
3.2.1. - Les massifs de bordure	56
3.2.2. - Le substratum	57
3.2.3. - Le remplissage alluvial	57

	Pages
3.3. - ETUDE MORPHOLOGIQUE DE LA NAPPE	62
3.3.1. - Etude des cartes piézométriques	62
3.3.1.1. - Nappe haute du 3 au 5 mars 1970	62
3.3.1.1.1. - Ecoulement	62
3.3.1.1.2. - Alimentation	63
3.3.1.2. - Nappe basse du 14 au 16 octobre 1969	63
3.3.1.2.1. - Ecoulement	63
3.3.1.2.2. - Alimentation	64
3.3.1.3. - Nappe "moyenne" du 15 au 17 avril 1969	64
3.3.1.3.1. - Ecoulement	64
3.3.1.3.2. - Alimentation	64
3.3.1.4. - Conclusions	65
3.3.2. - Fluctuations de la surface piézométrique	65
3.3.2.1. - Amplitude maximale des variations	65
3.3.2.2. - Variations synchrones	66
3.3.2.3. - Influence de la pluviométrie	66
3.3.3. - Conclusions	69
3.4. - HYDROCHIMIE	70
3.4.1. - Méthodes d'étude	70
3.4.2. - Etude des résultats	70
3.4.2.1. - Critères physiques	70
3.4.2.2. - Résultats des analyses pondérales	71
3.4.2.2.1. - Représentation des résultats	71
3.4.2.2.2. - Zonalité hydrochimique	72
3.4.2.2.3. - Evolution de la minéralisation	81
3.4.2.2.4. - Conclusions et problèmes particuliers	84
3.5. - INFLUENCE DE L'AMENAGEMENT SUR LA TENUE DE LA NAPPE	86
 CHAPITRE 4 - CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES DE L'AQUIFERE	
4.1. - ETUDE HYDROCHIMIQUE DES "GRAVIERS" DE LA PIBOULETTE	89
4.1.1. - Le régime du Rhône	89
4.1.2. - Le dispositif d'observation de la nappe	89
4.1.3. - Coupe géologique au droit de la station d'essais	92
4.1.4. - Exposé théorique	92
4.1.5. - Applications numériques	95
4.1.5.1. - Variations comparées du Rhône et du N 423	95
4.1.5.2. - Variations comparées du Rhône et du N 421	96
4.1.5.3. - Variations comparées du Rhône et du N 424	96
4.1.5.4. - Variations comparées des piézomètres N 423 et N 421	96
4.1.6. - Résultats obtenus par d'autres méthodes	97
4.1.7. - Avantages et inconvénients de la méthode	97
4.2. - AUTRES MESURES SUR LES ALLUVIONS AQUIFERES	98
4.2.1. - Essais de pompage	98
4.2.2. - Mesures de vitesse au micromoulinet	98
CONCLUSION	99
ANNEXES	101
BIBLIOGRAPHIE	101

LISTE DES FIGURES

<u>Figures N°</u>		<u>Pages</u>
1	Plan de situation	2
2	Le Cénomanién de Mondragon	11
3	Le Turonien entre Mondragon et Mornas	13
4	Coupes géologiques	27 - 28
5	Analyse granulométrique des marnes plaisanciennes	33
6	Courbes efforts - déformations	35
7	Droites de Coulomb	36
8	Essai de compressibilité	38
9	Consolidation	41
10	Diagramme de diffraction des rayons X	43
11	Courbes comparatives PDS - PMV	47
12	Le Rhône à Saint-Etienne-des-Sorts en 1969 et début 1970	52
13	Débits classés du Rhône à Saint-Etienne-des-Sorts en 1969	53
14	Variations comparées de l'Aygue et de la Cèze en 1969	55
15	Mesure des vitesses au micromoulinet - sondages n° 18 et n° 47 (usine)	58
16	Analyse granulométrique - puits d'essai de l'usine (Piboulette)	59
17 et 17 bis	Profils piézométriques transversaux	60 - 61
18	Variations synchrones du niveau piézométrique entre les 23 et 30 avril 1969	69
19	Variations comparées du Rhône et de la nappe	67
20	Influence de la pluviométrie	68
21	Répartition globale des échantillons sur le diagramme de Piper	73
22	Diagramme logarithmique - Zone A	74
23	" " " Zone A'	77
24	" " " Zone B	78
25	" " " Zone C	79
26	" " " Zone D	81
27	Evolution chimique de la nappe (Hautes eaux)	83
28	" " " (Basses eaux)	84
29	Diagramme logarithmique (eaux de surface)	76
30	Variations comparées du Rhône et de la nappe	88
31	Plan de la station d'essais (Barrage) et cartes piézométriques des 18 et 19 juin 1969	90 - 91
32	Coupe géologique E-O au droit de la station d'essais (Barrage)	93

LISTE DES TABLEAUX

<u>Tableaux N°</u>		<u>Pages</u>
I	Stratigraphie - Tableau synthétique	19
II	Répartition de la microfaune plaisancienne	25
III	Climatologie (station d'Orange - Caritat - 1969)	30

LISTE DES PLANCHES HORS-TEXTE

<u>N° Planches</u>	
1	Aménagement de la chute de Caderousse - Disposition générale des ouvrages
2	Carte géologique.
3	Géologie du substratum sous-alluvial.
4	Courbes de niveau du toit du substratum.
5	Courbes de niveau du toit des graviers.
6	Carte piézométrique dressée d'après les relevés du 3 au 5 mars 1970 (Nappe "haute").
7	Carte piézométrique du 14 au 16 octobre 1969 (Nappe "basse").
8	Carte piézométrique dressée d'après les relevés du 15 au 17 avril 1969 (Nappe "moyenne").
9	Courbes d'égale variation de la surface piézométrique entre nappe basse et nappe haute (1969).
10	Influence des précipitations sur la nappe - Courbes d'égale variation piézométrique entre le 3 et le 17 septembre 1969.
11	Hydrochimie (Résistivité et D.H.T.).
12	Hydrochimie (Ca ⁺⁺ et Na ⁺).
13	Hydrochimie (SO ₄ ⁻⁻ et Cl ⁻).
14	Annexe III - Situation des coupes des figures 4, 17 et 17 bis.

PREFACE

Les études exposées dans ce mémoire se rapportent au projet d'aménagement hydroélectrique de Caderousse (plaine d'Orange) par la Compagnie Nationale du Rhône ⁽¹⁾ et sont l'aboutissement d'un stage que nous avons pu effectuer à la fois sur le chantier d'Avignon et au sein du groupe d'études de la Chute de Caderousse. Dans une certaine mesure ce travail fait suite au rapport géologique préliminaire de Monsieur le professeur R. BARBIER sur le site de Caderousse, et témoigne, comme les études précédemment effectuées par Y. CARIDROIT, F. LETOUZE et J.L. ARNAUD sur d'autres projets et chantiers de la C. N. R. , de l'utilité - au stade du 3e cycle - d'une telle collaboration, même modeste, avec les grandes entreprises de Génie Civil.

Les ouvrages de Caderousse seront réalisés selon un schéma analogue à celui des aménagements antérieurs (Donzère-Mondragon, Montélimar-Logis-Neuf, Vallabrègues, Avignon) : au moyen d'un barrage déterminant une longue retenue endiguée, les eaux du Rhône seront dérivées dans un canal et acheminées vers une usine couplée à une écluse, puis restituées, par l'intermédiaire d'un canal de fuite au lit initial du fleuve.

Le type et les caractéristiques des ouvrages inclus dans un tel aménagement -établi dans une plaine alluviale large et intensément cultivée - sont à la fois déterminés par des critères hydrauliques, morphologiques, topographiques, géologiques et hydrogéologiques, et des considérations relatives à l'économie régionale, et parfois même encore subordonnés à l'esthétique et au pittoresque d'un paysage ou d'un site (aménagement de la Chute d'Avignon).

Situés au sein d'une épaisse formation alluvionnaire aquifère les ouvrages de Caderousse - comme les ouvrages antérieurement réalisés dans les mêmes conditions - mettront à profit les débits considérables du Rhône, sans nécessiter de mesures spéciales d'étanchéisation (qui s'avèreraient d'ailleurs extrêmement délicates). Le barrage et l'usine-écluse, fondés sur les marnes plaisanciennes, seront maintenus par leur propre poids. Ces conditions limitent évidemment la hauteur totale des ouvrages, mais la faible hauteur de chute réalisable doit être, là encore, compensée par l'importance des débits turbinables tout au long de l'année. Enfin la réalisation de l'aménagement ne doit pas perturber la nappe phréatique, importante et activement exploitée.

De cette brève description il ressort déjà que les études à effectuer, dans le cadre de la géologie appliquée aux aménagements hydrauliques, sont d'ordre géologique, géotechnique et hydrogéologique. Afin de compléter l'étude du milieu aquifère, une étude hydrodynamique souterraine a été jointe à ce tryptique.

Le but de cette étude est de contribuer à définir l'ensemble des conditions géologiques et à décrire de façon précise les caractéristiques de la nappe phréatique dans leur état actuel de façon à estimer l'importance des difficultés à prévoir et, éventuellement examiner les solutions qui pourront être adoptées.

(1) - Société Anonyme d'Economie Mixte, chargée de l'aménagement du Rhône.

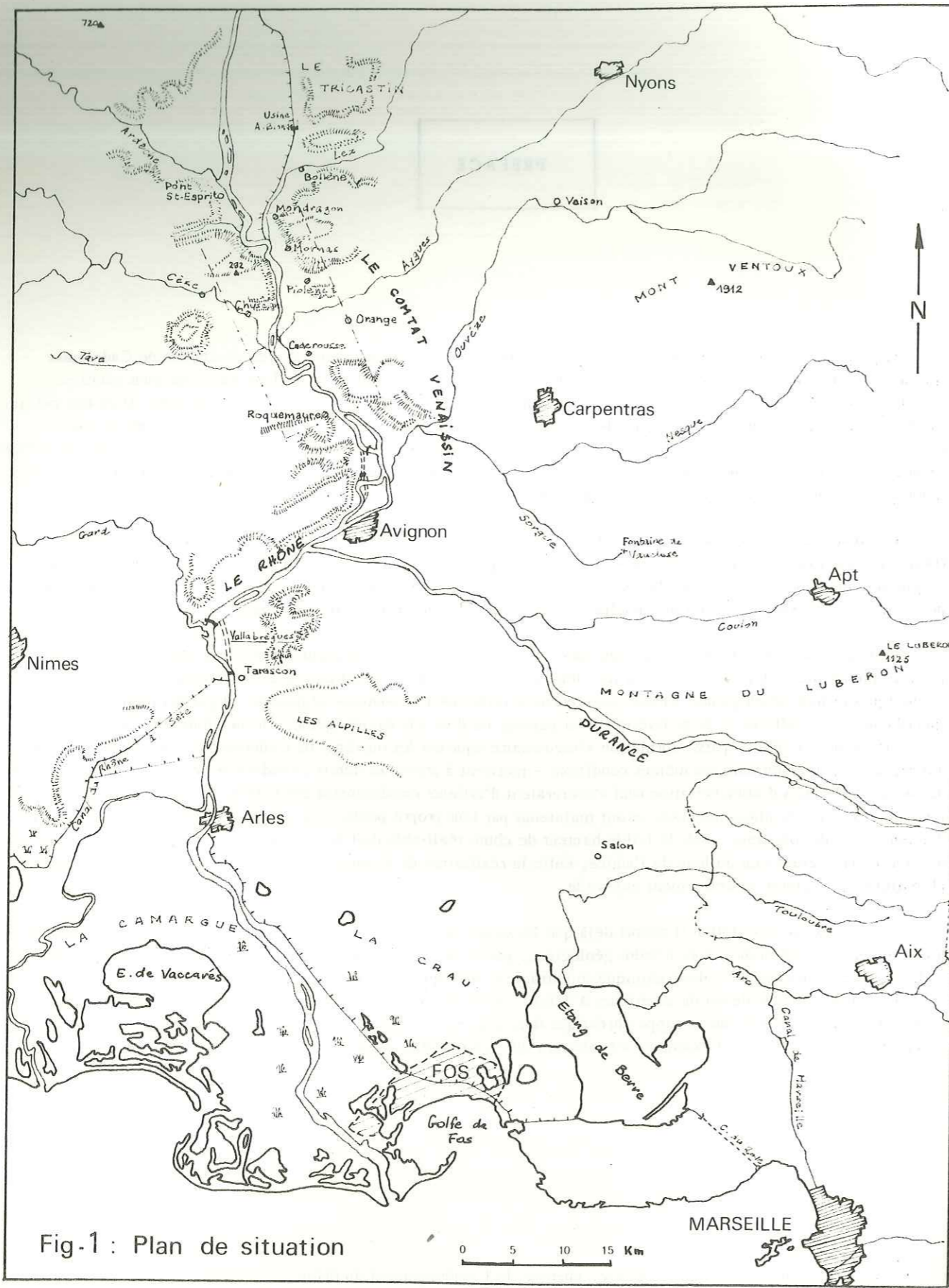


Fig-1 : Plan de situation

INTRODUCTION

Le couloir rhodanien, brusquement resserré au niveau de Mondragon, s'ouvre largement à la latitude d'Orange, aux portes de la Provence. Après avoir longé les contreforts orientaux des massifs gardois, le Rhône traverse, en direction du Sud, sa plaine alluviale considérablement élargie par l'adjonction des plaines de la Cèze en rive droite et de l'Aygues en rive gauche ; puis il franchit l'étroit goulet de Roquemaure avant d'arroser la vaste plaine d'Avignon.

C'est ce secteur - bien individualisé entre deux étranglements - de la vallée du Rhône que nous appellerons la "plaine d'Orange".

Dans le cadre de l'aménagement hydraulique du tiers aval du fleuve, la Compagnie Nationale du Rhône (C. N. R.) se propose d'aménager en cette plaine d'Orange le palier qui fait désormais défaut entre les ouvrages de Donzère-Mondragon et ceux, tout récents, d'Avignon.

0.1. - APERCU GEOGRAPHIQUE

0.1.1. - Géographie physique (fig. 1)

La plaine d'Orange s'étend aux confins des départements du Gard et de Vaucluse, à la frontière septentrionale du Haut-Comtat Venaissin. Elle est limitée à l'Est par le massif d'Uchaux, au Sud par les reliefs calcaires du Lampourdier et de Roquemaure, à l'Ouest par les massifs gardois de la Cèze et de la Tave.

- Les reliefs de bordure, gréseux ou calcaires, se raccordent à la plaine alluviale par des versants très pentus. Quoique peu accusés dans l'ensemble ils déterminent toutefois une topographie accidentée, surtout caractérisée par des versants nord très abrupts : falaises de Mondragon, de Montmout (230), de Mornas (197), de Roquemaure et de Saint-Etienne-des-Sorts (101). Les crêtes sont toujours orientées E-W et séparées par des vallées ou de petites plaines où on remarque encore les multiples murettes de pierre qui soutenaient jadis des champs en terrasses. Les flancs sud sont généralement plus doucement inclinés. On distinguera encore l'allure particulière des reliefs qui constituent les collines tertiaires de Monticaud à l'Est de Chusclan, Saint-Génies-de-Comolas et les flots cénomaniens de Montfaucon et Montlézon.

- La plaine alluviale ; elle représente la majeure partie de la surface du secteur considéré. Edifiée par le Rhône et ses affluents locaux elle atteint sa plus grande largeur à la latitude d'Orange, et se referme presque complètement au passage du verrou de Roquemaure. Sa pente générale N-S est très faible, puisqu'elle passe de la cote 40 à Mondragon à la cote 20 à Roquemaure sur 22 kilomètres, soit une pente moyenne de 0,9%. Les nombreuses divagations du Rhône et les déplacements successifs des confluences ont laissé autant de "îles", de bras morts ou secondaires qui déterminent maintenant de nombreuses îles : île Saint-Georges, des Brotteaux, des Rats, du Colombier, flon de Codolet, de Miémar et surtout la grande île de la Piboulette.

- La végétation, de type méditerranéen, est surtout représentée par des espèces xérophiles, différentes selon le substrat qu'elles colonisent : pins d'Alep ou pins pignons en forêt relativement denses comme au bois de Marcoule ou en bouquets épars dans le massif d'Uchaux et sur les collines de Saint-Génies-de-Comolas ; le thym, le cyste, la bruyère, la lavande, le romarin croissent dans les interstices des blocs gréseux. Sur les calcaires francs la couverture

végétale se transforme peu à peu en garrigues où prospèrent le chêne Kermès, les cystes et les graminées xérophiles. Par endroits subsistent quelques amandiers ou quelques oliviers, et, de rares cyprès gardent encore les ruines de vieilles fermes depuis longtemps désertées.

- Le climat, typiquement méditerranéen est caractérisé par des hivers doux et relativement humides, des étés chauds et secs. Le Mistral souffle avec violence une bonne partie de l'année, agissant ainsi de façon très brutale sur les températures et l'hygrométrie (cf. 3.1.2.).

0.1.2. - Les ressources

Dès l'antiquité les plaines du Haut-Comtat et toutes les basses vallées qui rejoignent celle du Rhône ont fait l'objet d'aménagements dont on admire un peu partout les vestiges. Ainsi l'abondance de l'eau et les irrigations ont mis très tôt en exploitation le grand jardin maraîcher et les vergers qui s'étendent de la Basse-Durance au Tricastin. Plus localement, on mesure, dans la plaine d'Orange, la fertilité incomparable des limons de débordement que le fleuve a répandus partout en une couche assez uniforme au-dessus des graviers et des sables ; les vergers couvrent la totalité des fies, abritées plus ou moins parfaitement par les endiguements ; les cultures maraîchères s'étendent partout, protégées du Mistral par les alignements de cyprès ou le plus souvent de peupliers d'Italie. Enfin, la vigne règne sur les hautes terrasses et les côtes.

Quelques industries se sont implantées dans la plaine d'Orange : usine atomique de Marcoule, usines métallurgiques et chimiques de l'Ardoise et diverses industries locales de moindres importances.

Dans un proche avenir cette région sera desservie par une grande voie navigable, déjà pressentie par TACITE : "un canal au moyen duquel les marchandises, après avoir remonté le Rhône et la Saône, seraient entrées dans la Moselle, puis dans le Rhin qu'elles auraient descendu jusqu'à la mer du Nord...", et susceptible de compléter sa vocation maraîchère par une expansion économique et industrielle, souhaitable pour les populations riveraines.

0.2. - CARACTERISTIQUES GENERALES DE L'AMENAGEMENT (Pl. 1)

Trait d'union entre les aménagements de Donzère-Mondragon (1952) et d'Avignon (en cours de travaux), le tronçon du Rhône compris entre les points kilométriques 200 (1) - au droit de la restitution de Donzère-Mondragon - et 221, à l'aval de la boucle du Revestidou, fait l'objet de cette étude.

Cet aménagement a trois objectifs principaux : créer une chute en vue de la production d'électricité, améliorer les conditions de navigation en alignant les caractéristiques de la voie navigable sur celles du gabarit européen, et, enfin, favoriser le développement de l'agriculture en protégeant les zones les plus basses de la vallée et en perfectionnant le réseau d'irrigation.

0.2.1. - Dispositions générales du projet

L'aménagement de Caderousse est constitué par une courte dérivation établie entièrement dans l'île de la Piboulette, et par une longue retenue ; il est situé dans les départements du Vaucluse et du Gard et comporte, en partant du Nord :

- une retenue de 13 km environ régnant du PK 200 au PK 213. Cette retenue sera contenue sur chaque rive par des digues insubmersibles de protection. La section comprise entre les digues sera recalibrée par rescindement des berges et par dragages dans le lit mineur du Rhône entre la restitution de Donzère-Mondragon et le PK 203 environ. Le remous remontera jusqu'à l'usine A. Blondel où le niveau sera rehaussé de 2 m environ à l'aval de l'ouvrage ;

- un barrage de retenue implanté sur le territoire de la commune de Caderousse à l'origine amont d'une courte déviation du Rhône, en rive gauche du fleuve. Le débit réservé à l'aval du barrage est fixé à 5 m³/s pendant toute l'année. En principe, le barrage ne laissera passer que ce débit pour tous les débits du fleuve inférieurs au débit turbinable à l'usine. Lors des crues exceptionnelles, il sera entièrement ouvert ;

- un canal d'amenée de 2,1 km de longueur environ se développant dans l'île de la Piboulette, en rive gauche du Rhône, entre celui-ci et un de ses bras secondaires, dits "bras de Caderousse" ;

(1) - Tous les P.K. du Rhône cités dans le texte correspondent au kilométrage officiel du Rhône, vers l'aval, dont l'origine (P.K. 0) est au confluent du Rhône et de la Saône, au pont de la Mulatière (Lyon).

- les ouvrages principaux usine-écluse, groupés en un seul bloc sur le territoire de la commune de Caderousse ;
- un canal de fuite de 2,2 km de longueur environ qui restituera le débit dérivé dans la retenue de la chute d'Avignon ;
- en prolongement et à l'aval de ce canal de fuite, un chenal dragué d'environ 1,2 km de longueur à l'intérieur des digues de la retenue d'Avignon, au droit de la boucle du Revestidou ;
- à l'amont de la retenue, entre la restitution de Donzère-Mondragon et le PK 203, une zone draguée dans le lit mineur du fleuve.

0.2.2. - Caractéristiques des principaux ouvrages

Le niveau normal de la retenue est fixé à la cote (35,50) N.G.F. (1) au droit de l'échelle de Saint-Etienne-des-Sorts (PK 203,2).

Cette condition se traduira, au droit du barrage, par des surélévations maximales de 9,8 m du niveau de l'étiage conventionnel et de 2,5 m du niveau naturel des P.H.E.C. (2). Le dimensionnement des ouvrages permettra l'écoulement des plus grandes crues sans aucune surélévation des niveaux naturels dans la partie amont de la retenue, et notamment au droit de l'agglomération de Saint-Etienne-des-Sorts.

Le barrage de retenue comportera 8 passes de 22 m de largeur, donnant un débouché total de 176 m.

Le débit dérivé maximal est fixé à 2 400 m³/s. La section du canal de dérivation a été dimensionnée pour les vitesses moyennes ne dépassant pas 1,5 m/s dans le canal d'amenée, et 2 m/s dans le canal de fuite pour le débit d'équipement de l'usine.

Aucun barrage de garde n'étant prévu, les digues du canal de dérivation seront arasées à des cotes les mettant à l'abri de toute submersion au regard des plus grandes crues. En outre, ces cotes devront procurer une revanche suffisante pour assurer la sécurité dans les conditions de fonctionnement les plus défavorables, notamment pour le cas d'une disjonction totale non compensée de l'usine.

L'usine hydroélectrique sera équipée de 6 groupes turboalternateurs du type à bulbe amont, à axe horizontal, d'une puissance unitaire de 30 MW.

A l'usine sera adjoint un ouvrage permettant d'évacuer les corps flottant.

L'écluse, accolée à l'usine, aura un sas de 12 m de largeur et de 195 m de longueur utiles. Le tirant d'air minimal sera de 7 m au-dessus des P.H.E.N. (3) et le tirant d'eau minimal sera de 3 m. L'emplacement d'une deuxième écluse sera laissé disponible. Enfin, la hauteur de chute variera de 9,45 m à l'étiage à 8,35 m pour le débit d'équipement.

0.2.3. - Exploitation de la chute

Le niveau normal de la retenue est fixé à la cote (35,50) au droit de l'échelle de Saint-Etienne-des-Sorts (PK 203,2).

Ce niveau pourra être maintenu constant, pour tous les débits du Rhône qui, après aménagement, sont susceptibles de s'écouler sous cette cote au droit de la dite échelle.

Pour les débits du Rhône plus élevés, le niveau de la retenue ne devra dépasser le niveau avant aménagement correspondant au même débit, à l'échelle de Saint-Etienne-des-Sorts.

Au droit de la prise, le niveau de la retenue variera en exploitation normale entre les cotes (35,50) et (33,75) environ ; exceptionnellement, lors des chasses de dégravement, il pourra être abaissé à la cote (31).

La crue millénaire, estimée à 12 500 m³/s, pourra être évacuée dans les conditions énoncées ci-dessus, avec une passe du barrage fermée moyennant la dérivation d'un débit de 1 250 m³/s seulement par le canal, ce qui correspond à une situation hautement improbable.

(1) - Toutes les cotes d'altitude sont indiquées entre parenthèses, exprimées au-dessus du niveau de la mer et rattachées au nivellement général de la France (N.G.F.).

(2) - Plus hautes eaux connues.

(3) - Plus hautes eaux navigables.

CHAPITRE 1 : ETUDE GEOLOGIQUE

1.1. - GEOLOGIE REGIONALE

L'ancienne région du Comtat-Venaissin et les contreforts orientaux des massifs gardois ont fait l'objet de nombreuses études. Depuis la deuxième moitié du siècle dernier, collectionneurs, géologues régionaux lui ont consacré plusieurs ouvrages à la lumière desquels nous pouvons replacer le secteur étudié dans son contexte géologique régional, en introduction à l'exposé ultérieur, plus détaillé.

1.1.1. - Historique des études

D'accès facile et riches en gisements fossilifères, les collines du Crétacé supérieur attirèrent de bonne heure collectionneurs et stratigraphes. Parmi eux, REQUIEN et d'ORBIGNY réunirent de riches collections.

La description géologique du département de Vaucluse par S. GRAS et une communication de COQUAND, publiées en 1862, résumèrent les observations de cette première période.

Quelques années plus tard HEBERT et TOUCAS (1872 à 1875) en rive gauche, et DUMAS (1875) en rive droite continuèrent à préciser les divisions stratigraphiques et l'allure générale de la faune fossile. A la suite de E. FALLOT (1885), plusieurs auteurs s'attachèrent à combler les vides laissés par leurs prédécesseurs tant du point de vue paléontologique que stratigraphique ; au début du siècle L. JOLEAUD (1907) publie un recueil sur la plaine du Comtat et ses abords, REPELIN (1902) étudie la faune du Cénomanién lagunaire et TOUCAS décrit à Piolenc de nombreux types de rudistes.

Se succèdent ensuite les ouvrages de DE BRUN et CHATELET (1938) sur le Cénomanién de Montfaucon et les pointements miocènes de FARAUD (1934-39) et de F. ROMAN. Parmi les synthèses plus récentes, nous retiendrons surtout le travail de J. SORNAY (1950) consacré à "l'étude stratigraphique du Crétacé supérieur de la vallée du Rhône entre Valence et Avignon" et "la monographie géologique du massif d'Uchaux" de G. MENNESSIER (1950).

1.1.2. - Histoire géologique régionale

- Au Crétacé inférieur, la région du Haut-Comtat Venaissin se trouve située dans la zone littorale septentrionale des "faciès provençaux", caractérisés par leur puissante sédimentation calcaire zoogène.

Au Berriasien, la région provençale est déjà occupée par des faciès néritiques, alors qu'aux confins de la "fosse vocontienne" et du domaine des "faciès provençaux" le régime profond se maintiendra jusqu'au Barrémien moyen, malgré quelques manifestations locales du faciès urgonien au cours du Barrémien inférieur.

Puis la "fosse vocontienne" se réduit, les faciès marneux ou calcaires à Ammonites ne dépassent plus, au Sud, la basse vallée de la Durance. Ailleurs, sur d'immenses étendues apparaissent, au Barrémien supérieur, les faciès calcaires zoogènes, puissants, durs et compacts de l'Urgonien.

Avec l'Aptien inférieur commence en Provence une évolution différentielle entre les massifs hercyniens émergés du massif Central et des Maures - Pyrénées et le domaine alpin :

- de Nîmes à Montpellier et au SE d'Avignon cet étage manque totalement ;
- de Nîmes à Roquemaure le Bédoulien s'intègre encore, pour une partie dans le faciès urgonien ;
- de part et d'autre de cet axe, dans la région d'Uzès et en Basse-Provence, le Bédoulien marque un retour aux faciès calcaréo-marneux.

Ainsi les dépôts relativement profonds de la Basse-Provence et ceux de la "fosse vocontienne" sont séparés, au Bédoulien, par l'individualisation d'un seuil sous-marin où persistent, pour un temps, les faciès de l'Urgonien récifal.

C'est la première ébauche de "l'isthme durancien" dont l'étendue ne fera que croître au Crétacé supérieur et qui s'étendra depuis le massif Central jusqu'aux Maures - Estérel.

Pendant tout l'Albien la période d'émersion se poursuit dans la région du Comtat qui marque le rebord nord de l'isthme. Ailleurs les dépôts sédimentaires traduisent la proximité des rivages ; les zones transgressives se déplacent. A Apt s'accumulent les formations sableuses littorales, colorées par le lessivage des bauxites duranciennes ; plus à l'Est des niveaux glauconieux phosphatés traduisent l'instabilité du littoral.

- La transgression cénomaniennne se traduit par des dépôts détritiques et littoraux dans la région nord de Roquemaure. A Orange elle s'opère directement sur les marnes aptiennes.

Le golfe rhodanien s'ouvre largement à l'Est et au Nord Est d'une ligne passant approximativement par Roquemaure, Uzès, Vagnas, Le Teil. Les contours paléogéographiques ne varieront guère jusqu'au Turonien supérieur, malgré quelques variations du fond sous-marin et la sédimentation restera grés-sableuse pour l'essentiel.

- A partir du Coniacien le golfe se rétrécit entre le Ventoux et Dieulefit pour ne plus laisser qu'un bras de mer orienté Est-Ouest, dont le fond s'exhausse progressivement, favorisant l'apparition et la prolifération des polypiers et des rudistes.

- Au Santonien la régression se poursuit, accompagnée de balancements du fond, bientôt marquée par l'installation des faciès saumâtres et ligniteux.

- L'évolution continentale, accélérée par les mouvements oligocènes, se continuera ensuite jusqu'à la transgression miocène qui laisse de vastes affleurements dans la région d'Avignon. Puis une nouvelle phase d'érosion et de creusement suivra l'émersion post-miocène générale dans la province rhodanienne.

- La mer pliocène transgresse ensuite une dernière fois le couloir rhodanien ; elle dépose d'abord les sédiments marneux du Plaisancien, puis les sables du faciès astien marquant son recul. Le régime continental du Pliocène s'achève par les épandages fluviaux à galets de quartzite du Villafranchien.

- Enfin, les variations eustatiques amèneront, durant le Quaternaire, le système de terrasses emboîtées qui aboutissent aux larges plaines alluviales actuelles.

1.2. - ETUDE STRATIGRAPHIQUE DES MASSIFS DE BORDURE

Les campagnes de sondages entreprises dans le cadre des études préliminaires avaient montré d'emblée l'extension très limitée des formations crétacées des bordures sous la couche alluviale, et par conséquent montré l'importance minime qu'elles pouvaient revêtir pour les travaux. Néanmoins la reconnaissance du substratum sous-alluvial ne pouvait être menée à bien qu'après un examen lithologique des massifs de bordure qui permette l'établissement de corrélations avec les carottes de sondages.

Toutefois, il n'était pas dans notre dessein de développer ici une étude biostratigraphique détaillée, mais plutôt de lever la carte géologique d'après les critères lithologiques et d'en préciser ensuite la stratigraphie à la lumière des publications antérieures (cf. 1.1.1.).

(Les noms des lieux cités dans le texte sont ceux portés sur les plans directeurs au 1/20 000 de l'IGN. Ils ne figurent pas sur les fonds de plan que nous avons utilisés - cf. Pl. 2).

1.2.1. - Le Crétacé

Les formations crétacées et surtout néocrétacées constituent la quasi totalité des reliefs de bordure et les quelques flots qui émergent des dépôts alluvionnaires pliocènes et quaternaires.

1.2.1.1. - BARREMIEN (n⁴)

Les terrains les plus anciens sont représentés ici par le Barrémien inférieur (n^{4a}) et supérieur (n^{4b}) du massif du Lampourdier et par le Barrémien supérieur à faciès urgonien (n^{4b} U) qui longe la "faille" de Roquemaure. La base de cet étage n'est pas observable dans le secteur de notre étude et ne se retrouve que sur la bordure nord du massif de Sauveterre ainsi que sur le rebord méridional de la barre de Roquemaure.

- Le Barrémien inférieur (n^{4a}) ne montre, dans le massif du Lampourdier, que sa partie supérieure en position structurale surélevée. C'est un ensemble de bancs calcaires gris ou jaunâtres, argileux, finement grumeleux, alternant avec de minces niveaux marneux beiges à passées ocre ou brique.

D'une manière générale, la macrofaune y est très pauvre. On signale sur la nouvelle édition de la carte géologique :

- Crioceras cf. emerici
- Cymaroceras néocomiensis
- Toxaster sp.

L'examen micrographique fait apparaître un calcaire organogène à ciment micritique contenant des intraclasts argileux, d'abondants débris d'échinodermes, des spicules de spongiaires, quelques ostracodes, de rares grains de quartz détritique et présentant des traces nombreuses d'altération ferrugineuse. D. FAURE y signale une assez riche microfaune.

Cet épisode calcaréo-marneux recouvrant le Barrémien inférieur et la majeure partie du Barrémien moyen constitue le Barutélien de D. FAURE.

- Le Barrémien supérieur (n^{4b}). Constituant la majeure partie du massif du Lampourdier sur ses versants nord et ouest, il est séparé du Barrémien inférieur (n^{4a}) par un niveau de calcaire micrograveleux, légèrement marneux, à Annelides connus uniquement dans ce massif. Ce niveau intermédiaire renferme un grand nombre de cherts bruns répartis dans toute la masse des bancs. Ces accidents siliceux ne sont pas un caractère spécifique d'un ensemble ni d'un niveau bien définis. On remarque seulement qu'ils soulignent toujours le passage de la sédimentation marneuse ou calcaréo-marneuse à la sédimentation carbonatée franche, quels que soient les faciès installés de part et d'autre. Ils marquent le plus souvent, dans cette région, le passage du Barrémien moyen au Barrémien supérieur.

Le niveau supérieur se compose de bancs puissants, séparés par des joints plans, d'un calcaire cristallin compact à patine gris souris et cassure saccharoïde beige rosé. On y rencontre encore quelques cherts céphaloïdes.

Il renferme en abondance des débris d'Echinodermes, de spicules et des Miliolidés.

Cette assise dite à "faciès de transition" passe latéralement vers Châteauneuf-du-Pape au "faciès urgonien" (n^{4b} U).

- La Barrémien supérieur à faciès urgonien (n^{4b} U). Le faciès typique se trouve cantonné dans notre secteur, au rebord septentrional de la barre de Roquemaure. Deux termes peuvent y être distingués :

- à la base : des calcaires graveleux, parfois oolithiques, organodétritiques. En bancs relativement puissants, à patine gris sombre, ils renferment une riche macrofaune représentée par des : Echinodermes, Lamellibranches, Bryozoaires, Polypiers, Spongiaires, Gastéropodes et Annélides.

L'examen microscopique montre une biomicrite à oolithes et plages de recristallisation sparitique à nombreuses espèces de foraminifères parmi lesquelles D. FAURE cite :

- Orbitolinopsis cf. Cuvillieri Moullade
- " cf. Kiliani
- Coskinolina Sunnilandensis Moullade
- Trocholina Friburgensis Reichel

On y reconnaît aussi quelques sections d'algues calcaires (Dasycladacées).

- Au sommet : séparées du niveau précédent par un horizon de cherts, les couches qui forment la retombée nord de la barre de Roquemaure s'arrangent en bancs puissants et compacts d'un calcaire micrograveleux beige rosé à la cassure et pétri d'orbitolines. Ce calcaire à faciès périrécifal admet encore de nombreuses inclusions siliceuses éparées.

L'étude stratigraphique du Barrémien de ce secteur apparaît en définitive assez complexe à cause des variations de faciès et des difficultés que l'on a à délimiter avec précision les différents ensembles.

Le Crétacé inférieur disparaît vers le Nord sous les formations du Crétacé supérieur. Au sondage pétrolier des Massanes (D. Mo. 1 de la SNPA) au Nord Est de Mondragon le Barrémien supérieur à faciès urgonien a été traversé sur 970 m, montrant une nette amplification de ce faciès vers le Nord.

1.2.1.2. - APTIEN (n⁵⁻⁶)

Seul le Gargasien affleure sur le territoire de notre étude, au lieu-dit de Châteaumar, sous forme d'un lambeau très réduit protégé par la faille qui limite au Nord le Lampourdier. Il est représenté par un grès calcaire, gris foncé, glauconieux, à éléments anguleux, contenant quelques rostrés de Bélemnites.

1.2.1.3. - CENOMANIEN (C2)

Ses affleurements, d'extension variable, sont disséminés sur toute l'étendue du secteur étudié. En rive gauche il apparaît dans sa quasi-totalité à Mondragon dominant la plaine de Bollène, et moins largement à la base de la colline d'Orange. Au Sud, il crève en plusieurs endroits la couche alluviale : on le retrouve à Bois-Feuillet, au Nord du Lampourdier.

En rive droite, il forme le rocher de Montfaucon et les buttes de Montlézon et de la Rocha.

Il apparaît enfin au pied de la Dent de Marcoule, dernier témoin des larges étendues cénomaniennes du massif de la Cèze.

En rive gauche :

- à Mondragon (fig. 2) :

Le Céno manien constitue le noyau du brachyanticlinal d'Uchaux et sa limite nord ouest ; G. MENNESSIER en donne une coupe très détaillée, relevée près de Mondragon que nous résumerons ainsi : de la base au sommet on distingue trois ensembles :

- "Grès inférieurs" (C^{2a})

Céno manien inférieur (75 à 85 m visibles)

Ce premier ensemble se compose de plusieurs niveaux de grès jaune à beige clair, en bancs puissants de compacité et de dureté variables qui forment la falaise au pied de laquelle passe la route de Mondragon à Bollène. Leur patine varie du roux au brun-noir, et ils présentent à différents niveaux de minces croûtes ferrugineuses rubéfiées. Les éléments détritiques quartzeux qui les composent sont de plus en plus grossiers vers le sommet où ils atteignent la taille de petits galets et sont faiblement maintenus par un ciment carbonaté peu abondant, qui ne représente, dans le niveau inférieur, que 10,5 % de la roche totale.

Ces grès inférieurs ne livrent que de très rares débris de lamellibranches.

- Complexe ligniteux de Mondragon :

Céno manien moyen (C^{2b}) (3 à 3,5 m)

Il représente l'extrémité orientale des puissantes séries saumâtres du Gard et contient deux lentilles marno-sableuses ligniteuses à microcristaux de gypse de néoformation. En alternance avec ces épisodes ligniteux, on observe deux bancs métriques très fossilifères : l'un gréseux, en position intermédiaire, presque essentiellement constitué d'huîtres bleues, remaniées et mal déterminables (*Ostrea* sp.) ; l'autre marneux, fort riche en glauconie.

- "Grès supérieurs"

Céno manien supérieur (C^{2c}) (80 à 90 m)

Cet ensemble terminal débute par une reprise de la sédimentation grésosableuse abondante, grossière et pratiquement azoïque, après le balancement de rivage de l'épisode précédent.

Deux ensembles puissants, séparés par un nouveau banc d'huîtres supportent les ruines du château de Mondragon. Ce sont des grès jaunes à bruns à patine rousse, avec des galets quartziteux blancs à la base ; puis des grès grossiers jaunes, à patine grise, à structure entrecroisée à laquelle se superpose un cloisonnement mis en relief par l'érosion. Ces derniers, peu consolidés, d'aspect vacuolaire, en bancs épais, montrent plusieurs passées conglomératiques à galets quartzeux et silex bruns.

Viennent ensuite 20 à 25 m de grès glauconieux blanc verdâtre, en bancs métriques, très durs et formant au sommet une corniche très nette et continue. Ces grès renferment quelques spicules et des échinodermes.

Le Céno manien supérieur se termine par un petit niveau conglomératique (0,20 m) assez constant, remaniant les grès sous-jacents et surmonté par un banc de grès roux, très grossier, au-delà duquel commence le Ligérien.

- A Bois-Feuillet

Observable sur une quarantaine de mètres, le Céno manien semble identique à celui de Mondragon dans l'ensemble, mais considérablement réduit.

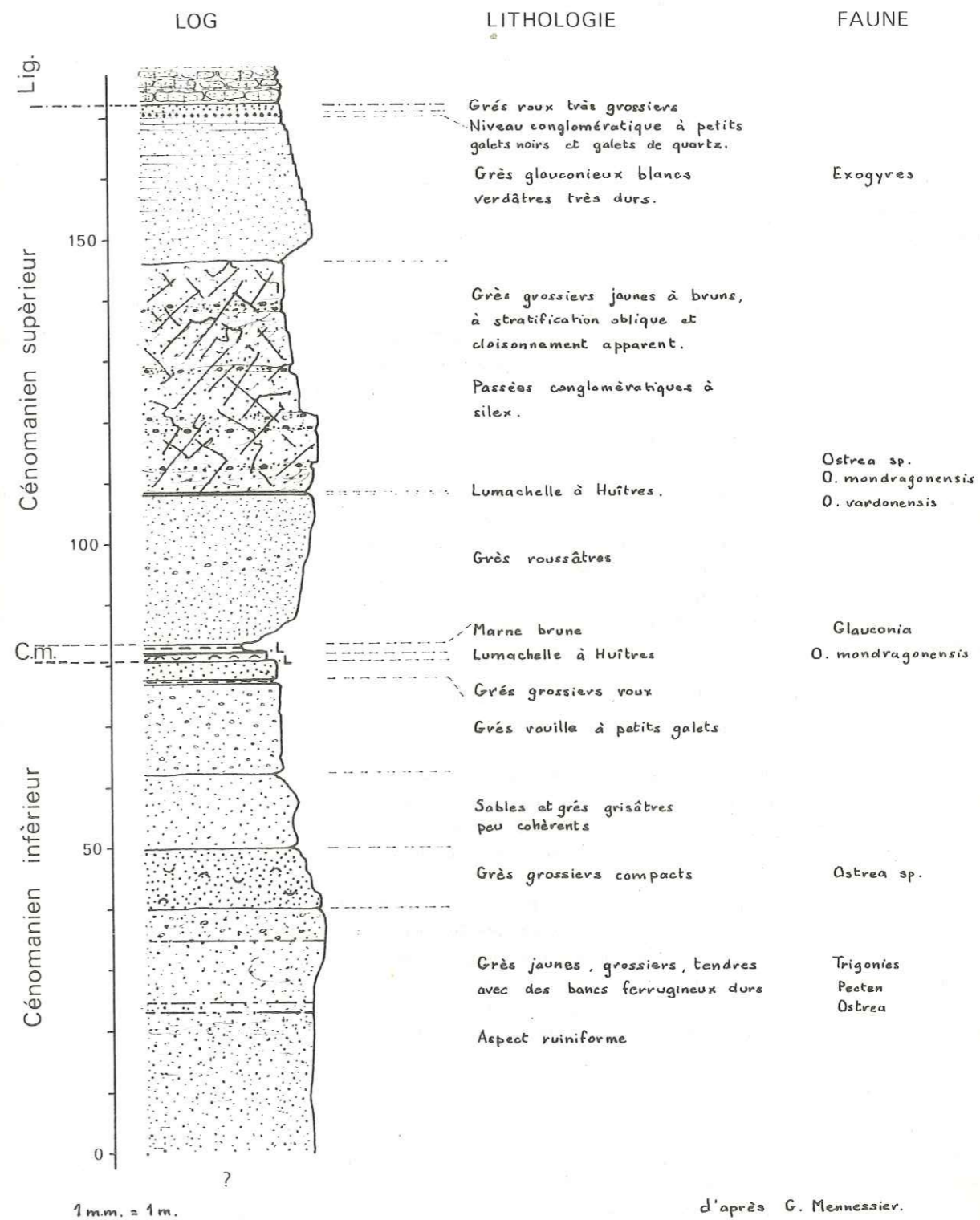


Fig. 2 - Le Céno manien de Mondragon (Log stratigraphique)

Du Sud vers le Nord et de bas en haut, on rencontre une vingtaine de mètres de grès tendres blanchâtres, passant à des grès grossiers rouges et à bancs quartzeux rubéfiés. Puis sur une vingtaine de mètres encore des grès ocre-jaune à stratification entrecroisée que surmonte un banc gréseux dur, jaunâtre, à galets de quartz et de silex. Ce niveau déjà rencontré à Mondragon, encore présent au sommet de la colline d'Orange, annonce le Ligérien.

- Au Sud du Lampourdier

L'effondrement délimité au Sud par le prolongement de la faille de Roquemaure et au Nord par les failles qui bordent le massif du Lampourdier, fait apparaître le Cénomani en position structurale abaissée.

Il semble que ces affleurements partiellement masqués par les alluvions appartiennent au Cénomani supérieur. Ils montrent en effet des grès glauconieux à débris d'échinodermes voisins de ceux qui couronnent la corniche de Mondragon.

- En rive droite :

- la Dent de Marcoule

Le Cénomani, masqué sur toute la bordure méridionale du massif, ne vient à l'affleurement qu'au pied de la Dent de Marcoule (220) en bordure du Rhône. De la base vers le sommet on rencontre :

- des grès tendres, marneux, jaunes, à passées ligniteuses, marneuses, grisâtres, représentant le terme supérieur des "faciès Taviens" ;
- des grès jaunes plus durs, coquilliers (huîtres) ;
- un banc de 2 m environ, compact, très dur, formant ressaut ;
- des grès jaunes (15 - 20 m) grossiers, tendres, à cloisonnage en relief, à gros éléments détritiques, analogues à ceux observés à Mondragon (Faciès Paulétien) ;
- un banc très dur de calcaires légèrement gréseux dont le dernier mètre est constitué par une lumachelle à *Exogyra columba*, marquant la limite supérieure du faciès paulétien ;
- un banc de calcaires plus gréseux que le précédent de 3 m environ, surmonté par l'horizon de grès grisâtres, durs, à galets de quartz et cailloux noirs ou vert sombre qui représente le terme final du Cénomani.

- Le pointement de Montfaucon et Montlézon

DE BRUN et CHATELET ont donné de ces deux affleurements cénomaniens une description détaillée, que l'on peut résumer ainsi, à partir du pied oriental de la colline de Montfaucon.

- Un premier ensemble grés-sableux jaune-kaki dont les 20 premiers mètres forment falaise, constitue la totalité de la colline de Montfaucon (60 - 65 m). Il renferme quelques niveaux indurés à nombreux gastéropodes et se termine par un banc de grès fins à gastéropodes et Trigonies.

La coupe se poursuit sur le flanc est de la butte de Montlézon séparée de Montfaucon par 600 m de plaine alluviale :

- un petit niveau de calcaires gréseux jaunâtres affleure sporadiquement à la base de la butte et supporte quelques mètres d'un calcaire marneux noirâtre à traces ligniteuses ;
- au-dessus vient un ensemble de grès et de sables peu consolidés à *Exogyra columba*, que couronne un niveau calcaire un peu gréseux riche en *Exogyra columba*.

D'après J. SORNAY, ces derniers niveaux sont analogues à ceux qui terminent le Cénomani dans les coupes précédentes, le premier ensemble grés-sableux pouvant représenter la base de cet étage.

1.2.1.4. - TURONIEN (C³) (fig. 3)

Cet étage forme les deux tiers du rebord occidental du massif d'Uchaux et la moitié environ de la superficie du massif de la Cèze en son versant rhodanien.

Si le Ligérien peut apparaître homogène de part et d'autre du Rhône, la série angoumienne montre, en revanche, une grande diversité de faciès, à l'origine de nombreuses erreurs d'interprétation de la part des anciens auteurs, surtout en ce qui concerne la partie centrale du massif d'Uchaux. Du fait de ces complications stratigraphiques, nous nous limiterons à une description de la coupe de Mondragon à Mornas en reprenant les subdivisions proposées par G. MENNESSIER. Cette même série angoumienne semble, par ailleurs, nettement simplifiée dans sa lithologie en rive droite du Rhône, par la disparition ou la variation latérale de certains faciès.

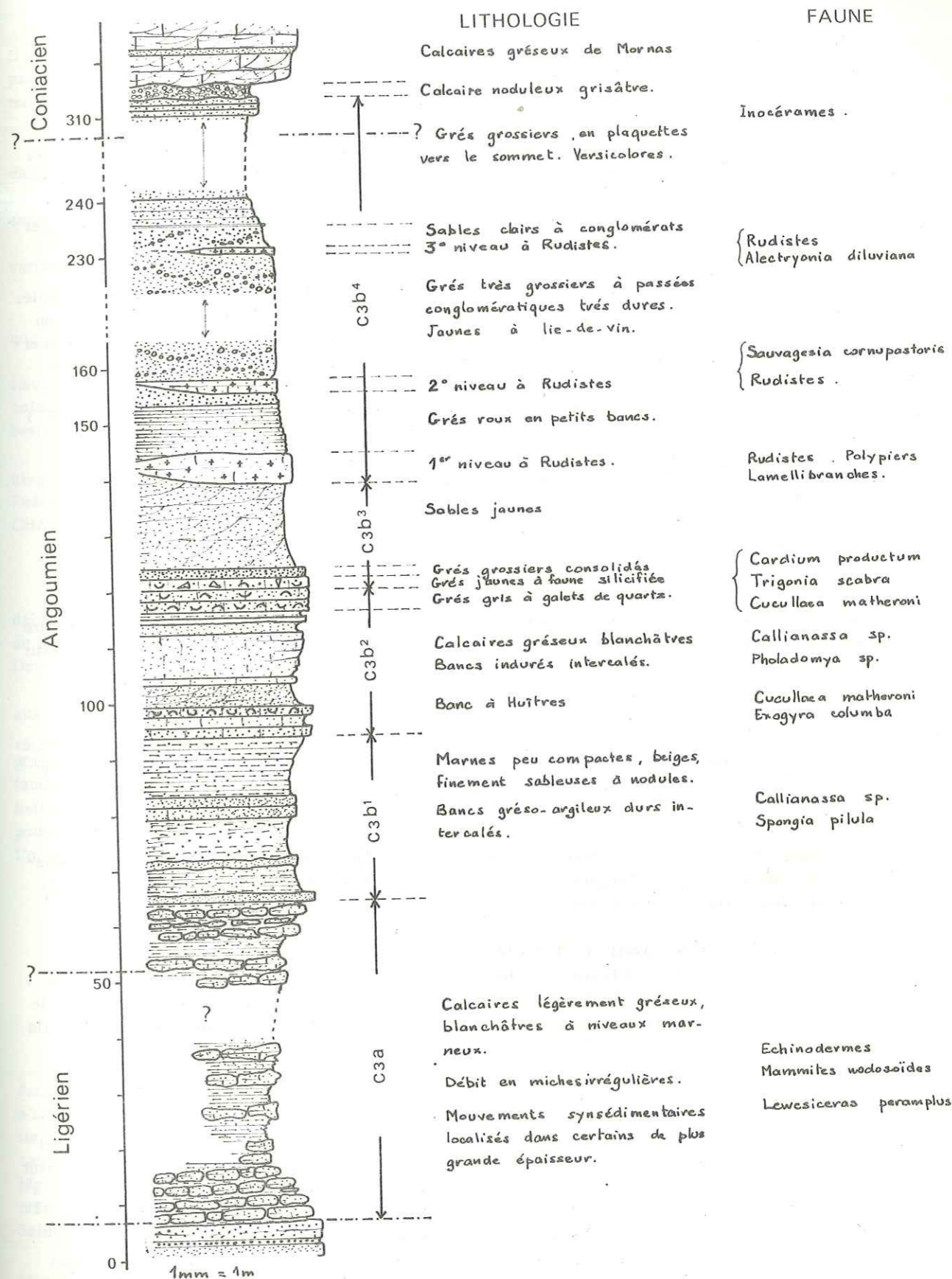


Fig. 3 - Le Turonien entre Mondragon et Mornas

- Le Ligérien (C³a)

Il affleure à proximité de Mondragon sur les talus des premiers lacets de la route D 152 qui mène de cette localité à Rochegude. Il se compose de calcaires blancs gréseux passant rapidement à des grès roses ou verdâtres en bancs décimétriques rappelant ceux qui précèdent immédiatement le conglomérat de base du Ligérien. Au-dessus s'étagent 60 à 100 m de calcaires gréseux blanchâtres en bancs de 0,20 à 0,30 m à débit en miches et joints ondulés irréguliers. Les interbancs marneux et finement sableux, à structure feuilletée, peuvent dépasser 1 m et renferment des pistes et des terriers de vers. On y trouve quelques rares débris d'oursins.

G. MENNESSIER situe la limite Ligérien-Angoumien à la base du dernier quart de cette formation des calcaires blancs où apparaissent les premiers Inocérames angoumiens. Lithologiquement cette limite n'est pas marquée.

- En rive droite, le Ligérien forme la majeure partie de la pente sur la façade méridionale du Bois de Marcoule. Là aussi il est représenté par des calcaires quartzeux, à patine grise et cassure saccharoïde blanchâtre surmontant un banc métrique de grès verdâtres tendres à petits cailloux noirs et galets quartziteux. Bancs à débits en miches et interbancs épais à débit feuilleté, plus marneux, se succèdent sur une trentaine de mètres ; nous y avons découvert une ammonite de grande taille.

Les derniers bancs de ce niveau portent les traces des mouvements synsédimentaires à aspect de "slump-balls" ; puis ils passent à des calcaires gréseux durs à patine grise et cassure roussâtre se terminant par un banc à silex de petite taille. C'est dans ces niveaux que se situe la limite supérieure du Ligérien.

Micrographiquement on peut désigner ces niveaux comme un grès quartzeux à ciment calcaire abondant (25 % de quartz) légèrement micacé et à quelques débris organiques très fragmentés.

- L'Angoumien (C³b)

- En rive gauche :

Les variations latérales d'épaisseur et de faciès qui affectent cette série rendent difficile, dans le cadre de cet exposé stratigraphique, une description complète des affleurements. Pour plus de clarté il est préférable de ne décrire qu'une coupe, en continuité de celle qui intéresse le Cénomanién. Selon une direction générale NNW - SSE ; à partir de la ferme du Regris on relève la coupe suivante, au-dessus des calcaires gréseux blancs à niveaux marneux :

a/ marnes et calcaires marneux gris-beige (C³b1) (60 m)

Ce niveau est constitué par des alternances irrégulières de zones marneuses très sableuses à très nombreux nodules peu consistants et de bancs composés de calcaires marneux et gréseux en fines plaquettes à joints irréguliers. Nous y avons trouvé un appendice de crustacé (*Callianassa* sp.) qui figure en abondance dans un niveau sus-jacent.

b/ calcaires gréseux à Cucullea (C³b2) (20 m)

Bruns, durs et compacts, ils atteignent la première crête (138) située au Sud de la route de Mondragon à Rochegude. A leur base figure une lumachelle à Exogyres. En lame mince on observe quelques recristallisations siliceuses sous forme de quartzine dans certains débris de tests.

c/ "grès de Boncavail" (C³b3) (20 m)

Ils débutent par un banc gréseux ocre à fossiles silicifiés très abondants (*Cardium productum*, Sow ; *Cucullea* Matheroni d'Orb ; *Trigonia scabra* LK) suivi par des alternances grésocalcaires et de grès parfois très grossiers vers le sommet. Ils sont couronnés par des grès jaunes sableux, à passées microconglomératiques et stratification oblique. Un petit banc de grès fin, consolidé, les sépare de l'ensemble suivant.

d/ "grès et sables de Montmout" (C³b4) (170 à 180 m)

Sous ce terme, MENNESSIER décrit une puissante série de grès sableux jaune ou ocre et de sables à passées quartzieuses très grossières, où s'intercalent trois lentilles plus ou moins distinctes à rudistes, polypiers et huîtres. Les deux premiers niveaux à rudistes se trouvent au Nord du ruisseau Valadas, le troisième au pied de Montmout dominant le talweg d'une quinzaine de mètres. (Ils sont figurés par des croix à l'intérieur du C³b4 - pl. 2).

Sur le talus nord du Montmout s'étagent des sables blancs, des grès glauconieux, ferrugineux, ocre-jaune sur une épaisseur de 60 à 80 m ; et enfin des grès calcaires pseudo-oolithiques jaunes en petits bancs durs.

Viennent ensuite deux mètres de calcaires gréseux, grisâtres, noduleux, formant le soubassement de la cuesta coniacienne du Montmout.

Du point de vue stratigraphique cette série grésosableuse se situe entre l'Angoumien moyen et le Coniacien inférieur, sans qu'il soit possible de préciser la limite entre ces deux étages.

- En rive droite

Au Nord du village de Chusclan et de l'usine atomique de Marcoule, la cuesta angoumienne orientée Est-Ouest domine un talus formé par les calcaires gréseux blancs du Ligérien. Elle est continue depuis le hameau de Carmignan à l'Ouest jusqu'à la grange de Rigaud sur la rive droite du Rhône. Contrairement aux assises de même âge décrites en

rive gauche, il s'agit là d'une formation relativement homogène sur toute la zone d'affleurement. Nous décrirons, par conséquent, la coupe la plus accessible, au long d'un chemin partant de Chusclan et se dirigeant vers le Nord, à travers le Bois de Marcoule.

a/ A la base du quart supérieur de la pente, une barre, plus dure et plus résistante, se détache dans le profil général, au sommet de laquelle nous situons le passage Ligérien - Angoumien inférieur. Elle est formée d'une alternance de passées détritiques grossières et fines dans lesquelles s'intercale un niveau à silex. Cet ensemble est suivi par un petit banc à nombreux débris de rudistes.

La suite de la coupe est représentée par une série monotone de calcaires gréseux fins, en bancs d'épaisseur variable et parfois à joints ondulés soulignés ou non par des dépôts argileux.

b/ Au sommet, couronnant la cuesta, se trouve un banc d'un mètre environ, renfermant de nombreux Rudistes et Madréporaires isolés et coloniaux.

Ce niveau se retrouve dans une carrière située près de la grange de Rigaud où J. PHILIP mentionne la faune suivante : "Plagioptychus, Sphaerilites, Praeradiolites, Vaccinites rousseli, Polypiers branchus, radioles d'oursins ; colonies massives de Madréporaires, brisées, perforées, déplacées et accompagnées de débris de Rudistes et de Mélobésiées".

Ce banc repère permet d'effectuer des corrélations avec le massif d'Uchaux ; il représente en effet, le "1er niveau à Rudistes" de G. MENNESSIER à la base de l'ensemble des "grès et sables de Montmout". Ce niveau à Rudistes et Madréporaires s'intercale dans les couches des "grès calcaires jaunes à Polypiers" de J. SORNAY que M. CHAMPENOIS regroupe sous le nom de "calcaires de Pignères".

c/ Le faciès Ucétien (C³-4)

Le puissant ensemble de "sables et de grès Ucétiens" (100 m) commence par des grès verdâtres peu cohérents à débris coquilliers et occupe la vaste dépression mollement vallonnée qui s'étend jusqu'au Jonquier. Quelques bancs de grès plus fins et plus durs interrompent les étendues sableuses, courant parallèlement à la cuesta angoumienne. Deux d'entre eux renferment une faune difficilement identifiable (Nérinées).

Les grès ucétiens passent, par l'intermédiaire de grès jaunâtres grossiers, aux calcaires gréseux jaunes analogues aux calcaires coniaciens de Mornas.

L'Ucétien est l'équivalent approximatif des grès de Montmout et il serait donc logique de le situer, pour la plus grande partie, dans l'Angoumien supérieur. Cependant, devant la diversité d'opinion des auteurs et l'absence de faune caractéristique, nous le ferons figurer sur la carte géologique (Pl. 2) sous l'indice conventionnel (C³-4) pour indiquer que la limite Angoumien-Coniacien n'a pu être encore localisée à l'intérieur du complexe ucétien. Notons, pour mémoire, que M. FARAUD et M. CHAMPENOIS font de l'Ucétien du Coniacien inférieur, contrairement à l'opinion de J. SORNAY qui n'attribue au Coniacien que les derniers bancs gréseux ucétiens.

1.2.1.5. SENONIEN

1.2.1.5.1. - LE CONIACIEN (C⁴)

"Calcaires de Mornas" (C⁴a)

Sa base est vraisemblablement constituée par le sommet de la formation de Montmout, le passage devant se faire dans les derniers mètres de la puissante série de grès ferrugineux jaunes ou versicolores suivis de deux ou trois mètres d'un calcaire gréseux jaunâtre sur lequel vient une couche d'épaisseur variable de calcaires noduleux grisâtres que surplombe la falaise. Les calcaires gréseux typiques de Mornas constituent l'essentiel du Coniacien ; la roche est un calcaire jaune pâle à nombreux débris remaniés de Bryozoaires, d'Echinodermes et son faciès est le même, à quelques légères variations près, depuis la crête de Mornas jusqu'à la remontée, au Sud, du synclinal de Piolenc où il forme la crête allant de Piolenc à Coucourdon. En rive droite, c'est le même "calcaire de Mornas" qui se retrouve jusqu'à Saint-Etienne-des-Sorts.

Le long de la crête de Mornas, répétition par faille de celle de Montmout, ils atteignent 100 à 120 m d'épaisseur et se caractérisent, à leur base, par leur disposition en gros bancs à stratification entrecroisée très nette (il faut noter la rapide diminution de la falaise vers l'Est, probablement due à une réduction de l'extension verticale du Coniacien calcaire, ou encore à une érosion différentielle).

Ils sont de plus en plus gréseux vers le sommet de la falaise où ils s'arrangent en petites plaquettes, toujours à stratification oblique, mais à passées détritiques plus grossières et plus abondantes. Ils passent ensuite à des calcaires finement gréseux, blancs, puis à des sables blancs à Bryozoaires qui supportent, dans la zone axiale du synclinal, la lentille de Rudistes coniaciens du Valbonnet.

Au Sud de Piolenc leur sommet est plus terrigène, marno-sableux et les bancs moins résistants donnent à la falaise qui domine le village un aspect ruiniforme. Il existe dans cette formation deux niveaux marneux très fossilifères ; à Brachiopodes et Lamellibranches. Les calcaires de Mornas se définissent micrographiquement comme une biocalcarénite à aspect pseudo-oolithique contenant un grand nombre de débris de : Polypiers, Echinodermes, Lamellibranches. Des Miliolidés, représentés par le genre *Quinqueloculina* sp., apparaissent en abondance dans le milieu de la série. Les grains de quartz détritiques y sont peu abondants (moins de 5 %) et accompagnés de très rares grains de tourmaline. Le ciment carbonaté est sparitique et la couleur de la roche est due à une pigmentation ferrugineuse très générale qui cerne les allochems et emplit même les loges des miliolites.

- Coniacien supérieur à Rudistes (C^{4b})

A Valbonnette, il est représenté par un niveau lenticulaire d'un kilomètre environ de diamètre reposant sur des sables blancs à bryozoaires et gastéropodes, et recouvert par des grès ferrugineux violets.

La lentille à rudistes est constituée par un calcaire argileux blanchâtre, terreux, renfermant une très riche faune récifale, paraautochtone, où on distingue :

Vaccinités moulini, *Orbignya socialis* et un grand nombre de radiolites associés à des polypiers, des lamellibranches et des gastéropodes. Le biostrome atteint son épaisseur maximale au Nord avec 8 m et disparaît au Sud et à l'Ouest sous les grès ferrugineux violets, parfois vacuolaires, de 1 à 2 m d'épaisseur.

Ces grès rappellent, par leur texture et leur aspect micrographique, certains traits des sols latéritiques, et pourraient marquer une période d'émersion au Coniacien terminal, déjà amorcée avec les biocoénoses peu profondes à rudistes.

1.2.1.5.2. - LE SANTONIEN (C⁵)

Il repose en concordance sur les grès violets du sommet du Coniacien, dans la zone axiale du synclinal de Piolenc. C'est le seul affleurement observable dans le secteur de notre étude.

Le flanc ouest de la colline de Valbonnette montre, de la base vers le sommet :

- sables clairs très fins sur 20 à 30 m d'épaisseur largement exploités ;
- lentille de marne feuilletée, plus ou moins ligniteuse, à rudistes et polypiers remaniés ;
- grès et sables roux (4 m) ;
- complexe ligniteux autrefois localement exploité composé d'une alternance de grès roussâtres à blancs, et de passées ligniteuses lenticulaires souvent marquées par des traînées sulfureuses ;
- sables blancs fins arkosiques, azoïques sur une trentaine de mètres à intercalation de bancs marno-sableux et de marnes schisteuses.

Toutes ces couches plongent faiblement vers l'Ouest et sont surmontées au sommet de la colline par la molasse marine miocène, horizontale.

1.2.2. - Le Néogène

1.2.2.1. - MIOCENE (m1)

Comme le Santonien, il n'est représenté qu'à Piolenc, par son terme inférieur (grès molassiques du Burdigalien inférieur) transgressif sur les derniers niveaux sableux du Santonien par l'intermédiaire d'un conglomérat à cailloux à patine verte. Les galets, de grande taille, accompagnés de nombreuses *Ostrea crassissima*, ravinent les sables blancs arkosiques santoniens.

Dans la zone SE de notre secteur, au Nord du Lampourdier, on note encore un petit affleurement Burdigalien sous les imposants placages helvétiques à faciès sableux (dit "sable de Provence") passant vers Châteauneuf-du-Pape aux "grès molassiques du Comtat" (m^{2b}).

1.2.2.2. - PLIOCENE

La base du Pliocène marque la dernière transgression marine qui intéressera le tiers aval du couloir rhodanien. Dans le secteur étudié, les formations pliocènes sont beaucoup plus étendues et affleurent en rive droite, couvrant le pied de la cuesta angoumoine du Bois de Marcoule et surtout, sur de vastes surfaces dans la région de Saint-Géniès-de-Comolas.

1.2.2.2.1. - PLAISANCIEN (p)

Les "argiles bleues" plaisanciennes sont représentées par des marnes jaune à beige à l'affleurement ; elles constituent, au Nord de Chusclan, une étroite bande, bordant les versants méridionaux du massif de Pont Saint-Esprit - Marcoule, et plaquée sur le Ligérien. On en trouve encore un petit lambeau au Sud Est de Chusclan, adossé à la colline de Monticaud.

Dans la région de Saint-Géniès-de-Comolas, le Plaisancien marin terminal, visible sur une trentaine de mètres au maximum, affleure au Pont de Nizon, au mont Pegueirol et à la base de la butte de Comolas, sous forme de marnes finement sableuses, micacées, à nodules pyriteux. La macrofaune, assez pauvre, est essentiellement représentée par *Nassa semistriata*, *Corbula gibba*, *Ostrea cuculata*, *Turritella vermicularis*, *Cerithium vulgatum*. Les foraminifères y sont plus abondants et nous permettront d'identifier avec certitude les marnes bleues qui couvrent, sous les alluvions de la vallée, d'immenses étendues.

1.2.2.2.2. - ASTIEN (po)

Ce faciès continental du Pliocène moyen est bien développé à Saint-Géniès-de-Comolas, où il est représenté par des sables jaunâtres, marneux par endroit, souvent grossiers et à galets de toutes tailles parmi lesquels figurent quelques dreikanter. Ils sont épais de 10 à 35 m et débutent par un micro-conglomérat auquel font suite un niveau de marnes beiges très peu sableuses, saumâtres à Potamidés, puis les formations sablo-marneuses.

La notice de la carte d'Avignon signale à Saint-Laurent-des-Arbres la faune des mammifères de Montpellier : *Rhinoceros leptorhinus*, *Mastodon arvernensis*.

D'autres affleurements des niveaux marno-sableux se rattachant au faciès astien forment les buttes du mont Jupiter et de Monticaud à l'Est de Chusclan.

1.2.3. Conclusions stratigraphiques

- Le Crétacé inférieur n'est ici représenté que par ses derniers termes : Barrémien et Aptien. Le faciès urgonien recouvre localement (Roquemaure) ces deux étages. Ailleurs, c'est le Barrémien inférieur calcaréo-marneux et le Barrémien supérieur à "faciès de transition" entre les faciès provençaux et subalpins qui affleurent (Lampourdier). La présence d'accidents siliceux nombreux se généralise à la base du Barrémien supérieur.

Le Gargasien, constitué de marne calcaire et de calcaire gréseux, marneux et glauconieux n'affleure que très peu.

L'Albien manque totalement sur notre secteur.

- Le Néocrétacé du massif d'Uchaux (bordure occidentale) et du massif de Pont-Saint-Esprit à Marcoule (bordure orientale) montre une série continue du Cénomaniens inférieur au Santonien, épaisse de 700 à 800 m, dans son meilleur développement. G. MENNESSIER y voit "la plus belle série néocrétacée de la vallée du Rhône, par sa stratigraphie et sa richesse en fossiles".

Au Cénomaniens, en rive droite comme en rive gauche, les faciès gréseux prédominent largement (faciès Tavien du Cénomaniens inférieur et ensemble des "Grès supérieurs").

Le Cénomaniens moyen se caractérise sur notre secteur par des veines ligniteuses lenticulaires, d'extension plus ou moins marquée (Faciès Paulétien = complexe ligniteux).

On constate d'autre part une sensible diminution de son épaisseur totale du Nord au Sud.

Les alternances de calcaires gréseux blanchâtres, plus ou moins terrigènes et de marnes sableuses du Ligérien du massif d'Uchaux se retrouvent en rive droite en bancs gris un peu plus épais à quelques ammonites.

Ces mêmes dépôts calcaréo-marneux, beaucoup moins réguliers, se retrouvent dans l'Angoumien inférieur avant d'être peu à peu remplacés par des grès.

A partir de l'Angoumien moyen, les conditions deviennent favorables au développement des polypiers et des rudistes, puis d'énormes apports de matériel détritique quartzeux se déversent dans ce secteur sud ouest du golfe rhodanien (Ucétien ; "Grès de Montmout"). L'Angoumien est l'étage le plus développé, le plus riche en fossiles, mais dont le fait stratigraphique essentiel est la variation considérable des faciès qui empêche de retrouver à quelque distance la même succession des couches.

Le Coniacien marque un retour à la sédimentation calcaire où se mêle encore une très faible fraction de quartz détritique ; puis apparaissent de nouveau des Biohermes à rudistes. Sur toute l'étendue des affleurements le Coniacien présente un faciès constant (type "Calcaires de Mornas").

Au Santonien, on voit réapparaître les faciès lagunaires, sableux, ligniteux par place, alternant avec des épisodes marins dont témoignent quelques lentilles à rudistes. Cet étage est ici l'ultime terme de la période crétacée.

Le Miocène, molassique, commence par un conglomérat à galets verts et ne forme que de petits placages sur les paléoreliefs crétacés. Son extension est beaucoup plus limitée que dans la région d'Avignon.

- Le Pliocène est représenté par un épisode marin, transgressif (marnes bleues du Plaisancien) suivi d'une régression et de l'établissement définitif du régime continental (sables du faciès Astien).

1.2.4. - Plio-Quaternaire

1.2.4.1. - Les alluvions anciennes

Au Pliocène supérieur, la vallée du Rhône est parcourue par un fleuve puissant qui y répand d'importants dépôts alluvionnaires. Ces alluvions anciennes sont en majorité représentées par des épandages de galets de quartzite d'origine alpine. Le même régime se poursuit au Pléistocène, avec oscillations du niveau de base, provoquant la formation de nouvelles terrasses alluviales très développées dans la vallée principale.

D'une manière générale, les terrasses fluviales ainsi différenciées sont constituées de graves sableuses, parfois légèrement argileuses avec un fort pourcentage de quartzites et une fraction de galets calcaires d'origine régionale, de plus en plus importante vers les basses terrasses. Selon les endroits la grave crue constitue le sommet des terrasses, ou bien elle est recouverte de sols évolués limoneux ou terreux.

D'après L. JOLEAUD l'examen des formations quaternaires permet de conclure à la succession des phénomènes suivants dans la basse vallée du Rhône :

- au Sicilien récent, il y a creusement jusqu'en dessous de la cote -45, en relation avec un important mouvement négatif de la mer, peut-être jusque vers la cote -300 ;
- au Pléistocène ancien s'effectue un remblaiement jusqu'à la cote +60 en relation avec un nouveau mouvement positif de la mer qui permet la formation des plages de 60 et de 30 m ;
- au Pléistocène moyen une phase de creusement (-26) accompagne un abaissement important du niveau de base (-200). Suit un remblaiement jusqu'à la cote -20 au Pléistocène récent ;
- enfin, après une nouvelle variation légèrement négative, un dernier mouvement (Holocène) ramène la mer à un niveau voisin du niveau actuel.

Dans le secteur qui nous intéresse, ces variations se traduisent par l'édification des différentes terrasses suivantes :

Fv : très ancienne terrasse (98 - 105 m)

D'âge probablement villafranchien, c'est la terrasse la plus haute au-dessus du Rhône qui soit observable dans notre secteur. Elle est constituée, pour l'essentiel, de galets et petits blocs roulés de quartzites alpins oxydés, mêlés à des sables et quelques lentilles argilo-sableuses. Elle n'existe qu'en rive droite, sous forme de petits lambeaux couronnant les buttes astiennes de Monticaut et de Saint-Géniès-de-Comolas, ou recouvrant en divers points les calcaires barrémiens du massif de Rochemaure.

Fx : haute terrasse (60 - 80 m)

Le matériel provient, en grande partie, du remaniement des galets quartzitiques du diluvium précédent. Elle s'étend largement sur les calcaires coniaciens entre Saint-Etienne-des-Sorts et Vénéjean, et forme le sommet du mont Jupiter. On la retrouve en rive gauche au sommet du Lampourdier.

Fy : moyenne terrasse (30 - 40 m)

Plusieurs témoins de cette terrasse sont disséminés en rive droite : bien individualisée à l'Est de Chusclan, au château de Lascours et au camp Rossignac, elle prend une allure de raccordement vers Saint-Laurent-des-Arbres. Les formations qui recouvrent le mont Pegueirol et qui présentent de nombreux dreikanter sont à rattacher, d'après la notice de la carte d'Avignon au 50 000, au niveau précédent.

Fy 2 : basse terrasse (10 - 17 m)

Formée de cailloutis, en majorité calcaires, elle constitue le passage entre la moyenne terrasse et les alluvions fluviales récentes, qu'elle borde sur une étroite bande entre l'Ardoise et Saint-Géniès-de-Comolas. Elle est souvent exploitée en de vastes gravières et recouverte localement de formations argilo-limoneuses.

TABEAU I

STRATIGRAPHIE - TABLEAU SYNTHETIQUE

ETAGE	LITHOLOGIE	MACROFAUNE	MICROFAUNE
"ASTIEN" (P ₀) (30 m)	- Sables et galets - Sables et marnes	Potamides Basteroti	
PLAISANCIEN (P) (30 m)	- Marnes bleues et marnes beiges à minces lits sablo- micacés	Nassa semistriata Corbula gibba Cerithium vulcatum Arca diluvii	cf. tableau II p. 25
MIOCENE (m)	- Conglomérat verdi - Grès molassiques		
SANTONIEN (c ⁵) (60-70 m)	- Sables et grès ferrugineux. Marnes schisteuses ligniteuses - Sables et marnes à lignite. Calc. marno-gréseux à Rudistes - Sables blancs et grès fins	Orbinya socialis Hippurites Radiolites	
CONIACIEN (c ⁴) (110-130 m)	- Calcaire à Rudistes (c ^{4b}) - Calcaire gréseux de Mornas - Sables et grès de Montmout	Rudistes nombreux Entroques Bryozoaires Rudistes	Quinqueloculina sp
ANGOUMIEN (c ^{3b}) (220-250 m)	- "UCETIENS" - Grès de Boncavail à faune silicifiée (c ^{3b3}) - Calcaire gréseux à cucullea (c ^{3b2}) - Marnes et calcaire marneux (c ^{3b1})	Polypiers Cardium productum Trigonia scabra Cucullea matheroni Huîtres Spongiaires	
LIGERIEN (c ^{3a}) (90-110 m)	- Petit niveau conglomé- ratique - Calcaire blanchâtre à niveaux marneux		
CENOMANIEN (c ²) (140-170 m)	- "Grès supérieurs" (c ^{2c}) Grès grossiers - Complexe ligniteux de Mondragon (c ^{2b}) - "Grès inférieurs" (c ^{2a}) grès jaunes	Huîtres Ostrea sp Ostrea mondragonensis	
APTIEN n (5-6)	- Marnes calcaires et calcaire gréseux glauconieux gris	Belemnites Semicanaliculatus	
BARREMIEN SUP. (n ^{4bu}) "Urgonien" Rochemaure	- Calcaire récifal, crypto- cristallin, graveleux, organo- gène - Horizons à cherts	Polypiers Lamellibranches	Orbitolina conoidea discoidea Orbitolinopsis sp Coskinolina sunnilandensis
BARREMIEN SUP. (n ^{4b}) Faciès de transition	- Calcaire cristallin compact à silex - calcaire marneux micro- graveleux	Echinodermes Spongiaires (spicules) Annélides	Miliolidae Trocholines
BARREMIEN INF. (n ^{4a})	- Calcaire argileux beige jaunâtre à bancs marneux intercalés	Bryozoaires Lamellibranches	

1.2.4.2. - Les alluvions fluviales récentes : Fz

Limons et cailloutis modernes s'étendent sur de vastes surfaces, occupant toute la plaine du Rhône et les vallées adjacentes.

Ils atteignent leur extension latérale maximale à la latitude d'Orange (plus de 12 km) où ils se raccordent vers l'Est aux formations alluviales de l'Aygues. Leur épaisseur totale, très variable sur l'ensemble de la vallée, est comprise en moyenne entre 10 et 20 m dans la zone axiale. Plusieurs zones de surcreusement, qui accidentent la topographie du substratum (cf. Pl. 4) s'échelonnent du Nord au Sud au droit du cours actuel du fleuve. A la faveur de ces sillons, notamment au passage du verrou de Roquemaure, le comblement alluvial peut dépasser 45 m.

Ces alluvions récentes se partagent en deux termes :

- en surface, sur une épaisseur variable, s'étalent des limons de débordement. Leur épaisseur peut atteindre 5 à 6 m.

Dans l'île de la Piboulette, leur composition sédimentologique moyenne est la suivante :

- Argile	11,2 %	- Sable grossier	5,4 %
- Limon	64,5 %	- Matières organiques	2,5 %
- Sable fin	16,4 %		

Sur l'ensemble du sédiment, on compte 42,0 % de carbonate de calcium. Les limons, très fertiles, sont intensément cultivés hors des zones inondables.

- en profondeur, sous les limons et jusqu'au substratum (cf. Pl. 5) les différentes divagations du fleuve ont entraîné la formation de lentilles entrecroisées à granulométrie variable. On retrouvera donc tous les intermédiaires entre le sable fin et les gros cailloux. De façon générale, les plus gros galets (120 à 180 mm) se rencontrent au contact du substratum, dans les anciens chenaux principaux. Gravier et galets sont de nature pétrographique variée : calcaires, silex, quartzites, pegmatites, gneiss, granites...

Nous aurons l'occasion, dans les chapitres suivants, d'aborder plus en détail certains aspects de ces alluvions, en regard des différents travaux à y effectuer.

En effet, les travaux de rescindement et de dragages, ainsi que les terrassements des canaux et les fouilles des ouvrages seront effectués, en majeure partie, dans les alluvions modernes et, pour une bonne part, dans les limons (cf. 4.1.3. ; 3.2.3. ; 2.3.).

1.2.4.3. - Eboulis et sols résiduels

Les éboulis sont peu importants sur l'ensemble de notre secteur et ne se rencontrent qu'au bas des pentes des massifs calcaires où ils forment des placages d'épaisseur variable mais généralement faible.

Des sols résiduels, cultivés, recouvrent en partie les versants coniaciens peu inclinés dans le massif d'Uchaux et de Vénéjean, mais cette zone altérée, à fragments calcaires associés à une argile de décalcification, ne dépasse jamais quelques décimètres. Le plus souvent, ces sols résiduels sont constitués par une arène sèche, issue de la désagrégation des divers grès et sables cénomaniens ou turoniens, mêlée à de la terre végétale.

1.3. - GEOLOGIE DU SUBSTRATUM SOUS-ALLUVIAL

1.3.1. - Les méthodes d'investigation

La reconnaissance géologique de la vallée du Rhône entre Mondragon et Roquemaure avait été entreprise dès 1949 dans les environs de Mornas, en continuation des études effectuées au titre de l'aménagement de Donzère-Mondragon. Puis les campagnes de prospection géophysique et de sondages mécaniques se sont succédées sur l'ensemble de la vallée, afin de déterminer la nature et l'extension des différentes formations du substratum. Les connaissances acquises devant permettre, au stade de l'avant-projet, de prévoir les grandes lignes du futur aménagement, et de choisir, dans des limites de compatibilité acceptables avec des critères hydrauliques et technologiques, l'emplacement des ouvrages projetés.

Cette reconnaissance s'est déroulée en deux phases qui sont, par ordre chronologique :

- des campagnes de prospection géophysique,
- des campagnes de sondages mécaniques.

1.3.1.1. - Prospection géophysique

La Compagnie Générale de Géophysique a effectué, pour le compte de la C.N.R., plusieurs campagnes d'études et notamment une campagne de prospection électrique et sismique de la région de Mornas à Beaucaire, de juin 1960 à octobre 1961, dont nous avons retenu les principaux résultats, dans les zones dépourvues de sondages mécaniques, pour dresser la carte topographique du substratum (Pl. 4).

Les études par sismique réfraction ont généralement été réalisées en dernier lieu pour compléter ou préciser, le cas échéant, certaines zones où les différences de résistivité trop faibles entre deux formations laissent subsister une incertitude.

Enfin, quelques sondages mécaniques ont été effectués pour étalonnage et vérification des résultats de la géophysique.

1.3.1.2. - Sondages mécaniques

Toujours au stade des études avant-projet, plusieurs campagnes de sondages mécaniques préliminaires ont été effectuées systématiquement, tant sur terre ferme, à proximité du fleuve, qu'en rivière. Les sondages implantés sur les emprises de l'aménagement d'Orange sont indexés en O, ou RO pour les sondages en rivière (Rhône-Orange), (A et RA pour l'aménagement d'Avignon).

Ce sont :

- de RO 1 à RO 57 : des sondages effectués en 1965 depuis un ponton dans le lit même du fleuve, tous les 500 m environ, alternativement en rive droite et rive gauche. Dans les zones où le substratum était atteint à une profondeur relativement faible, l'écart entre deux sondages voisins pouvait être réduit à 100 m ;

- de O.10 à O.69 : des sondages en terre ferme, implantés à l'emplacement des ouvrages projetés, et dans l'axe des canaux. Ils sont particulièrement denses dans l'île de la Piboulette ;

- de DS 1 à DS 19 : des sondages en rivière encore, plus anciens, rassemblés entre Saint-Etienne-des-Sorts et Marcoule ;

- dans la région de Roquemaure, une trentaine de sondages programmés dans le cadre de l'aménagement d'Avignon ;

- Enfin, une trentaine de sondages non C. N. R. disséminés sur l'ensemble du secteur étudié, dont les directions régionales du B.R.G.M. nous ont communiqué les résultats.

Soit, au total, environ 195 points d'investigation au moment de notre passage à la C. N. R.

Les sondages commandés par la C. N. R. ont été réalisés par des sondeuses de type Craelius XCH 60, utilisées en battage dans les alluvions et en rotation et carottage continu dans le substratum. Les sondages en rivière avaient un diamètre de 140 à 114 mm en percussion et de 95 mm en rotation. Certains sondages en terre ferme pouvaient être d'un diamètre supérieur selon les besoins ; notamment pour être équipés de piézographes ou pour permettre d'effectuer des mesures de vitesse au micromoulinet.

Compte tenu des buts poursuivis, le substratum atteint n'était reconnu que sur les 5 premiers mètres en moyenne et faisait l'objet d'un prélèvement continu au moyen d'un double-carottier. Seuls quelques sondages ont été conduits plus profondément : O.18 (33 m carottés) O60 (71,30 m), O61 (69 m), O62 (70,40 m) dans l'île de la Piboulette ; C 14 (200 m au Nord de Caderousse).

1.3.2. - Cartographie du substratum (Pl. 4)

Les résultats des campagnes de prospection géophysique et de sondages mécaniques ont été, en premier lieu, rassemblés pour dresser une carte topographique de la surface du substratum. Cette carte est complétée çà et là par les indications supplémentaires qu'ont pu apporter les battages de piézomètres qui ont contacté le substratum.

La surface du toit du substratum est représentée en courbes isobathes (Pl. 4) et montre, au Nord et au Sud, les particularités suivantes :

- à la latitude de Mondragon le substratum apparaît relativement plat, variant de la cote 20 à la cote 25 sans changement rapide ; les grès cénomaniens forment un très léger ressaut au-dessus des "marnes bleues" ;
- au Nord de Saint-Etienne-des-Sorts, le talweg suit le cours actuel du fleuve, mais s'aprofondit brusquement jusqu'à la cote -10,00 environ, immédiatement à l'amont de la prolongation du massif coniacien de Vénéjean. Au-delà de cette zone de surcreusement, le talweg contourne l'éperon calcaire, pour se

diriger vers le centre de la plaine où il longe, en sa rive gauche, le prolongement sous-alluvial du Coniacien calcaire du synclinal de Piolenc, avant de se raccorder à un ancien chenal de l'Aygues ;

- entre Saint-Etienne-des-Sorts et Marcoule, sous l'extrémité de l'île des Brotteaux et à l'aval de la banquette calcaire on distingue une nouvelle zone d'affouillement jusqu'à la cote -10,00 NGF ;
- dans la partie centrale de la plaine, le talweg s'élargit et suit approximativement le cours actuel du fleuve jusqu'à la hauteur de Montfaucon. La zone comprise entre le Rhône et l'Aygues apparaît subhorizontale ;

- dans la région de Roquemaure enfin, la "barre" calcaire se prolonge sous alluvions, ne laissant qu'un défilé très encaissé qui correspond à la largeur du fleuve. Ce chenal très étroit se prolonge sur plusieurs centaines de mètres à l'amont et s'abaisse au niveau de Roquemaure à une cote inférieure à -30,00 NGF, soit plus de 50 m au-dessous des affleurements barrémiens riverains (cf. coupe 6, fig. 4).

En conclusion, si l'allure générale du toit du substratum paraît assez bien définie sur l'ensemble de la vallée, à l'issue des premières campagnes de reconnaissance, il reste à la préciser sur l'emplacement des futurs ouvrages à l'aide de sondages en petit diamètre.

On retiendra enfin que la pente générale du substratum, dans le sens nord-sud, reste très faible sur l'ensemble de la vallée, marquant seulement un léger redressement vers l'Est et l'Ouest dans sa partie médiane (3 %).

1.3.3. - Etude stratigraphique du substratum (Pl. 3)

Le nombre relativement élevé des points d'investigation et les résultats de la géophysique nous ont permis de délimiter sans grande difficulté les différentes formations du substratum des alluvions ; toutefois, leur étude stratigraphique s'est avérée beaucoup plus délicate, compte tenu de la longueur souvent insuffisante des carottages et de l'absence de microfaune dans la plupart des niveaux.

1.3.3.1. - CRETACE

Il s'agit le plus souvent des prolongements, plus ou moins étendus sous les alluvions modernes, des formations crétaées des massifs de bordure.

- Le Barrémien ceinture ou prolonge les affleurements du Lampourdier et du massif de Saint-Génies-Roquemaure. Le Barrémien supérieur du Lampourdier se poursuit à quelque distance du rebord occidental du massif où il a été contacté par des piézomètres entre les cotes 21,00 et 23,00. Il est probablement limité en profondeur par la continuation des failles subverticales NW-SE et E-W relevées en surface.

La barre "urgonienne" (n⁴b^U) de Roquemaure se prolonge sous les alluvions, ne laissant qu'un défilé qui correspond à la largeur du fleuve. Entre Roquemaure et l'affleurement de Pierre-à-Feu les sondages ont rencontré les calcaires urgoniens à des cotes comprises entre 10,00 et 15,00 NGF, sauf au droit du fleuve où certains sondages ont traversé 50 m d'alluvions sans atteindre le rocher.

Les pointements de la Tour de l'Hers se haussent par failles au-dessus de ce massif ennoyé par les alluvions et témoignent, en rive gauche, de la continuité de la "barre" de Roquemaure jusqu'à Pierre-à-Feu (fig. 4, coupe 6).

- Albien-Vraconien ? En bordure de l'île de Miémar, les sondages implantés dans le lit du Rhône, et à proximité des rives ont rencontré sous les alluvions les niveaux suivants :

- Au sommet une marne noire, schisteuse, très peu argileuse mais très sablonneuse et friable, sur un mètre environ. Un examen à la loupe binoculaire n'y a révélé aucun organisme.

- Au-dessous, soit un grès calcaréo-marneux, vert sombre, très compact, soit un grès dur, plus grossier, beige jaunâtre.

Le premier niveau gréseux qui semble être en position intermédiaire dans la plupart des sondages a un aspect lithologique bien particulier : c'est un grès fin à litage et passées détritiques terrigènes très irréguliers, auquel un pourcentage notable de grains glauconieux donne une coloration gris verdâtre. L'examen micrographique permet d'y distinguer des grains de quartz anguleux, bien calibrés, de la glauconie, quelques micacés et de nombreux spicules de Spongiaires. Le ciment calcaréo-marneux est abondant et présente de très nombreuses traces d'altération ferrugineuses. Aucun Foraminifère n'y a été observé.

Le second niveau gréseux, plus grossier, beaucoup plus quartzeux, présente les mêmes constituants en lame mince que le précédent, dont il diffère par son aspect macroscopique : c'est un grès très dur et compact beige jaunâtre

à ciment calcaire peu abondant. Les carottes extraites du sondage A 109 portent en outre quelques traces ichnologiques tubulaires et annelées.

L'absence totale de microfaune et le fait que ces niveaux ne peuvent être apparentés à aucun des niveaux affleurant sur les bordures, rendent leur identification très hasardeuse. Néanmoins, leur localisation au-dessous des formations cénomaniennes et une certaine similitude de faciès avec des niveaux datés du Vraconien ou de l'Albien supérieur, rencontrés par sondage au Nord de Mondragon (sondage pétrolier de Massanes) nous amène à attribuer à cet étage, mais sans aucune certitude, ces niveaux gréseux.

- Le Cénomanien

- Zone de Montfaucon-Roquemaure

Les grès cénomaniens occupent en rive droite, une large bande pratiquement parallèle à la direction moyenne du Rhône entre l'extrémité méridionale de l'île de la Piboulette et la faille de Roquemaure. Ils sont coïncés, au Sud Est, entre les failles bordières du Lampourdier et le prolongement de l'accident de Roquemaure vers Pierre-à-Feu.

Les carottages ont rencontré des grès roux, tendres et friables, alternant avec des grès ou des calcaires très gréseux jaunes, durs, renfermant des débris coquilliers (huîtres et petits lamellibranches).

Les carottages effectués dans les sondages P 15 et P 14 montrent un grès calcaire jaunâtre, très diaclasé, à niveaux argileux, assez semblable à celui qui constitue les premiers affleurements à l'Ouest de la butte de Montlézon.

Par ailleurs, des sondages (J 1 à J 3) implantés à proximité de la ligne ferroviaire Nîmes-Le Teil, à l'Ouest de Roquemaure, dans le cadre des études de l'autoroute A 9, ont apporté les précisions suivantes : le Cénomanien y a été contacté à 12 m de profondeur en moyenne, sous le terrain naturel, au-dessous de quelques décimètres de marne sableuse. Ce sont des grès fins à glauconie, légèrement marneux, compacts, probablement affectés par la proximité de la faille de Roquemaure. Ils montrent, en effet, un pendage vertical, et plusieurs fissures verticales dont les lèvres portent des traces de glissement (fig. 4, coupe 5).

- Zone de l'Estagnol

En bordure de la Cèze quelques battages de piézomètres ont été arrêtés à une profondeur moyenne de 5 m par un promontoire gréseux enfoui sous les alluvions. Malgré l'absence de preuves tangibles nous émettrons l'hypothèse qu'il s'agit là de grès cénomaniens qui affleurent au Nord, à Marcoule, et à l'Ouest à proximité de Laudun.

A l'Est de Marcoule, cinq sondages "en rivière" ont retrouvé les grès cénomaniens sous moins d'un mètre d'alluvions : ce sont des grès fins calcaires, micacés, durs, alternant avec des passées plus grossières à petits galets et débris coquilliers, qui prolongent les affleurements situés au pied de la Dent de Marcoule.

Enfin, le Cénomanien inférieur ceinture, sur une largeur qui atteint parfois le kilomètre les affleurements correspondants de Mondragon. Il n'a été atteint, dans cette zone, que par quelques sondages effectués au cours des études du canal de Donzère-Mondragon et, sous les marnes plaisanciennes, par le sondage pétrolier de Massanes (jusqu'à la cote -160 environ).

- Turonien et Coniacien

Bien qu'ils n'aient pas toujours été mis en évidence par les sondages mécaniques, notamment en rive gauche, les niveaux ligériens et angoumiens se prolongent sous les alluvions à une distance variable des bordures (Pl. 3). En rive gauche ils couvrent de grandes étendues en profondeur, au niveau de la confluence du canal de fuite de Donzère et du Rhône.

En rive droite les sables ucétiens ont été nettement surcreusés à l'aval du "môle" coniacien de Saint-Etienne-des-Sorts.

Les calcaires gréseux jaunes, à entroques et Miliolidés, du Coniacien forment sous la plaine alluviale des "môles" à surface peu inclinée entre les cotes 20,00 et 30,00 NGF, surtout étendus en rive gauche entre Mornas et Piolenc. Sur les rebords de ces plateaux ensevelis, le Coniacien s'enfonce rapidement sous la couverture plaisancienne. Bien qu'aucun sondage ne le confirme on peut penser que ces "môles" sont limités par des failles verticales et parallèles à l'axe principal de la vallée, ménageant ainsi le couloir d'effondrement qu'a emprunté la transgression plaisancienne.

1.3.3.2. - LE NEOGENE

1.3.3.2.1. - Les sables "astiens"

Un forage de recherche d'eau *, implanté à la Rocha (G 1) a recoupé sur plus de neuf mètres (de 16,70 à 7,50) des sables aquifères à faciès astien surmontant, par l'intermédiaire d'une couche graveleuse consolidée les marnes plaisanciennes. Ces niveaux sableux astiens semblent avoir une extension très limitée.

* Archives B. R. G. M. Montpellier.

1.4. - REMARQUES SEDIMENTOLOGIQUES ET PALEOGEOGRAPHIQUES

Quoique les formations des massifs de bordure n'interviennent pratiquement pas dans la réalisation des divers ouvrages, il est bon d'ajouter aux études stratigraphiques qui précèdent quelques considérations sédimentologiques et paléogéographiques, notamment pour expliquer, dans une certaine mesure, les variations latérales de faciès et de puissance des couches, que nous avons pu noter à divers niveaux.

La répartition et l'évolution des faciès régionaux dans ce secteur de la vallée du Rhône, sont étroitement conditionnés par les mouvements orogéniques positifs qui devaient amener l'émersion de "l'isthme durancien", dès la fin du Gargasien, et provoquer ainsi l'individualisation, au Nord, du "Golfe Rhodanien" (J. SORNAY) - (cf. 1.1.2.).

- Au cours du Crétacé inférieur, l'exhaussement progressif d'une ride - embryon de l'isthme durancien - entraîne la différenciation entre les "faciès provençaux" et les "faciès vocontiens" réputés plus profonds, selon le schéma conventionnel. Sédimentologiquement, du Barrémien inférieur au Barrémien supérieur à "faciès de transition" puis au Barrémo-Aptien à faciès "urgonien", on observe une série à gradient carbonaté positif qui s'achève par les dépôts récifaux ou péri-récifaux en mer chaude, des calcaires urgoniens.

L'Aptien, (Gargasien) calcaro-marneux, gréseux à grains fins, serait un faciès de bordure des reliefs émergés plus au Sud.

- Crétacé supérieur : au Cénomanién inférieur, le "Golfe Rhodanien" est largement ouvert sur la mer alpine. Les formations gréseuses, plus ou moins grossières selon la distance aux rivages, apparaissent et se généralisent. A Mondragon, les "Grès inférieurs" sont assez grossiers et pratiquement azoïques, à leur base. Une étude granulométrique effectuée dans les grès et sables a fait ressortir le bon classement du sédiment (Sorting index = 1,44) ; les plus gros éléments ont environ 2 mm de diamètre.

Vers l'Est ils passent à des faciès plus marneux, à Trigonies, peut-être plus profonds. Puis un exhaussement du fond amène quelques épisodes ligniteux à Mondragon, alors qu'à l'Est se poursuit la sédimentation gréseuse grossière et qu'à l'Ouest les lignites sont très abondants (Saint-Paulet-de-Caisson). Tout ceci semble dénoter des mouvements de bascule, positifs à l'Ouest et négatifs à l'Est.

Les "Grès supérieurs" marquent ensuite le retour à un ennoyage progressif, et la reprise des apports détritiques en provenance du massif Central, sous un climat tropical chaud et humide (J. MEDUS et J.M. TRIAT).

Le Cénomanién montre de nettes diminutions de puissance du Nord vers le Sud.

L'étude détaillée du Turonien a permis à C. MONLEAU de distinguer plusieurs domaines paléogéographiques, dont nous retiendrons ceci : "La formation récifale (qui s'installe sur les sables jaunes, fins, déposés en masse dans le bassin) est ouverte vers la mer alpine au Nord Est et est bordée par un rivage au Nord, au Nord Ouest, à l'Ouest et au Sud Ouest de la Cèze. L'implantation du complexe récifal est réalisée grâce à la mise en place d'un haut-fond sur la rive droite du Rhône". Le complexe récifal prend ensuite une importance croissante à la faveur des comblements détritiques qui se poursuivent à sa périphérie, marquant une tendance à l'érosion.

Puis de nouveaux apports détritiques atteignent cette partie du golfe (sables de Montmout).

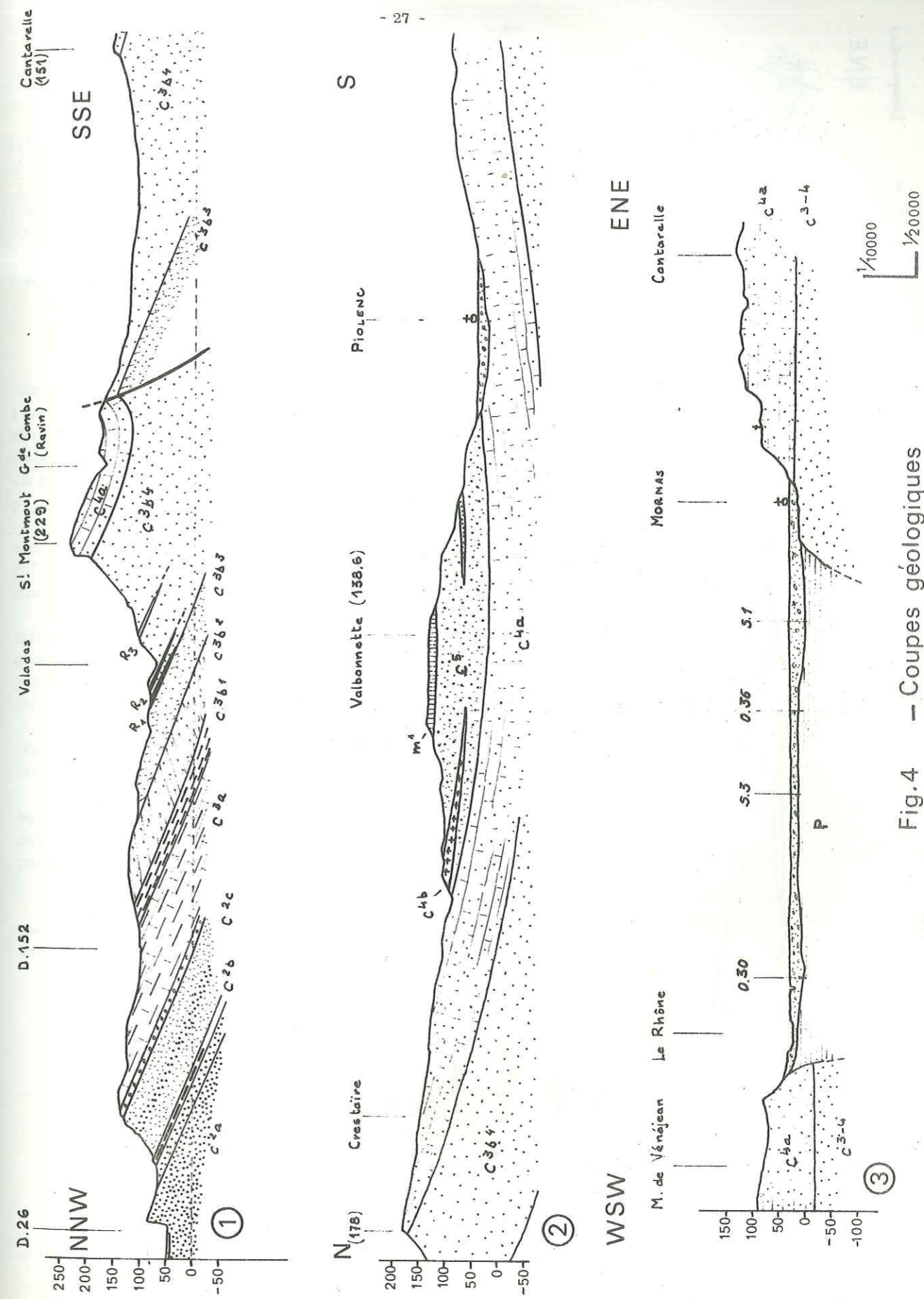
Au Coniacien une mer peu profonde couvre la région qui s'ennoye sous un manteau de calcaires gréseux zoogènes (calcaires de Mornas) ; de nouveau, le fond se relève et les colonies de Rudistes se répandent à la fin du Coniacien. On estime généralement qu'à ce moment-là, une communication directe existe avec la Provence (C. MONLEAU).

Au Santonien, le golfe est réduit à un étroit bras de mer par la formation du synclinal de Piolenc (amorcé au Coniacien terminal) ; et meurt bientôt sur place après les signes avant-coureurs de l'émersion manifestés par les formations récifales, suivies des dépôts ligniteux. Les sables blancs de base, déposés en eau très calme sont très bien triés (sorting index = 1,32) et fins (Q₂ = 0,26 mm), indiquant l'évolution marquée du sédiment par des actions de lévigation hydrodynamique très modérées.

L'émersion se poursuit jusqu'à la transgression miocène, et l'Helvétien s'avance dans le synclinal de Piolenc.

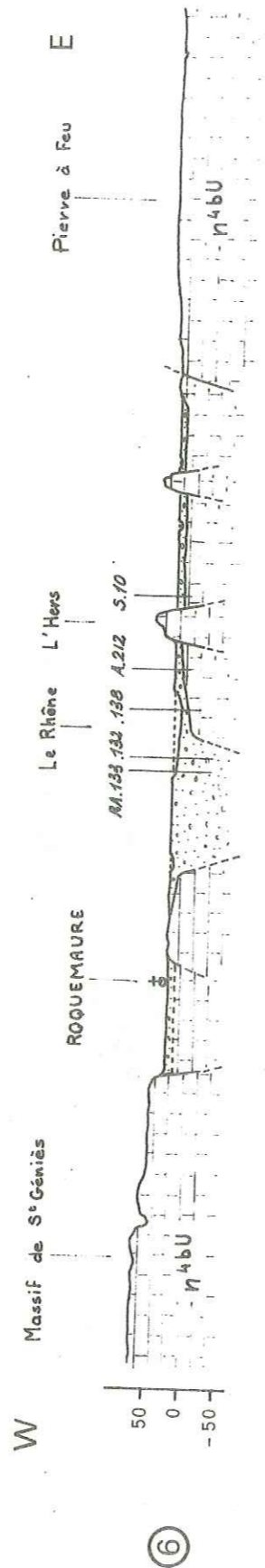
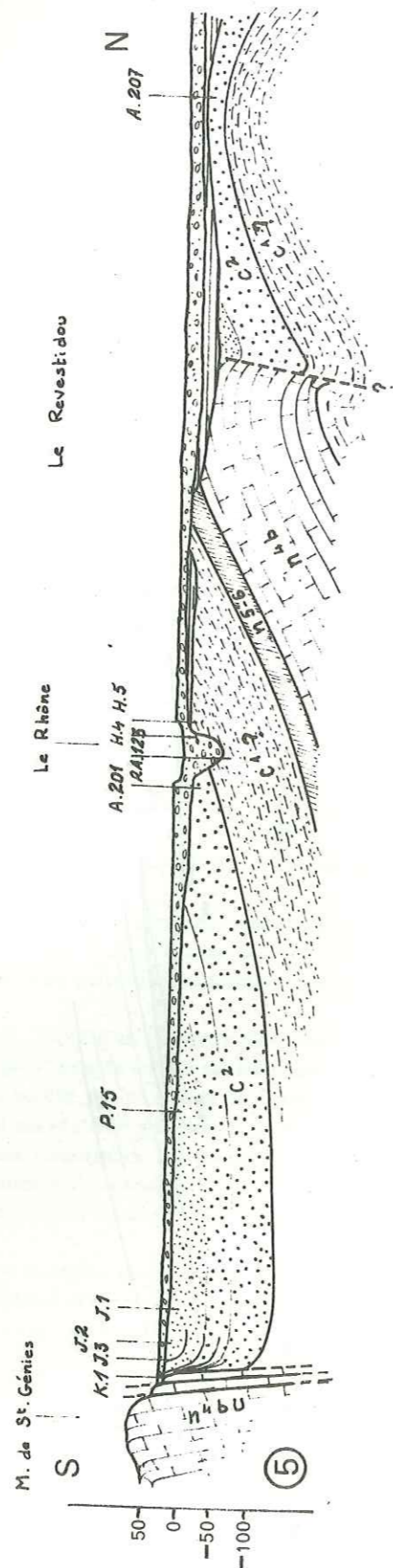
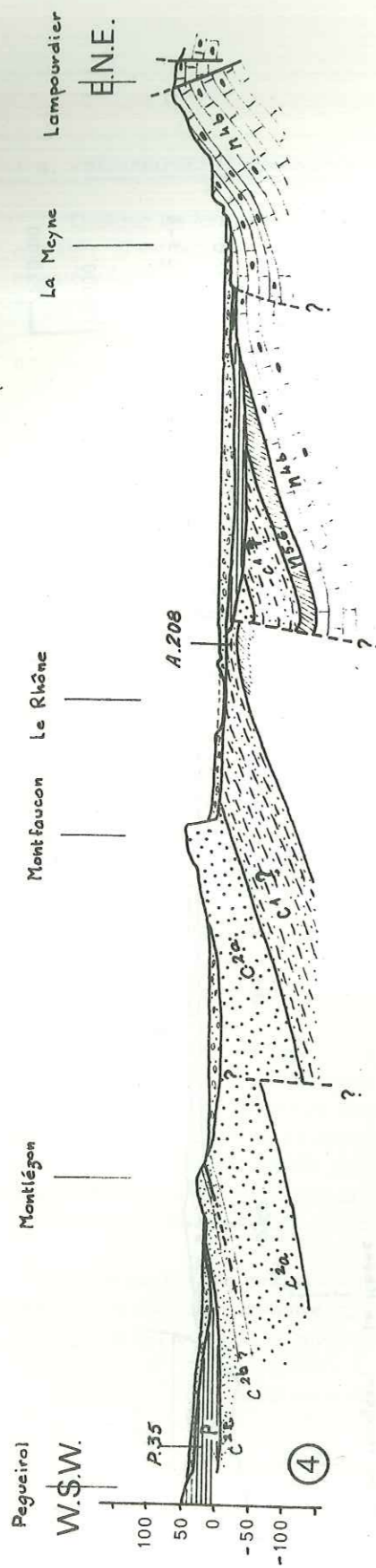
Après la dernière phase "Rhodanienne", ultime stade de l'orogénèse alpine (Miocène terminal) la région est soumise dans son ensemble, à une phase d'érosion et de creusement qui accentue encore l'inversion des pentes opérée par les contre-coups des mouvements alpins (Oligocène - Miocène).

La transgression pliocène dépose alors les puissantes séries marneuses marines du Plaisancien. Suivent des dépôts fluviaux sableux (faciès astien) et le cycle pliocène s'achève par l'étalage des nappes alluviales villafranchiennes.



Les figurés utilisés pour les différentes formations sont les mêmes que pour la Pl. 2. - La situation des coupes est indiquée annexe III. - La coupe 1 intéresse la partie occidentale du massif d'Uchaux et est parallèle à l'axe de plongement général des couches (15° environ SSE).

Fig.4 - Coupes géologiques



1.5. - REMARQUES TECTONIQUES

- Les principales structures observables dans le secteur de cette étude sont :
- le synclinal, très ouvert, de Piolenc (cf. fig. 4 coupes 1 et 2) qui borde à l'Ouest le brachyanticlinal d'Uchaux,
 - l'ensemble monoclinale qui borde le massif de la Cèze en rive droite,
 - la forte flexure, pentée 85° N, qui affecte les couches du Barrémien supérieur de Roquemaure (cf. fig. 4 coupe 5),
 - le massif du Lampourdier montre une structure périclinale (25° vers le Nord et vers l'Ouest) (cf. fig. 4, coupes 4 et 5)
- Les pendages sont généralement faibles : compris entre 10° et 15° dans les séries du Crétacé supérieur (cf. Pl. 2).

- Les accidents majeurs, qui sont observables sur les bordures sont représentés par :
- la faille de Montmout qui atteint au maximum 150 m de rejet (fig. 4, coupe 1) et semble être de direction varisque (NE - SW) mais qui date très probablement de la phase orogénique du Coniacien terminal, comme l'ensemble de la structure d'Uchaux. Au pied ouest de Montmout, une faille approximativement S-N, dont la lèvre abaissée est faite de calcaires gréseux de Mornas inclinés à 45° NNE, l'autre lèvre étant de même nature, mais avec un pendage de 15° SSW, explique la descente vers le SW de la crête de Montmout. Cette faille et une autre qui lui est parallèle et de rejet analogue, semblent n'être que des failles satellites de la précédente. Toutes ces failles ont pu rejouer depuis le Coniacien terminal - Santonien sans qu'il soit possible d'en apporter la preuve.
 - la "faille" de Roquemaure dont il est difficile d'évaluer l'ampleur est de direction E-W, liée aux mouvements tectoniques pyrénéo-provençaux, qui ne semblent pas avoir été ressentis plus au Nord. Les couches, inclinées à 85° vers le Nord, présentent des miroirs très nets, parallèles ou confondus avec la surface des bancs. Elle affecte les couches du Cénomaniens gréseux, redressées à la verticale et faillées verticalement (sondages).
 - les failles d'effondrement qui limitent le massif du Lampourdier et le hachent de sorte que le Barrémien inférieur apparaît en position structurale surélevée, se rattachent par leur allure générale à la tectonique observable dans la région d'Avignon. Dans les formations du Crétacé supérieur ce style tectonique ne se retrouve pas, et l'on peut penser que les couches du Crétacé supérieur reposent localement en discordance sur les formations calcaires du Crétacé inférieur (Barrémien supérieur).
- Ces failles ont été poursuivies en profondeur et les structures représentées figure 4, coupes 4 et 5 ne sont que le résultat d'une interprétation hypothétique d'après les résultats de sondages très peu profonds et les observations de surface considérablement limitées par les épandages alluviaux.
- les bordures de la plaine alluviale, sont très probablement limitées par des failles d'effondrement que nous n'avons pu mettre en évidence mais dont l'existence paraît être dénotée par les différences d'altitude qui existent entre les affleurements crétacés des bordures et le toit des mêmes formations sous les alluvions et qui semblent ne pouvoir être dus seulement à des phénomènes d'érosion différentielle ou de surcreusement (cf. Pl. 2, Pl. 3 et Pl. 4).

Ajoutons qu'aucune trace de faille n'a été relevée dans les carottes des marnes plaisanciennes et qu'il semble bien que même sans rejeter a priori une telle éventualité les inconvénients qui pourraient en découler seraient très atténués par le fait de colmatage qui ne manqueraient pas de se produire.

La coupe 2 est la continuation vers le Sud de la coupe 1 à travers le synclinal de Piolenc. -
 Les structures représentées coupe 4 et coupe 5 sont hypothétiques, la profondeur des sondages étant insuffisante.
 La coupe 6 montre l'importance du surcreusement au passage de la barre de Roquemaure - Pierre à Feu.

CHAPITRE 2

ETUDE GEOTECHNIQUE DES TERRAINS INTERESSES PAR LES OUVRAGES

Les études géologiques qui précèdent ont montré la grande homogénéité, à l'échelle de l'aménagement, des formations plaisanciennes et le rôle très réduit que pouvaient jouer les autres formations géologiques dans l'ensemble des travaux à réaliser (cf. Pl.3).

Si les sondages ont révélé l'absence de discontinuités qui auraient pu être préoccupantes, dans le sol de fondation (telles que des lentilles sableuses importantes, comme il en existe dans les marnes plaisanciennes en d'autres secteurs de la vallée du Rhône) ils n'ont permis d'avoir des propriétés mécaniques de ces marnes qu'une idée très empirique seulement basée sur l'aspect des carottes ou le pourcentage des carottages. Il y avait donc lieu de procéder - sans outrepasser les compétences du géologue de Génie Civil - à quelques essais géotechniques courants de façon à déterminer les principales caractéristiques mécaniques des marnes. Ces essais ont été effectués au Laboratoire de Mécanique des Sols de l'Institut de Mécanique de Grenoble, grâce à la sollicitude et sous la conduite de Monsieur M. DAYRE. Nous verrons dans les paragraphes qui suivent qu'il ne faut cependant pas accorder aux résultats obtenus un crédit total, mais plutôt considérer ces études comme un exemple et une expérience (2.1.).

Pour compléter les informations ainsi recueillies il s'est avéré profitable de procéder à des analyses radiocristallographiques qui ont été conduites par Monsieur GRANET dans le laboratoire de l'Institut Dolomieu (2.2.), et qui ont apporté des précisions intéressantes.

Enfin, dans un dernier sous-chapitre (2.3.) nous avons cherché à dégager des enseignements apportés par le chantier d'Avignon des conclusions utilisables à Caderousse quant à la mise en œuvre des alluvions récentes (Fz), à divers stades des travaux, notamment en ce qui concerne la réalisation de l'écran d'étanchéité nécessaire à l'ouverture des fouilles.

2.1. - ETUDE GEOTECHNIQUE DES MARNES PLAISANCIENNES

Afin de déterminer les caractéristiques physiques et mécaniques des marnes plaisanciennes, quelques essais ont été effectués sur des échantillons prélevés par carottage dans les sondages 0,62, 0,18 et 0,67.

Il nous faut dès à présent noter que ces essais ont dû être conduits sur des échantillons desséchés et vieillis par un long stockage en carothèque et qu'ils sont en nombre très nettement insuffisant pour permettre la moindre conclusion. Il faudra pour cela attendre une prochaine campagne de sondages mécaniques, effectuer ces essais en grand nombre, et, surtout, disposer d'échantillons frais, maintenus à saturation et prélevés dans les meilleures conditions.

Bien que les carottes destinées à ces essais aient été choisies pour leur bon aspect extérieur et l'absence apparente de fissuration il y a lieu de penser que leur dessiccation quasi-totale et les variations de température et d'hygrométrie qu'elles ont subies, ont eu quelque influence sur la structure interne du matériau. De même, il est très délicat d'estimer les effets produits ultérieurement par la ressaturation (gonflements, retraits, claquages...), bien que cette ressaturation ait été effectuée sous contrôle oedométrique. Ces éventuels remaniements sont à ajouter à ceux inhérents au prélèvement par carottage. Notons à ce propos, qu'il semble préférable - cf. documents C.N.R. - lors de telles campagnes de reconnaissance et dans un tel matériau, de procéder à des sondages par percussion - si l'avancement reste acceptable -, à l'aide d'un carottier de Kjellman par exemple, plutôt que d'utiliser les outils travaillant en rotation, même si les remaniements sont plus homogènes dans ce dernier cas. On utilisera alors le bas des échantillons prélevés à la percussion. Des critères de rentabilité détermineront le choix à faire, en outre, quand au diamètre de ces sondages, sans oublier qu'on aura toujours avantage à fournir au laboratoire de mécanique des sols des échantillons suffisamment volumineux pour supposer que la retaille éliminera les zones les plus désorganisées lors du prélèvement. Ultérieurement, un programme d'essais complémentaires pourra être entrepris sur des échantillons de dimensions plus importantes, prélevés en fond de fouilles, afin de comparer les résultats à ceux déduits des essais effectués sur les carottes de sondage.

Malgré toutes les réserves émises ci-dessus, il nous a paru tout de même instructif de procéder à quelques essais, ne serait-ce qu'à titre indicatif, et de comparer, plus tard, leurs résultats à ceux obtenus sur des échantillons frais.

2.1.1. - Situation des échantillons

Les sondages 0,18 et 0,62 ont été implantés sur le site de l'usine et le sondage 0,67 sur celui du barrage, dans l'île de la Piboulette (cf. Pl. 3).

Le tableau ci-dessous indique leur profondeur et la pression à laquelle ces échantillons étaient soumis :

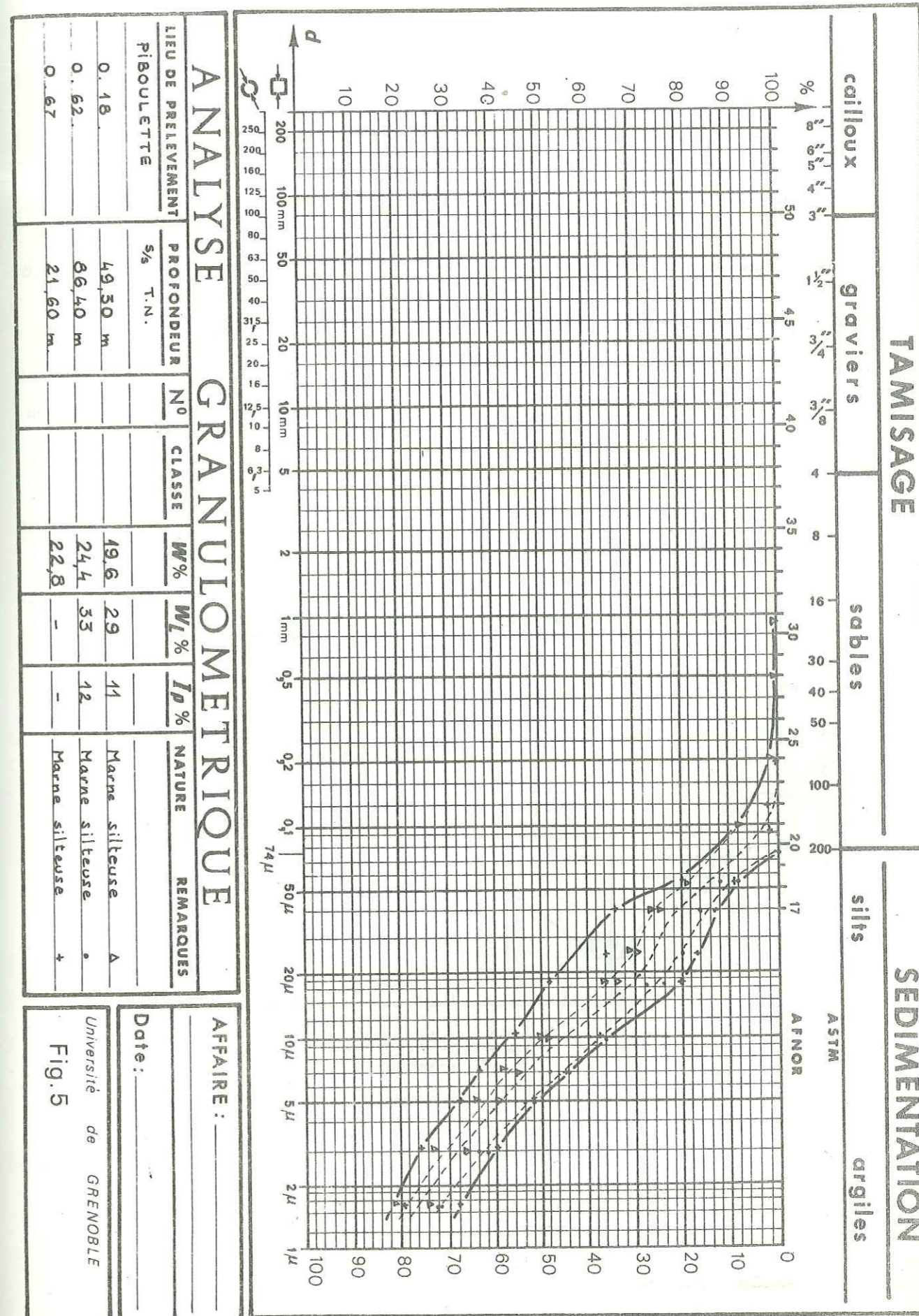
	Profondeur sous T. N.	Profondeur sous toit plais.	en place (bars)
0,18	49,30 m	32,30 m	10
0,62	86,40 m	69,40 m	17,5
0,67	21,60 m	4,00 m	4,3

2.1.2. - Résultats des essais

2.1.2.1. - Essais d'identification

L'état des échantillons examinés n'a évidemment permis aucune mesure sérieuse de la teneur en eau (W) et du poids spécifique (γ) "in situ". Toutes les valeurs énoncées ci-dessous correspondent aux mesures effectuées après ressaturation des échantillons ; (étant données les conditions d'obtention, on ne les considèrera qu'à titre indicatif).

- Les teneurs en eau (à saturation) sont comprises entre 18,9 % et 24,4 %, les plus faibles valeurs correspondant à certaines éprouvettes de cisaillement.
- Les poids spécifiques apparents secs (γ_d), mesurés, sont compris entre 1,62 g/cm³ et 1,66 g/cm³.
- Les poids spécifiques apparents humides (γ_{sat}), calculés à saturation, sont compris entre 2,04 g/cm³
- Les analyses granulométriques effectuées sur les trois échantillons sont rassemblées en un seul graphique (fig. 5) sous forme de fuseau. Les courbes montrent que les composants du matériau se partagent entre les silts et les argiles avec une très faible fraction finement sableuse que l'on a déjà remarquée, localisée pour l'essentiel dans de très minces passées qui soulignent le litage. On constate d'autre part que le sédiment marneux est mal trié :



indice de Trask :

$$s_o = \sqrt{\frac{Q_3}{Q_1}} \neq 4,1$$

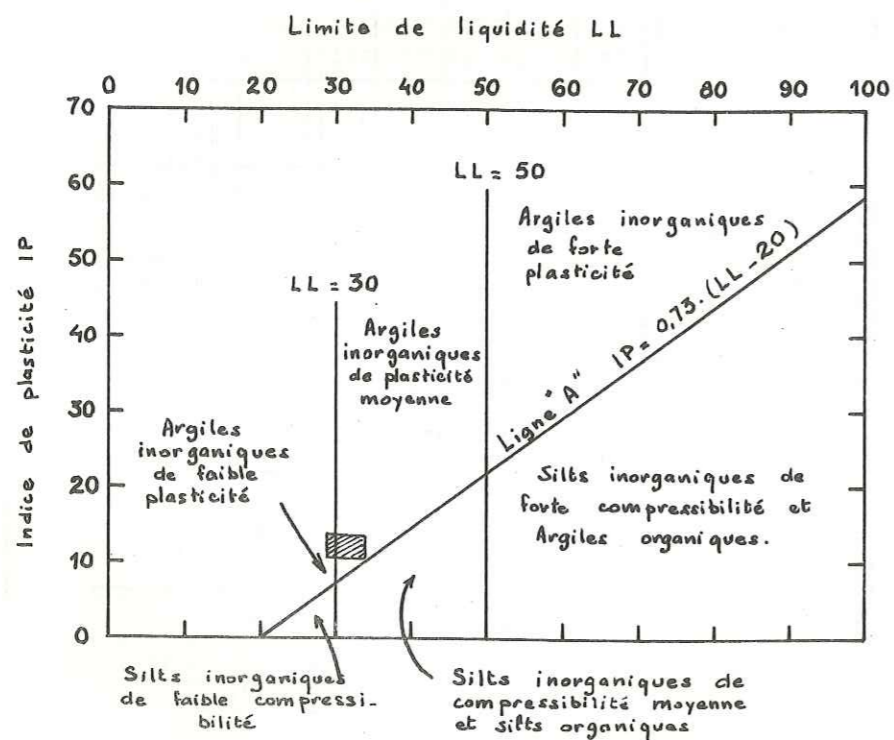
Les valeurs moyennes de C_u et C sont :

$$\text{Coefficient d'uniformité : } C_u = \frac{D_{60}}{D_{20}} \neq 10$$

$$\text{Coefficient de courbure : } C = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \neq 1$$

D'après G. AMBERGER, le D_{20} d'un sédiment permet une prévision satisfaisante de sa perméabilité. Avec un D_{20} moyen de $1,16 \mu$, on a $k = 4 \cdot 10^{-8}$ cm/s.

- Les limites d'Atterberg ont été mesurées sur les échantillons 0,18, 0,62 et 0,25. Les limites de liquidité (LL) sont comprises entre 29 % et 34 %. Les indices de plasticité (IP) entre 11 % et 14 %. Les valeurs moyennes seraient donc : LL = 32 % ; IP = 12,3 %, d'après la classification de Casagrande ces valeurs correspondent à une "argile inorganique de plasticité moyenne".



- Abaque de plasticité - (A. CASAGRANDE)

2.1.2.2. - Essais de stabilité

Deux éprouvettes circulaires, taillées dans chacun des échantillons 0,18 et 0,67 ont été soumises à des essais de cisaillement direct, afin de connaître, en première analyse, leur angle de frottement interne ψ et leur cohésion c .

Chaque disque, de 60 mm de diamètre et de 30 mm d'épaisseur environ, est placé dans une boîte de cisaillement circulaire et soumis à un effort de compression vertical N , normal à la surface, et un effort de traction horizontal F . Pour une surface S les composantes de la contrainte critique seront donc :

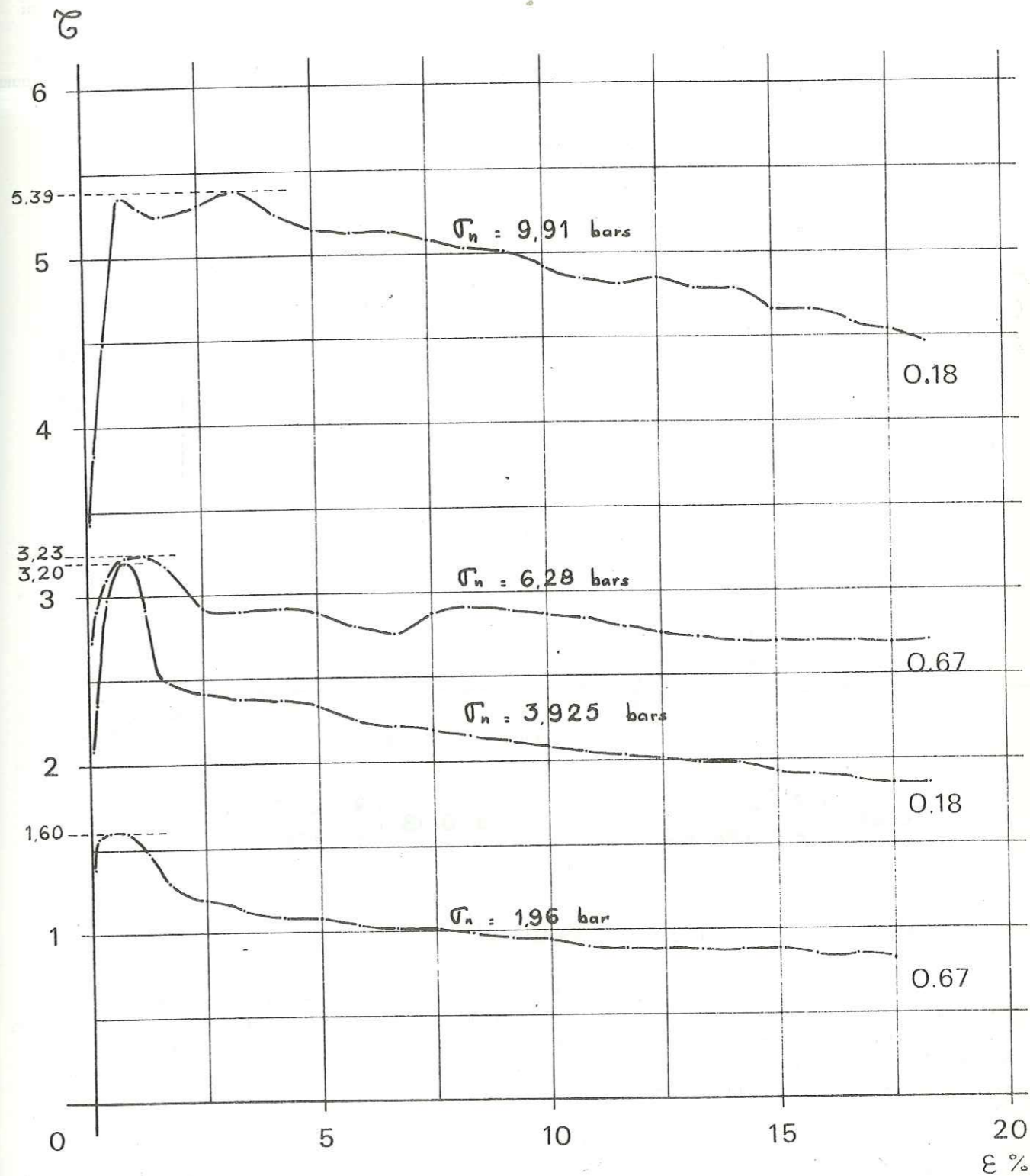


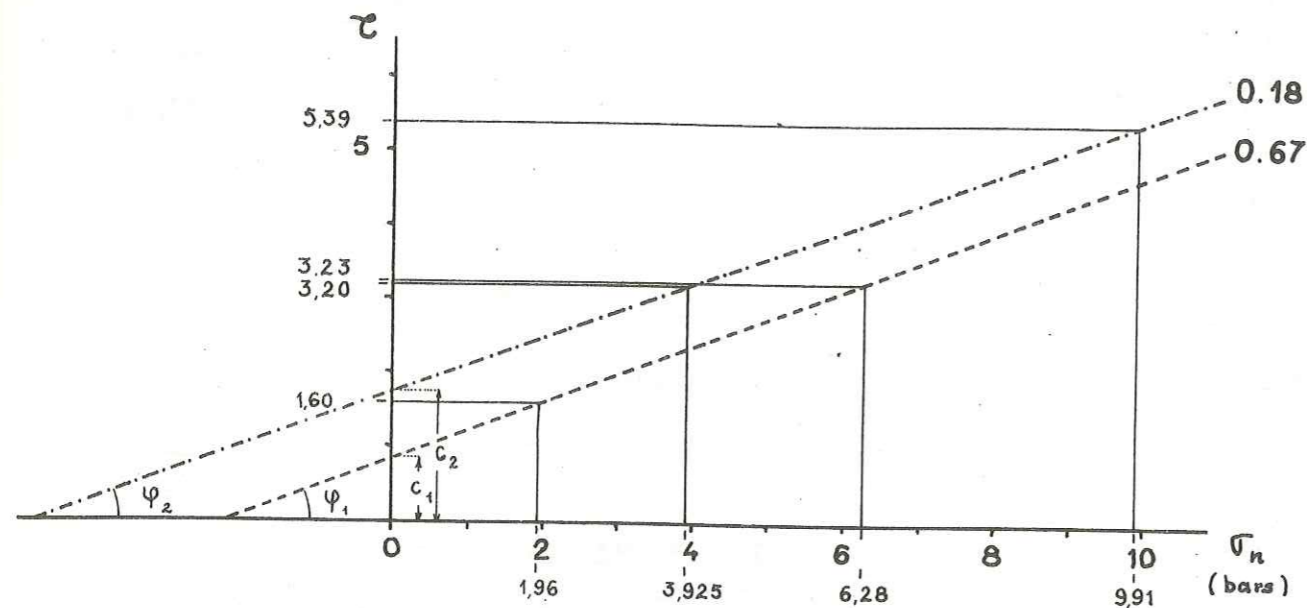
Fig 6 Courbes efforts - déformations

$$\sigma_n = \frac{N}{S} \text{ et } \tau = \frac{F}{S} \text{ avec } F = K.N$$

Pendant les essais, les échantillons ont été maintenus saturés et consolidés sous la pression normale de l'essai σ_n . On a choisi une vitesse de cisaillement faible (0,5 mm/m) en rapport avec la très faible perméabilité du matériau, de façon à réduire l'incidence de la pression interstitielle. Néanmoins, il est certain que les essais ne sont pas vraiment drainés et que les variations de pression interstitielle jouent un rôle non négligeable.

Les résultats des essais de cisaillement direct sont exprimés graphiquement ; la figure 6 représente les courbes contraintes/déformations à vitesse constante et la figure 7 les droites de Coulomb qui en découlent. Les caractéristiques intergranulaires ainsi mesurées sont :

- pour 0.18 : $c_2 = 1,78 \text{ bar}$ et $\psi_2 = 21^\circ$
- pour 0.67 : $c_1 = 0,88 \text{ bar}$ et $\psi_1 = 21^\circ$



- 1. 0.67 $\left\{ \begin{array}{l} \psi = 21^\circ \\ c = 0,88 \text{ bar} \end{array} \right.$
- 2. 0.18 $\left\{ \begin{array}{l} \psi = 21^\circ \\ c = 1,78 \text{ bar} \end{array} \right.$

Fig. 7 Droites de Coulomb

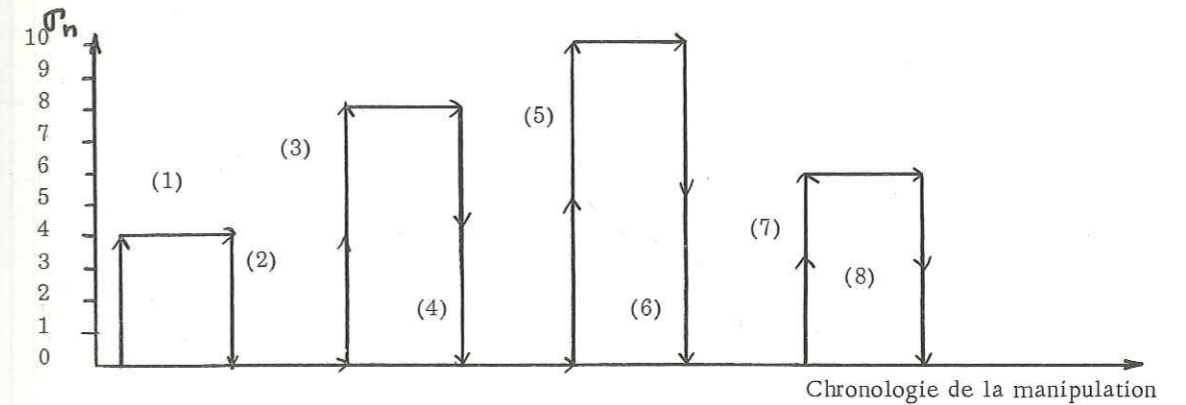
Les droites de Coulomb des deux échantillons 0.18 et 0.67 sont parallèles et ne diffèrent que par une cohésion apparente plus importante pour 0.18. Ceci apparaît également sur les courbes contraintes/déformations. Cette cohésion supérieure peut être attribuée à une préconsolidation de l'échantillon 0.18, prélevé à une profondeur bien supérieure à celle de l'échantillon 0.67. Les effets de cette préconsolidation par la surcharge des terrains sus-jacents ont pu être conservés malgré les décompressions survenues au cours de l'extraction des échantillons par carottage, et de leur stockage.

2.1.2.3. - Essais de compressibilité

Ils ont été réalisés sur l'échantillon 0.62 et effectués à l'œdomètre normalisé (essais dits "normaux"). Dans cet appareil, l'échantillon est maintenu latéralement par un anneau de 70 mm de diamètre intérieur et pris entre deux plaques poreuses. Un réservoir d'eau alimente en permanence les plaques poreuses de façon à empêcher une éventuelle variation du degré de saturation de l'échantillon, qui subirait alors une compression parasite sous l'effet des tensions superficielles du liquide interstitiel. Des comparateurs au 1/100 de mm servent à la mesure des déformations sous l'application de charges normales à la surface de l'éprouvette.

Au préalable, cet échantillon a été saturé sous contrôle œdométrique sous une pression de 4 bars, de façon à le replacer approximativement dans les conditions de pression existant au niveau le plus bas des fouilles projetées. Il a ensuite subi les cycles de chargements/déchargements qu'indique le schéma suivant :

- | | |
|----------------------------|-----------------------------|
| (1) Saturation sous 4 bars | (2) Déchargement 4 bars à 0 |
| (3) Chargement à 8 bars | (4) --- 8 bars à 0 |
| (5) -- 10 bars | (6) --- 10 - 0 |
| (7) -- 6 bars | (8) --- 6 - 0 |



- Diagramme de chargement -

Pour chaque modification de la charge appliquée, on note les variations de hauteur de l'échantillon, au moyen de micromètres, en fonction du temps. On observe une déformation continue qui tend à se stabiliser sous charge constante ; ce phénomène porte le nom de consolidation. Il y a lieu de charger et décharger très progressivement si l'on veut respecter, dans l'expérience, la cadence que le terrain aura à subir lors des travaux.

La courbe œdométrique de la figure 8 représente les déformations successives subies par l'éprouvette en fonction des charges appliquées ; l'échelle des pressions est logarithmique et les ordonnées ne représentent pas les tassements relatifs mais les indices des vides successifs (courbe $e/\log P$). Cependant il n'est pas possible de mesurer les différents indices des vides de l'échantillon pendant l'expérience, il faut donc les calculer à partir de la mesure des tassements. On supposera donc, hypothèse légitime dans le cas des marnes et des argiles, que les grains solides sont incompressibles et que le tassement résulte uniquement d'un arrangement nouveau des grains après départ de l'eau adsorbée.

Le volume des grains, supposé constant, a pour expression :

$$\frac{h}{1 + e}, \text{ par suite, pour chaque déformation on aura :}$$

$$\frac{h}{1 + e} = \frac{h + \Delta h}{1 + e + \Delta e} \text{ soit } \frac{\Delta h}{h} = \frac{\Delta e}{1 + e} \quad (1)$$

ce qui permet le calcul des valeurs successives de l'indice des vides, à condition de connaître sa valeur au début ou à la fin de la manipulation. A titre indicatif, nous avons constaté, pour l'éprouvette 0.62, qu'une déformation de 2,44 % de sa hauteur correspond à une variation de 7,02 % de l'indice des vides.

- Compression : la courbe œdométrique obtenue (fig. 8) se compose de deux portions distinctes : jusqu'à la pression de consolidation (σ_c) elle est pratiquement horizontale puis elle s'infléchit quand les variations de l'indice des vides deviennent proportionnelles aux variations du logarithme de la pression ; autrement dit, les tassements sont alors proportionnels au logarithme des efforts de compression. Le coefficient de proportionnalité, appelé indice de compression est défini par la formule :

$$C_c = - \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma} \quad (2)$$

$$\text{qui peut encore s'écrire : } e_1 = e - C_c \cdot \log \left(1 + \frac{\Delta \sigma}{\sigma} \right) \quad (3)$$

où e et σ caractérisent l'état initial, e_1 représente l'indice des vides après application d'une surcharge $\Delta \sigma$; l'échantillon est alors soumis à une pression : $\sigma_1 = \sigma + \Delta \sigma$

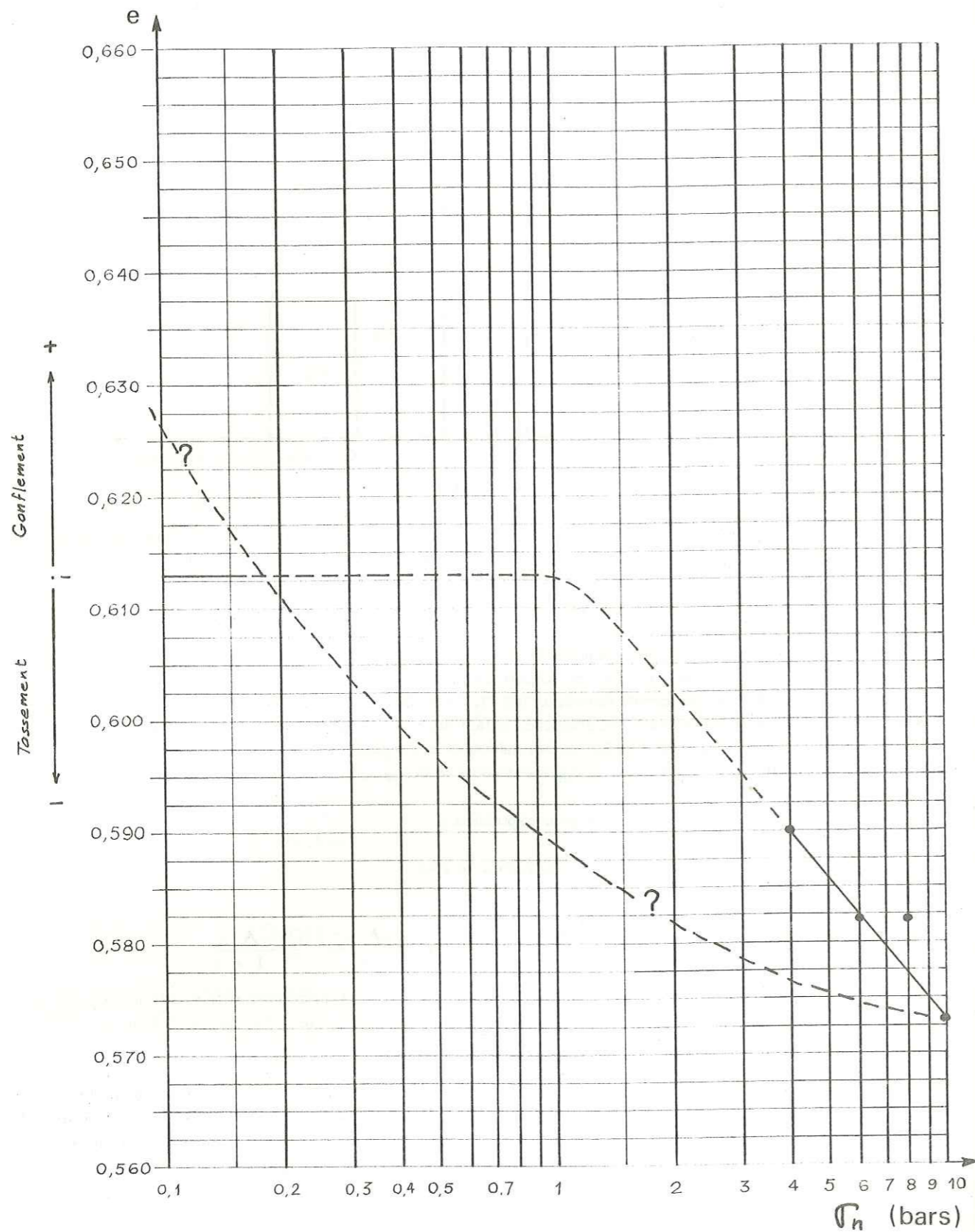


Fig. 8 : Essai de compressibilité

D'après les résultats du graphique (fig. 8), on trouve pour 0,62 :

$$C_c = 0,043 \quad (\text{valeur moyenne calculée entre 4 et 10 bars})$$

Dans le tableau suivant figurent les valeurs C_c pour chaque surcharge appliquée :

	4 à 6 bars	6 à 10 bars	4 à 10 bars
C_c	0,0453	0,0406	0,0427

L'échantillon de hauteur h est en équilibre sous l'action d'une pression σ , on augmente cette pression de $\Delta\sigma$, la hauteur de l'échantillon varie alors de Δh ; par définition, le module œdométrique E' a pour expression :

$$E' = - \frac{\Delta\sigma}{\frac{\Delta h}{h}} \quad \text{soit, d'après (1) et (3) :}$$

$$\frac{\Delta\sigma}{E'} = - \frac{\Delta h}{h} = - \frac{\Delta e}{1+e} = \frac{C_c}{1+e} \cdot \log \left(1 + \frac{\Delta\sigma}{\sigma} \right), \quad \text{soit encore :}$$

$$E' = \frac{1+e}{C_c} \cdot \frac{\Delta\sigma}{\log \left(1 + \frac{\Delta\sigma}{\sigma} \right)} \quad (4)$$

On obtient, avec $C_c = 0,043$: $E' = 703$

- **Gonflement** : en gonflement les courbes œdométriques ne peuvent pas être assimilées à des droites ; C_g (indice de gonflement) dépend de la pression initiale et de la pression finale. Il faudra donc calculer chaque valeur de C_g correspondant à un intervalle de pressions donné.

$$\text{Avec } \Delta e = -C_g \cdot \log \left(1 + \frac{\Delta\sigma}{\sigma} \right) \quad (3')$$

et les résultats du graphique ci-contre on trouve les valeurs suivantes de C_g :

	4 bars à 0	6 bars à 0	8 bars à 0	10 bars à 0
C_g	0,065	0,071	0,079	0,080

On remarquera qu'aucun palier n'a été effectué à la décharge et qu'à chaque fois on est passé de la pression initiale à une pression nulle ; ceci permet de gagner du temps, mais nous empêche, en revanche, d'obtenir la moindre précision quant à l'allure de la courbe œdométrique en gonflement. Nous avons de ce fait utilisé des courbes déjà décrites à propos d'un matériau voisin, pour le dessin de la courbe œdométrique représentée figure 8.

- **Mouvements du sol en fond de fouilles** : la réalisation de la fouille conduit approximativement à une décharge au maximum égale à 4 bars, ce qui nécessite de connaître les indices de gonflement (C_g) correspondant aux décharges de 4 bars à 0,5 bars à 1, de 6 bars à 2, etc. Ces tranches de pressions correspondant elles-mêmes à l'état de contrainte des tranches de terrain superposées. On considère donc l'épaisseur de terrain intéressée comme une pile verticale d'échantillons œdométriques et on additionne les gonflements calculés pour chacun d'entre eux. Cette méthode est simple mais approchée, quoiqu'en rapport avec les approximations faites plus haut, eu égard à l'état et aux caractères propres (hétérogénéité, litage) du matériau.

La connaissance de C_c ou de C_g permet le calcul des déformations d'une couche au temps infini à partir de l'expression :

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{C_c \text{ ou } C_g}{1+e} \cdot \log \left(1 + \frac{\Delta\sigma}{\sigma} \right) \quad (6)$$

avec : Δh = déformation (gonflement ou tassement)

h = épaisseur de la couche compressible intéressée

e et σ correspondant à l'état initial du matériau avant application ou retrait d'une surcharge $\Delta\sigma$; on pourra donc aussi bien prévoir approximativement les gonflements inhérents aux travaux de fouille que les tassements dus à la construction de l'ouvrage.

- Consolidation : dans ce qui précède, on ne s'est pas préoccupé de la variable du temps. Or, le phénomène de tassement est loin d'être instantané ; il y a donc lieu d'étudier la vitesse de tassement, d'une grande importance pratique. On a déjà vu que la perméabilité du matériau joue un grand rôle dans les essais œdométriques, le tassement n'étant possible dans un matériau saturé que si l'eau peut en être expulsée. On étudie donc à l'œdomètre l'évolution du tassement sous charge constante en fonction du temps ; cette évolution est graphiquement représentée en fonction du logarithme du temps (fig. 9).

On discerne sur la courbe représentative de cet essai deux branches sensiblement rectilignes dont les prolongements se coupent en un point A. En tassement, la branche de gauche représente la "consolidation primaire" ; la résistance offerte à l'évacuation de l'eau en excès en est la seule cause. La branche de droite représente la consolidation secondaire", plus lente, qui semble résulter d'un arrangement progressif de la structure du sol, lié aux déformations des couches adsorbantes.

Par définition le point A détermine le tassement primaire. Le tassement définitif sera atteint lorsque la surcharge appliquée sera entièrement supportée par le squelette granulaire, donc égale, dès ce moment là, à la contrainte intergranulaire ; alors qu'à l'instant où la surcharge est appliquée, $\Delta\sigma$ est intégralement reprise par l'eau interstitielle, qui est alors soumise à une surpression : $U = \Delta\sigma$.

Le calcul des déformations au bout d'un temps t fait intervenir le coefficient de consolidation C_v . Il permettra théoriquement de calculer l'évolution en fonction du temps de la déformation qui suit la loi de consolidation de Terzaghi.

$$\text{Ce coefficient a pour expression : } C_v = \frac{k \cdot E'}{\gamma_w}$$

$$\text{soit, avec (4) : } C_v = \frac{k \cdot (1 + e) \cdot \Delta\sigma}{\gamma_w \cdot C_g \cdot \log \left(1 + \frac{\Delta\sigma}{\sigma} \right)} \quad (7)$$

C_v s'exprime en cm^2/s ; k étant la perméabilité du matériau.

On trouve pour C_v , en fonction de k, ces valeurs moyennes approchées :

$$C_v = 445 k \cdot \text{cm}^2/\text{s} \quad \text{au gonflement}$$

$$C_v = 55 k \cdot \text{cm}^2/\text{s} \quad \text{en compression.}$$

Pour les raisons citées en introduction à ce chapitre, nous ne pouvons accorder, aux valeurs numériques indiquées, qu'un crédit limité, en attendant de pouvoir les comparer à celles déduites d'expériences ultérieures. Le cas échéant, il sera alors instructif de connaître la marge d'erreur, due pour l'essentiel aux effets de la resaturation des échantillons examinés ici.

Nous avons voulu décrire une méthode d'étude, utilisable dans le cadre de la géologie appliquée, dont les calculs fourniront des indications relativement précises, en première analyse, quant aux valeurs extrêmes des mouvements probables du substratum. Il ne faut cependant pas en attendre une précision absolue que, seule l'observation directe autorisera.

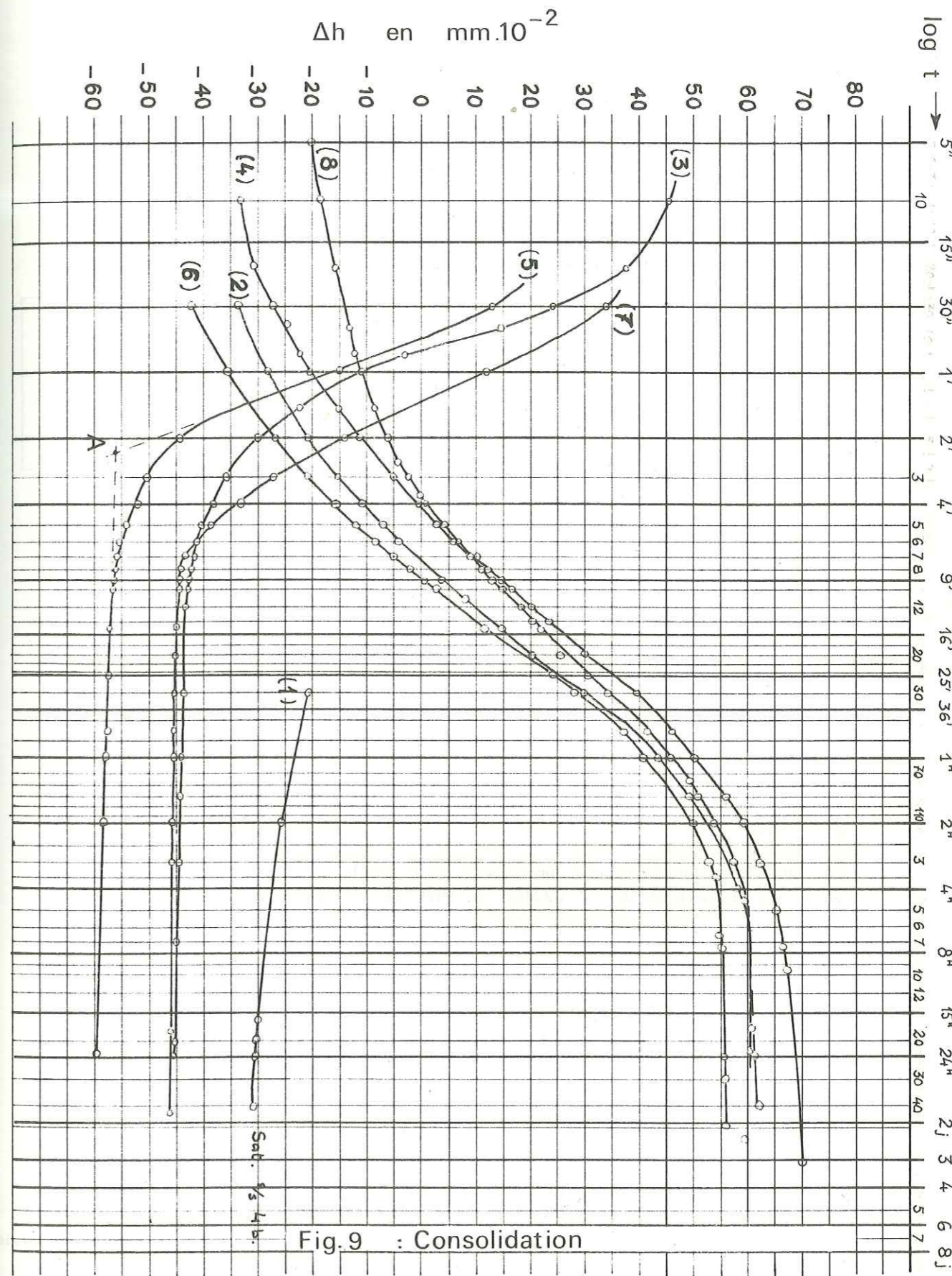


Fig. 9 : Consolidation

2.2. - ETUDE RADIOCRISTALLOGRAPHIQUE DES MARNES PLAISANCIENNES

Les essais géotechniques exposés dans le sous-chapitre précédent ont montré que le module œdométrique au gonflement des marnes plaisanciennes atteint une valeur assez élevée. Cette particularité pouvant être due à la présence d'argiles "gonflantes" il était dès lors très instructif de procéder à quelques analyses radiocristallographiques sur des échantillons prélevés par carottage à l'emplacement des ouvrages projetés.

Le tableau suivant indique la situation de ces échantillons :

Sondage	Site	Profondeur sous toit du substratum	Cote N. G. F.
0,39	Barrage	0,60 m	19,40
0,40		4,50 m	13,40
0,50	Usine	3,80 m	7,70
0,54		3,20 m	10,70

2.2.1. - Méthode d'étude

Les déterminations par radiogramme ont été effectuées sur la fraction argileuse de la roche après élimination, selon des méthodes appropriées, des carbonates, du fer et des sels divers qui peuvent masquer les phénomènes de diffraction par les minéraux argileux. La fraction argileuse fine est séparée par sédimentation et déposée sur des plaquettes de verre pour aboutir à l'élaboration d'un agrégat orienté. Les déterminations sur agrégat orienté ont l'avantage de limiter le nombre des raies puisque seules apparaissent les réflexions des plans réticulaires (001).

Les essais sont réalisés de trois manières successives :

- l'échantillon est soumis au rayonnement X à l'état "naturel", sans autre traitement préalable que ceux exposés ci-dessus ;
- exposition au rayonnement X après traitement au glycérol ;
- la première préparation est reprise et exposée au rayonnement X après traitement par la chaleur (490° C pendant 4 heures).

Les mesures faites sur les trois diagrammes obtenus permettent, dans la plupart des cas, de faire des déterminations d'une grande probabilité (J. LUCAS ; T. CAMEZ ; G. MILLOT).

2.2.2. - Etude des diagrammes

Les séries de trois diagrammes obtenus pour chacun des échantillons, sont très comparables entre elles. Les diagrammes relatifs à chaque étape de l'expérimentation sont pratiquement les mêmes pour les quatre échantillons. Nous ne décrivons par conséquent qu'une seule analyse : celle de l'échantillon 0.39 (fig. 10).

2.2.2.1. - Illite

Facile à déterminer elle se caractérise par la production de pics aigus et de forte amplitude à 9,99 Å ; 4,98 Å et 3,33 Å.

2.2.2.2. - Chlorite (et kaolinite)

Il n'est pas possible de distinguer les kaolinites des chlorites sur le seul aspect des radiogrammes. La kaolinite est, en effet, entièrement masquée par la chlorite puisque les raies de la première sont exactement superposées aux raies d'ordre pair de la seconde (7,08 Å et 3,52 Å). La chlorite seule se signale par des pics assez bien marqués à 14,02 Å, 4,71 Å et 2,83 Å (ordres impairs).

Le traitement par la chaleur, faisant disparaître les raies d'ordre pair des chlorites en même temps que toutes les raies de la kaolinite, n'est d'aucune utilité (fig. 10, diagramme 3).

- ① Sans traitement préalable
- ② Après traitement au glycérol
- ③ " " par la chaleur

PLAISANCIEN
0.39

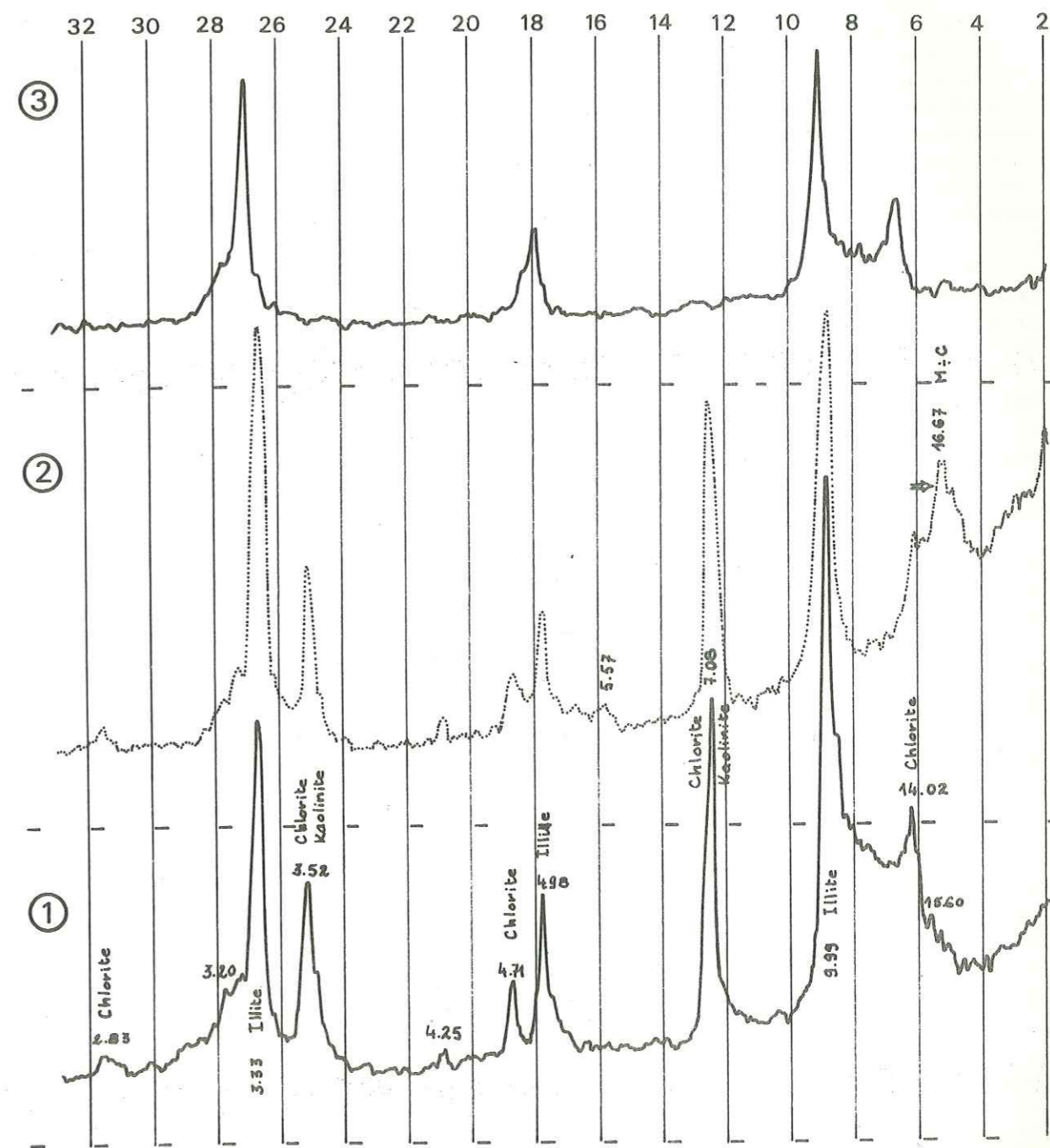


Fig 10 Diagramme de diffraction des rayons X

Sur cette figure sont représentés les 3 diagrammes de diffraction des rayons X correspondant aux 3 étapes (1, 2, 3) indiquées. Le diagramme n° 2 montre le déplacement du pic Montmorillonite-Chlorite vers 16,67 Å après traitement au glycérol. Sur le diagramme n° 3 on constate la disparition des raies d'ordre pair de la chlorite par effet de la chaleur.

2.2.2.3. - Montmorillonite

Le déplacement des pics autour de la raie à 14,02 Å de la chlorite, sous l'influence du traitement au glycérol (fig. 10, diagrammes 1 et 2) dénote bien la présence d'une montmorillonite ; toutefois, l'évolution des pics de 15,60 Å à 16,67 Å n'est pas celle de la montmorillonite pure qui devrait donner : 14-15 Å à 17,7 Å.

Les montmorillonites présentes sont donc interstratifiées avec un autre minéral argileux : la chlorite.

Au glycérol, le gonflement partiel de l'édifice produit une raie à 16,67 Å, par effet de pointe entre la raie théorique à 17,7 Å de la montmorillonite glycérolée et la raie à 14,02 Å de la chlorite.

Cet interstratifié montmorillonite-chlorite (M-C) semble être plus riche en montmorillonite qu'en chlorite du fait du décalage vers le pic de la montmorillonite glycérolée de 17,7 Å. La raie obtenue par effet de pointe ne représente plus les distances réelles entre les plans réticulaires de l'édifice interstratifié, mais le jeu des interférences entre les rayons réfractés par les plans (001) de la montmorillonite et de la chlorite. Un mélange à 50 % de chaque constituant, même si leur répartition géométrique est hétérogène, devrait donc donner un effet de pointe à mi-chemin entre les raies caractéristiques de la chlorite et de la montmorillonite après glycérolage. Selon cette hypothèse, l'interstratifié serait donc approximativement constitué de 70 % de montmorillonite pour 30 % de chlorite.

2.2.3. - Conclusions

De l'étude qui précède il ressort donc que les marnes plaisanciennes contiennent des "argiles gonflantes" de la famille des montmorillonites. Mais si l'on a pu évaluer approximativement les pourcentages respectifs de montmorillonite et de chlorite dans les systèmes argileux interstratifiés il est, par contre, impossible de déterminer les quantités relatives exactes de chaque constituant de la fraction argileuse, et encore moins de la roche totale.

L'examen des diagrammes permet seulement, du point de vue quantitatif, de conclure à la prédominance des illites dans la fraction argileuse.

Une étude effectuée sur la roche totale a montré, par ailleurs, que le quartz, la calcite et la muscovite sont abondants ; les lavages ont en outre montré que les minéraux argileux constituent à peu près les trois quarts de la roche.

Lorsqu'elles sont présentes en quantité notable, les montmorillonites posent des problèmes de stabilité, au moment de l'excavation des fouilles d'une part, et pendant la construction des ouvrages d'autre part. Saturées d'eau à l'état naturel, leur dessiccation au cours des fouilles peut s'accompagner de phénomènes de rétractation, et inversement, elles peuvent gonfler sans toutefois devenir plastiques lors de leur ressaturation.

Cependant les montmorillonites présentes dans les marnes plaisanciennes ne paraissent pas être en quantité suffisante pour que les modifications de leur teneur en eau intrafoliaire puissent avoir des conséquences préoccupantes dans la conduite du chantier.

En tout état de cause l'étude mécanique (2.1) tient compte de ces difficultés éventuelles inhérentes à la composition minéralogique des marnes plaisanciennes.

2.3. - OUVRABILITE DES ALLUVIONS RECENTES (Fz)

Une grande partie des travaux sera effectuée dans les alluvions récentes (rescindement des berges, dragages, terrassements des canaux, ouverture des fouilles...) et, si pour la plupart d'entre eux aucune difficulté majeure n'est à craindre il n'en va pas de même en ce qui concerne la réalisation des parois étanches qui doivent permettre d'effectuer à sec l'excavation des fouilles.

2.3.1. - Les parois minces verticales

Les sites de l'usine-écluse et du barrage doivent être, en effet, parfaitement isolés des eaux de la nappe par une paroi complète et étanche, édifée sur toute la hauteur des alluvions. En un premier stade la nappe sera rabattue localement par pompage de sorte que les engins de terrassement puissent atteindre le toit des graviers à sec, et prélever le volume de matériau nécessaire à la construction d'une plate-forme sur laquelle se déplaceront ensuite, sur rails, les engins qui doivent réaliser la paroi. Une fois la paroi terminée les faibles débits qui peuvent éventuellement la traverser seront collectés, pompés dans un puisard situé dans un point bas de la fouille et évacués.

Cette paroi étanche peut être construite de deux façons différentes : sous forme d'une "paroi mince verticale" (P.M.V.), ou d'une paroi épaisse réalisée au "kelly". La première solution offre le double avantage d'être à la fois plus rapide et moins onéreuse, mais en revanche elle est d'une réalisation délicate et ne peut être envisagée que dans certaines conditions malheureusement mal définies.

Le principe de fabrication en est simple : un profilé au bas duquel est aménagé un système d'injection, est enfoncé verticalement dans le sol par vibro-fonçage, puis retiré en même temps qu'est envoyé sous pression le coulis d'injection. La même opération est recommencée un peu plus loin de sorte que deux postes consécutifs se recouvrent suffisamment pour éviter que subsistent des trous dans le voile, et ainsi de suite jusqu'à la réalisation complète de la paroi. Cette paroi ne joue aucun rôle de soutien et restera protégée par un talus après excavation des fouilles.

Ayant eu l'occasion, pendant les travaux de l'aménagement d'Avignon, d'assister à la réalisation de trois parois étanches, nous avons essayé d'en tirer quelques enseignements applicables à l'aménagement de Caderousse.

La réalisation d'une paroi mince verticale (P.M.V.) dépend étroitement d'un grand nombre de paramètres qui sont encore mal définis et difficilement mesurables pour la plupart. On peut distinguer ceux qui sont inhérents au fonctionnement de la machine (fréquence et amplitude des vibrations, section du profilé, forme du sabot, viscosité des coulis utilisés...) et ceux que l'on peut mesurer avec une plus ou moins grande exactitude avec l'aide de la géotechnique (résistance dynamique apparente à l'enfoncement des pénétromètres, caractéristiques granulométriques, coefficient de tassement, cohésion, angle de frottement...).

La première série de ces paramètres est le fait de la technologie, de la mécanique, et l'ingénieur de chantier s'efforcera de les cerner, de les évaluer, le plus souvent par expérimentations successives.

Les facteurs principaux semblent être l'amplitude et la fréquence des vibrations. Notons, à ce sujet, une remarque de A. CAQUOT :

"L'efficacité de l'appareil dépend de l'amplitude et de la fréquence des vibrations que transmet au sol la partie déjà enterrée du profilé. L'amplitude dépend essentiellement de la composante verticale de la force centrifuge appliquée, du poids de l'appareil et de la section de la pièce à enfoncer : tant que l'amplitude n'a pas dépassé un seuil, il n'y a pas d'enfoncement ; au-delà, la vitesse d'enfoncement croît linéairement avec l'amplitude, toutes choses égales par ailleurs. La fréquence agit d'une façon plus complexe. Pour des éléments à enfoncer dans un sol qui leur oppose principalement une réaction latérale la vitesse d'enfoncement croît comme une puissance intermédiaire entre 1 et 2 de la fréquence, d'où l'emploi de vibrateurs à haute fréquence".

Dans la seconde série le seul mode d'investigation dont on dispose généralement et auquel on se fie est l'essai de pénétration dynamique (P.D.S.) ou de pénétration statistique (P.S.)

Bien que dans les deux cas on tape sur une "tige" afin de l'enfoncer dans le sol, l'expérience montre qu'on ne peut, des données du pénétromètre, tirer a priori de conclusions directes quant à la rentabilité de la P.M.V.. En effet on a pu constater à la lumière de différentes expériences que la P.M.V. n'est utilisable que dans des conditions très délimitées, dans un terrain strictement à sa convenance, et ce sont ces limites qu'il serait fort intéressant de définir. Dans ce but, nous nous sommes efforcés d'utiliser toutes les indications que le chantier de Sauveterre (aménagement d'Avignon) nous a fourni et de comparer graphiquement les essais P.D.S. préalablement effectués sur le tracé de la P.M.V. avant sa réalisation, et les diagrammes de fonçage des profilés correspondants. Afin de donner une valeur statistique à la délimitation du domaine dans lequel le rendement moyen de la P.M.V. est acceptable il est nécessaire de disposer d'un grand nombre de données.

D'autre part il semble que la granulométrie des alluvions traversées influe non seulement sur la résistance dynamique apparente au P.D.S. mais encore sur des phénomènes secondaires propres au fonçage des profilés, tels que : tassements provoqués par des poinçonnages successifs, modification de l'indice des vides, lavages et entraînement des éléments fins par le coulis d'injection.

Les analyses granulométriques effectuées sur le site de la Piboulette montrant de grandes similitudes avec celles des alluvions récentes des divers sites d'Avignon il nous paraît légitime d'élargir les observations qui suivent à ce que pourront donner les graviers de la Piboulette, à condition que les méthodes et le matériel utilisés soient les mêmes.

2.3.1.1. - Courbes comparatives P.M.V. - P.D.S.

Ces courbes ont été construites sur quadrillé semi-logarithmique ; les profondeurs sont portées en abscisse et le facteur temps en ordonnée (fig. 11)

Ne pouvant connaître avec exactitude la résistance offerte par le terrain à l'enfoncement des profilés, la seule variable utilisable dans la comparaison recherchée est donc le temps. Toutefois, si les temps ont pu être mesurés pendant le fonçage des profilés, le même procédé ne pouvait être utilisé en ce qui concerne les pénétromètres, aussi avons-nous choisi comme représentant du facteur "temps" le nombre de coups de mouton (ce qui revient, en fait, à utiliser les valeurs de la résistance dynamique apparente pour un enfoncement donné). Nombre de coups de mouton, et temps (s) sont cumulés.

Cette façon d'opérer est évidemment très fastidieuse car elle oblige à reprendre toutes les notes des expérimentateurs et à ramener, lorsque cela est nécessaire, à un seul et même poids de mouton les avancements obtenus avec des moutons de poids différents. A cet effet, nous avons construit un abaque empirique qui traduit en "30 kg" l'avancement obtenu avec des moutons de 60 à 90 kg.

Toutes ces manipulations sont malgré tout nécessaires pour mettre en évidence l'analogie qui existe entre le fonçage des profilés et les essais de pénétration dynamique, et tenter d'en dégager un coefficient de proportionnalité.

L'emplacement et les temps d'enfoncement des profilés ont été soigneusement relevés sur les différents chantiers au cours de l'exécution des P.M.V. Nous avons donc pu comparer avec exactitude profilés et P.D.S. correspondants (50 couples environ sur l'aménagement d'Avignon).

On constate que les courbes ainsi obtenues ont une allure comparable (fig. 11), et il semble donc a priori possible d'en dégager un coefficient de proportionnalité dont il s'agit ensuite d'étudier les variations en fonction de divers paramètres tels que la résistance dynamique apparente au P.D.S., la profondeur ou la granulométrie. Toutes ces comparaisons resteront empiriques et constituent la seule méthode d'approche de ce problème, utilisée dans le cadre de ce travail.

2.3.1.2. - Influence de la granulométrie

Elle existe certainement mais est impossible à évaluer, pour deux raisons principales : d'une part les observations et comparaisons que nous avons pu faire à partir des analyses granulométriques effectuées, dans certains cas, à proximité immédiate des fouilles et à des profondeurs différentes, ont fait ressortir le décalage qui existe fréquemment entre les variations de la résistance dynamique apparente au pénétromètre et celles de la granulométrie. Pour des caractéristiques granulométriques (coefficient de courbure, d'uniformité, D.60, D.30, etc.) qui varient peu on observe en effet des variations très importantes des résistances mesurées au P.D.S. De plus le sens des variations est parfois contraire dans l'un et l'autre cas.

D'autre part, pour que de telles comparaisons soient valables il faudrait effectuer des analyses granulométriques mètre par mètre à l'emplacement précis de chaque essai de pénétration dynamique.

De toute manière l'indice des vides et la façon dont sont arrangés les "grains" dans les alluvions, ont très probablement une plus grande influence que la granulométrie elle-même. Malheureusement il apparaît très délicat de procéder à de telles mesures "in situ", et en tout état de cause une semblable étude ne saurait trouver sa place dans le cadre des études nécessaires à l'aménagement.

2.3.1.3. - Influence de la profondeur

On remarque, au vu des courbes comparatives P.M.V. - P.D.S., dont la figure 11 est un exemple, que le rapport du nombre de coups de mouton (P.D.S.) aux temps (P.M.V.) diminue avec la profondeur. Ce qui signifie que la résistance à l'enfoncement augmente beaucoup plus vite avec la profondeur dans le cas du fonçage des profilés que pour les essais P.D.S. La rentabilité de la P.M.V. sera donc considérablement réduite à partir de profondeurs comprises entre 20 et 25 m, selon les renseignements des courbes examinées. Notons toutefois que le toit du substratum, sur les sites de la Piboulette, se trouve à des cotes bien supérieures à ces profondeurs.

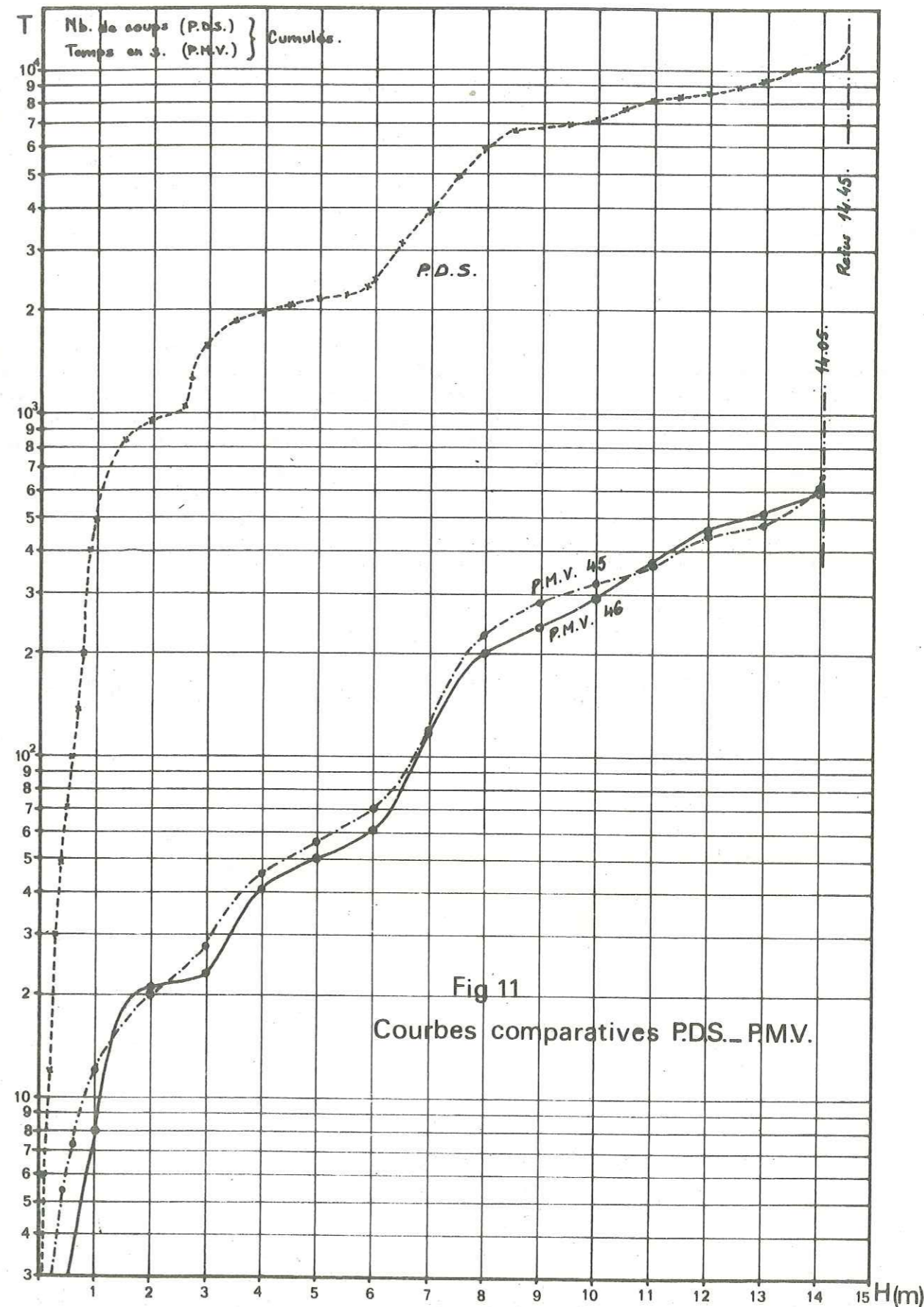


Fig 11
Courbes comparatives P.D.S. - P.M.V.

Evolution parallèle des courbes de pénétration dynamique (PDS) et des diagrammes de fonçage des profilés (PMV). La connaissance des facteurs, qui interviennent donc de la même façon dans les deux cas, doit permettre de prévoir la rentabilité de la PMV.

2.3.1.4. - Conclusions

D'autres essais de corrélation, par les procédures de corrélation multiple, ont été tenté mais aucun n'a apporté de solution acceptable. La réalisation d'une P.M.V. apparaît donc effectivement subordonnée à un grand nombre de facteurs qu'il est difficile non seulement d'évaluer mais encore de déterminer.

Nous nous en tiendrons donc, en conséquence, à l'expérience acquise sur les chantiers précédents et aux courbes réalisées d'après les données expérimentales. On pourra ainsi, par simple comparaison graphique, entre les essais de pénétration dynamique de l'un et de l'autre site, prévoir très approximativement l'efficacité de la technique P.M.V.

2.3.2. - Rescindements et dragages

Les sondages mécaniques, battages de piézomètres, tarières et observations sur le terrain ont apporté suffisamment de renseignements sur les formations alluviales pour qu'on puisse avoir la quasi-certitude que les divers travaux à y effectuer ne rencontreront aucune difficulté particulière (cf. Pl. 4 et Pl. 5) Aucune formation de poudingues, par exemple, n'a été mise en évidence sur le tracé des canaux ou dans le lit du fleuve. Seuls les limons pourront entraver quelque peu la circulation normale des engins de terrassement en période de hautes et moyennes eaux de la nappe.

CHAPITRE 3 - ETUDE HYDROGEOLOGIQUE

Le Rhône et la nappe alluviale sont les principales ressources naturelles de la plaine d'Orange. La grande fertilité des limons de débordement déposés par le fleuve sur toute l'étendue de la plaine et la présence, à faible profondeur, de la nappe phréatique ont largement contribué au développement de l'agriculture locale, et demeurent un facteur déterminant de l'économie de ce secteur du couloir rhodanien.

La mise en service de l'aménagement risque d'entraîner des modifications dans la tenue de cette nappe. Pour éviter, et éventuellement corriger toute variation de la nappe par rapport à son niveau moyen actuel, dommageable pour les cultures, ou encore améliorer certaines conditions naturelles il était essentiel de définir les caractéristiques de la nappe phréatique dans leur état actuel.

Deux études complémentaires, dynamique et géochimique ont donc eu pour but de connaître - à des périodes différentes choisies par référence au niveau de base que constitue le Rhône - les caractéristiques de l'alimentation et de l'écoulement de la nappe.

Les études sont précédées, dans le présent chapitre, par des remarques préliminaires relatives aux données géographiques et géologiques qui interviennent à des degrés divers dans le comportement général de la nappe.

3.1. - DONNEES GEOGRAPHIQUES

3.1.1. - Limites de la plaine alluviale

Sous le terme de "plaine alluviale" sont rassemblées, sans distinction d'âge, toutes les formations alluvionnaires aquifères qui s'étendent de Mondragon à Roquemaure, sans faire la part relative qui revient au Rhône et à ses affluents locaux dans son édification.

L'examen des photographies aériennes et les levés de terrain ont permis d'en fixer les limites. Dans certains cas particuliers elles ont été précisées par l'étude des formations quaternaires du substratum (limite en rive droite entre l'Estagnol et Saint-Géniès-de-Comolas).

D'une superficie totale approximative de 130 km², la plaine alluviale d'Orange s'allonge sur 24 km entre Mondragon et Roquemaure, suivant un axe N-S et atteint 9 km dans sa plus grande largeur, à la latitude d'Orange.

Notablement étendue au Nord de Mondragon entre Pierrelate Bollène et Pont-Saint-Esprit, la vallée du Rhône se resserre à la latitude de Mondragon pour ne plus avoir que 2,2 km de largeur au niveau de Mornas, entre la bordure occidentale du massif d'Uchaux et les collines de Saint-Etienne-des-Sorts. Dans sa partie médiane elle s'ouvre à l'Ouest vers la vallée de la Cèze et plus largement à l'Est sur la plaine de l'Aygues. Enfin, en descendant vers le Sud la plaine alluviale se referme progressivement et le Rhône ne franchit le verrou calcaire de Roquemaure que par un sillon de 800 m de large environ.

Si dans sa moitié nord la plaine est limitée par les reliefs crétacés relativement accusés de Marcoule, Saint-Etienne-des-Sorts en rive droite, et des falaises de Mondragon et de Mornas en rive gauche, dans sa partie méridionale ses frontières sont moins nettes sauf en ce qui concerne les massifs barrémiens de Roquemaure et du Lampourdier. En effet ses limites sont alors marquées uniquement par la remontée du substratum qui émerge en de molles ondulations ou se maintient à faible profondeur (Saint-Géniès-de-Comolas, quartier du Grès).

Ces limites sont soulignées par des hachures sur l'ensemble des cartes se rapportant aux études hydrogéologiques (Pl. 6 à 11).

Dans son ensemble la surface de la plaine alluviale reste plane et très faiblement pentue à la fois vers le Sud (0,5 ‰), et vers le Rhône, passant de 37 m à 25 m d'altitude. Elle marque une légère remontée en direction de la plaine de l'Aygues.

3.1.2. Climatologie

Bien que les conditions climatiques observables dans cette portion de la vallée du Rhône ne puissent seules déterminer le régime du fleuve et de la nappe alluviale il est certain qu'il n'en va pas ainsi pour les affluents et la part éventuelle des précipitations sur les versants.

Ne disposant que des renseignements fournis par la station météorologique de la base aérienne d'Orange-Caritat nous admettons leur validité pour l'ensemble de la région étudiée. Ils sont rassemblés dans le tableau III.

Le climat qui règne sur la plaine d'Orange est du type méditerranéen, avec de nombreuses heures d'insolation, des pluies peu fréquentes, mais relativement abondantes, et pour l'année considérée un nombre de jours de Mistral nettement supérieur au tiers de l'année.

3.1.2.1. - Calcul de l'évapotranspiration

Malgré l'absence de données lysimétriques, il est possible de déterminer approximativement la valeur de l'évapotranspiration, par l'application de diverses méthodes de calcul. Les formules proposées sont toutes empiriques et les résultats obtenus, d'une façon ou d'une autre, ne peuvent être considérés qu'à titre indicatif. En ce qui concerne la plaine d'Orange, comme dans le cas de toute région intensément cultivée, il paraît en effet très difficile de pouvoir tenir compte de paramètres tels que la nature du couvert végétal ou l'influence des irrigations. En outre, les calculs effectués d'après des valeurs moyennes ou globales des températures et des précipitations ne permettent pas de tenir compte de l'intensité des averses ou de l'influence - certainement considérable dans notre région - des vents et de la durée de l'ensoleillement.

On peut néanmoins retenir la méthode de calcul proposée par L. TURC, qui donne la valeur de l'évapotranspiration potentielle en fonction de la pluviosité et de la température moyenne du lieu :

$$E_r = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

avec : $L = 300 + 25 T + 0,05 T^3$
 où P = précipitations totales annuelles en mm par an
 T = température moyenne annuelle en °C
 L = pouvoir évaporant de l'air

Avec les données rassemblées dans le tableau III on trouve : $E_r = 480$ mm/an, soit 76 % de la hauteur totale des précipitations en 1969. Cette valeur de 480 mm/an est à rapprocher de la valeur calculée dans la région de Vallabrègues par J.L. ARNAUD (520 mm/an) et paraît être légèrement inférieure à la valeur réelle de l'évapotranspiration.

T ABLEAU III

CLIMATOLOGIE (station Orange-Caritat - 1969)

	Température moyenne (°C)	Hygrométrie (%)	Evaporation (m/24 h)	Nombre de jours de pluie	Hauteur d'eau (mm)	Insolation ² (cal./cm ²)	Jours de Mistral
Janvier	6,2	77,0	--	7	53,0	148,3	14
Février	4,7	67,6	--	4	47,5	179,8	12
Mars	9,5	74,3	--	13	71,3	160,2	12
Avril	12,2	67,7	86,7	9	21,5	228,3	17
Mai	16,3	66,4	105,5	5	66,3	270,1	12
Juin	18,0	68,0	100,3	7	78,5	284,3	16
Juillet	22,6	65,7	137,5	5	29,6	--	19
Août	21,8	66,3	123,9	8	31,7	294,7	3
Septembre	18,9	74,9	71,1	12	96,9	214,1	7
Octobre	15,3	71,8	65,0	5	53,2	207,4	14
Novembre	9,1	75,4	--	9	53,4	155,8	15
Décembre	1,8	71,6	--	8	22,1	148,1	22

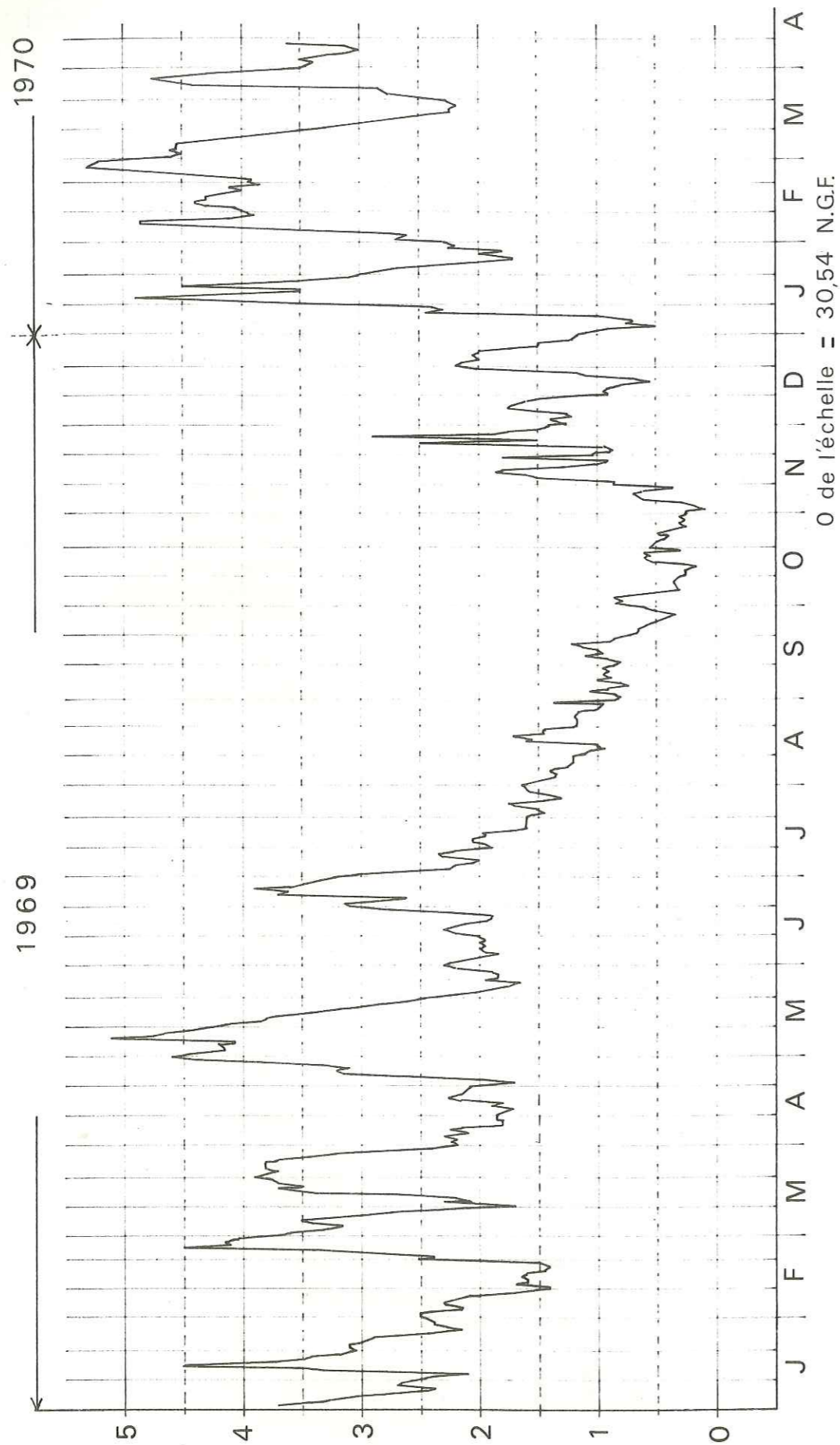


Fig 12 : Le Rhône à St Etienne-des-Sorts en 1969 et début 1970

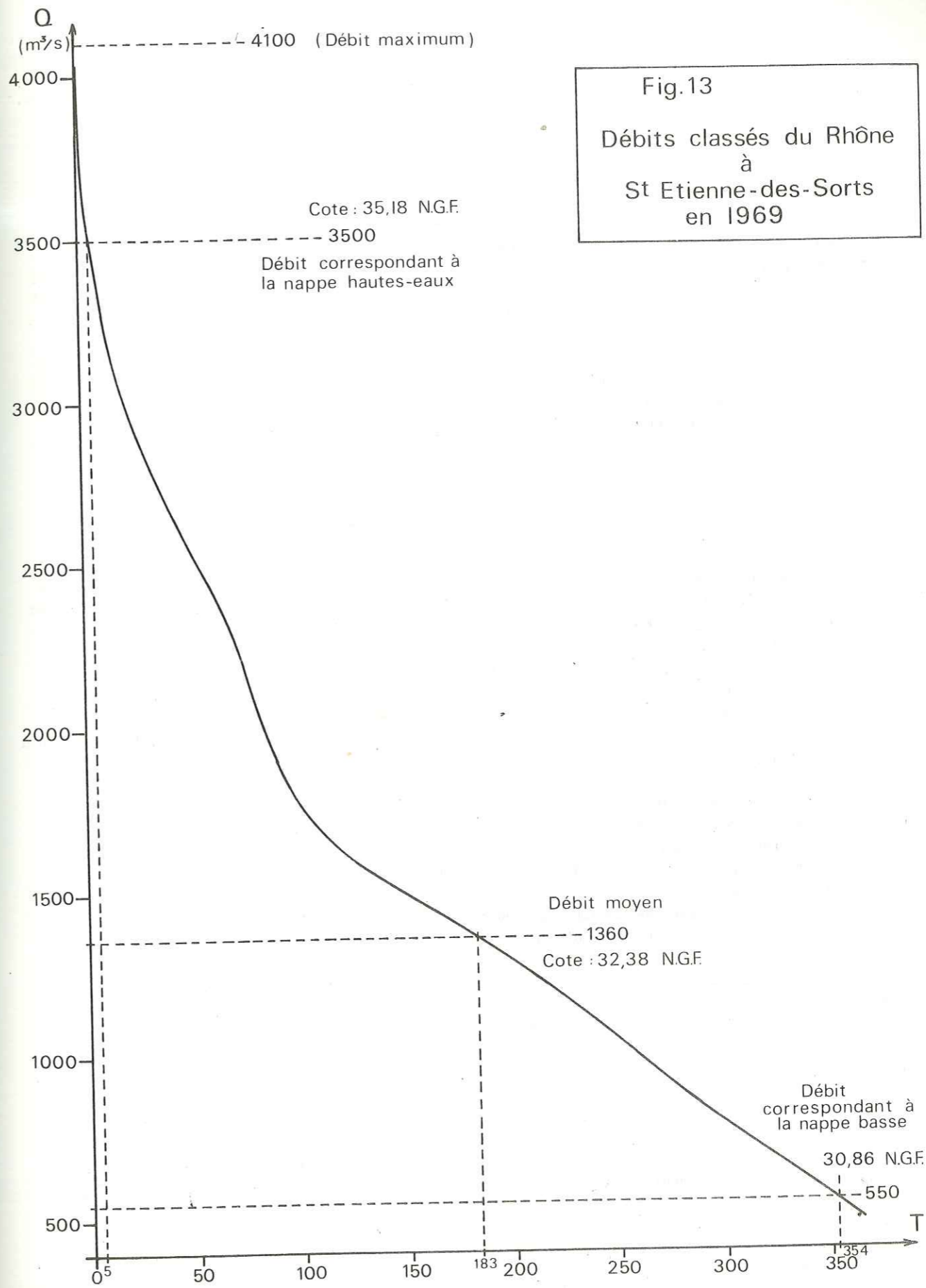


Fig.13
Débits classés du Rhône
à
St Etienne-des-Sorts
en 1969

3.1.3. - Hydrologie

Le Rhône décrit un cours très sinueux depuis Pont-Saint-Esprit jusqu'à Roquemaure, excepté sur la distance qui sépare Saint-Etienne-des-Sorts de Marcoule où il longe le massif crétacé, dont la bordure est pratiquement rectiligne. Il reçoit successivement les eaux du canal de fuite de Donzère-Mondragon, de l'Aygues et de la Meyne en rive gauche, et celle de la Cèze en rive droite. Il a, au cours de son histoire, divagué sur toute la largeur de la vallée, comme en témoignent de nombreux bras morts et îles, qui isolent maintenant plusieurs fles.

3.1.3.1. - Le Rhône (fig. 12 et 13)

A Saint-Etienne-des-Sorts le fleuve charrie les eaux recueillies sur un bassin versant estimé à 74 000 km², à Roquemaure la surface drainée s'est accrue de 2 590 km² par l'adjonction de ses affluents.

Les débits caractéristiques à la station de Saint-Etienne-des-Sorts résultant de l'application d'une méthode statistique à des observations de longue durée sont les suivants :

- étiage conventionnel (débit dépassé en moyenne 355 jours par an) 530 m³/s
- débit dépassé 9 mois par an 910 m³/s
- débit semi-permanent 1 300 m³/s
- débit moyen annuel 1 530 m³/s
- débit dépassé 3 mois par an 1 900 m³/s
- débit dépassé 10 jours par an 3 800 m³/s
- crue décennale 7 200 m³/s
- crue centennale 10 000 m³/s
- crue millénaire 12 500 m³/s

Dans la région considérée, le régime du Rhône se caractérise en général par des hautes eaux de printemps dues à la fonte des neiges et à quelques pluies sur le Jura et le bassin de la Saône. Ces hautes eaux sont suivies d'un étiage d'été qui se prolonge généralement jusqu'en septembre et octobre ; durant ces deux derniers mois, la fonte des neiges est ralentie et la sécheresse peut persister dans les bassins inférieurs, de sorte que les étiages d'octobre sont parfois les plus sévères (1969). En novembre, décembre et quelquefois janvier, les pluies océaniques provoquent souvent des crues (exemple novembre 1951, janvier 1955). Enfin les mois de février à avril sont parfois des périodes de basses eaux. Ces indications ne sont que des tendances générales ; des crues importantes peuvent très bien survenir à n'importe quel moment de l'année, notamment sous l'effet des affluents de rive droite. Les crues peuvent alors commencer par des montées très rapides.

Pour les débits supérieurs à 4 000 m³/s, les parties basses des plaines sont progressivement inondées. De nombreuses digues établies en bordure des fleuves évitent les ravinelements provoqués par les courants traversiers, mais n'empêchent pas les submersions par l'aval.

Sur la rive droite, la protection la plus efficace est celle de l'île Saint-Georges du fait de la longueur et de la continuité de l'endiguement.

Sur la rive gauche, les plaines de Mornas et de Caderousse malgré de longs endiguements, sont fréquemment inondées. Quant à l'île de la Piboulette, elle n'est protégée que par des digues transversales contre les risques de ravinement.

Après mise en service de l'aménagement, un certain nombre de plaines seront totalement protégées. Ce sont, sur la rive gauche : les plaines de Mondragon, Mornas, Piolenc et Orange.

De plus, de vastes territoires seront protégés contre les débordements directs du fleuve et notamment la plaine de Codolet en rive droite de la plaine de Caderousse en rive gauche. La durée et la fréquence des submersions, ainsi que la hauteur d'eau lors de celles-ci, seront très fortement diminuées dans ces territoires.

Le débit solide transporté par le Rhône comprend des matériaux en suspension (limons) et un charriage de fond (sable et graviers). Ces débits solides, en particulier le charriage de fond, deviennent importants en période de crues.

Les dimensions données à la retenue (grande largeur et profondeur peu importante) permettent de penser que l'écoulement du débit solide de charriage et de suspension ne sera pas notablement perturbé par la présence des ouvrages. Si le besoin s'en fait sentir, des chasses seront pratiquées en période de crue de façon à rétablir temporairement un écoulement voisin de l'écoulement naturel et de faciliter ainsi le cheminement des matériaux.

Les matériaux en suspension ont un rôle utile en début d'exploitation, pour le colmatage des digues et du fond des canaux cependant, les projets sont conçus pour éviter les dépôts importants.

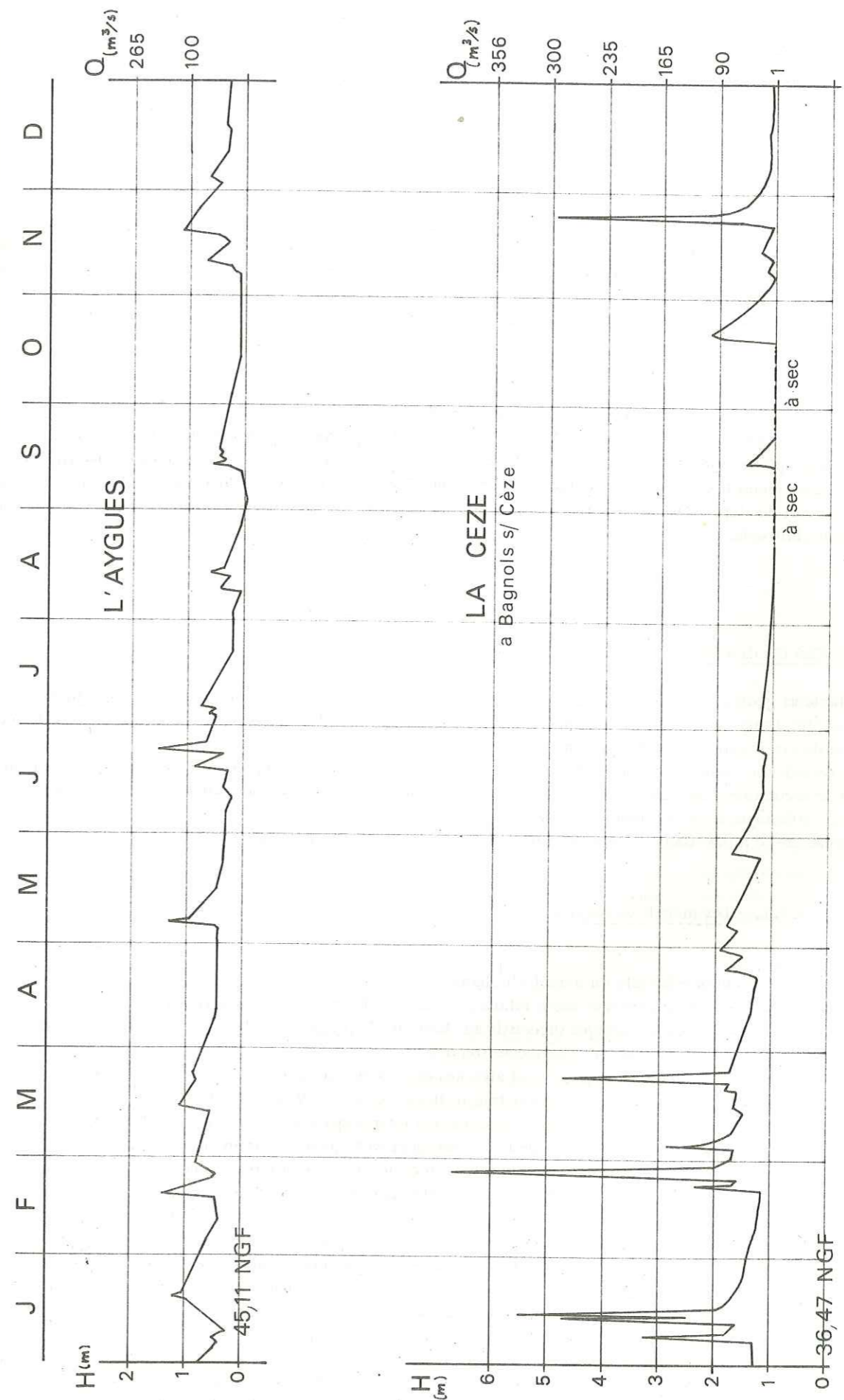


Fig. 14 Variations comparées de l'Aygues et de la Cèze en 1969

3.1.3.2. - L'Aygues (fig. 14)

Son régime est étroitement lié à la pluviométrie de la zone que traverse son cours inférieur comme le montre la figure 20. Les débits moyens sont relativement faibles et légèrement influencés par la fonte des neiges au mois d'avril. L'Aygues draine, en effet les zones à moyenne altitude qui s'étendent aux confins de la Drôme et des Hautes Alpes et qui reçoivent un enneigement moyen. En outre, la nappe alluviale de l'Aygues joue, comme nous le verrons plus loin, un rôle important dans le régime hydrologique souterrain de la plaine d'Orange.

3.1.3.3. - La Cèze (fig. 14)

Au limnigraphe de Bagnols-sur-Cèze les débits moyens enregistrés sont faibles (40 à 45 m³/s, mais sous l'influence des précipitations atmosphériques la Cèze peut présenter des crues très rapides qui se traduisent par des hautes brutales du niveau des eaux. Les débordements sont cependant très rares à cause de la profondeur importante du lit par rapport au terrain naturel.

Pour l'année 1969 on note une longue période de très basses eaux de juin à septembre, ainsi qu'au cours du mois de décembre.

3.1.3.4. - Le réseau d'irrigation et de drainage

Très dense, en rive gauche au Sud de l'Aygues, le réseau d'irrigation qui distribue les eaux du canal de Pierrelatte ainsi que le système de "roubines" et de "mayres" qui assurent le drainage de la couche superficielle des alluvions limoneuses peuvent avoir quelque influence sur la tenue de la nappe. Toutefois, cette influence, à cause, d'une part de l'épaisseur des limons, d'autre part, de la répartition uniforme des canaux sur la plaine, est difficilement chiffrable.

3.2. DONNEES GEOLOGIQUES

Les facteurs géologiques régionaux tant en ce qui concerne les massifs de bordure que le substratum sous-alluvial, et plus directement le comblement alluvial, influencent à des degrés divers les conditions naturelles de gisement et de circulation des eaux souterraines.

Sans revenir sur l'étude géologique des affleurements et du substratum, exposée dans un chapitre précédent il y a lieu de reconsidérer sous une optique différente, leurs caractéristiques géomorphologiques et structurales, leurs particularités lithologiques et sédimentologiques.

En revanche le remplissage alluvial fera ici l'objet d'une étude plus détaillée.

3.2.1. - Les massifs de bordure

- En rive gauche :

Au Nord, la façade occidentale du massif d'Uchaux est formée de crêtes parallèles E-W séparées par des vallons. La colline de Mornas se brise suivant une haute falaise, et, à l'Est de Mondragon les formations calcaréo-gréseuses de l'Angoumien se haussent par des abrupts successifs au-dessus de la plaine. De façon générale la morphologie de ce massif est le reflet fidèle de sa lithologie ; la succession d'assises calcaréo-gréseuses dures et sableuses peu résistantes à pendage sud détermine ces crêtes à façades nord abruptes et doucement pentées vers le Sud se raccordant aux vallons sablonneux où coulent de minces ruisseaux intermittents comme le Valadas et le ruisseau des Combes.

De cette brève description morphologique jointe aux caractéristiques sédimentologiques des assises "compactes" de l'Angoumien et du Coniacien on peut tirer quelques enseignements quant au comportement hydrogéologique de cette partie du massif, ainsi que l'attestent les multiples traces de ravinement qui parcourent les surfaces structurales du Montmout et de la crête sise à l'Est de Mornas, le ruissellement est prépondérant sur les hauteurs. L'absence de fissures sur ces mêmes surfaces structurales et la faible épaisseur de la couche d'altération nous amènent à penser que les eaux météoriques s'infiltreront en quasi-totalité dans les niveaux sableux et y circuleront pour un temps au contact des niveaux "compacts". Quelques puits creusés dans ces formations sableuses dans les points bas des talwegs captent ces eaux qui doivent former une nappe très épisodique puisque alimentée uniquement par les pluies et dont l'écoulement doit être conforme au pendage des formations réceptrices.

Nous admettons que ces nappes de très faible extension, liées aux divers niveaux sableux échelonnés entre Mondragon et Mornas, ou formant la cuvette santonienne de Valbonette, s'écoulent pour une partie vers la plaine alluviale du Rhône lorsqu'elles sont en période de hautes eaux soit après de fortes pluies. Les débits qui peuvent atteindre la plaine semblent en tout état de cause, tout à fait négligeables devant le débit spécifique des alluvions aquifères.

Entre Orange et le verrou de Roquemaure le relief est moins marqué, seules quelques collines émergent de la masse alluvionnaire ; la colline Saint-Eutrope, le petit massif de Bois Feuillet, le Lampourdier. En rive gauche les versants n'ont donc aucun émissaire superficiel permanent, mais seulement quelques ruisseaux très courts qui évacuent le trop plein à la suite des plus fortes précipitations.

- En rive droite

Les mêmes remarques s'appliquent dans leur ensemble aux versants en rive droite. Quelques puits implantés dans les sables ucétiens témoignent de l'existence, en profondeur, d'une nappe dont il est difficile d'évaluer l'importance par manque d'information. Ici encore on ne rencontre aucun émissaire superficiel.

En ce qui concerne la région de Saint-Géniès-de-Comolas, la proximité du substratum imperméable laisse supposer que la totalité des précipitations diminuée des pertes normales par évapotranspiration rejoint la nappe alluviale principale soit directement, soit par l'intermédiaire de la Nizon et des canaux de drainage.

3.2.2. - Le substratum

Les essais géotechniques effectués sur les marnes plaisanciennes ont montré qu'elles pouvaient être considérées comme imperméables. En outre l'absence de traces visibles de mouvements tectoniques post-plaisanciens et l'épaisseur considérable des marnes font que l'on peut rejeter toute hypothèse de pertes en profondeur. Seuls les changements de pente et les divers sillons creusés dans le substratum plaisancien (cf. Pl. 4) sont susceptibles de provoquer quelques anomalies dans le profil de dépression général de la nappe.

Les autres formations qui constituent - dans de moindres proportions que le Plaisancien - le substratum sous-alluvial (cf. Pl. 3), ne semblent pas non plus influencer sensiblement le profil de dépression de la nappe. Certaines d'entre elles comme les niveaux sableux de l'Angoumien (formation de Montmout et sables ucétiens) ou du Cénomaniens sont très probablement le siège de circulations d'eau non négligeables, cependant nous sommes contraints à ce sujet de rester dans le domaine des hypothèses par manque d'information. Nous verrons ultérieurement que dans certains cas les formations perméables du substratum semblent participer à l'alimentation de la nappe mais l'absence de zone de dépression permanente ne permet pas de conclure à l'existence du phénomène inverse.

De plus amples connaissances pourront être déduites de l'examen des cartes piézométriques et de l'étude hydrochimique.

3.2.3. - Le remplissage alluvial

L'ensemble des formations alluviales présente des caractères assez hétérogènes. Il existe, non seulement une très grande différence évidente entre les "graviers" et les limons de débordement, mais encore des variations sensibles de granulométrie sur toute l'épaisseur de l'aquifère. Ces niveaux de granulométries différentes - anciens chenaux superposés et entrecroisés - sont lenticulaires et on retrouve donc ces variations de la granulométrie tant dans le sens vertical que dans le sens latéral. Cette anisotropie des alluvions est bien mise en évidence par les mesures de vitesse verticale au micromoulinet qui ont été effectuées dans quelques piézomètres (fig. 15). Les valeurs mesurées de la vitesse diffèrent beaucoup selon la profondeur traduisant ainsi plus ou moins directement les variations de granulométrie.

L'examen des courbes granulométriques (fig. 16) dressées d'après les échantillons "non lavés" prélevés au cours du fonçage des puits d'essais de la Piboulette, autorise les mêmes conclusions, tout en apportant quelques précisions : l'équivalent de sable demeurant à peu près constant (70 à 85 %) ce sont donc les variations du pourcentage en galets et graviers qui sont à l'origine des variations de la granulométrie totale. On peut cependant penser que l'écoulement général des eaux souterraines ne présentera pas la même hétérogénéité du fait, précisément, de la structure lenticulaire de l'aquifère : les effets des variations de la granulométrie se compensent au cours du cheminement des eaux, et les caractéristiques hydrodynamiques globales de l'aquifère sont donc le résultat de l'intégration de toutes les petites modifications qu'elles subissent au niveau de chaque lentille. Seules des variations à grande échelle peuvent avoir une répercussion sur l'écoulement général de la nappe.

C'est ce qui semble se produire sur la rive droite de la Cèze et au Nord de Codolet d'une part ; au débouché de la vallée de l'Aygues, au Sud de Piolenc d'autre part. En effet, la carte du toit des graviers (Pl. 5) révèle l'existence d'une petite terrasse enterrée sous les limons et les différences de perméabilité, même légères, qui existent entre ces deux formations alluviales peuvent entraîner, pour une part, les changements de pente observés sur les cartes piézométriques dans ces secteurs-là. Nous verrons cependant que bien d'autres facteurs peuvent entraîner les mêmes conséquences. La puissance de l'aquifère, enfin, se déduit de la comparaison de la carte du toit du substratum avec celle du toit des graviers. De même, si l'on compare cette dernière avec les différentes cartes

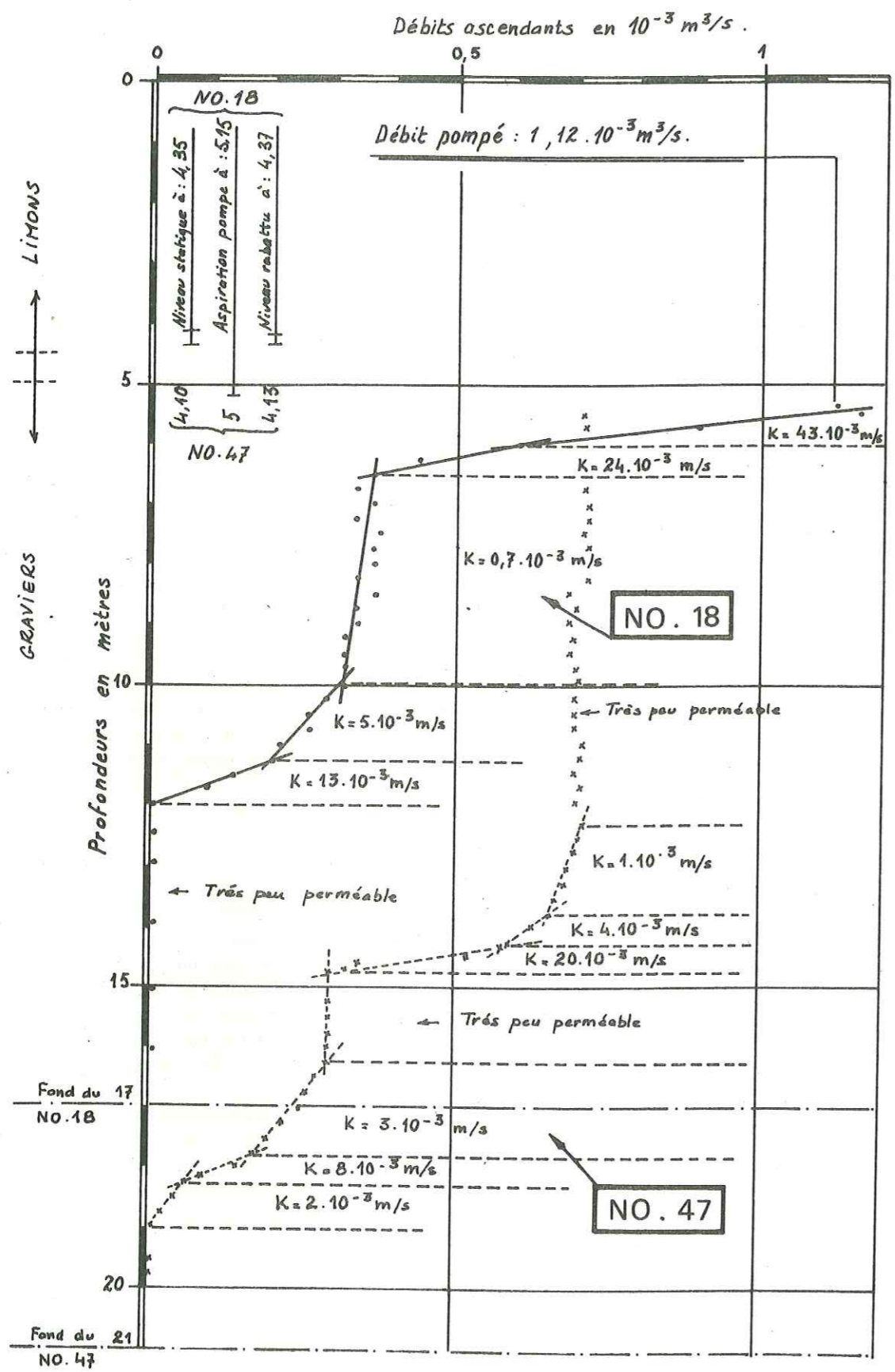


Fig.15 - Mesure des vitesses au micromoulinet Sondages NO.18 et NO.47 (Usine)

Les variations de vitesses verticales enregistrées dans les sondages NO 18 et NO 47 dénotent l'anisotropie des alluvions aquifères dans le sens vertical (formations lenticulaires). La perméabilité globale reste assez forte, ($3,10^{-3}$ m/s).

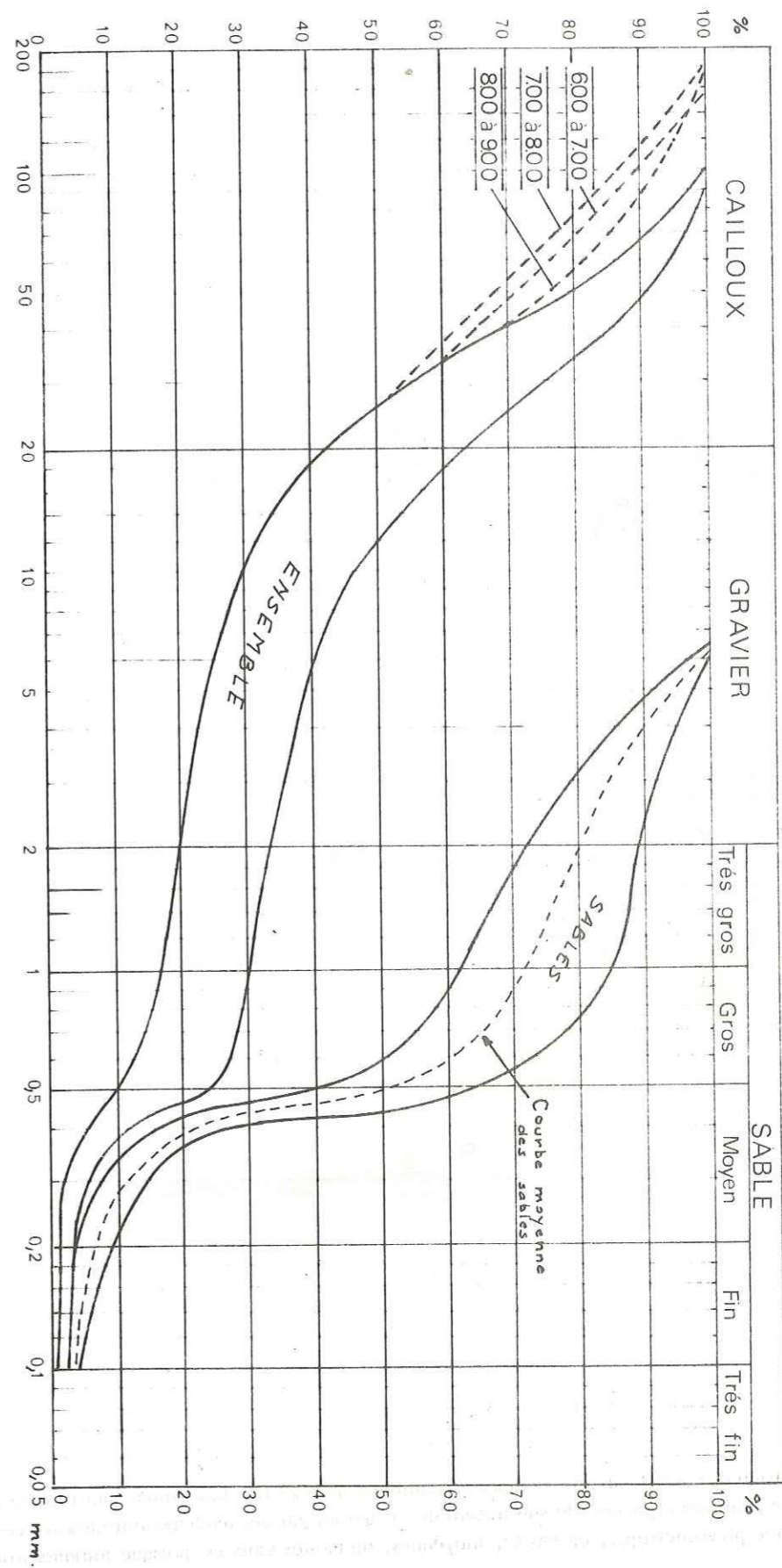


Fig16 : Analyse granulométrique Puits d'essai de l'usine (Piboulette)

Courbes enveloppes des échantillons complets

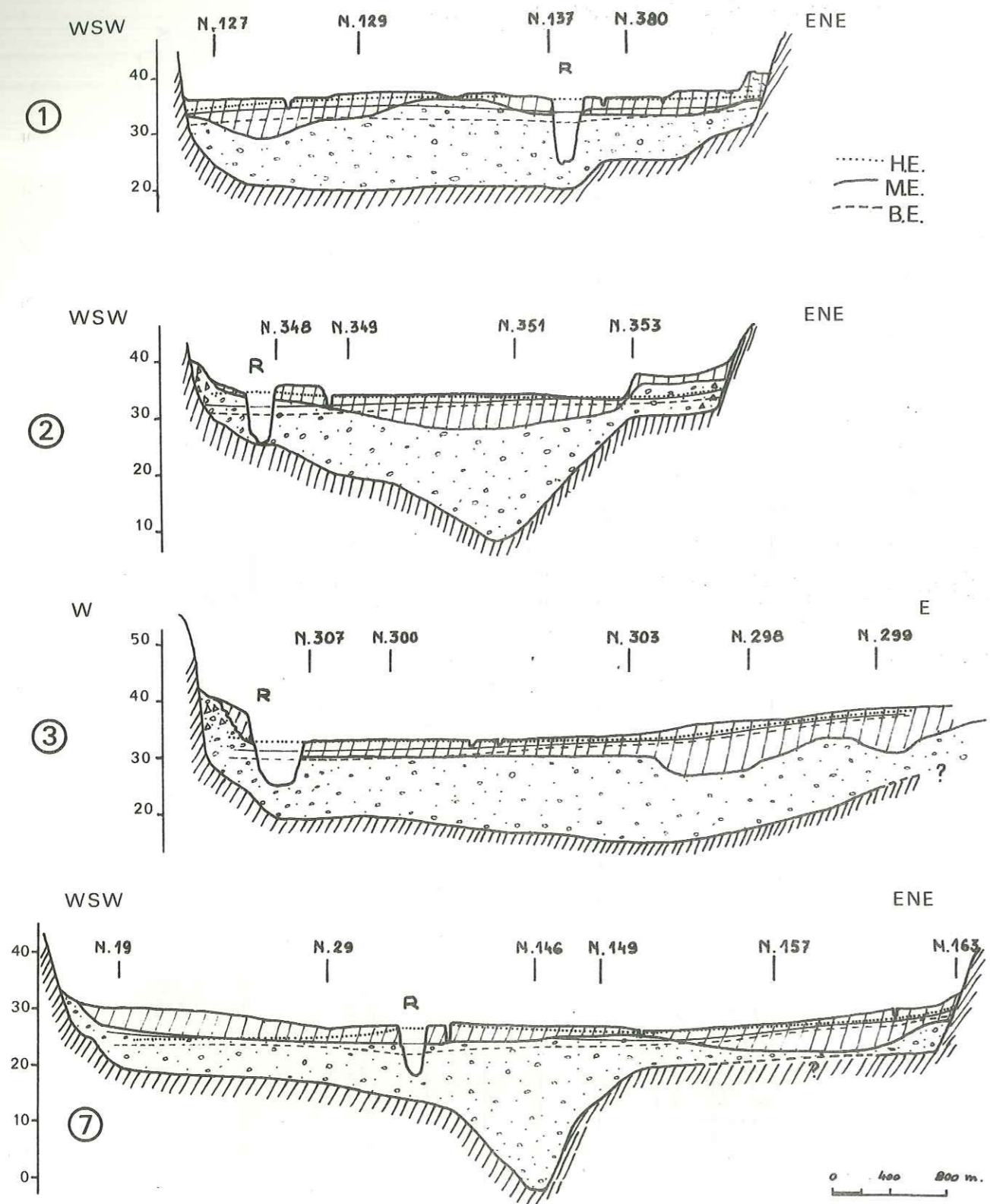


Fig 17 Profils piézométriques transversaux

La situation des profils piézométriques est indiquée Annexe III. Les limons sont représentés par des hachures obliques espacées, le substratum des alluvions par des hachures obliques serrées.
 La surface piézométrique, en basses, moyennes, ou hautes eaux est presque toujours située au-dessus

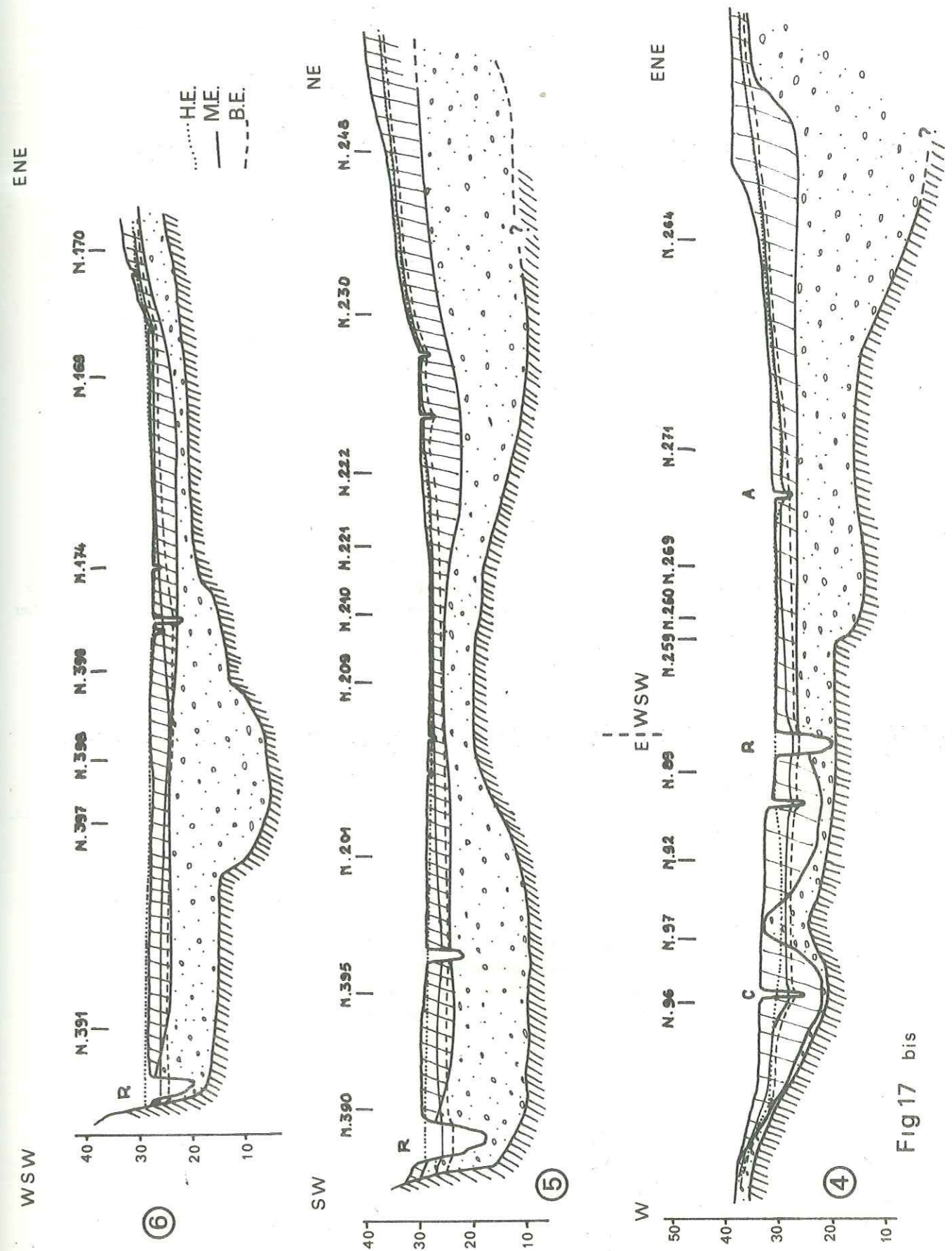


Fig 17 bis

du mur des limons : la nappe est captive dans la majeure partie de la plaine.
 Le substratum montre de nombreux sillons où le surcreusement est parfois important (coupes 2 et 7).

piézométriques présentées au chapitre suivant on constatera que dans la grande majorité des cas la nappe est presque toujours en charge sous les limons : c'est pourquoi nous emploierons l'expression "surface piézométrique" de préférence à "surface de la nappe". Tout ceci est encore illustré par les profils piézométriques transversaux des figures 17 et 17 bis.

3.3. - ETUDE MORPHOLOGIQUE DE LA NAPPE

Les quelques cinq cents piézomètres implantés dans les alluvions du Rhône entre Mondragon et Roquemaure font l'objet de relevés hebdomadaires permettant ainsi la construction de cartes piézométriques à toute époque de l'année.

L'étude de ces cartes piézométriques est le seul moyen de connaître la forme de l'écoulement de la nappe mais de telles cartes ne traduisent que l'allure de l'écoulement superficiel, déduite du profil de dépression, et qui peut parfois être différente de celle de l'écoulement en profondeur. L'écoulement profond devant être plus largement influencé par la forme du substratum imperméable. Dans certains cas l'étude géochimique pourra lever cette indétermination.

Nous avons choisi de dresser trois cartes représentatives de la nappe en fonction des débits du Rhône à Saint-Etienne-des-Sorts (cf. Fig. 12) ; soit :

- une carte avec Rhône "haut" illustrant la tenue de la nappe "haute" (du 3 au 5 mars 1970) ;
- une carte avec Rhône "bas" représentant la tenue de la nappe "basse" (du 14 au 16 octobre 1969) ;
- une carte de la nappe en moyennes eaux, en relation avec le débit moyen du Rhône pour l'année 1969 (15 au 17 avril 1969).

Chacune des dates d'étude a été choisie, en outre, parce que précédée d'une période (5 à 6 jours) de relative stabilité du Rhône et dépourvue de précipitation importante de sorte que l'on puisse espérer obtenir une image de la nappe stabilisée dans son profil d'équilibre. Il est évident néanmoins, que l'on ne pourra, au mieux, que s'approcher du "régime permanent".

Chaque carte piézométrique permettra de déterminer à une époque donnée :

- la profondeur de la surface piézométrique ;
- le profil de dépression ;
- le sens de l'écoulement général.

Notons, dès à présent, que tous les piézomètres ne sont pas relevés au même instant, et que dans certains cas, il existe un décalage de deux jours entre deux tournées voisines. Les effets de ce décalage dans le temps sont difficilement chiffrables mais peuvent être négligés si les conditions d'étude précédemment énoncées ont été respectées.

3.3.1. - Etude des cartes piézométriques

3.3.1.1. - Nappe haute du 3 au 5 mars 1970 (Pl. 6)

Le débit moyen du Rhône était pendant cette période de 3 500 m³/s à Saint-Etienne-des-Sorts (cote 35,10 N.G.F.) et stabilisé depuis 5 jours (amplitude des battements 0,20 m environ). Cette valeur du débit n'ayant été atteinte ou dépassée que cinq jours en 1969 cette carte de la nappe peut être considérée comme représentant les plus hautes eaux avant le domaine des "crues" et des débordements, comme en témoignent les amorces d'inondation qui affectent, du Nord au Sud, l'île Vieille, la partie méridionale de l'île du Colombier, le quartier de la Gardetta au Nord de Montfaucon et l'île de Miémar.

3.3.1.1.1. - Ecoulement

La surface piézométrique n'est pas régulière et présente une morphologie très complexe. La direction de l'écoulement et le gradient hydraulique sont très variables suivant les zones considérées. L'étude de la carte du toit des graviers révèle une seule caractéristique constante : la nappe est en charge sur toute l'étendue de la vallée ; le niveau piézométrique dépasse parfois de 4 à 5 m le toit de l'aquifère et parfois même le terrain naturel.

L'examen des courbes isopièzes permet d'identifier trois zones principales :

- Une zone orientale développée en éventail à courbes équipotentiellles serrées dont la concavité est dirigée vers l'amont. Elle intéresse une grande partie de la vallée depuis Piolenc jusqu'au quartier du Grès en passant

par le coude de l'Aygues. Sur l'ensemble de ce secteur les filets sont divergents, le gradient hydraulique est de 3 % environ. Les eaux souterraines circulent à très faible profondeur (de 0,8 m à 2 m) et résurgent même en certains endroits comme au bien nommé quartier des Négades.

Cette structure à écoulement général E-W indique une très importante alimentation de la part de l'Aygues et de sa nappe, qui se fait encore sentir au Nord de Piolenc.

- Une zone occidentale constituée de deux couloirs étroits à très fort gradient hydraulique (1 %) séparés par le rocher subaffleurant de l'Estagnol, s'ouvrant brusquement vers l'aval, au niveau des derniers coudes de la Cèze en direction du Rhône vers Codolet et l'Ardoise. Le gradient très fort à l'amont est dû conjointement à la pente du substratum et à l'aplatissement très marqué de la couche perméable parfois réduite à quelques dizaines de centimètres (profil 4, fig. 17 bis). Il diminue rapidement vers l'aval, bien que la pente du substratum reste la même, à cause de l'augmentation de volume de l'aquifère. Le profil de dépression est ici d'allure hyperbolique, le débit relativement faible malgré une vitesse d'écoulement probablement assez forte. On remarquera que les lignes d'eau ne sont pas influencées par la Cèze.

- Une zone axiale bordée latéralement de dépressions de la surface piézométrique qui la séparent des zones précédemment différenciées. Cette zone s'étend de Pont-Saint-Esprit à Roquemaure en passant par l'île de la Piboulette, elle couvre la majeure partie de la vallée et est caractérisée par des courbes isopièzes assez espacées à concavité dirigée vers l'aval. L'orientation générale de l'écoulement dans cette zone, de part et d'autre du Rhône met en évidence l'importance des apports à la nappe en provenance du fleuve.

On peut distinguer les particularités suivantes :

- l'effet de drainage du canal de fuite de Donzère-Mondragon R.D., alors que sur l'ensemble de cette zone le Rhône alimente nettement sa nappe alluviale ;
- le drainage opéré par la lône Saint-Georges dans l'île du même nom ;
- dans l'île de la Piboulette la surface piézométrique simple et régulière, représente une nappe à filets convergents vers l'axe médian de l'île et à faible gradient hydraulique (0,7 %) ; cette portion de la nappe est à la fois alimentée par le Rhône et par le bras de Caderousse avec une nette prépondérance pour le premier.

Plus au Sud la plaine de Montfaucon, alimentée par les eaux du Rhône, renferme une nappe à profil de dépression hyperbolique, vraisemblablement drainée au contact de la faille de Roquemaure. Au Sud de Montfaucon la surface piézométrique devient sub-horizontale sans direction d'écoulement bien définie.

Au contact de la "zone axiale" et des deux autres zones décrites antérieurement on observe plusieurs dépressions de la surface piézométrique, dont le talweg détermine un axe de drainage. Peu à peu ces dépressions seront atténuées du fait de l'avance de l'onde de crue, le gonflement maximum dans leur partie médiane étant alors seulement limité par le drainage effectif.

En ce qui concerne les versants, notons enfin, que seul le vallon du Valadas, en rive gauche, paraît alimenter quelque peu la nappe.

3.3.1.1.2. - Alimentation

Les apports de la nappe de l'Aygues restent prépondérants sur une grande partie de la plaine, diminuant d'autant l'influence du Rhône dans ce secteur. En rive droite, l'alimentation de la nappe de l'île Saint-Georges est directement liée au Rhône, dont elle suit les fluctuations.

3.3.1.2. - Nappe basse du 14 au 16 octobre 1969

Le débit moyen du Rhône observé au cours de la huitaine qui a précédé la date des mesures, correspondait à l'étiage conventionnel (530 - 550 m³/s). La carte de la nappe (Pl. 7) représente donc l'état de la nappe phréatique sous la seule influence des apports provenant à la fois des vallées adjacentes et, éventuellement, des versants.

Sur l'ensemble de la plaine alluviale le Rhône draine la nappe. De même qu'en hautes eaux le gradient hydraulique reste élevé en rive droite au débouché des nappes de la Cèze et de la Tave, et en rive gauche, au débouché de la nappe de l'Aygues.

3.3.1.2.1. - Ecoulement

- Entre Mondragon et Piolenc l'écoulement est approximativement perpendiculaire au Rhône.
- Dans l'île Saint-Georges, contrairement aux observations faites en hautes eaux, la lône Saint-Georges participe nettement à l'alimentation de la nappe.

- Dans la partie centrale de la vallée, en rive gauche de l'Ayguës, l'écoulement reste grossièrement parallèle à la direction générale de la rivière puis au bras de Caderousse.
- Dans l'île de la Piboulette, on remarque que le drainage est plus important côté Rhône que côté bras de Caderousse. Le profil de dépression de la nappe est parabolique.
- Dans le secteur sud, en rive droite du Rhône, la nappe s'écoule d'Ouest en Est en direction de l'île de Miémar.

3.3.1.2.2. - Alimentation

L'alimentation par les versants est, dans le cas présent, sinon plus importante qu'en hautes eaux mais du moins plus sensible. L'étiage de la nappe principale fait ressortir, par exemple, l'alimentation, pourtant peu importante, par des eaux d'infiltration qui circulent sur les marnes pliocènes sub-affleurantes du secteur SW. De même l'influence du ruisseau du Valadas, au Sud de Mondragon, est plus marquée qu'en temps ordinaire malgré l'absence de précipitation notable depuis la mi-septembre.

En ce qui concerne les apports que fournissent les nappes de la Cèze et de la Tave, en rive droite, il ne semble pas que leurs débits soient très importants ; en effet, le fort gradient qu'on y observe est plutôt dû à une diminution de la perméabilité jointe à une réduction de l'extension de l'aquifère, qu'à l'importance du débit. Le même phénomène, bien que moins accusé, existe en rive gauche, au débouché de la nappe de l'Ayguës dans la plaine alluviale d'Orange. Dans les deux cas, il faut ajouter l'influence de la pente du terrain naturel aux facteurs qui déterminent le gradient hydraulique.

L'essentiel de l'alimentation provient en définitive de la nappe de l'Ayguës et de celle de la plaine de Bollène, pour la rive gauche, et des nappes de la Cèze et de la Tave, en rive droite.

3.3.1.3. - Nappe "moyenne" du 15 au 17 avril 1969

La carte de la nappe "moyenne" (Pl. 8) représente en fait l'état de la nappe correspondant au régime semi-permanent du Rhône (1 360 m³/s). Au cours de la semaine qui a précédé les mesures, les débits du Rhône et de ses affluents étaient suffisamment stables (Cèze : 30 m³/s ; Ayguës : 45 m³/s), et par ailleurs aucune précipitation n'a été enregistrée.

3.3.1.3.1. - Ecoulement

L'allure des courbes isopièzes rappelle nettement ce que nous avons vu en basses eaux (Pl. 7). Le niveau général est légèrement supérieur (de 1 m environ) dans les zones basses de la plaine, à cause de la hausse du niveau de base par rapport aux basses eaux, mais pratiquement identique dans les zones excentriques, au voisinage des bordures.

- Dans l'île de la Piboulette la nappe est drainée à la fois par le bras de Caderousse et par le Rhône, dans des proportions équivalentes, et l'orientation générale de l'écoulement suit le lit du fleuve.
- Dans le centre de la plaine les lignes d'eau suivent toujours la direction générale du cours de l'Ayguës.
- A la latitude de Piolenc, on note le même axe d'écoulement préférentiel EW qu'en basses eaux. L'étude hydrochimique confirmera, dans ce secteur, l'existence d'un vaste chenal.

En rive droite quelques dépressions localisées traduisent l'influence de pompes industrielles ou d'alimentation : au SW de l'Ardoise, près du piézomètre N 50 (cette dépression était très visible en hautes eaux) et au NW de Codolet.

3.3.1.3.2. - Alimentation

Le Rhône ne participe pas à l'alimentation de la nappe, sauf en de rares endroits : secteur NE de l'île Saint-Georges, extrémité N de l'île de la Piboulette et de l'île de Miémar, où elle est de toute façon très restreinte. Il draine donc l'ensemble de la nappe qui est, comme toujours, alimentée par les nappes de Bollène et de l'Ayguës en rive gauche, de la Cèze et de la Tave en rive droite.

Il existe en quelques endroits une alimentation par les versants, dont il est difficile cependant d'évaluer l'importance : bordure méridionale de l'île Saint-Georges, secteur de Saint-Géniès-de-Comolas. En rive gauche : comme sur les cartes précédentes on note des venues par le vallon du Valadas, et quelques écoulements en direction du quartier du Grès provenant du versant septentrional du Lampourdier.

3.3.1.4. - Conclusions

- En rive gauche, la nappe phréatique relativement puissante en raison de la grande épaisseur du gravier, est alimentée principalement par la nappe de la vallée de l'Ayguës qui débouche dans la plaine de Caderousse, entre Piolenc et Orange. Cette nappe d'orientation est-ouest, s'écoule vers le Rhône et le bras de Caderousse et prend une direction sensiblement nord-sud.

En amont de Piolenc, la nappe est faiblement alimentée par les collines, et elle se trouve plus directement influencée par le Rhône.

En période de hautes eaux du Rhône, la nappe à l'amont de Piolenc est alimentée par le Rhône, alors qu'à l'aval le niveau du Rhône s'oppose à l'écoulement naturel de la nappe et influence celle-ci sur une moindre largeur.

- En rive droite, l'alimentation de la nappe de l'île Saint-Georges est directement liée au Rhône dont elle suit les fluctuations.

Entre Saint-Etienne-des-Sorts et Marcoule l'aquifère est pratiquement inexistant.

La nappe de la plaine de Codolet est alimentée principalement par les nappes, d'ailleurs assez faibles, des vallées de la Cèze et de la Tave, l'influence du fleuve se faisant surtout sentir en hautes eaux sur une profondeur limitée.

Il est à noter qu'en eaux moyennes, la nappe principale de rive droite (plaine de Codolet-Chusclan) est relativement profonde, de trois à cinq mètres en dessous du terrain naturel.

La nappe de la rive gauche est au contraire très près du sol (de 0,50 m à 1,50 m) ce qui peut gêner dans certains secteurs le développement des cultures ; en étiage extrême, la profondeur de la nappe sous le terrain naturel dépasse rarement 2 à 3 m.

Sur l'ensemble de la plaine alluviale, et de façon quasi-permanente, la nappe est captive sous les limons.

3.3.2. - Fluctuations de la surface piézométrique

L'interprétation des fluctuations régionales de la nappe dans le temps et à des distances variables du niveau de base s'est avérée aussi utile que celle des cartes piézométriques. En effet, les variations de la nappe phréatique intègrent toutes les influences régionales, et il est intéressant de connaître l'influence relative de chacun des facteurs qui déterminent les variations. Toutefois dans la plupart des cas, ces dernières seront rapportées aux fluctuations du niveau de base puisque les cartes piézométriques ont montré qu'il en était un facteur prépondérant.

Cette étude comprend :

- une carte représentant l'amplitude maximale des variations de la surface piézométrique entre les hautes et basses eaux du Rhône en 1969 (Pl. 9) ;
- une carte des variations de la nappe sous l'effet d'une hausse du niveau de base dans un laps de temps relativement court (7 jours) (fig. 18) ;
- une carte illustrant l'influence de la pluviométrie sur la tenue de la nappe (Pl. 10) ;
- des graphiques comparant l'évolution de la nappe en certains points sous l'influence de différents facteurs tels que les cours d'eau ou la pluviométrie.

3.3.2.1. - Amplitude maximale des variations

Les courbes d'égales différences (cf. Pl. 9) entre la nappe "basse" du 14 au 16 octobre 1969 et la nappe "haute" du 3 au 5 mars 1970 permettent d'une part, de délimiter le domaine d'influence du Rhône, et d'autre part, de distinguer à l'intérieur de ce domaine différentes zones classées par degré d'influence maximum.

Les variations maximales se situent logiquement en bordure du Rhône mais diminuent assez rapidement en s'éloignant des rives. On remarquera qu'à proximité des berges l'amplitude des variations est parfois supérieure (plus de 5 m) à la différence des niveaux du Rhône mesurés à Saint-Etienne-des-Sorts.

Ceci tient au fait, qu'en hautes eaux, le niveau varie beaucoup plus d'une rive à l'autre, dans les courbes, qu'en basses eaux à cause de la rapidité du courant et de l'inertie des eaux. Ainsi les différences de niveaux, en certains points, sont-elles supérieures à celles qui ont été mesurées à l'échelle de Saint-Etienne-des-Sorts.

En rive droite, l'influence du fleuve se fait ressentir jusqu'à la hauteur de Chusclan ; il est cependant très probable que les eaux du Rhône ne remontent pas jusqu'à une telle distance des berges mais qu'il y a transmission de pression dans la nappe captive.

En rive gauche l'influence du Rhône est sensible jusque dans la partie médiane de la plaine (courbe à 0,5 m) ; elle s'annule au niveau du débouché de la plaine d'Ayguës. L'étude hydrochimique montrera qu'il y a un véritable mélange des eaux jusqu'à ce niveau.

Il est possible, à partir de cette carte, de calculer le volume total de l'aquifère intéressé par les variations soit le volume des ressources régularisées pour l'année considérée (G. CASTANY) :

$$dW = V \cdot S = A \cdot dH_m \cdot S$$

- avec dW = volume des ressources régularisées (en m^3/an)
- A = surface piézométrique (en m^2)
- dH_m = hauteur de fluctuation moyenne (en m)
- S = coefficient d'emmagasinement
- V = volume de la tranche d'aquifère intéressé (en m^3).

Ce calcul bien que très empirique, suffit à démontrer les ressources considérables de la nappe : on trouve en effet un volume utilisable annuellement, de $220.10^6 m^3$ à $300.10^6 m^3$, sans aggraver pour autant l'étiage de la nappe.

Cette méthode d'étude, qui intègre toutes les fluctuations intermédiaires entre les deux états de la nappe considérée ne permet pas de déceler les zones éventuelles d'écoulement préférentiel. Il est donc nécessaire d'établir une carte des variations synchrones qui tiendra compte du facteur temps.

3.3.2.2. - Variations synchrones

La figure 18 représente la variation du niveau de la nappe entre le 23 et le 30 avril 1969, sous l'effet d'une crue de forte amplitude (2,75 m). La crue, régulière, continue et rapide, permet d'éviter les interférences de crues et de décrues qui auraient gêné l'interprétation.

Les courbes d'égale variation sont pratiquement parallèles aux berges du Rhône et l'onde de crue s'amortit assez rapidement à une distance constante des berges sans révéler l'existence de passages préférentiels. L'étude hydrochimique semble pourtant indiquer qu'ils sont assez fréquents sur l'étendue de la vallée. On peut proposer l'explication suivante à cette apparente contradiction : la durée d'observation n'a pas été suffisante pour que l'on puisse constater une évolution différentielle et l'onde de crue se fait ressentir dans la nappe en charge par une poussée hydrostatique avant qu'il n'y ait de véritable écoulement. La mise en pression se fait alors d'une façon beaucoup plus uniforme qu'un écoulement par la création d'un mur d'eau qui s'oppose assez brutalement à l'avance des eaux qui s'écoulaient auparavant vers le fleuve.

3.3.2.3. - Influence de la pluviométrie (Pl. 10)

Une précipitation de débit suffisant pour provoquer une infiltration efficace, relève la surface piézométrique dans des proportions qui dépendent de divers paramètres tels que : l'évapotranspiration, la nature du couvert végétal, l'intensité de l'averse et la nature du sol. En outre, on note fréquemment un retard entre l'averse et la réponse de la nappe. La carte d'égales variations piézométriques (Pl. 10) dressée au cours d'une période pluvieuse fait bien ressortir de telles différences.

Entre le 3 et le 17 septembre 1969, le Rhône était stabilisé aux environs de la cote 31,45 N.G.F. à Saint-Etienne-des-Sorts (amplitude des battements : 15 cm). Au cours de la même période 71 mm d'eau furent recueillis dans les pluviomètres de la station météorologique d'Orange-Caritat, en 7 jours de pluie.

L'examen de la carte figurée Pl. 10 amène les constatations suivantes :

- De façon générale, les zones situées en bordure du Rhône marquent une légère décrue, montrant que le fleuve n'a pas encore subi l'influence des précipitations.
- En rive droite : les nappes de la Cèze et de la Tave n'ont pas encore réagi alors que la Cèze amorce, par contre, une hausse assez nette, qui se répercute à travers les berges sur la nappe au voisinage immédiat de la rivière.

Au Sud et au Nord de cette zone il n'y a aucune influence visible des précipitations, la nappe reste relativement stable.

- En rive gauche, l'influence des précipitations est beaucoup plus marquée et l'évolution de la nappe montre plusieurs particularités.

Les apports des versants sont nets dans le secteur de Piolenc : les eaux tombées sur le massif au Nord et à l'Est de Piolenc ont ruisselé sur la surface structurale des calcaires coniaciens et arrivent assez rapidement à la nappe après s'être infiltrés ou non dans les niveaux sableux du Coniacien terminal.

Les précipitations qui régissent pour une grande part, le régime de l'Aygues (cf. 3.1.3.2.), font ressentir assez loin leur influence par l'intermédiaire de la rivière : les hausses du niveau de la nappe observées en rive gauche du bras de Caderousse en témoignent. Au Sud de l'île du Colombier et en rive droite du bras de Caderousse il semble que des phénomènes de colmatage annulent l'influence de l'Aygues.

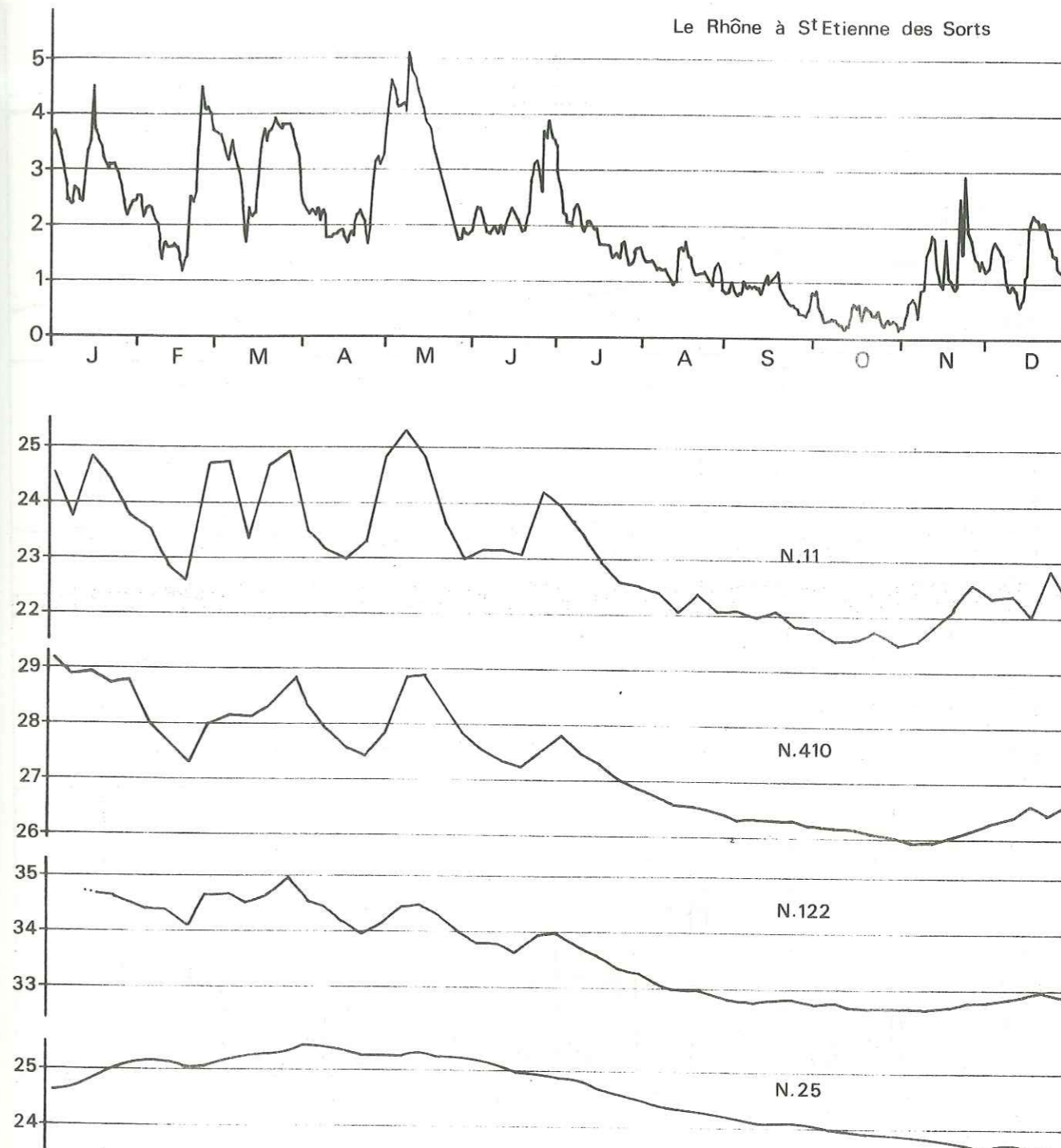


Fig. 19 Variations comparées du Rhône et de la nappe

Les variations piézométriques enregistrées dans les sondages N 11, N 410, N 122 et N 25 - situés dans cet ordre à une distance croissante du Rhône - mettent en relief l'influence du fleuve (niveau de base) sur la nappe et l'amortissement des ondes de crues avec la distance.

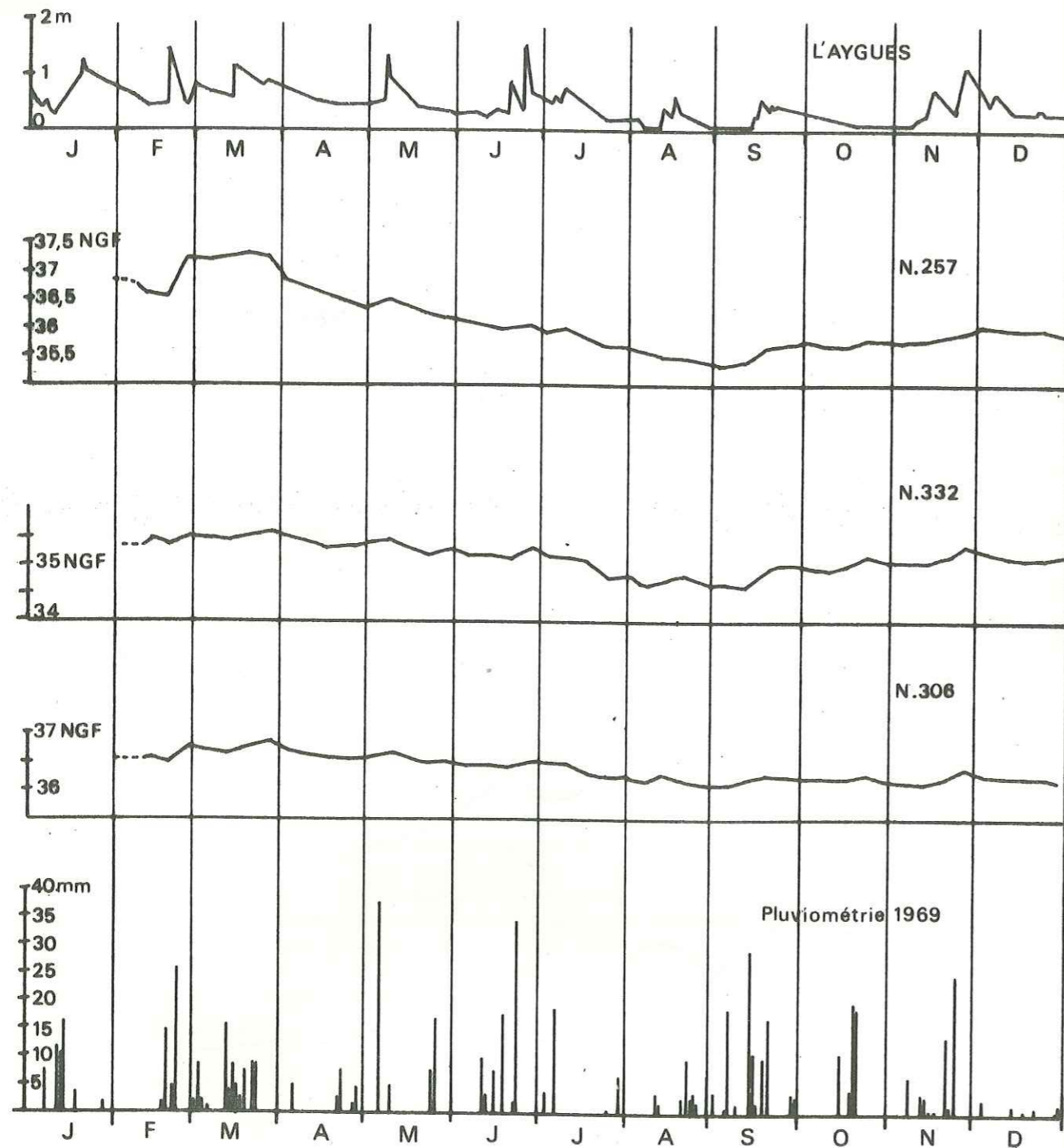


Fig 20 Influence de la pluviométrie

L'influence de l'Aygues est nette sur les piézomètres N 332 et N 306. Le piézomètre N 257 subit, à la fois l'influence du Rhône et de l'Aygues. La pluviométrie conditionne étroitement le régime de l'Aygues et son influence est parfois sensible sur la nappe (fin octobre 1969 par exemple).

Au Nord et au Nord Est de Caderousse, enfin, se dessinent deux zones à circulation préférentielle où les apports de la pluviométrie qui ont transité par la nappe de l'Aygues s'avancent plus loin et plus rapidement qu'ailleurs (courbes à +20 cm). L'étude géochimique de la nappe confirmera l'existence de deux zones à plus forte perméabilité.

La figure 20 montre, à travers les exemples que fournissent les variations de trois piézomètres implantés entre Piolenc et le débouché de la nappe de l'Aygues dans les alluvions de la plaine d'Orange, que les influences de la pluviométrie, qui se confondent avec celles de la rivière (N 257 et N 332 pour le dernier trimestre 1969) sont parfois moindres, en certaines périodes que celle du Rhône (N 257 - mars 1969).

3.3.3. - Conclusions

Les facteurs qui interviennent dans la forme de l'écoulement et l'alimentation de la nappe sont donc par ordre d'importance : le Rhône, ses affluents rive droite et rive gauche et à un degré bien moindre, les versants.

Le Rhône, selon les périodes et selon son débit, draine ou alimente la nappe, et son influence est toujours sensible sur la majeure partie de la plaine. Elle diminue progressivement à mesure qu'on s'éloigne du fleuve et que grandit le déphasage entre les fluctuations du Rhône et celles de la nappe (fig. 19).

L'Aygues, ou plutôt la nappe qu'elle alimente depuis Nyons jusqu'à Orange participe dans une large mesure à l'alimentation de la nappe principale surtout en période de basses eaux du Rhône.

Nous avons pu remarquer, enfin, que l'exploitation des eaux souterraines par pompage, en divers points de la vallée, n'entraîne pratiquement jamais de discontinuité notable dans l'écoulement de la nappe faisant par là-même la preuve de la bonne perméabilité moyenne des alluvions et de l'importance des réserves.

Une dernière remarque s'impose au sujet du bilan hydrologique qui a été volontairement laissé de côté : les débits considérables qui traversent la vallée à chaque instant, de Saint-Etienne-des-Sorts à Roquemaure, font que tout calcul du bilan apparaît beaucoup trop aléatoire pour avoir une quelconque valeur. En effet, malgré l'importance de la nappe phréatique le débit total des eaux souterraines qui parviennent au Rhône, en régime semi-permanent, reste bien inférieur à l'erreur que l'on peut faire sur la mesure des débits du fleuve. De même les calculs effectués avec les données climatologiques montrent que la plus forte précipitation enregistrée en 1969 (100 mm en 19 h) n'a pu, au mieux, apporter au Rhône qu'un débit égal à 3,3 % de son débit total. Compte tenu des modifications permanentes du profil du lit du fleuve, il apparaît dès lors qu'un tel calcul du bilan hydrologique est entaché d'une erreur trop importante pour qu'on ait une estimation satisfaisante de ses divers facteurs. Le volume considérable des réserves ne justifie pas, en outre, le besoin de tels calculs.

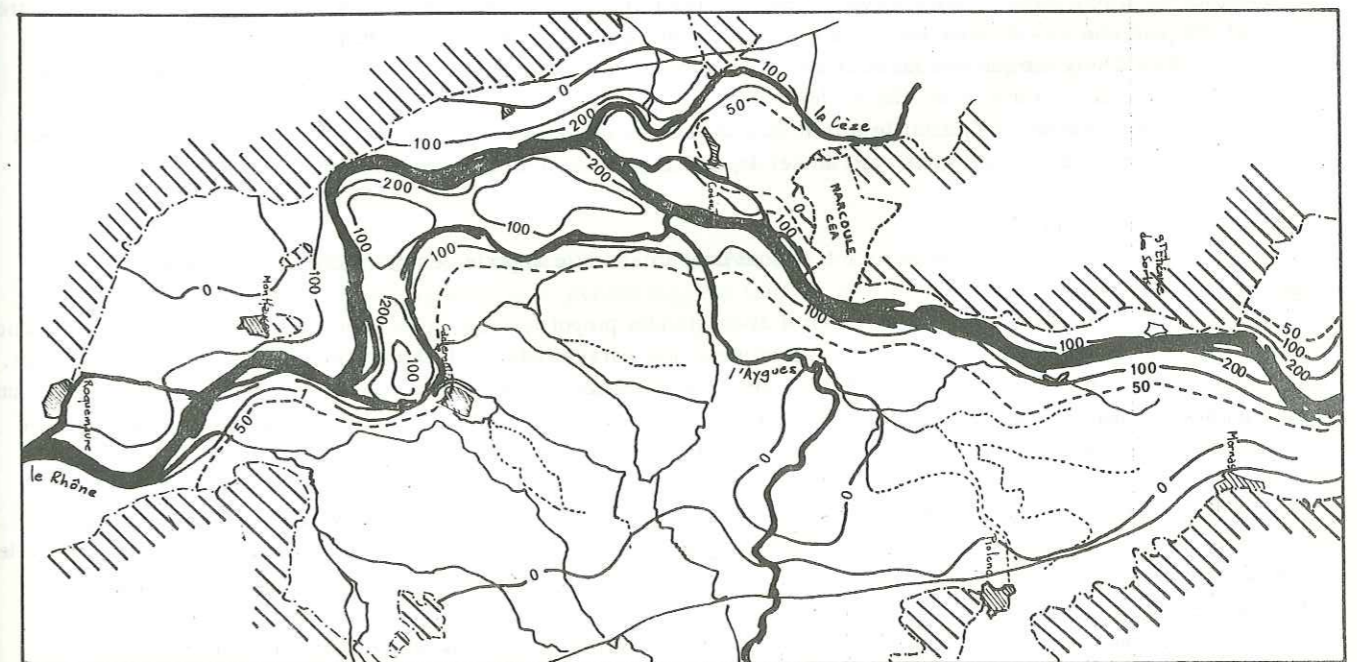


Fig 18 Variations synchrones du niveau piézométrique entre le 23 et le 30 Avril 1969

3.4. - HYDROCHIMIE

Pour compléter, et dans une certaine mesure, préciser l'ensemble des informations relatives à la nappe alluviale obtenues au moyen du dispositif d'observation mis en place par la C.N.R., nous avons procédé à un certain nombre de prélèvements aux fins d'analyse. Cette étude hydrochimique devait nous permettre, d'une part d'apprécier les qualités chimiques et physico-chimiques des eaux souterraines dans leur état actuel, et, d'autre part, d'obtenir des renseignements complémentaires quant à leur origine et leur mode de circulation au sein des alluvions. La connaissance des qualités physico-chimiques des eaux de la nappe doit permettre, en dernier lieu, d'évaluer, et éventuellement de prévenir, l'incidence des aménagements sur la qualité de ces eaux.

3.4.1. - Méthodes d'étude

Deux campagnes de prélèvements ont été effectuées à deux périodes différentes, correspondant respectivement aux "hautes eaux" et aux "moyennes eaux" au cours desquelles 67 échantillons ont été récoltés sur l'ensemble de la plaine alluviale.

Afin d'obtenir des résultats homogènes et comparables entre eux, la durée totale de chaque campagne a été aussi réduite que possible et les points de prélèvements ont été répartis suivant les indications préalablement fournies par les cartes piézométriques et des séries de mesures de température et de la résistivité "in situ" qui ont porté sur la moitié, environ, des piézomètres répartis entre Mondragon et Roquemaure.

La première campagne s'est déroulée du 9 au 10 mars 1970, quelques jours seulement après une crue du Rhône (cf. Pl. 6) et a comporté 28 prélèvements ; 39 échantillons ont été prélevés au cours de la seconde, du 16 au 18 juin 1970. Les prélèvements ont été effectués dans des piézomètres après 10 à 15 minutes de pompage au moyen d'une pompe à bras, à une profondeur moyenne de 2 à 3 m sous le niveau piézométrique.

Les échantillons, étudiés par l'Institut Pasteur de Lyon, ont fait l'objet d'une analyse chimique et physico-chimique complète (type 1).

3.4.2. - Etude des résultats

3.4.2.1. - Critères physiques

- La température :

Les températures sont, d'une façon générale, assez uniformes sur l'ensemble de la vallée, ne montrant que de très faibles variations dans le temps et dans l'espace. Les températures mesurées en mars 1970 étaient comprises entre 14°4 et 9°8 pour une valeur moyenne de 12°C, ne marquant qu'un très léger réchauffement en juin (15°4 à 12°1 - moyenne 13°4). On remarque que les eaux en provenance de la vallée de l'Ayguës gagnent un à deux degrés à leur arrivée dans la plaine alluviale du Rhône, le long d'une ligne assez nette, qui souligne une légère rupture de pente du terrain naturel, rapprochant ainsi le toit de la nappe de la surface du sol. Comme pour toute nappe alluviale peu profonde, les températures reflètent avec un net amortissement les températures extérieures saisonnières.

- La résistivité : (Pl. 11)

Fonction directe de la quantité de sels dissous dans l'eau, elle apporte, en première analyse, une estimation globale de la minéralisation.

Les valeurs de la résistivité varient dans d'assez grandes proportions sur l'ensemble de la vallée et sous l'influence des fluctuations du Rhône, en fonction de la structure et des caractéristiques hydrodynamiques des alluvions aquifères. Les cartes en courbes d'égale résistivité (Pl. 11) reflètent bien cette complexité mais apportent, en revanche, plusieurs enseignements quant au cheminement souterrain des eaux, que les cartes piézométriques ne peuvent traduire dans le détail, et que l'étude des variations piézométriques laissait seulement entrevoir.

En basses eaux (juin) la résistivité diminue progressivement de l'amont vers l'aval, à mesure qu'augmente la minéralisation. En outre, on constate, en rive gauche, sur la plus grande partie de la plaine alluviale que les courbes dessinent de nombreuses digitations montrant une évolution différentielle de la minéralisation, et, par conséquent, d'assez grandes irrégularités dans la perméabilité des alluvions.

En effet, on peut admettre, à priori, qu'à température constante les vitesses de réactions sont constantes, et donc que la vitesse d'évolution de la minéralisation de l'eau est proportionnelle à la perméabilité du terrain traversé. Ainsi, la composition pétrographique des alluvions restant très constante dans son ensemble, seules des augmentations

locales de leur perméabilité sont à l'origine des digitations dessinées par les courbes d'équirésistivité, qui s'avancent vers la zone axiale de la plaine jusqu'à Caderousse et au quartier des Négades notamment. Ces zones à circulation préférentielle pourraient être d'anciens chenaux de l'Ayguës.

A proximité du Rhône la valeur de la résistivité des eaux de la nappe n'est plus que de 1 200 à 1 450 Ω /cm, alors qu'elle atteignait 4 000 Ω /cm à leur arrivée dans la plaine d'Orange.

On remarque néanmoins que la résistivité reste très élevée en bordure de l'Ayguës, ainsi qu'en deux points de la vallée en rive gauche : dans l'île du Colombier (5 350 Ω /cm) et au Nord Est de Piolenc (5 443 Ω /cm). Il semble que ces valeurs, localement élevées, de la résistivité résultent de mélanges avec des eaux profondes très peu minéralisées mais aussi, pour une part, comme nous le verrons ultérieurement, d'une évolution particulière de la minéralisation.

- En hautes eaux, sous l'influence du fleuve, le phénomène s'inverse en même temps que le sens général de l'écoulement, et les plus fortes valeurs de la résistivité s'observent au voisinage du Rhône (3 500 Ω /cm). L'allure des courbes d'équirésistivité confirme les variations relatives de la perméabilité, signalées précédemment.

- Le D. H. T. (Pl. 11)

Le Degré Hydrotimétrique Total traduit la teneur globale en sels de calcium et de magnésium ; on l'exprime en degrés français (1 degré correspond à 0,2 Meq/l on a une eau contenant 10 mg de CO₃Ca, Mg par litre).

La cartographie des mesures du D.H.T. montre de grandes similitudes avec celle de la résistivité (Pl. 11) faisant apparaître par conséquent l'importance prépondérante des sels de calcium et de magnésium dans la minéralisation globale des eaux souterraines. L'examen des valeurs numériques et des variations du D.H.T. amène les remarques suivantes :

- en hautes eaux le D.H.T. moyen est de 25,3° et varie de 10,6° à 49,6° ;

- en basses eaux, la moyenne est de 22,3° avec des valeurs extrêmes de 45° et 7,3°. Le léger écart

qui existe entre ces deux périodes pourrait être dû à des déplacements de l'équilibre ionique et des changements du coefficient de solubilité et de l'agressivité, entraînés par l'augmentation des températures moyennes au cours du mois de juin. Ceci, en supposant toutefois, que la composition chimique qualitative reste à peu près constante d'une période à l'autre. Notons cependant, dès à présent, que l'augmentation des teneurs en sulfates et chlorures peut tout aussi bien avoir les mêmes conséquences en modifiant la concentration de CO₂ libre dans l'eau, augmentant ainsi son agressivité.

- Le T. A. C.

Le Titre Alcalimétrique Complet, exprimé également en degrés français, représente la teneur globale de l'eau en hydrates, carbonates et bicarbonates alcalins et alcalino-terreux.

D'une façon générale, le T. A. C. varie dans les mêmes proportions que le D. H. T. et son évolution reste parallèle à celle de la résistivité traduisant la prédominance des carbonates et bicarbonates alcalins et alcalino-terreux. En basses eaux, une zone étroite s'individualise en bordure du Rhône, où l'on observe un léger décalage dans l'évolution comparée du D. H. T. et du T. A. C. : en rive gauche du bras de Caderousse, ainsi que dans l'île du Colombier (T.A.C. = 4° au N 279). Les sels de calcium et de magnésium ne seront donc pas uniquement associées aux carbonates et bicarbonates.

Le T.A.C. varie de 4° à 29,7° en hautes eaux et de 7,5° à 34° en basses eaux, la moyenne générale avoisinant 20°. Les plus faibles valeurs ont été relevées au Nord de l'île Saint-Georges, dans l'île du Colombier, et, en rive droite, dans la région de Montfaucon (de 4° à 13°).

La minéralisation totale moyenne des eaux de la nappe phréatique n'est donc pas très accentuée, essentiellement bicarbonatée calcique et magnésienne et accessoirement sulfatée ou chlorurée calcique.

3.4.2.2. - Résultats des analyses pondérales

Les critères physico-chimiques ont montré que la minéralisation des eaux de la nappe est représentée pour l'essentiel par les carbonates et bicarbonates de calcium et de magnésium. L'analyse chimique doit maintenant apporter toutes les précisions nécessaires à l'étude de la zonalité hydrochimique et de l'évolution des eaux de la nappe.

3.4.2.2.1. - Représentation des résultats

Le dépouillement et la comparaison des analyses chimiques sont grandement facilités par leur représentation sous forme de diagrammes et l'élaboration des rapports caractéristiques entre les différents éléments. De même les cartes chimiques en courbes d'égale teneur (en mg/l) permettent de suivre aisément l'évolution quantitative de chaque ion ou groupe d'ions considéré.

- Cartes chimiques

La carte des isoteneurs en ions calcium (Ca^{++}) (Pl. 12) montre que l'influence du Rhône en hautes eaux, se fait ressentir bien au-delà des limites indiquées par les cartes piézométriques (Pl. 6), notamment dans la basse vallée de l'Aygues. Elle confirme, par ailleurs, ce qu'avaient annoncé les cartes du D.H.T. et de la résistivité, à savoir que l'accroissement de la minéralisation se fait dans le sens de l'écoulement général en hautes comme en basses eaux.

La carte des sulfates (Pl. 13) fait apparaître deux zones à forte teneur, comparativement aux valeurs enregistrées sur l'ensemble de la plaine, au Nord Est de Caderousse et au Sud Est de Montfaucon.

- Diagramme à base trilineaire (PIPER) (fig. 21)

Le diagramme comprend un losange et deux triangles équilatéraux sur les côtés desquels sont portés les pourcentages d'ions exprimés en milliéquivalents par rapport à la somme des ions de même signe. Dans un des triangles figure le point représentatif des anions, dans l'autre celui des cations. Le point résultant de ces deux points à l'intérieur du losange représente alors la minéralisation totale de l'eau. Son principal avantage est de permettre la comparaison globale d'un grand nombre d'analyses d'eau, beaucoup plus aisément que les diagrammes à échelle verticale, plutôt que de fournir une représentation isolée. Il est possible, en outre, de suivre l'évolution de l'eau dans une nappe, d'en déceler et d'interpréter les phénomènes modificateurs éventuels. En dernier lieu, la classification des eaux s'opère graphiquement, sans qu'il soit nécessaire de se livrer à des comparaisons fastidieuses.

- Diagramme de Schoeller - Berkloff (fig. 22 à 26)

Le principal inconvénient du diagramme trilineaire est qu'il ne tient pas compte des concentrations relatives, nous lui adjoignons donc le diagramme à échelle logarithmique verticale de Schoeller qui permet une représentation plus imagée de la minéralisation.

- Rapports caractéristiques

Pour caractériser chaque zone hydrochimique ainsi déterminée, nous dégagerons des résultats pondéraux trois rapports de quantité entre les différents éléments :

$$R_1 = \frac{r \text{ CO}_3^{--}}{r \text{ Cl}^- + r \text{ SO}_4^{--}}$$

$$R_2 = \frac{r \text{ SO}_4^{--}}{r \text{ Cl}^-}$$

$$R_3 = \frac{r \text{ Mg}^{++} + r \text{ Ca}^{++}}{r \text{ Na}^+ + r \text{ K}^+}$$

où r indique que la teneur est exprimée en milliéquivalent par litre (Me/l).

3.4.2.2.2. - Zonalité hydrochimique

A l'intérieur d'un faciès d'ensemble, défini par le groupement des analyses sur le diagramme de Piper (fig. 21) il est possible, sur ce même diagramme complété par les diagrammes logarithmiques, de différencier plusieurs "zones" ou du moins, plusieurs stades dans l'évolution chimique de la nappe. Compte tenu de l'influence prépondérante des fluctuations du niveau de base sur les caractéristiques chimiques de la nappe phréatique, les "zones" ainsi délimitées ne valent que dans les conditions hydrologiques qui régnaient à l'époque de l'échantillonnage et sont susceptibles de variations tant dans leur chimisme que dans leur situation géographique. Cette classification n'est donc, en fait, qu'un inventaire des étapes du chimisme des eaux à l'intérieur d'un groupe de caractères plus constants, dans leur ensemble, que l'on peut résumer ainsi : "eaux essentiellement bicarbonatées calciques (peu magnésiennes) et accessoirement sulfatées ou chlorurées calciques".

- Zone A (fig. 22)

Ces eaux sont essentiellement caractérisées par leur très faible minéralisation ($5 \text{ } 400 \Omega$) (résistivité $> 3 \text{ } 000 \Omega$) et des teneurs en sulfates inférieures à 10 mg/l. En revanche les teneurs en chlorures sont relativement plus élevées qu'ailleurs sans toutefois excéder 33 mg/l ($R^2 < 0,5$).

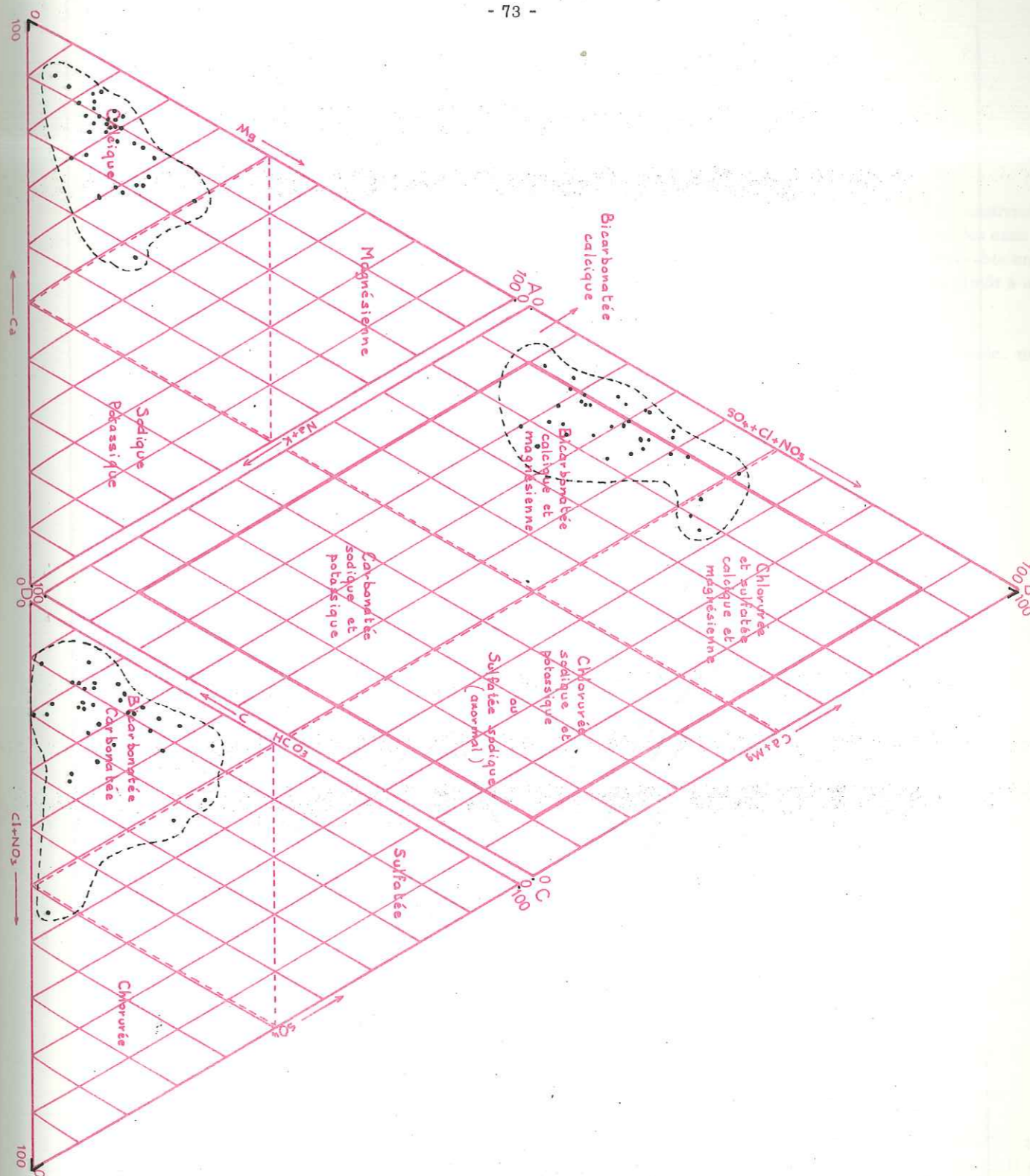


Fig. 21 : Répartition globale des échantillons sur le diagramme de PIPER (USGS)

L'ensemble des points représentatifs des analyses chimiques est groupé en un nuage inclus dans la zone des eaux "bicarbonatées calciques et magnésiennes" ; seuls quelques points traduisent une tendance, peu marquée, vers le faciès chloruré calcique (triangle des anions).

DIAGRAMME LOGARITHMIQUE
(mg./L)

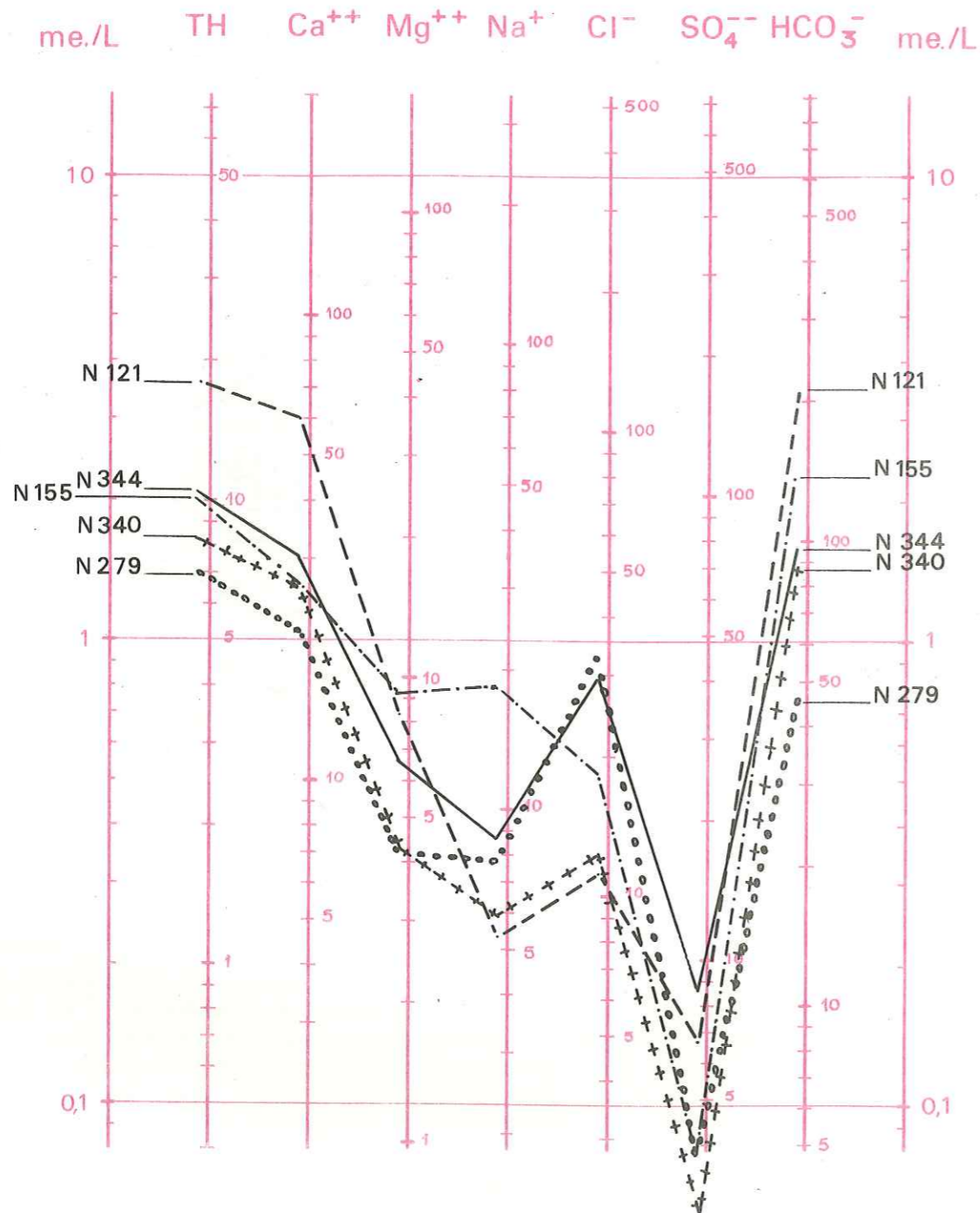
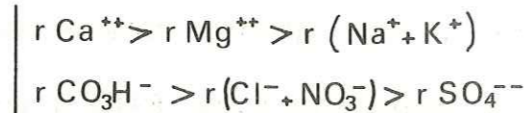


Fig-22

Zone A



N° Piézomètre	R1	R2	R3
N 340	3,57	0,16	5,40
N 279	0,77	0,08	3,65
N 344	1,57	0,22	4,64
N 121	7,55	0,42	12,13
N 130	2,90	0,27	3,52

Une remarque est à faire au sujet de l'échantillon N 279, qui, quoique très faiblement minéralisé (résistivité : 5 350 Ω /cm) a un R₂ de 0,08 indiquant une teneur en chlorures en proportion nettement plus élevée que les eaux appartenant à la même zone, lui donnant un faciès "chloruré calcique". La chute de minéralisation observable en ce point ainsi que dans toute cette zone peut être imputable aux précipitations du Ca SO₄ et du Ca CO₃ ou plutôt à un apport particulier d'eaux très peu minéralisées.

Les points de prélèvement N 155 et N 168 ont aussi fourni une eau très peu sulfatée, de résistivité élevée, mais à tendance sodique et potassique d'où une diminution du R₃ (fig. 23 : zone A').

N° piézomètre	R ₁	R ₂	R ₃
N 155	3,87	0,15	2,23
N 168	4,23	0,35	4,01

- Zone B (fig. 24)

Les valeurs du R₁ de ce secteur sont légèrement inférieures à celles de la zone A, tandis que le R₂, lui, reste équivalent aux valeurs précédentes.

N° piézomètre	R ₁	R ₂	R ₃
N 240	1,95	0,37	6,54
N 144	2,18	0,38	6,57
N 326	1,95	0,66	7,35
N 306	2,63	1,16	7,34
N 130	1,51	0,50	4,71
N 309	2,01	0,41	5,16

Les concentrations en Ca⁺⁺ et SO₄⁻⁻ (15 à 20 mg/l) sont un peu plus élevées dans cette zone que dans la zone précédente. Ceci signifie, soit que les ions SO₄⁻⁻ et Ca⁺⁺ qui précipitaient dans la zone A sont encore ici en solution, soit que des apports de sulfates ont rejoint la nappe.

D'après les directions d'écoulement déduites des cartes piézométriques, il semble que ces deux phénomènes opposés concourent simultanément à la variation des teneurs en sulfates.

Cette famille d'eau se retrouve en bordure du Rhône et de l'Aygues en hautes eaux et sur une large bande bordant la plaine alluviale en basses eaux.

Notons que les teneurs en sulfates sont constantes et de valeur moyenne (50 mg/l) aussi bien dans le Rhône que dans l'Aygues et qu'il est difficile d'expliquer par leurs apports à la nappe ces variations de teneurs en sulfates (fig. 29).

DIAGRAMME LOGARITHMIQUE
(mg./L)

me./L TH Ca⁺⁺ Mg⁺⁺ Na⁺ Cl⁻ SO₄⁻⁻ HCO₃⁻ me./L

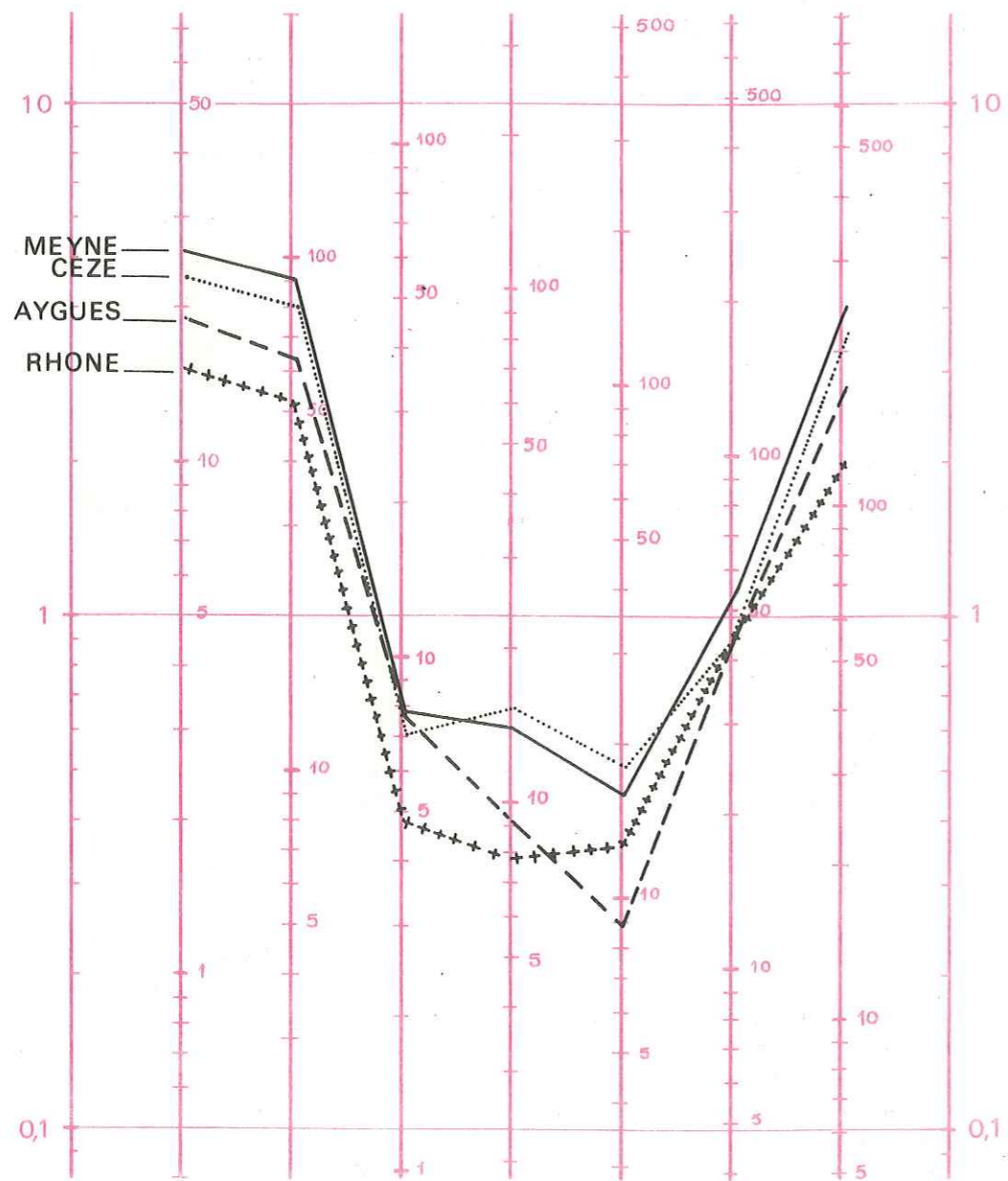


Fig. 29 Eaux de surface Juin 70

DIAGRAMME LOGARITHMIQUE
(mg./L)

me./L TH Ca⁺⁺ Mg⁺⁺ Na⁺ Cl⁻ SO₄⁻⁻ HCO₃⁻ me./L

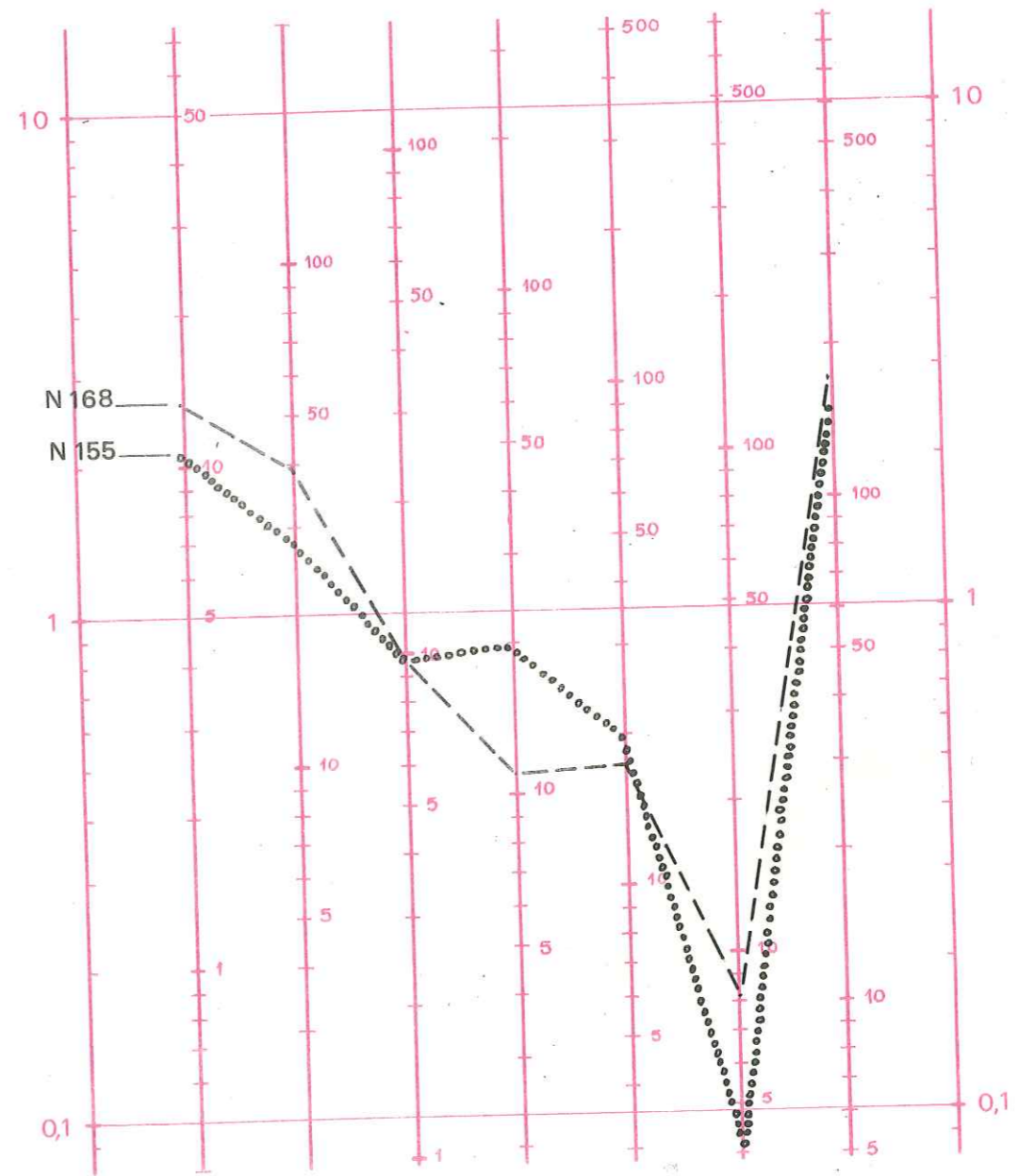


Fig. 23 Zone A' $\left| \begin{array}{l} r \text{ Ca}^{++} > r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) \geq r \text{ Mg}^{++} \\ r \text{ CO}_3\text{H}^- > r(\text{Cl}^- + \text{NO}_3^-) > r \text{ SO}_4^{--} \end{array} \right.$

DIAGRAMME LOGARITHMIQUE
(mg./L)

me./L TH Ca⁺⁺ Mg⁺⁺ Na⁺ Cl⁻ SO₄⁻⁻ HCO₃⁻ me./L

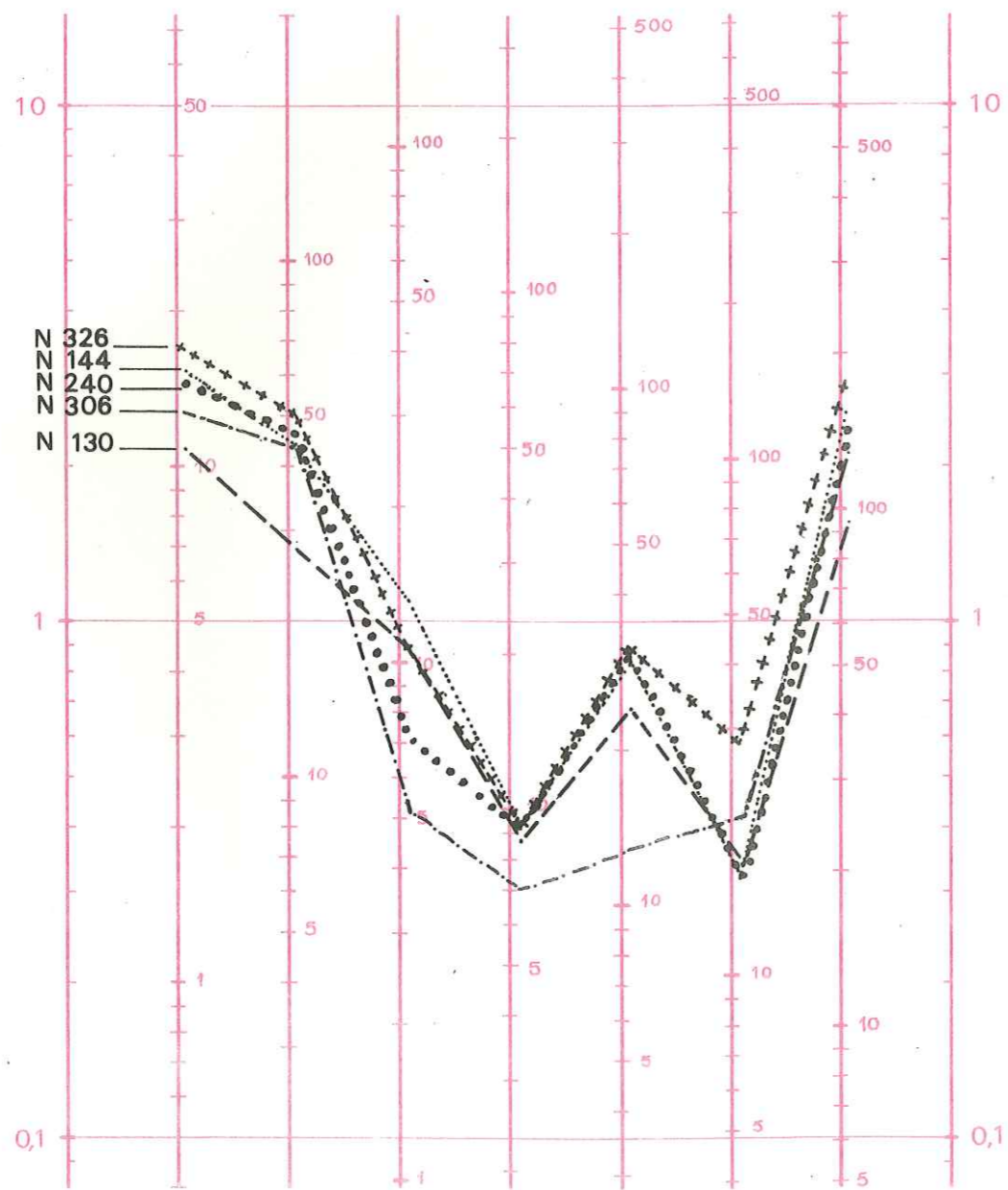


Fig. 24 Zone B $\left\{ \begin{array}{l} r \text{ Ca}^{++} > r \text{ Mg}^{++} > r (\text{Na}^{+} + \text{K}^{+}) \\ r \text{ CO}_3\text{H}^{-} > r (\text{Cl}^{-} + \text{NO}_3^{-}) > r \text{ SO}_4^{--} \end{array} \right.$

DIAGRAMME LOGARITHMIQUE
(mg./L)

me./L TH Ca⁺⁺ Mg⁺⁺ Na⁺ Cl⁻ SO₄⁻⁻ HCO₃⁻ me./L

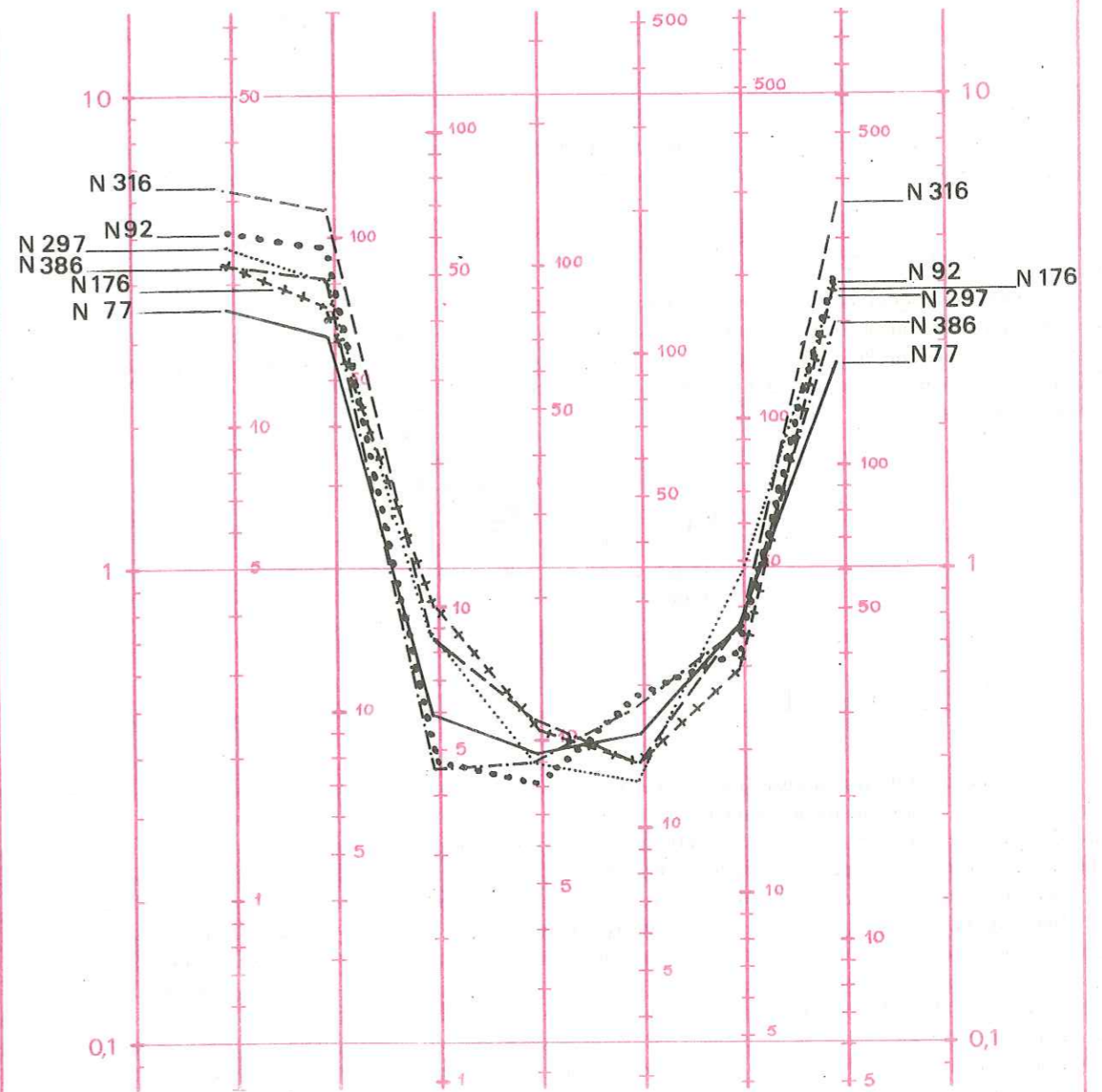


Fig. 25 Zone C $\left\{ \begin{array}{l} r \text{ Ca}^{++} > r \text{ Mg}^{++} \neq r (\text{Na}^{+} + \text{K}^{+}) \\ r \text{ CO}_3\text{H}^{-} > r \text{ SO}_4^{--} > r (\text{Cl}^{-} + \text{NO}_3^{-}) \end{array} \right.$

- Zone C (fig. 25)

Les teneurs en sulfates continuent d'augmenter ($R_2 \neq 1,5$ en moyenne) tandis que les chlorures se résorbent un peu, dans les mêmes proportions que Mg^{++} . Les concentrations en calcium varient de 50 à 100 mg/l et celles des bicarbonates de 150 à 350 mg/l. La résistivité diminue donc en proportion (1 800 à 3 000 ohms/cm).

	R_1	R_2	R_3
N 176	3,99	1,53	8,47
N 92	3,26	1,25	14,16
N 77	2,29	1,66	7,82
N 316	4,91	1,97	11,96
N 386	2,57	1,47	7,65
N 297	2,99	2,66	10,52

Ce sont des eaux bicarbonatées très calciques et peu magnésiennes qui constituent une zone étendue suivant l'axe principal de la vallée, en basses eaux, et en hautes eaux. Ce faciès chimique recouvre la majorité des eaux de la nappe.

- Zone D (fig. 26)

Les valeurs de R_2 de ce secteur sont nettement supérieures à celles atteintes dans les autres zones, tandis que celles du R_1 s'échelonnent de 1 à 2. Les eaux sont caractérisées par de fortes teneurs en sulfates comparativement au reste de la nappe (de 80 à 185 mg/l). Les diagrammes logarithmiques de cette famille sont parallèles à ceux de la famille précédente, mais plus haut dans l'échelle des concentrations et plus riches en sulfates. Il y a donc seulement un apport de SO_4^{--} .

	R_1	R_2	R_3
N 507	1,01	3,44	14,7
N 230	1,68	5,51	1,2
N 19	1,80	4,89	12,9
N 260	1,28	7,00	9,3
N 22	1,00	2,26	4,64

La présence de sulfates en quantités notables est permanente dans le secteur compris entre Montfaucon, le massif Saint-Géniès et Roquemaure, en rive droite ; et seulement liée au régime de basses eaux, en rive gauche, entre l'Aygues, le bras de Caderousse et le village de Caderousse. Dans cette dernière zone, les concentrations en sulfates sont plus élevées que dans l'Aygues et le Rhône et plus élevées aussi que dans la partie amont de la nappe.

Plusieurs causes - naturelles ou liées aux activités agricoles - peuvent être à l'origine de ce phénomène.

Une origine naturelle possible de ces sulfates impliquerait l'existence de formations gypseuses soit dans les alluvions fluviales, soit dans les marnes plaisanciennes du substratum, ce qui, selon toute vraisemblance paraît très improbable. En revanche il semble que l'on puisse retenir l'hypothèse selon laquelle une partie des sulfates solubles proviendrait de l'oxydation des pyrites que l'on trouve, en petite quantité, dans ces mêmes marnes. Toutefois ce phénomène d'altération chimique ne peut, à lui seul, expliquer l'apparition des sulfates en des zones aussi limitées (piézomètres N 230 et N 240) et le caractère épisodique de leur apparition dans les eaux de la nappe.

En dernier lieu, la connaissance que l'on a du substratum de la nappe alluviale, dans cette zone, ne permet pas d'invoquer des venues très profondes à la faveur de failles.

Il semble donc que les plus fortes concentrations en sulfates soient le fait de pollutions depuis la surface, sous l'influence de sulfatages agricoles. Cette hypothèse est étayée par le caractère saisonnier de ce phénomène. Dans ce cas l'augmentation des teneurs en SO_4^{--} vers l'aval s'expliquerait par des apports d'eaux de plus en plus concentrées en sulfates vers le fleuve, depuis le réseau de drainage de la plaine.

En hautes eaux, les diminutions de teneur en SO_4 seraient le fait de dilutions par les eaux en provenance du Rhône ; aucun indice n'a permis de conclure à des phénomènes de réduction des sulfates.

DIAGRAMME LOGARITHMIQUE
(mg./L)

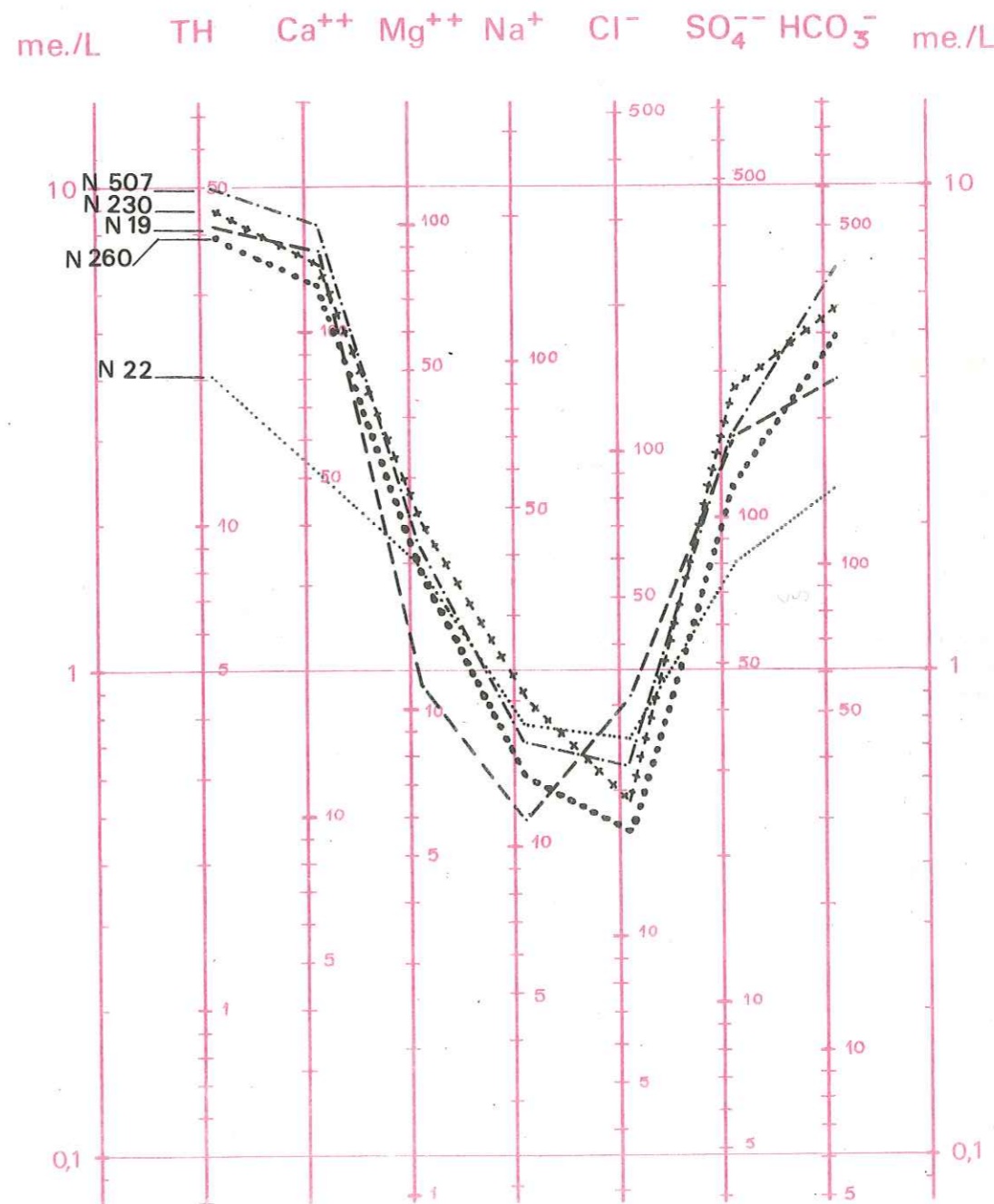
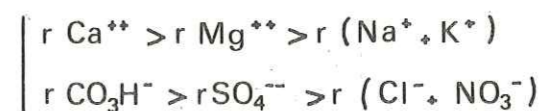


Fig. 26

Zone D



3.4.2.2.3. - Evolution de la minéralisation

La lithologie des bassins versants se répercute sur la géochimie des eaux de surface qui conditionnent à leur tour celle des nappes qu'elles alimentent. Les apports secondaires liés aux activités humaines s'ajoutent à ces conditions naturelles, et l'ensemble détermine la minéralisation globale des eaux souterraines.

Toutefois, la minéralisation acquise n'est pas immuable et elle évolue durant le parcours souterrain des eaux à la faveur d'échanges avec les formations aquifères et à la suite d'interactions entre les sels minéraux dissous.

L'utilisation du diagramme de Piper (fig. 27 et 28) permet de mettre en évidence ces phénomènes modificateurs - précipitations et échanges de bases - et de suivre l'évolution des eaux souterraines dans le détail. En effet, la comparaison des points illustrant plusieurs analyses situées sur un même axe d'écoulement fait ressortir les modifications intervenues dans les pourcentages respectifs des cations et anions en solution.

- Augmentation de la minéralisation

Les cartes hydrochimiques ont montré que la minéralisation totale augmente de l'amont vers l'aval. L'eau, suivant son agressivité, dissout, en traversant les alluvions, du carbonate de calcium, ce qui entraîne une augmentation du taux des carbonates et bicarbonates et une diminution relative du taux des autres anions. Parallèlement l'agressivité diminue progressivement jusqu'à ce qu'on observe une stabilisation du taux des carbonates.

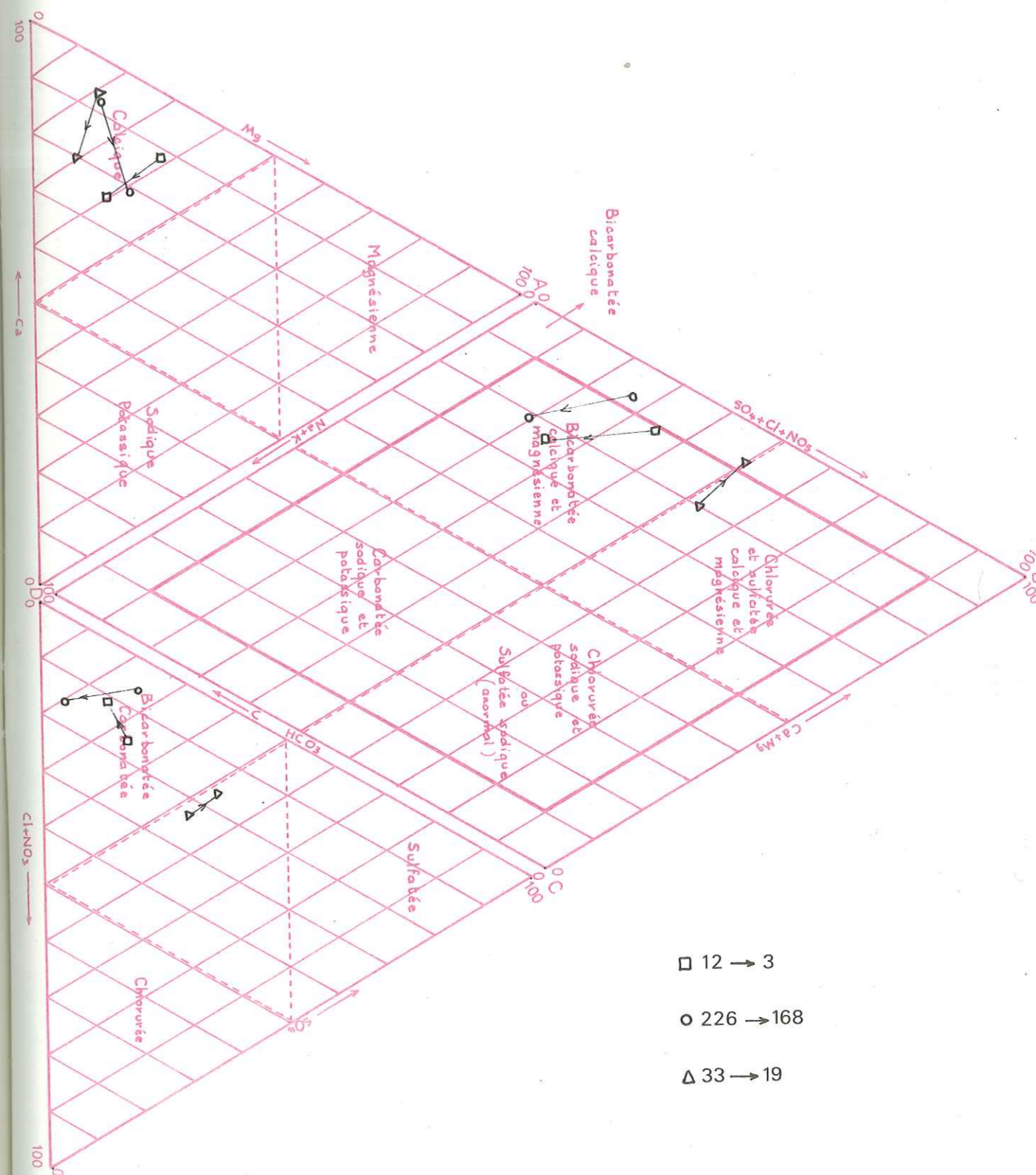
En hautes eaux, on observe entre le point N 12 et N 3 un enrichissement en $\text{CO}_3^{--} + \text{CO}_3\text{H}^-$ et une diminution relative du taux des sulfates (fig. 27). On voit là l'influence des apports en provenance du Rhône, qui, riches en CO_2 libre augmentent l'agressivité de l'eau vis-à-vis des éléments calcaires de l'aquifère.

- Précipitation des carbonates et bicarbonates

Plusieurs facteurs interviennent dans la solubilité du CO_3Ca . Elle augmente en fonction de la présence de Mg^{++} et Na^+ , et diminue, en revanche, avec SO_4^{--} . Dans la représentation graphique des eaux d'une même nappe, l'orientation vers la précipitation du CO_3Ca se traduira dans le losange de Piper, par un déplacement vers la droite, c'est-à-dire par une nette diminution des carbonates et bicarbonates. Dans le diagramme des anions apparaît alors un accroissement des sulfates accompagné d'une augmentation moindre de la teneur en chlorures, indiquant une tendance vers le faciès sulfaté calcique. Un exemple de ce phénomène nous est fourni, en basses eaux en suivant le cheminement des eaux souterraines entre les piézomètres N 277 et N 230 (fig. 28). Les modifications observées sont rassemblées dans le tableau suivant :

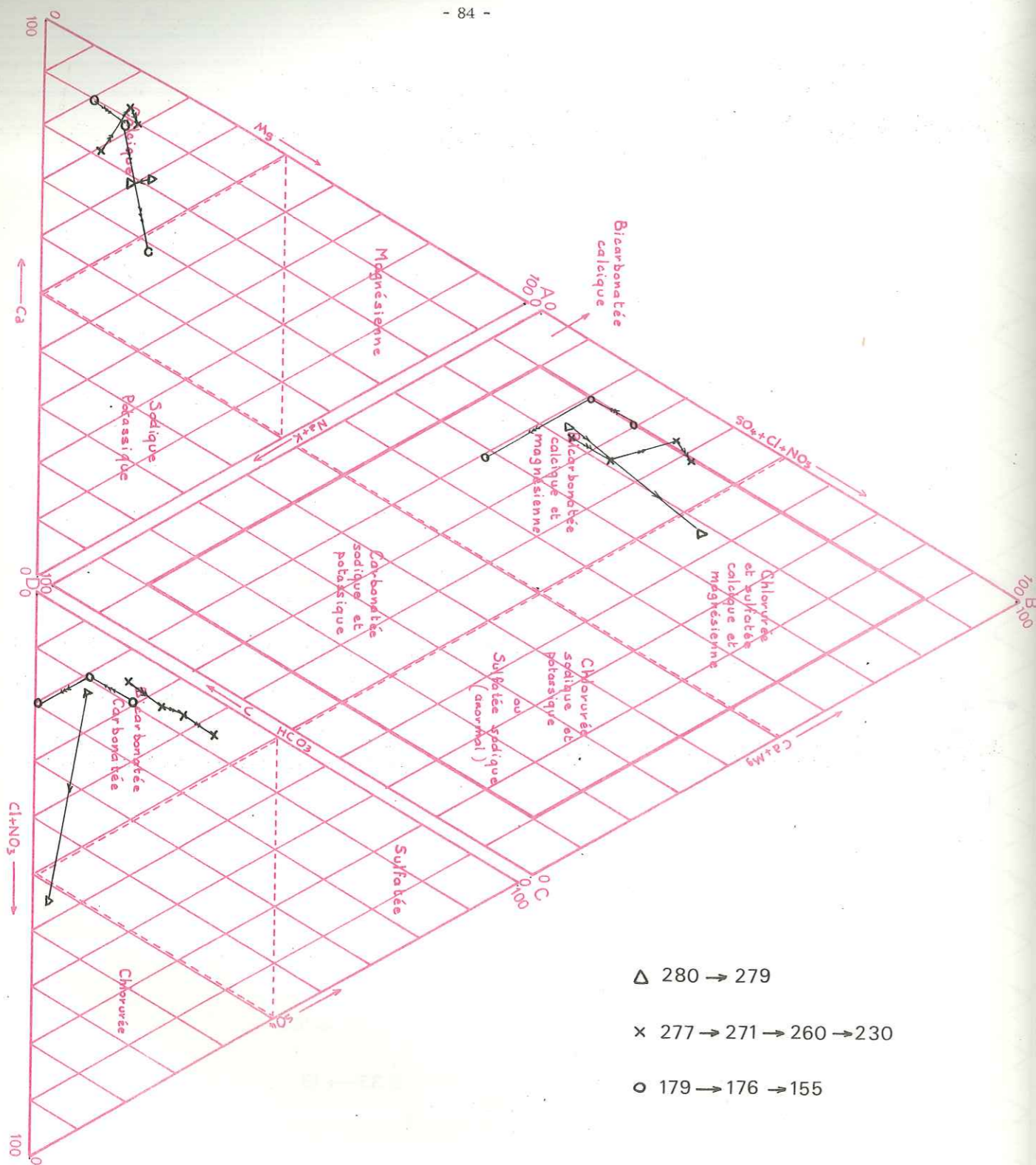
	N 227	N 271	N 260	N 230
r% CO_3H	76,2	65,6	62,6	56,1
r% SO_4^{--}	19,5	27,5	31,2	38,2
pH	7,3	7,20	7,25	7,2
Résistivité	2 500	1 300	1 428	1 240
D H T	22,25	41,4	39,15	45
T A C	18,75	29,75	25	28,25

On remarque dans le triangle des cations que le calcium est cependant pratiquement resté constant et que seuls les alcalins ont franchement diminué. Il y a donc eu précipitation de CO_3Ca mais le stade en Ca^{++} a été maintenu par des échanges de bases avec départ de Na^+ et K^+ .



Evolution chimique de la nappe (HE)

Fig 27



Evolution chimique de la nappe (BE)

Fig 28

La nature et l'amplitude des variations de la composition chimique des eaux pendant leur parcours souterrain, dans le sens de l'écoulement, est illustré par les traits fléchés. Les triangles de base (anions et cations) rendent compte du détail de ces variations.

- Précipitation du $SO_4 Ca$

Dans une nappe, la précipitation du $SO_4 Ca$ intervient après celle du $CO_3 Ca$. Le passage du point N 226 au point N 168 - en hautes eaux - et du point N 179 au point N 155 - en basses eaux - en donne une illustration (fig. 27 et 28). Dans les triangles des ions, on constate la diminution de Ca^{++} et de SO_4^{--} qui s'accompagne d'un accroissement des teneurs relatives en alcalins et en Cl^- . Tous ces phénomènes traduisent une évolution normale par le passage à un faciès chloruré sodique.

- Echanges de bases

L'eau peut échanger des ions alcalins Na^+ et K^+ contre les alcalino-terreux Ca^{++} et Mg^{++} du terrain encaissant, et inversement. Les échanges se traduisent, dans le triangle des cations par des modifications sensibles alors que les anions ne sont pratiquement pas remaniés. Dans le losange ces permutations ioniques se traduisent par un déplacement des points représentatifs suivant une ligne approximativement parallèle à l'axe (Ca + Mg).

Une légère tendance à l'échange de Na^+ contre Ca^{++} du terrain s'observe entre les piézomètres N 33 et N 19 en hautes eaux (fig. 27). Le phénomène inverse semble être en partie responsable de l'évolution des eaux souterraines entre les points N 176 et N 155, en basses eaux.

* Précipitations, mises en solution, échanges de bases conditionnent donc, pour une part, l'évolution chimique des eaux de la nappe. Il faut, en outre, ajouter l'influence des mélanges, les apports étrangers depuis la surface, et les interférences entre chacun de ces facteurs font qu'il est difficile de faire, avec certitude, la part de chaque réaction. Néanmoins, il reste possible, sur de faibles distances, de déterminer le sens de l'évolution de la minéralisation quoique les modifications observées soient généralement peu accentuées.

3.4.2.2.4. - Conclusions et problèmes particuliers

Les analyses et études qui précèdent ont montré que les eaux de la nappe sont, dans leur ensemble, d'assez bonne qualité, malgré une dureté totale parfois élevée, et sans préjuger d'éventuelles contaminations organiques. En effet, certains points d'analyse ont révélé d'assez fortes teneurs en sels ammoniacaux sans autre signe de pollution organique.

Le faciès bicarbonaté calcique prédomine largement, comme dans les eaux de surface, et il ne fait pas de doute qu'un traitement adoucisseur soit obligatoire pour que ces eaux puissent répondre aux exigences industrielles.

La présence de sels de fer en quantité parfois très élevée sur l'ensemble des analyses (jusqu'à 12 mg/l avec une moyenne de 2,4 mg/l) ne semble pas devoir être prise en considération parmi les critères habituels de potabilité. En effet, la présence de sels de fer (Fe^{++}) et de manganèse (Mn^{++}) dans de telles proportions semble liée pour l'essentiel au fait que les pompages ont tous été effectués à l'intérieur de piézomètres métalliques. Dans ces conditions, et malgré les précautions prises quant à la durée des pompages avant prélèvement, il est fort probable que les ions ferreux mis en solution par l'attaque d'eaux agressives subsistent en quantité anormale dans le voisinage des piézomètres ; il devient impossible alors de déterminer la concentration moyenne en sels de fer, qui entre réellement dans la minéralisation de la nappe phréatique.

La distribution du fer dans la nappe telle qu'elle est indiquée par nos analyses ne permet de déceler aucune évolution logique, prouvant par là même qu'elle est désordonnée et sans rapport avec l'évolution d'autres constituants ou caractères physiques tels que teneur en CO_2 libre, agressivité, dureté.

Mentionnons, pour mémoire, les teneurs en Fe^{++} signalées dans les eaux pompées dans diverses stations et destinées à l'alimentation en eau des agglomérations :

- station de captage de Roquemaure : 0,5 mg/l
- station de pompage de Mornas : moins de 0,05 mg/l
- essais de pompage (Piboulette) : 0 à 0,13 mg/l

Notons enfin, et conformément aux observations dynamiques que quelques analyses effectuées à des profondeurs différentes ont montré l'existence d'une seule et même nappe dans la totalité des alluvions. Malgré les différences de perméabilité dans le sens vertical, mises en évidence par les mesures au micromoulinet, il semble donc que les qualités physico-chimiques des eaux se conservent pareilles à elles-mêmes dans leur ensemble, sans que la structure lenticulaire des alluvions soit à l'origine d'évolutions différentielles.

3.5. - INFLUENCE DE L'AMENAGEMENT SUR LA TENUE DE LA NAPPE

La mise en service de l'aménagement risque d'amener des modifications des niveaux piézométriques.

Le niveau de la retenue en exploitation normale (fixé à 35,50 N.G.F. à Saint-Etienne-des-Sorts dépassera de beaucoup, en effet, le niveau naturel du régime semi-permanent (cf. 0.2.). Au droit du barrage les surélévations maximales seront de 9,80 m par rapport au niveau de l'étiage conventionnel et de 2,50 m par rapport au niveau naturel des "plus hautes eaux connues". Comparé aux "moyennes eaux" naturelles le niveau, en exploitation normale, sera rehaussé de 3,50 m à Saint-Etienne-des-Sorts, de 4,50 m à la latitude de Marcoule et de 7,50 m à hauteur de Codolet.

Pour éviter toute remontée dommageable de la nappe au-delà de son niveau moyen actuel, la C.N.R. établira le long des deux rives de la retenue, des contre-canaux dont les eaux s'écouleront par gravité et qui seront mis en communication avec la nappe soit directement par recoupement avec les graviers en place, soit indirectement par des massifs drainants ou des forages de décompression.

Des aménagements particuliers seront prévus :

- en rive droite : dans l'île Saint-Georges, un canal de drainage sera établi en bordure de l'endiguement existant. Les eaux ainsi recueillies seront rejetées dans la retenue par une station de pompage. Les parties basses de la commune de Saint-Etienne-des-Sorts seront remblayées ;

- en rive gauche : les eaux du contre-canal s'écouleront dans la dérivation de l'Aygues pour être rejetées dans le canal de fuite à l'aval de l'usine de Caderousse. Le contre-canal recueillera les débits de servitude limités à 5 m³/s de la rivière de Lez (qui se jetait avant la réalisation de Donzère-Mondragon dans le Rhône, au Nord de Saint-Etienne-des-Sorts), les eaux d'assainissement et de colature des plaines de Mornas, Piolenc et Orange, ainsi que les eaux de débordement éventuel de l'Aygues. Toutes ces eaux s'écouleront dans la déviation de l'Aygues pour être rejetées dans le canal de fuite à l'aval de l'usine de Caderousse.

A l'aval de l'usine les eaux du canal de fuite resteront toujours à un niveau supérieur à celui des basses eaux actuelles et suivront approximativement, pour des débits supérieurs à ce régime, les fluctuations observables avant aménagement.

La tenue de la nappe devrait donc rester très semblable, en moyenne, à ce qu'elle est actuellement en moyennes à hautes eaux au Nord de l'Aygues et jusqu'au secteur de Caderousse, à cause de l'influence des contre-canaux ; et subira les mêmes fluctuations qu'auparavant dans la zone méridionale de la plaine. Un seul secteur sera très probablement défavorisé : celui de l'Ardoise en rive droite. Il faudra peut-être approfondir les puits qui alimentent les importantes usines de ce secteur, ce qui serait parfaitement réalisable eu égard à la grande épaisseur des alluvions aquifères de cette zone (sondages E 1 et E 2 - Pl. 4).

Les qualités chimiques et physiques des eaux souterraines ne devraient pas être altérées par la mise en service de l'aménagement sous réserve de pollutions accidentelles du Rhône. Les seules modifications qui peuvent se produire se feront dans le sens d'une augmentation de la minéralisation totale au voisinage des contre-canaux qui draineront à la fois les eaux de percolation à travers les digues mais aussi celles apportées par la nappe de l'Aygues et qui traverseront la plaine alluviale toujours dans le même sens, soit d'Est en Ouest.

Les cartes piézométriques établies en des périodes différentes (Pl. 6, Pl. 7 et Pl. 8) ont par ailleurs, montré que les variations du niveau piézométrique des nappes qui alimentent la nappe principale sont de faible amplitude (nappe de l'Aygues en rive gauche, et petites nappes de la Tave et de la Cèze en rive droite) (cf. Pl. 9).

Cette constatation, et le fait que le battement du niveau des eaux dans les contre-canaux seront bien inférieurs à ceux actuellement observés dans le Rhône, nous amènent à conclure que les fluctuations du niveau piézométrique après aménagement ne devraient pas être plus importantes que celles qui ont été enregistrées après la mise en eau de l'aménagement de Vallabrègues, au Sud d'Avignon, (1 m) (cf. J.L. ARNAUD). De plus, le fait que la nappe est presque toujours en charge sous les couches limoneuses permet de penser que les limons ne seront pratiquement jamais dénoyés et qu'ainsi les cultures n'auront pas à souffrir des variations de la frange capillaire.

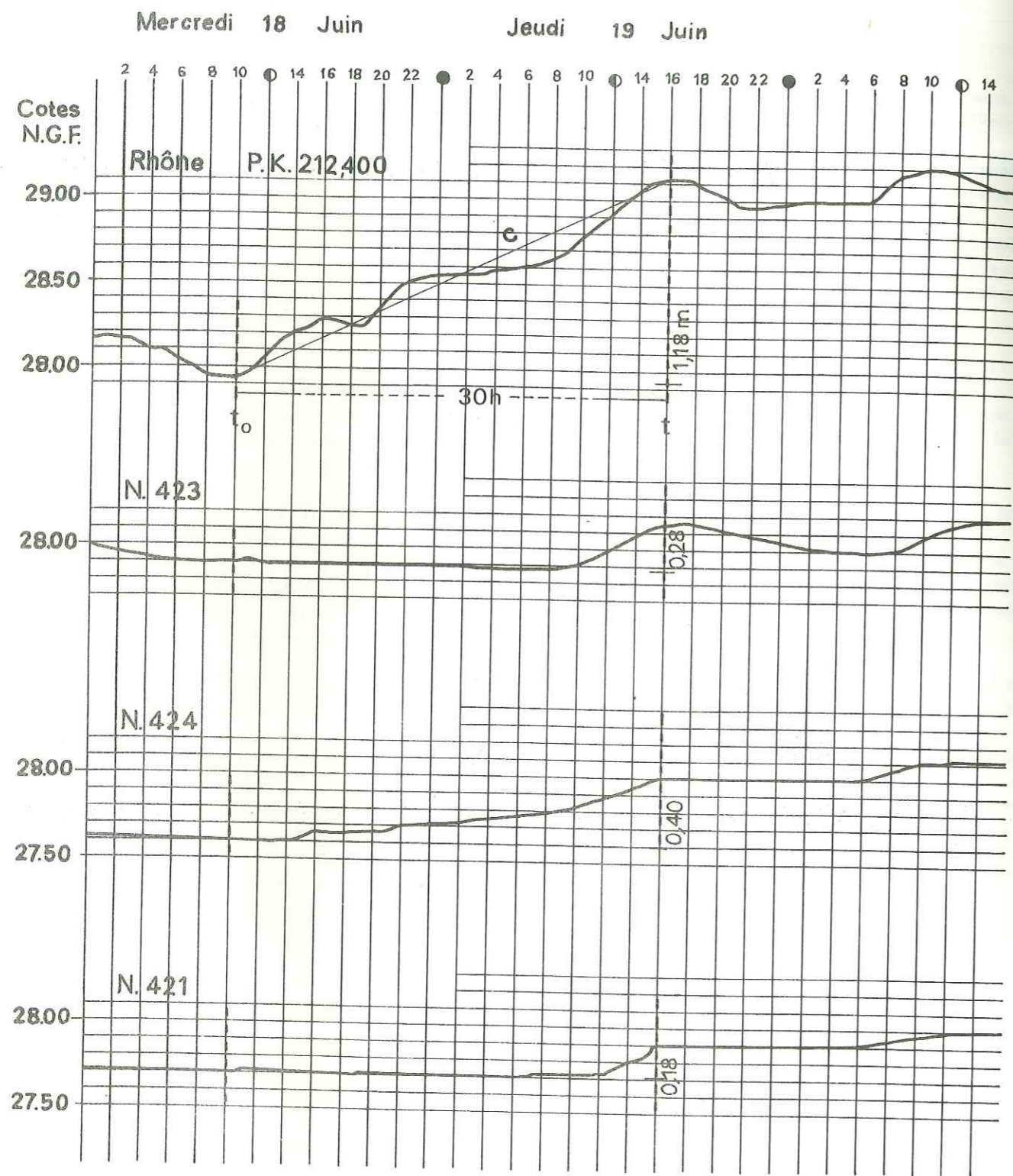


Fig.30 - Variations comparées, du Rhône et de la nappe

La courbe représentative de la crue du Rhône (entre le 11 juin, 10 h et le 19 juin, 16 h) est assimilée à une droite de coefficient angulaire c . Les piézographes enregistrent l'onde de crue, d , diminuée de l'amortissement proportionnel à l'éloignement des berges, avec un retard variable.

CHAPITRE 4 - CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES DE L'AQUIFERE

4.1. - ETUDE HYDRODYNAMIQUE DES "GRAVIERS" DE LA PIBOULETTE

Dans le cadre des études préliminaires du site de la Piboulette, la C.N.R. avait effectué - dans la première semaine de juillet 1969 - deux essais de pompage, l'un situé à l'emplacement de l'usine projetée, l'autre à l'emplacement du barrage - nous en avons retiré les indications et les éléments nécessaires à l'étude qui suit.

Plutôt que de procéder à l'interprétation de ces essais de pompage, ce qui avait été fait selon les méthodes habituelles par la C.N.R. nous avons préféré décrire une méthode de calcul différente du coefficient de perméabilité d'un aquifère. Ne nécessitant aucun pompage cette méthode particulière est essentiellement fondée sur l'observation des fluctuations relatives du niveau de la nappe et du plan d'eau qui l'alimente. Elle repose sur l'hypothèse suivante ; dans le cas d'un cours d'eau en intercommunication libre avec sa nappe alluviale, toute variation d'altitude positive, de la surface des eaux libres, se répercute à plus ou moins brève échéance et jusqu'à une distance variable de la berge sur la surface piézométrique de la nappe alluviale. L'analyse théorique des relations hydrologiques existant entre le cours d'eau et sa nappe alluviale devrait donc permettre la détermination des caractéristiques hydrologiques de l'aquifère, et, en particulier de son coefficient de perméabilité.

Nous avons donc exploité le dispositif mis en place à l'occasion des essais de pompage afin de connaître, avec la précision souhaitable, les variations piézométriques et les fluctuations du Rhône au cours de la période choisie, enregistrées les unes et les autres au moyen de limnigraphes ou de piézographes.

4.1.1. - Le régime du Rhône

Disposant de relevés limnigraphiques continus s'étendant sur une durée d'un mois avant les premiers pompages nous avons pu choisir, en fonction de l'ensemble des conditions requises, l'époque la plus favorable pour effectuer ces calculs.

Indépendamment des conditions de validité habituelles en hydrodynamique, que nous rappellerons avant l'exposé théorique de cette méthode, il était nécessaire d'éliminer ou d'éviter, dans la mesure du possible, toute complication du phénomène naturel. Sur l'ensemble des relevés limnigraphiques disponibles avant le début des essais de pompage, il nous fallait utiliser une hausse brutale et importante du Rhône, précédée, autant que possible, d'une période de relative stabilité. Dans le même temps, le profil d'équilibre de la nappe ne devait pas montrer de variations importantes.

Toutes ces conditions se trouvaient remplies de façon acceptable les 18 et 19 juin 1969, où l'on observait, au P K 212, 400, une hausse du Rhône de 1,18 m en une trentaine d'heures alors que depuis le début du mois l'amplitude des battements mesurés n'avait jamais dépassé 0,40 m. Nous avons assimilé la courbe de concentration de l'hydrogramme de crue à une droite (fig. 30), de sorte que sa fonction représentative puisse s'exprimer simplement ; une telle approximation ne semble pas exagérée au vu de l'allure générale de cette courbe.

4.1.2. - Le dispositif d'observation de la nappe

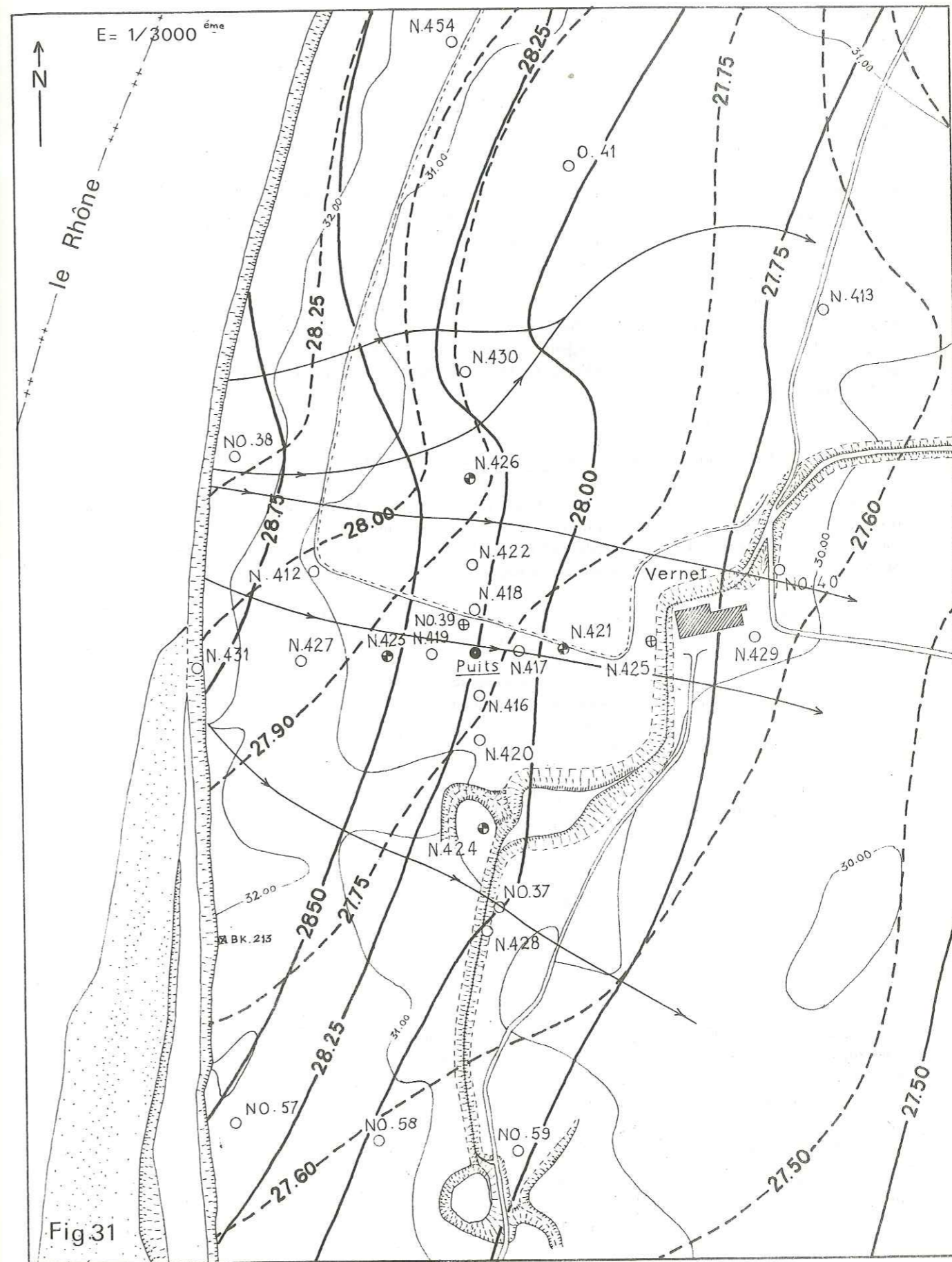
La figure 31 montre le plan de la station d'essais. Le puits, foré pour les essais de pompage, se trouve au centre de la station ; les piézomètres sont implantés suivant quatre axes rayonnants perpendiculaires entre eux et ayant pour

Relevés piézométriques

	18 Juin Cote NGF de la nappe	19 Juin Cote NGF de la nappe	Accroissement
Puits	27.78	28.19	0.41
N.412	27.95	28.61	0.66
N.413	27.65	27.72	0.07
N.416	27.77	28.16	0.39
N.417	27.73	28.05	0.32
N.418	27.83	28.27	0.44
N.419	27.85	28.39	0.54
N.420	27.74	28.12	0.38
N.421	27.68	27.91	0.23
N.422	27.86	28.32	0.46
N.423	27.88	28.51	0.63
N.424	27.69	28.07	0.28
N.425	27.64	27.81	0.17
N.426	27.93	28.38	0.45
N.427	27.92	28.62	0.68
N.428	27.64	27.95	0.31
N.429	27.62	27.71	0.09
N.430	27.88	28.19	0.31
N.431	27.94	28.78	0.84
N.454	28.03	28.35	0.32
NO.37	27.68	28.02	0.34
NO.38	28.32	28.83	0.51
NO.39	27.83	28.30	0.47
NO.40	27.65	27.67	0.02
NO.57	27.67	28.43	0.76
NO.58	27.59	27.99	0.40
NO.59	27.57	27.76	0.19

Légende de la Fig-31

- Courbes isopièzes du 18 Juin
- - - - - 19 Juin
- ⊕ Piézographe
- ⊕ Mesures au micro-moulinet



origine commune l'axe de l'ouvrage. Deux de ces rayons sont perpendiculaires au sens de l'écoulement de la nappe, et dans le cas particulier qui nous intéresse, grossièrement parallèles, en même temps, à la berge du Rhône. Les deux autres axes alignés sont, en conséquence, normaux à la berge.

Nous ne nous préoccupons ici que des piézomètres équipés de piézographes ; ils sont au nombre de quatre mais nous n'avons pu utiliser que les relevés de trois d'entre eux : le N 423, le N 421 et le N 424. Le limnigraphe installé sur la berge du Rhône se trouve 450 m environ à l'amont du puits, au P K 212,400.

La figure 30 représente les variations comparées du Rhône et de la nappe au cours des journées du 18 au 20 juin 1969.

Des relevés piézométriques portant sur l'ensemble du dispositif nous ont permis de dresser deux cartes en courbes isopièzes intéressant la même période. Elles sont représentées, superposées, figure 31. De l'examen de ces cartes on tire les conclusions suivantes : tout d'abord, que la nappe au cours de la période étudiée, est effectivement alimentée par les eaux du Rhône ; le profil de dépression de la surface piézométrique est de forme hyperbolique ; de façon générale la concavité des courbes isopièzes est orientée vers l'amont et les lignes de courant divergent depuis les berges du fleuve, l'écoulement se faisant d'Ouest en Est. D'autre part, la carte du 19 juin montre un front d'alimentation, au niveau de l'axe portant les piézomètres N 423 et N 421, pratiquement normal à cet axe et parallèle à la berge du fleuve. Situés sur une même ligne de courant les piézomètres N 423 et N 421 sont "alimentés" de la même manière et leur piézographes inscrivent bien, à des temps successifs, l'avance du flux, sans l'effet parasite d'apports convergents. En outre, à l'emplacement de la station d'essais, les lignes équipotentielles, parallèles entre elles, semblent révéler une certaine homogénéité des caractéristiques hydrologiques de l'aquifère.

4.1.3. - Coupe géologique au droit de la station d'essais

Elle est représentée figure 32, orientée suivant l'axe W-E de la station, dans le sens de l'écoulement. On remarquera que la nappe est faiblement en charge sous l'épais manteau quasi-imperméable des limons ; et que le substratum est très irrégulier, ce qui ne devrait pas avoir une très grande influence sur les variations de la surface piézométrique, compte tenu de l'épaisseur de la nappe.

Lors du fonçage du puits d'essais, une coupe complète de la couche alluviale a pu être établie :

- de 0 à 2,00 m : terre végétale et sablons limoneux
- de 2,00 à 5,00 m : sable limoneux
- de 5,00 à 7,00 m : galets, gravier et sable

La composition granulométrique approximative est la suivante :

- Sable (de 0,1 à 2 mm) : 29 %
- Gravier (de 2 à 20 mm) : 24 %
- Galets (de 20 à 50 mm) : 35 %
- " (de 50 à 100 mm) : 12 %
- de 7,00 à 10,00 m : gros galets, gravier et sable ; avec :
 - Sable : 30 %
 - Gravier : 26 %
 - Galets (de 20 à 50 mm) : 18 % à 11 %
 - " (de 50 à 100 mm) : 26 % à 33 %
- de 10,00 à 11,50 m : sable, gravier et petits galets.

4.1.4. - Exposé théorique

On dispose de la loi de Darcy, qui impose un écoulement en régime laminaire, un milieu homogène et isotrope. Nous admettons que ces conditions sont remplies et que les vitesses et la pente de la nappe lui demeurent compatibles (pente moyenne faible : 1 pour 1000). D'autre part, les variations de la surface piézométrique sont faibles par rapport à sa hauteur totale (0,40 m au maximum pour 8,80 m).

Sous sa forme générale la loi de Darcy s'écrit :

$$\vec{V} = K \cdot \vec{i} \text{ soit } \vec{V} = K \cdot \vec{\text{grad}} H$$

ou encore :

$$\vec{q} = T \cdot \vec{\text{grad}} H \quad (1)$$

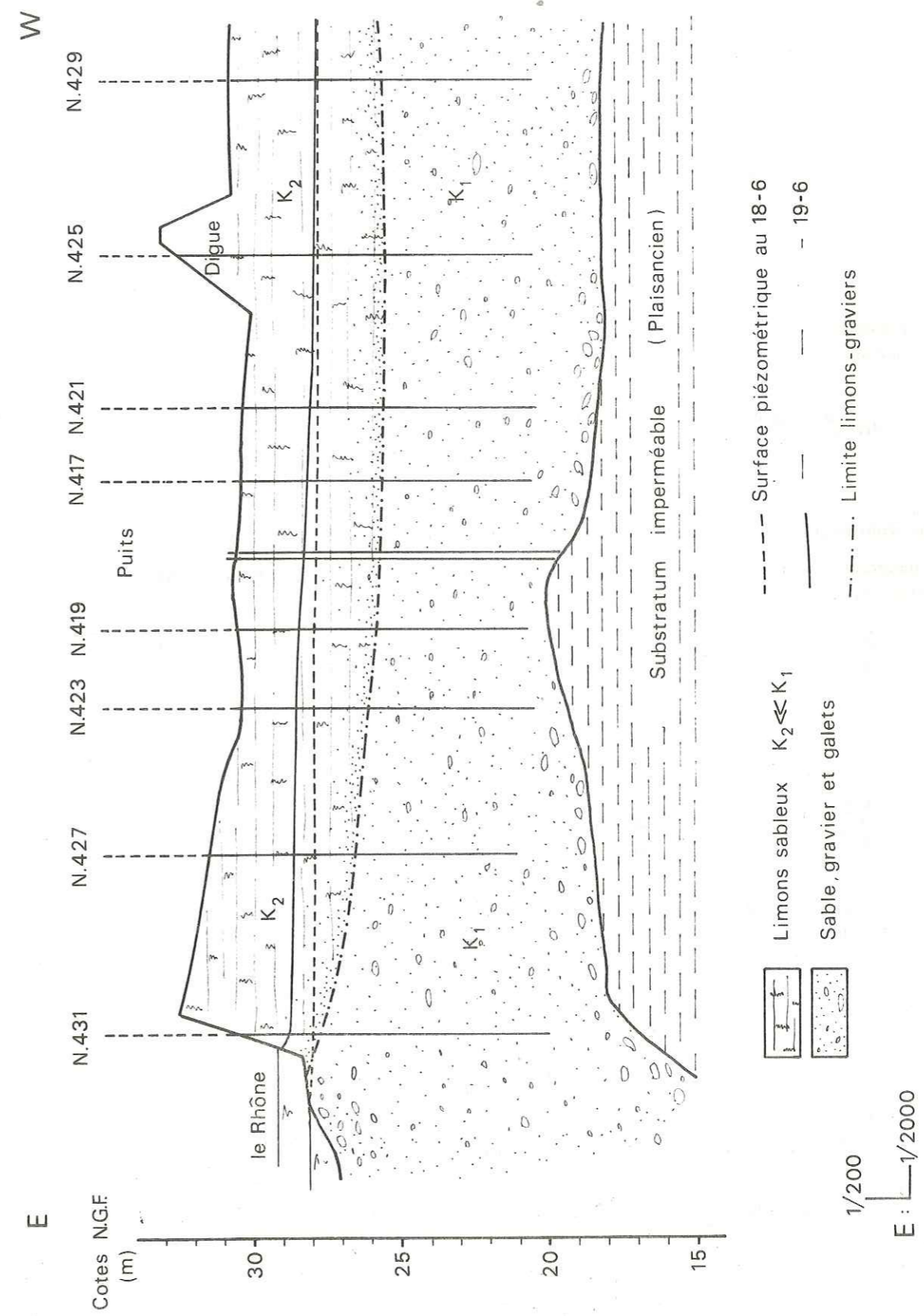


Fig.32 - Coupe géologique E-O au droit de la station d'essais -

A la loi de Darcy ainsi exprimée on superpose l'équation de continuité :

$$\text{div } \vec{q} = \frac{\partial V}{\partial t}$$

$$\text{d'où : } \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = \frac{\partial V}{\partial t} \quad (2)$$

L'équation (1) signifie que dans les trois dimensions on a :

$$\vec{q} = T \cdot \text{grad } H \iff \begin{cases} q_x = T \cdot \frac{\partial H}{\partial x} \\ q_y = T \cdot \frac{\partial H}{\partial y} \\ q_z = T \cdot \frac{\partial H}{\partial z} \end{cases}$$

La superposition de la loi de Darcy et de l'équation de continuité donne donc, en remplaçant q_x , q_y et q_z par leurs expressions :

$$\text{div } \vec{q} = \frac{\partial V}{\partial t} = T \cdot \left(\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

Nous avons vu précédemment que la pente de la nappe ($\frac{\partial^2 H}{\partial z^2}$) peut être négligée et que les courbes isopièzes montrent l'absence de pente suivant l'axe des Y, orthogonal au sens de l'écoulement dans le plan horizontal ; nous écrirons donc :

$$\frac{\partial V}{\partial t} = T \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \quad (4) \text{ soit encore, puisque } \frac{\partial V}{\partial t} = S \cdot \frac{\partial H}{\partial t} :$$

$$S \cdot \frac{\partial H}{\partial t} = T \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial x^2}$$

d'où :

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = \frac{S}{T} \cdot \frac{\partial H}{\partial t} \quad (5)$$

avec :

S = coefficient d'emmagasinement

T = transmissivité de l'aquifère

H(x, t) = hauteur piézométrique de la nappe à une distance x de la berge et au temps t compté par rapport au niveau et temps origines.

Les conditions aux limites sont les suivantes :

$$t = 0 \text{ au début de la crue du Rhône avec } h(x, 0) = 0 \implies \frac{\partial H}{\partial x} = 0$$

A l'infini le mouvement est totalement amorti :

$$x \rightarrow \infty \implies h(x, t) = 0$$

La variation du niveau du fleuve est une fonction linéaire du temps :

$$h(0, t) = f(t)$$

On résout l'équation différentielle (5) par les transformées de Carson-Laplace, et il existe une solution dans deux cas particuliers :

- lorsque le fleuve subit une hausse instantanée Δh ,

on a :

$$h(x, t) = \Delta h \cdot \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^U e^{-u^2} \cdot du \right)$$

où :

$$U = \frac{x}{2} \cdot \sqrt{\frac{S}{T \cdot t}}$$

avec :

x = distance en mètres de la berge au point d'observation de la nappe, mesurée dans le sens de l'écoulement général, indiqué par l'allure des courbes isopièzes.

t = temps en secondes correspondant à une augmentation d'altitude Δh du cours d'eau.

$$\left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^U e^{-u^2} \cdot du \right) \text{ s'appelle "fonction d'erreur" et s'écrit : erf } \cdot U$$

1-erf $\cdot U = \text{erf c} \cdot U$ "fonction d'erreur complémentaire"

On écrira donc :

$$h(x, t) = \Delta h \cdot \text{erf c} \cdot U$$

La fonction erf $\cdot U$ est tabulée pour les valeurs de U comprises entre 0,01 et 5,00.

- la variation Δh du fleuve est linéaire dans le temps, avec un coefficient angulaire c :

$$\Delta h = f(t) = c \cdot t$$

et on a :

$$h(x, t) = c \cdot \int_0^t \text{erf c} \cdot U \cdot dt$$

$$h(x, t) = ct \cdot \left(1 - \frac{4}{\sqrt{\pi}} \cdot \text{int } f \cdot U \right) \quad (6)$$

Int $f \cdot U$ étant le résultat de l'intégration de 0 à t de erf c.U. La fonction int $f \cdot U$ est tabulée pour des valeurs de U comprises entre 0 et 0,42.

Ces équations restent applicables à une nappe en charge ou à une nappe à surface libre dont les variations sont peu importantes par rapport à son épaisseur.

4.1.5. - Applications numériques

Comme nous l'avons écrit plus haut les applications numériques ont porté sur les piézomètres N 423, N 421 et N 424.

La crue du Rhône, amenant une hausse de 1,18 m, s'étend sur 30 heures, soit $108 \cdot 10^3$ s, à partir du 18 juin à 10 heures. Cette valeur de t, avec la même origine t_0 , sera conservée dans tous les cas de figure.

4.1.5.1. - Variations comparées du Rhône et du N 423

Appliquons l'équation (6) à ces variations :

$$h_{(x, t)}^{N 423} = c \cdot t \cdot \left(1 - \frac{4}{\sqrt{\pi}} \cdot \text{int } f \cdot U \right)$$

avec :

$$c = \frac{\Delta h}{t} \quad \text{et} \quad U = \frac{x}{2} \cdot \sqrt{\frac{S}{T \cdot t}}$$

où :

$$x = 114 \text{ m}$$

De t_0 à t le piézographe N 423 traduit une augmentation de 0,28 m de la charge de la nappe en ce point, liée à une hausse du Rhône de 1,18 m ; pour tenir compte de l'amortissement de l'onde de crue souterraine (estimée à 8 % de son amplitude) on prendra :

$$h_{(x, t)}^{N 423} = 0,30 \text{ m}$$

On trouve ainsi :

$$\left(1 - \frac{4}{\sqrt{\pi}} \cdot \text{int } f \cdot U \right) = 0,254$$

et la table donne alors :

$$U = 0,535$$

d'où :
$$U = 0,535 = \frac{114}{2} \cdot \sqrt{\frac{S}{T \cdot 108 \cdot 10^3}}$$

et on obtient :
$$\frac{S}{T} = 9,51$$

Avec $H = 9,20$ m (hauteur piézométrique au N 423) et un coefficient d'emmagasinement S compris entre 12 % et 20 % (valeur approximative de la porosité efficace des alluvions aquifères), on trouve comme valeur du coefficient de perméabilité :

$$1,4 \cdot 10^{-3} \text{ m/s} < K < 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

4.1.5.2. Variations comparées du Rhône et du N 421

On connaît :

$$x = 215 \text{ m} ; h_{(x,t)}^{N 421} = 0,18 \text{ m} ; U = 0,706$$

On trouve :

$$\frac{S}{T} = 4,71, \text{ et, avec } H = 9,70 \text{ m} :$$

$$2,8 \cdot 10^{-3} \text{ m/s} < K < 4,8 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

4.1.5.3. - Variations comparées du Rhône et du N 424

Avec :

$$x = 164 \text{ m} ; h_{(x,t)}^{N 424} = 0,40 \text{ m} ; U = 0,43$$

On trouve pour $H = 9,20$ m :

$$4,6 \cdot 10^{-3} \text{ m/s} < K < 7,6 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

4.1.5.4. - Variations comparées des piézomètres N 423 et N 421

Nous avons vu que l'alimentation de la nappe se fait partant du Rhône, suivant un front quasiment parallèle à la berge et progressant dans le sens de l'axe est-ouest de la station d'essais (fig. 31). Les lignes de courant conservant la même direction pendant toute la traversée de la station, nous pouvons légitimement imaginer, à l'instant où l'onde de crue parvient au piézomètre N 423, que l'équipotentielle qui le traverse représente un niveau d'une surface liquide fictive, qui elle-même alimenterait, dès lors, la nappe, en direction du piézomètre N 421. Une hausse de 0,28 m en 7 heures, soit 25 200 s (temps mesuré au N 423), de ce niveau d'eau imaginaire entraînerait donc une augmentation de 0,18 m du niveau de la nappe 100 m à l'aval, au N 421.

La même méthode de calcul est applicable, avec comme nouvelles conditions aux limites :

- $t = 0$ au début de la hausse enregistrée au N 423, d'où :

$$h_{(x,0)}^{N 423} = 0 \text{ et } h_{(0,t)}^{N 423} = f.(t) = c'.t$$

avec :

c' = coefficient angulaire de la droite représentative de la hausse enregistrée au N 423 à partir du temps $t = 0$.

On aura donc, au piézomètre N 421 :

$$h_{(x,t)}^{N 421} = c'.t \left(1 - \frac{4}{\sqrt{\pi}} \cdot \text{int } f.U \right)$$

avec :

$$U = \frac{x}{2} \cdot \sqrt{\frac{S}{T \cdot t}} \quad \text{où } \begin{matrix} t = 25\,200 \text{ s} \\ x = 101 \text{ m} \end{matrix}$$

On trouve :

$$3,9 \cdot 10^{-2} \text{ m/s} < K < 5 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$$

Cette valeur de la perméabilité, calculée entre les piézomètres N 423 et N 421, est environ dix fois supérieure à la moyenne obtenue par les comparaisons entre le Rhône et chaque piézomètre étudié. Cet écart pourrait être dû, toutes choses égales par ailleurs, à un colmatage de la berge. L'influence du colmatage éventuel ne se faisant pas sentir dans ce dernier cas, les valeurs obtenues doivent être considérées comme plus proches de la réalité que les précédentes, au moins en ce qui concerne le sous-sol de la station d'essais.

Il est bien difficile, au demeurant, de faire la part relative des colmatages, de l'hétérogénéité des alluvions et des irrégularités du substratum dans la différence des résultats ; notons, tout au plus, que chacun de ces paramètres doit y concourir.

4.1.6. - Résultats obtenus par d'autres méthodes

Selon les essais de pompage effectués dans cette même station d'essais :

$$\begin{matrix} 4 \cdot 10^{-3} \text{ m/s} < K < 8 \cdot 10^{-3} \text{ m/s} \\ 3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s} < T < 6 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s} \end{matrix}$$

Les mesures de vitesse au micromoulinet dans les piézomètres N 425 et NO 39 indiquent, pour les cinq premiers mètres de l'aquifère :

$$1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s} < K < 7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

avec une valeur moyenne de :

$$K = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

Tous ces résultats sont bien comparables à ceux que nous avons obtenus, résumés à leur valeur moyenne ; $K = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$, exception faite de la forte perméabilité trouvée dans le dernier cas de figure.

4.1.7. - Avantages et inconvénients de la méthode

Le premier avantage est, à priori, d'ordre économique puisqu'il suffit de quelques piézomètres équipés de piézographes pour pouvoir déterminer la valeur du coefficient de perméabilité en des périodes différentes et autant de fois que nécessaire sans devoir déplacer à plusieurs reprises une équipe et un matériel important.

De plus, il est possible, en répartissant les piézographes suivant les besoins, de déterminer le coefficient de perméabilité moyen sur une grande étendue et d'éliminer ainsi les inconvénients éventuels des essais trop ponctuels par pompage.

En revanche cette méthode de calcul ne peut être appliquée dans les conditions fixées en introduction qu'à proximité d'un cours d'eau ou d'une étendue d'eau à surface libre, ce qui limite considérablement son utilisation.

4.2. - AUTRES MESURES SUR LES ALLUVIONS AQUIFERES

4.2.1. - Essais de pompage

Quelques essais de pompage ont été effectués en divers points de la vallée par les industriels ou par certaines communes :

- ARDOISE : $5,4 \cdot 10^{-3}$ m/s
- ROQUEMAURE (La Roche) : $2,2 \cdot 10^{-3}$ m/s
- MORNAS (syndicat R.A.O.) S 16 : $1,8 \cdot 10^{-3}$ m/s

4.2.2. - Mesures de vitesse au micromoulinet

Outre les mesures effectuées sur les deux sites de la Piboulette, la C.N.R. a fait procéder à deux autres séries de mesures de vitesse pour étude de la station de pompage de Mornas (Syndicat des eaux R.A.O.) située à proximité du Rhône à la latitude de Mornas.

Les résultats obtenus sur les sondages 0.42 et 0.10 sont les suivants :

- 0.42 : perméabilité très faible sur les quinze premiers mètres de l'aquifère et
K = $1,6 \cdot 10^{-3}$ m/s entre 20 et 30 m de profondeur.
- 0.10 : très peu perméable sur les 11 premiers mètres
K = $17 \cdot 10^{-3}$ m/s entre 13 et 19 m de profondeur.

Ces valeurs différentes et l'hétérogénéité des résultats à l'intérieur d'un même sondage mettent bien en relief la structure lenticulaire des alluvions.

CONCLUSIONS GENERALES

La reconnaissance géologique précise du substratum des alluvions récentes ne pouvait être menée à bien sans la connaissance préalable de la géologie régionale et des massifs de bordure.

L'exploitation bibliographique des nombreuses publications traitant de la stratigraphie régionale a été entreprise dans ce but et fut doublée du levé de la carte géologique des bordures afin d'aider à l'identification des faciès qui pouvaient être rencontrés par sondage. Les formations crétacées qui s'échelonnent du Barrémien au Santonien constituent la quasi-totalité des reliefs, et seuls quelques témoins de transgressions miocène et pliocène les recouvrent localement. En revanche, la reconnaissance du substratum a montré l'extension très importante des marnes plaisanciennes sous les alluvions et leur épaisseur certainement considérable (plus de 200 m).

Les niveaux datés du Vraconien-Albien, devront faire l'objet d'analyses plus complètes dans le cadre d'une étude stratigraphique précise, qui sortait un peu des objectifs poursuivis dans ce travail.

Les ouvrages principaux devant être fondés sur les marnes plaisanciennes, une étude géotechnique a été effectuée qui a montré qu'on pouvait s'attendre à quelques mouvements de décompression en cours de fouille et de tassement en fin de chantier. Les autres formations du substratum n'interviennent pas dans les travaux, sauf en de rares points du tracé des canaux.

L'étude hydrogéologique a permis de retrouver les caractéristiques classiques des nappes liées aux alluvions récentes du Rhône.

On retrouve là, en effet, l'influence prépondérante des fluctuations du Rhône ; la nappe d'accompagnement de l'Aygues joue cependant un rôle non négligeable, surtout en période d'étiage du fleuve. A cause de l'imperméabilité relative des limons de débordement et de l'influence considérable du Mistral, les infiltrations depuis la surface se sont avérées négligeables.

Les études physico-chimiques ont permis de déterminer les zones d'influence réciproque des différentes alimentations. Elles ont, en outre, mis en évidence les apports d'eaux peu minéralisées qui circulent dans les niveaux sableux du Coniacien terminal et ressortent dans la nappe en rive gauche, à la latitude de Piolenc notamment. Les eaux souterraines sont en majorité carbonatées, calciques et magnésiennes.

Les alluvions récentes, intervenant dans le programme de l'aménagement à des titres divers, ont fait l'objet de mesures de perméabilité par une méthode originale qui a apporté des résultats acceptables et comparables à ceux obtenus par les méthodes classiques.

Cette étude nous a permis de mettre en pratique diverses techniques, traditionnelles ou situées à la frontière du domaine de l'ingénieur, nécessaires à la compréhension des divers phénomènes observables et qui interviennent dans l'étude d'un aménagement hydroélectrique.

ANNEXE I.

RESULTATS DES ANALYSES DU 9 - 10 MARS 1970

N°	DHT	TAC	Résistivité	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	CO ₃ H ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	NO ₃ ⁻	R ¹	R ²	R ³
3	30,6	30	1520	98	14,9	11,6	1,41	366,1	30,33	58	0,8	2,91	1,39	3,20
12	17,6	13,75	2710	49	13	9	2,1	167,8	23,76	35	1	1,96	1,09	8,02
19	41,6	20,25	1390	147,6	10	11,6	3,2	247,1	31,95	150	34	1,01	3,44	14,69
33	38,65	23	1295	135	11,9	24	36	280,7	35,50	145	80	1,15	3	3,92
36	20,95	17,7	2620	70,6	8,1	6,6	1,1	216,6	5,33	28	1	4,86	3,86	13,1
47	13,90	9,75	3430	52	2,2	9	0,7	119	17,04	44	6,8	1,39	1,91	6,78
65	38,8	28,5	1670	142	7,9	10,6	1,3	347,8	23,08	95	15	2,15	3,07	15,83
77	18	13,75	3030	63,2	5,3	9,6	0,04	167,8	16	36	2,2	2,29	1,66	7,82
85	19	16	2910	56,4	11,8	9,8	1,2	195,20	17,75	23	1	3,26	0,96	8,26
92	26,20	20,25	2220	97,6	4,3	8,4	0,5	247,13	19,5	33	6,40	3,26	1,25	14,16
102	25,65	23,25	2070	81	13	12,4	1,7	283,74	14,9	30	5,4	4,47	1,47	8,84
113	28,9	22,25	2030	106	5,8	7,8	2,2	271,5	16,7	50	6,8	2,94	2,21	14,45
121	18,80	17,75	3070	62,4	7,7	5,6	2,6	216,6	11,7	7	1	7,55	0,42	12,13
130	10,6	7,5	4285	27,2	9,2	0,37	3,1	91,53	23,40	16	1,6	1,51	0,5	4,71
144	15,45	12,25	3260	43	11,4	10,8	2,9	149,49	28,8	15	1	2,18	0,38	6,57
168	13,25	13,75	3390	39	8,5	8	7	167,8	17	8	1,2	4,23	0,35	4,01
226	25,8	20,25	2220	86,8	9,9	10,4	2,1	247,13	11	54	1,4	2,83	3,61	12,9
233	37	28,25	1725	114	20,7	10,4	2	344,8	17,75	76	1,4	2,72	3,16	14,8
240	14,4	11,25	3320	45,6	7,2	9	2	137,3	29,8	15	1	1,95	0,37	6,54
257	18,80	15,75	2640	52	14	14,4	2,2	192,2	24,5	30	1,2	2,40	0,9	5,53
289	19,4	16,75	2850	63,2	8,8	9,8	1,7	204,4	12,4	30	1	3,45	1,77	8,25
304	30,25	22,25	2030	105	9,7	11,2	2,2	271,5	11,4	70	9,2	2,5	4,56	13,15
316	32,3	28,5	1810	116,4	7,7	11,2	2,2	347,8	13,85	37	1,6	4,91	1,97	11,96
338	24,2	18,5	2300	76,2	12,5	15,6	2,6	225,8	23,1	62	1,4	1,89	2	6,44
358	20,9	19	2310	68	9,4	12,4	8,5	231,9	16	30	0,8	3,55	1,37	5,50
375	40,75	27,25	1550	149	8,6	9,8	1,7	332,5	29,52	78	40	2,22	1,95	17,34
386	22,2	16,25	2430	82	4,1	9,2	7	198,3	18,1	36	2,6	2,57	1,47	7,65
507	49,60	34	1335	167	19	16,8	1,8	414,9	22,7	150	12,8	1,8	4,89	12,88

ANNEXE II

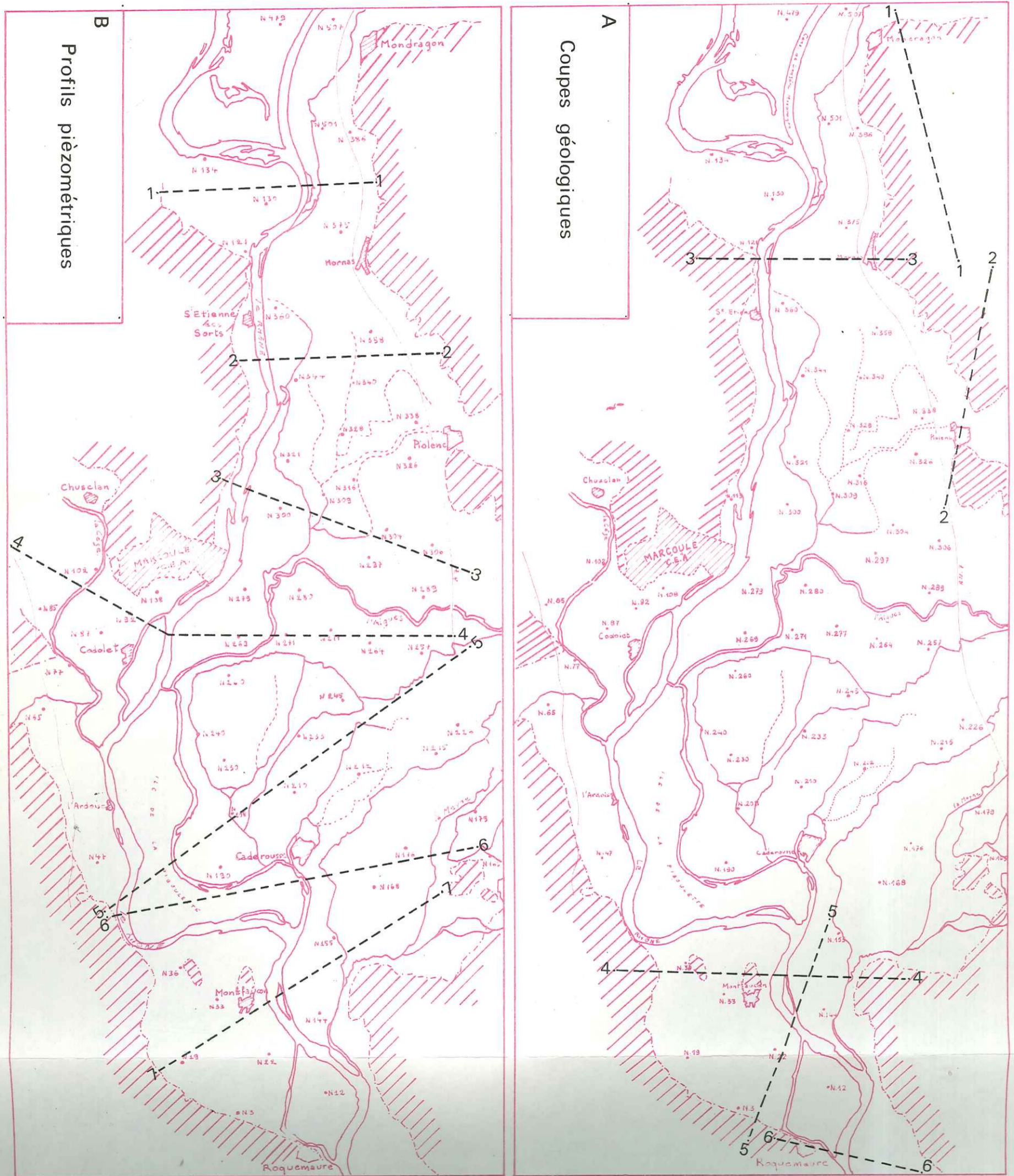
RESULTATS DES ANALYSES DU 16-18 JUIN 1970

N°	DHT	TAC	Résistivité	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	CO ₃ H ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	NO ₃ ⁻	R1	R2	R3
22	20,20	12	2430	52,4	17,3	18	3,5	146,4	25,9	80	4	1,00	2,26	4,64
87	32,30	22,25	1760	120	5,6	10,4	1,1	271,5	30,6	65	16	2,01	1,57	13,56
108	25,4	19,25	2110	92	5,8	12,8	2,5	234,9	20,9	50	14	2,34	1,78	8,19
134	8,10	8	4990	24	5,1	8,6	3,7	97,6	15,3	6	0,8	2,90	0,27	3,52
155	10,5	12	3810	28	8,5	19,2	4,2	146,5	19,2	4	0,6	3,87	0,15	2,23
165	23,2	16,25	2335	82	6,6	10,6	1,5	198,3	21,7	59	2,2	1,74	2,04	9,28
176	22,45	19,75	2230	73	10,2	10,6	2,6	241	13,9	30	2,2	3,99	1,53	8,47
179	32,6	25	1680	114	9,9	14	3,4	305,1	16,4	71	11,2	2,55	3,26	9,45
190	26,3	20,25	1966	76	17,8	16	3,3	246	23,10	85	1,2	1,66	2,73	6,74
208	27,35	20,50	1880	77	19,7	15,6	5,2	250	23,10	75	0,8	1,86	2,38	6,67
210	11,4	13,5	3266	32	8,2	9,6	3,3	164,7	20,9	7	1	3,7	0,24	4,56
212	19,35	15,5	2778	63	8,7	8,8	1,9	189,2	10,6	45	1	2,48	3,16	9,00
215	18,5	15,25	2910	60	8,4	9	2,1	186,1	10,6	26,5	0,8	3,59	1,83	8,4
230	45	28,25	1240	140	24,6	20,8	2,9	344,7	19,5	185	1,2	1,28	7,00	9,3
245	21,1	16,75	2640	70	8,7	9,4	1,8	204,4	7,8	48	0,8	2,74	4,54	9,37
260	39,15	25	1428	125	19,2	14	2	305	16,7	120	1,5	1,68	5,31	1,2
264	24,3	20	2120	80	10,5	10,2	10,5	244	11,4	55	5,2	2,72	3,59	6,57
269	13,15	13,25	3630	29	14,3	10,8	3,4	161,7	6,7	16	1	5,09	1,73	4,7
271	41,4	29,75	1340	130	21,6	15,2	3,6	363,1	21,3	120	0,6	1,99	4,16	11,04
277	22,25	18,75	2500	75	8,6	9	2,1	228,8	7,1	46	0,8	3,23	4,80	7,53
279	7,3	4	5350	22	4,4	8,2	2,1	48,8	34,1	4	0,8	0,77	0,08	3,65
280	12	10,75	4100	34	8,5	9,4	2,6	131,2	12,4	18	1,2	2,98	1,06	5,1
297	24,2	19,75	2200	82	9	9,2	2,7	241	12,8	46	6,8	2,99	2,66	10,52
300	27,9	21	1851	90	13,1	15,6	3,1	256,3	19,2	75	4,4	2,01	2,87	7,44
306	12,85	10,25	3992	43	5,1	7	2,2	125,1	12,8	20	2,8	2,63	1,16	7,34
309	13,95	10,75	3447	33	13,8	11,2	2	131,2	27	15	8,4	2,01	0,41	5,16
321	34,65	24,75	1632	117	13,1	10,4	2,5	302	20,6	74	0,6	2,33	2,65	14,14
326	16,90	13,75	2778	50	10,6	9	3,1	167,8	30,2	27	0,4	1,95	0,66	7,35
328	19,30	17,75	2733	66	6,7	8,2	11,5	216,6	13,1	23	1	4,17	1,29	5,94
340	8,65	7,50	5443	27	4,5	6,2	2,1	91,5	12,8	3	0,8	3,57	0,16	5,40
344	10,9	8,24	4082	32	7	9,2	2,6	100,7	30,5	9	0,6	1,57	0,22	4,64
360	28,50	22	1639	114	12,9	10,2	2,5	268,5	23,4	80	28	1,90	2,50	13,52
479	23,05	15,75	2256	81	6,9	14	2,2	192,2	31,2	52	0,8	1,6	1,22	7,09
501	36,75	28,25	1575	135	7,3	7,8	1,5	344,8	17,4	70	5,2	2,91	2,95	19,86

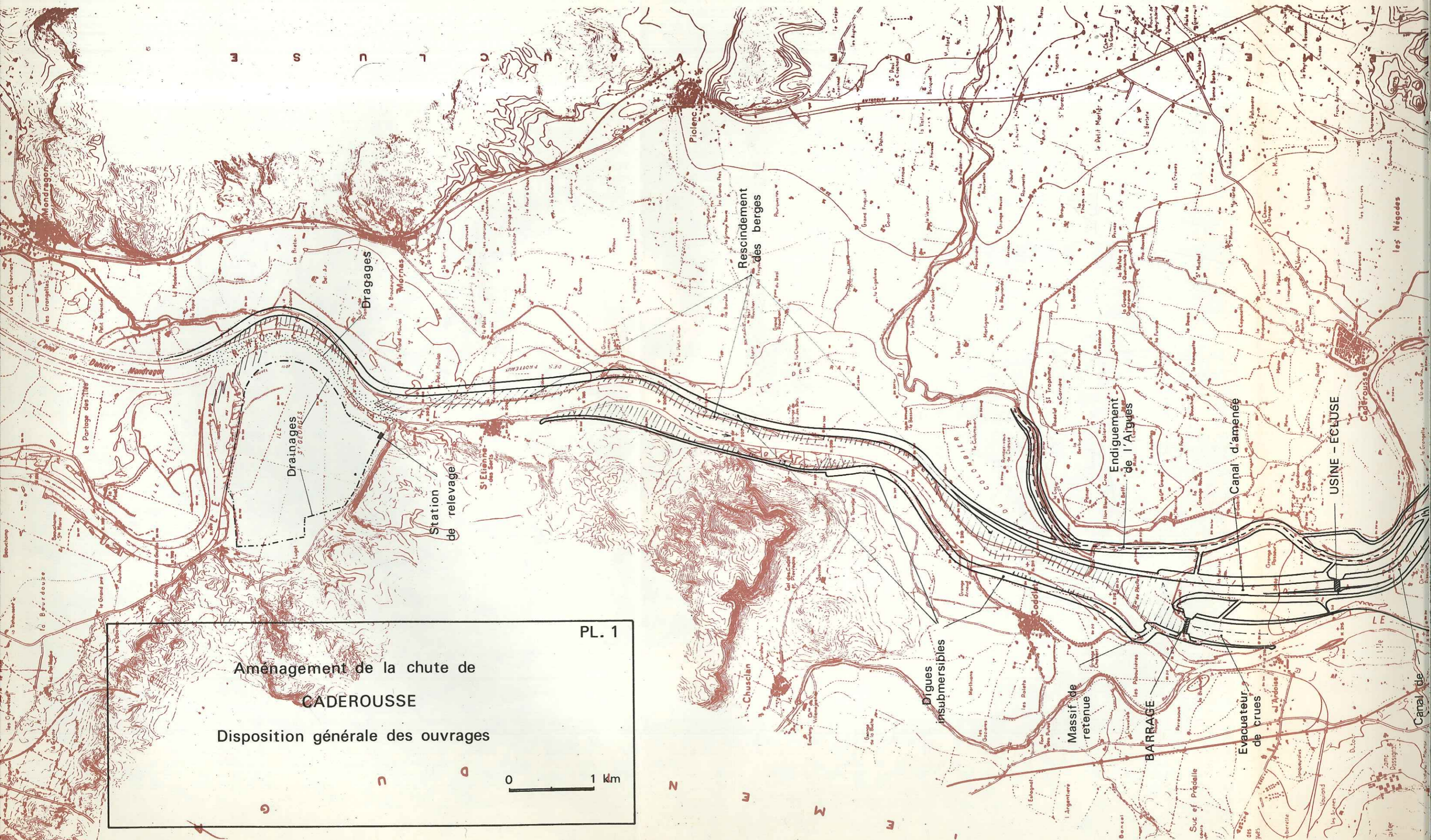
EAUX DE SURFACE - ANALYSES DU 16-18 JUIN 1970

Rhône 1	15,35	10,25	3360	53	5,1	7,8	3,1	125,1	13,1	46	2,8	1,54	2,59	8,77
Rhône 2	15	10	3400	52	4,8	7,8	3,1	122	12,8	44	3,2	1,56	2,55	7,32
Cèze	22,9	18	2300	80	7,1	15,2	2,1	219,7	18,1	46	4,8	2,44	1,88	6,45
Aygues	18,8	14	2820	63	7,7	9,2	2	170,8	8,9	44	4	2,39	3,68	8,42
Mevne	25,7	20,25	2053	90	7,8	14	2,8	247,1	16	54	9,2	2,57	2,48	7,67

Aygues	18,8	14	2820	63	7,7	9,2	2	170,8	8,9	44	4	2,39	3,68	8,42
Meyne	25,7	20,25	2053	90	7,8	14	2,8	247,1	16	54	9,2	2,57	2,48	7,67



Annexe III Situation des coupes des Fig 4 ; Fig 7^{bis} et 7



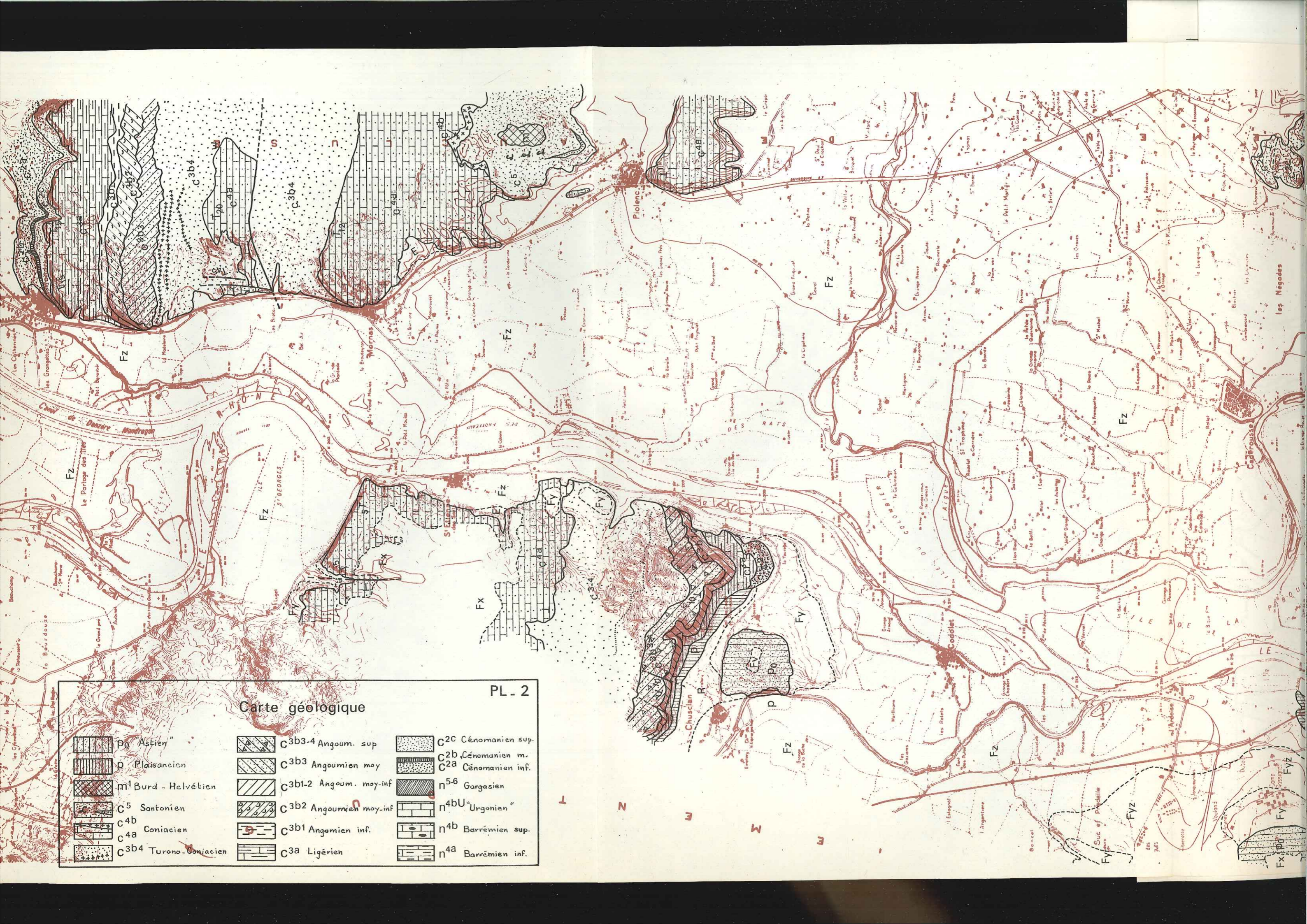
PL. 1
Aménagement de la chute de
CADEROUSSE
Disposition générale des ouvrages

0 ——— 1 km

PL. 1

1 km





Carte géologique

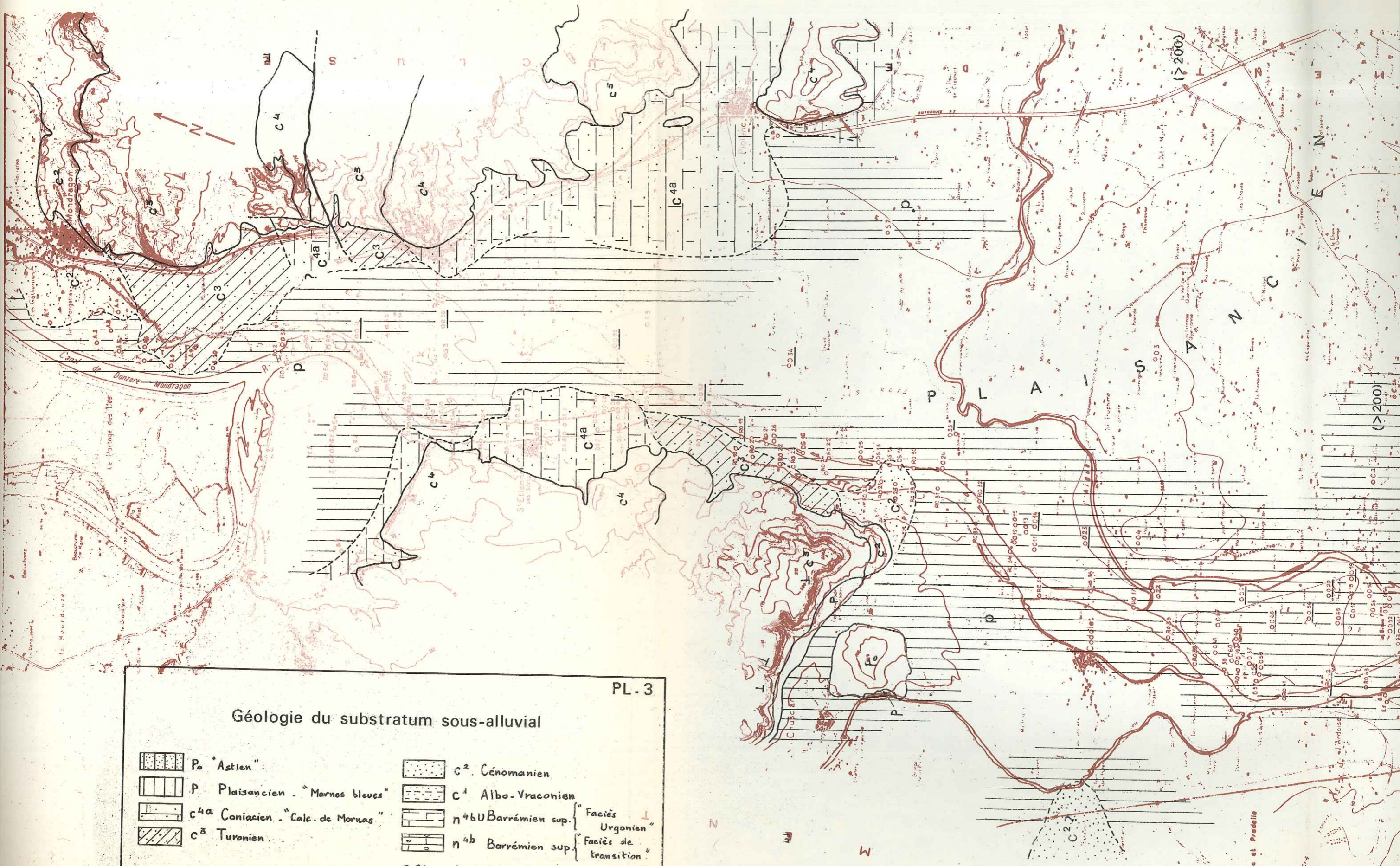
PL. 2

- | | | |
|--|--|--|
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |



PL. 2

énomanien sup.
 énomanien m.
 énomanien inf.
 argasien
 "Urgonien"
 barrémien sup.
 barrémien inf.

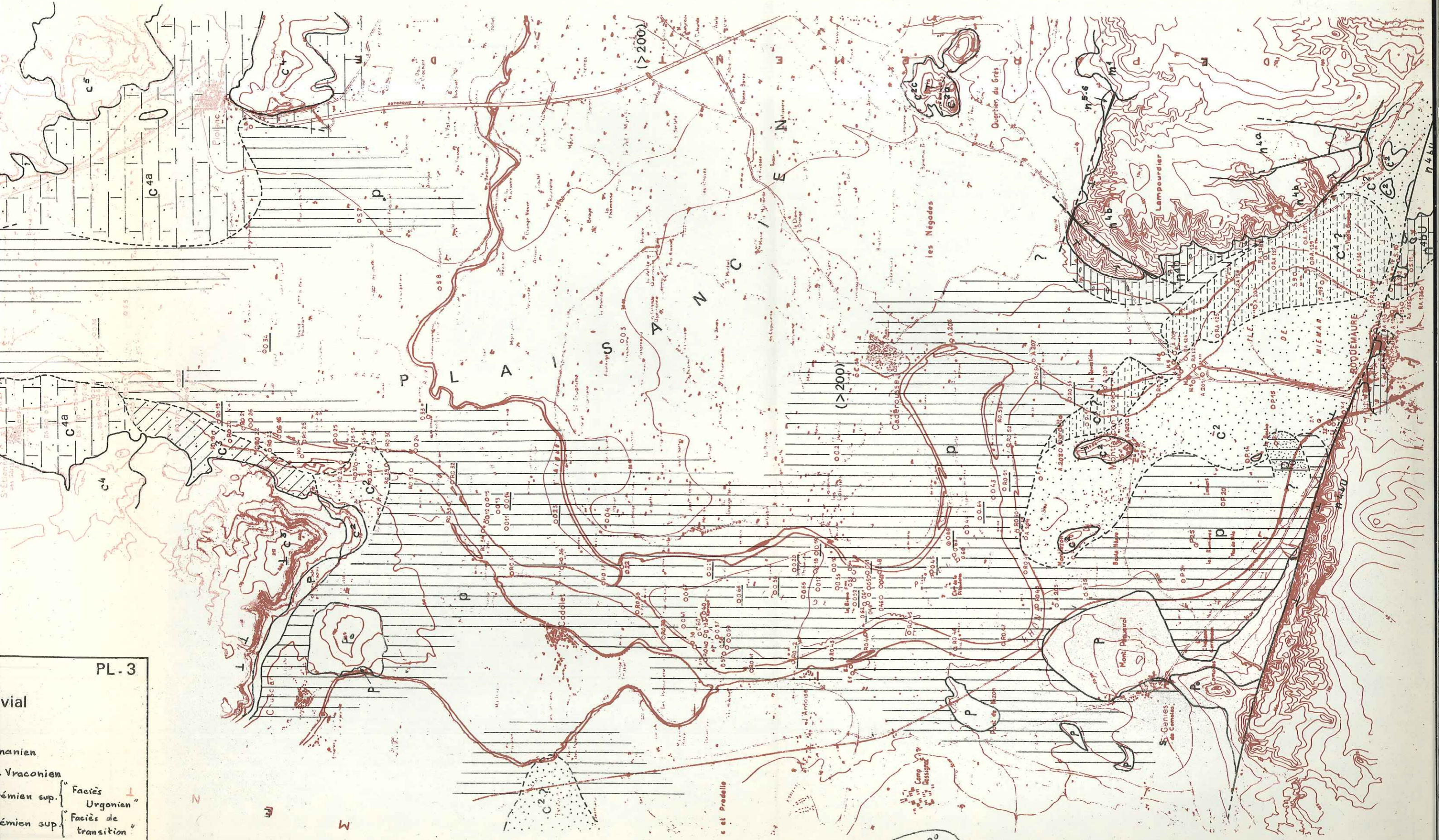


PL. 3

Géologie du substratum sous-alluvial

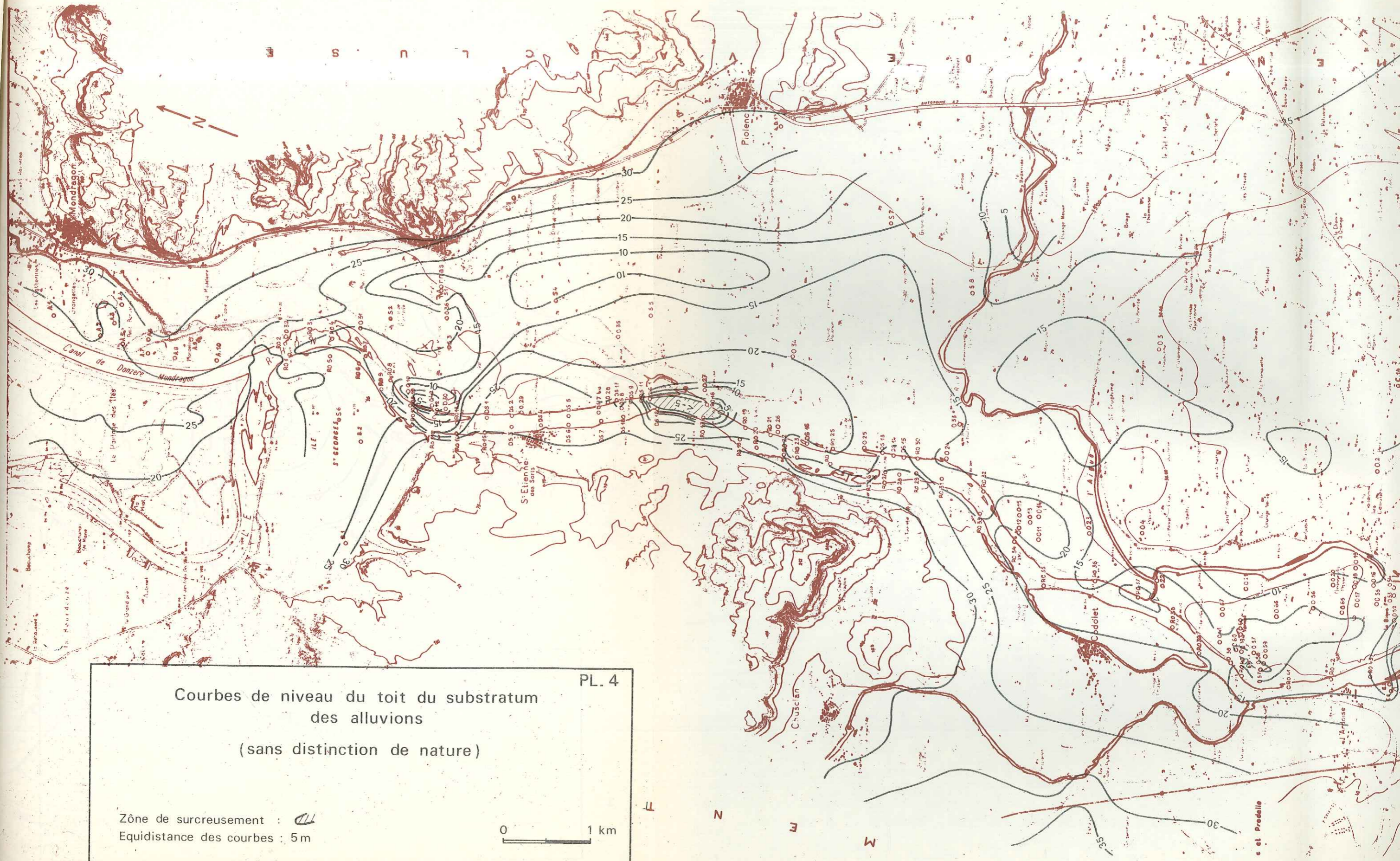
<table border="0"> <tr> <td style="text-align: center;"></td> <td>P₀ "Astien"</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"></td> <td>P Plaisancien - "Marnes bleues"</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"></td> <td>C_{4a} Coniacien - "Calc. de Morvas"</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"></td> <td>C₃ Turonien</td> </tr> </table>		P ₀ "Astien"		P Plaisancien - "Marnes bleues"		C _{4a} Coniacien - "Calc. de Morvas"		C ₃ Turonien	<table border="0"> <tr> <td style="text-align: center;"></td> <td>C₂ Cénomanién</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"></td> <td>C₁ Albo-Vraconién</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"></td> <td>n_{4bU} Barrémién sup. {</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"></td> <td>n_{4b} Barrémién sup. {</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: right;">"Faciès Urgonién"</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: right;">"Faciès de transition"</td> </tr> </table>		C ₂ Cénomanién		C ₁ Albo-Vraconién		n _{4bU} Barrémién sup. {		n _{4b} Barrémién sup. {		"Faciès Urgonién"		"Faciès de transition"
	P ₀ "Astien"																				
	P Plaisancien - "Marnes bleues"																				
	C _{4a} Coniacien - "Calc. de Morvas"																				
	C ₃ Turonien																				
	C ₂ Cénomanién																				
	C ₁ Albo-Vraconién																				
	n _{4bU} Barrémién sup. {																				
	n _{4b} Barrémién sup. {																				
	"Faciès Urgonién"																				
	"Faciès de transition"																				

0.66 : Analyse microfaune.



PL-3

vial
 manien
 Vraconien
 émien sup. { Faciès Urganien
 émien sup. { Faciès de transition
 profaune



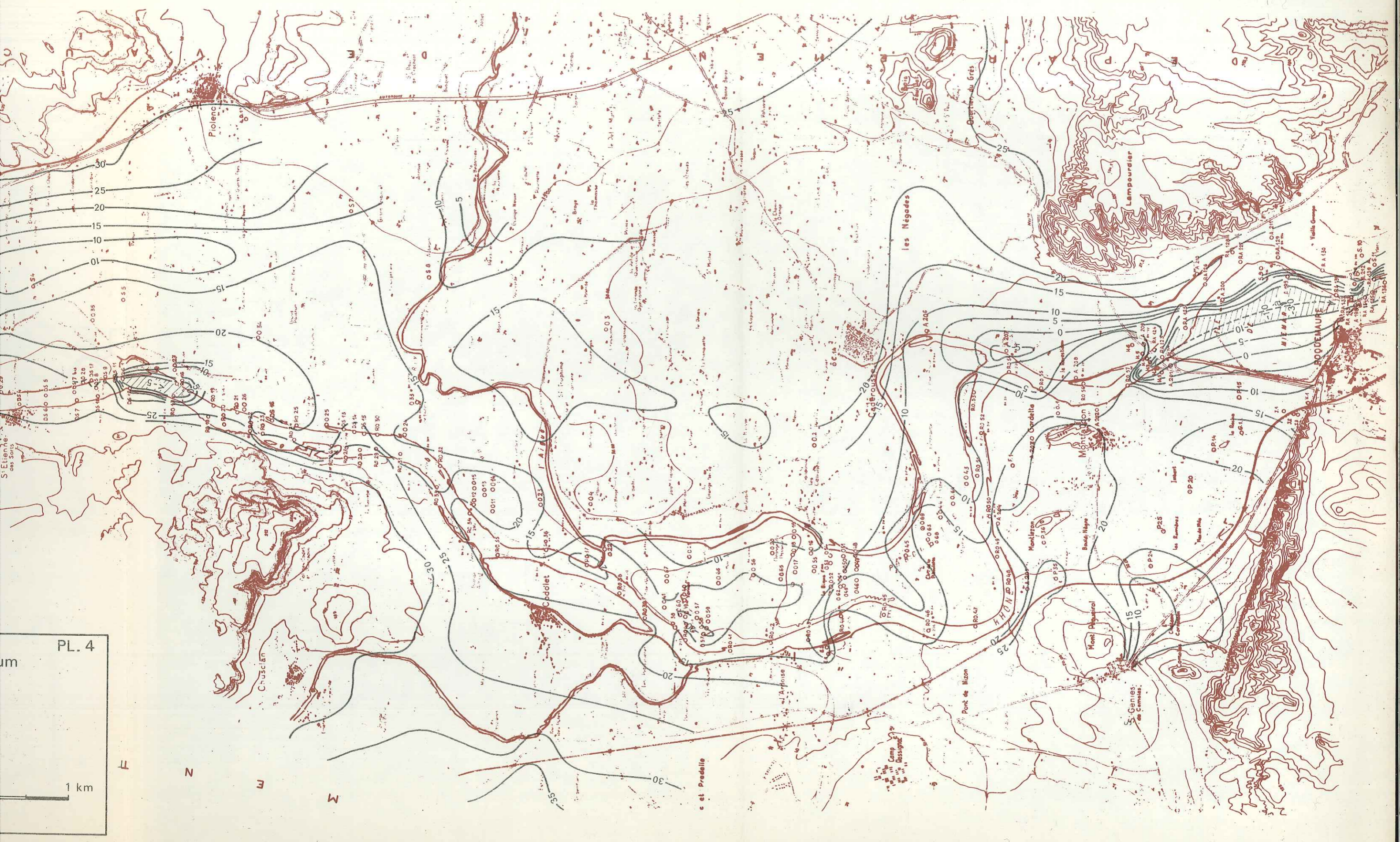
PL. 4

Courbes de niveau du toit du substratum
 des alluvions
 (sans distinction de nature)

Zone de surcreusement :

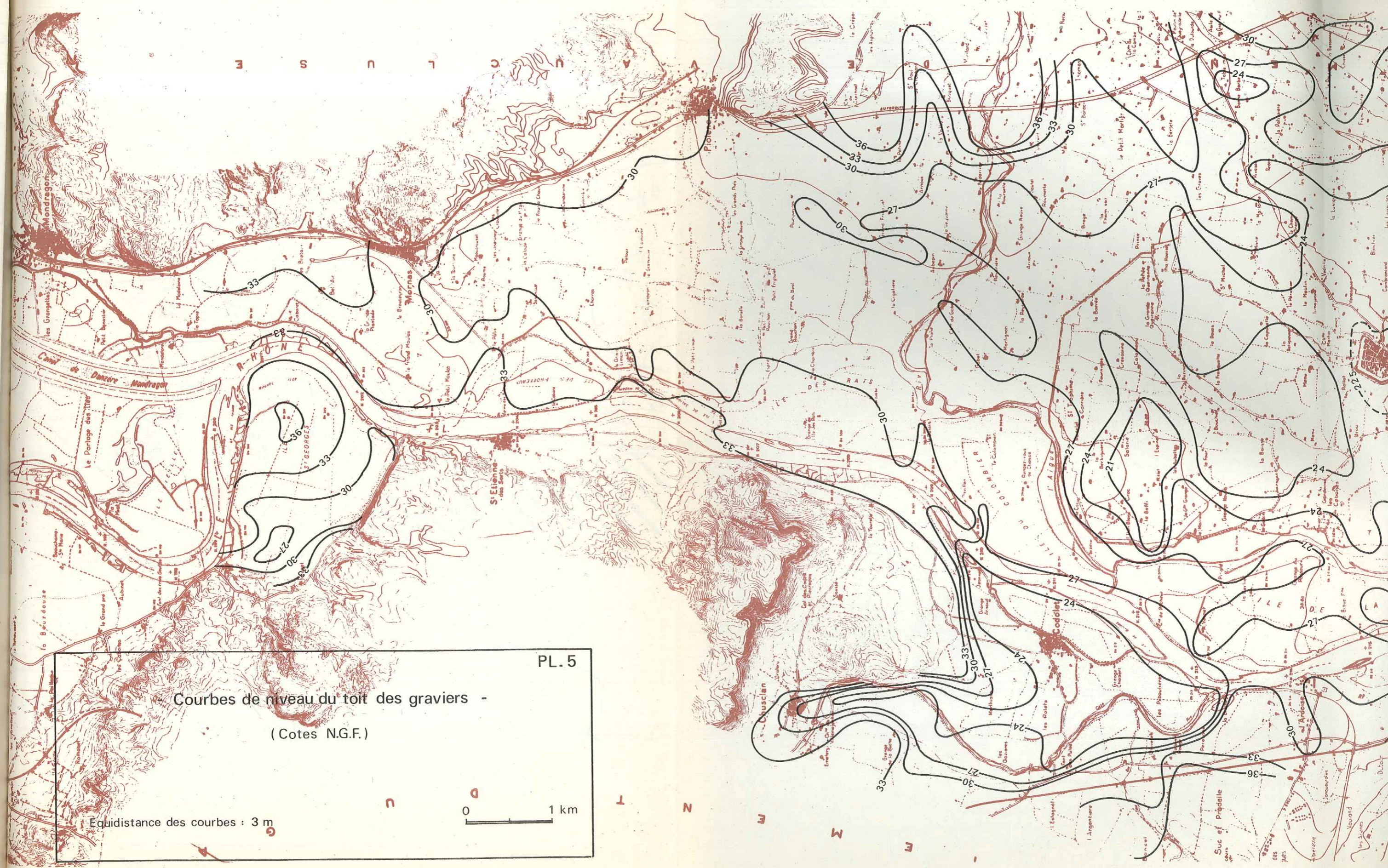
 Equidistance des courbes : 5m

0 1 km



PL. 4

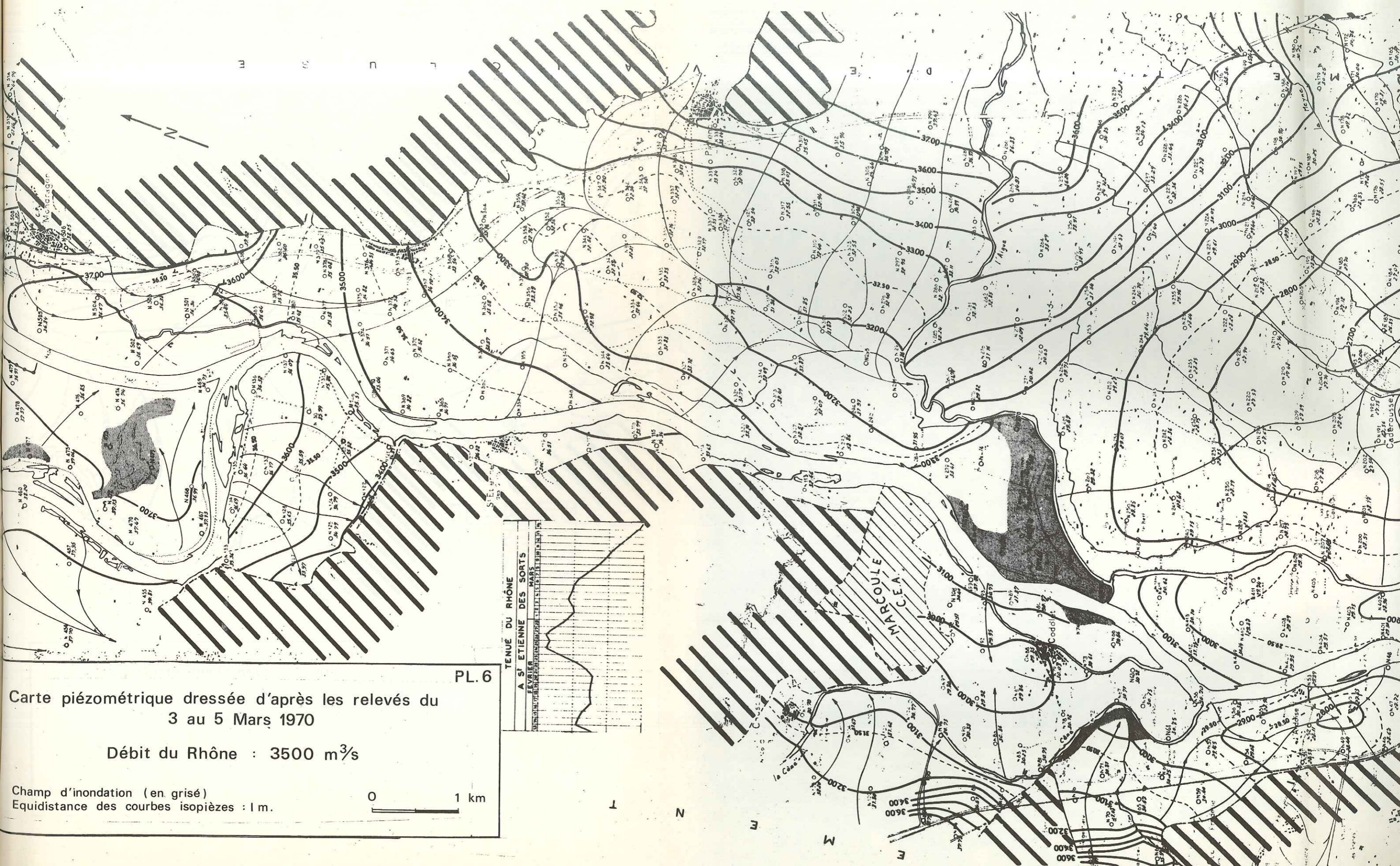
1 km



PL. 5

1 km





Carte piézométrique dressée d'après les relevés du
3 au 5 Mars 1970

Débit du Rhône : 3500 m³/s

Champ d'inondation (en grisé)
Equidistance des courbes isopièzes : 1 m.

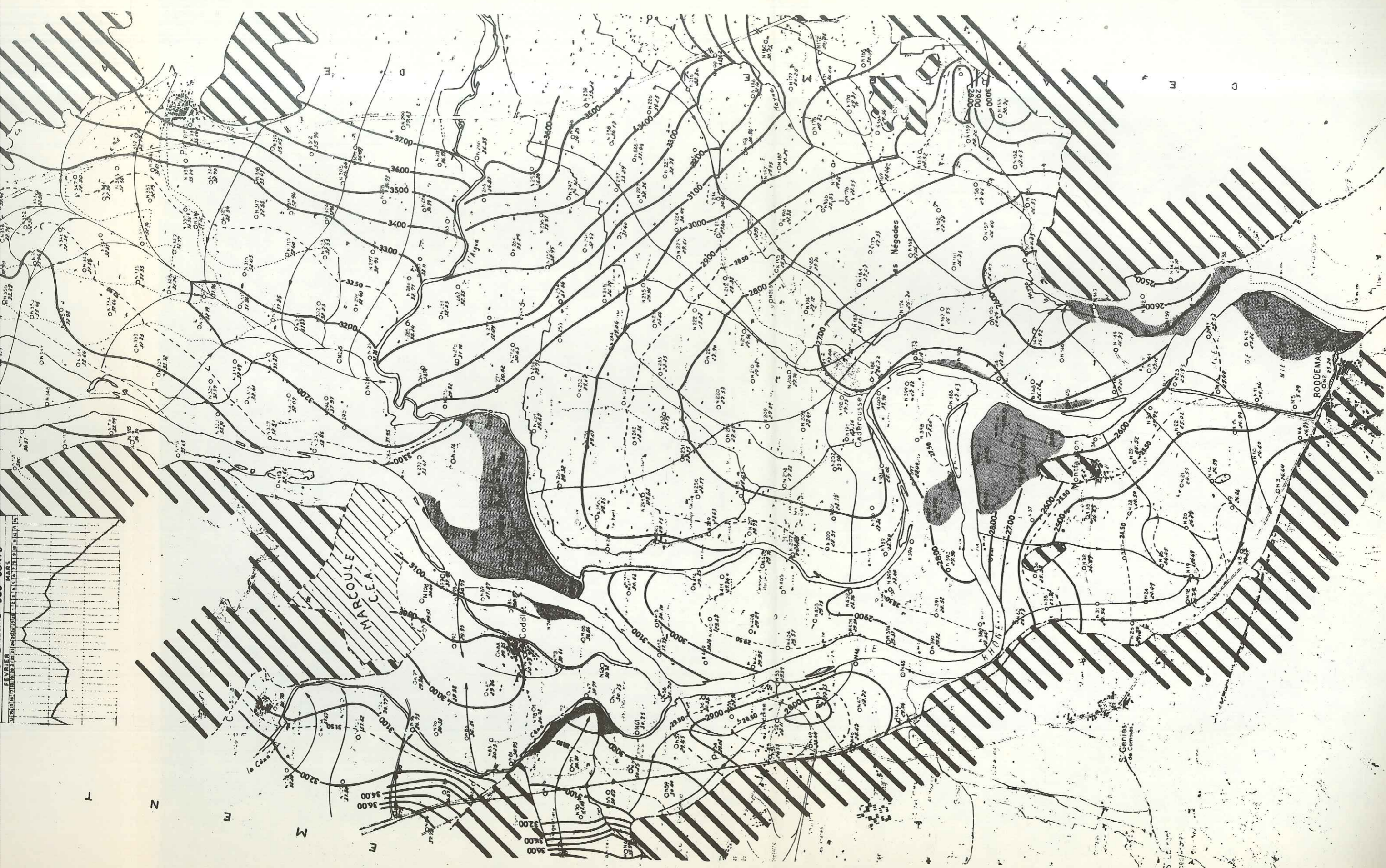


PL. 6

TENUE DU RHÔNE A S'ETIENNE DES SORTS LEVIER MARS 1970

Scale bar and grid information:

0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
METERS										
FEET										

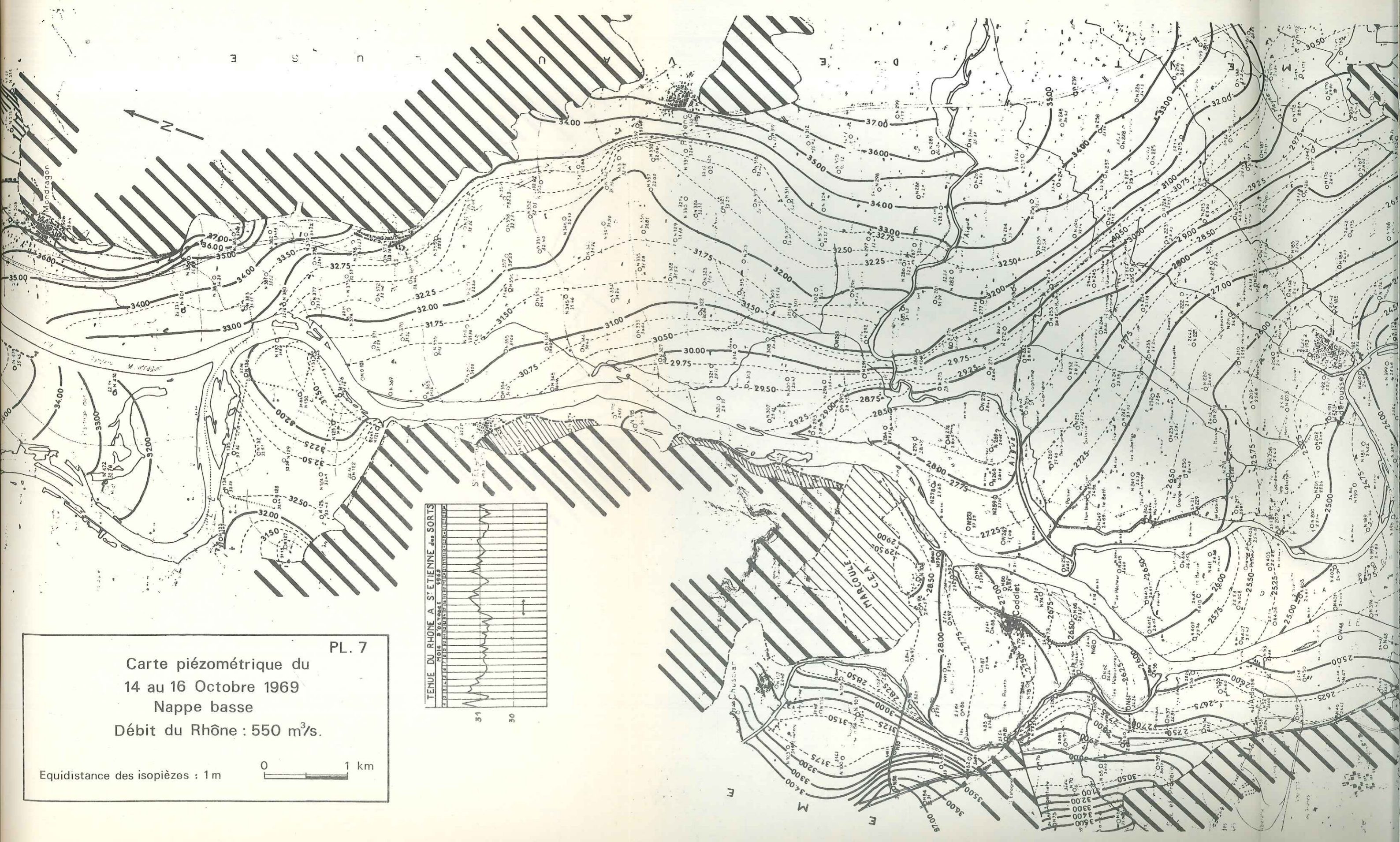
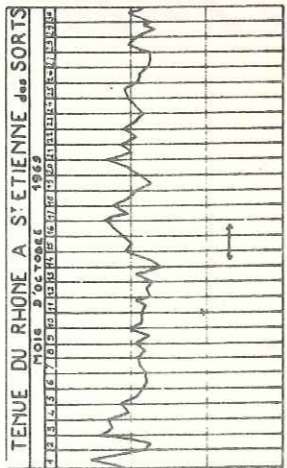


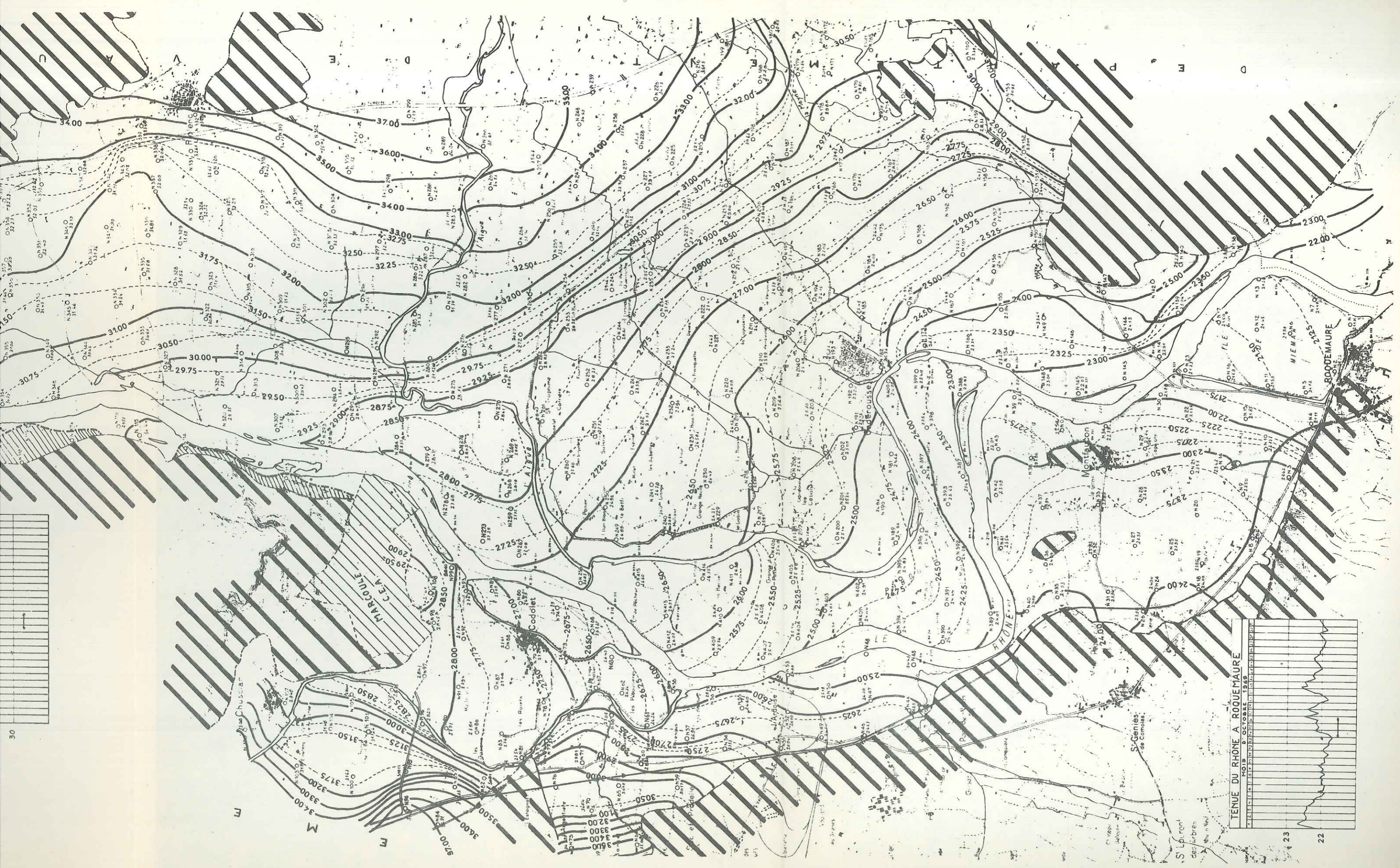
Map labels and annotations:

- Contour Lines:** 2400, 2500, 2600, 2700, 2800, 2900, 3000, 3100, 3200, 3300, 3400, 3500, 3600, 3700.
- Locations:** Marcotte, Cadrouse, Montignon, Rodema, Les Négades, St. Genies de Comnès, La Casa, MIE, D.F., MIE, D.F., RODEMA, MIE, D.F.
- Spot Heights:** Numerous numerical values scattered across the map, such as 2450, 2550, 2650, 2750, 2850, 2950, 3050, 3150, 3250, 3350, 3450, 3550, 3650.
- Grid:** A coordinate grid with letters (M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z) and numbers (1-10) along the edges.

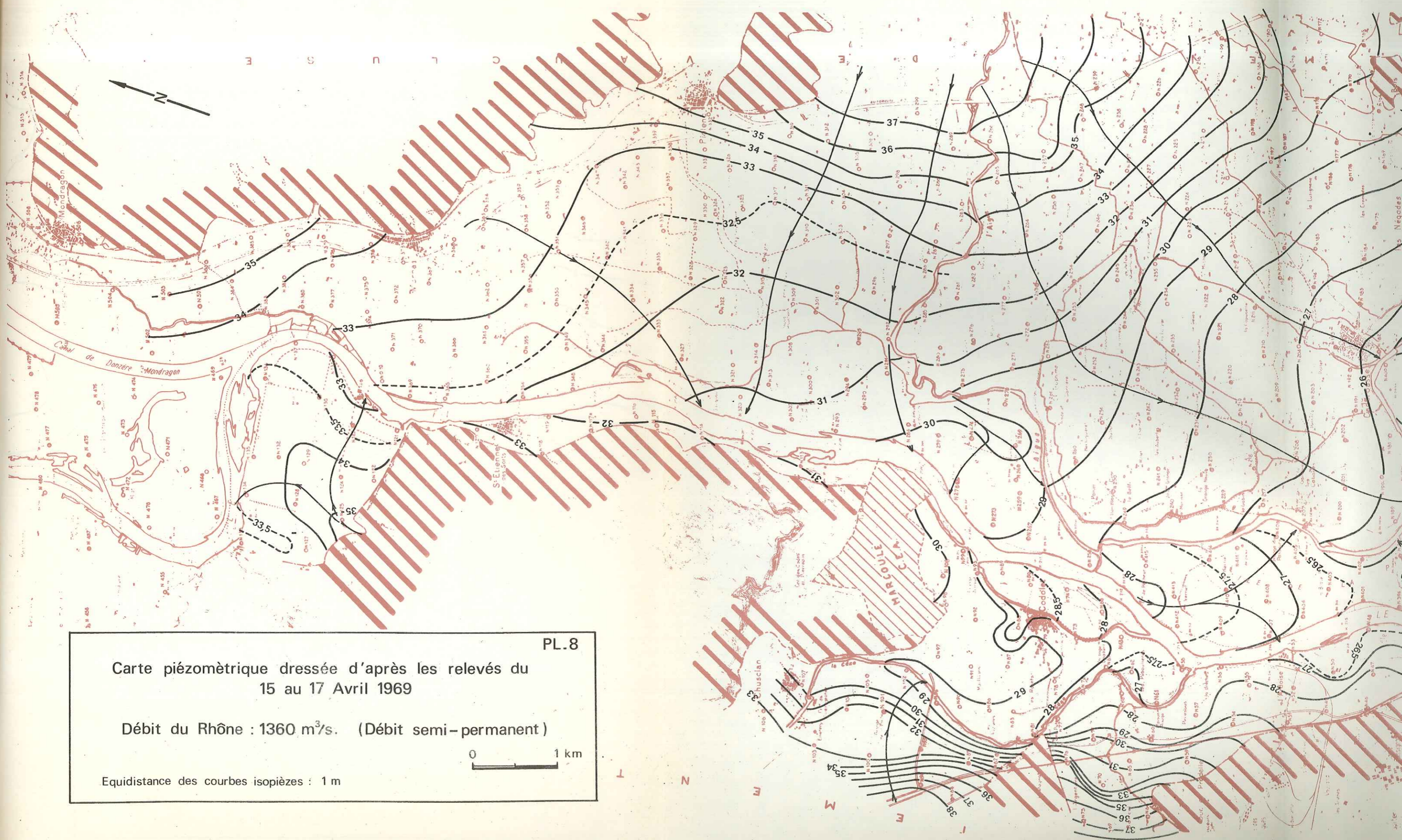
Carte piézométrique du
 14 au 16 Octobre 1969
 Nappe basse
 Débit du Rhône : 550 m³/s.
 Equidistance des isopièzes : 1 m

PL. 7





TENUE DU RHONE A ROQUEMAURE
MOIS D' OCTOBRE 1869
ELEVATION: 1812-1813-1814-1815-1816-1817-1818-1819-1820-1821-1822-1823-1824-1825-1826-1827-1828-1829-1830-1831-1832-1833-1834-1835-1836-1837-1838-1839-1840-1841-1842-1843-1844-1845-1846-1847-1848-1849-1850-1851-1852-1853-1854-1855-1856-1857-1858-1859-1860-1861-1862-1863-1864-1865-1866-1867-1868-1869-1870-1871-1872-1873-1874-1875-1876-1877-1878-1879-1880-1881-1882-1883-1884-1885-1886-1887-1888-1889-1890-1891-1892-1893-1894-1895-1896-1897-1898-1899-1900-1901-1902-1903-1904-1905-1906-1907-1908-1909-1910-1911-1912-1913-1914-1915-1916-1917-1918-1919-1920-1921-1922-1923-1924-1925-1926-1927-1928-1929-1930-1931-1932-1933-1934-1935-1936-1937-1938-1939-1940-1941-1942-1943-1944-1945-1946-1947-1948-1949-1950-1951-1952-1953-1954-1955-1956-1957-1958-1959-1960-1961-1962-1963-1964-1965-1966-1967-1968-1969-1970-1971-1972-1973-1974-1975-1976-1977-1978-1979-1980-1981-1982-1983-1984-1985-1986-1987-1988-1989-1990-1991-1992-1993-1994-1995-1996-1997-1998-1999-2000



PL.8

Carte piézométrique dressée d'après les relevés du
15 au 17 Avril 1969

Débit du Rhône : 1360 m³/s. (Débit semi-permanent)



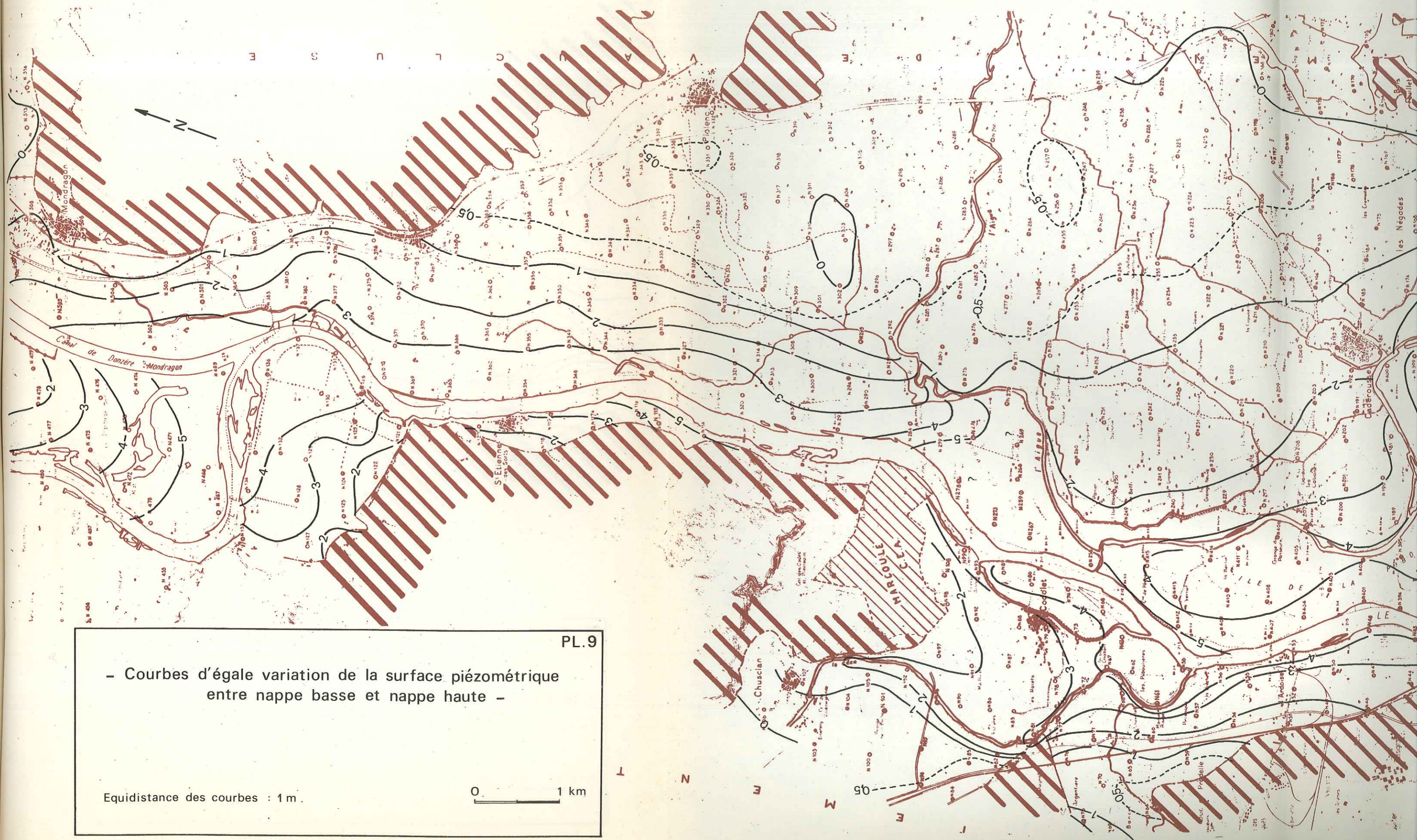
Equidistance des courbes isopièzes : 1 m



PL.8
 vés du
 rmanent)
 1 km

TENUE DU RHONE EN AVRIL 1969
 A ST ETIENNE-DES-SORTS

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----



PL.9

- Courbes d'égal variation de la surface piézométrique
entre nappe basse et nappe haute -

Equidistance des courbes : 1 m.

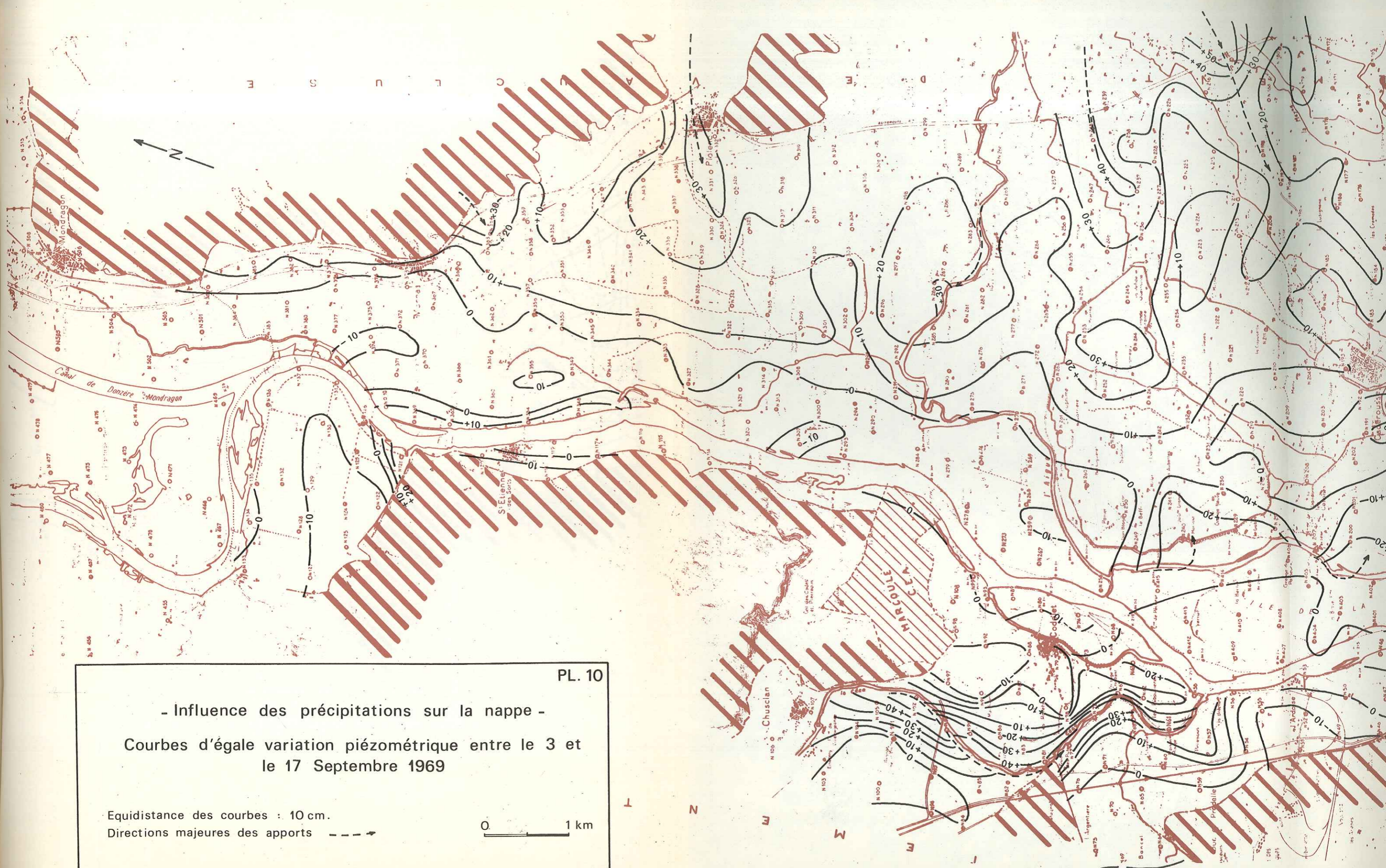




PL.9

ométrique
e -

1 km



PL. 10

- Influence des précipitations sur la nappe -

Courbes d'égal variation piézométrique entre le 3 et le 17 Septembre 1969

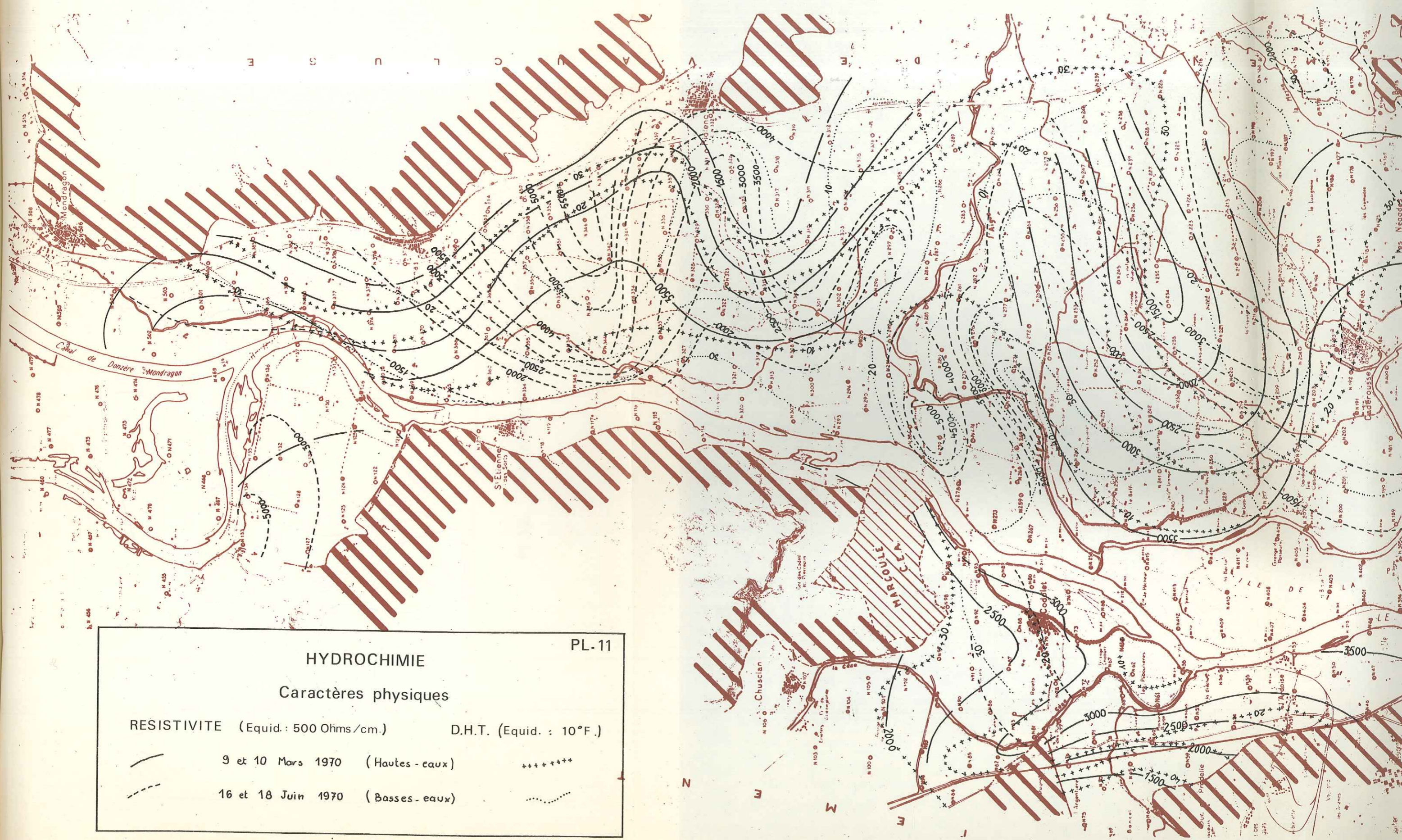
Equidistance des courbes : 10 cm.

Directions majeures des apports \dashrightarrow



PL. 10
 nappe -
 entre le 3 et
 0 1 km





PL-11

HYDROCHIMIE

Caractères physiques

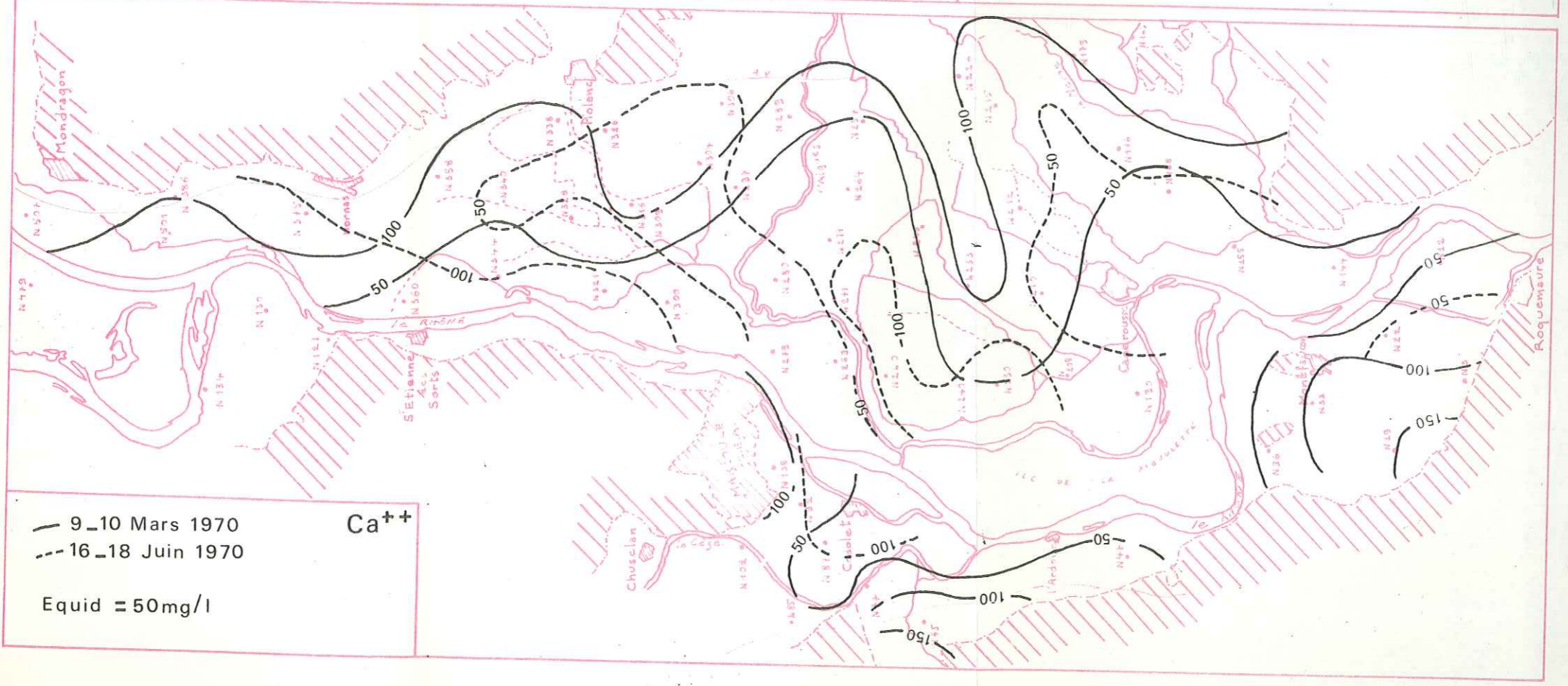
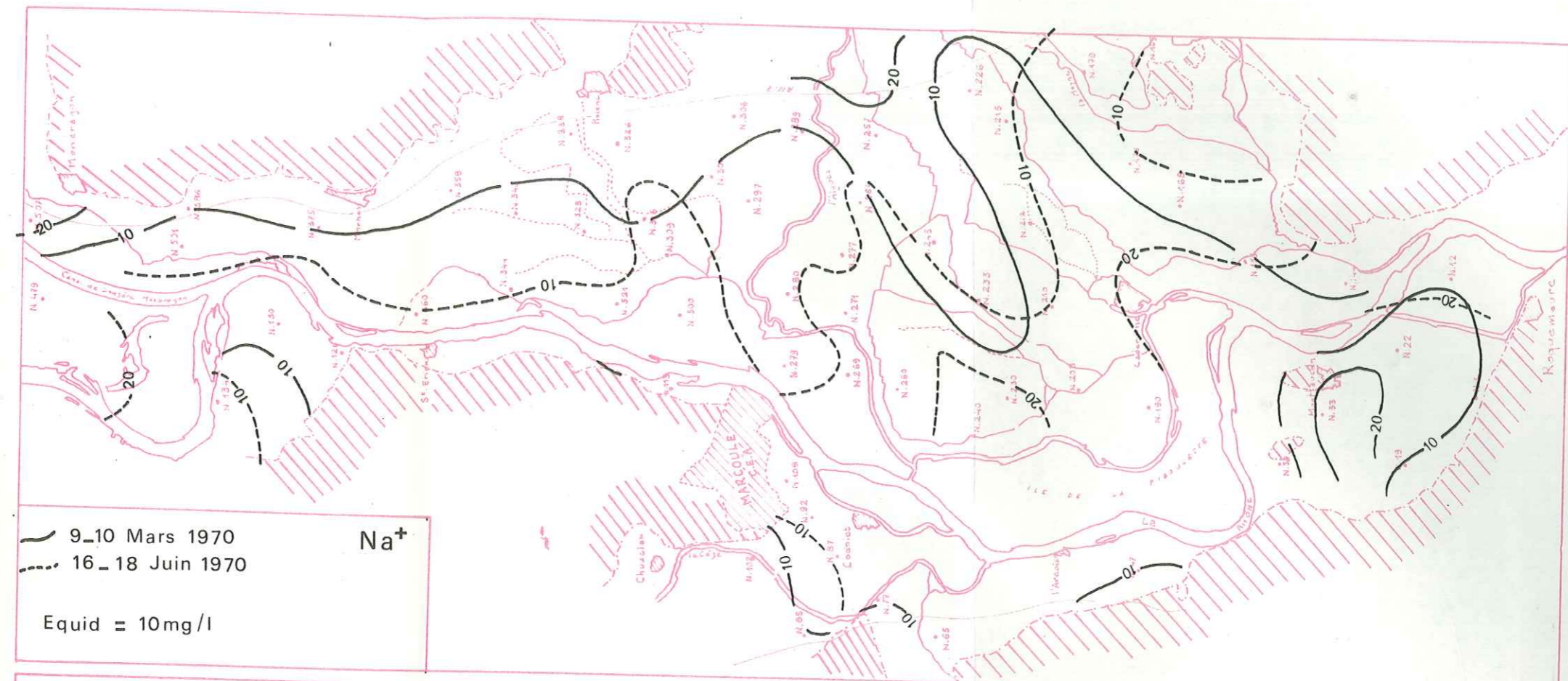
RESISTIVITE (Equip. : 500 Ohms/cm.)	D.H.T. (Equip. : 10°F.)
— 9 et 10 Mars 1970 (Hautes-eaux)	+++++
- - - 16 et 18 Juin 1970 (Basses-eaux)



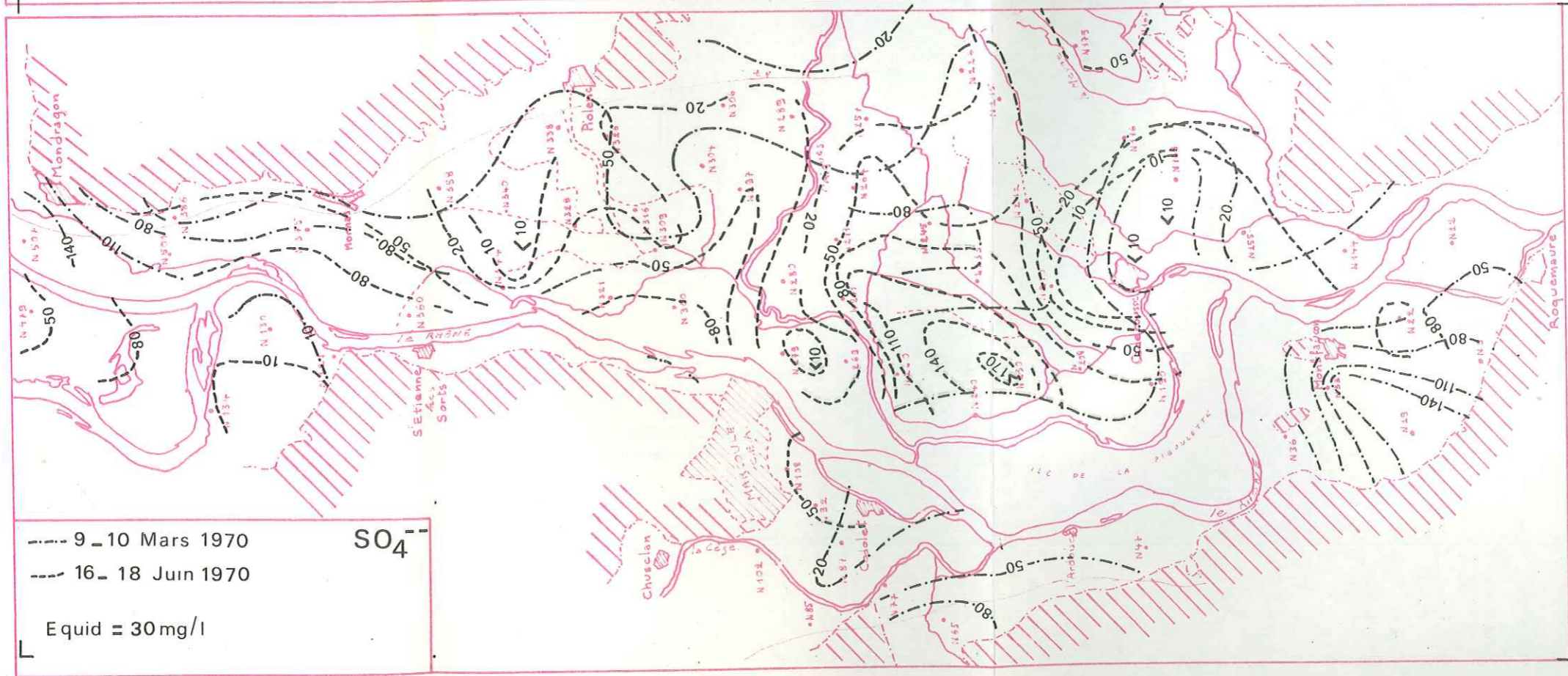
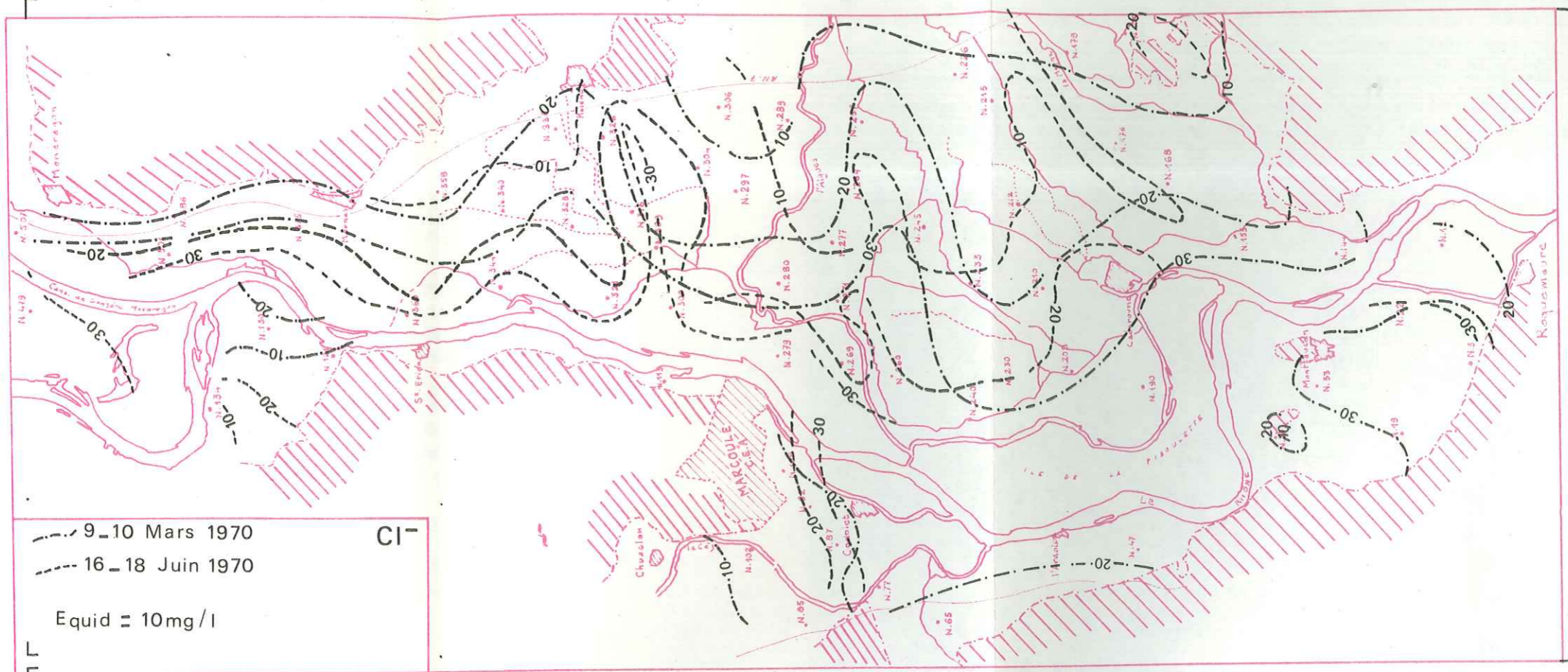
PL-11

Equid. : 10° F.)





PL.12 HYDROCHIMIE Ca⁺⁺ et Na⁺



PL.13 HYDROCHIMIE Cl⁻ et SO₄⁻

BIBLIOGRAPHIE

- AMBERGER (G.), 1969. - Détermination des caractéristiques hydrogéologiques. - Eclog. Géol. Helv., n° 62, pp. 621-623.
- ARNAUD (J.L.), 1972. - Etude géologique et hydrogéologique de la vallée du Rhône entre Aramon et Tarascon-Beucaire. - Thèse 3e cycle - Grenoble.
- BARBIER (R.), 1968. - Rapport d'études préliminaires - Dossier d'enquête de l'aménagement de Caderousse. - D.C.N.R. (inédit).
- BOURDIER (F.), 1961. - Le bassin du Rhône au Quaternaire. Géologie et préhistoire. Ed. C.N.R.S.
- B. R. G. M., 1962. - Méthodes d'études et de recherche des nappes aquifères. Paris Publida.
- CAQUOT (A.) et KERISEL (J.), 1956. - Traité de Mécanique des sols 3e édition, Paris. Gauthier-Villars.
- CASTANY (G.), 1967. - Traité pratique des eaux souterraines. (2e édition) Dunot, Paris.
- CATALAN (J.), 1969. - Química del agua (en español). Madrid. Editorial Blume.
- CHAMPENOIS (M.), 1962. - Contribution à l'étude géologique de la bordure orientale du massif de la Cèze (Gard). Thèse, Grenoble.
- CHATELET (C.) et DE BRUN (P.), 1926. - Le Cénomanien de Montfaucon. Trav. Lab. Géol. Lyon, t. 9, n° 8, 72 p. 30 fig., 2 pl.
- COQUAND (H.), 1875. - Comparaison des diverses divisions adoptées par M. HEBERT pour la craie du Midi de la France avec celles de M. COQUAND. B.S.G.F., 3e série, III, p. 265-270.
- DENIZOT (G.), 1939. - Le problème des terrasses rhodaniennes. Etudes rhodaniennes. Rev. Géog. Région., t. XV, p. 119-133.
- 1952. - Le Pliocène de la vallée du Rhône. Rev. Géog. Lyon, t. XXVII, n° 4, p. 327-357.
- DUMAS (E.), 1875-76. - Statistique géologique, minéralogique, métallurgique et paléontologique du département du Gard. Paris - Nîmes, 3 vol.
- FALLOT (E.), 1885. - Etudes géologiques sur les étages moyens et supérieurs du terrain crétacé dans le SE de la France. Ann. Sci. Géol., XVIII, p. 268, 41 fig., 8 pl.
- FAURE (D.), 1962. - Contribution à l'étude géologique et micropaléontologique du massif de Pont Saint-Esprit. - Thèse 3e cycle, Paris.
- 1963. - Le Barrémien du Sud du couloir rhodanien. Colloque sur le Crétacé inférieur. Lyon 9/1963. Ed. B.R.G.M., 1965, p. 139-146.
- GIGNOUX (M.) et BARBIER (R.), 1955. - Géologie des barrages et des aménagements hydrauliques. Masson, ed. Paris.
- GRAS (S.), 1862. - Description géologique du département de Vaucluse. Paris et Avignon, 438 p.
- HEBERT (E.) et TOUCAS (A.), 1875. - Description du bassin d'Uchaux. Ann. Sci. Géol., VI, 132 p.
- JOLEAUD (L.), 1905. - Géologie de la plaine du Comtat et de ses abords. Mém. Acad. Vaucluse, 475 p.
- LUCAS (J.), CAMEZ (T.) et MILLOT (G.), 1959. - Détermination pratique aux rayons X des minéraux argileux simples et interstratifiés. Bull. Serv. Carte Géol. Alsace-Lorraine, t. 12, n° 2, Strasbourg.
- MEDUS (J.) et TRIAT (J.M.), 1969. - Le Cénomanien supérieur de la coupe de Laudun (Gard) ; étude palynologique et données sédimentologiques. Rev. Palaeobotan. Palynol., 9 (1969), p. 213-228.
- MENNESSIER (G.), 1950. - Monographie géologique du massif d'Uchaux. Bull. S.G.F. (48), 227, pp. 1-50.
- MONLEAU (C.), 1971. - Etude pétrographique et paléocologique des calcaires à rudistes du Turonien de la basse vallée du Rhône. Thèse 3e cycle, Marseille.
- PIPER (A.M.), 1944. - A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. Amer Geophys. Union Trans., vol. 25, pp. 914-923.

PHILIP (J.), 1970. - Les formations calcaires à rudistes du Crétacé supérieur provençal et rhodanien. Thèse
Marseille, 438 p., 76 fig., 6 tb., 8 pl.

ROMAN (F.), 1939. - Observations sur le Crétacé supérieur du Vaucluse et du Gard. B.S.G.F.

SANGLERAT (G.), 1966-1967. - Cours de Mécanique des Sols. E.C.L. 66-67.

SCHOELLER (H.), 1962. - Les eaux souterraines. Masson, éd., Paris.

SCHNEEBELI (G.), 1965. - "Hydraulique souterraine". Eyrolles; éd., Paris.

SORNAY (J.), 1950. - "Etude stratigraphique sur le Crétacé supérieur de la vallée du Rhône entre Valence et
Avignon, et des régions voisines. Thèse, Grenoble, 247 p., 31 fig., 12 pl.

TERZAGHI (K.) et PECK (R.B.), 1965. - "Mécanique des sols appliquée aux travaux publics et au bâtiment".
Dunod, éd., Paris.

Vu,
Grenoble, le
le Président de la thèse

R. BARBIER

Vu, et permis d'imprimer
Grenoble, le
le Président de l'Université
Scientifique et Médicale

M. SOUTIF