



HAL
open science

Essai de méthodologie en pays karstique : étude de problèmes hydrogéologiques et géotechniques dans le massif des Morières (Nord-Toulon-Var) /

Alain Combes

► **To cite this version:**

Alain Combes. Essai de méthodologie en pays karstique : étude de problèmes hydrogéologiques et géotechniques dans le massif des Morières (Nord-Toulon-Var) /. Géologie appliquée. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1976. Français. NNT : . tel-00760472

HAL Id: tel-00760472

<https://theses.hal.science/tel-00760472>

Submitted on 4 Dec 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.

N° d'ordre

GEOGRAPHIE GRENOBLE UJF



D

050 323283 5

THESE

présentée à

L'UNIVERSITE SCIENTIFIQUE ET MEDICALE
DE GRENOBLE

Exclu du prêt

pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE SPECIALITE

(Troisième cycle de Géologie appliquée)

par

Alain COMBES

ESSAI DE METHODOLOGIE EN PAYS KARSTIQUE

ETUDE DE PROBLEMES HYDROGEOLOGIQUES ET GEOTECHNIQUES DANS LE MASSIF DES MORIERES

(NORD-TOULON - VAR)

Soutenu le 5 novembre 1976 devant la commission d'examen :

R. BARBIER

Professeur à l'Université
de Grenoble I

Président

J. SARROT-REYNAULD

Professeur à l'Université
de Grenoble I

Examineur

J.L. BARBIER

Géologue à la Société du
Canal de Provence

Examineur

N° d'ordre

THESE

présentée à

L'UNIVERSITE SCIENTIFIQUE ET MEDICALE

DE GRENOBLE

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE SPECIALITE

(Troisième cycle de Géologie appliquée)

par

Alain COMBES



ESSAI DE METHODOLOGIE EN PAYS KARSTIQUE

ETUDE DE PROBLEMES HYDROGEOLOGIQUES ET GEOTECHNIQUES DANS LE MASSIF DES MORIERES

(NORD-TOULON - VAR)

Soutenue le 5 novembre 1976 devant la commission d'examen :

R. BARBIER

Professeur à l'Université
de Grenoble I

Président

J. SARROT-REYNAULD

Professeur à l'Université
de Grenoble I

Examineur

J.L. BARBIER

Géologue à la Société du
Canal de Provence

Examineur

EICI L'AIGO ES D'OR

AVANT - PROPOS

Ce mémoire représente l'aboutissement d'une étude entreprise sous l'égide de la Société du Canal de Provence. Que Monsieur R. CLEMENT son Directeur Général et Monsieur A. ARVIEUX son Directeur des Services Techniques, trouvent ici la marque de ma reconnaissance pour m'avoir accepté comme stagiaire dans leur service.

Il m'est agréable de remercier également tous ceux qui ont contribué à la réalisation de cet ouvrage :

- Monsieur le Professeur R. BARBIER qui a bien voulu corriger le manuscrit et me faire l'honneur de présider le jury de cette thèse.

- Monsieur le Professeur J. SARROT-REYNAULD qui m'a permis de mener à bien ce travail en me guidant de ses critiques et de ses avis éclairés.

- Monsieur J.L. BARBIER, Ingénieur-Géologue à la Société du Canal de Provence, qui n'a ménagé ni son temps, ni ses conseils tout au long de cette étude. Qu'il trouve ici l'expression de mes vifs remerciements.

- Monsieur P. VIALON, Maître de conférence à l'Université de Grenoble, pour l'attention qu'il a bien voulu porter à la partie structurale de ce travail.

- Monsieur J.C. FOURNEAUX, Maître Assistant à l'Université de Grenoble, qui a toujours su me guider de ses judicieux conseils.

- Mes amis « thésars » pour les encouragements qu'ils m'ont prodigués.

Je remercie toute l'équipe de Géo-Topo pour sa gentillesse et l'aide qu'elle m'a accordée ainsi que l'ensemble des techniciens de l'Institut Dolomieu et tout particulièrement Monsieur CHABERT.

Je ne saurais terminer ces remerciements sans adresser une affectueuse pensée à mes parents et mes beaux-parents qui n'ont cessé de m'aider et de m'encourager tout au long de mes études.

SOMMAIRE

INTRODUCTION

PREMIERE PARTIE

ETUDE GEOLOGIQUE

Chapitre 1 Situation - Etude géologique

Chapitre 2 Etude structurale

DEUXIEME PARTIE

ETUDE HYDROGEOLOGIQUE

Chapitre 3 Etude hydrologique

Chapitre 4 Etude hydrodynamique

TROISIEME PARTIE

ETUDE GEOTECHNIQUE

Chapitre 5 Les phénomènes karstiques

Chapitre 6 Etude géotechnique

CONCLUSION GENERALE

ANNEXES

BIBLIOGRAPHIE, LISTE DES FIGURES

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION

LE PROBLEME DE L'EAU EN PROVENCE

La Provence a souvent été peinte sous des soleils de plomb où l'aridité du paysage n'avait d'égale que la luminosité de son ciel .

La pénurie d'eau , due à des précipitations irrégulières et des conditions climatiques particulières , défavorise cette région essentiellement tournée vers l'agriculture et le tourisme .

Il était donc nécessaire d'aller chercher cette eau plus au Nord où elle coule en abondance .

LES REALISATIONS DE LA SOCIETE DU CANAL DE PROVENCE

La Société du Canal de Provence a été créée pour réaliser les ouvrages indispensables à l'irrigation et l'alimentation en eau des Communes de la région .

La Durance et le Verdon , principales rivières du Sud-Est , fournissent par l'intermédiaire d'un canal mixte construit par l'E.D.F. les mètres-cubes destinés aux Départements du Var et des Bouches-du-Rhône .

Un réseau de galeries et de canaux (ou cuvettes) diffuse l'eau sur l'ensemble des deux départements .

La branche dite de " Toulon Est " ou " Var III " devra , dans un premier temps , alimenter la Ville de Toulon en eau potable , puis , par un réseau de canaux secondaires , irriguer à l'Est la région d'Hyères .

BUT DE L'ETUDE

Conformément à la ligne de conduite suivie par la Société du Canal de Provence , les ouvrages souterrains sont suivis d'une étude après travaux . Ceci affine la connaissance du secteur et complète l'étude prévisionnelle initiale .

De telles études permettent , par la suite , d'éviter les écueils qui pourraient entraver les futures réalisations présentant des caractéristiques analogues , dans la région provençale .

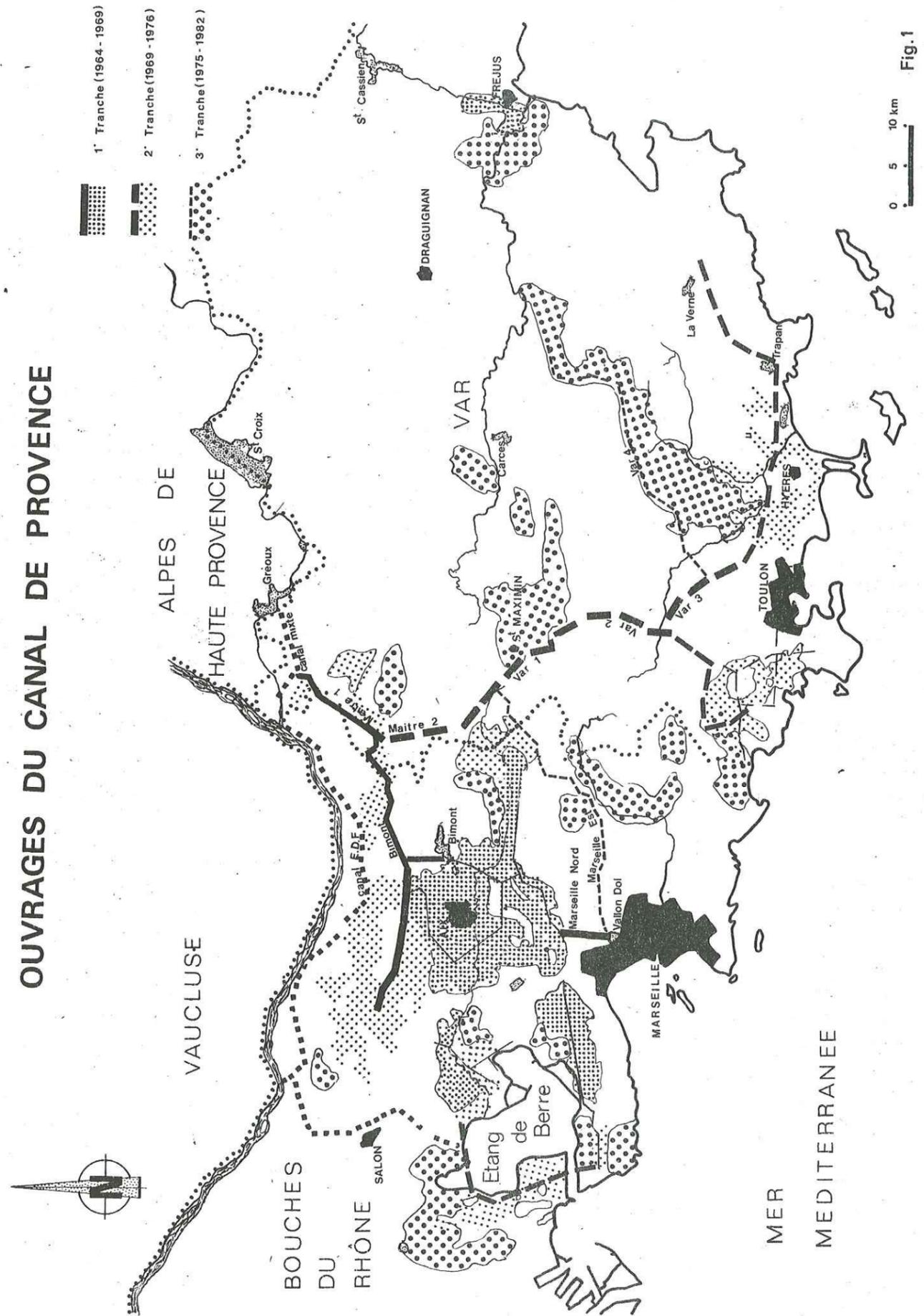


Fig.1

PLAN DE L'ETUDE

Dans le mémoire présenté ici , nous avons essayé de conserver cette optique .

En tenant compte de l'étude préliminaire réalisée par Ch. Choquet (1972) et en liaison avec les travaux poursuivis par J. L. Barbier , ingénieur-géologue à la S. C. P. , nous avons repris l'étude géologique et structurale du secteur , afin de préciser les observations géologiques de surface et de les coordonner plus étroitement avec les observations que nous avons réalisées sur les 14 kilomètres de galerie .

Le secteur situé à l'Ouest du Gapeau est constitué par le massif des Morières où ont été creusées les galeries de Montrieux et de Valaury .

Nous avons particulièrement étudié la fracturation et la fissuration des roches tant en surface qu'en galerie car il s'agit là d'un élément fondamental pour la connaissance de l'hydrogéologie et du comportement géotechnique du massif traversé .

L'étude des caractéristiques hydrogéologiques du massif des Morières n'avait jamais été réalisée et en dehors de son intérêt général pour la compréhension du régime de l'infiltration et des circulations souterraines , il était essentiel de connaître les caractères des sources situées à la périphérie du massif et leur mode d'alimentation afin de déterminer les répercussions éventuelles du creusement de la galerie sur leur régime .

L'étude des systèmes karstiques qui se sont révélés assez abondants dans la région méritait d'être développée en liaison avec l'étude hydrogéologique et nous nous sommes appuyés à la fois sur les observations faites en galerie et sur divers essais d'application de méthodes géophysiques pour mieux comprendre leur origine et les localiser .

Nous avons enfin essayé de relier les résultats de l'analyse structurale que nous avons réalisée avec les mesures électriques et sismiques pour déterminer les caractéristiques géotechniques des diverses formations dont la connaissance est indispensable au maître d'oeuvre et aux entreprises .

Au cours de l'exposé des résultats de nos recherches , nous essayerons de faire apparaître les avantages et les inconvénients des techniques employées afin de faciliter la mise au point d'une méthodologie de plus en plus complète et rigoureuse pour la réalisation de projets de galeries en terrains calcaires .

CHAPITRE I

SITUATION

ETUDE GEOLOGIQUE

SITUATION GEOGRAPHIQUE

SITUATION GEOLOGIQUE

I - CADRE GEOLOGIQUE REGIONAL

II - CADRE GEOLOGIQUE DU SECTEUR ETUDIE

CONCLUSION

SITUATION GEOGRAPHIQUE

A 10 km de la côte varoise , au Nord-Est de Toulon , la zone d'étude s'étend sur environ 70 km².

Petit fleuve côtier , le Gapeau qui la limite au Nord et à l'Est irrigue une frange de basses terres fertiles : c'est le pays des cerisiers . Dominant cette vallée , les collines présentent des terrains en escaliers dus aux nombreuses " restanques " (ou murettes) qui protègent les oliveraies . Plus haut , sur le plateau , s'étend la grande forêt domaniale des Morières où le chêne vert domine dans ce paysage provençal qui culmine au Grand Cap à 783 m .

Quelques villages se sont implantés en bordure du Gapeau. Signes , au Nord , est le débouché d'une vaste plaine ; Belgentier et Solliès-Toucas bordent la " route des Alpes " , tandis que Solliès-Ville domine la plaine de Cuers .

Essentiellement agricole , l'activité humaine se limite aux abords du Gapeau et aux collines voisines .

Le Mont Coudon (702 m) constitue la limite de notre étude vers le Sud .

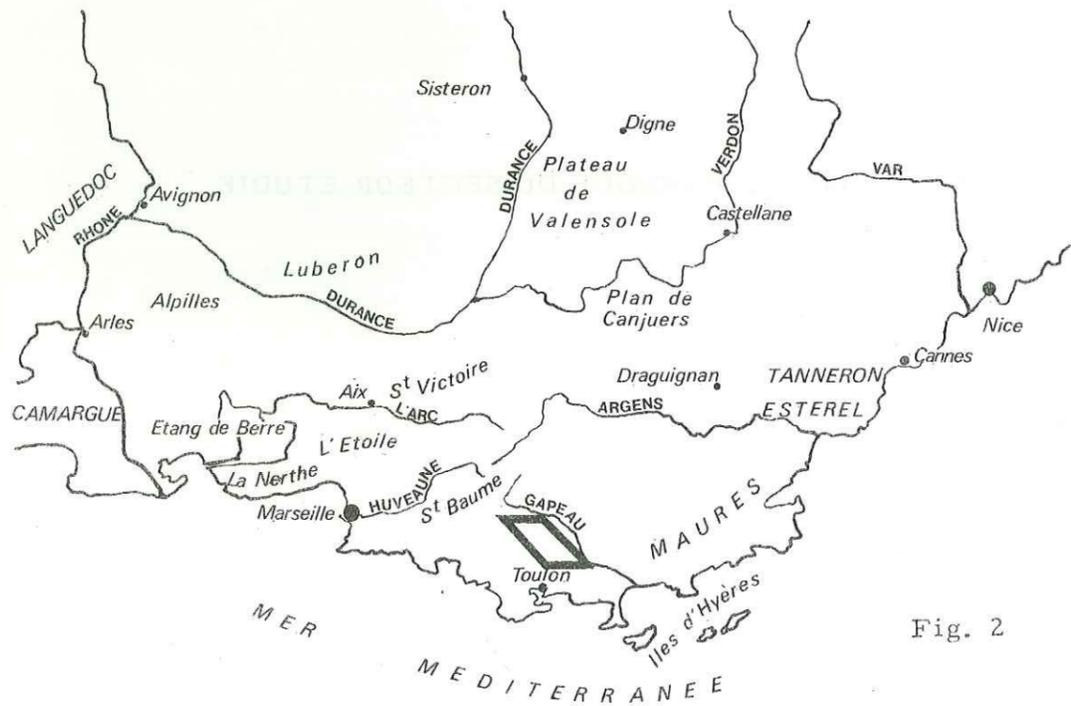
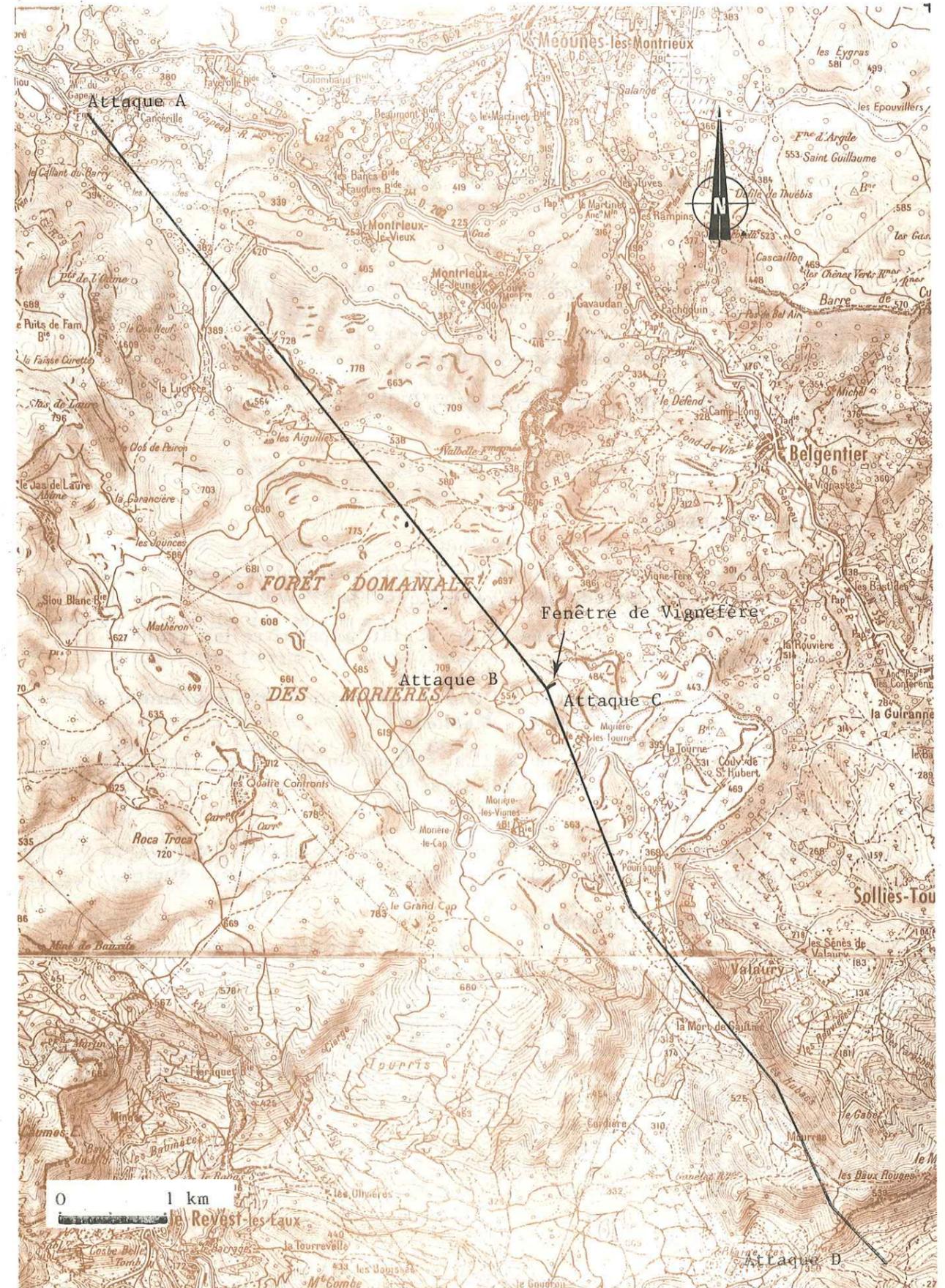


Fig. 2

SITUATION DANS LE CONTEXTE REGIONAL

CARTE DE SITUATION

Fig. 3



SITUATION GEOLOGIQUE

I - CADRE GEOLOGIQUE REGIONAL

Située au coeur de la Provence, la zone étudiée ne présente qu'un aspect très réduit de cette région exceptionnellement intéressante du point de vue géologique. Replacer le secteur dans son contexte sera le premier objectif de cette étude qui retracera un bref historique géologique.

Une carte simplifiée et synthétique permettra de mettre en relief les grandes unités géologiques.

1 - SITUATION GENERALE

Au Sud-Est de la France, entre les grands ensembles alpins et pyrénéo-provençaux, se situe une grande unité géologique : la Provence.

La carte synthétique proposée (Fig. 4) fait apparaître les grandes divisions de cette région.

- La Provence rhodanienne à l'Ouest correspond principalement aux dépôts quaternaires du Bas-Rhône.
- La Provence hercynienne à l'Est s'étend du massif du Tanneron à la rade de Toulon, comprenant ainsi le massif des Maures et de l'Estérel.
- La Provence calcaire est formée de modestes chaînons séparés par des bassins. C'est dans cette unité que se situe le terrain étudié.

2 - HISTOIRE GEOLOGIQUE REGIONALE

2.1. - Historique des connaissances

Dès la fin du siècle dernier, bon nombre de stratigraphes : L. Collot, H. Coquard, Ph. Matheron, A. Toucas, G. Vasseur, s'intéressèrent à la Provence. Ph. Zurcher, mais surtout M. Bertrand, se sont appliqués à définir la tectonique régionale en proposant la notion de " recouvrement " (M. Bertrand 1887) à laquelle succéda celle de charriage.

Cette école eut de nombreux défenseurs parmi lesquels les noms de L. Bertrand, E. Haug (1915, 1925, 1930) et A. Lanquine (étude du Jurassique provençal :

1929, 1935) sont les plus représentatifs.

C'est en 1924 que L. Lutaud fait intervenir la notion de chaîne de couverture. Il démontre l'indépendance tectonique de la couverture sédimentaire secondaire par rapport au socle cristallin et au tégument permien et triasique inférieur ; les niveaux gypseux du Trias favorisant le glissement.

Ces deux notions fondamentales et caractéristiques, chaîne de couverture et charriage (ramené à sa juste valeur), sont aujourd'hui unanimement reconnues et constituent le point de départ des études ultérieures.

En 1943, J. Goguel démontre la dépendance existant entre la nature lithologique et le style tectonique. L'étude des chevauchements fut détaillée par G. Corroy, Cl. Gouvernet et C. Denizot. Ils démontrèrent l'enracinement des accidents de la couverture sur des accidents du socle.

Parallèlement, J. Aubouin s'intéressa au décollement de la couverture et G. Mennessier à la structure du contact zone alpine et provençale. Pour sa part, C. Cornet décrivait l'évolution tertiaire et quaternaire de la Provence depuis l'Oligocène.

Enfin, les travaux de J. Aubouin et G. Mennessier (1960-1962) font une synthèse des travaux ayant trait à la région.

2.2 - Evolution stratigraphique

L'histoire de la Provence débute par l'orogénèse hercynienne qui a soulevé le massif cristallin des Maures.

A partir du Permien, la sédimentation se poursuit jusqu'au Quaternaire.

- Le Permo-Trias :

Les dépôts permien sont détritiques et s'effectuent au sein d'un milieu de type lacustre. La base du Trias ne diffère pas tellement du Permien si ce n'est par une sédimentation plus fluviatile.

Les premiers changements s'effectuent à la base du Muschelkalk où les formations ont un caractère marin peu profond. Le Keuper diffère peu du Muschelkalk et, comme lui, présente des niveaux à gypse et anhydrite. Des dolomies et cargneules à grandes cavités sont également à rattacher à cet étage.

- Le Jurassique :

Au Jurassique, l'immersion est totale. Les différences de faciès sont dues aux variations bathymétriques.

Ainsi, le Rhétien fait généralement corps avec l'Hettangien et est représenté par des calcaires dolomitiques ou des dolomies. La dolomitisation paraît plus importante à l'Hettangien.

Le Lias correspond à un milieu peu profond tandis que la bathymétrie augmente au Dogger. La paléogéographie de ces formations est mouvante et il y a souvent intrication entre les différents faciès. Des passées marneuses, plus ou moins importantes se retrouvent fréquemment intercalées entre des bancs de calcaires marneux.

Le Jurassique supérieur se caractérise par une sédimentation moins profonde donnant des calcaires blancs et des dolomies .

- Le Crétacé :

Au Néocomien , les émerisions sont sporadiques , tandis que le Barrémien constitue un retour aux conditions périrécifales .

Premier accident dans l'histoire de cette sédimentation , le soulèvement de l'Isthme Durancien est d'âge Albien supérieur-Cénomanién inférieur ; ce bombement est un plissement à grand rayon de courbure . Au Cénomanién supérieur et au Turonien , une transgression , venue du S. SW. , recouvre le bassin du Beausset et la partie Sud de la Sainte-Baume .

Au Santonien et au Coniacien , la transgression se poursuit , faisant apparaître de très nombreuses variations de faciès .

La régression générale du Campanien amorce la surrection du Crétacé Supérieur . Les faciès sont lagunaires et très localisés (Valdonnien et Fuvelien) .

Il y a émerision au Maëstrichtien avec un mouvement de bascule du Sud vers le Nord ; l'érosion consécutive donne des sédiments détritiques .

Le passage Crétacé-Tertiaire est donc caractérisé par des faciès continentaux marqués par l'ébauche des accidents tectoniques .

- Le Tertiaire :

L'Eocène continental se termine par une grande phase tectonique . C'est la phase provençale ou pyrénéo-provençale responsable des grands chevauchements de la région .

En parallèle , se créent des bassins comblés de produits oligocènes : ce sont les bassins d'Aix et de Marseille .

Un changement important apparaît au Miocène avec l'arrivée d'une transgression marine . Cette transgression envahit le sillon molassique périalpin où se forment des dépôts très fossilifères .

Un mouvement de bascule vers le Sud intervient au passage Miocène-Pliocène . Il est responsable de l'inversion du sens des transgressions . Au Miocène , le niveau de base marin était vers le Nord alors que la transgression pliocène vient du Sud .

- Le Quaternaire :

Rien de très important n'affecte la région à cette époque . Située en bordure des Alpes , elle appartient au domaine périglaciaire et effectue un mouvement de bascule vers l'Ouest .

3 - ETUDE DE LA STRUCTURE REGIONALE

3.1. - Evolution structurale

La série de couverture débute par un Trias à évaporites très important. Dans les formations supérieures , les dépôts sont plus ou moins épais , néritiques et présentent quelques lacunes dues à des émerisions temporaires .

La plus importante date de l'Albien supérieur et correspond à l' " Isthme Durancien " . Ce bombement est consécutif au soulèvement de la chaîne pyrénéenne . Les oscillations de la mer traduisent un jeu de plateforme en partie immergée .

Les plissements s'effectuent en deux phases . La première , datée fin Crétacé-début Tertiaire , ébauche des accidents tectoniques cassants . Celle de l'Eocène supérieur , plus importante , est responsable des chevauchements provençaux . Elle porte le nom de phase pyrénéo-provençale .

Longtemps après ces phases de plissement , la Provence bascule du Sud vers le Nord . Ainsi , les massifs anciens des Maures et de l'Esterel sont exhausés à la limite Oligocène-Miocène .

Fin Miocène-début Pliocène , un nouveau mouvement de bascule s'effectue en sens inverse . Il est responsable de l'immersion de la Provence effondrée et de la formation des calanques .

Au Quaternaire , la fin temporaire de cette évolution structurale se traduit par un ennoyage vers l'Ouest responsable des grandes accumulations alluviales de la Camargue .

3.2. - Style structural

La Provence est une chaîne de couverture typique . La tectonique de compression alpine n'a eu aucun effet sur le vieux matériel du socle cristallin et s'est exercée uniquement sur la couverture, le Trias à évaporites ayant permis la disharmonie de comportement .

Le style de plissement reflète deux caractéristiques de la région .

- L'épaisseur variable des séries sédimentaires scinde la Provence en deux parties . Celle du Sud , échappant à l'émerision de l'Isthme Durancien , présente une série crétacé complète et relativement épaisse . Le style tectonique correspondant se traduit par des plissements souples : c'est le grand chevauchement Sud-Provençal à déversement vers le Nord .

La Provence du Nord , émergée au Crétacé moyen et supérieur (remplacé par la bauxite) comporte une série réduite avec des accidents tectoniques courts et discontinus , qui sont surtout des chevauchements de faible amplitude .

- Les deux phases de plissement , précédemment décrites , sont séparées par une époque d'érosion . Il en résulte une morphotectonique, décrite par L. Lutaud, qui intéresse des anticlinaux formés à la fin du Crétacé .Leurs sommets, éventrés à l'Eocène inférieur et moyen, subissent la phase tectonique de l'Eocène supérieur qui agit sur un matériel ayant perdu sa continuité . Il s'ensuit un mécanisme indépendant dans chaque compartiment en fonction de l'espace disponible .

4 - PRESENTATION DE LA CARTE REGIONALE

4.1. - Les ensembles régionaux

La carte N° 4 fait ressortir les grands ensembles régionaux .

Il est facile de distinguer :

- Le socle cristallin
- Le tégument (Permien et Trias inférieur)
- La couverture comprenant
 - . Le Trias (moyen et supérieur)
 - . Le Jurassique et le Crétacé inférieur
 - . Le Crétacé supérieur
 - . Le Maestrichtien - Eocène
 - . L'Oligo - Miocène
 - . Le Quaternaire

4.2. - Le secteur dans la région

Située sur la carte N° 4 , la zone étudiée constitue la bordure orientale du bassin du Beausset . Ce synclinal d'âge Crétacé supérieur présente à sa périphérie des formations essentiellement jurassiques , pentées régulièrement vers l'Ouest et qui constituent la majeure partie de la zone d'étude .

Au Nord , se situe la dépression triasique de Signes - Méounes .

Au Sud , le massif se termine par les monts Nord Toulonnais (Le Coudon).

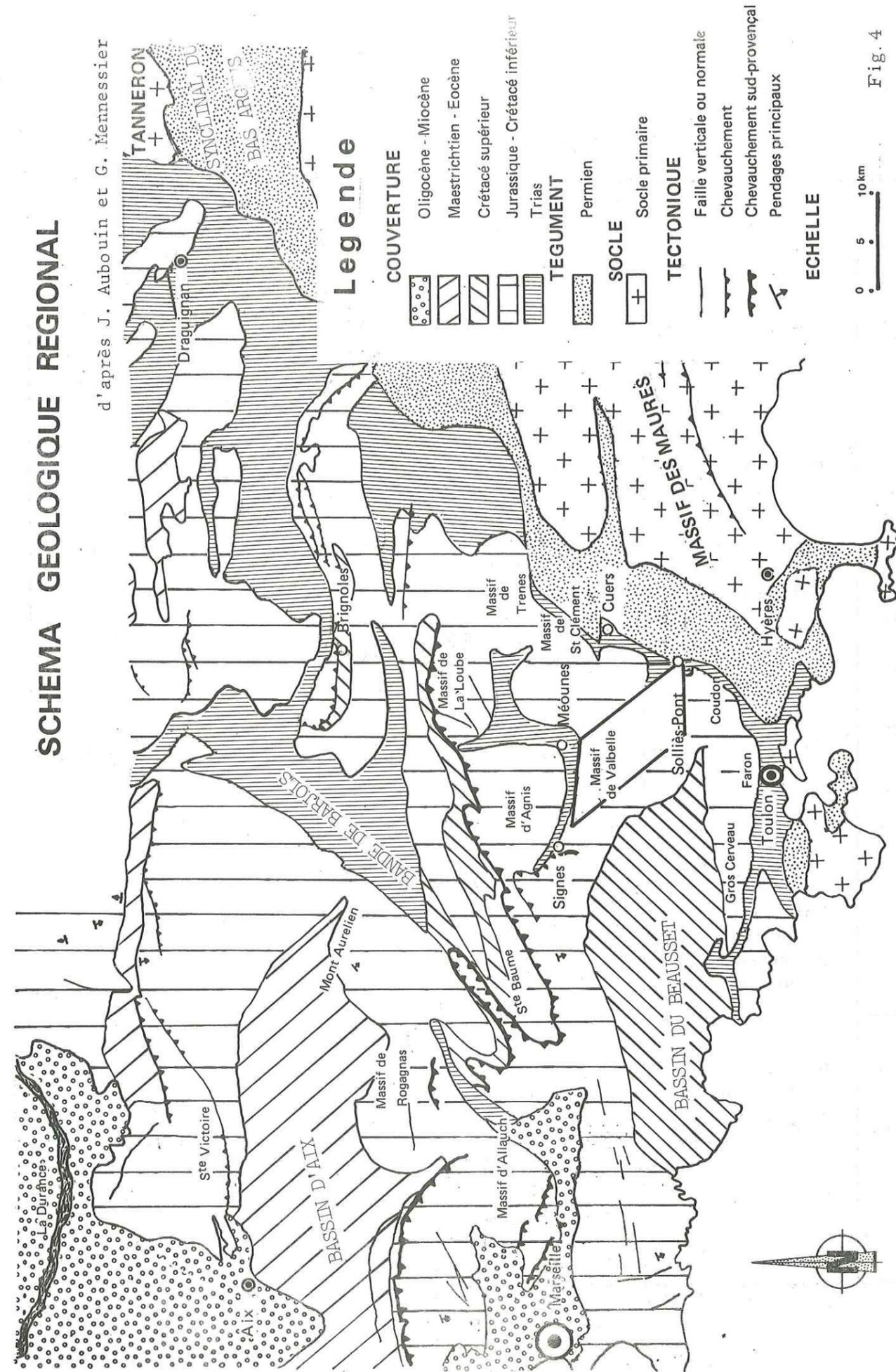
La frange triasique bordant la dépression permienne de Cuers limite au S. SE. le cadre de l'étude .

II - CADRE GEOLOGIQUE DU SECTEUR ETUDIE

1 - ETUDE STRATIGRAPHIQUE

Pour la cartographie , il est nécessaire de définir précisément les différents terrains . Un log. stratigraphique illustre , de façon claire , les formations , tandis qu'une étude lithologique parallèle détaille le profil géologique du secteur .

Avant de conclure sur la stratigraphie , différents problèmes , locaux ou régionaux , seront évoqués .



Périodes	AGES	Formations géotechniques	Figuré sur la carte	Epaisseurs appréciées	FIGURES
C R E T A C E	Barrémien	Faciès urgonien		300 m	
	Hauterivien				
	Valanginien supérieur				
C R E T A C E	Valanginien inférieur	Niveau à Marnes Vertes		30 m	
	Berriasien supérieur			15 m	
C R E T A C E	Berriasien inférieur	Faciès portlandien		70 m	
	Tithonique supérieur				

LITHOLOGIE DE SURFACE	REMARQUES LITHOLOGIQUES EN GALERIE
<p>Ce faciès typique est constitué de calcaire blanc massif de cassure conchoïdale assez mal stratifié. Cette formation constitue les barres sommitales du paysage. Rencontrée au Grand Cap et au Jas des Laures, elle présente des surfaces fortement lapiazées. Macroscopiquement, des sections de rudistes sont visibles (Requiena, Toucasia).</p>	<p>La zone observée est de faible étendue. C'est un calcaire blanc, massif, où de nombreux indices karstiques (trous, fissures ouvertes, etc ...) ont été révélés.</p>
<p>Niveau mince de calcaires marneux grumeleux. Barre de calcaires récifaux blancs fins à sections de petits rudistes.</p>	<p>Marnes compactes gris-vertes veinées vert olive. Marno-calcaire vert jaune devenant de plus en plus foncé vers le sommet. Calcaire gris, puis vert. Calcaire à cassure rose.</p>
<p>Cette formation surmonte la masse dolomitique néojurassique. Ces Calcaires Blancs, à pâte fine, sont par endroits soumis à la dolomitisation. La cassure conchoïdale s'accompagne de menues esquilles. Le litage reste net : les surfaces sont souvent lapiazées. Azoïque.</p>	<p>Ce calcaire blanc, crème, à pâte fine, est parcouru par de très nombreuses diaclases d'argile rouge (20cm).</p>

Périodes	AGES	Formations géotechniques	Figuré sur la carte	Epaisseurs appréciées	FIGURES
J U R A S S I Q U E	Tithonique Kimmeridgien Oxfordien Callovien	Dolomies néojuras- siques		350 m	
	Bathonien supérieur	Bathonien supérieur		70 m	
	Bathonien inférieur Bajocien supérieur	"Dogger"		300 m	

LITHOLOGIE DE SURFACE	REMARQUES LITHOLOGIQUES EN GALERIE
<p>Il s'agit d'une masse de dolomies claires donnant au paysage un aspect ruiforme. De patine grisâtre, ces dolomies ont des cassures grises, blanches, parfois beiges; elles sont saccharoïdes. L'altération sableuse et la présence de nombreux avens laissent présager un réseau souterrain important. Azoïque.</p>	<p>Dans ce faciès, trois divisions sont possibles :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dolomies beiges saccharoïdes. L'altération sableuse importante produit un enduit ocre rosé sur les parements. La stratification est quasiment invisible. - Dolomies grises à grains plus grossiers que les dolomies beiges. Cette formation a 25 m d'épaisseur environ. La finesse du grain et la couleur plus claire augmentent en montant dans la série. - La base (environ 20 m) est formée de bancs réguliers (1 à 1,50 m d'épaisseur). Lorsqu'il n'est pas altéré (couleur grise à brun-rouille et aspect poreux) l'échantillon est de couleur grise mouchetée de vert par de nombreux grains de glauconie.
<p>Sous cette appellation sont regroupés des calcaires "bicolores", en bancs réguliers (50 cm) qui forment une barre. La cassure, esquilleuse, est de couleur grise alors que la frange altérée est jaune-ocre. La pâte est souvent micacée. De nombreux fragments de laméllicornes sont visibles.</p>	<p>Ce calcaire massif, gris-fer, se caractérise par un débit très esquilleux donnant aux parements un aspect très découpé. La stratification est très difficile à discerner.</p>
<p>Cette puissante série donne des formes vallonnées. Ceci est dû à l'alternance de calcaires plus ou moins marneux et de marnes peu épaisses (lits de 10 à 20 cm). Les calcaires, de patine jaune clair, ont une cassure gris-bleu.</p>	<p>Constituée de calcaires gris, cette formation diffère des terrains supérieurs par la présence d'interbancs plus marneux soulignant la stratification.</p>

Périodes	AGES	Formations géotechniques	Figuré sur la carte	Epaisseurs appréciées	FIGURES
E U Q S S		"Dogger"			
	Bajocien inférieur				
	Aalénien Toarcién Pliensbachien	Lias		40 m	
	Sinemurien Hettangien	Dolomies Infraliasiques		100 m	
R A S U J	Rhétien	Rhétien		30 m	
	Keuper				
	Supérieur Muschelkalk Inférieur	Trias			

LITHOLOGIE DE SURFACE	REMARQUES LITHOLOGIQUES EN GALERIE
<p>Leur répartition en bancs est assez irrégulière (bancs de 20 à 70 cm). Une faune abondante a été décrite : lamellibranches, céphalopodes dans les calcaires, Cancélophycus dans les marnes.</p>	<p>Les interbancs marneux se débitent en crayons et l'altération, tout comme pour le Bathonien supérieur, est argileuse, de couleur gris-jaune.</p>
<p>Niveau très mince (centimétrique) de calcaire dur, ferrugineux, "couches à Witchellias".</p>	
<p>Ce calcaire roux à beige forme des bancs de 60 cm en moyenne. Sa cassure esquilleuse est gris-noir avec un aspect saccharoïde et quelques micas. Les joints argileux sont faibles (4 cm).</p>	<p>Non observé</p>
<p>Il s'agit de dolomies grises ou blanches soit en bancs épais, soit en lits minces (10 cm). Les interbancs sont remplis de marnes vertes. Le débit parallélépipédique est caractéristique.</p>	<p>Ces dolomies plus rousses que les dolomies néojurassiques sont grisâtres à roses en cassure. Elles sont caractérisées par des intercalations de marne verte bien visibles.</p>
<p>Bancs de calcaire marneux alternant avec des marnes vertes. Calcaire détritique et coquillier.</p>	<p>Non observé</p>
<p>Masse de gypse très plissoté. Marnes bariolées. Cargneules à cavités importantes. Dolomies en bancs bien individualisés. Calcaire dolomitique. Calcaire compact à cassure sombre, bien lité. Alternance de grès fins, de marnes jaunes et de grès dolomitiques.</p>	<p>Amas très diffus d'argile compacte ou d'argile très schistifiée de couleur noire. L'ensemble est fortement veiné de gypse blanc.</p>

1.1. - La série stratigraphique

- Sur la coupe de la série stratigraphique , les différentes formations ont été datées en fonction des âges présumés .

Pour une meilleure compréhension de la part des entreprises , un découpage lithographique a été opéré . Bien que n'ayant souvent qu'un lointain rapport avec l'âge des terrains désignés , nous avons conservé ces appellations qui apparaîtront fréquemment lors des levés géotechniques . C'est ainsi que le " Dogger " regroupera le Bajocien supérieur et le Bathonien inférieur , tandis que le terme " Bathonien " correspondra au Bathonien supérieur qui présente des caractéristiques hydrogéologiques et géotechniques qui lui sont propres .

- L'étude lithologique adjacente a été scindée afin de mieux apprécier les différences entre l'affleurement de surface et la nature de la roche en profondeur .

1.2. - Problèmes lithostratigraphiques

Deux problèmes se retrouvent fréquemment dans cette région :

- L'appréciation des limites Portlandien-Urgonien .

- La dolomitisation et son effet sur le Portlandien .

- La dolomitisation affecte de nombreuses formations depuis le Trias . Ses différents aspects ont été détaillés , en galerie , au sein des terrains néojurassiques . La granulométrie décroît progressivement de la base (bancs distincts de dolomie granuleuse) vers le sommet (masse des dolomies beiges) . La couleur aussi passe progressivement du noir au beige clair . Les grains de glauconie s'estompent vers le sommet tandis que les dolomies beiges d'abord saccharoïdes perdent lentement ce caractère .

Au sommet de la formation , les distinctions sont beaucoup plus floues . Il arrive que le Portlandien soit , lui-même , complètement dolomitisé . Malheureusement , en galerie , le contact entre le Portlandien et les dolomies n'a jamais pu être observé autrement que par l'intermédiaire d'un accident tectonique .

De pâte plus fine , les calcaires se distinguent par une stratification plus nette que les dolomies .

- Le problème de datation du faciès Urgonien est bien connu . Il s'est posé lors du percement de la galerie de Valaury où , au sommet du Portlandien , un ensemble marneux vert était sous-jacent à des calcaires blancs . D'abord interprété comme une variation locale de faciès , les calcaires blancs supérieurs se sont avérés être d'âge Valanginien à faciès Urgonien (association de foraminifères typiques : Valdanchella miliani et Trocholina elongata) . Il était donc évident que les marnes vertes constituaient la zone limite entre Portlandien et Urgonien . Suivant les récents travaux de J. P. Masse (communication orale) , le faciès Urgonien se distingue dès le sommet des niveaux repères de marne verte .

CARTE GEOLOGIQUE

D'après C. Choquet modifiée

LEGENDE

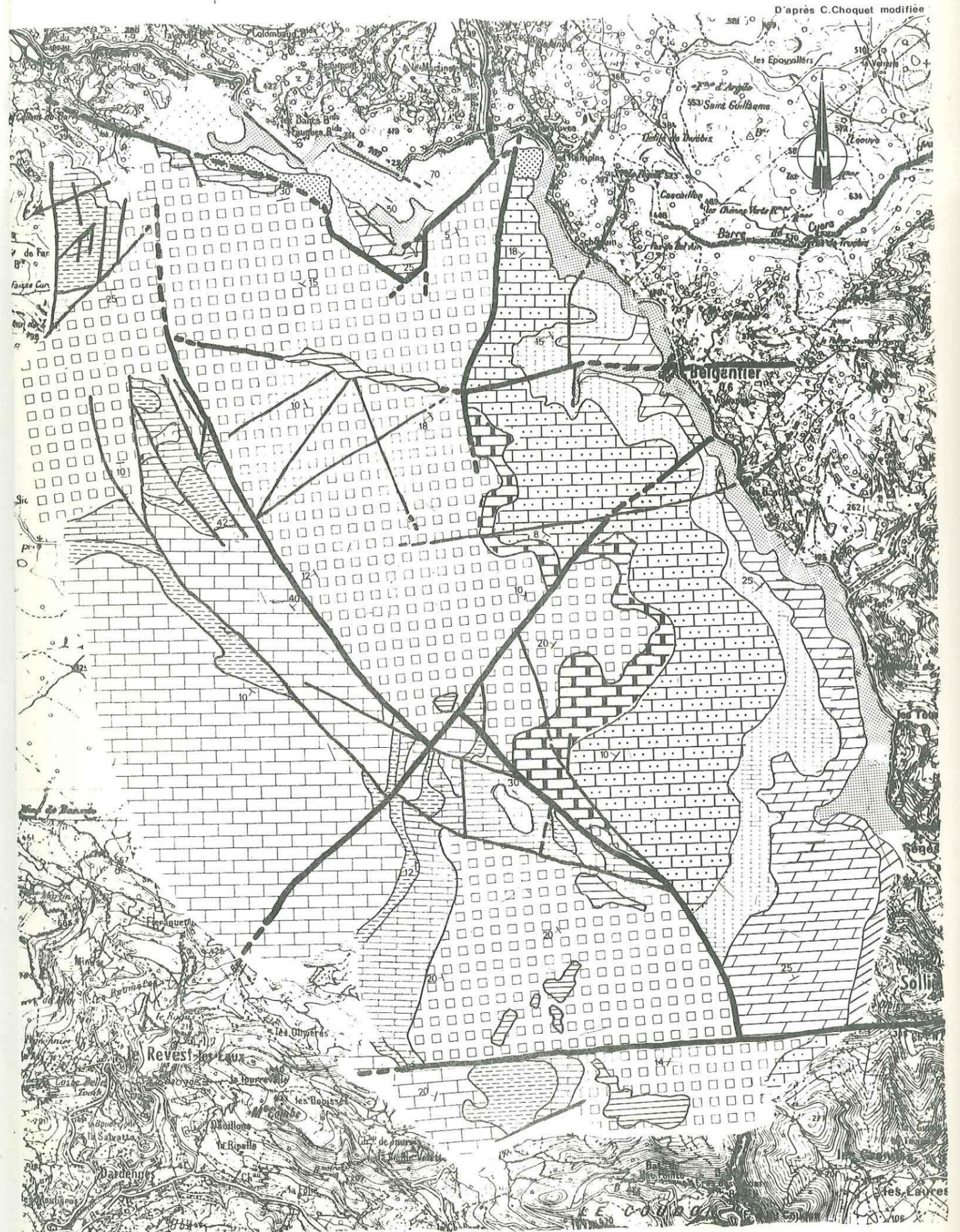
-  Alluvions et éluvions
 -  Dépression karstique
 -  Eboulis
 -  Urgonien
 -  Marnes valanginiennes
 -  Portlandien
 -  Dolomie néojurassique
 -  Bathonien supérieur
 -  Dogger
 -  Lias moy et sup
 -  Hettangien
 -  Rhétien
 -  Trias

 -  Principal
 -  Secondaire
 -  Supposé
 -  Pendage
- } Contact
} anormal

Echelle : 1/50.000



Fig. 5



2 - ETUDE CARTOGRAPHIQUE

Présentation de la carte géologique

La carte géologique montre qu'apparemment le secteur étudié n'est pas d'une grande complexité géologique .

Deux parties s'individualisent :

- Le massif de Valbelle .
- Les bordures Nord et Est .

- Le Massif de Valbelle :

Couvert de l'épaisse forêt domaniale des Morières , c'est un vaste monoclinal penté vers l'Ouest d'environ 20° . Les dolomies néojurassiques à l'Est et l'Urgonien à l'Ouest couronnent les formations sous-jacentes . La tectonique perturbe quelque peu cet ensemble avec trois directions préférentielles : N 140 , N 45, N 90 et des ondulations locales sont à signaler .

Si le passage entre le Trias et les autres formations s'effectue progressivement dans le Sud , il n'en est pas de même au Nord où le massif des Morières vient buter sur le Trias de la plaine de Signes .

- Les bordures Nord et Est du massif des Morières :

Au Nord , se trouve la plaine triasique de Signes , dont les affleurements sont en contact anormal avec les dolomies néojurassiques . Ce contact , quoique peu visible sur le terrain , fera l'objet d'une étude plus approfondie .

A l'Est , une série de fractures décale , plus ou moins , les formations du Jurassique . La Vallée du Gapeau s'entaille dans des terrains essentiellement liasiques jusqu'à atteindre le Trias au Sud , vers Solliès-Pont .

3 - ETUDE DE QUELQUES PARTICULARITES GEOLOGIQUES

Certains points particuliers ont été jugés intéressants à détailler . L'étude pétrographique des terrains peut en effet permettre de comprendre plus aisément la dolomitisation , l'altération ou la karstification .

La mise au point de la carte géologique a soulevé le problème du " chevauchement de Montrieux " dont l'étude va être approfondie .

3.1. - Etude pétrographique

En lame mince , une distinction s'impose au départ entre les roches calcaires et dolomitiques .

- Les roches calcaires :

Très vite , à l'observation , deux classes sont apparues :

+ Les calcaires cryptocristallins comprennent :

- . Les calcaires du "Dogger" dans lesquels apparaissent quelques fragments de lamellibranches et des micas en baguette .
- . Les calcaires Portlandien , avec des filonnets et des plages de recristallisation de calcite . Si quelques cristaux losangiques de dolomies sont visibles , la texture reste plus fine que celle du "Dogger" .

+ Les calcaires microgrenus :

- . Les plus finement grenus sont les calcaires du Bathonien supérieur où un léger voile gris laisse présager d'un début de dolomitisation . De nombreux filonnets très fins semblent indiquer une micro-fissuration .
- . Les calcaires du Lias sont très riches en débris organiques . De grandes plages de recristallisation de calcite sont à noter .
- . Le calcaire Urgonien est un calcaire construit où dominant les foraminifères .

- Les roches dolomitiques :

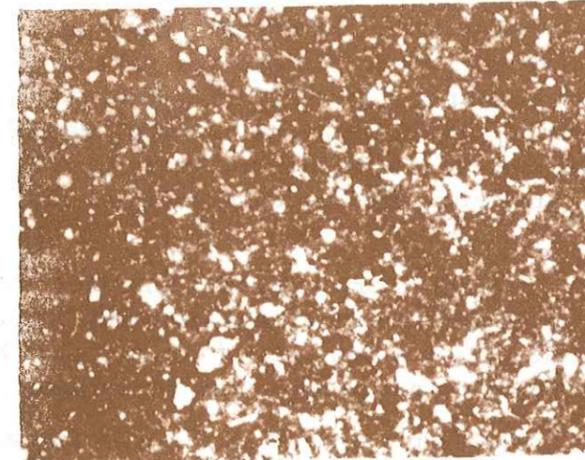
Au sein des dolomies néojurassiques , les bancs de la base ont été étudiés séparément . Ils sont constitués d'une roche cristalline à grains de dolomie automorphes , de forme losangique . Des traces de rouille semblent provenir des grains de glauconie visibles sur l'échantillon et invisibles en lame mince .

Les dolomies beiges , cristallines , présentent des grains moulés les uns aux autres . Ces plages grenues sont voilées de gris et de brun clair .

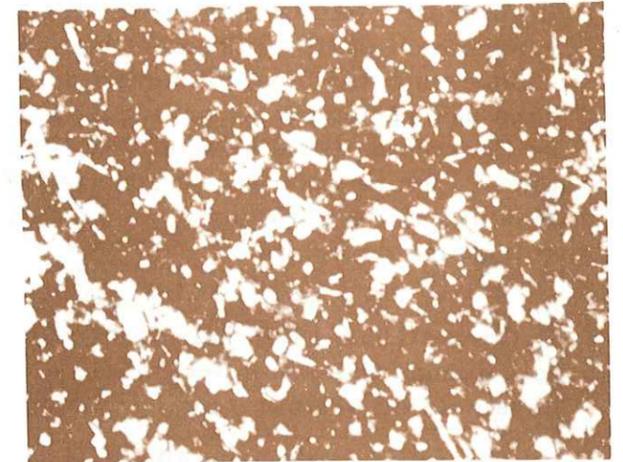
On peut conclure de l'examen de ces roches en lame mince que la dolomitisation paraît synsédimentaire donc primaire et que les teneurs élevées en $CaCO_3$ facilitent les phénomènes de dissolution .

ETUDE PETROGRAPHIQUE

Fig.6

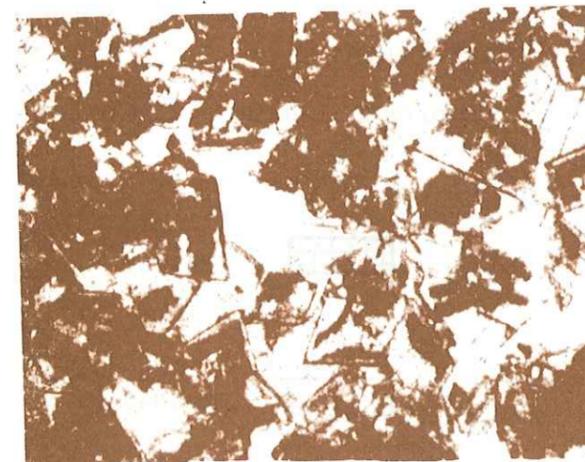


"Dogger"

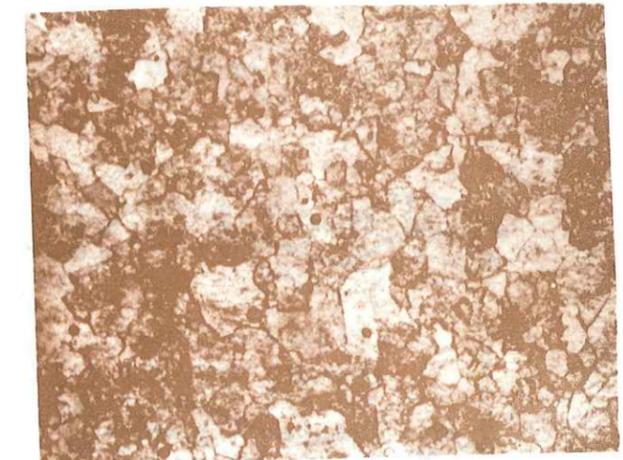


Bathonien supérieur

L.N. 0 0,1mm



NIVEAU DE BASE



Dolomies néojurassiques

3.2. - Etude du " chevauchement " de Montrieux

Un certain nombre de points particuliers a attiré notre attention sur le secteur compris entre Montrieux-le-Vieux à l'Ouest et le Gapeau au lieu dit " Le Martinet " à l'Est .

L'accident affectant cette zone est appelé " chevauchement de Montrieux ". Il apparaît , dès la lecture de la carte géologique au 1/50.000e , comme un chevauchement particulièrement horizontal ou très faiblement incliné . Ceci peut choquer d'autant que son dessin indique une continuité tectonique sur près de 4km dans une région où les accidents sont plutôt cassants . Le deuxième point intéressant l'entrée de la galerie de Var III qui recoupe cet accident . A sa côte , dans le tunnel , on ne note pas de zone faillée indiquant un chevauchement mais tout au plus une faille quasiverticale (zone de bourrage d'argile multicolore avec des amygdales de dolomie).

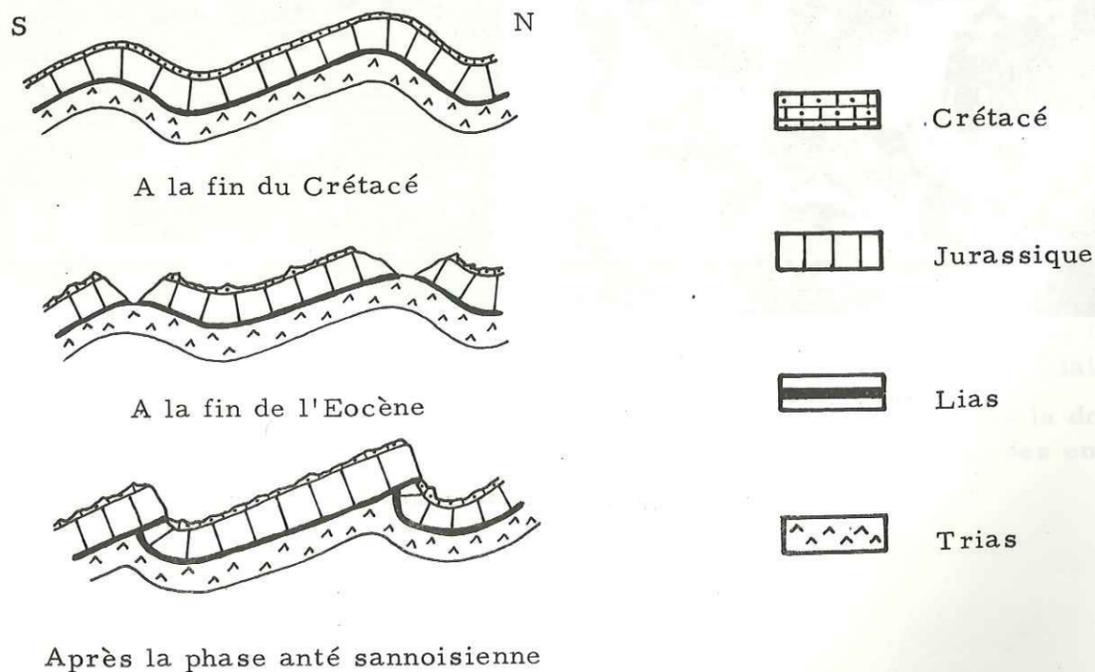
Sur le terrain , on constate que les contacts décrits par A. Lanquine (1934), C. Cornet (1957-1958) puis par C. Choquet (1972) se retrouvent parfaitement. Toutefois aucune indication tectonique n'est visible . Il n'y a pour cela (comme pour l'ensemble du secteur) que la photographie aérienne qui puisse nous renseigner .

Cette étude nous amène à une interprétation proposée Fig. 7 . Elle fait apparaître un certain nombre de fractures dont l'orientation et le mécanisme seront développés dans le prochain chapitre . Dès à présent , on peut conclure en présentant l'accident de Montrieux non plus comme un chevauchement de type classique mais plutôt comme un ensemble de failles inverses plus ou moins décrochantes . Le caractère chevauchant du secteur subsiste au niveau de la région surtout si l'on considère la dépression triasique au Nord comme étant un anticlinal éventré , ce qui semble être le cas .

MORPHOTECTONIQUE PROVENCALE

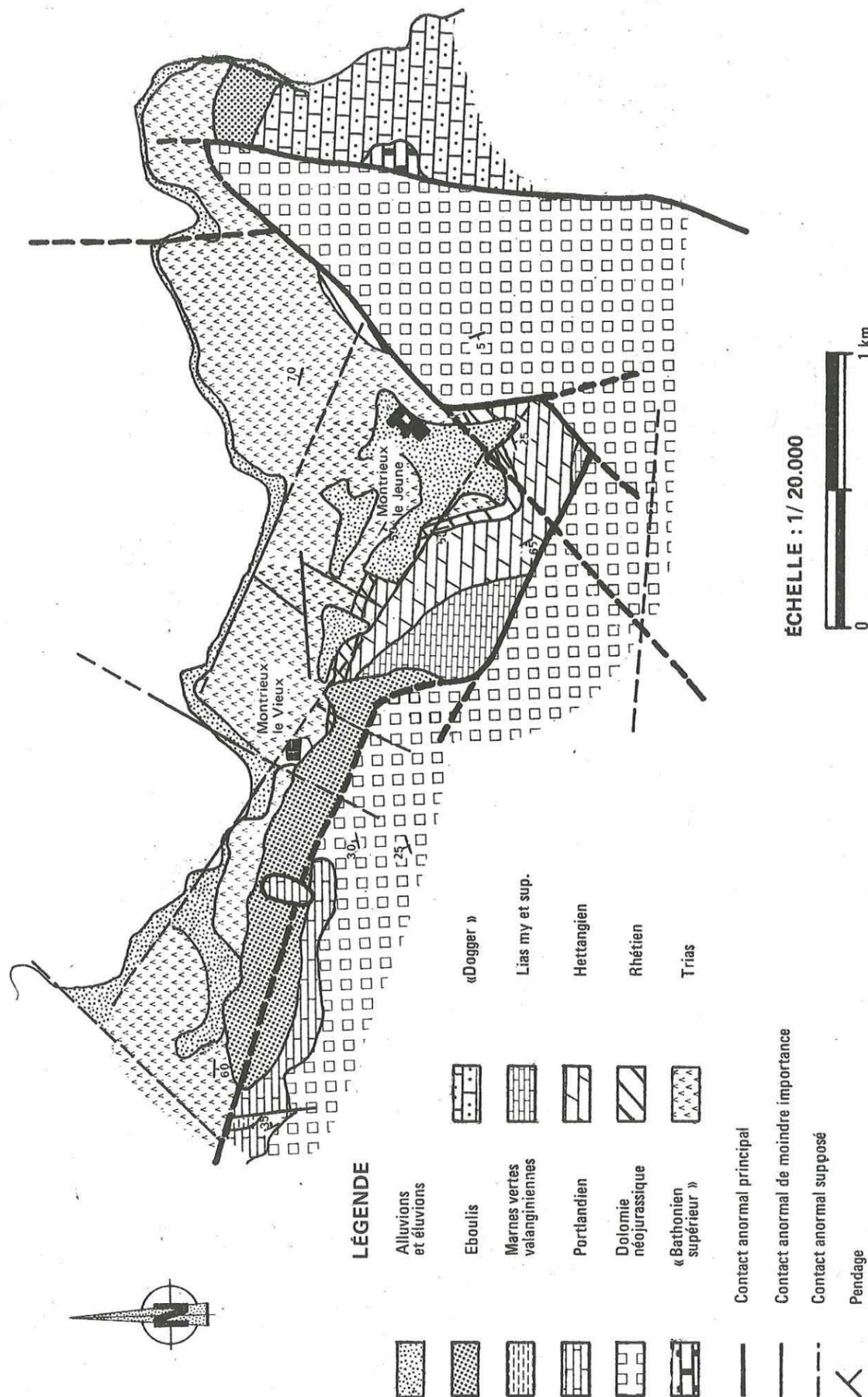
Fig. 8

d'après L. Lutaud et C. Cornet



CARTE INTERPRETATIVE DU SECTEUR DE MONTRIEUX

Fig. 7



CONCLUSION

Situé au coeur de la Provence calcaire , le secteur étudié constitue la bordure orientale du bassin crétacé du Beausset . Bien que l'histoire géologique régionale soit particulièrement compliquée , il se présente sous forme d'un vaste monoclinale de calcaires et de dolomies . Les terrains rencontrés s'étendent du Trias jusqu'au Crétacé inférieur à faciès Urgonien .

L'étude géologique a permis de détailler leur nature tant à l'échelle de l'affleurement qu'en lame mince donnant ainsi des caractéristiques intéressantes pour la géotechnique et l'hydrogéologie .

L'étude particulière de la partie Nord de la carte donne à penser que l'accident de Montrieux , loin d'être un chevauchement , serait un ensemble de fractures plus ou moins inclinées ; leurs pendages pouvant par endroits déverser les terrains Jurassiques sur la plaine triasique de Signes .

Ces observations ont un caractère essentiellement descriptif . Il faut donc , à présent , trouver les mécanismes qui régissent les structures . C'est dans cette optique que sera menée l'étude structurale et tectonique .

CHAPITRE II

ETUDE STRUCTURALE

I - INTRODUCTION

II - ETUDE DE LA FRACTURATION

III - CRITIQUE DE LA METHODE

IV - ESSAI D'INTERPRETATION STRUCTURALE

V - CONCLUSION

I - INTRODUCTION

1 - PROBLEME DE L'ECHELLE

Un problème peut n'apparaître qu'à une échelle déterminée et ainsi revêtir un caractère particulier. Par contre, il peut se retrouver, également, à différentes échelles et refléter un aspect général du secteur étudié.

Il est donc important d'analyser les problèmes posés à différentes échelles et de comparer les résultats obtenus.

+ A l'échelle du secteur, donc kilométrique, la carte de la fracturation met en évidence les accidents majeurs. Une analyse des accidents "secondaires" permet de distinguer les accidents satellites des accidents indépendants.

- . Les accidents satellites se raccordent aux accidents majeurs suivant les critères classiques de la géologie structurale.
- . Les accidents indépendants peuvent être le vestige de phases tectoniques différentes des grands accidents parcourant le secteur.

+ Les mesures sur les affleurements de surface sont à rapprocher de celles effectuées en galerie. L'échelle peut être métrique, décimétrique, plus rarement centimétrique.

Un dépouillement semblable à celui proposé ci-dessus permet souvent de vérifier des données perçues à l'échelle supérieure.

Très souvent l'étude métrique de l'affleurement permet de mieux comprendre l'agencement des structures lorsque les phénomènes se retrouvent aux différentes échelles.

2 - ECHANTILLONNAGE DES MESURES

Une sélection précise et judicieuse est à effectuer dans l'échantillonnage des mesures.

A l'échelle de l'affleurement, il est nécessaire de considérer les fractures selon leurs paramètres d'épaisseur, de remplissage, de direction et de plongement.

L'échantillonnage doit être fonction des objectifs recherchés. Il sera différent s'il concerne la recherche des grands accidents ou l'étude statistique de la fissuration.

Les classifications sont encore assez mal déterminées, aussi avons-nous adopté un tableau pratique d'utilisation.

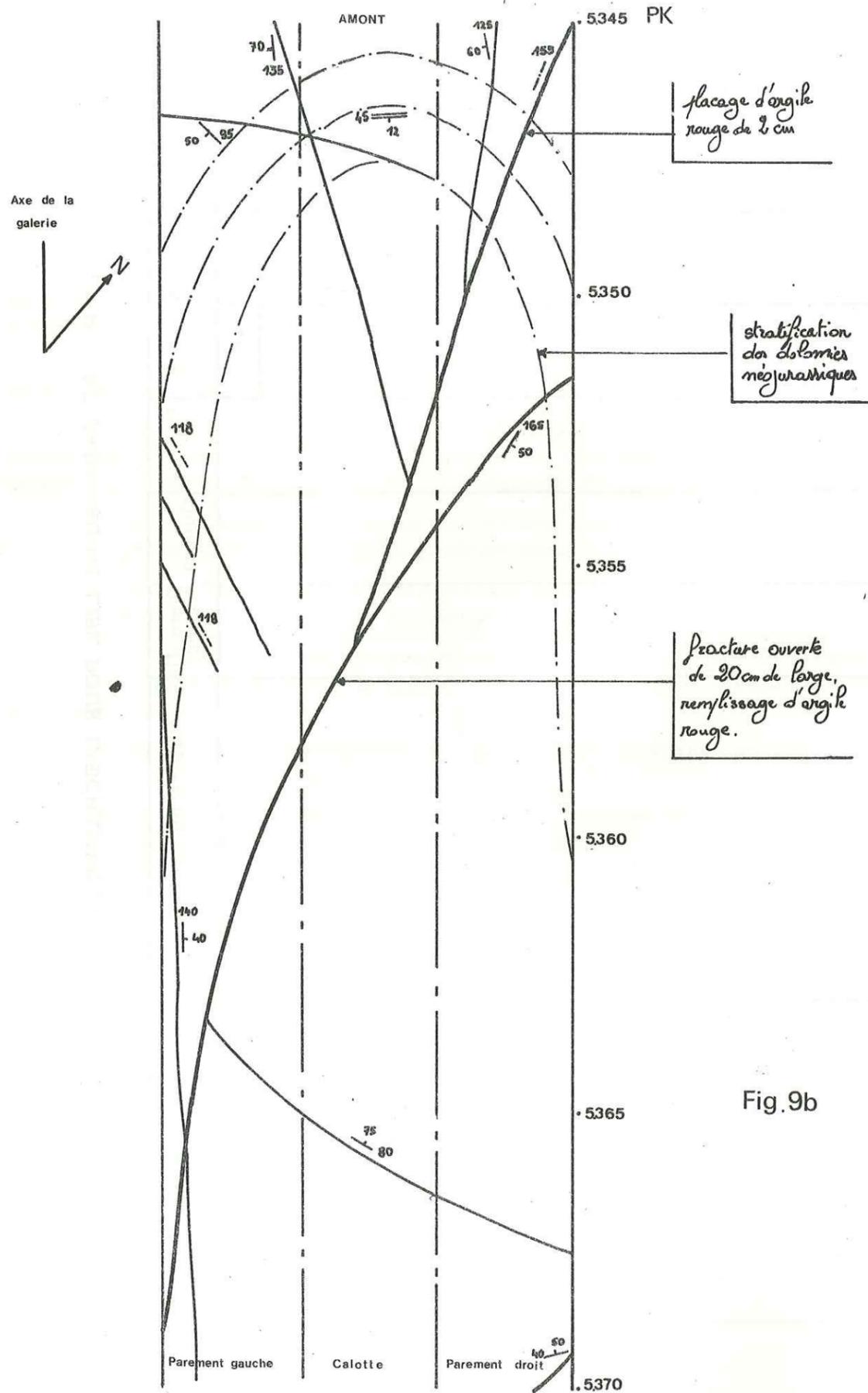
EXEMPLE DE TABLEAU UTILISE POUR L'ECHANTILLONNAGE

Fig. 9

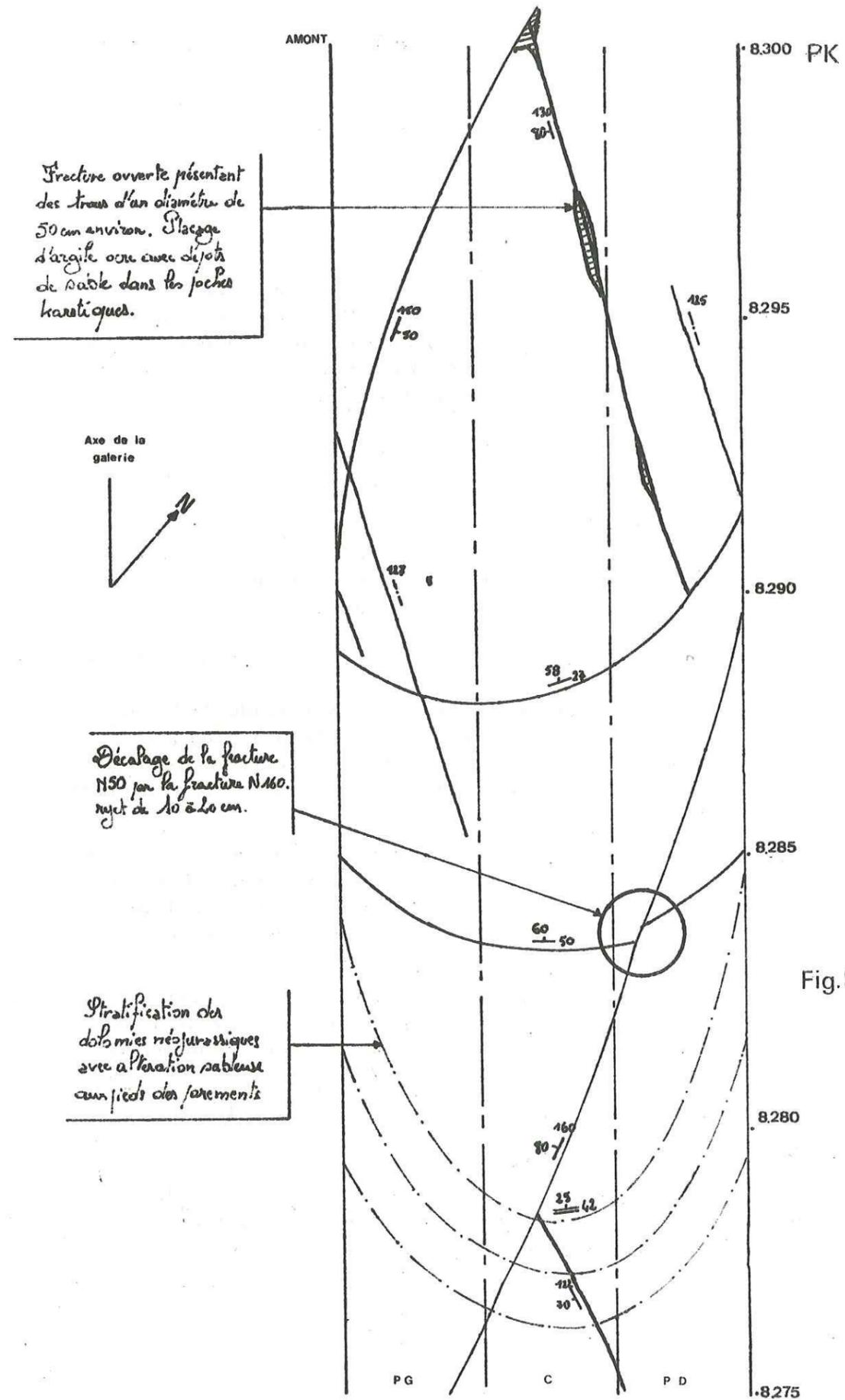
Situation	Dimension ouverture			Fermé	Ouvert	Remplissage	Nature du remplissage	Remarques
	mm	cm	dm					
PI 4300	0	130		X			Liseré de calcaire	
PI 3130		50	45			X	Trage d'argile rouge	Recouper par l'affleurement N° 14
PI 1310	20	50			X			Suivent les fissures aux liserés de calcaire. Recouper par l'affleurement N° 14.
PI 4440	20			X				

* R. G. = rive gauche

EXEMPLE DE RELEVÉ EN GALERIE



EXEMPLE DE RELEVÉ EN GALERIE



II - ETUDE DE LA FRACTURATION

1 - MESURES DE LA FRACTURATION

Etant donné l'épaisse couverture forestière du secteur, peu de fractures ont pu être observées sur le terrain. C'est l'interprétation des photographies aériennes qui a fourni le plus grand nombre de renseignements. En galerie, la fissuration a été mesurée très précisément mais le tracé des failles a dû être extrapolé car les zones très fracturées étaient généralement cintrées.

1.1. - Mesures sur le terrain

Sur le terrain, ont été mesurés :

- les grands contacts anormaux du secteur.
- la fissuration sur quelques affleurements " frais " (bordure de route ou de chemin forestier).

- Les grands contacts anormaux se suivent très bien malgré l'absence de figures tectoniques : strie, crochon, brèche ...

Dans le Nord du secteur, la zone " chevauchante de Montrieux " a été précédemment étudiée. Ce contact anormal se poursuit à l'Est, en rive droite du Gapeau où les dolomies néojurassiques sont en contact avec le "Dogger" (faille de Gavaudan). Cette fracture N-S semble se poursuivre au Nord dans la dépression de Méounes.

La faille de Morières les Tournes est bien visible sur le terrain où elle décale les calcaires du Bathonien d'environ 400 m au niveau de Vigne-Fère. Son rejet (250 m) est également visible en rive droite du Gapeau et intéresse les calcaires du Lias moyen et supérieur. Il semble que cette faille ait un pendage fortement incliné (environ 70 à 80°) vers le S-S.E.

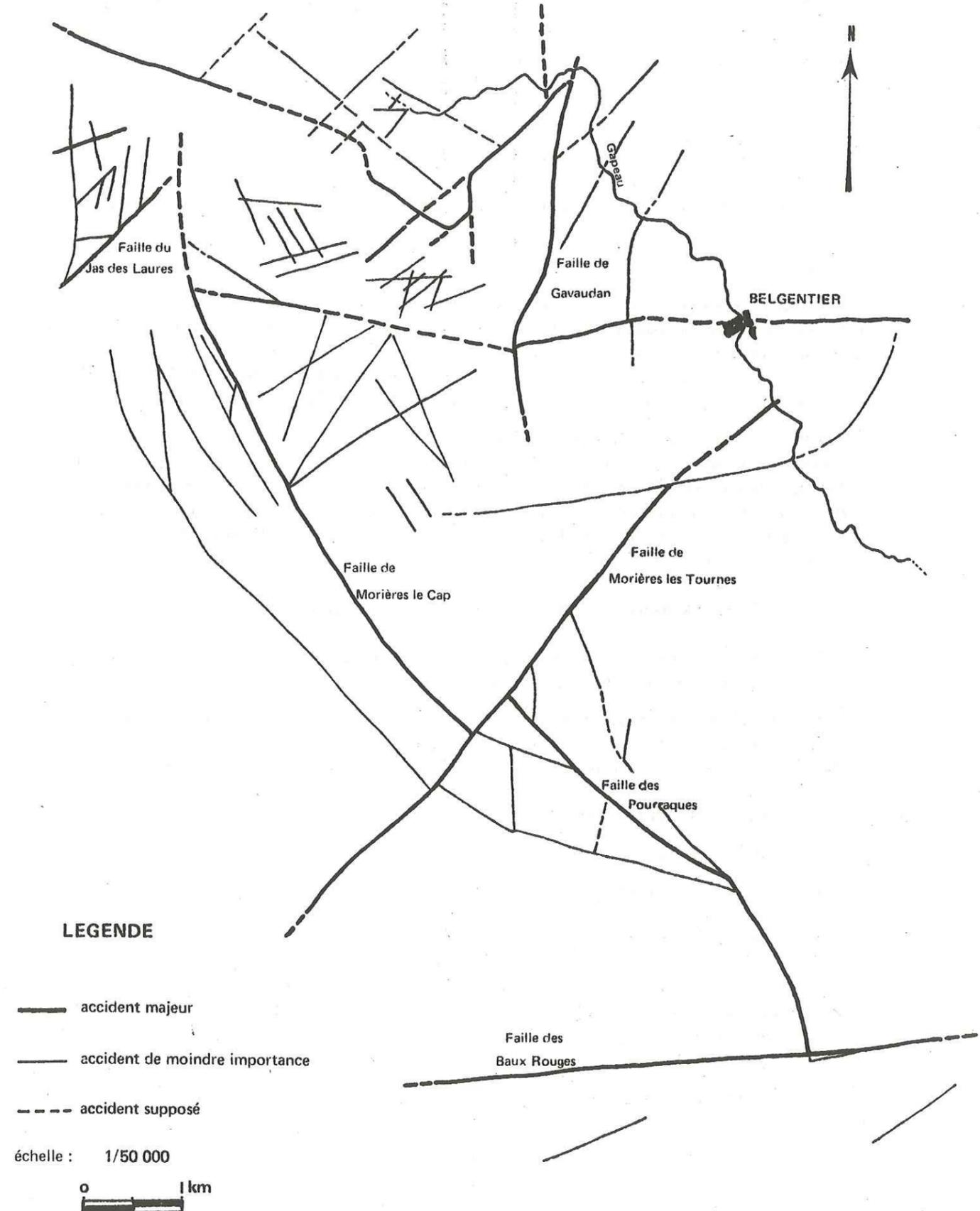
Les failles des Pourraques et de Morières le Cap sont surtout visibles dans le paysage. Suivant leurs directions s'aligne une série de dépressions ou de talwegs dans l'épaisseur de la forêt recouvrant les dolomies néojurassiques.

Au Sud, la faille des Pourraques et des Baux Rouges entraîne le contact anormal entre les dolomies néojurassiques et les formations du "Dogger", du Lias et de l'Hettangien.

- Les mesures de la fissuration ont été opérées sur des " affleurements frais " où l'érosion n'a eu que peu d'influence. Plusieurs points ont été étudiés suivant les critères énoncés dans l'introduction de ce chapitre.

CARTE DE LA FRACTURATION

Fig. 10



Sur les dolomies néojurassiques :

Dans le secteur des Aiguilles de Valbelle , les orientations principales sont N 130 et N 40 .

Sur le sentier bordant la faille de Gavaudan , les fissures, généralement ouvertes de 1 à 4 cm , sont orientées préférentiellement N 120 , N 60 .

Sur le "Bathonien" :

A Valaury , deux directions dominant : N 130 , N 50 .

Au niveau de la faille de Morières les Tournes , au Sud de la source de la Foux , le Bathonien présente une fissuration principalement orientée N 100 et pentée de 80 ° vers l'Ouest .

Sur le "Dogger" :

A Valaury , la fissuration s'observe suivant trois directions : N 10 , N 150 , N 80 .

Dans le secteur de la source de Fond de Vin , on trouve les orientations N 46 et N 0 . L'ouverture des fissures est de l'ordre du millimètre .

Vers le site de la Rouvière , ce sont les directions N 0 , N 86 et N 170 qui dominent . Les ouvertures sont millimétriques , quelquefois centimétriques .

L'ensemble de la fissuration présente des pendages quasiverticaux compris entre 70 et 90 ° . L'agencement des fractures entre elles est difficile à définir . De nombreuses observations ont pu être effectuées sur les orientations N 0 et N 90 . Ces directions se recoupent simultanément et dans des proportions identiques . Il semblerait donc que l'on puisse conclure , pour l'instant , à une genèse contemporaine des accidents présentant ces deux directions .

1.2. - Mesures sur photographies aériennes

L'interprétation des photographies aériennes a permis de vérifier la position des grands accidents découverts sur le terrain .

Les failles des Pourraques et de Morières le Cap sont ainsi décalées de 500 m par rapport à la faille de Morières les Tournes . Pour ces deux accidents , on a été amené à distinguer un accident majeur d'un accident de moindre importance puisque ce dernier (faille des Pourraques et de Morières le Cap) est affecté par le premier (faille de Morières les Tournes) .

A l'échelle du secteur , d'autres failles ont pu être dessinées .

Les directions principales se retrouvent suivant N 45 , N 140 , N 0 et N 90 .

1.3. - Mesures en galerie

Les mesures en galerie sont de loin les plus abondantes . Un recensement complet de la fissuration a été effectué sur les 14 km de la galerie . Des études statistiques ponctuelles complètent ce relevé . On pourra retrouver ces résultats sur la figure N° 11 .

On a essayé par les mesures en galerie de comprendre l'agencement des grands accidents du secteur .

Si en surface la faille de Morières les Tournes (N 45) prend le pas sur celles des Pourraques et de Morières le Cap (N 140) , en galerie on ne peut pas dire que l'une de ces directions soit prédominante . Sur les trente points de mesures effectuées , elles se recoupent dans une proportion de 50 % .

Par contre , les orientations N 140 et N 45 recoupent les directions N 90 et N 0 .

Il semblerait d'autre part que la direction N 90 affecte plus fréquemment la direction N 0 , mais le nombre de points de mesures (une quinzaine) ne nous semblant pas suffisamment représentatif , nous nous en tiendrons aux observations effectuées en surface .

2 - REPRESENTATION DES RESULTATS

Afin de représenter les mesures de façon claire, précise, permettant une bonne compréhension des observations de terrain, plusieurs méthodes sont proposées.

La méthode graphique est de loin la plus explicite; encore faut-il qu'elle soit adaptée au problème.

Nous avons utilisé deux genres de diagrammes :

- . L'histogramme d'orientations ou de directions, adapté surtout aux fractures quasiverticales, nous permet d'avoir une vue d'ensemble d'un secteur ou d'une formation (Fig. 11).
- . Le diagramme de Schmidt, appliqué à un point précis, nous renseigne d'une façon statistique sur le secteur à étudier (Fig. 12).

3 - INTERPRETATION DES RESULTATS

L'étude de la fracturation en galerie, grâce aux histogrammes d'orientation (Fig. 11) fait ressortir deux directions principales : N 140 et N 45.

Les autres directions se répartissent de façon identique. Toutefois, dans la partie la plus septentrionale, les orientations N 0 et N 90 se dégagent sur les diagrammes.

Les accidents tectoniques du secteur présentent des orientations sensiblement voisines (Carte N° 10).

Les orientations principales sont donc N 140 et N 45 avec une prédominance de cette dernière. Deux autres orientations N 90 et N 0 sont de moindre importance mais toutes aussi constantes.

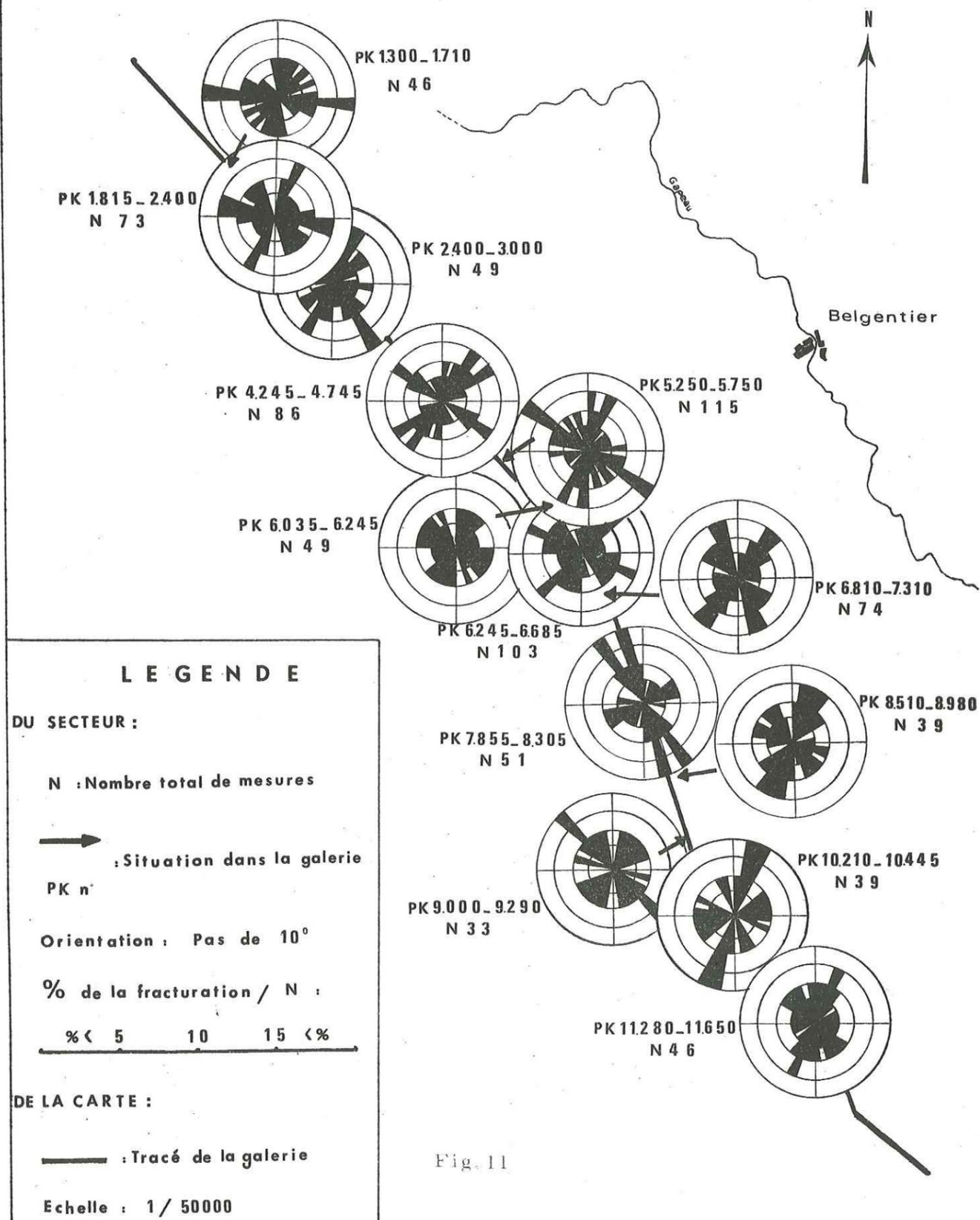
4 - CONCLUSION

L'étude de la fracturation sur les diagrammes de Schmidt permet d'individualiser deux secteurs séparés par la faille de Morières les Tournes.

Le secteur Nord se caractérise par une distribution des mesures en guirlande sur le canevas, tandis qu'au Sud, deux grandes familles de fractures se distribuent séparément l'une de l'autre (Fig. 12).

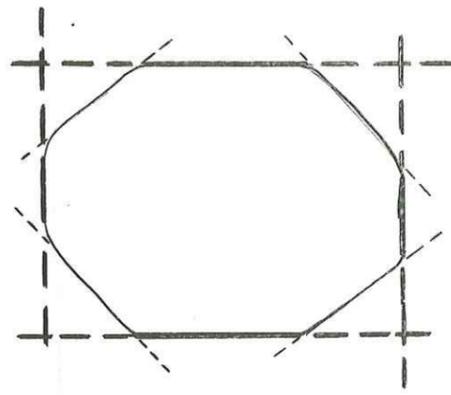
Ainsi, on peut concevoir pour le compartiment Nord un modèle théorique du type " borne arrondie ou cylindrique " où le parallépipède, découpé par les familles majeures, a les angles émoussés par les fractures d'ordre deux.

LA FRACTURATION DANS LA GALERIE

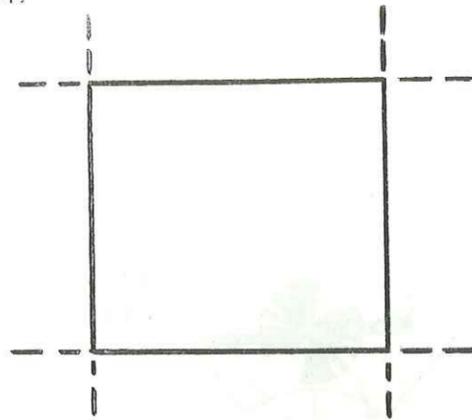


REPARTITION DE LA FISSURATION

-47-



COMPARTIMENT NORD
dit en " borne arrondie "

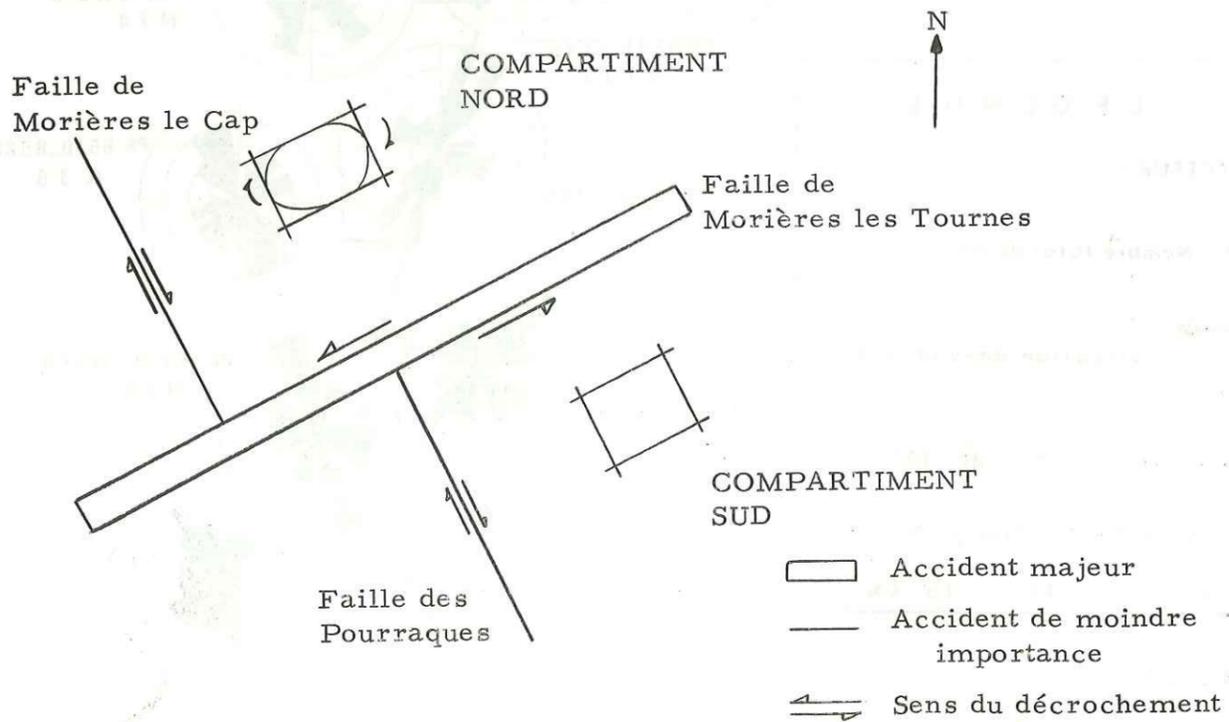


COMPARTIMENT SUD

— accident majeur
- - - accident secondaire

Dans le compartiment Sud, le modèle est représenté par un simple parallépipède. La cartographie du secteur et l'étude de la fracturation présentée ci-dessus, permettent de concevoir le système d'accidents majeurs N 45 et N 140 comme étant des décrochements conjugués. Il semble toutefois que la faille de Morières les Tourne soit plus importante mais néanmoins de même génération que la fracture N 140. Il s'agit là d'un cas banal de cisaillements conjugués où une famille prend le pas sur sa conjuguée.

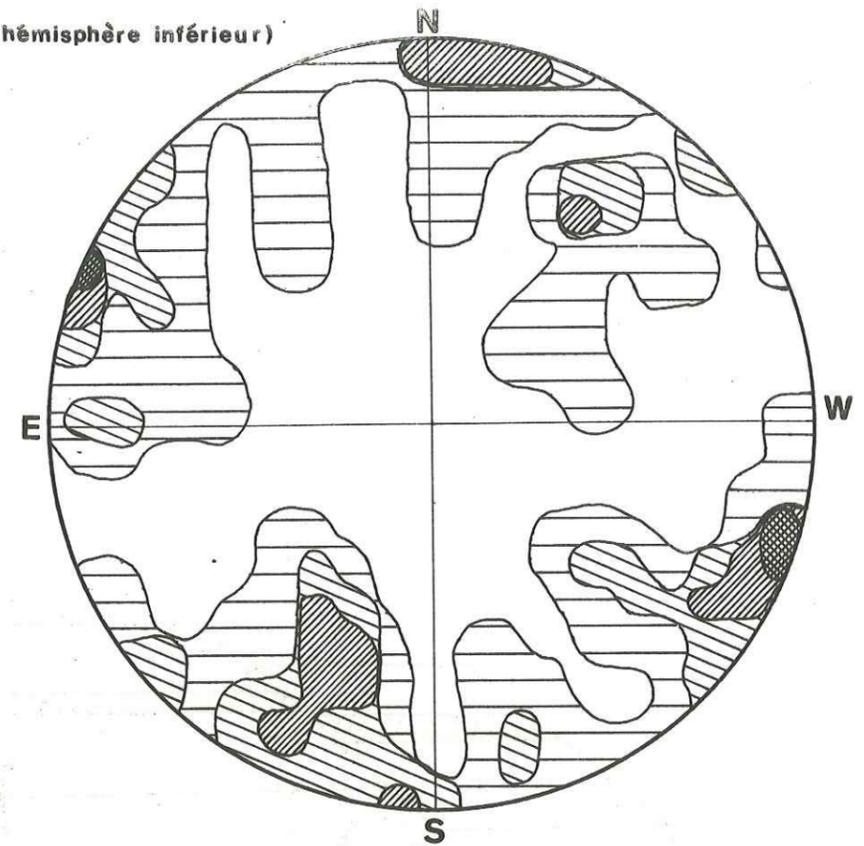
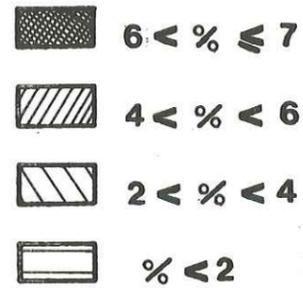
L'étude structurale permet donc de conclure à un système qui serait de la forme :



Diagrammes de Schmidt (hémisphère inférieur)

pk 5250-5750

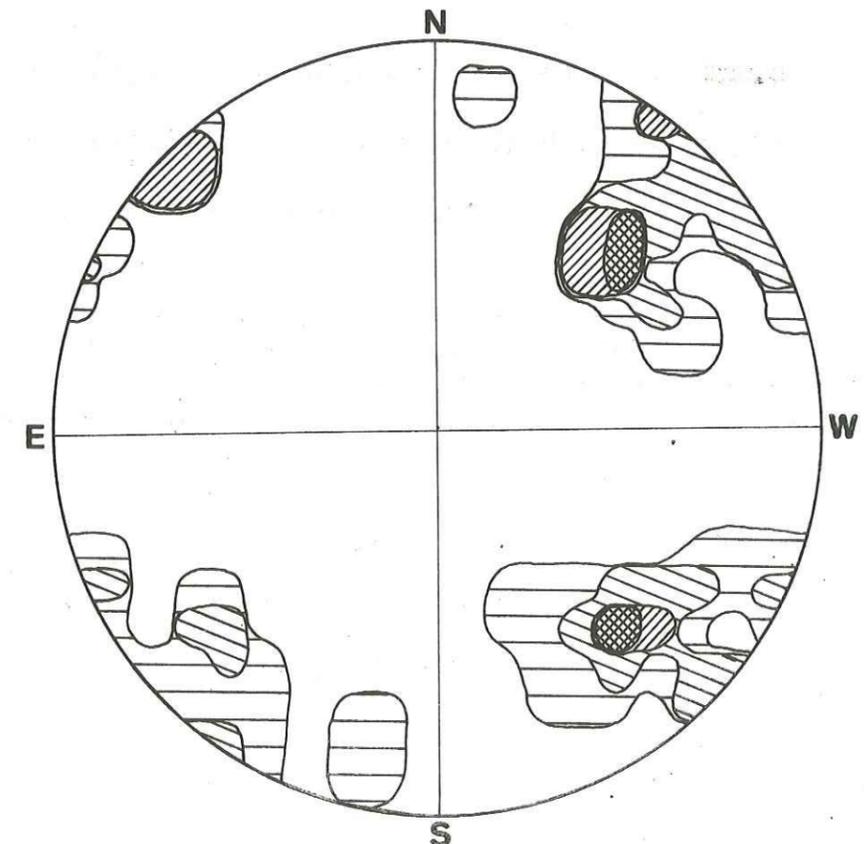
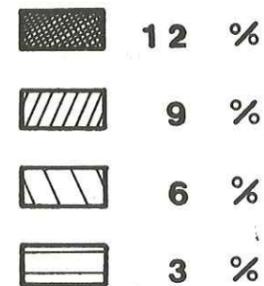
N 115



Type compartiment N

pk 9000-9290

N 33



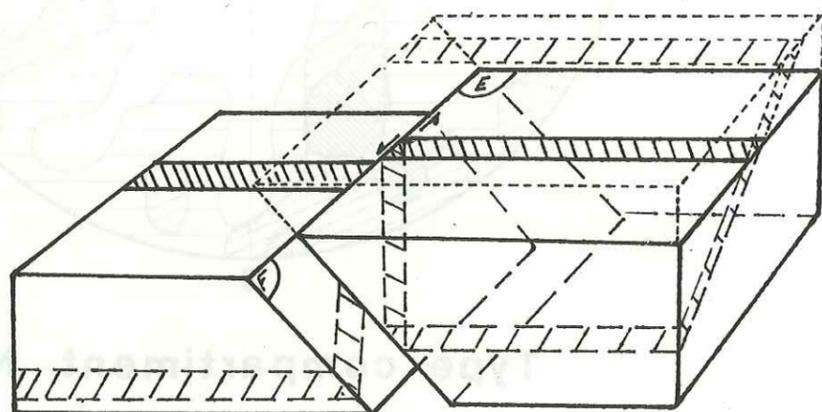
Type compartiment S

Fig.12

En l'absence d'indices visibles sur le terrain (stries , crochons , etc...) cette hypothèse paraît la mieux adaptée au secteur .

Une deuxième hypothèse peut être formulée .

Bien que la cartographie de la zone voisine de la faille de Morières les Tournes indique un décalage suggérant que cet accident correspond à un décrochement des couches , il ne faut pas écarter la possibilité d'une faille inverse dont le compartiment supérieur aurait été érodé .



-  Niveau repère cartographié
-  Plan de faille
-  Trace du niveau repère
-  Plan d'érosion
-  Sens apparent du mouvement

Il est fort possible , compte tenu de la structure des accidents régionaux (chevauchement de la Sainte-Baume par exemple) , que la faille de Morières les Tournes soit en fait un compromis entre les deux hypothèses , c'est-à-dire une faille inverse à compartiment chevauchant érodé s'étant produite avec un mouvement de décrochement vers le N. E. .

III - CRITIQUE DE LA METHODE

Bien qu'assez complète et s'appuyant sur les principes fondamentaux de l'analyse structurale , notre façon d'opérer a révélé à l'usage des lacunes qui devraient être corrigées lors d'études ultérieures .

1 - PRECISION DE L'ECHANTILLONNAGE

Pour obtenir une bonne précision des mesures , il est indispensable que le géologue ou le technicien soit présent au front de taille le plus souvent possible . Après la volée , les parements livrent sans aucune difficulté la lecture de la fracturation , mais plus on attend , plus la galerie devient poussiéreuse , boueuse , des gunitages et des cintres masquent les zones qui sont les plus intéressantes pour le géologue .

Il est donc essentiel d'effectuer les relevés au front de taille , ce que nous n'avons pas toujours pu réaliser .

2 - RELATIONS ENTRE LES MESURES

Après la collecte des mesures de fissuration , il s'est avéré difficile de comparer les différentes mesures entre elles .

Il est en effet indispensable , pour une étude statistique , de référer ces mesures à une valeur unité ; cette valeur pouvant être une surface , un tronçon de galerie ou plus simplement une longueur de parement .

Il est à noter que plus la base unité est grande , plus les risques d'oubli de mesures sont importants .

En pratique , cette valeur doit être appréciée en fonction de la densité de fissuration sur l'ensemble de l'ouvrage .

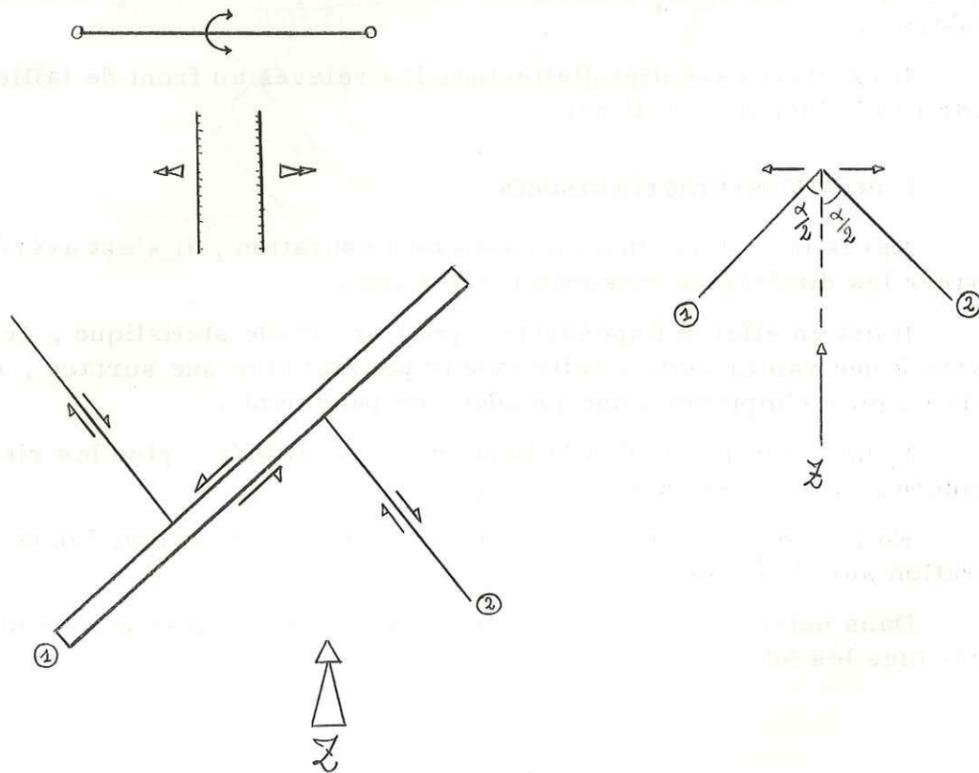
Dans notre cas , il semble que la meilleure valeur unité soit de 5 mètres relevée tous les 50 mètres .

IV - ESSAI D'INTERPRETATION STRUCTURALE

1 - CADRE THEORIQUE

Comme le démontre l'analyse de la fracturation, un système de décrochements conjugués peut être envisagé.

Un tel système suppose une direction de l'axe Z, axe de raccourcissement maximum, parallèle à la bissectrice de l'angle formé par les deux décrochements. Deux structures théoriques en découlent : d'une part, la création de plis anticlinaux perpendiculairement à la direction de Z et d'autre part des accidents d'extension, parallèles à Z.



2 - INTERPRETATION REGIONALE

Le schéma théorique ci-dessus, replacé dans le contexte de la région étudiée admet une direction N-S de l'axe Z.

Les failles d'extension de direction N 0 se retrouvent facilement notamment à l'Est avec la faille de Gavaudan qui se poursuit vers le Nord.

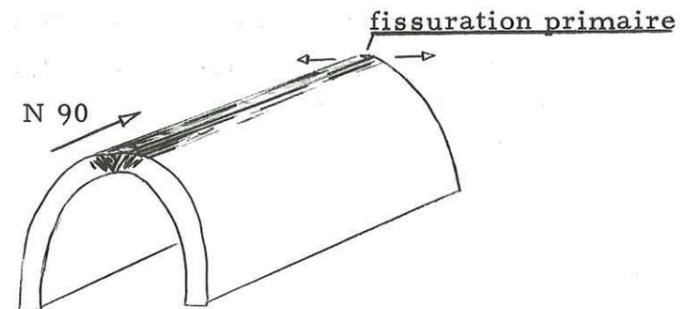
Les structures anticlinales sont moins évidentes excepté au Nord où la plaine de Signes peut être interprétée comme un anticlinal éventré de type provençal.

De toute façon, les failles inverses de la région de Montrieux le Jeune traduisent de façon satisfaisante les mouvements proposés par le schéma théorique. D'autres accidents de direction N 90 ont été recensés sans qu'apparemment on ait pu déceler une structure anticlinale.

Toutefois, ces accidents sont bordés de dépressions karstiques dont la genèse demeure une énigme.

Il est communément admis qu'une densité élevée de la fracturation est à l'origine de ces formes du relief, avec un comblement argileux du type karstique. Le problème est d'expliquer la situation de ces dépressions.

En fait, si on admet le schéma proposé, les directions N 90 représentent le sommet de forme anticlinale. Or c'est précisément à ce niveau du pli que se situe l'extension d'extrados qui entraîne une fracturation plus élevée.



V - CONCLUSION

Succédant à l'étude géologique , l'analyse structurale du secteur permet d'affiner la tectonique de la zone étudiée .

Plusieurs remarques sont à signaler.

. L'étude de la fracturation fait apparaître deux zones où la répartition des fractures est différente de part et d'autre de la faille de Morières les Tournes (N 45) . L'orientation de la fracturation se répartit suivant deux directions majeures : N 45 et N 140 . Les orientations N 0 et N 90 se retrouvent souvent mais restent de moindre importance .

. Etant donné le peu de mesures possibles du fait de la mauvaise visibilité sur le terrain , une hypothèse de travail a été élaborée essentiellement à partir des données recueillies en galerie et par interprétation de photographies aériennes. Ainsi , les directions N 45 et N 140 joueraient le rôle de décrochements conjugués . Il résulte d'un tel système une direction d'extension N 0 et une orientation des axes de plis N 90 .

Ceci semble se vérifier à l'échelle du secteur étudié .

Les résultats de l'étude géologique et structurale vont pouvoir être utilisés pour l'étude hydrogéologique et géotechnique .

CHAPITRE III

ETUDE HYDROLOGIQUE

I - TOPOGRAPHIE

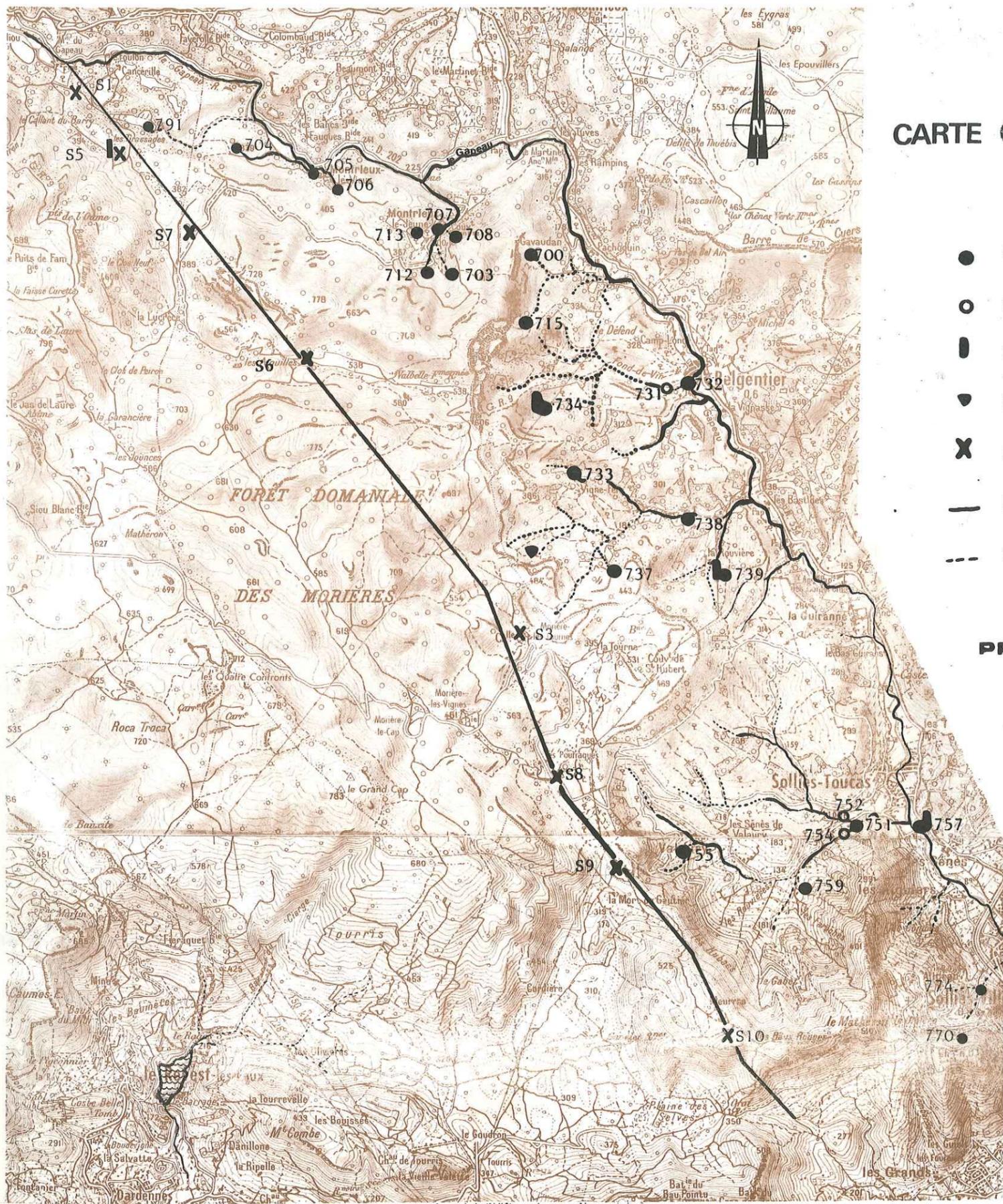
II - HYDROGRAPHIE

III - LA VEGETATION

IV - DONNEES METEOROLOGIQUES

V - PRESENTATION DES SOURCES ETUDIEES

VI - CONCLUSION



CARTE ORO-HYDROGRAPHIQUE

Fig. 13

- SOURCES
- PUIITS
- ▮ LIMNIGRAPHERS
- ▼ PLUVIOGRAPHE
- ✕ SONDAGES
- RUISSEAU PERMANENT
- - - RUISSEAU TEMPORAIRE

PRINCIPALES SOURCES ETUDIÉES

- 700 Gavaudan
- 703 Montrieux le Jeune
- 706 Montrieux le Vieux
- 734 Fond de Vin
- 737 La Foux-Lacanal
- 738 St-Mathieu
- 739 La Rouvière

ECHELLE : 1/50.000e



I - TOPOGRAPHIE

Trois zones d'altitude différentes peuvent être observées :

- A l'Est , une zone basse , quasiment plane , est constituée par la vallée du Gapeau. Elle a une altitude moyenne de 150 m .
- Légèrement plus à l'Ouest , les altitudes avoisinent 400 m . Elles correspondent à une série de collines qui buttent sous la falaise dolomitique tandis qu'au Nord la vallée de Montrieux présente des formes semblables , légèrement plus élevées .
- C'est dans la partie Ouest du secteur que se trouvent les plus hautes altitudes (600 - 700 m) . Le point culminant , le Grand Cap , atteint 783 m . Le paysage est constitué soit de bombements , soit de plateaux surplombant très souvent en falaise des talwegs peu profonds .

II - HYDROGRAPHIE

1 - IMPLANTATION DES SOURCES ET DES APPAREILS DE MESURE

Carte N° 13

A la périphérie du Massif des Morières , et en rive droite du Gapeau , nous avons recensé une vingtaine de sources . Le niveau piézométrique a également été relevé sur onze puits ou forages .

Trois limnigraphes ont fonctionné : sur les sources de Fond de Vin et de La Rouvière (depuis 1966) et sur le piézomètre S 5 (depuis 1971) situé au N-W de notre secteur .

2 - LE GAPEAU

Résultant des sources précitées , quelques petits ruisseaux , temporaires ou non , se jettent dans le seul cours d'eau important de la région : Le Gapeau .

Prenant sa source au Nord de Signes , il arrose la vallée de Solliès et se jette dans la Méditerranée après s'être épuisé dans la plaine d'Hyères .

Il présente au niveau de Belgentier , pour l'année 1974 , une moyenne des débits moyens mensuels égale à $2,12 \text{ m}^3/\text{s}$, soit un total de 67 millions de m^3 pour l'année .

III - LA VEGETATION

La végétation est de type méditerranéen . Ses différents aspects dépendent de la nature des terrains , de l'exposition et de l'activité humaine .

En remontant vers l'Ouest , les vergers de la vallée du Gapeau laissent la place aux oliveraies cultivées presque exclusivement sur les calcaires marneux du Dogger . La couverture végétale est très réduite excepté au sommet des collines où la forêt de pins subsiste malgré le déboisement .

Le plateau de Valbelle est constitué par la forêt domaniale des Morières plantée de chênes verts . Un sol constitué d'humus en général assez épais pour la région , repose sur un cailloutis formé par les dolomies néojurassiques . Ce secteur reçoit les précipitations ce qui lui confère une certaine humidité , rare dans la région .

Les calcaires urgoniens forment de grandes dalles lapiazées où la végétation , lorsqu'elle existe , est constituée d'arbustes et buissons formant la garrigue .

Enfin , une végétation particulière pousse dans les dépressions karstiques qui sont d'anciens champs aujourd'hui incultes . Des graminées en occupent le centre , les bordures étant plantées de cèdres ou de chênes .

IV - DONNEES METEOROLOGIQUES

1 - LE CLIMAT

Le secteur étudié est sous l'influence d'un régime méditerranéen de type mixte entre le climat méditerranéen sec (Mistral prédominant) de la Provence continentale et celui plus humide (prédominance des vents marins du S-E) de la région niçoise . L'influence des reliefs élevés au voisinage du littoral est sensible sur le volume annuel des précipitations .

2 - LE VENT

Le vent dominant est le Mistral sec et froid, soufflant du N-W , surtout en hiver et au printemps , mais les vents du S-E apportant la pluie , moins violents et plus réguliers , sont également fréquents . Les vents d'Ouest et d'Est soufflent moins souvent .

3 - LES TEMPERATURES

Les stations météorologiques les plus proches sont celles de Cuers et d'Hyères . Les résultats présentés ici donnent une idée des températures , mais

TEMPERATURES DE LA STATION DE CUERS

Fig. 14

mois ans	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septem.	Octob.	Novem.	Décem.
1975	6,0 14,1 10,1	4,6 14,1 9,4	4,3 15,0 9,6	7,1 20,9 14,0	9,9 23,3 16,6	12,7 27,3 20,0	17,0 33,9 25,5	18,1 32,6 25,4	15,1 26,5 20,8	- - -	- - -	1,2 13,6 7,4
1974	5,8 13,0 9,4	5,4 13,5 9,1	6,5 16,2 11,4	7,6 18,5 13,0	10,3 23,7 17,0	14,4 28,8 21,6	17,2 32,5 24,9	18,0 33,2 25,7	14,2 23,1 18,6	6,7 18,1 12,0	6,9 15,6 11,2	5,8 15,0 10,4
1973	3,8 13,3 8,5	3,0 13,1 8,0	4,1 16,8 10,5	5,8 18,8 12,3	11,7 24,8 18,2	15,2 30,0 22,6	17,5 33,2 25,3	19,1 34,5 26,2	15,9 29,9 22,9	10,3 22,5 16,4	7,8 16,7 12,3	4,1 13,1 8,6
1972	4,6 11,1 7,9	5,7 13,1 9,4	6,5 17,5 12,6	8,4 19,3 13,9	10,8 23,6 17,2	13,6 26,3 20,0	16,5 32,0 24,3	15,5 30,4 23,0	12,7 23,5 18,1	- - -	8,2 17,1 12,7	5,6 13,0 9,3
1971	3,5 11,8 7,6	4,8 15,0 9,9	2,9 13,9 8,4	10,0 19,3 14,6	12,6 23,3 17,9	14,9 27,4 21,1	18,7 33,8 26,2	20,7 34,7 27,7	15,8 27,7 21,7	12,0 23,5 17,7	5,5 15,0 10,3	5,0 14,0 9,5

m : valeur minimale ; M : valeur maximale ; my : valeur moyenne .

Si l'on note des écarts annuels sensibles entre les deux méthodes , la moyenne opérée sur les quatre années donne des valeurs voisines :

Evapotranspiration selon Turc $E = 601 \text{ mm/an}$

Evapotranspiration selon Coutagne $E = 588 \text{ mm/an}$

On peut donc penser que l'évapotranspiration réelle est en année moyenne de l'ordre de 600 mm par an et il resterait environ 500 mm disponibles pour le ruissellement et l'infiltration .

V - PRESENTATION DES SOURCES ETUDIEES

Seules quelques sources ont pu être étudiées de façon régulière et suivie .

Du Nord au Sud , on rencontre (cf carte N° 13) :

- La source de Montrieux le Jeune (703) se trouve au sein des dolomies hettangiennes . L'exutoire se situe au pied d'un miroir de faille orienté N 50 penté de 70° vers le Sud . Une grotte de 5 m de diamètre abrite cette source qui présente les caractéristiques moyennes suivantes :

Résistivité ramenée à 20° : $2660 \Omega / m$

Température : $T_c = 10^{\circ}7$

Débit moyen mensuel : $Q = 3 \text{ l/s}$

- La source de Gavaudan (700) constitue le captage en eau potable du village de Belgentier . Elle sort au niveau du contact anormal séparant les dolomies néojurassiques du "Dogger" . La position précise de l'exutoire est masquée par d'importantes formations de tufs et de cargneules . Tout comme la source 703 , le fond de l'émergence est sableux .

Résistivité ramenée à 20° : $2420 \Omega / m$

Température : $T_c = 10^{\circ}$

Débit moyen mensuel : $Q = 5 \text{ l/s}$

- La source de Fond de Vin (734) se situe dans le Dogger . Elle est équipée d'un limnigraphe enregistreur .

Résistivité ramenée à 20° : $2370 \Omega / m$

Température : $T_c = 6^{\circ}7$

Débit moyen mensuel : $Q = 19 \text{ l/s}$

- La source de la Foux-Lacanal (737) jouxte le grand accident N 45 visible sur le terrain et sort des calcaires bathoniens . Elle est caractérisée par les valeurs suivantes :

Résistivité ramenée à 20° : $2720 \Omega / m$

Température : $T_c = 7^{\circ}8$

Débit moyen mensuel : $Q = 10,5 \text{ l/s}$

- La source de la Rouvière (739) entièrement située dans le "Dogger" présente deux exutoires : l'un inférieur est constitué d'un trou d'eau à niveau quasiment constant , s'écoulant sur un terrain marécageux , l'autre 70 m plus haut , est une grotte de surverse de 15 à 20 m de diamètre . Le puits central de cette cavité circulaire est profond d'environ 5 m . Il est tapissé de galets ayant environ 25 cm de long sur 20 cm de largeur .

Un limnigraphe enregistreur est installé sur le ruisseau résultant des deux exutoires .

Résistivité ramenée à 20° $2305 \Omega / m$

Température : $T_c = 8^{\circ}7$

Débit moyen mensuel enregistré au limnigraphe : $Q = 46 \text{ l/s}$

Débit moyen mensuel à la source permanente : $Q = 6,5 \text{ l/s}$.

VI - CONCLUSION

Deux remarques s'imposent . Le Sud du secteur étudié , sous influence plus marquée de la mer , se différencie du Nord soumis au Mistral et aux précipitations orageuses .

La zone haute à l'Ouest , couverte de forêts , peut être considérée comme l'impluvium tandis que ses bordures collectent l'eau et la restituent au niveau du Gapeau .

L'étude détaillée du comportement des sources recensées va permettre d'étudier l'écoulement des eaux souterraines et ainsi de connaître l'hydrodynamique du secteur .

RECHERCHES HYDRODYNAMIQUES

I - ESSAI DE CALCUL DES PERMEABILITES

Le but de ce chapitre est de déterminer les coefficients de perméabilité des roches étudiées à l'aide de méthodes classiques et de les comparer avec les résultats obtenus par les essais de laboratoire.

CHAPITRE IV

III - ESSAI DE CORRELATION ENTRE LES METHODES

Ce chapitre est consacré à l'établissement de la corrélation entre les résultats obtenus par les différentes méthodes de mesure de la perméabilité.

ETUDE HYDRODYNAMIQUE

Le but de ce chapitre est de décrire les conditions de l'étude hydrodynamique et de présenter les résultats obtenus.

I - ETUDE DES SOURCES PAR LEUR COURBE DE TAILLAGE

Ce chapitre est consacré à l'étude des courbes de débit des sources et à la détermination de leur type et de leur débit.

II - ESSAI D'EVALUATION DES RESERVES

Ce chapitre est consacré à l'évaluation des réserves d'eau souterraine à l'aide de méthodes classiques et de méthodes modernes.

III - CONCLUSION

Ce chapitre est consacré à la conclusion de l'étude et à la présentation des recommandations.

CONCLUSION

Ce chapitre est consacré à la conclusion de l'étude et à la présentation des recommandations.

Ce chapitre est consacré à la conclusion de l'étude et à la présentation des recommandations.

RELATIONS ENTRE HYDROGEOLOGIE ET FRACTURATION

I - ESSAI DE CALCUL DES PERMEABILITES

II - INTERPRETATION DES ESSAIS LUGEON

III - ESSAI DE CORRELATION ENTRE LES METHODES

ETUDE DES CIRCULATIONS SOUTERRAINES

I - ETUDE DES SOURCES PAR LEUR COURBE DE TARISSEMENT

II - ESSAI D'EVALUATION DES RESERVES

III - CONCLUSION

CONCLUSION

RELATIONS ENTRE HYDROGEOLOGIE

ET FRACTURATION

I - ESSAI DE CALCUL DE PERMEABILITE

1 - BUT DE L'ETUDE

Pour connaître le comportement des eaux souterraines dans un massif, il est indispensable de délimiter les systèmes d'écoulement hydrodynamique au sein de l'aquifère.

La loi expérimentale de Darcy permet de calculer le champ des vecteurs vitesses de filtration \vec{q} .

$$\vec{q} = \bar{K} \text{grad } \psi$$

\bar{K} représentant la perméabilité ne dépend que du milieu poreux solide et des propriétés physiques du liquide. Dans notre région, il nous faut donc essayer de déterminer \bar{K} pour un milieu qui ne ressemble apparemment qu'assez peu à un milieu poreux.

2 - PRINCIPE

A partir de la géométrie des fissures, L. Kiraly définit la " perméabilité équivalente " d'un massif fissuré de la façon suivante :

$$\bar{K} = \frac{g}{12v} f d^3 \bar{A}$$

g = accélération due à la gravité

d = largeur de la fissure

v = viscosité cinématique du liquide

f = fréquence de la famille directionnelle sur 1 m

$\bar{A} = [1 - n \otimes n]$ où n est un tenseur caractéristique de la famille directionnelle.

3 - METHODE

Pour appliquer la méthode de L. Kiraly, il faut effectuer des mesures statistiques de la fracturation. Pour cela, on répertorie les fissures recoupant une longueur donnée sur l'affleurement en notant l'orientation, le pendage et l'ouverture des fissures ainsi que leur remplissage. (Tableau N° 9).

Les mesures seront reportées, par exemple, sur un canevas de Schmidt où les familles directionnelles apparaîtront. La fréquence d'une famille est égale au nombre total de ses fissures rencontrées sur un mètre.

4 - RESULTATS

Les mesures que nous avons réalisées intéressent essentiellement le 'Dogger' et ont été effectuées sur les sites de La Rouvière et de la source de Fond de Vin ainsi qu'en galerie .

Les familles de fractures ayant une même direction, par exemple N 90 , présentent en surface des ouvertures de l'ordre de 10^{-3} m . Les mesures effectuées en galerie sur ces mêmes fractures donnent des ouvertures voisines de 10^{-4} m . Il y a donc fermeture des fissures avec la profondeur .

Un " coefficient de fermeture " a été établi par déduction , entre les mesures de l'espacement des lèvres des fissures (ou ouverture) , en surface et en galerie .

Ce coefficient a pu être estimé à 10 % sur l'ensemble de la fracturation .

4.1. - Calcul en galerie

Situation : du PK 6550 au PK 6555

Direction des strates : N 50° E

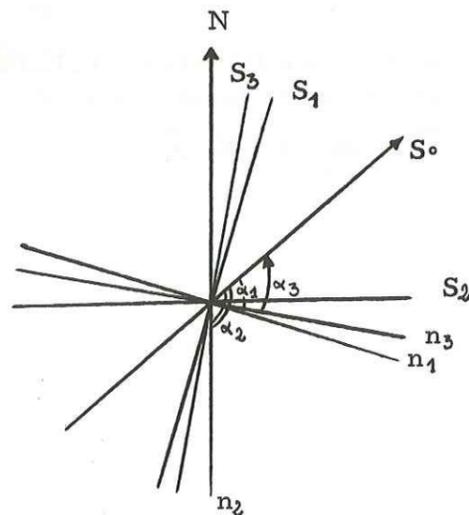
Pendage : 05° vers l'Ouest .

Trois familles de fissures .

$$S_1 \rightarrow N 18 ; f_1 = 0,8 ; d_1 = 10^{-4} m ; n_1 = \left[\sin \alpha_1, \cos \alpha_1, 0 \right]$$

$$S_2 \rightarrow N 90 ; f_2 = 0,8 ; d_2 = 10^{-4} m$$

$$S_3 \rightarrow N 10 ; f_3 = 0,6 ; d_3 = 10^{-3} m$$



L'observation montre que la famille S 3 est constituée de fissures bourrées d'argile . De ce fait , elles n'entrent pas en ligne de compte pour le calcul de perméabilité .

Sachant que : $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$

$$\bar{v} = 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

$$\text{et } \bar{A}_1 = 1 - (n_1 \otimes n_1)$$

$$n_1 \otimes n_1 = \begin{bmatrix} \sin^2 \alpha_1 & (\sin \alpha_1 \cos \alpha_1) & 0 \\ (\sin \alpha_1 \cos \alpha_1) & \cos^2 \alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

\bar{K}_1 est de la forme :

$$\bar{K}_1 = \frac{9,81}{12 \cdot 10^{-6}} \times 0,8 \times (10^{-4})^3 \bar{A}_1$$

$$\text{soit } \bar{K}_1 = \begin{bmatrix} 0,183 & 0,292 & 0 \\ 0,292 & 0,47 & 0 \\ 0 & 0 & 0,653 \end{bmatrix} \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

$$\bar{K}_2 = \begin{bmatrix} 0,27 & 0,32 & 0 \\ 0,32 & 0,383 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

La matrice \bar{K} représente le tenseur de perméabilité dans la base des couches .

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} 0,453 & 0,612 & 0 \\ 0,612 & 0,853 & 0 \\ 0 & 0 & 1,306 \end{bmatrix} \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

La perméabilité équivalente est de l'ordre de :

$$\frac{(0,453 + 0,853 + 1,306)}{3} = 0,87 \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

4.2. - Calcul sur le site de la Rouvière

Compte tenu du coefficient de fermeture , les valeurs suivantes ont été obtenues :

Direction des strates : N 120° E

Pendage : 05° vers l'Ouest

Quatre familles de fissures :

$$S_1 \text{ --- } N 0 ; f_1 = 1 ; d = 10^{-3} m \text{ soit } d_1 = 10^{-4} m$$

$$S_2 \text{ --- } N 86 ; f_2 = 0,6 ; d = 10^{-3} m \text{ soit } d_2 = 10^{-4} m$$

$$S_3 \text{ --- } N 170 ; f_3 = 0,8 ; d = 10^{-2} m \text{ soit } d_3 = 10^{-3} m$$

$$S_4 \text{ --- } N 135 ; f_4 = 0,6 ; d = 10^{-3} m \text{ soit } d_4 = 10^{-4} m$$

Les observations effectuées en galerie (bourrage argileux sur la famille N 0 . N 10) permettent d'écartier les familles S 1 et S 3 , d'orientation très proche et voisine de N 0 .

$$\bar{K}_2 = \begin{bmatrix} 0,161 & -0,229 & 0 \\ -0,229 & 0,329 & 0 \\ 0 & 0 & 0,49 \end{bmatrix} \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

$$\bar{K}_4 = \begin{bmatrix} 0,015 & -0,08 & 0 \\ -0,08 & 0,475 & 0 \\ 0 & 0 & 0,49 \end{bmatrix} \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

$$\text{soit } \bar{K} = \begin{bmatrix} 0,176 & 0,309 & 0 \\ 0,309 & 0,804 & 0 \\ 0 & 0 & 0,98 \end{bmatrix} \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

La perméabilité équivalente est de l'ordre de :

$$\frac{(0,176 + 0,804 + 0,98)}{3} = 0,65 \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

4.3. - Calcul sur le site de Fond de Vin

Dans ce secteur les résultats sont les suivants :

Direction des strates : N 130

Pendage : 10° vers l'Ouest

Deux familles de fissures :

$$S_1 \text{---} N46 ; f_1 = 0,8 ; d = 10^{-3} \text{ m} \text{ soit } d_1 = 10^{-4} \text{ m}$$

$$S_2 \text{---} N0 ; f_2 = 0,6 ; d = 10^{-3} \text{ m} \text{ soit } d_2 = 10^{-4} \text{ m, bourrage d'argile}$$

$$\bar{K} = \bar{K}_1 = \begin{bmatrix} 0,648 & -0,056 & 0 \\ -0,056 & 0,005 & 0 \\ 0 & 0 & 0,653 \end{bmatrix} \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

La perméabilité équivalente est de l'ordre de :

$$\frac{(0,648 + 0,005 + 0,653)}{3} = 0,43 \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

4.4. - Conclusion

L'identité des résultats de calcul de la "perméabilité" pour les assises du "Dogger" à partir des mesures en surface et en galerie, confirme la validité du choix du coefficient de fermeture des fissures à la valeur de 10 %.

La perméabilité verticale du "Dogger" peut donc être estimée entre des valeurs de l'ordre de : $0,43 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ et $0,87 \times 10^{-6} \text{ m/s}$.

4.5. - Autres résultats

D'autres mesures ont été effectuées dans la galerie au sein des diverses formations.

On pourra, grâce au tableau N° 17, comparer ces différents résultats.

5 - INTERPRETATION DES RESULTATS

On constate que la perméabilité du "Dogger" est voisine de celle du "Bathonien", soit 10^{-6} m/s , la valeur extrême du "Bathonien" étant légèrement supérieure à celle du "Dogger".

Les dolomies néojurassiques sont nettement plus perméables avec des valeurs de l'ordre de 10^{-3} m/s .

Les dolomies sont plus poreuses que les calcaires aussi, à fréquence égale de la fracturation, la perméabilité de ces formations néojurassiques sera t'elle plus élevée.

6 - CRITIQUE DE LA METHODE

Les mesures ont été exécutées dans des conditions favorables pour deux raisons :

L. Kiraly prévoit son étude à partir d'une stratification horizontale (une correction est nécessaire dans le cas contraire). Sur le secteur étudié, la stratification est quasiment horizontale ; les valeurs du pendage dépassant très rarement 15° à 20°.

La formule de L. Kiraly considère uniquement les fissures verticales et minimise le rôle des discontinuités ayant un pendage plus faible. C'est un des inconvénients de la méthode. Or, il n'intervient pas sur le terrain étudié puisque l'ensemble des fractures rencontrées présente un plongement variant de 70° à 90° donc quasiment vertical. Ainsi donc toute la fracturation des sites étudiés est représentée dans les calculs.

Un autre des inconvénients de la méthode de Kiraly réside dans la formule de calcul. L'ouverture de la fissure intervient par le cube de sa valeur alors que les autres paramètres (orientation, fréquence, etc...) sont à la puissance un. Ce terme est donc capital et traduit presque à lui seul la valeur de la perméabilité. L'exemple des dolomies néojurassiques est caractéristique.

Les figures sont groupées en cinq familles :

$$S_1 \text{---} N110 ; f_1 = 1,3 ; d_1 = 10^{-3} \text{ m}$$

$$S_2 \text{---} N120 ; f_2 = 1 ; d_2 = 10^{-4} \text{ m}$$

$$S_3 \text{---} N140 ; f_3 = 0,6 ; d_3 = 10^{-4} \text{ m}$$

$$S_4 \text{---} N80 ; f_4 = 0,6 ; d_4 = 10^{-2} \text{ m}$$

$$S_5 \text{---} N45 ; f_5 = 0,6 ; d_5 = 10^{-1} \text{ m}$$

Les familles S4 et S5, bourrées d'argile, n'interviennent pas dans le calcul. Les tenseurs de perméabilité sont de la forme :

$$S_1 \text{---} \bar{K}_1 = 10^{-3} \cdot 1,06 \cdot \bar{A}_1$$

$$S_2 \text{---} \bar{K}_2 = 10^{-6} \cdot 0,817 \cdot \bar{A}_2$$

$$S_3 \text{---} \bar{K}_3 = 10^{-6} \cdot 0,49 \cdot \bar{A}_3$$

On constate que le tenseur total K dépend uniquement de K_1 . L'écart entre les tenseurs partiels eut été beaucoup plus important si les fissures S_4 ou S_5 avaient été débouffées .

Cette formule traduit bien ce qui se produit à l'échelle métrique mais est inopérante à l'échelle de la formation . Il est évident que sur un mètre cube de rocher , la quantité d'eau drainée par une fracture décimétrique sera supérieure à celle recueillie par un réseau de fissures millimétriques . Il n'en est pas toujours de même au niveau de la formation où les fissures se répartissent en une maille serrée rendant l'aquifère perméable en petit . Les fractures les plus importantes peuvent représenter des circulations privilégiées sans pour cela que les quantités d'eau soient supérieures à celles contenues dans l'ensemble des fissures fines .

II - INTERPRETATION DES ESSAIS LUGEON

1 - BUT DE L'ETUDE

Un certain nombre d'essais ont été effectués à la côte de la galerie afin de tester la résistance du rocher à l'emplacement de l'ouvrage .

Les résultats vont être étudiés dans l'optique de l'hydrologie . Ils seront comparés avec les données obtenues par les autres méthodes .

2 - RESULTATS

Les résultats ont été regroupés sur le tableau N° 17 .

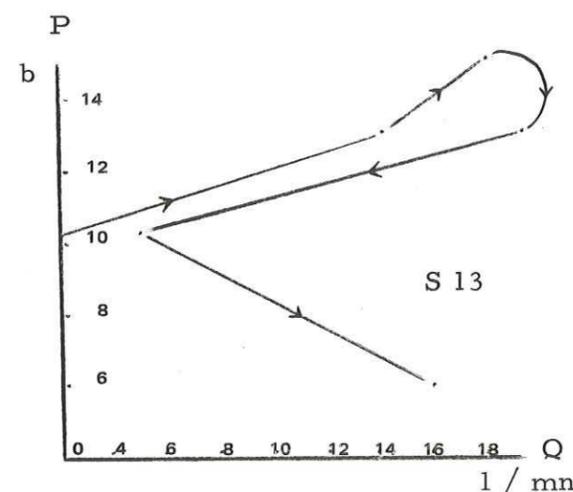
En comparant les différentes formations , quelques remarques sont à retenir :

- Le "Dogger" se caractérise par des perméabilités faibles . Les carottes sont fracturées régulièrement et la densité des fissures reste faible .
- Le "Bathonien" présente de fortes perméabilités pouvant être supérieures à 20 Lugeons . A ce niveau , certaines passées sont très fracturées , d'autres le sont moins : il y a irrégularité de la fissuration (Exemple : Sondage S 14) .
- Les dolomies néojurassiques constituent la formation la plus perméable. Il faut noter une différence importante entre la base , massive , et le reste de la formation très fracturé .
- Le Portlandien , bien que fissuré , présente des absorptions nulles .

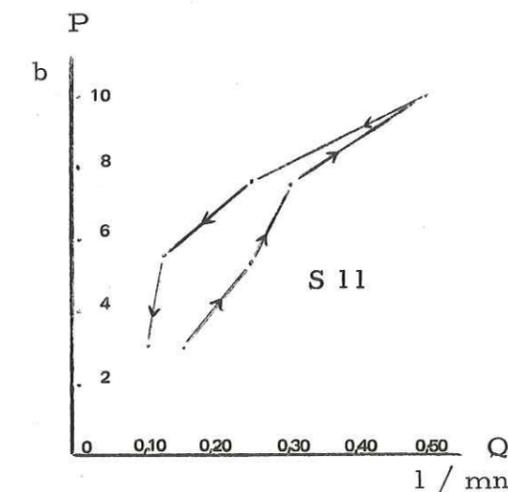
3 - INTERPRETATION DES RESULTATS

On notera tout d'abord que ces résultats concordent bien avec ceux fournis par l'étude de la fissuration , mais les courbes , correspondantes aux essais Lugeons , suscitent une remarque .

Les graphes des dolomies néojurassiques diffèrent de ceux du "Bathonien" et du "Dogger" .



a - Dolomies néojurassiques



b - Bathonien supérieur

L'interprétation de telles courbes permet de présager un régime laminaire pour les dolomies tandis que le "Bathonien" et le "Dogger" seraient le siège d'un régime turbulent . D'autre part , les dolomies présentent un remplissage à haute pression puis un débouffage . Ceci s'explique par les dépôts sableux importants qui sont lessivés puis bloqués dans les fissures . Lorsque la pression de l'eau est suffisante , la poche ainsi formée crève et c'est une eau claire puis très chargée en sable qui jaillit .

Certaines perméabilités semblent tout-à-fait aberrantes tant elles sont élevées . Le cas du "Bathonien" a été tout particulièrement étudié (Sondage S 14) . Les mesures ont été effectuées au niveau du passage entre le "Bathonien" et les formations voisines : "Dogger" et dolomies néojurassiques . Ces passées sont évidemment des zones de faiblesse qui ne reflètent pas le caractère propre à l'ensemble de la formation .

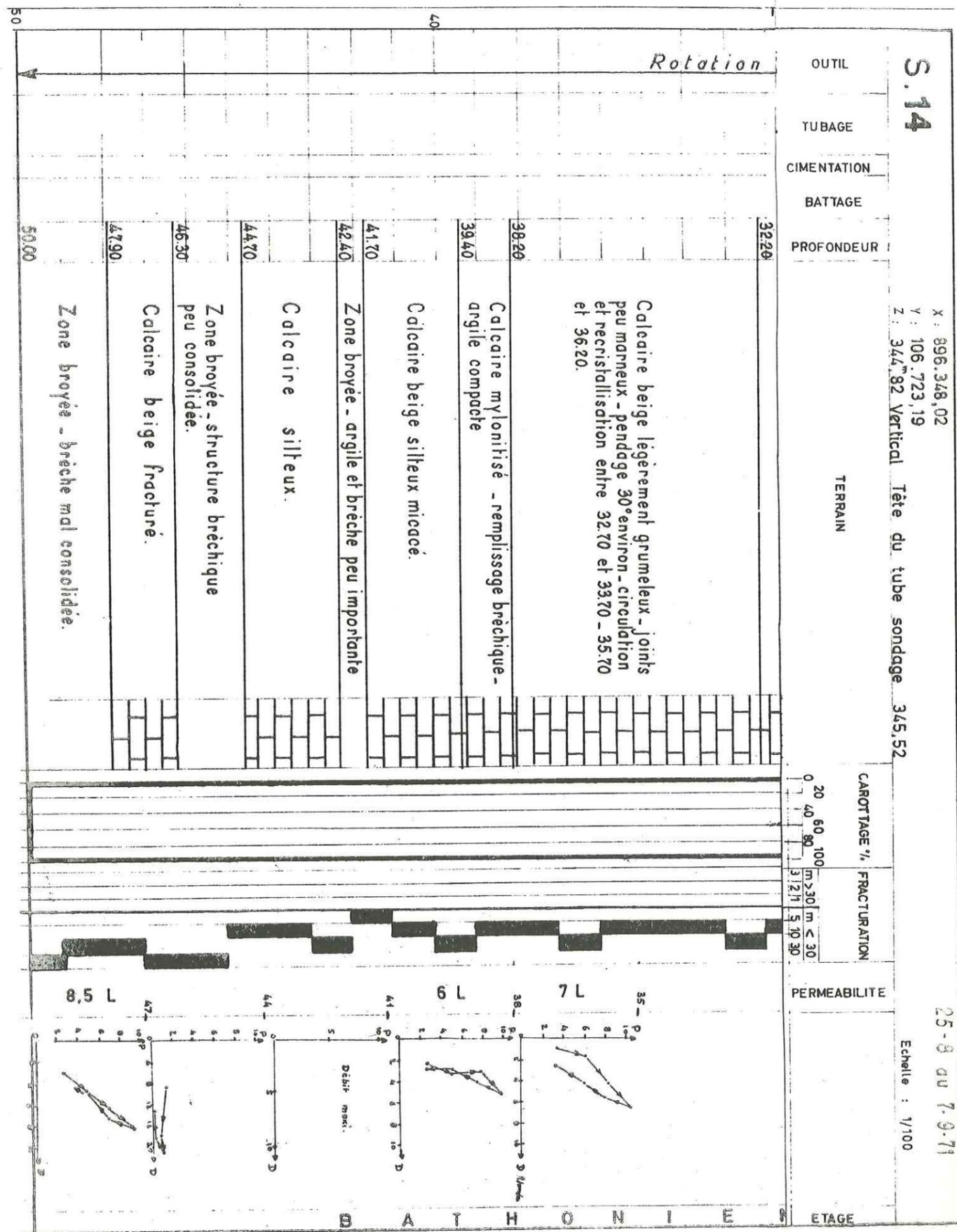
4 - CRITIQUE DE LA METHODE

- Il faut noter que les essais réalisés avaient un but essentiellement géotechnique et devaient permettre d'évaluer la tenue du rocher par l'étude de son hétérogénéité au niveau de la galerie. L'extension de ces données à l'hydrogéologie est cependant un complément d'information pour deux raisons :

. La galerie a souvent une position limite entre deux formations. Ceci donne donc des valeurs aux essais qui représentent bien l'hétérogénéité de cette zone de faiblesse mais ne traduit pas les caractéristiques générales de l'une ou de l'autre des formations.

. Pour remédier à cet inconvénient, il aurait fallu opérer à une implantation judicieuse des sondages dans le cadre de l'étude hydrogéologique. Les points particuliers tels que les fractures ou les discontinuités lithologiques seraient à éviter. Ainsi donc à la ponctualité de l'essai doivent répondre des conditions très strictes d'installation et d'emploi si l'on considère uniquement le caractère hydrogéologique de l'opération.

- De plus des contraintes artificielles sont créées lors des essais. L'augmentation de la pression à 10 bars ne correspond à aucun phénomène naturel en hydrogéologie dans notre secteur.



25-8 du 7-9-71
 Echelle : 1/100

III - ESSAI DE CORRELATION ENTRE LES METHODES

Les deux méthodes développées ci-dessus définissent les caractères d'un aquifère .

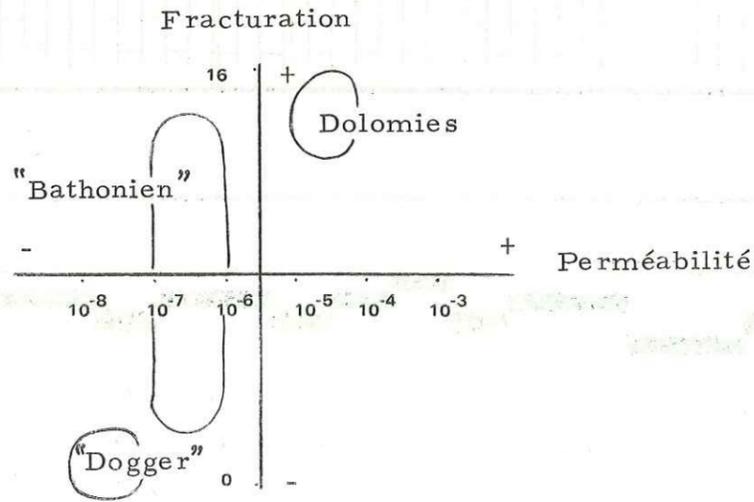
Le tableau récapitulatif N° 17 met en évidence la perméabilité plus grande des dolomies par rapport aux autres formations rencontrées ; les calcaires ayant des perméabilités de l'ordre de 10^{-6} , 10^{-7} m/s .

C'est à peu près la seule certitude que l'on a dans ce domaine .

En pratique , pour pouvoir comparer les résultats , il faut se référer à une base de travail commune aux deux méthodes .

Dans notre cas , c'est la densité de fissuration qui constitue cette base mais malheureusement , il est très difficile d'extrapoler les valeurs mesurées à l'ensemble du massif ou d'un point à l'autre . L'incertitude sur la valeur statistique des résultats est telle qu'il ne faut considérer ceux-ci qu'à titre indicatif. Ceci ne doit cependant pas empêcher d'essayer ces méthodes qui s'avèrent valables dans les cas favorables et seront améliorées par un échantillonnage de mesures plus important dans le futur .

Ainsi le diagramme proposé ci-dessous tente de classer les terrains rencontrés en fonction de leurs caractéristiques tectoniques et hydrodynamiques présentées par le tableau .



PERMEABILITE ET FRACTURATION

Nature de la formation	Situation		Perméabilité verticale m/s	Perméabilité Lugeon m/s	F. de la fracturation par m de forage au niveau des essais
	En surface	En galerie Sondage n°			
"Dogger"	La Rouvière		0,65.10 ⁻⁶		
	Fond de Vin		0,43.10 ⁻⁶		
		Pk 6.550-6.555	0,87.10 ⁻⁶		
"Bathonien"		S 11, S 8		0,45.10 ⁻⁷	3,33
		Pk 6.095-6.115	0,82.10 ⁻⁷ < 4,5.10 ⁻⁷		
Dolomies néojurassiques		S 14, S 6		6.10 ⁻⁷ < 2.10 ⁻⁶	6,5 < 14,28
		Pk 5.770-5.800	1.10 ⁻³		
Portlandien		S 7, S 3		1,1.10 ⁻⁵ < 1,66.10 ⁻⁵	10 < 14,63
		S 5		Absorption nulle	9,5

* Sondage S 7 intéresse la base des dolomies (moins fissurée que l'ensemble de la formation) .

ETUDE DES CIRCULATIONS SOUTERRAINES

I - ETUDE DES SOURCES PAR LEUR COURBE DE TARISSEMENT

L'étude de la fracturation a permis de déterminer certaines caractéristiques hydrogéologiques des terrains rencontrés, mais d'autres méthodes permettent de définir également l'aquifère. Les courbes de tarissement, notamment, reflètent le régime des circulations souterraines. La méthode d'étude choisie est celle de A. Mangin car elle semble la mieux adaptée aux problèmes des karts. Toutefois, une comparaison sera effectuée avec des méthodes plus "classiques" telles que celles de Maillet et Tison.

1 - PRINCIPE

L'aquifère karstique est considéré formé de deux ensembles :

- Une zone non saturée où s'effectuent les infiltrations
- Une zone noyée ou saturée.

Suivant les vitesses de circulation, la vidange sera laminaire ou turbulente. Tout comme Maillet ou Tison, A. Mangin propose deux équations :

$$(1) \quad Q = \frac{q_0 - \eta t}{1 + \varepsilon t} + Q_0 e^{-\alpha t} \quad \text{en régime laminaire}$$

$$(2) \quad Q = \frac{q_0 - \eta t}{1 + \varepsilon t} + (Q_0 - \beta t) \quad \text{en régime turbulent}$$

Elles sont de la forme $Q = \Psi(t) + \mathcal{F}(t)$ où $\Psi(t)$ représente la part des infiltrations tandis que la vidange de la zone noyée intervient par $\mathcal{F}(t)$.

Enfin, une troisième formule traite le cas d'un régime mixte théorique.

Cette méthode présente l'avantage de refléter les conditions naturelles d'écoulement dans un aquifère karstique.

2. METHODE

On trace sur papier semi-logarithmique pour les régimes laminaires et arithmétique pour les régimes turbulents, le graphique des débits en fonction du temps.

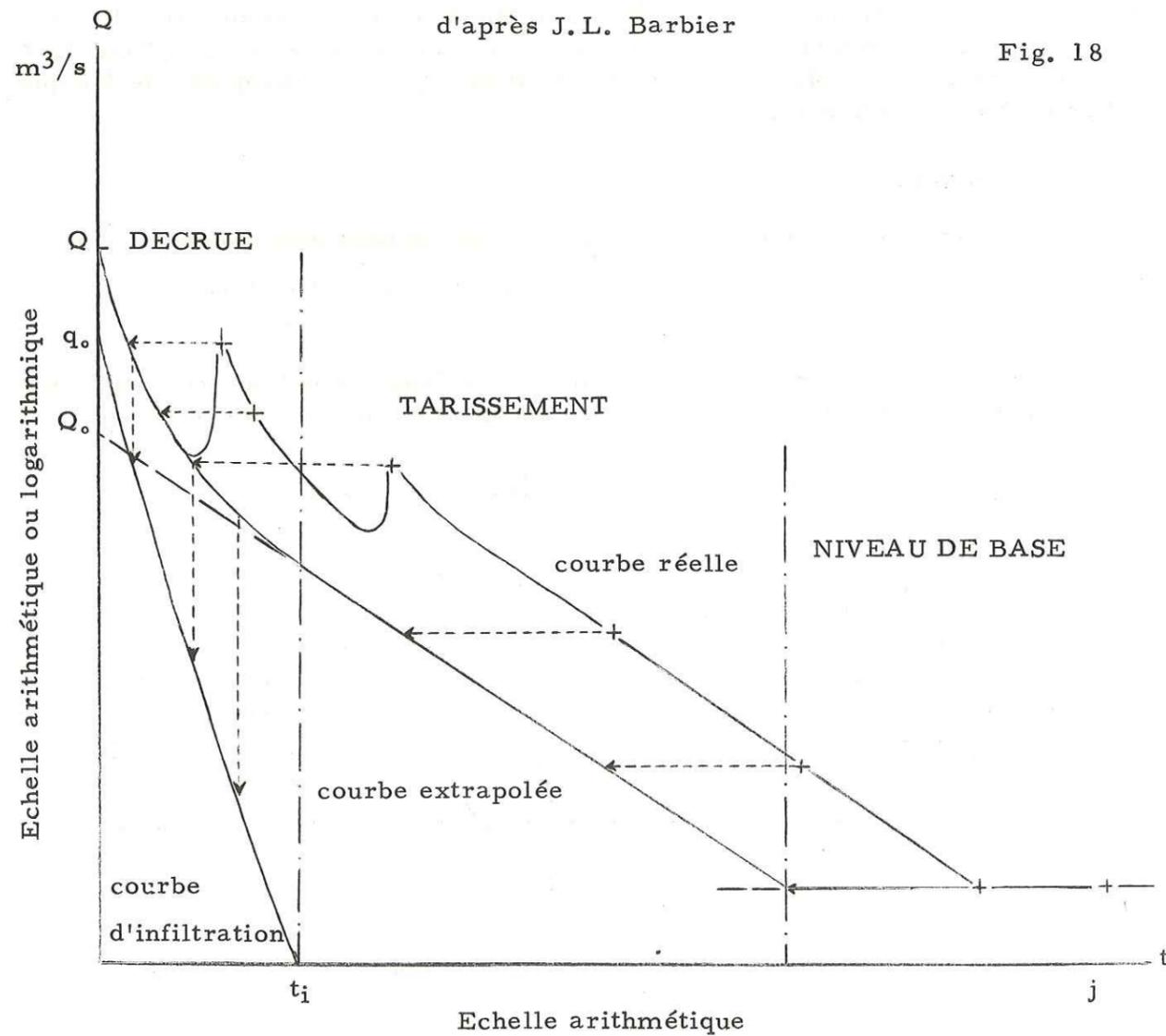
On obtient ainsi des segments de droite parmi lesquels on distingue : la courbe de tarissement où la vidange se termine et où l'infiltration est nulle et éventuellement un niveau de base.

Les valeurs des débits sont données graphiquement et par intégration de (1) ou (2), on obtient le volume des réserves.

COURBE THEORIQUE DE LA LOI DE A. MANGIN

d'après J.L. Barbier

Fig. 18

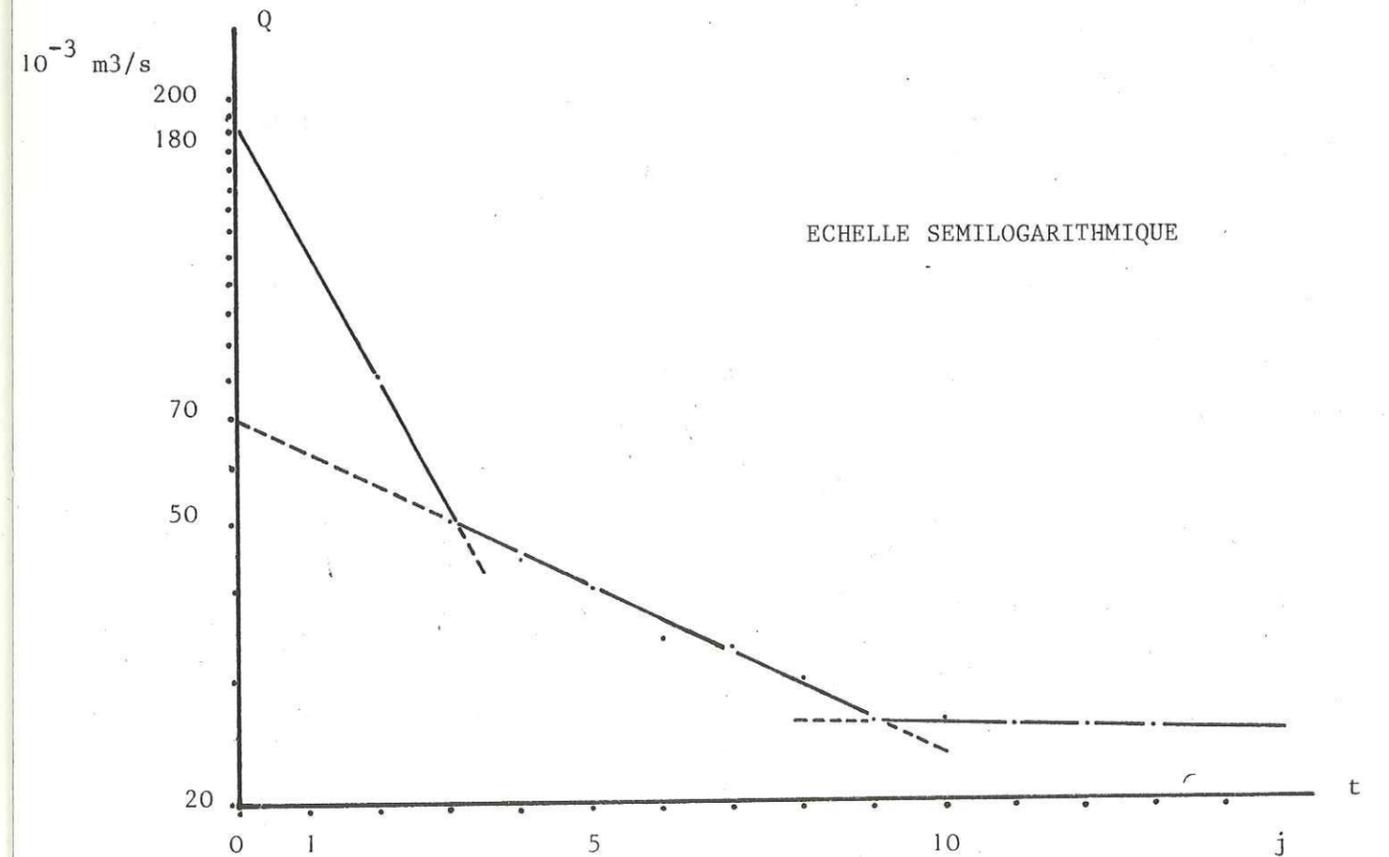
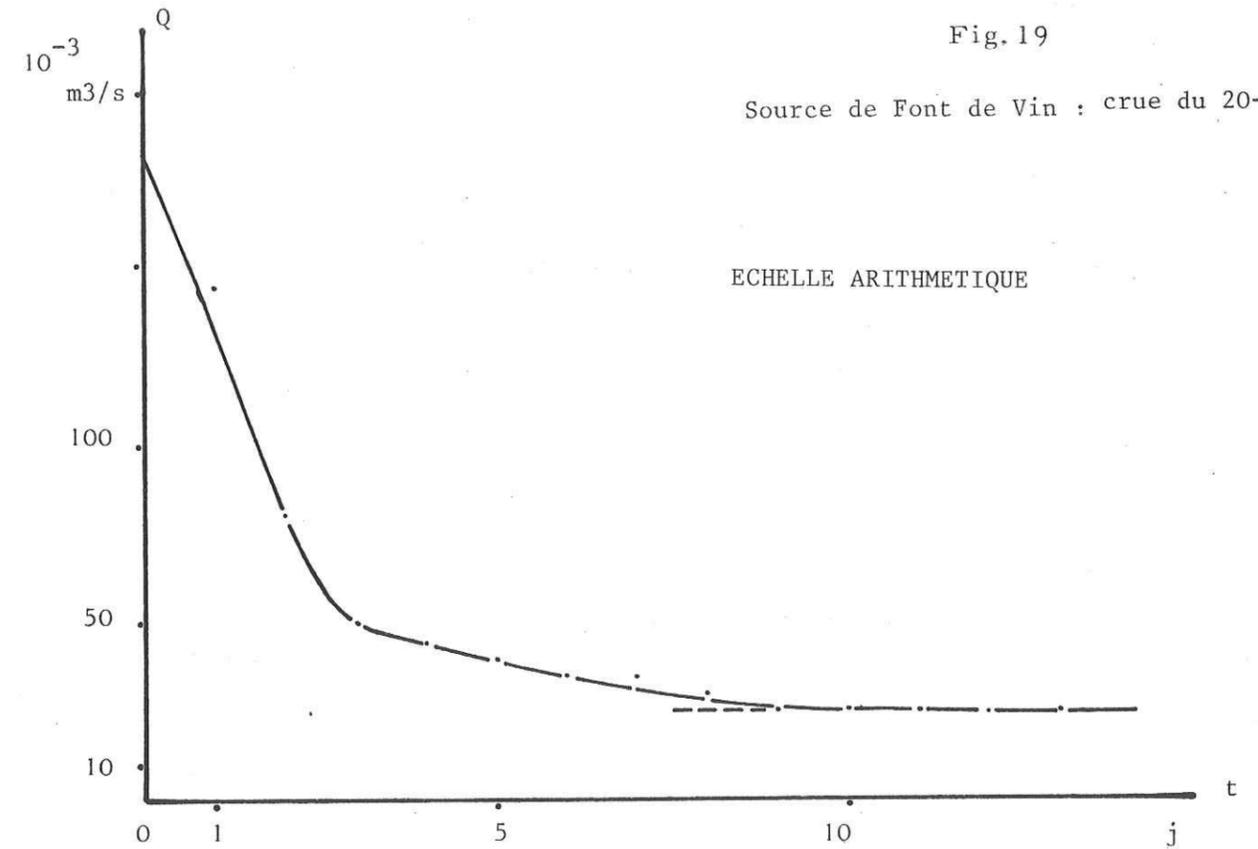


COURBE DE TARISSEMENT

Fig. 19

Source de Font de Vin : crue du 20-03-71

ECHELLE ARITHMETIQUE



3- RESULTATS

Deux catégories de courbes ont pu être dessinées, représentant chacune un régime particulier : le régime laminaire et le régime turbulent .

3.1. - Source présentant un régime laminaire

. Source de Fond de Vin (734)

La crue du 20 mars 1971 a été détaillée à titre d'exemple (Fig. 19) .

Les valeurs suivantes caractérisent la courbe de tarissement :

$$Q = 180 \cdot 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$$

$$Q_0 = 70 \cdot 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$$

$$q_0 = 110 \cdot 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$$

Il faut tout d'abord vérifier la validité de la loi d'infiltration sur l'ensemble du domaine de la décrue .

La construction de la courbe , débit d'infiltration en fonction du temps , se déduit point par point à partir du débit maximal de la crue en retranchant au débit mesuré le débit défini par le prolongement de la courbe de tarissement et l'axe des ordonnées .

La formule adoptée par A. Mangin est une fonction homographique de la forme : $y = q = \frac{at + b}{ct + d}$

La validité d'emploi de cette fonction doit être déterminée par la méthode d'alignement . Il convient pour cela de changer de variable . Sur la courbe de la fonction donnée , on prend un point quelconque (t_1, q_1) et on aligne $Y = \frac{t - t_1}{q - q_1}$ et $t : Y = A + Bt$. (Fig. 20) soit : $Y = \frac{-(3 - t)}{q - q_1}$.

La loi n'est vérifiée que pour les valeurs de Y supérieures à 50 ; ce qui correspond à une infiltration de $55 \cdot 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$ ou à un débit total de $125 \cdot 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$.

Deux domaines seront à considérer :

- La portion de courbe supérieure à $125 \cdot 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$ (ou supérieure à $55 \cdot 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$ d'infiltration) dans laquelle l'infiltration sera représentée par une fonction de type $q = q_0 - 50 t$.

- La portion comprise entre $125 \cdot 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$ et $0 \text{m}^3/\text{s}$ où la loi sera homographique et de la forme : $q = \frac{q_0 - \eta t'}{1 + \xi t'}$.

En final , on obtient des équations $Q = \mathcal{Y}(t) + \Psi(t)$ de la forme :

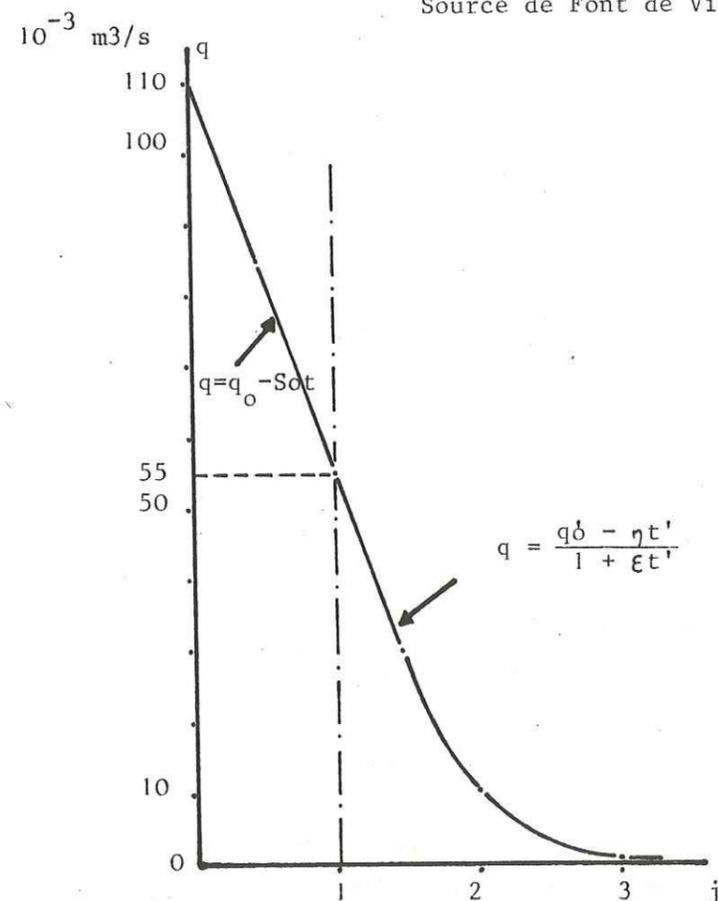
$$Q = (q_0 - 50 t) + Q_0 e^{-\alpha t}$$

$$Q = \frac{q_0' - \eta t'}{1 + \xi t'} + Q_0 e^{-\alpha t}$$

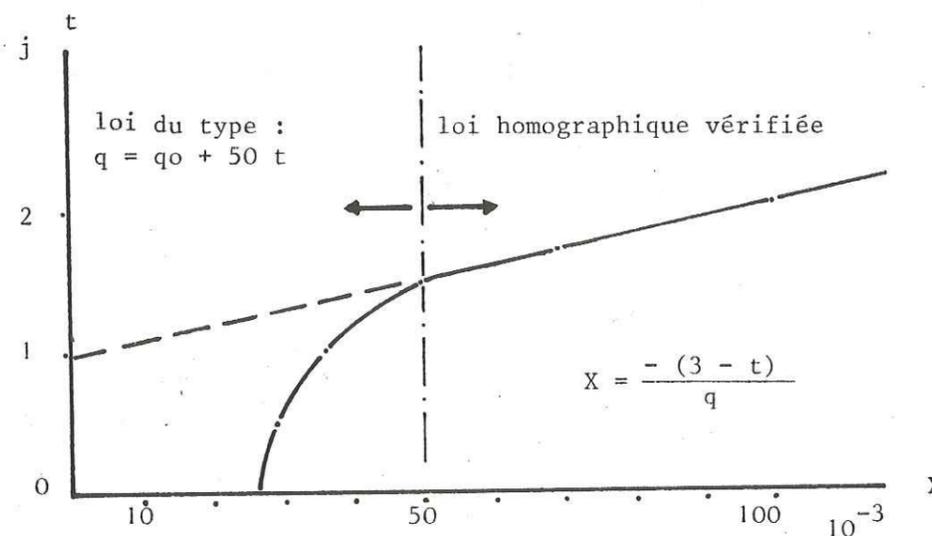
COURBE D'INFILTRATION

Fig. 20

Source de Font de Vin : crue du 20-03-71



VERIFICATION DE LA LOI HOMOGRAPHIQUE



Il faut tout d'abord calculer les paramètres .

Lorsque $q = 0 \rightarrow t_i = 3 \text{ j}$ et $Q_1 = 50 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ $\eta = \frac{q_0}{t_i} = 0,036$

Lorsque $q = \frac{q_0}{2} \rightarrow t = 9 \text{ j}$ et $Q_2 = 26 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ $\epsilon = \frac{q_0 - 2 \eta t}{q_0 t} = 1$

d'où : $\alpha = \frac{\log Q_1 - \log Q_2}{0,43 (t - t_i)} = 0,109$

Les équations finales de la courbe de décrue et de tarissement seront de la forme :

- 1ère partie : $Q = (110 \cdot 10^{-3} - 50t) + 70 \cdot 10^{-3} e^{-0,1 t}$

- 2ème partie : $Q = \frac{55 \cdot 10^{-3} - 0,036 t'}{1 + t'} + 70 \cdot 10^{-3} e^{-0,1 t'}$

L'étude a porté également sur trois autres crues :

Le 03 avril 1971

Le 21 janvier 1971

Le 15 janvier 1973

L'ensemble de ces courbes donne les valeurs suivantes du coefficient de tarissement α :

$0,064 < \alpha < 0,109$

. Source de Gavaudan (700)

Les mesures effectuées sur la crue du 04 mars 1965 donnent une valeur du coefficient de tarissement égale à $1,9 \cdot 10^{-3}$.

3.2. - Sources présentant un régime turbulent

. Source de La Rouvière (739)

Tout comme la source de Fond de Vin , la Rouvière servira d'exemple avec la crue du 13 octobre 1973 (Fig. 21).

Il convient , tout d'abord , de vérifier le domaine de la loi d'infiltration . Après changement de variable et alignement des points , la validité de la loi est confirmée sur l'ensemble du domaine .

Les valeurs obtenues sont les suivantes :

$Q = 1,79 \text{ m}^3/\text{s}$

$Q_0 = 0,125 \text{ m}^3/\text{s}$

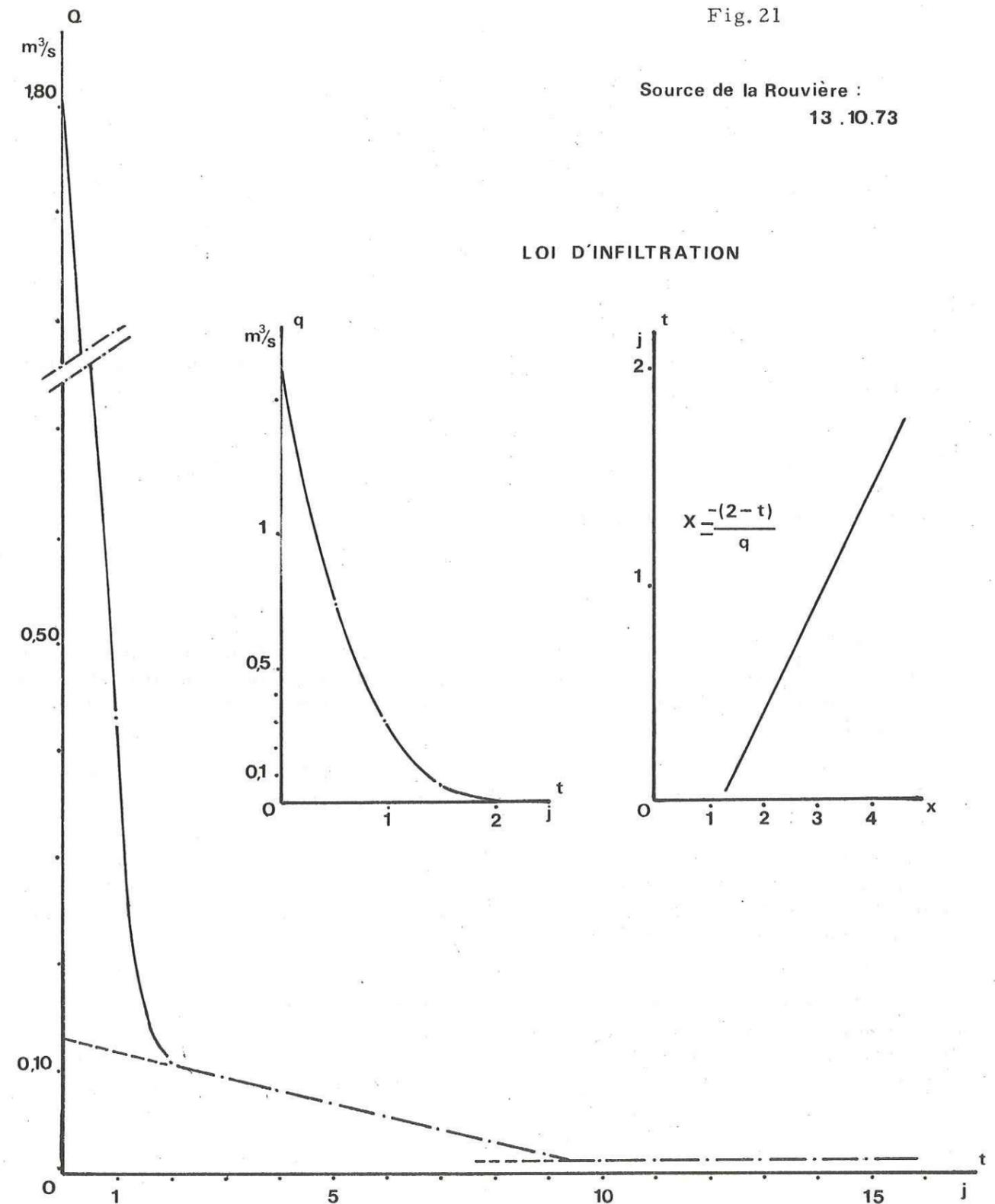
$q_0 = 1,565 \text{ m}^3/\text{s}$

$\beta = 0,013$

COURBE DE TARISSEMENT

Fig. 21

Source de la Rouvière :
13.10.73



Lorsque $q = 0 \rightarrow t_i = 2,5 j \quad \eta = \frac{q_0}{t_i} = 0,626$

Lorsque $q = \frac{q_0}{2} \rightarrow t = 0,5 j \quad \varepsilon = \frac{q_0 - 2 \eta t}{q_0 t} = 1,2$

L'équation finale de la courbe de décrue et de tarissement sera de la forme :

$$Q = \left(\frac{1,565 - 0,626 t}{1 + 1,2 t} \right) + (0,125 - 0,25 t)$$

Les résultats suivants ont été enregistrés pour les crues du :

03 novembre 1966

et du 28 décembre 1972

$$0,22 < \beta < 0,64$$

. Source de La Foux Lacanal (737)

Pour cette source, le coefficient de tarissement a une valeur $\beta = 0,072$ pour la crue du 10 janvier 1974.

. Source de Montrieux le Jeune (703)

La courbe de décrue du 19 mars 1974 présente un coefficient β de 0,087.

. Source de Saint-Mathieu (738)

$\beta = 0,125$ pour la crue du 13 mars 1974.

4 - INTERPRETATION DES RESULTATS

Le régime laminaire indique de faibles vitesses et donne à penser que la circulation s'effectue de façon diffuse plutôt qu'en chenaux. Les eaux d'infiltration percolent dans un matériel très finement discontinu et émergent au niveau d'un point bas par exemple.

Les dolomies néojurassiques, facilement solubles en grand, correspondent à un aquifère de ce type que l'on peut comparer à un réservoir poreux.

Au niveau des accidents tectoniques, les formations présentent des caractères de faiblesse tels qu'une augmentation de la fissuration, des figures d'extension ou une altération plus importante. Il s'en suit la formation de vides plus ou moins grands où l'eau circule avec des vitesses variables, mais toutefois plus importantes que dans un réseau régulier du type "aquifère dolomitique" précédemment cité.

Les circulations de ce genre se traduisent par des régimes turbulents. Toutefois, deux exceptions sont à signaler : la source de Gavaudan et celle de La Rouvière. L'une est située sur la faille de Gavaudan avec un régime laminaire, tandis que La Rouvière, à régime turbulent, est dans un secteur apparemment non faillé.

II - ESSAI D'EVALUATION DES RESERVES

1 - PRINCIPE

Le débit Q au niveau de l'exutoire définit le mouvement d'un volume d'eau à l'intérieur du karst. L'équation du débit est l'équation différentielle de l'équation du mouvement de ce volume. Pour A. Mangin, le volume d'eau qui au début de la décrue est en mouvement, est connu par le calcul de l'intégrale de l'équation des débits. L'intégration s'effectue entre deux limites qui sont les limites de l'intervalle de variations possibles de Q , soit $t = 0$ et $Q = 0$.

Ce volume, ainsi défini, sera appelé volume dynamique initial (V_d) par A. Mangin et comprendra le volume d'eau situé au dessus de l'exutoire et celui situé en dessous.

De même, le volume d'infiltration (V_i) sera connu par intégration entre les limites $t = 0$ et $q = 0$ soit t_i .

Le volume total (V_t), correspondant à l'ensemble de la masse d'eau mise en jeu lors de la crue, sera donné par la somme : $V_t = V_d + V_i$.

Plusieurs cas se présentent :

- En régime laminaire, la loi d'infiltration est homographique :

$$V_d = \int_0^t Q_0 e^{-\alpha t} ; V_i = \int_0^{t_i} \frac{q_0 - \eta t}{1 + \varepsilon t}$$

- En régime laminaire, la loi d'infiltration n'est vérifiée qu'après un temps t' :

$$V_d = \int_0^t Q_0 e^{-\alpha t} ; V_i = \left[\int_0^{t'} (q_0 - At) + \int_{t'}^{t_i} \frac{q_0' - \eta t}{1 + \varepsilon t} \right]$$

q_0' représente le débit d'infiltration au temps t' .

- En régime turbulent avec la loi vérifiée :

$$V_d = \int_0^t (Q_0 - \beta t) ; V_i = \int_0^{t_i} \frac{q_0 - \eta t}{1 + \varepsilon t}$$

- En régime turbulent avec deux lois d'infiltration :

$$V_d = \int_0^t (Q_0 - \beta t) ; V_i = \left[\int_0^{t'} q_0 - At + \int_{t'}^{t_i} \frac{q_0 - t}{1 + t} \right]$$

A l'instant t le volume des réserves sera de la forme :

$$(3) \text{ Régime laminaire : } V_{dt} = \frac{Q_0}{\alpha} \left(1 - \frac{1}{e^{\alpha t}} \right)$$

$$(4) \text{ Régime turbulent : } V_{dt} = Q_0 t - \frac{\beta t^2}{2}$$

Considérant $Q = 0$, on peut extrapoler la courbe de tarissement jusqu'à son intersection avec l'axe des abscisses. On obtient donc un temps t qui nous permet par (3) ou (4) de calculer le volume (V_{d1}) situé au dessus du niveau de l'exutoire. Le volume (V_{d2}) situé au dessous de ce niveau sera égal à :
 $V_{d2} = V_d - V_{d1}$.

2. RESULTATS

Le tableau N° 22 permet de confronter les résultats obtenus. Les données fournies par la méthode de Maillet et Tison ont été indiquées à titre comparatif. Leurs formules sont rappelées ci-dessous :

Formule de Maillet : $V_d = \frac{Q_0}{\alpha}$

Formule de Tison : $V_d = \frac{Q_0}{\alpha(1+\alpha t)}$

3 - INTERPRETATION DES RESULTATS

Il faut tout d'abord se garder de toute comparaison excessive entre les résultats. Effectivement et pour une même source, il est nécessaire de comparer des crues correspondant à des précipitations de même intensité et de même répartition; l'état des réserves devant être identique. On constate que de telles conditions sont quasiment impossibles à réaliser.

Le but de l'étude ci-dessus est de donner un aperçu des circulations de l'eau dans le massif et d'apprécier l'ordre de grandeur de ces volumes.

Les résultats présentent des valeurs généralement plus élevées de V_d avec la formule de A. Mangin qu'avec celles de Maillet ou Tison. Ceci est dû au fait que A. Mangin considère Q_0 dans le prolongement de la courbe de tarissement pour le temps correspondant au maximum de la crue alors que Maillet prend Q_0 à l'intersection entre les courbes de décrue et de tarissement.

D'autre part, on constate que les résultats des trois sources 738, 703 et 737 sont totalement différents. Or, les crues et les débits enregistrés sur ces exutoires sont très faibles par rapport aux autres sources étudiées : crue de l'ordre de 60 l/s et débit d'étiage de l'ordre du l/s. Dans la formule de A. Mangin, les débits en m^3 interviennent au carré soit avec une puissance positive pour une source du type " La Rouvière " (forts débits voisins du m^3) mais une valeur voisine de 10^{-6} pour les sources du type " La Foux ", " Montrieux le Jeune " ou " Saint-Mathieu ".

Il semble donc, dans le cas présent où les coefficients de tarissement sont sensiblement égaux, que la loi de A. Mangin ne puisse être appliquée aux sources présentant de faibles débits.

Autre constatation, la source de La Rouvière fournit des volumes d'infiltration nettement plus importants que le volume vidangé. L'hypothèse d'une recharge par une nappe voisine ne semble pas convenir aux observations effectuées sur le terrain.

RESULTATS DES COURBES DE TARISSEMENT

Fig. 22

Source	Date de la crue	α ou β	MANGIN		V_{d2}		MAILLET		TISON		Méthodes Résultats Régime
			V_d m^3	V_i m^3	V_d %	V_{d2} m^3	α	V	β	V	
734	21.01.71	0,083	33311	7064	2%	666	0,075	33859	-	-	LAMINAIRE
	20.03.71	0,109	55486	9587	2%	1109	0,108	40000	-	-	
	03.04.71	0,064	101250	14395	1%	1012	0,040	86400	-	-	
700	15.01.73	0,086	88409	17536	4%	3536	0,085	71153	-	-	LAMINAIRE
	04.03.65	0,0019	295579	2177	16%	47292	0,0014	184320	-	-	
	03.11.66	0,018	27237	30857	5%	1362	-	-	0,29	12600	
739	28.12.72	0,011	56552	324096	4%	2265	-	-	0,20	31418	TURBULENT
	13.11.73	0,013	49846	94800	1%	498	-	-	0,25	24179	
738	13.04.74	0,12	207	173	-	-	-	-	0,011	69120	TURBULENT
	19.04.74	0,087	144	1992	-	-	-	-	0,024	8887	
737	10.01.74	0,072	240	97	-	-	-	-	0,013	31920	TURBULENT

L'explication serait plutôt d'ordre topographique . Effectivement , le limnigraphe où s'inscrivent les débits des crues est situé en aval à la côte 153 m sur le ruisseau collecteur des eaux de la source permanente (à débit quasiment constant et à la côte 156 m) et des eaux jaillissant temporairement de la grotte , 50 m plus en amont . Ainsi le pic de la courbe de crue-décru correspond aux très gros débits qui sourdent tels une rivière karstique de la grotte . Par coloration , la liaison entre cette cavité et le karst du Pk 8.330 a été reconnu . Le tarissement est ensuite perçu par l'écoulement de la source pérenne qui correspond au niveau de base découvert à - 120 m dans la galerie au niveau du karst .

Enfin , si l'on excepte la source de Gavaudan , l'estimation des réserves sous l'exutoire prévoit de très faibles volumes .

Ceci s'explique fort bien sur le site de La Rouvière où la zone aval de la source pérenne est constituée d'un marécage horizontal traduisant une passée argileuse importante formant un niveau imperméable .

III - CONCLUSION

L'étude des courbes de tarissement traduit les caractéristiques des circulations souterraines aux périodes considérées . Les résultats obtenus font ressortir le comportement différent de deux familles de sources ; l'une traduirait un écoulement sous forme de ruisseaux souterrains , l'autre représenterait les circulations dans un aquifère poreux . Le choix de la méthode de A. Mangin s'est trouvé justifié . Elle reflète de façon précise non seulement les différentes vidanges possibles dans la zone noyée (citées ci-dessus) mais aussi des indications sur la zone non saturée ou zone d'infiltration .

D'autre part , la comparaison avec les méthodes de Maillet et Tison souligne des caractères intéressants et fait percevoir les limites de validité de ces méthodes .

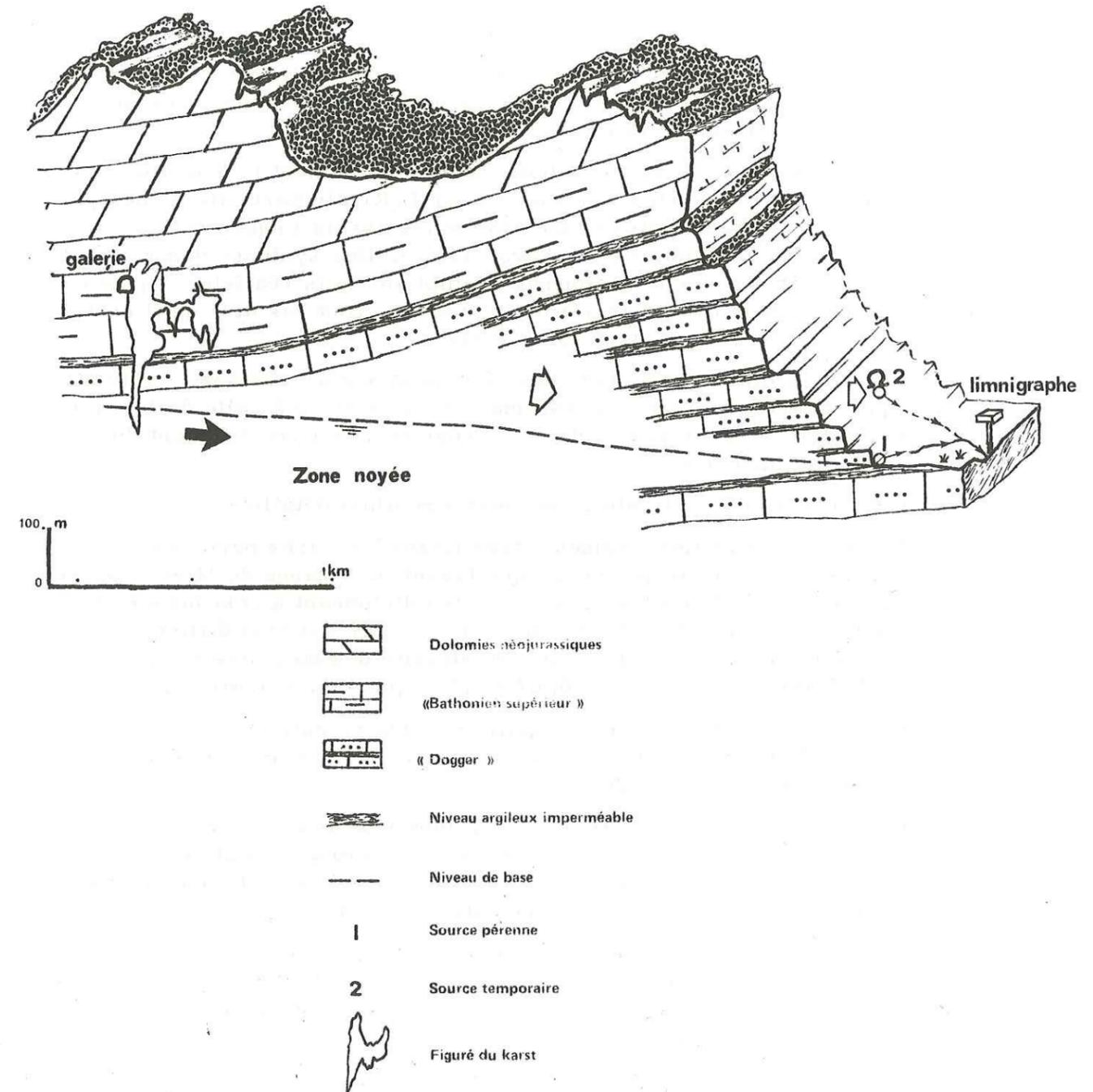
Il eut été intéressant de calculer la lame d'eau due à une pluie sur le bassin versant d'une source . Par différence avec le débit enregistré , on aurait pu mettre en évidence d'éventuelles pertes dans les terrains traversés . Or ceci s'est avéré impossible à réaliser pour deux raisons majeures : d'une part il aurait fallu isoler une pluie intéressant la source et de ce fait aménager un appareillage adéquat , d'autre part la connaissance des caractéristiques du bassin versant doit être précise ; or ceci est utopique dans ce secteur essentiellement régi par la fracturation .

Le problème a été en partie résolu par l'étude de la carte du mur des dolomies néojurassiques établie depuis les relevés en galerie et les sondages et sur laquelle on peut situer les points bas ou les chenaux favorables à la circulation de l'eau . L'hypothèse avancée pour la source de Gavaudan (700) se trouve justifiée . Il en est de même pour les sources de la Foux-Lacanal (737) et de Saint-Mathieu (738) situées sur des failles (N 45 et N 90) qui drainent des chenaux .

SCHEMA INTERPRETATIF DES CIRCULATIONS

AU NIVEAU DU SITE DE LA ROUVIERE

Fig. 23



CONCLUSION

Les caractéristiques hydrogéologiques des formations rencontrées et l'hydrodynamique des circulations souterraines ont été étudiées avec les méthodes les plus adaptées aux massifs fissurés ou karstiques .

- La fracturation , base de l'étude , est certainement le domaine le plus difficile à quantifier . Les études poursuivies par L. Kiraly permettent une approche dans le calcul des perméabilités tout comme les essais Lugeon qui sont toutefois plus difficilement exploitables en hydrogéologie. Une synthèse des résultats obtenus fait ressortir une vérité quelque peu simpliste mais réaliste : " plus un terrain est fissuré , plus il est perméable " . Cela ne veut pas dire qu'il contient pour autant plus d'eau que les autres formations .

Parmi les méthodes d'étude des circulations souterraines , celle de A. Mangin , plus adaptée au massif karstique , est comparée à celle de Maillet et Tison . Les résultats , souvent concordants en régime laminaire , diffèrent du simple au double en régime turbulent .

Certains points particuliers peuvent être ainsi détaillés .

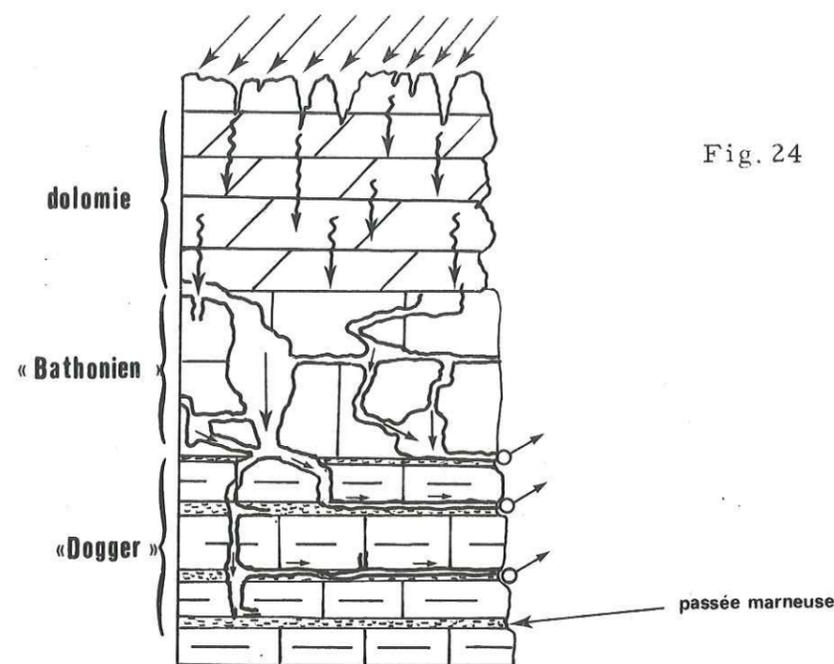
- Les dolomies néojurassiques , très fissurées , très perméables , se comportent comme un aquifère poreux ce que traduit la vidange de la zone noyée de leur source en régime laminaire . Il n'y a rien d'étonnant à cela lorsque l'on sait que le carbonate double de magnésium et de calcium est plus difficilement soluble que le carbonate de calcium et que la porosité des dolomies est comprise entre 1,5 et 22 % alors qu'elle est de 0,67 à 2,5 % pour les calcaires .

Les calcaires constituent un aquifère où les circulations s'effectuent plutôt par chenaux karstiques . La courbe de tarissement reflète un régime turbulent de la vidange de la zone noyée .

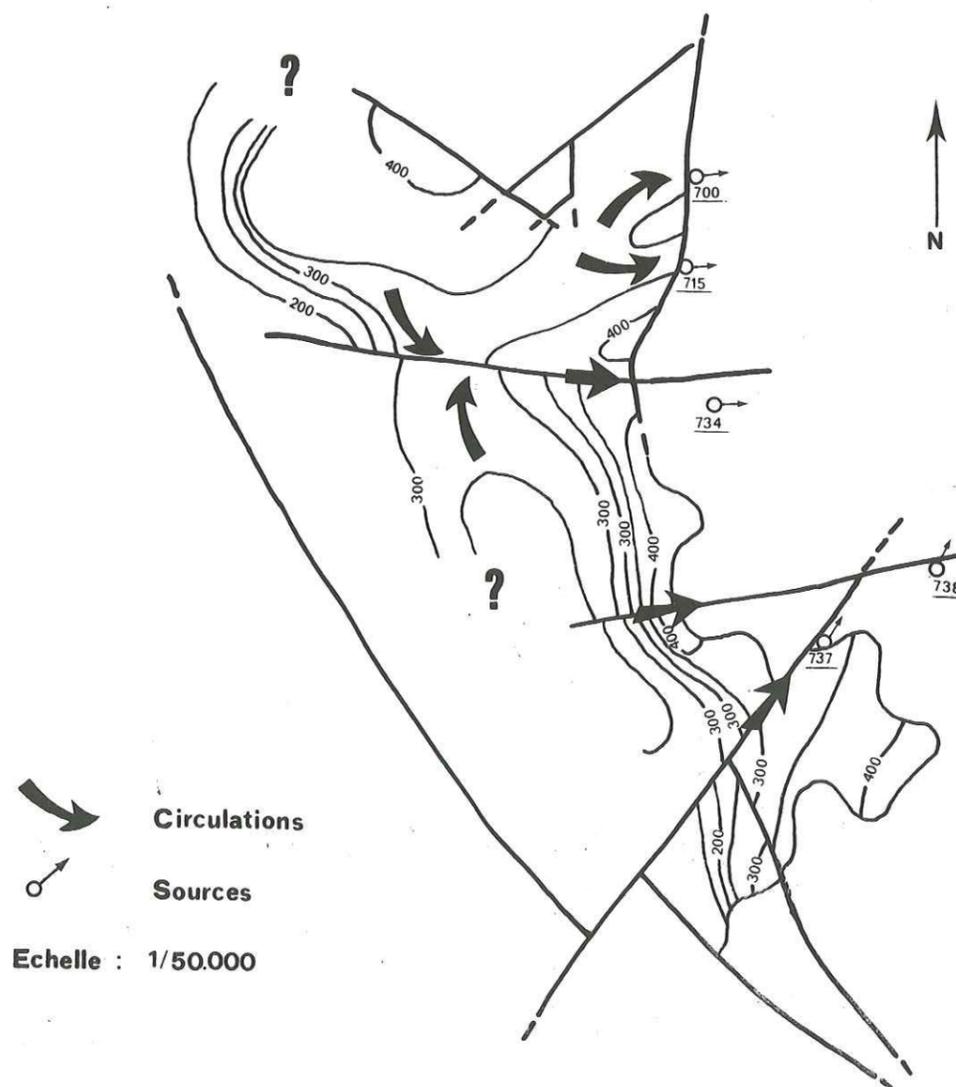
Enfin , toutes ces sources ont des volumes de réserves relativement importants , mais caractérisées par une vidange très rapide . Seule la source de Gavaudan présente des réserves d'eau remarquables . C'est certainement pour cette raison qu'elle constitue le captage du village de Belgentier .

L'étude des circulations souterraines a mis en évidence l'importance des phénomènes karstiques dans la région étudiée . Leur observation servira de base au chapitre suivant dans lequel seront présentées des méthodes de détection de cavités en vue de travaux souterrains .

a. HYPOTHESE SUR LES CIRCULATIONS SOUTERRAINES



b. CARTE DU MUR DES DOLOMIES NEOJURASSIQUES



INTRODUCTION

ASPECTS DE LA KARSTIFICATION

I - LES INDICES DE SURFACE

II - LES KARSTS DE LA GALERIE DE VALAURY

III - LA GEOLOGIE ET LA KARSTIFICATION

IV - CONCLUSION

DETECTION DES ZONES KARSTIQUES PAR LES METHODES GEOPHYSIQUES

I - LE PROBLEME DU KARST DANS LES TRAVAUX
SOUTERRAINS

II - LA GRAVIMETRIE APPLIQUEE A LA RECHERCHE
DES VIDES

III - LA MICROSISMIQUE A L'APPROCHE DU KARST

IV - COMPARAISON ENTRE LES METHODES GEOPHYSIQUES
ET LES RELEVES DE LA GEOLOGIE

CONCLUSION

INTRODUCTION

De nature essentiellement calcaire , les terrains constituant le secteur étudié sont propices à la formation des cavités karstiques .

Afin de faciliter l'étude de ce phénomène, il est nécessaire de recenser les différentes formes rencontrées tant en surface que lors du percement de la galerie .

La première partie de ce chapitre sera donc essentiellement descriptive . Une étude analytique menée grâce aux données géologiques déjà décrites devrait permettre de définir la formation , l'époque et la situation de ces différents karsts .

Toutefois , la localisation de ces vides reste un problème fondamental lors de travaux souterrains ; deux méthodes géophysiques ont été mises au point afin de le résoudre . Leurs résultats devraient compléter l'étude préliminaire déjà entreprise et faciliter nos connaissances dans le domaine des phénomènes karstiques .

ASPECTS DE LA KARSTIFICATION

I - LES INDICES DE SURFACE

1 - RECENSEMENT DES PHENOMENES KARSTIQUES

Dans une région calcaire comme celle étudiée , les phénomènes karstiques sont fréquents . Ils se traduisent par la présence de nombreux avens de faible diamètre se prolongeant par des puits plus ou moins éboulés . L'altération sous forme d'argile rouge pour les calcaires et de sable pour les dolomies , accompagne toujours les karsts .

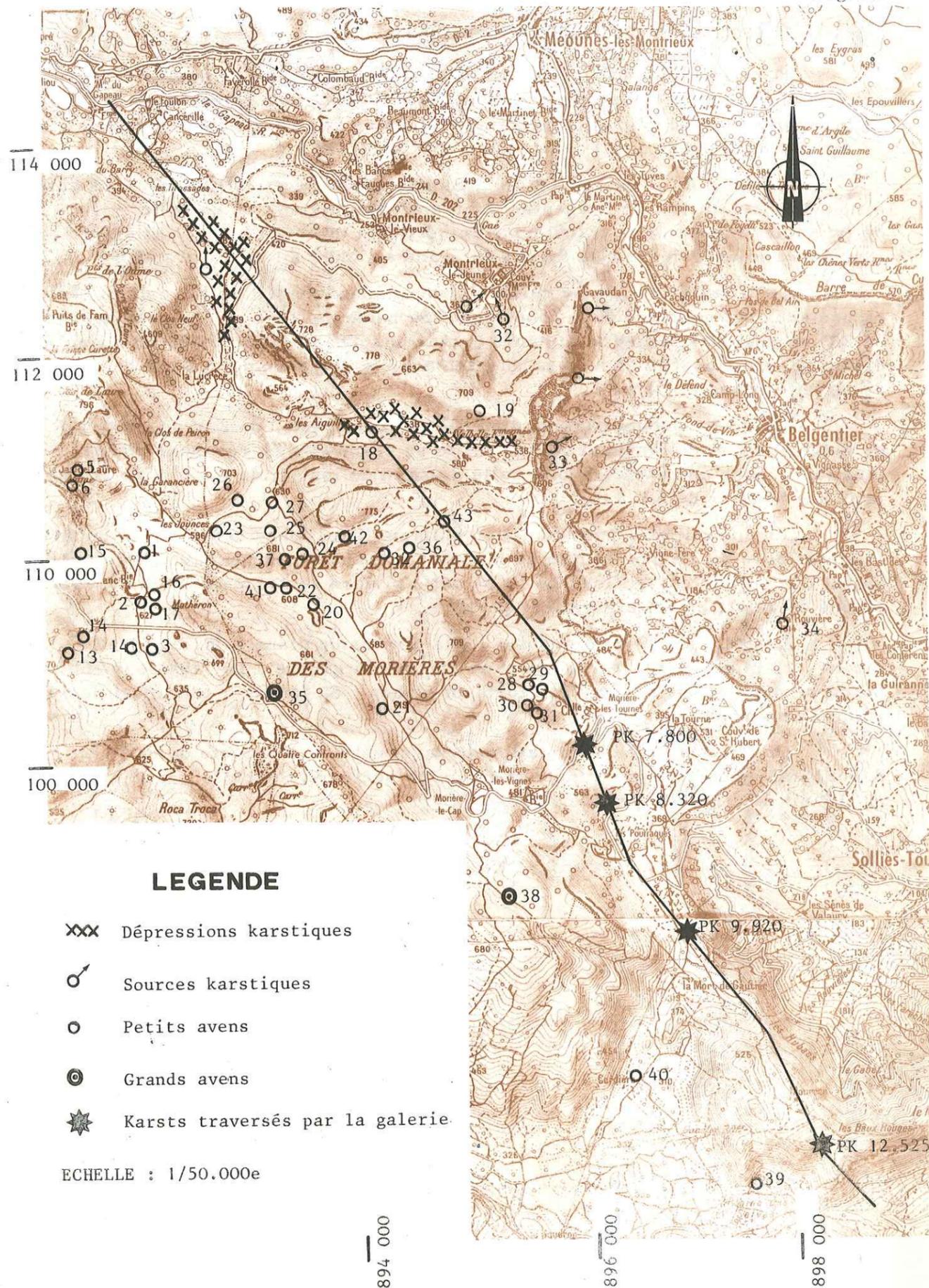
De nombreuses dépressions à fond plat sont qualifiées de karstiques car elles résultent de zones très fracturées ayant subi un comblement argilo-sableux .

Enfin , la majorité des sources sont karstiques : exutoire en boyau ou en puits avec remplissage de galets ou de sable .



CARTE DE LA KARSTIFICATION RECONNUE

Fig. 25



- LEGENDE**
- xxx Dépressions karstiques
 - Sources karstiques
 - Petits avens
 - ◎ Grands avens
 - ★ Karsts traversés par la galerie
- ECHELLE : 1/50.000e

2 - RECONNAISSANCE DES CAVITES KARSTIQUES

Dans la région de la forêt domaniale des Morières, l'ensemble des avens rencontrés en surface sont d'une reconnaissance difficile. Rares sont les orifices qui permettent une exploration humaine et dans ce cas, ils se prolongent, souvent, par des boyaux soit trop étroits, soit éboulés.

Cependant, l'exurgence de la Baume Escure est facilement accessible. Située à droite du Pas de Belgentier, au pied des falaises de Valbelle, elle est de type intermittent et se transforme en véritable torrent l'hiver. Elle sort des dolomies néojurassiques à la faveur du grand accident dit de "Gavaudan".

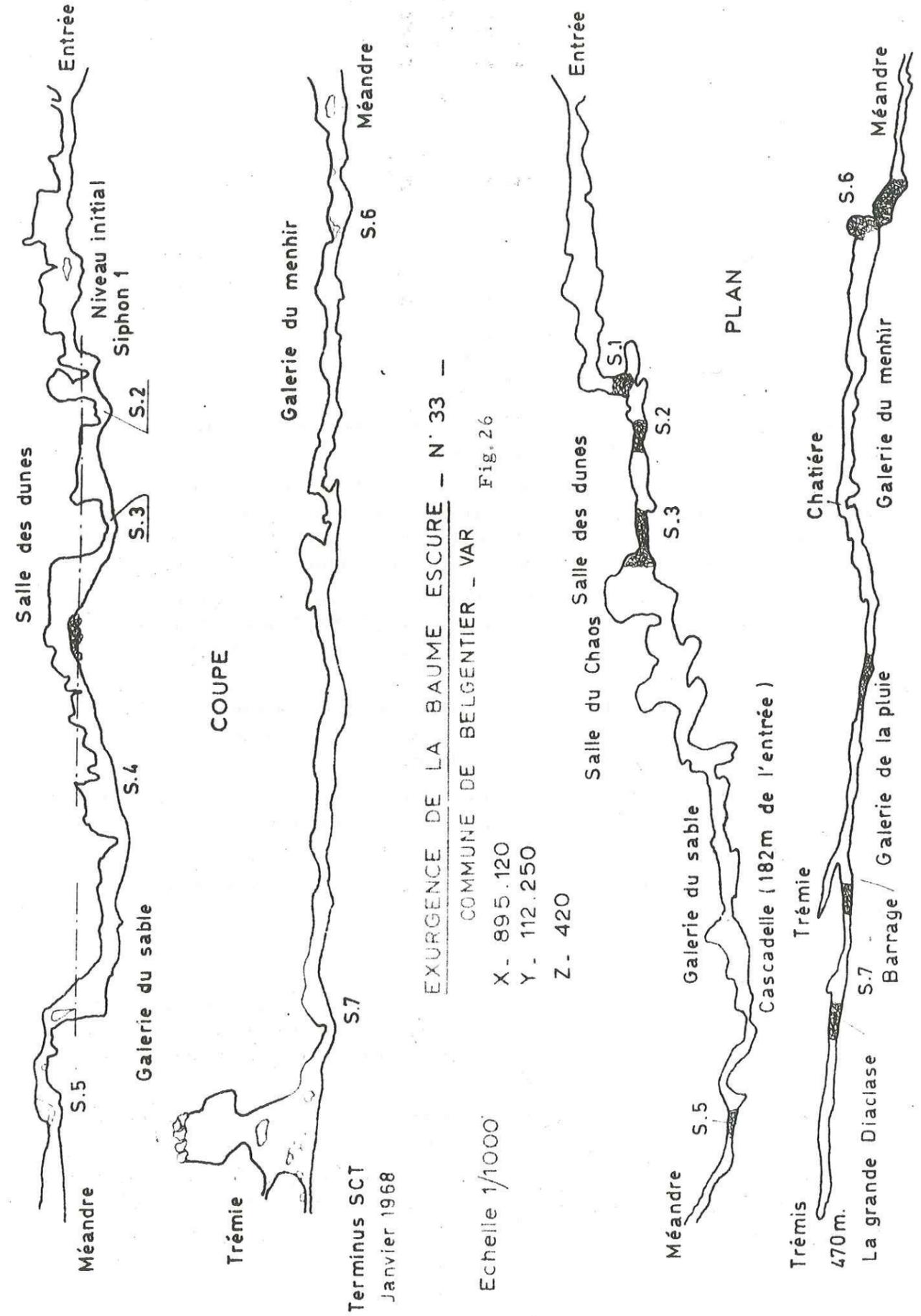
Le lit extérieur de ce ruisseau torrentueux donne la preuve de la force de ces eaux qui sourdent de la montagne. Sa pente est très vive, atteignant plus de 20° en quelques 300 m de distance, avec une dénivellation de 80 m sur cette distance. Ce ruisseau assure sa jonction avec le ruisseau de la Fond de Vin avant de se jeter dans le Gapeau.

La grotte débute par une diaclase N 55 inclinée, de 2 m de haut et de 1 m de large sur 7 m de longueur. Puis, elle se coude et s'élargit pour aboutir 5 m plus loin, dans une vaste et jolie salle de 22 m de long et de 4 à 6 m de largeur pour une hauteur de 6 à 8 m.

En son milieu, une formation stalagmitique donne naissance à une galerie inférieure de 1 x 1 m et 5 m de longueur, creusée par les eaux, qui ne pouvaient contourner cet édifice. Le lit de cette rivière souterraine intermittente est jonché de galets en cette première partie.

La salle se rétrécit ensuite, à la dimension d'une galerie, pour se terminer, 15 m plus loin, en tournant de 70° sur la gauche, par abaissement brutal de la voûte et une nappe d'eau formant siphon. Sa longueur totale est de 59 m jusqu'à ce siphon.

On constate que l'orientation du karst est peu différente de celle des grandes directions tectoniques rencontrées sur le secteur; toutefois, il ne semble pas qu'il y ait de direction privilégiée.



II - LES KARSTS DE LA GALERIE DE VALAURY

Quatre karsts ont été rencontrés lors du creusement de la galerie . Le karst du Pk 8.330 et celui du Pk 9.930 ont été particulièrement étudiés .

1 - LE KARST AU NIVEAU DU PK 8.330

1.1. - Observation

Une fracture N 150 à N 155 est ouverte sur une largeur de 10 m environ dans les calcaires du Bathonien supérieur .

En aval , la fracture se referme , à la hauteur de l'axe de la galerie , pour ne laisser subsister qu'une ouverture descendante de 1 m de largeur environ . Au dessus de cette zone , se situe une grosse cheminée remontante , zone d'arrivée d'eau ne présentant que des ruissellements réduits .

En amont du contact de la galerie et du karst , la fracture se résume en une diaclase verticale , ouverte sur une largeur de 1,5 m environ . A cet endroit , une arrivée d'eau donne naissance à un petit lac , retenu derrière une zone d'éboulis .

Au niveau du contact galerie-karst , se trouve un puits de 13 mètres de profondeur , montrant un peu d'eau dans son fond . Ce puits représente la continuation logique de la fracture en profondeur .

La plus grande partie de la vaste salle découverte est occupée par un éboulis de très gros blocs , plus ou moins recimentés par des dépôts de calcite .

Cette fracture ne correspond pas directement à un accident visible en surface à cet endroit . Toutefois sa direction est celle que présente une faille repérée à 700 m vers le S-E .

1.2. - Origine

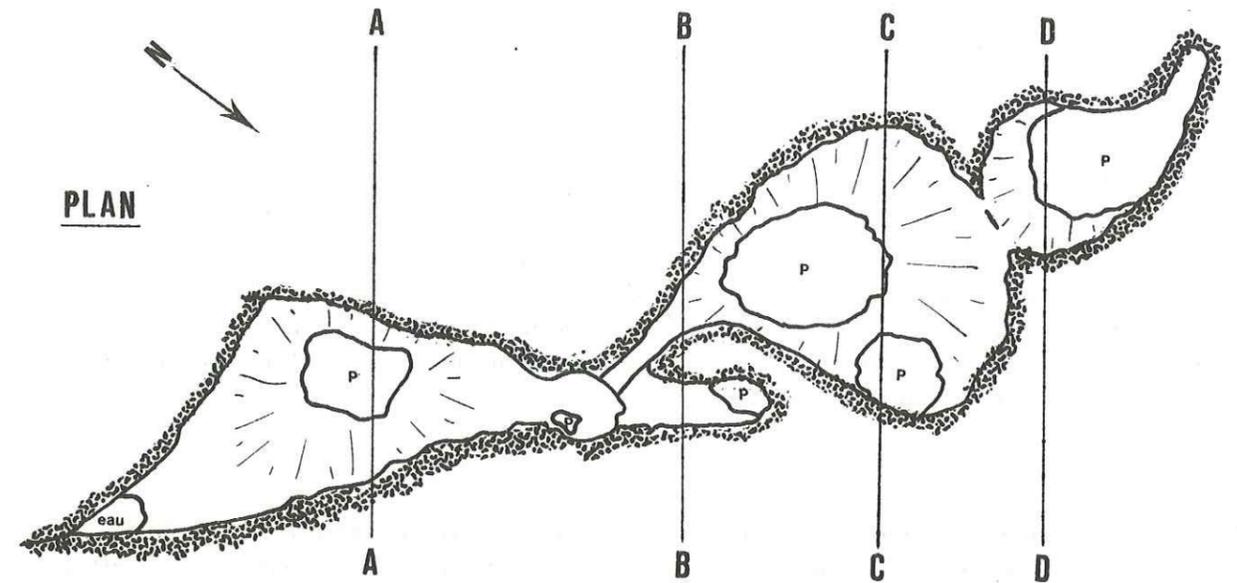
En première analyse , ce karst peut se trouver dans la zone d'alimentation des sources de La Rouvière , ou des sources karstiques de Solliès-Pont . Une étude par coloration a permis de vérifier l'hypothèse de circulations vers l'exutoire du site de " La Rouvière " .

Comme dans la majorité des cas de ce type , les circulations karstiques se sont établies dans une fracture , agrandie par dissolution .

Le pendage des couches étant faible , et les parois de la cavité se décomprimant , des décollements de strates , puis des effondrements se sont produits , amenant la création de vastes salles . Tel est le cas de la galerie et du karst .

SCHEMA DU KARST DU PK. 8330

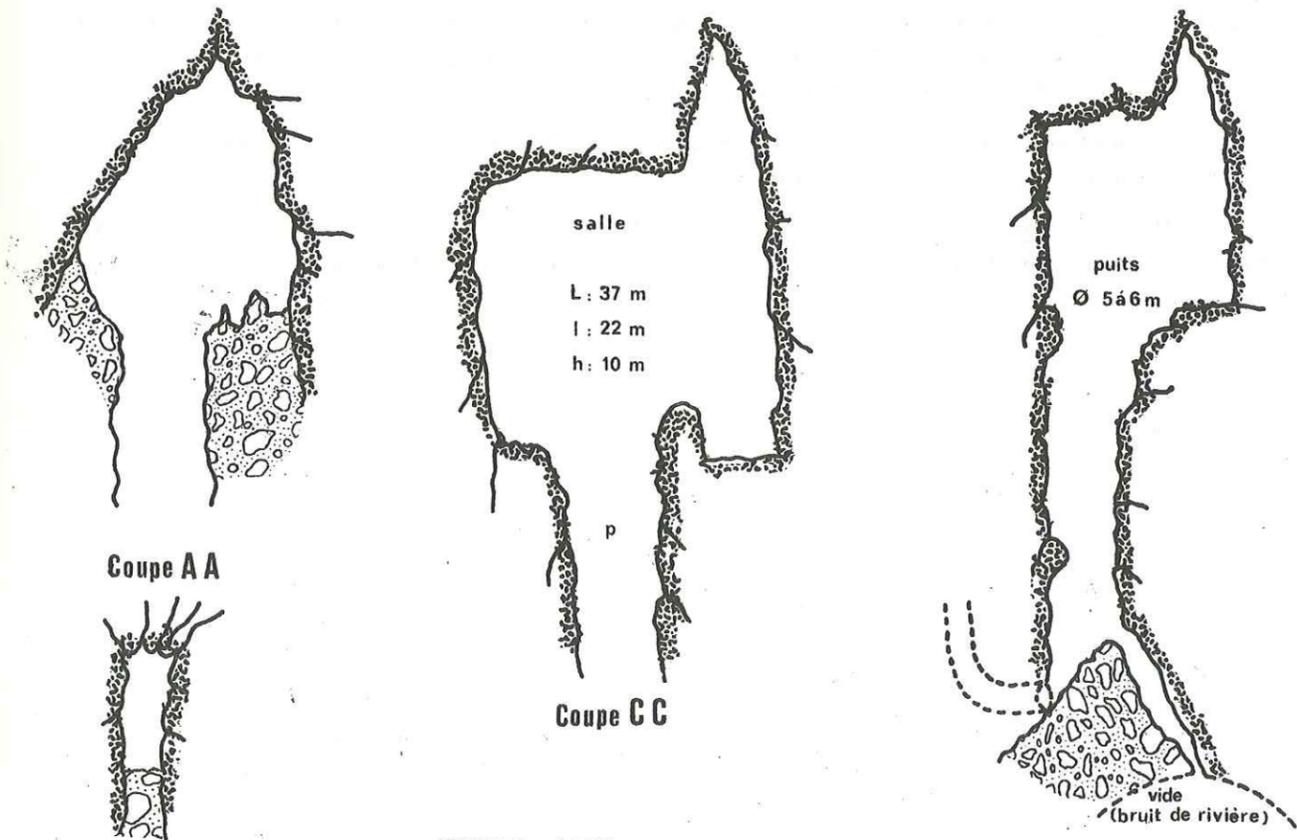
Fig. 27



PLAN

COUPES

p : puits



Coupe AA

Coupe CC

Coupe DD

Coupe BB

ECHELLE : 1/400e

2- LE KARST AU NIVEAU DU PK 9.930

2.1. - Observations

Les fractures sub-verticales, fermées, de direction N 140°, de nature cisailante, orientent la partie du karst située immédiatement après le débouché de la galerie.

Les fractures fermées de direction N 110° avec un pendage de 70° vers le Sud ne paraissent pas influencer sur les directions générales du karst.

C'est le long des fractures de direction N 55° avec un pendage de 75° vers le Nord que s'allonge principalement la zone karstique, soit plus ou moins perpendiculairement à l'axe de la galerie. Dans cette partie du karst se sont produits de nombreux effondrements. La partie dissoute ou effondrée montre une largeur de 5 à 15 m suivant les zones.

2.2. - Origine

Les dimensions importantes du karst sont incompatibles avec la faible couverture existant au-dessus de ce karst. Le bassin versant utile est en effet réduit, et donc les conduits karstiques sont anormalement grands.

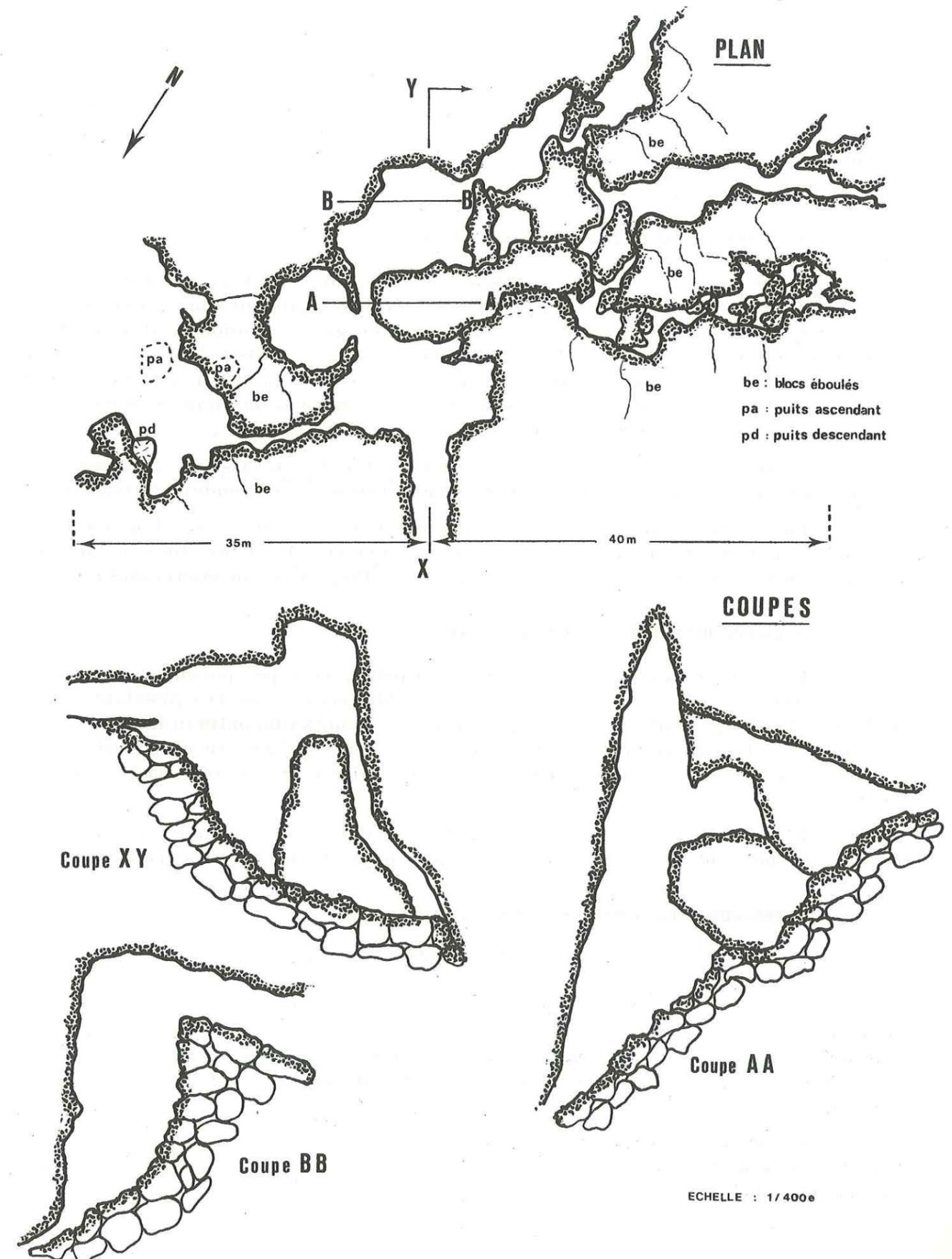
L'ensemble des conduits karstiques semble s'être développé par dissolution le long des plans de fractures de direction N 55° à une époque où les débits, donc la couverture, étaient plus importants. Il s'est produit ensuite des effondrements de grandes dimensions amenant la chute de blocs de plusieurs dizaines de mètres-cubes dans certains cas.

Ce karst représente donc un cas exceptionnel tant par ses dimensions que par l'ancienneté de son creusement.

Il existe quelques traces de circulations actuelles, sensibles sans doute durant les seules périodes de fortes pluies. Ces dernières cheminent entre les blocs effondrés.

SCHEMA DU KARST DU PK. 9930

Fig. 28



III - LA GEOLOGIE ET LA KARSTIFICATION

Deux grands caractères de la géologie sont responsables de la formation de cavités karstiques au sein d'un massif calcaire . Déjà étudiés en détail dans les chapitres précédents , ces facteurs sont d'une part la pétrographie des formations rencontrées et d'autre part la fissuration qui les affecte .

1 - LA PETROGRAPHIE ET LA KARSTIFICATION

Il est bien connu que le carbonate de calcium , CO_3Ca , est soluble dans l'eau chargée de gaz carbonique . Or si le carbonate de magnésium , CO_3Mg , est également assez soluble dans les eaux chargées de gaz carbonique , il n'en est pas de même pour la combinaison chimique des deux sels , c'est-à-dire de la dolomie, $\text{CO}_3\text{Ca} - \text{CO}_3\text{Mg}$, qui est fort peu soluble . Ainsi donc , de par leur teneur en carbonate de calcium , les différentes formations seront plus ou moins sujettes à ce phénomène de dissolution différentielle qu'est la karstification .

La figure 29b met en évidence une forte teneur en CO_3Ca , par rapport à la proportion de dolomie dans les terrains du "Dogger", "Bathonien" et Urgonien .

La texture de la roche intervient également . Ainsi , les calcaires du "Bathonien" ou de l'Urgonien , microgrenus , seront-ils plus favorables à l'attaque chimique des eaux chargées que les calcaires du "Dogger" ou du Portlandien .

2 - LA FISSURATION ET LA KARSTIFICATION

La roche calcaire , imperméable en petit , très peu poreuse , ne peut donner naissance à des cavités si elle ne présente pas de fissures préalables permettant à l'eau agressive d'agir en profondeur . Toutes discontinuités , c'est-à-dire joint de stratification , fissure , diaclase , faille , joueront un rôle dans les circulations de l'eau et de ce fait seront les directions privilégiées dans la karstification .

C'est ainsi que l'on constate que les azimuts relevés sur les cavités explorées correspondent aux grandes orientations , déjà étudiées , de la fracturation .

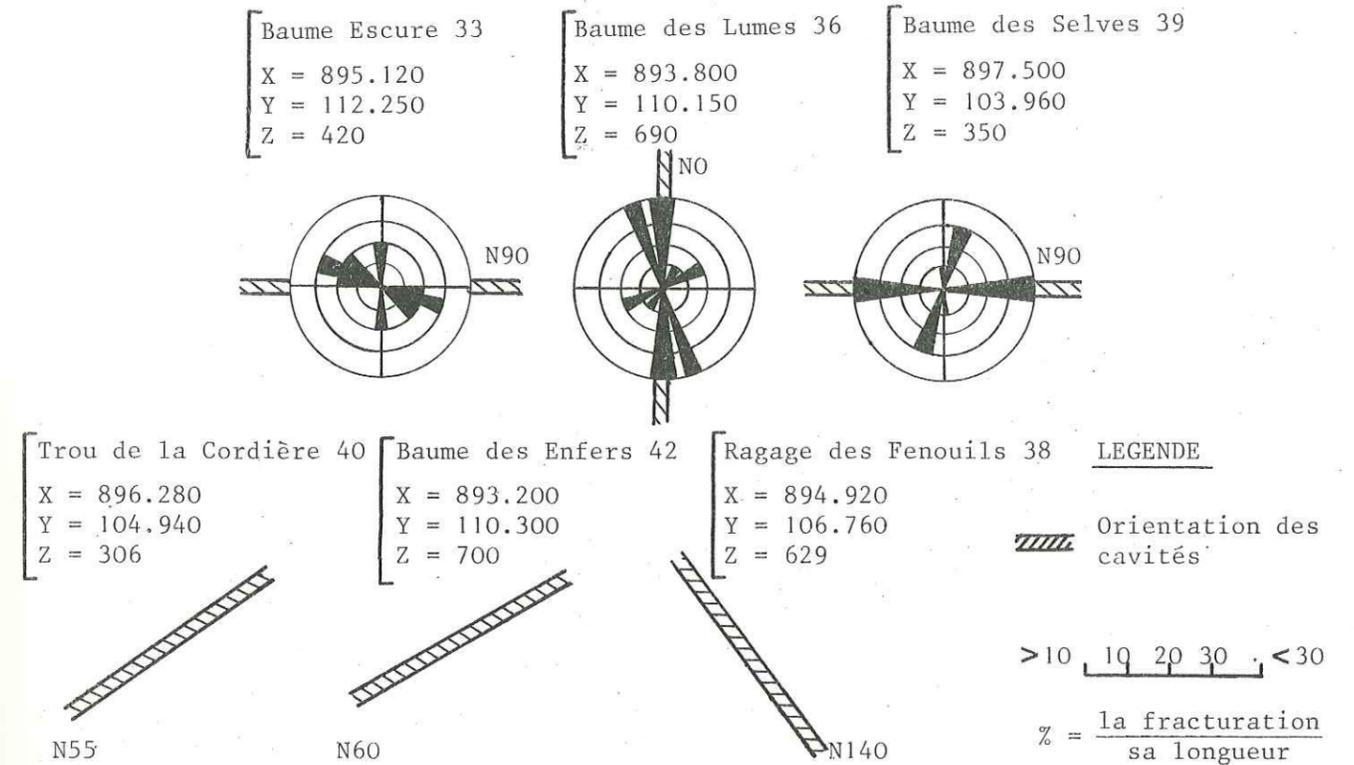
3 - ESSAI DE DATATION DES PHENOMENES KARSTIQUES

3.1. - Les épisodes régionaux de la karstification

Il faut , avant de vouloir dater les formes karstiques du secteur étudié , connaître les grands épisodes karstiques qui ont marqué la Provence au cours de son histoire géologique . Ces périodes correspondent en général aux grandes émergences géologiques s'accompagnant d'un climat favorable à la formation de tels phénomènes .

- Le premier épisode correspond à l'émergence albienne qui permet la karstification des formations déjà déposées soit dans notre région essentiellement du Jurassique supérieur jusqu'à l'Urgonien .

a. FRACTURATION ET ORIENTATION DES CAVITES



b. PROPORTION DU CaCO_3 DANS LES ROCHES CARBONATEES

% total des carbonates

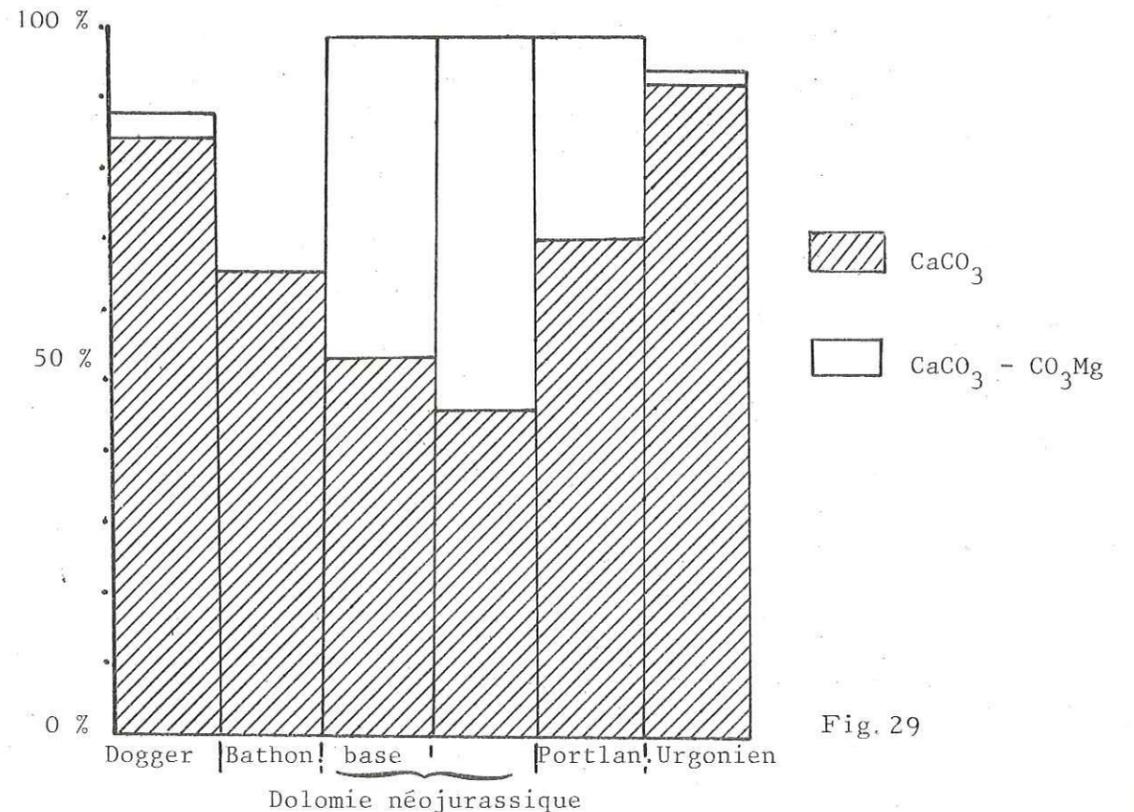


Fig. 29

De type tropical, le climat est des plus favorables (formation de bauxite), Il se traduit par une pluviométrie abondante et des températures élevées .

Il y aura deux évolutions possibles pour ces karsts :

-soit un remplissage quasicontemporain ou juste postérieur à sa formation . Ce sera un remplissage bauxitique ou d'argilites du début du Crétacé.

-soit un remplissage très postérieur provenant des ruissellements qui ont lessivé la bauxite existante . Ce bourrage est d'âge Quaternaire .

-Le deuxième épisode date du Tertiaire mais correspond à des phénomènes karstiques plus réduits que ceux du Crétacé .

- C'est au Quaternaire que se situe le troisième épisode de la karstification en Provence . Les caractères climatologiques diffèrent de ceux déjà décrits . Le climat est plus froid et les pluies , par conséquent , moins agressives . Les cavités de cette période sont en général réduites et superficielles .

3.2. - Datation des karsts observés

Deux catégories de phénomènes karstiques ont été observés :

- Les grands karsts de la galerie
- Les cavités réduites rencontrées tant en surface qu'en galerie notamment dans les dolomies néojurassiques .

- Les grands karsts sont sans équivoque des cavités anciennes non actives. Ils peuvent être considérés comme secs ou du moins le volume d'eau transité par ces formes est hors de proportion avec les dimensions du karst (Exemple:karst du Pk 8.330) .

Ces karsts sont totalement ou en partie éboulés . De plus , des dépôts d'aragonite ont pu être observés indiquant ainsi un dépôt de carbonates sous climat chaud .

Ils peuvent donc être datés du premier ou du deuxième épisode régional .

Cette conclusion se confirme sur un autre ouvrage du Canal de Provence (Branche de Marseille - Est) où des dépôts d'aragonite sont recoupés par l'érosion traduisant une formation précoce de ces dépôts .

- Les cavités réduites se présentent sous forme de fissures superficielles karstiques ou de trous très souvent remplis de sable . Il y a absence totale de tout concrétionnement . Ils sont très souvent aquifères et essentiellement localisés dans les dolomies néojurassiques .

Il semble donc que ces formes karstiques soient récentes (Quaternaire) et que le Bathonien supérieur formerait le niveau de base de ce karst .

IV - CONCLUSION

En synthétisant l'ensemble des résultats obtenus lors des chapitres précédents sur l'hydrodynamique souterraine , l'étude structurale et la géologie générale du secteur , il semble qu'il soit possible de prévoir les zones favorables à la karstification .

Ainsi , les grandes directions de fractures reconnues sur le secteur N 45, N 140 , N 90 , N 0 sont également les orientations principales de la majorité des cavités reconnues .

Toutefois , le karst n'intéresse pas toujours toutes les formations comme pourrait le faire la faille qui le dirige .

La teneur en carbonate de calcium et la structure pétrographique de la roche interviennent pour une grande part dans la formation des cavités karstiques. La solubilité différentielle entre les calcaires et les dolomies rend ces dernières peu favorables à la karstification .

Un tableau récapitulatif des principales zones favorables à la karstification a été dressé à partir des données géologiques ; on y a reporté les principales cavités reconnues .

TABLEAU RECAPITULATIF DES ZONES KARSTIFIEES Fig. 30

Orientation favorable	N 0	N 45	N 90	N 140	Cas particuliers
Formation					
Urgonien				38	
Portlandien					Fractures dominantes Pk 9.910 N 60
Dolomies néojurassiques	36	40	39		42 N 60
base		Pk 7.800			
"Bathonien "		Pk 8.310			
"Dogger "			33		Pk 12.520 Pas de direction dominante

Toutes ces indications résultent d'observations sur le terrain et nous renseignent quant aux possibilités de la karstification . Ce travail indispensable étant effectué , il incombe au géologue en travaux publics de préciser la nature des zones " suspectées " . Pour cela , il doit faire appel à des moyens plus élaborés tels que la géophysique qui lui permettront de détecter des karsts éventuels.

DETECTION DES ZONES KARSTIQUES PAR LES METHODES GEOPHYSIQUES

I - PROBLEME DU KARST DANS LES TRAVAUX SOUTERRAINS

Bien que de nombreux indices puissent nous renseigner sur l'état plus ou moins karstique d'une formation, il est toujours très difficile, voire impossible, de déterminer l'emplacement exact ainsi que les caractéristiques géométriques d'un karst.

Il va de soi qu'une telle imprécision rend très aléatoire l'établissement de dossiers prévisionnels d'une fiabilité suffisante. Cet inconvénient peut avoir, aussi bien pour l'entreprise que pour le maître d'oeuvre des conséquences matérielles et économiques importantes.

Le deuxième problème concerne les circulations karstiques. Elles sont assez mal connues et il est difficile de déterminer d'avance l'influence d'un ouvrage souterrain sur leur comportement.

II - LA GRAVIMETRIE APPLIQUEE A LA RECHERCHE DES VIDES

1 - BUT RECHERCHE

Les méthodes gravimétriques ont été surtout appliquées à la recherche de vides dans le gypse ou dans des carrières du Bassin Parisien en vue de fondations superficielles.

Des essais ont été réalisés en diverses régions en vue de déceler la présence de karsts éventuels depuis la surface du sol.

Il est certain que si les résultats s'avéraient probants, de telles études pourraient être étendues aux travaux préliminaires de certaines galeries en pays karstique.

C'est pourquoi, à titre de test, il a été opéré un essai au droit d'un karst connu en galerie sous une couverture de l'ordre de 35 m.

2 - PRINCIPE ET METHODE

La prospection gravimétrique met en évidence les variations anormales de la pesanteur provoquées par des variations de densité du terrain .

Les cavités souterraines vides , par exemple , créent des déficits de masse se traduisant par des anomalies négatives .

De la profondeur , de la taille et de la géométrie de la cavité vont dépendre l'amplitude et la forme de l'anomalie résultante .

Un vide apparenté à un cylindre de forme connue et à une profondeur donnée représente une certaine anomalie . Nous assimilons donc l'anomalie à une figure géométrique fictive mais connue à une profondeur déterminée .

Le gravimètre utilisé lors des essais effectués par la S. C. P. est de type Lacoste et Romberg modèle D permettant des lectures au millième de milligal (1 microgal = $10^{-9}g$) . De ce fait , les mesures au centième de milligal sont assurées sans difficulté .

Au total , 41 stations équidistantes de 5 m ont été implantées le long d'un profil de 200 m de long .

Les mesures doivent subir après lecture un certain nombre de corrections : dérive luni-solaire et instrumentale , altitude , par rapport à une base , latitude et corrections dites " de terrain " nécessitant des profils topographiques perpendiculaires au profil gravimétrique .

3 - RESULTATS

3.1. - Lecture

Après corrections , le profil obtenu représente l'anomalie de Bouguer .

Cette anomalie regroupe les anomalies recherchées et " l'anomalie régionale " reflétant des causes géologiques très profondes .

En retranchant de l'anomalie de Bouguer l'anomalie régionale déterminée graphiquement , il apparaît l'anomalie représentative des causes recherchées .

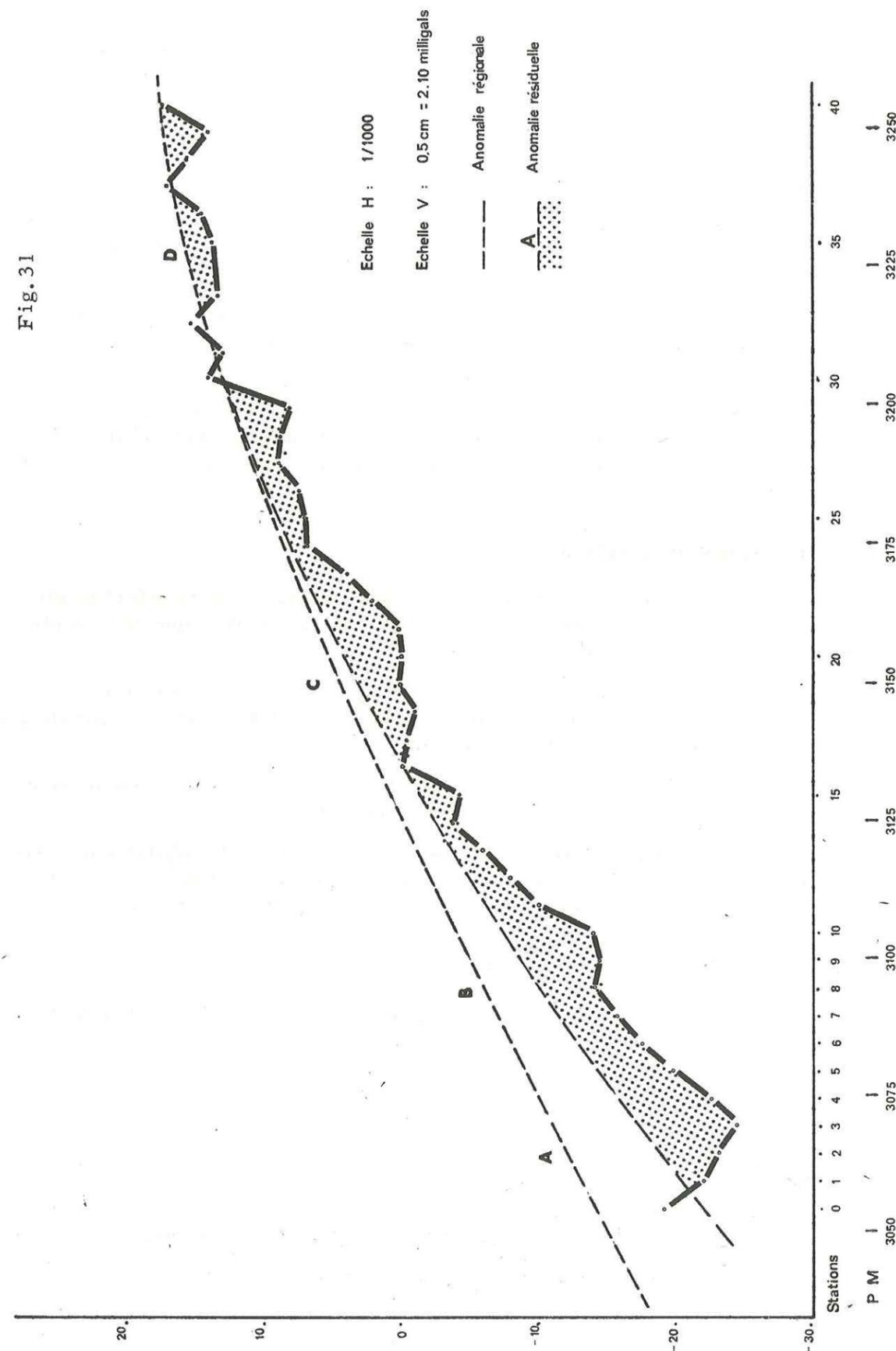
3.2. - Interprétation

Comme nous le montre le schéma N° 31 , l'anomalie régionale n'a pas pu être déterminée avec exactitude du fait de la faible extension du profil expérimental . Seule l'extrémité S-E (Stat. 27 à 40) est sans ambiguïté : au delà deux hypothèses sont possibles qui accentueraient ou non cette anomalie .

Dans le cas de l'hypothèse 1 , la différence entre l'anomalie de Bouguer et l'anomalie régionale donne trois zones d'anomalies résiduelles :

- une anomalie proche de la surface : D (stations 27 - 30 - 37 - 40)
- une anomalie profonde C : 16 - 24
- une anomalie composite A - B : 0 - 16 .

PROFIL GRAVIMETRIQUE



Afin de ne pas développer exagérément notre sujet, nous détaillerons seulement l'anomalie C, correspondant au karst rencontré en galerie au PM 3160.

Sa forme est allongée et l'amplitude relativement faible ($4 \cdot 10^{-2}$ mgals).

Procédant par la méthode citée ci-dessus, on peut se faire une idée des dimensions du karst.

- Une forme cylindrique horizontale aurait son axe à environ 12 m et la cavité aurait 8 à 10 m de diamètre pour un contraste de densité à l'encaissant de 1.
- Pour une forme aplatie, l'axe serait vers 8 m de profondeur et son épaisseur de 5 m pour un même contraste de densité.

En fait, cette anomalie rend compte de la zone karstique (rocher décomprimé, cheminée ascendante...) qui prolonge la cavité rencontrée par la galerie. La poche rencontrée ayant été remblayée et bétonnée (3000 m³ de béton environ) ne présente plus un contraste de densité suffisant pour créer une anomalie importante en surface.

4 - CRITIQUE DE LA METHODE

Des résultats, il ressort que l'essai aurait dû être effectué plus tôt, c'est-à-dire dès la découverte de la cavité, afin d'éviter que le remplissage de béton ne fausse les résultats.

Il serait souhaitable de réaliser un profil relativement long, de façon à n'avoir aucune ambiguïté dans la détermination de l'anomalie régionale, comme cela a été le cas sur ce profil de 200 m.

La couverture au-dessus du karst joue un grand rôle. La méthode perd de son efficacité dès que la couverture augmente.

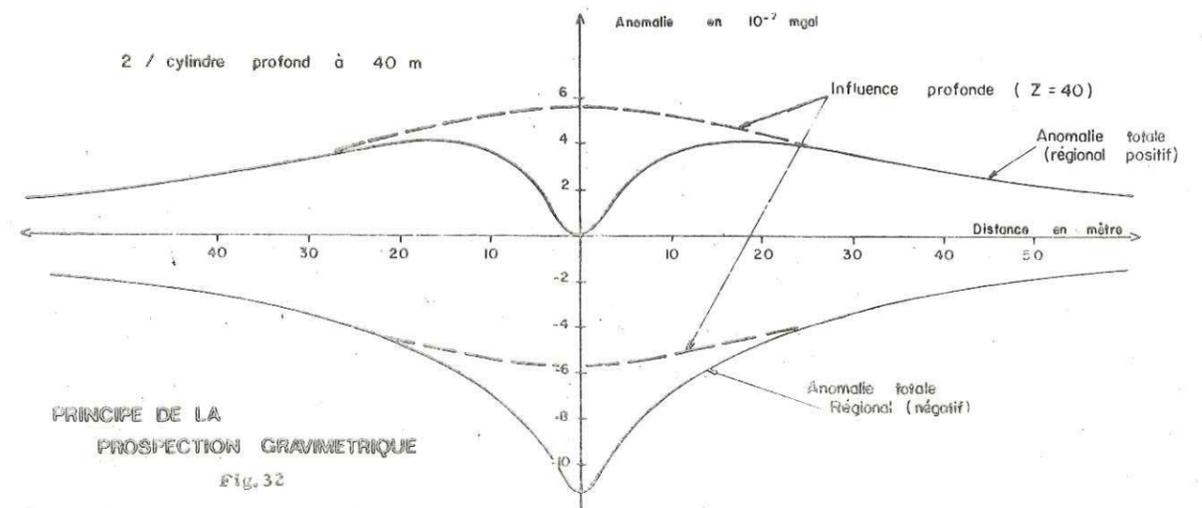
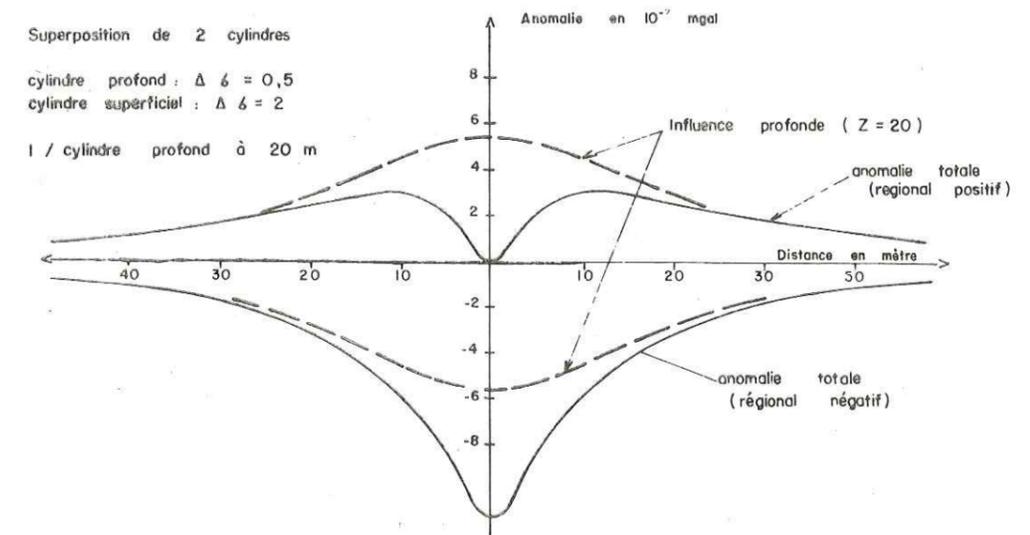
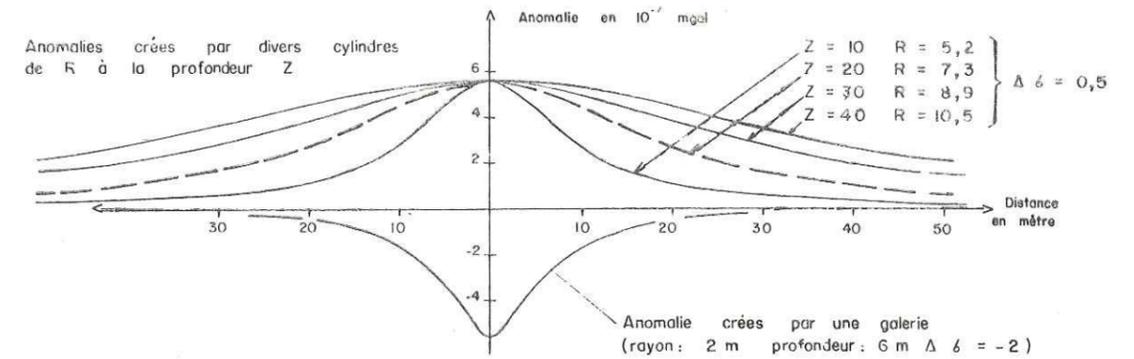
Le calcul mathématique implique comme base de départ une forme théorique du vide. Il y a donc une indétermination de la profondeur du vide créant l'anomalie au stade des reconnaissances car la géométrie de ce vide est inconnue.

III - LA MICROSISMIQUE A L'APPROCHE DU KARST

1 - BUT RECHERCHE

Le but de cette méthode est de connaître les zones décomprimées à proximité du karst et les caractéristiques dynamiques du rocher en galerie.

Ceci intéresse tout particulièrement l'entreprise qui peut prévoir l'approche du karst et les travaux d'injection.



2 - PRINCIPE

Il s'agit de traiter la propagation dans le rocher des ondes créées par un choc explosif .

Plusieurs paramètres seront analysés :

- Vitesse longitudinale .

V_l , analysée sur une courbe dromochronique (temps / distance) donne l'épaisseur des couches . En galerie , une zone décomprimée (ou fracturée) se traduit toujours par des vitesses relativement faibles . La V_l , en rocher sain , sera d'autant plus élevée que la pression lithostatique (fonction de l'épaisseur de la couverture) est grande .

- Vitesse transversale .

V_t correspond à la vitesse de propagation des ondes de cisaillement dans le rocher sain .

- Module d'élasticité dynamique E (Module de Young) et le coefficient de Poisson ν . Ce module est déduit des vitesses .

$$E = \rho V_l^2 \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu} \quad (1)$$

$$\nu = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{V_l^2}{V_t^2} \right) \quad (2)$$

Connaissant V_l , V_t et ρ (masse spécifique du rocher = 2,7) on déduit E et ν .

- Temps du toit du 5000 m/s .

En prenant une vitesse arbitraire de 5000 m/s pour le rocher sain , on calcule , à partir des dromochroniques , le temps double nécessaire à l'onde de choc pour parvenir au toit de la formation à 5000 m/s prise comme référence . Ceci permet de faire ressortir nettement les zones les plus décomprimées , soit par leurs vitesses faibles , soit par leurs épaisseurs importantes , soit par les deux paramètres ensemble .

Nous nous affranchirons ainsi de la notion d'épaisseur seule en faisant intervenir la vitesse superficielle quelles que soient les vitesses en présence .

3 - METHODE

L'appareil utilisé est un ABEM TRIO 24 traces . Au total 20 dispositifs de 30 m ont été exécutés avec un espacement de 2,50 m entre chaque géophone .

Chaque microdispositif comprend quatre tirs :

Deux tirs à chaque extrémité .

Deux tirs off set extérieurs aux dispositifs .

Toutes les mesures ont été réalisées en pied droit à une hauteur sensiblement constante de 1,20 m par rapport au radier . La répartition des dispositifs se fait : 14 en amont de la zone karstique , 7 en aval .

4 - RESULTATS (Cf. Plan en annexe)

4.1. - Lecture

Sur l'exemple de la galerie du Var III , on note les valeurs suivantes :

- V_1 1000 - 1500 m/s rocher décomprimé ou altéré
4800 - 5500 m/s rocher sain
- V_t 2400 - 2850 m/s sont les valeurs généralement observées.
Les plus faibles se situent vers 2380 .
- E E moyen est de l'ordre de 550.000 bars . Les valeurs les plus faibles varient de 391.000 à 459.000 bars .
- ν varie peu . La valeur la plus fréquente est 0,33 , la plus faible est 0,19 .
- Temps au toit du 5000 m/s
Une zone à temps très élevé , 1,8 milliseconde , a été décelée . La valeur la plus répandue étant de 1,10 m/s .

4.2. - Interprétation

Ce lot de mesures a permis de définir très clairement les quatre zones jugées défavorables .

Nous étudierons plus spécialement le secteur karstique . C'est la zone A qui , suivant toute logique , présente la plus grande anomalie .

Outre les vitesses faibles en surface de la paroi de la galerie (1200 - 1300 m/s) , cette zone présente des vitesses intermédiaires sur une grande épaisseur (3,50 m) . Le temps du toit du 5000 m/s est élevé (1,8 milliseconde .) .

5 - CRITIQUE DE LA METHODE

. On peut constater que E est défini pour les terrains non décomprimés alors que l'intérêt serait d'avoir E dans les zones décomprimées pour faciliter les calculs de revêtement de la galerie .

. Du fait de la durée relativement longue de l'opération (une quinzaine de jours) les travaux en galerie n'ont pu être suspendus . Il y a donc eu perturbation des mesures par le passage des trains et les tirs de mine .

. Cette manipulation nécessite l'utilisation d'appareils de très haute sensibilité .

IV - COMPARAISON ENTRE LES METHODES GEOPHYSIQUES ET L'ANALYSE STRUCTURALE

La première remarque qui s'impose est d'ordre matériel et économique . Il est évident qu'une campagne géophysique nécessite des moyens plus importants que le levé de terrain .

Il faut aussi tenir compte de la précision des méthodes . Une campagne géophysique intéresse un secteur déterminé alors que le levé permet non seulement de définir des données générales mais aussi de détailler des zones très réduites .

La géophysique présente l'avantage d'être efficace même sur des terrains présentant une couverture végétale importante . Néanmoins , elle reste , pour une large part , tributaire du levé de terrain .

En conclusion , les deux genres de méthodes , malgré leurs différences d'utilisation , loin de s'opposer , sont complémentaires . La superposition des résultats permet d'apprécier les apports des différentes méthodes .

C'est ce que nous avons fait au niveau du karst 1600 de la galerie du Var III , lors de la campagne de prospection sismique .

- Les valeurs obtenues font ressortir la médiocre tenue de certaines formations telles que le Bathonien . La nature pétrographique de la roche explique ce phénomène . Tout en étant un " calcaire massif " , la composition minéralogique du Bathonien présente 66 % de calcite pour 34 % d'éléments non carbonatés . Cette fraction , essentiellement argileuse , rend le rocher moins compétent donc plus sensible à la décompression .

- Au sein d'une même formation des différences peuvent apparaître . C'est le cas de la base des dolomies néojurassiques où les valeurs observées révèlent un terrain de meilleure tenue que les dolomies susjacentes .

Là aussi la lithologie intervient puisque cette zone correspond à des bancs très compacts de dolomies granuleuses . La dolomie néojurassique , en masse non stratifiée , présente , de plus , une densité de fissuration plus importante que la base de la formation .

- Les zones de faiblesse les plus caractéristiques sont situées au passage d'une formation à une autre . Ceci est tout particulièrement visible sur le schéma proposé (Fig. 33) .

Sur le terrain , outre une fissuration plus dense , le rocher est altéré , avec des couleurs différentes ; parfois le contact est souligné par une brèche .

- Les grands accidents se retrouvent facilement . Les fractures N 120 ou N 155 , mises en évidence par la géophysique , avaient été révélées par les relevés avant et après travaux . L'étude de la densité de fissuration permet dans la zone C de mettre en évidence une famille de fractures N 155 qui se prolonge dans la zone karstique .

Cette direction avait été observée sur photo aérienne , légèrement plus au Sud . Il n'est pas impossible d'envisager un prolongement de cet accident , observé à l'échelle du secteur , sous forme d'un faisceau uniquement mesurable sur l'affleurement .

La zone de décompression apparaît bien avant le karst sur le parement gauche de la galerie . Les vitesses longitudinales dans le rocher sont de l'ordre de 4000 à 4500 m/s à cet endroit alors qu'elles dépassent les 5000 m/s sur l'ensemble de la galerie . Ceci se retrouve dans le karst où le parement de gauche présente des phénomènes d'écaillage et des éboulements .

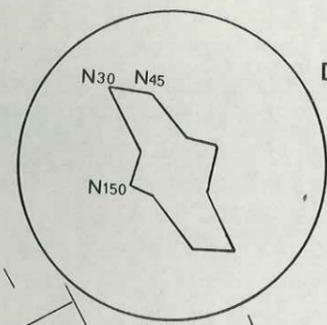
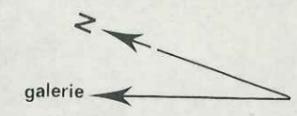
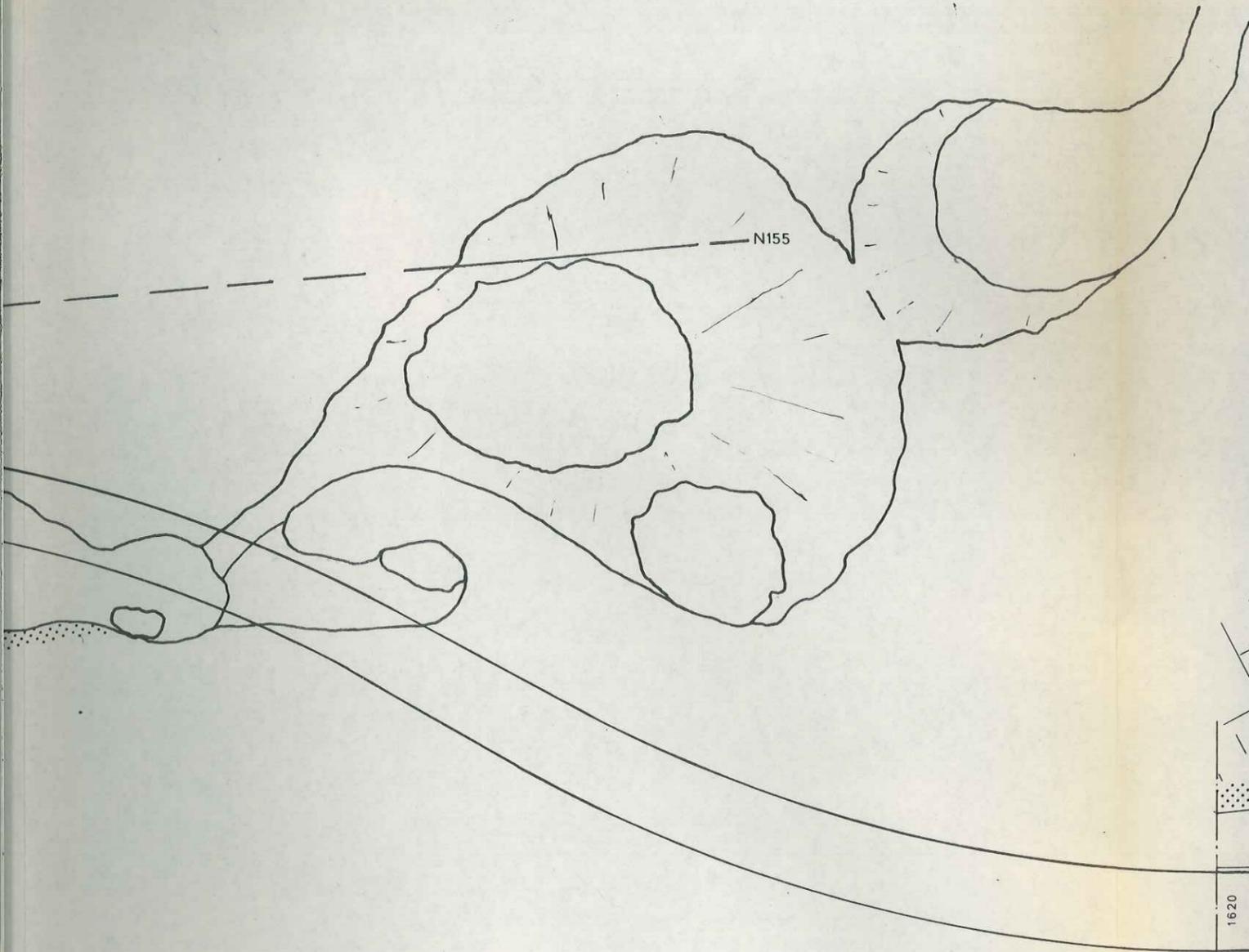
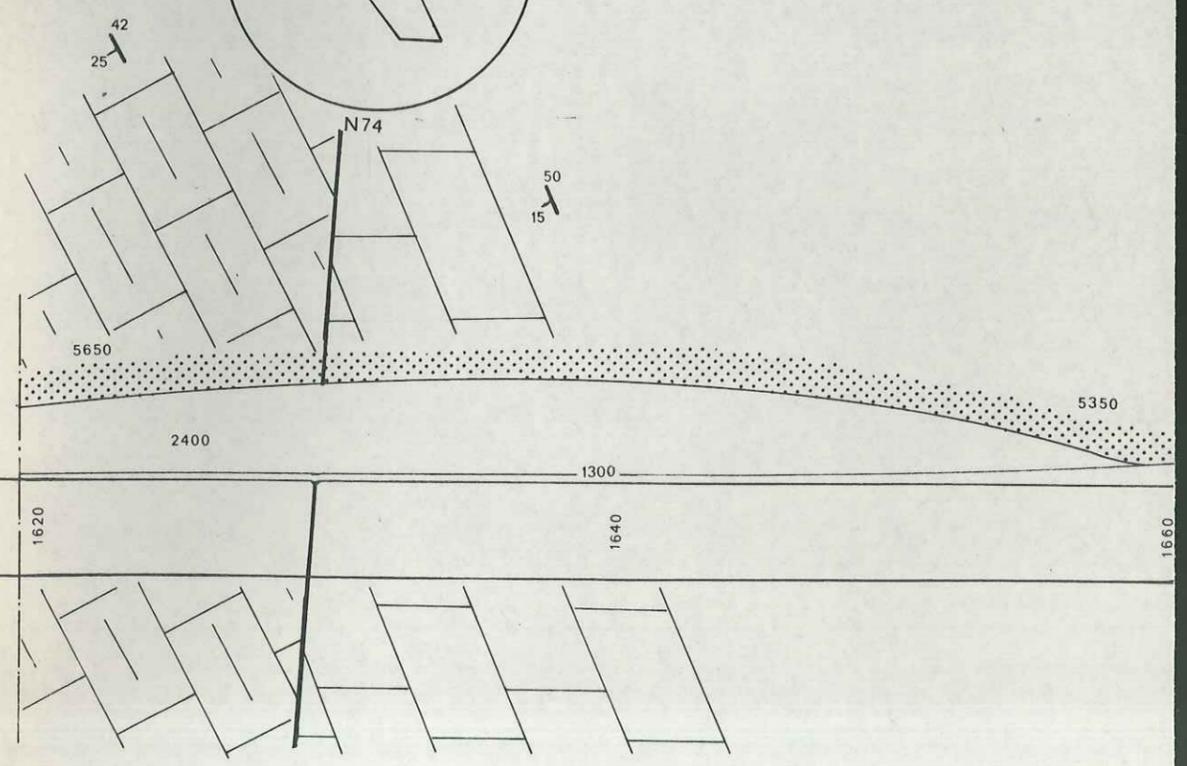
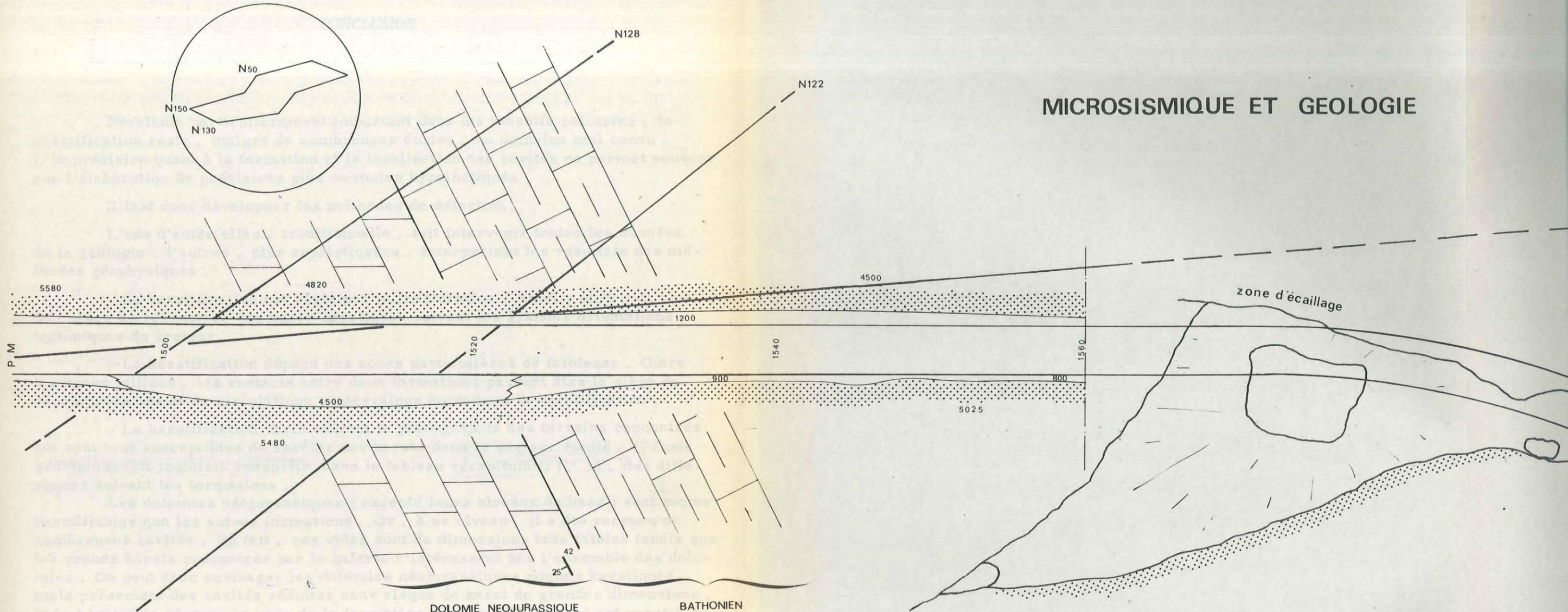


Diagramme de fissuration



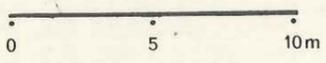
MICROSISMIQUE ET GEOLOGIE



 Rocher sain

 Fracture

Echelle : 1/250e



CONCLUSION

Problème particulièrement important dans les massifs calcaires , la karstification reste , malgré de nombreuses études , un domaine mal connu . L'imprécision quant à la formation et la localisation des cavités ne permet souvent que l'élaboration de prévisions plus ou moins hypothétiques .

Il faut donc développer les méthodes de détection .

L'une d'entre elles , traditionnelle , fait intervenir toutes les données de la géologie ; d'autres , plus sophistiquées , interprètent les résultats des méthodes géophysiques .

- La karstification est régie par la fracturation . Ainsi y aura-t-il plus de chance de rencontrer des zones karstiques suivant les grandes orientations tectoniques du secteur .

- La karstification dépend des zones particulières de faiblesse . Outre les zones faillées , les contacts entre deux formations peuvent être le siège de décompressions et de circulations souterraines entraînant la karstification .

- La karstification varie suivant la pétrographie des terrains rencontrés qui sont tous susceptibles de recéler des karsts dans le secteur étudié . L'étude géologique fait toutefois ressortir , dans le tableau récapitulatif N° 30 , des différences suivant les formations .

Les dolomies néojurassiques (excepté leurs niveaux de base) sont moins karstifiables que les autres formations . Or , à ce niveau , il a été reconnu de nombreuses cavités . En fait , ces vides sont de dimensions très faibles tandis que les grands karsts rencontrés par la galerie n'intéressent pas l'ensemble des dolomies . On peut donc envisager les dolomies néojurassiques comme karstiques mais présentant des cavités réduites sans risque de karst de grandes dimensions . Il faut toutefois séparer la base de la formation (environ 20 m) qui est constituée de bancs massifs bien stratifiés . Les joints de stratification jouent un rôle favorable dans les circulations d'eau agressive , créant des décollements qui favorisent les cavités par effondrement .

Schématiquement , on peut considérer le "Bathonien" comme étant le terrain le plus favorable à la formation des grands karsts . Le "Dogger" est bien moins karstifié du fait de ses nombreuses passées imperméables qui drainent les eaux souterraines . La karstification se fera de préférence le long de ces passées argileuses .

La gravimétrie , depuis la surface , détecte les vides au sein du massif . Les résultats obtenus donnent des indices sans toutefois préciser de façon satisfaisante les caractéristiques du karst .

La microsismique à l'approche du karst offre des résultats beaucoup plus intéressants pour la géologie appliquée aux travaux souterrains . Effectivement , la zone karstique est caractérisée par une frange de terrain décomprimé . Ces zones sont également dues au percement de la galerie . Il est donc fondamental d'étudier , à présent , les phénomènes karstiques d'un point de vue plus géotechnique .

Si , jusqu'à présent , les méthodes utilisées nous ont permis d'avoir une meilleure connaissance des phénomènes sur le secteur étudié , il est utile d'employer ces données du point de vue de la technique des travaux souterrains .

CHAPITRE VI

ETUDE GEOTECHNIQUE

I - CARACTERISTIQUES DE LA GALERIE DE TOULON-EST

II - ETUDE COMPARATIVE DES RESULTATS

III - APPLICATIONS AUX CARACTERISTIQUES DE L'OUVRAGE

IV - COMPORTEMENT DE LA GALERIE FACE AUX VIBRATIONS

V - CONCLUSION

I - CARACTERISTIQUES DE LA GALERIE DE TOULON-EST (Montrieux - Valaury)

Longue de 13,460 kilomètres, la galerie de Montrieux-Valaury se situe à la côte 310 m. La couverture varie d'environ 40 m jusqu'à 420 m. La section mouillée est de 4,74 m². De forme en fer à cheval, elle sera revêtue de béton sur une épaisseur minimale de 30 cm.

Lorsqu'elle sera en service, en 1977, la galerie sera en charge (pression inférieure à 1 bar) et la vitesse maximale d'écoulement sera de l'ordre de 2 m/s.

Pour sa réalisation, une fenêtre a été percée au niveau de Vigne Fère, soit quasiment au centre de l'ouvrage. Il y a ainsi quatre attaques travaillant simultanément (Fig. 3).

II - ETUDE COMPARATIVE DES RESULTATS

1 - EVALUATION DES RISQUES

Avant le commencement des travaux de creusement de la galerie, on a recensé les risques naturels susceptibles d'entraver la bonne marche de l'ouvrage.

L'étude géologique préliminaire a déterminé les zones apparemment dangereuses et l'étude géophysique a donné de précieux renseignements qui complètent l'étude de terrain.

1.1. - La prospection électrique

Une campagne de prospection électrique a eu lieu afin de compléter la reconnaissance sur le tracé de la galerie (C. Choquet 1972).

Deux techniques ont été utilisées : le sondage électrique et le trainé à répétition. Avec le sondage électrique, on étudie la variation de la résistivité apparente du sous-sol en fonction de la profondeur d'investigation ; c'est le dispositif Schlumberger couramment employé. Il en est de même pour le trainé à répétition où l'on conserve, cependant, le même écartement des électrodes lors du déplacement le long d'un profil.

Compte tenu des corrélations entre les coupes des différents forages effectués et des résultats de la prospection électrique, quatre groupes de terrains présentant une composition, une compacité et une fracturation différentes ont été distingués au niveau de la galerie.

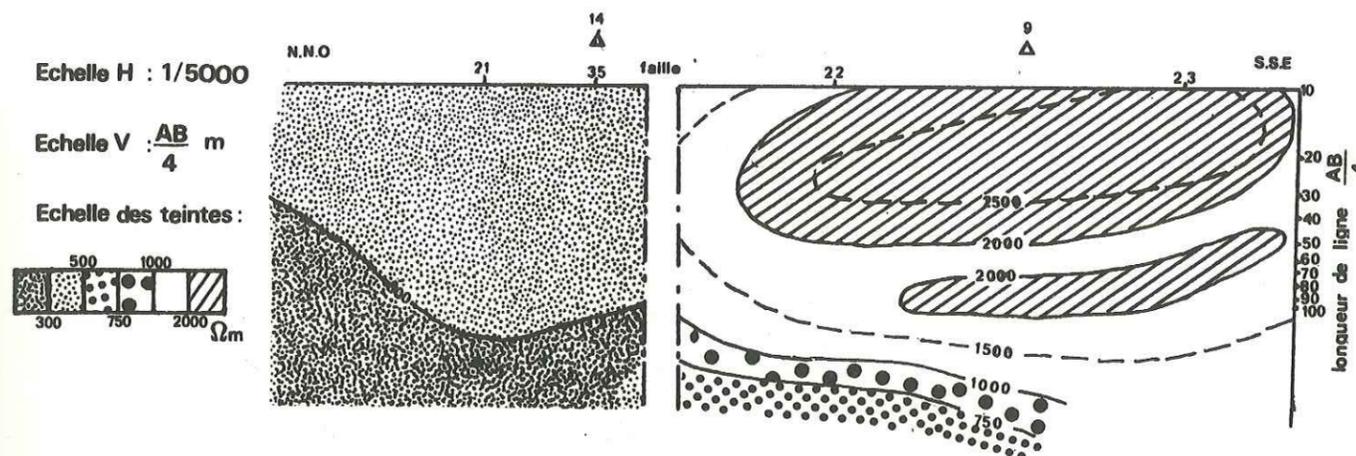
Horizons électriques en ohm. mètre	Nature probable des terrains correspondants
Classe 3 : 25 - 500	Argiles gypseuses triasiques Zones broyées ou karstifiées Bathonien et Dogger marneux
Classe 2 : 500 - 1.000	Bathonien supérieur sain calcaréo-marneux Dolomies argilisées Portlandien bréchiqye
Classe 1 : 1.000 - 1.500	Portlandien peu fissuré ou oolithique Dolomies néojurassiques fracturées ou fissurées Dolomies hettangiennes
Classe 0 : 2.000 et au-dessus	Dolomies néojurassiques saines et Bathonien supérieur calcaire

Ainsi, deux sortes de documents reflètent le profil en profondeur des différentes formations. " Les coupes des résistivités apparentes " traduisent des plages d'isorésistivité tandis que " les profils des résistivités apparentes " représentent une coupe au niveau de la future galerie.

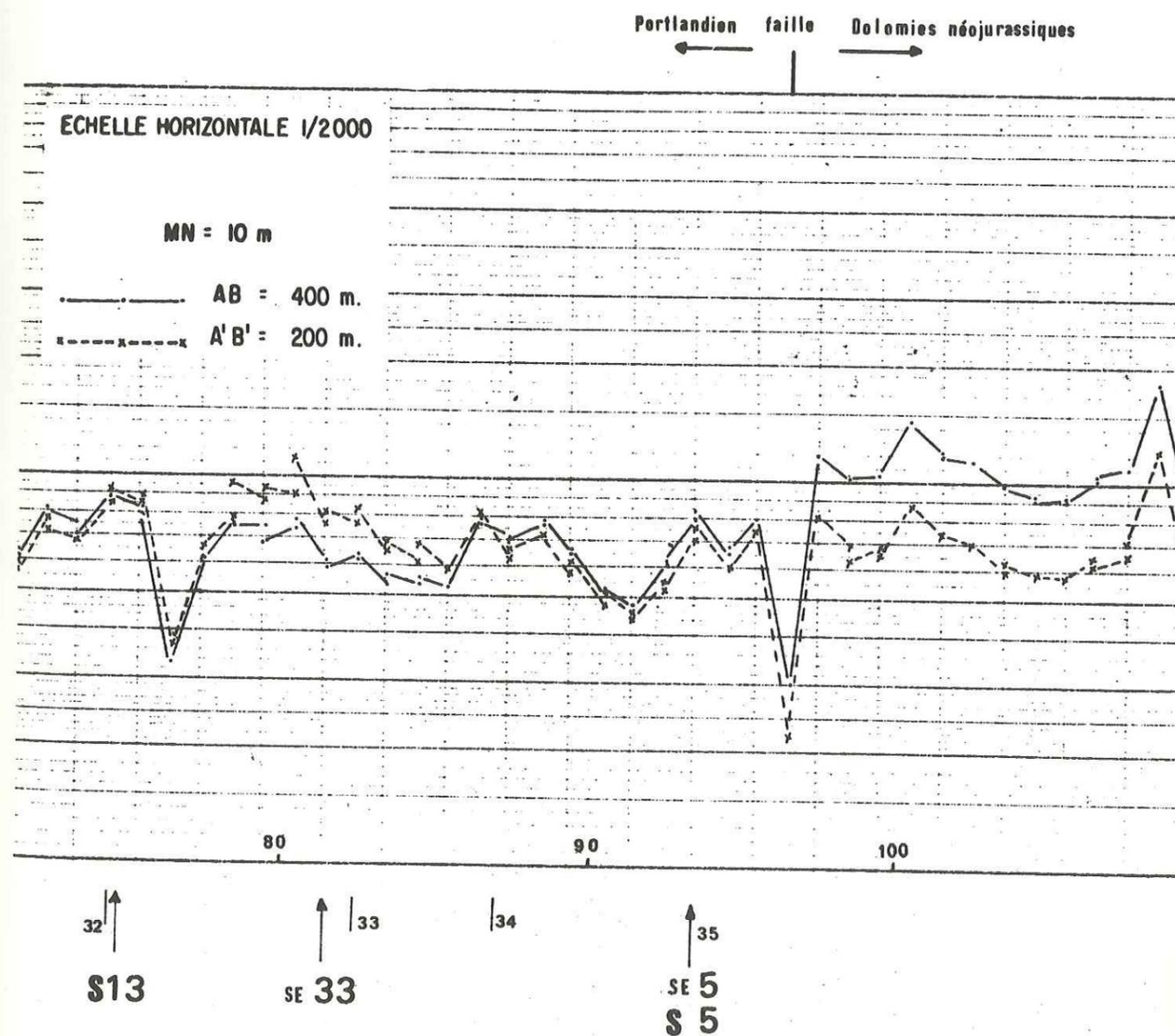
L'interprétation de tous ces résultats doit permettre de déterminer la nature et les qualités des différents horizons qui seront recoupés par l'ouvrage. Trois principaux objectifs ont été poursuivis, la détection des failles et des zones broyées, la précision des contacts géologiques en profondeur et principalement la détermination du toit des marnes et des calcaires marneux du Jurassique moyen, le repérage des karsts et des zones karstiques.

EXEMPLES DE REPRESENTATION EN PROSPECTION ELECTRIQUE

COUPE DES RESISTIVITES APPARENTES Fig. 34



PROFILS DES RESISTIVITES APPARENTES



En anticipant un peu sur l'étude après travaux, on peut se féliciter de la bonne précision des résultats en notant toutefois l'échec relatif dans le domaine de la détection des zones karstiques. Effectivement, la méthode de prospection électrique, si elle n'a pas détecté les karsts, a le plus souvent mentionné ces zones comme étant très faillées donc favorables à la formation de vides.

1.2. - Méthodes utilisées

A partir de toutes les données ainsi collectées, la S.C.P. a proposé aux entreprises des profils prévisionnels avant travaux de la galerie (Fig. 36). Ces profils rendent compte de la géologie : terrains rencontrés, pendage des couches, grandes fractures.

Le levé avant travaux est un rapport précis qui pour autant ne fait pas intervenir un certain nombre de facteurs de portée plus générale.

Par exemple, pour la galerie de Var III, on avait redouté, dans l'étude générale, une karstification sous forme de cavités restreintes et assez généralisées sur l'ensemble des formations traversées. Ceci, tout en étant mentionné dans l'appel d'offres, ne figure pas sur le profil prévisionnel, tout comme les problèmes soulevés par l'hydrogéologie ou la fissuration.

1.3. - Document proposé

Un document d'ordre plus général, recouvrant l'ensemble des risques potentiels dus au creusement de la galerie, a été défini. Il est destiné à compléter l'étude prévisionnelle et à renseigner de façon claire l'entreprise. Le levé avant travaux, plus précis, reste un complément de cette "carte des risques".

Le document prévisionnel proposé présente deux aspects :

- Une carte sur laquelle figurent les zones susceptibles de poser des problèmes lors du creusement. Elles sont définies essentiellement en fonction de la nature du terrain rencontré (exemple : favorable pour les calcaires du Bathonien supérieur ; moyenne pour les dolomies qui peuvent présenter des phénomènes karstiques), de la présence d'accidents tectoniques (exemple : difficile pour les zones très fissurées ; très difficile pour le passage des grandes failles). Cette carte, relative à l'ensemble de la galerie, est un document très simple mais significatif quant à la localisation et la direction des zones pouvant présenter des difficultés pour l'entreprise.

- Un profil prévisionnel où se retrouvent tous les caractères géotechniques susceptibles de renseigner l'entrepreneur. Ce profil, élaboré par C. Choquet (1972) pour la galerie de Toulon-Est, est le complément indispensable de la carte prévisionnelle. Il fait état à la fois des observations de terrain, des essais mécaniques, des campagnes de géophysique et de l'hydrogéologie.

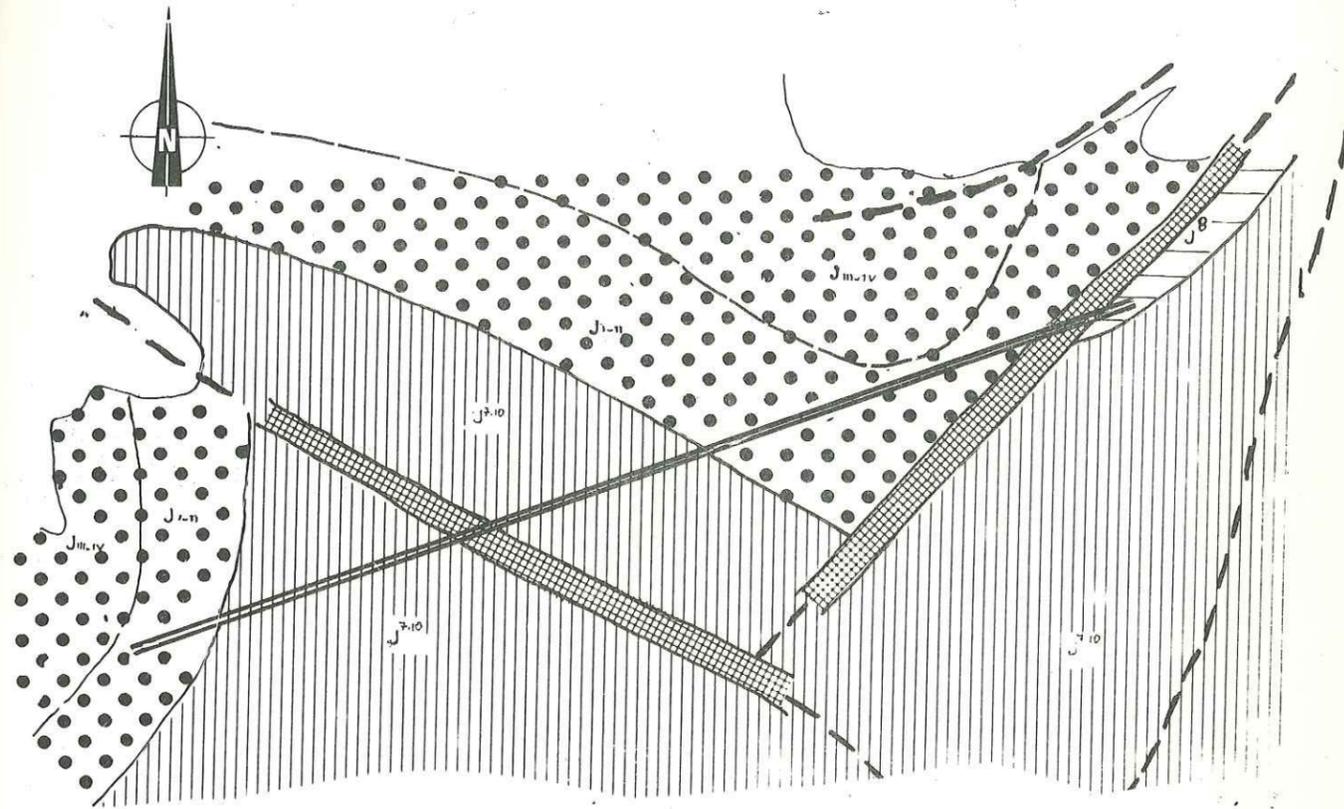
On peut donc conclure par un profil géotechnique qui permet d'avoir une estimation sur les soutènements à prévoir.

EXEMPLE DE DOCUMENT PREVISIONNEL

(DU PK 6.750 AU PK 9.750)

Fig.35

Carte et profil prévisionnels à la côte 300



Légende

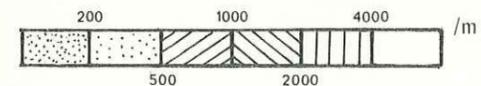
GÉOLOGIE

- Portlandien
- Dolomies néojurassiques
- « Bathonien supérieur »
- « Dogger »
- Faille

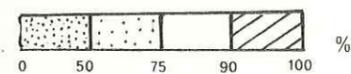
GÉOTECHNIQUE

- Favorable
- Moyenne
- Difficile
- Très difficile

RESISTIVITES VRAIES



R. O. D.



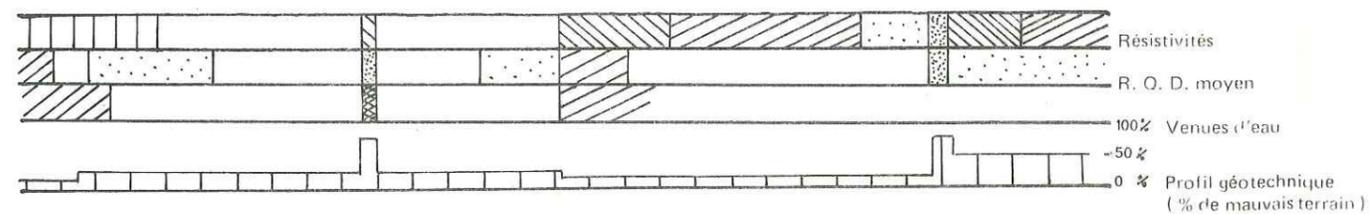
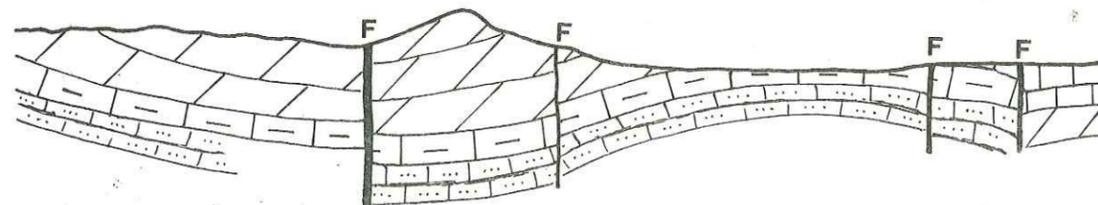
VENUES D'EAU

- Débits élevés
- Ruissellement diffus
- Venues localisées (écoulements karstiques)

Echelle 1/20 000e

N. NW

S. SE



2 - ETUDE APRES TRAVAUX

Ce levé intéresse les galeries de Montrieux et de Valaury depuis le moulin du Gapeau (PK 0) à l'attaque des Baux Rouges (PK 13.455) .

2.1. - Galerie de Montrieux : PK 0 au PK 6.750

- Du PK 0 au PK 920 :

La galerie ainsi qu'il était prévu traverse un contact chevauchant souligné par des zones gypseuses veinées d'argile noire jusqu'au PK 0.180 environ . Vient ensuite des calcaires et des dolomies d'âge jurassique jusqu'au PK 0.920 .

Cette zone montre une fracturation due à la proximité du chevauchement qui a entraîné la pose de soutènements mais correspond dans l'ensemble aux prévisions .

La tenue reste bonne même au passage de petites cavités karstiques vides ou bourrées d'argile initialement prévues dans cette zone et rencontrées entre les PK 0.800 et 1.000 . Au PK 0.920 , est traversée une zone broyée correspondant aux fractures prévues au voisinage du sondage S 5 et que l'on rencontre avec un certain décalage .

Ce dernier est dû non pas à une erreur de prévision mais à une modification des axes de galerie en cours de creusement , laquelle a eu pour conséquence une modification de la position d'ensemble par rapport aux structures géologiques . Ce phénomène sera rencontré au long du tracé et nous n'y reviendrons donc pas .

- Du PK 0.920 au PK 3.650 :

La galerie , ainsi qu'il était prévu , suit le contact entre dolomies néojurassiques et calcaires marneux noirs du Bathonien .

Notons que ce contact est souligné par un niveau de dolomies grises saccharoides et de grès verts à la base de l'ensemble néojurassique .

Les fractures rencontrées montrent fréquemment des remplissages d'argile mais le soutènement reste peu fréquent et la tenue des terrains est bonne .

Il était redouté dans cette zone de fortes venues d'eau sous pression . Cette estimation s'est avérée pessimiste . Les circulations dans cette zone se font dans des chenaux creusés le long de directions de fractures agrandies par dissolution , mais en dehors de ces zones le rocher est parfaitement sec . L'intercommunication entre chenaux semble dans le cas présent mauvaise et il n'était donc pas possible de parler de véritable nappe d'eau .

De ce fait , alors que la zone voisine du piézomètre S 7 était redoutée , il ne s'est produit en fait , lors du percement , qu'une venue d'eau importante certes mais de courte durée au passage d'un conduit karstique . Le phénomène est assimilable à la vidange d'un petit réservoir isolé .

Nous pouvons donc considérer que , dans cette zone , les conditions hydrogéologiques réelles ont été nettement plus favorables que ne le prévoient les études préliminaires .

- Du PK 3.650 à PK 4.500 :

Dans cette zone, la galerie reste au contact entre les dolomies néojurassiques et les calcaires du Bathonien, le passage entre les deux formations s'effectuant par des fractures plus ou moins argileuses.

La tenue reste bonne sauf lors du franchissement de coupes argileuses. Les fractures importantes ont été rencontrées avec une bonne précision, seules de petites fractures annexes, qui ne pouvaient être repérées lors des reconnaissances, ont été recoupées entre les PK 3.400 et 3.700.

Il avait été indiqué au voisinage du sondage S 6 une zone karstifiée dans les dolomies néojurassiques, zone où des venues d'eau étaient donc à craindre, d'autant qu'en surface une topographie en creux rendait favorable la concentration d'eau en ce point. Fort heureusement, la galerie s'est plus ou moins trouvée dans les calcaires marneux du Bathonien moins karstifiés, les venues d'eau ont donc été réduites.

La présence de karsts s'est par contre manifestée par des remplissages d'argile de décalcification dont l'importance entre les PK 3.825 et 3.900 ont nécessité un soutènement. Il est à noter que ces phénomènes avaient été signalés du fait de l'altération importante des dolomies sus-jacentes.

- Du PK 4.500 au PK 6.750

La galerie aborde un synclinal bien marqué qui la fait pénétrer nettement dans les dolomies néojurassiques jusqu'au PK 6.000 environ. Les dolomies ne sont pas altérées et hormis au passage de fractures, d'ailleurs prévues, n'ont demandé aucun soutènement.

Au-delà, la galerie aborde un anticlinal de calcaires marneux du 'Bathonien' et de calcaires marneux et marnes du 'Dogger' difficilement différenciables sinon par une augmentation de l'importance des interlits marneux dans le 'Dogger'.

La tenue de cette zone est excellente et les différences par rapport à la coupe prévisionnelle sont purement formelles. Elles sont en fait dues, comme nous l'avons signalé, à des différences entre le tracé initialement prévu et celui réalisé, dans ce cas particulier la longueur de la fenêtre de Vigne Fère ayant été modifiée à la réalisation, il s'ensuit un décalage dans l'axe de la galerie.

2.2. - Galerie de Valaury : PK 6.750 au PK 13.455

- Du PK 6.750 au PK 8.390 :

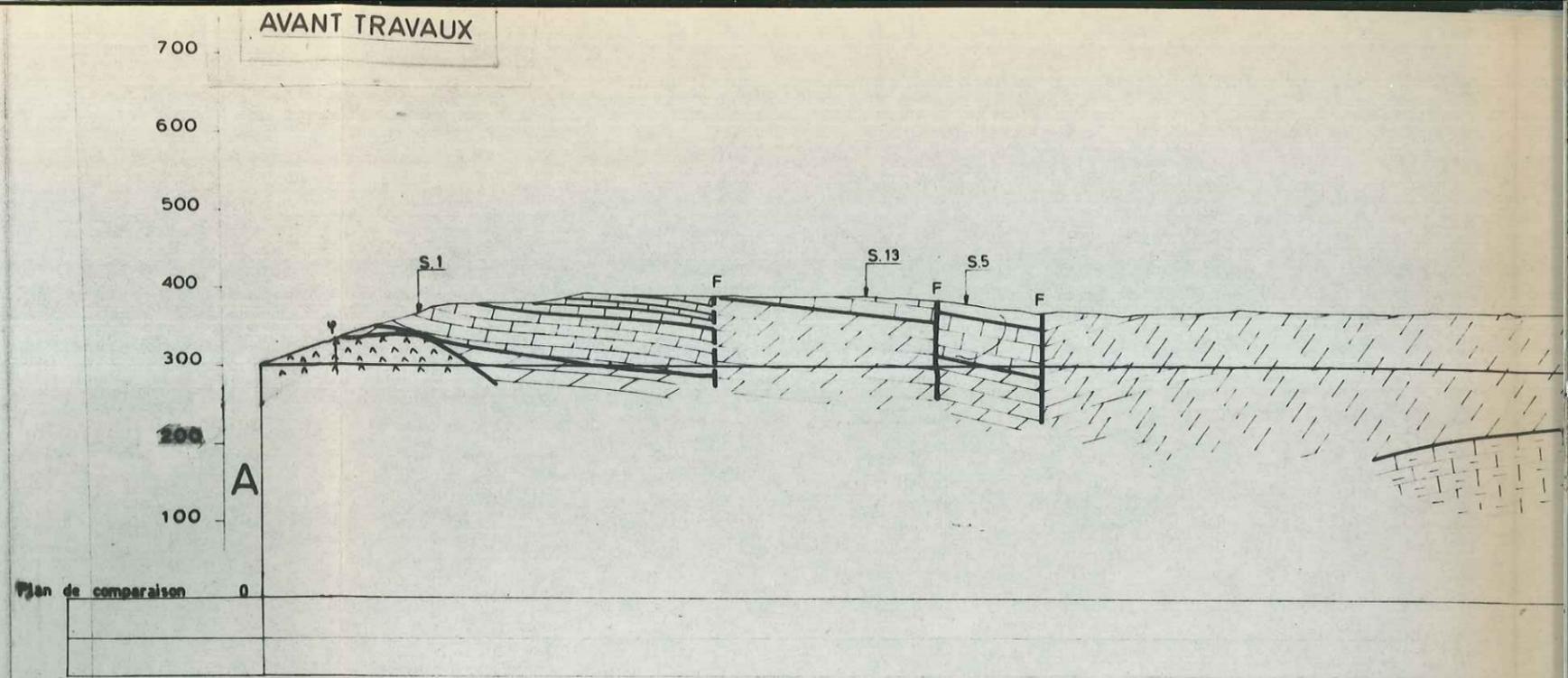
La galerie traverse une vaste structure synclinale dans les dolomies néojurassiques. Cette disposition avait été correctement prévue, mais, comme nous l'avons signalé, les modifications dans le tracé ont entraîné des décalages dans la géométrie de la coupe.

Jusqu'au PK 6.850, la galerie se situe dans des calcaires marneux du Bathonien de bonne tenue et passe ensuite jusqu'au PK 8.275 à des dolomies néojurassiques pour revenir enfin à des calcaires bathoniens au voisinage du PK 8.310 (au niveau du Karst du PM 1600 - attaque C).

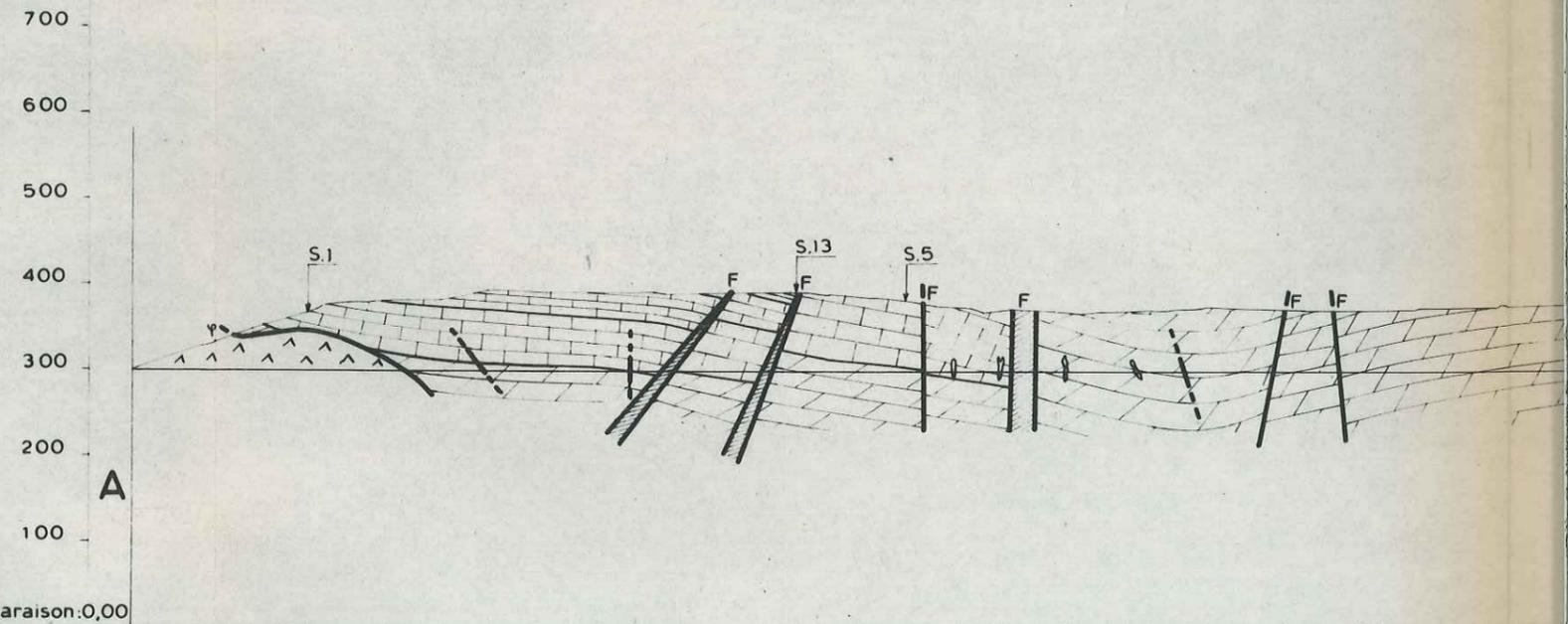
BRANCHE DU VAR III
ET DE TOULON-EST
GALERIES DE MONTRIEUX
ET DE VALAURY
(Attaques A et B)

PROFIL EN LONG GEOLOGIQUE

Avant travaux
Après travaux



APRES TRAVAUX



LEGENDE

-  Valanginien (Calcaires et interbancs marneux)
-  Portlandien (calcaires)
-  Dolomies néojurassiques
-  Bathonien supérieur (calcaires)
-  Dogger (calcaires marneux et marnes)
-  Hettangien (Dolomies)
-  Trias (gypses, marnes, calcaires en plaquette)
-  Faille majeure avec brèche
-  Faille
-  Chevauchement faille inclinée
-  Sondage
-  Vide karstique

Plan de comparaison : 0,00

PK.	Pendage Couches	Pendage Fractures	Remarques	Cintres
32				
75				
150				
180				
200				
220				
267				
440				
465				
510				
600				
630				
665				
635				
780				
830				
810				
880				
920				
950				
1000				
1018				
1045				
1075				
1115				
1160				
1210				
1250				
1290				
1320				
1400				
1430				

FENETRE

schistosité N 137.
zone broyée. Prédominance d'éléments en amygdales.
gîte noire et rosée

Bourrage d'argile noire sur 20m avec brèche.
Zone de brèche à éléments calcaires et à pâte gris-noir

Pseudo brèche avec argile.

Zone broyée avec argile et éléments en amygdales.
Zone broyée avec argile et éléments en amygdales.

Zone broyée avec argile, jaunes, ocre, verdâtre et pseudo-brèche

Prédominance des fissures N 110.
W 60, colmatage argileux avec trous karstiques

Zone broyée avec argile multicolore

Calcaire très veiné et passées argileuses et sableuses de type karstique

Trou karstique avec de l'argile

Zone broyée avec trous karstiques, argile et galets en amygdale brèche dolomitique à ciment rose

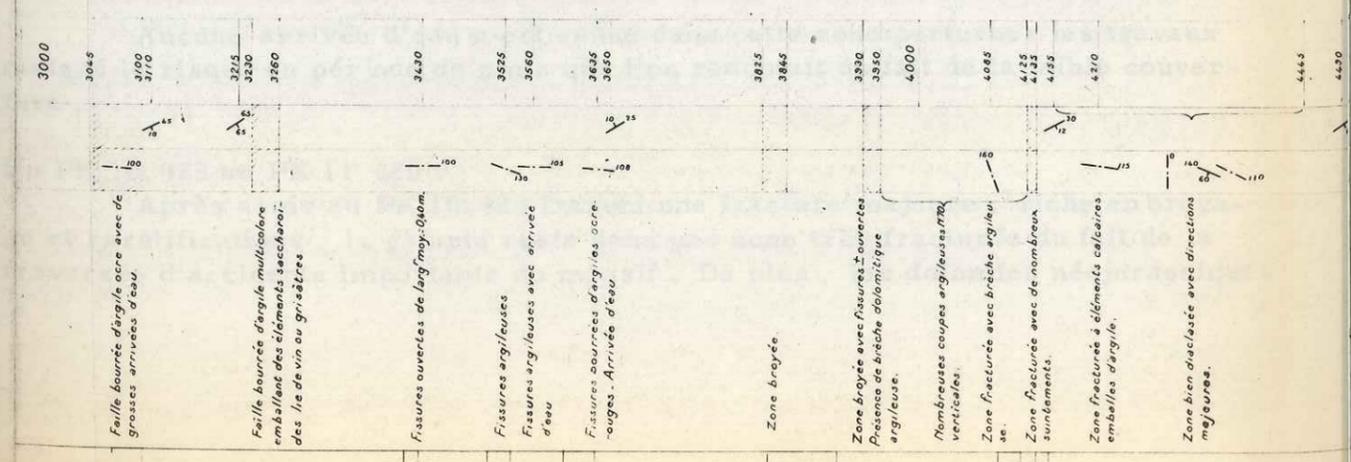
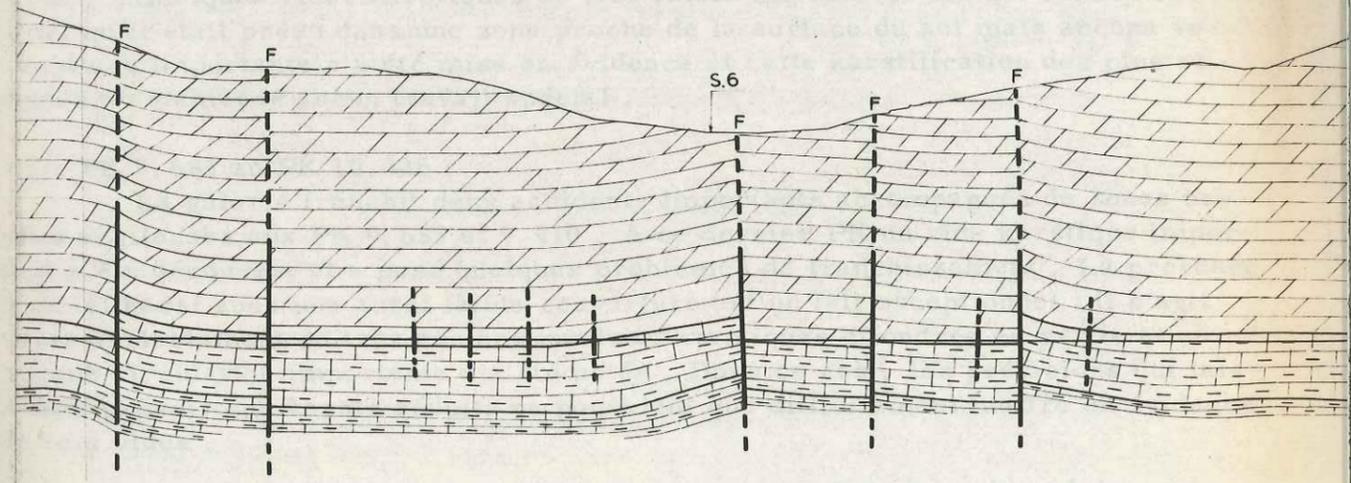
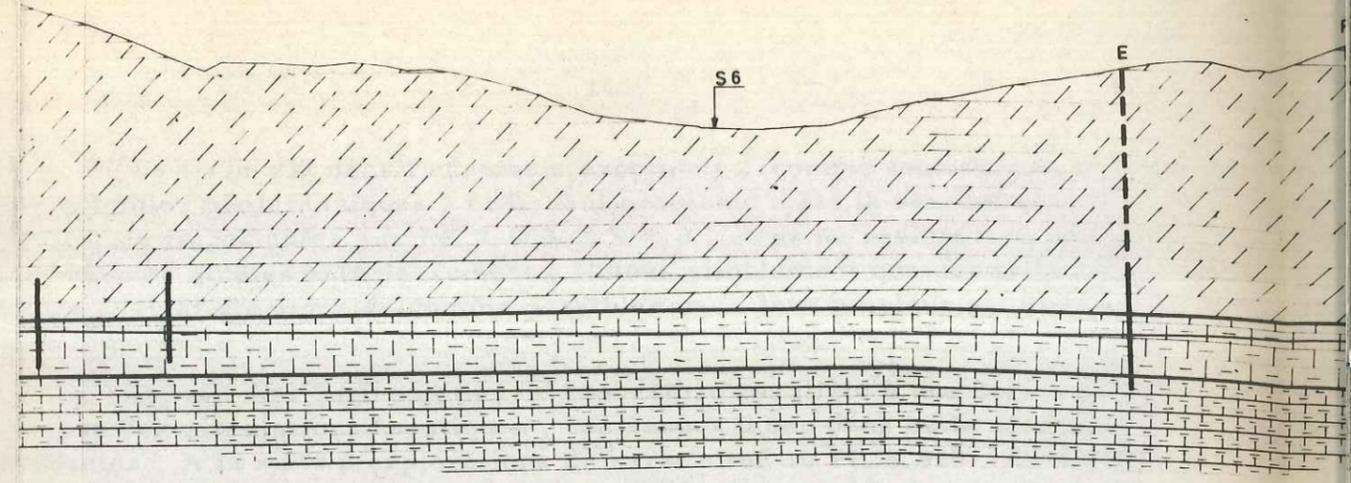
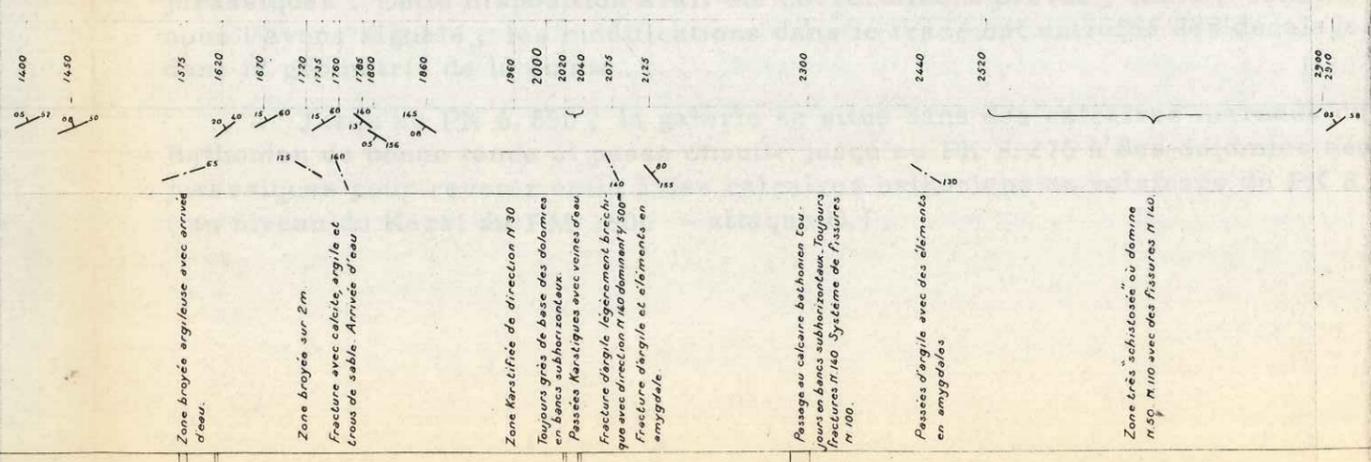
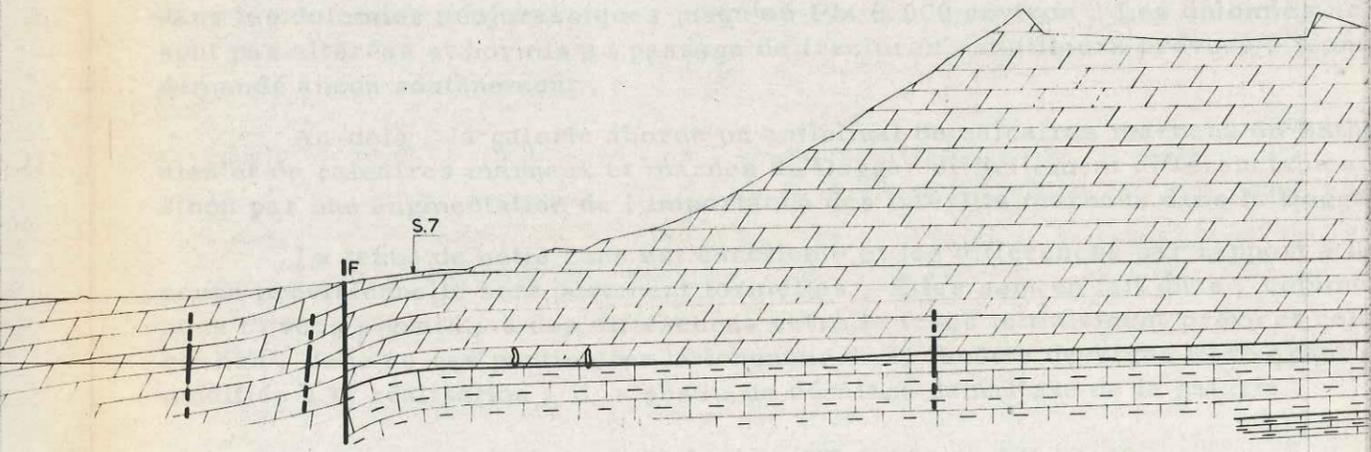
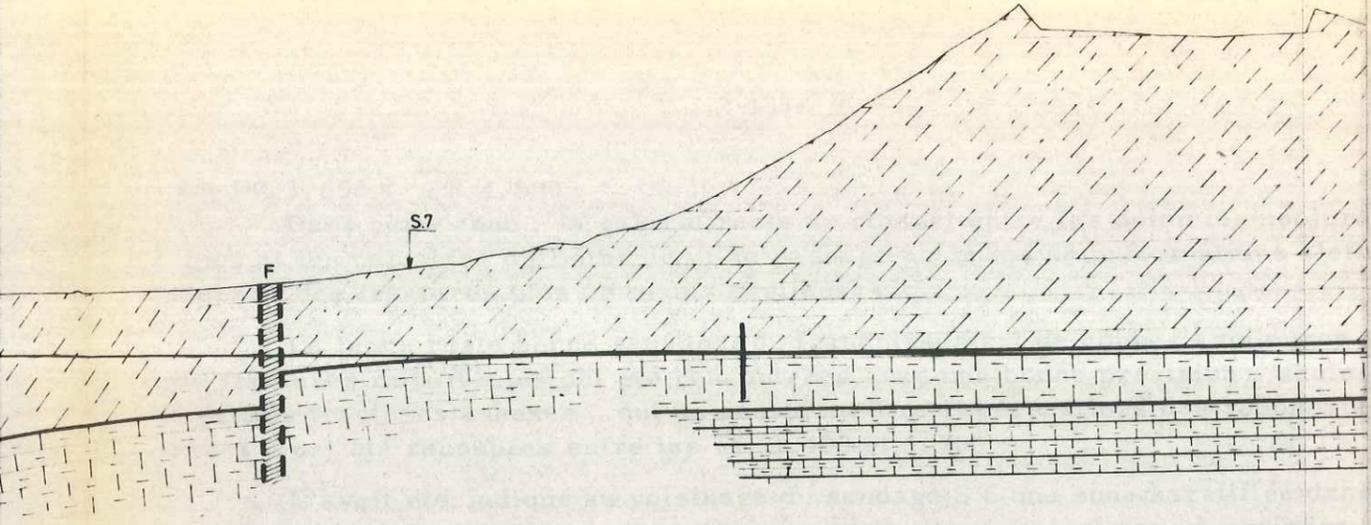
Passée karstique

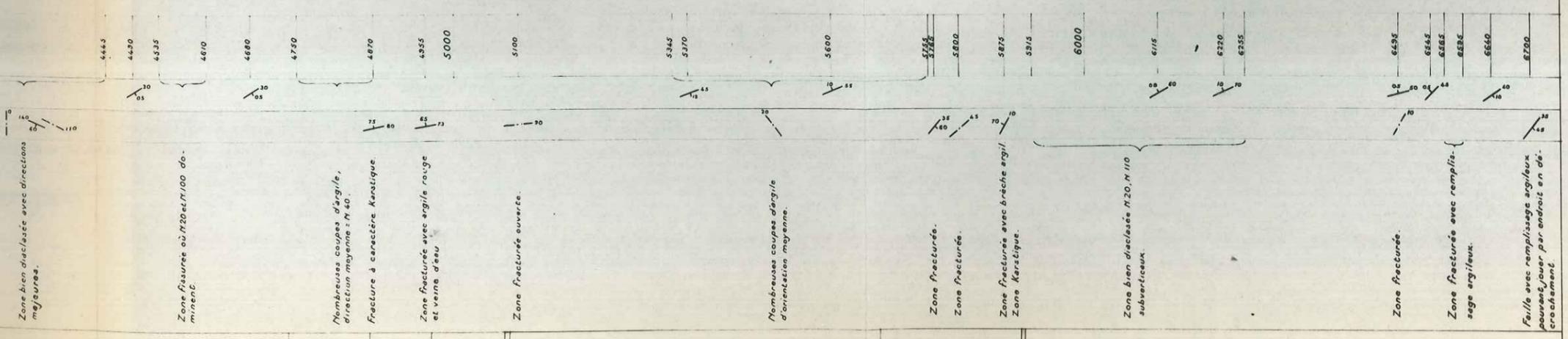
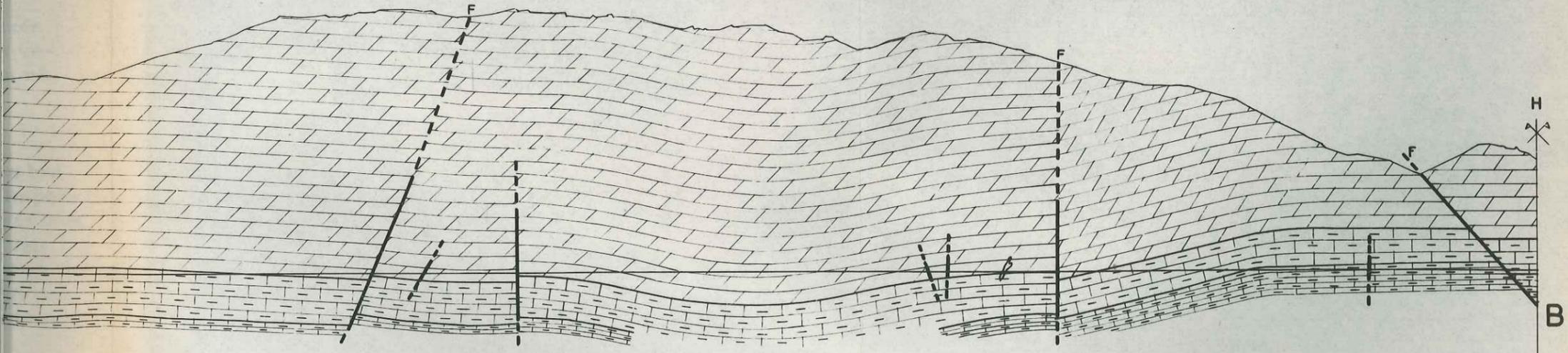
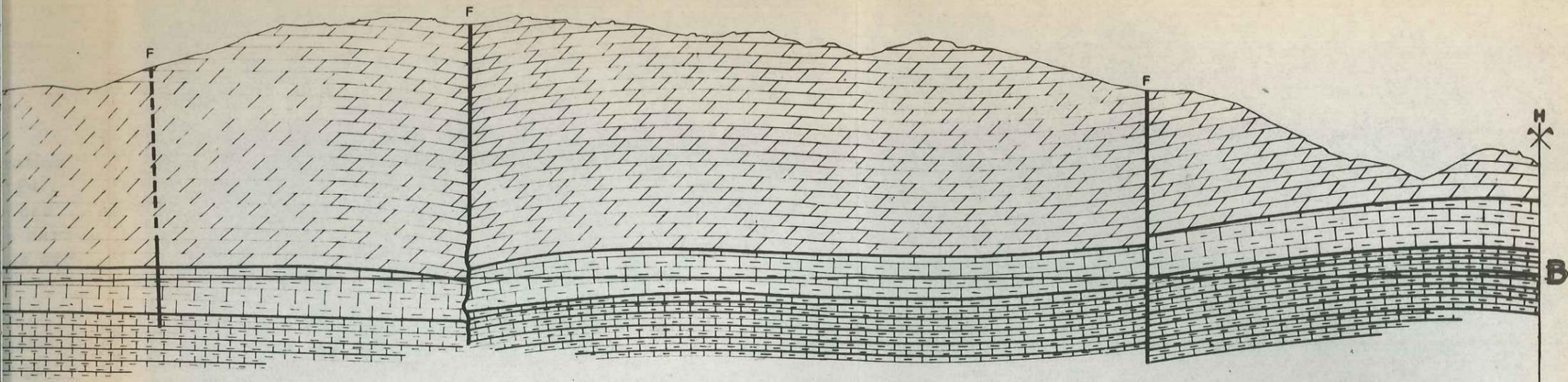
Passée karstique

Zone broyée, bréchique avec argile

Zone bréchique prononcée, éléments anguleux de dolomie emballés dans la gîte multicolore avec calcite.

Zone broyée et bréchique Argile multicolore





La tenue est dans l'ensemble excellente, compte tenu du peu d'altération des dolomies néojurassiques, et le seul problème a été la rencontre de cavités karstiques importantes aux PK 7.800 et 8.310. Nous ne reviendrons pas sur ces phénomènes étudiés antérieurement, Notons simplement que des phénomènes karstiques avaient été signalés comme possibles mais leur ampleur est dans le cas présent importante.

Du fait de l'augmentation de couverture parallèle à une baisse du niveau de base des circulations karstiques, les venues d'eau dans cette zone sont insignifiantes. A la suite d'explorations du karst situé au PK 8.320, nous avons pu mettre en évidence un plan d'eau situé à environ 120 m sous le niveau de la galerie, lequel alimente plusieurs sources de la vallée du Gapeau à la faveur d'une fracture agrandie par dissolution et effondrements.

- Du PK 8.390 au PK 9.685 :

Après avoir franchi une fracture, la galerie aborde au PK 8.460 les calcaires marneux noirs du "Bathonien", puis à partir du PK 8.800 environ les calcaires et marnes du "Dogger".

La tenue de ces différents terrains est bonne, mais du fait de leur nature marneuse, ils présentent des phénomènes de décompression amenant postérieurement au creusement quelques écaillages. Ce phénomène est sensible dans les zones fracturées.

Quelques vides karstiques de très faible importance ont été rencontrés ainsi qu'il était prévu dans une zone proche de la surface du sol mais aucune venue d'eau importante n'a été mise en évidence et cette karstification des plus réduites n'a demandé aucun travail spécial.

- Du PK 9.685 au PK 10.925 :

La galerie franchit deux accidents importants accompagnés de zones broyées argileuses aux PK 9.685 et 9.910. A ce dernier PK un vide karstique important a été découvert et a posé quelques problèmes de franchissement. La présence d'un tel karst sous une aussi faible couverture est un fait exceptionnel; il s'agit vraisemblablement de très anciens conduits karstiques effondrés en partie et où aucune circulation importante n'a été notée. Dans ce cas, les prévisions qui laissaient prévoir des karsts réduits ne pouvaient que difficilement mettre en évidence de tels vides.

La galerie se trouve par ailleurs au contact entre dolomies néojurassiques et calcaires portlandiens, tous deux de bonne tenue hors de zones réduites où quelques karsts bourrés d'argile ont été découverts.

Aucune arrivée d'eau n'est venue dans cette zone perturber les travaux malgré le risque en période de pluie que l'on redoutait du fait de la faible couverture.

Du PK 10.925 au PK 11.620 :

Après avoir au PK 10.925 franchi une fracture majeure, riche en broyage et karstifications, la galerie reste dans une zone très fracturée du fait de la traversée d'accidents importants du massif. De plus, les dolomies néojurassiques

traversées étant sensibles à l'altération, la tenue entre les PK 10.925 et 11.300 a été faible dans l'ensemble.

- Du PK 11.620 au PK 12.400 :

La galerie a, dans cette zone, rencontré des difficultés liées à une fracturation importante. Il existe, et ceci était d'ailleurs prévu, une fracture importante dont l'axe correspond approximativement à l'axe de la galerie. Initialement, cette fracture devait se situer hors de la zone de travaux, mais par suite de son pendage difficile à estimer au stade de l'étude, elle s'est trouvée en fait dans l'axe même de la galerie. Les autres fractures sont secondaires vis-à-vis de cet accident principal.

Cette fracture met en contact soit les calcaires marneux noirs du "Bathonien", soit les calcaires et marnes du "Dogger" avec des dolomies hettangiennes. Cet accident d'autre part montrant une zone ouverte ou bourrée d'argile de 1 m ou plus de puissance, la tenue a été mauvaise en particulier entre les PK 12.000 et 12.400.

Il a d'ailleurs été décidé en cours de creusement un changement d'axe afin de sortir de la zone fracturée et de ce fait, nous l'avons vu, la tenue en amont du PK 11.620 est nettement meilleure.

- Du PK 12.400 au PK 13.455 :

La galerie se situe intégralement dans les calcaires et marnes du "Dogger" d'excellente tenue hors de zones fracturées entre les PK 12.520 et 12.620 puis entre les PK 12.690 et 12.805.

Le "karst" rencontré au PK 12.520 (PM 800 aval) correspond en fait plus à un effondrement de strates lié aux fractures voisines du point K qu'à une cavité de dissolution.

Il n'existe aucune venue d'eau dans cette zone.

2.3. - Conclusions

- Galerie de Montrieux :

Les points suivants sont à noter :

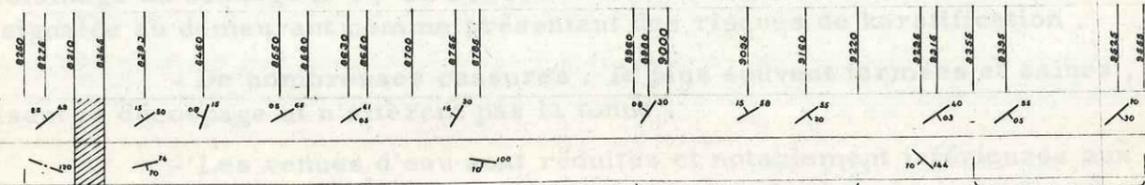
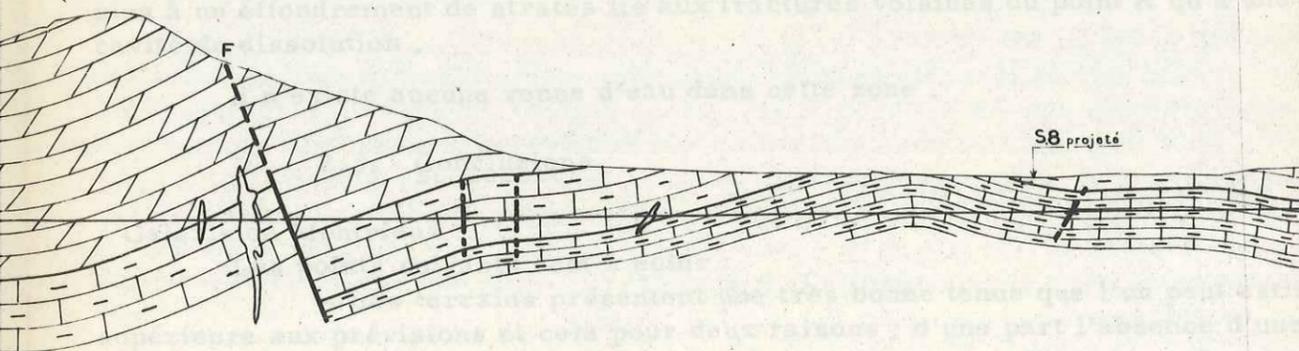
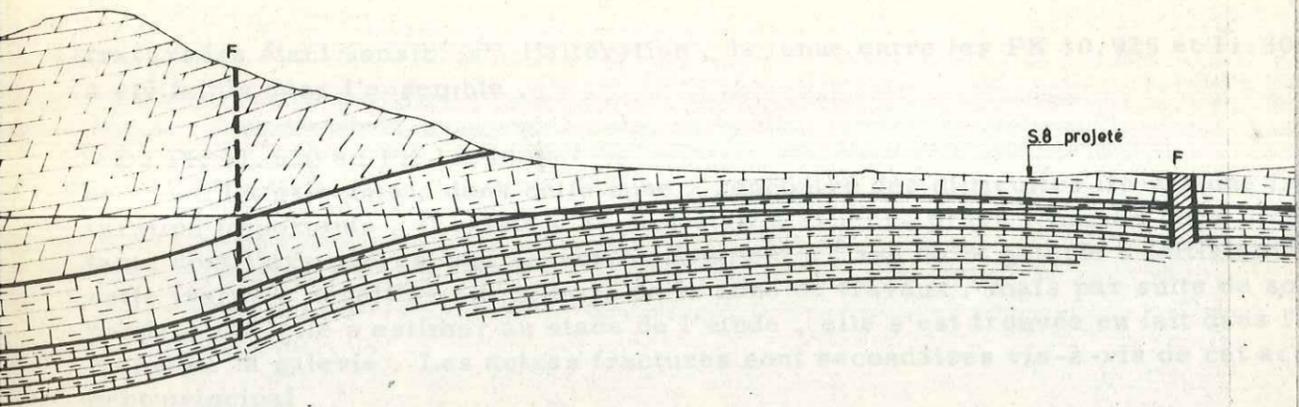
- Les terrains présentent une très bonne tenue que l'on peut estimer supérieure aux prévisions et cela pour deux raisons : d'une part l'absence d'une nappe de fissures généralisées et d'autre part le fait que les dolomies soient peu ou pas altérées.

- Une seule zone broyée, argileuse et de mauvaise tenue se situe au voisinage du sondage S 6, du PK 3.400 au PK 4.150 environ. Cette zone avait été signalée au demeurant comme présentant des risques de karstification.

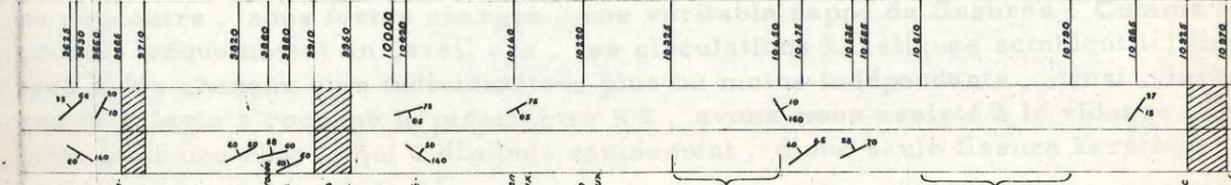
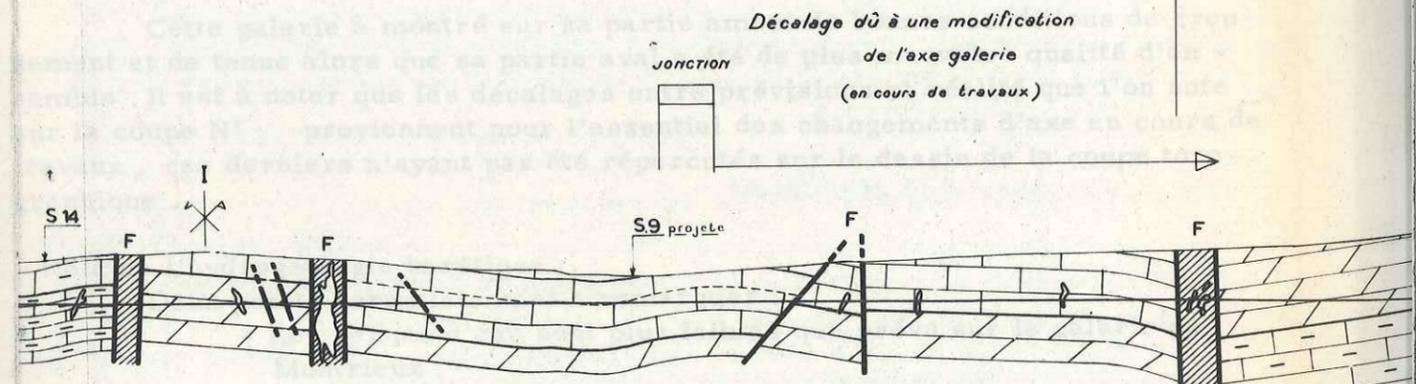
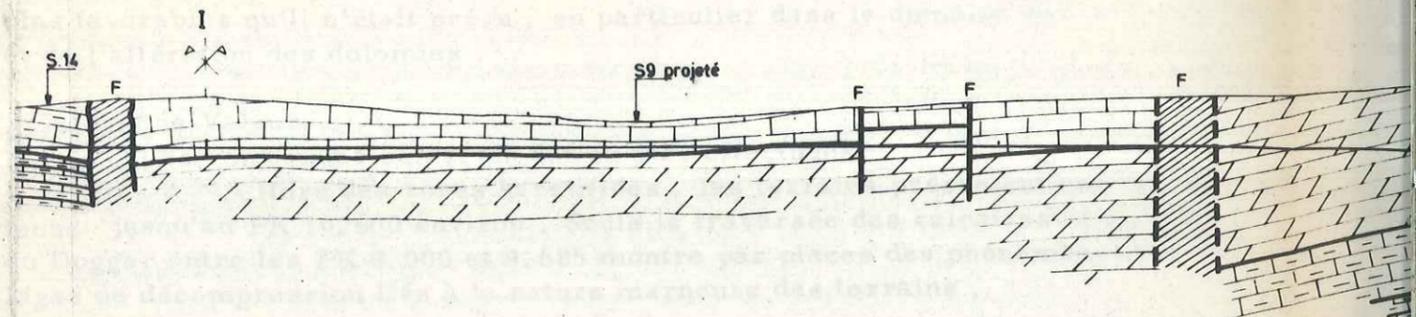
- De nombreuses cassures, le plus souvent fermées et saines, favorisent le découpage et n'altèrent pas la tenue.

- Les venues d'eau sont réduites et notablement inférieures aux prévisions, phénomène sur lequel il sera nécessaire de revenir.

- La précision des contacts de terrain prévus initialement est bonne.



Fracture karstique
 Cavités karstiques très importantes.
 Faille soulignée par un joint d'argile multicolore metant en contact les calcaires du Bathonien aux dolomies néojurassiques.
 Fracture présentant un épais bourrage argileux.
 Fracture argileuse
 Zone bien diacléée où N 40 subvertical domine.
 Fracture karstique.
 Zone très fissurée avec de nombreux pieçages d'argile.
 Fracture avec placage d'argile et brèche argileuse
 Zone bien diacléée.



Fissure karstique.
 Zone broyée présentant de nombreuses fractures argileuses.
 Zone à fractures karstiques.
 Fracture à brèche obolomique à pâte argileuse avec des brèches karstiques dans les calcaires Portlandiens entre 2 fractures de direction moyenne N 60 subverticale.
 Zone d'argile multicolore avec brèches argileuses.
 Changement de faciès du Portlandien qui devient vert foncé et plus gresseux.
 Changement de faciès du Portlandien qui devient vert foncé et plus gresseux.
 Calcaires blancs diacléés avec de nombreuses coupes d'argiles.
 Fracture avec brèche argileuse.
 Zone karstique
 Zone bréchique avec argiles.
 Passac karstique très argileuse.
 Nombreuses coupes d'argile de direction moyenne N 40.
 Zone ka-sifée.
 Zone bréchée argileuse avec des passées karstiques.
 Zone diacléée avec de nombreuses coupes d'argile.

Profil modifié le 26-07-14

Décalage dû à une modification de l'axe galerie (en cours de travaux)

Cette galerie a , dans l'ensemble , montré des conditions de réalisation plus favorables qu'il n'était prévu , en particulier dans le domaine des venues d'eau et de l'altération des dolomies .

- Galerie de Valaury :

Les remarques suivantes ont pu être effectuées :

- Hors des zones karstifiées , les terrains présentent une bonne tenue jusqu'au PK 10.600 environ . Seule la traversée des calcaires et marnes du Dogger entre les PK 9.000 et 9.685 montre par places des phénomènes d'écaillage de décompression liés à la nature marneuse des terrains .

- Entre les PK 10.925 et 12.400 , les terrains sont de mauvaise tenue . Pour l'essentiel , cette mauvaise tenue était prévue , seules des complications d'ordre géologique entre les PK 11.620 et 12.400 peuvent avoir entraîné une tenue plus médiocre que celle escomptée .

- Les terrains sont de bonne tenue dans l'ensemble entre les PK 12.400 et 13.455 , sauf dans les zones de fracture signalées lors de l'étude .

- Les coupes prévisionnelles présentent une bonne précision hors de la zone située entre les PK 11.620 et 12.400 en raison de la complexité de ce dernier secteur .

- Si les venues d'eau ont été faibles , il est à noter l'importance anormale de certains vides karstiques aux PK 8.310 et 9.910 , les autres karsts étant du domaine du prévisible .

Cette galerie a montré sur sa partie amont de bonnes conditions de creusement et de tenue alors que sa partie aval a été de plus mauvaise qualité d'ensemble . Il est à noter que les décalages entre prévisions et réalité que l'on note sur la coupe N° proviennent pour l'essentiel des changements d'axe en cours de travaux , ces derniers n'ayant pas été répercutés sur le dessin de la coupe topographique .

- Rôle de l'hydrogéologie karstique :

Deux points essentiels sont à remarquer :

- Les venues d'eau sont plus faibles que prévu sur la galerie de Montrieux .

- Sur la galerie de Valaury , les vides karstiques présentent une importance anormale .

Pour le premier point , il était redouté que la galerie , située sur le plan de ce que l'on peut considérer comme le niveau de base des circulations karstiques, ne rencontre , sous fortes charges , une véritable nappe de fissures . Comme il se produit fréquemment en pareil cas , les circulations karstiques semblent ici limitées à des chenaux bien individualisés plus ou moins indépendants . Ainsi , lorsque la galerie a recoupé le piézomètre S 7 , avons-nous assisté à la vidange complète sous une charge qui a diminué rapidement , d'une seule fissure karstique .

En ce qui concerne le second point, si la présence de petits karsts était redoutée, les cavités importantes n'auraient dû se situer que bien au-dessous du niveau de la galerie. Dans les différentes zones où ont été rencontrées les cavités le niveau de base des circulations est bas (120 m sous la galerie pour le karst du PK 8,310) et la couverture ne laissait présager qu'un bassin versant karstique réduit le plus souvent. Les vides karstiques de l'importance de ceux rencontrés sont vraisemblablement très anciens et donc difficilement prévisibles puisque hors de la logique des circulations actuelles.

III - APPLICATIONS AUX CARACTERISTIQUES DE L'OUVRAGE

1 - LA TENUE DES TERRAINS

L'étude préliminaire a permis de déterminer les caractéristiques géotechniques des différentes formations et la prospection électrique a cerné des zones de mauvaise tenue que l'on peut interpréter comme le passage d'une faille ou celui d'un karst. La transition d'une formation à l'autre est souvent caractérisée par des terrains de tenue médiocre.

Les sondages ont permis de connaître la densité de la fracturation par le R. Q. D. La nature du remplissage est également connue. L'ensemble de ces caractères facilite les prévisions sur le type de soutènement nécessaire à la traversée des zones suspectes.

2 - LE CALCUL DE REVETEMENT

Dans le calcul du revêtement d'un ouvrage souterrain, il est indispensable de connaître les contraintes auxquelles il sera soumis. Or, c'est la zone décomprimée qui entraîne des poussées sur le revêtement; il faut donc prévoir la forme et l'étendue de celle-ci. Son profil peut être dessiné à partir des vitesses longitudinales proposées par la campagne de microsismique.

Sur l'ensemble d'une galerie telle que Var III, les sondages, en donnant le R. Q. D. et le module d'élasticité E, permettent de définir un terrain. Il est donc possible, lors du percement, de reconnaître une formation par analogie avec ces caractères déjà étudiés depuis la surface.

3 - LA PREVISION DES INJECTIONS

Plusieurs sortes d'injections terminent les travaux d'édification d'une galerie :

- Les injections de bourrage, constituées de béton, complétant les zones où le revêtement est défectueux.

- Les injections de collage sont des coulis de ciment facilitant le contact du béton avec le rocher.
- Les injections de traitement de terrain améliorent la qualité mécanique de la roche. Ce sont ces injections qui sont directement intéressées par l'étude préliminaire et essentiellement par la campagne de microsismique.

La connaissance de E permet de définir la qualité mécanique du rocher et donc de prévoir le mode des injections de traitement. On effectue :

- soit des injections de coulis de ciment si la perméabilité le permet
- soit des injections de silicate dans le cas contraire. Les silicates pouvant se disperser très loin, il est bon d'évaluer l'étendue de la zone décomprimée afin de diminuer la pression d'injection et donc de réduire le cubage des silicates qui sont d'un coût élevé.

Les dernières injections effectuées avec un coulis de ciment peuvent contenir une proportion plus ou moins grande de silicates permettant une prise rapide. De ce fait, le coulis a une dispersion de moindre étendue.

4 - LES TRAVAUX EFFECTUES SUR LA GALERIE DE TOULON-EST

Compte tenu de la nature peu différente des terrains rencontrés lors du creusement de la galerie de Toulon-Est, aucune différenciation n'a été opérée lors du traitement de chaque formation.

Des injections de bourrage ont été effectuées dans ces calcaires et ces dolomies à raison d'un trou tous les cinq mètres en calotte, ceci afin de compléter le remplissage en béton de la voûte de la galerie.

Les injections de collage permettant de faire adhérer la voûte au rocher, se retrouvent suivant une auréole de quatre trous tous les deux mètres de galerie. La pression maximale de ces injections est de 5 bars alors que les injections de bourrage sont plus faibles.

Enfin, intervient le traitement des zones de mauvaises tenues par des coulis spéciaux, notamment aux silicates. Les caractéristiques de ces injections varient en fonction du problème posé par la zone concernée.

Il est à noter que l'on réduit les injections à 300 kg afin qu'il n'y ait pas une trop grande dispersion du coulis dans le terrain. Si cela est nécessaire, on recommence l'injection après avoir attendu la prise du premier jet.

IV - COMPORTEMENT DE LA GALERIE VIS-A-VIS DES VIBRATIONS

Une étude a été effectuée afin d'évaluer les risques (fissuration de l'ouvrage) occasionnés par des ondes de choc dues à une explosion ou éventuellement à un séisme. Ces essais ont été effectués en collaboration avec la marine nationale (D. C. A. N. Tourris) à partir d'un centre d'essais situé au Nord de Toulon.

1 - CRITERES DE SECURITE

La commission tirs de mines de l'A. F. T. E. S. (Association Française de Travaux en souterrains) recommande des vitesses particulières * admissibles variant dans de larges limites :

- 0,25 cm/s pour une construction de mauvaise qualité en mauvais terrain ,
- 7,5 cm/s pour des constructions d'excellente qualité sur terrain très dur .

De son côté , le U. S. Bureau of Mines admet une vitesse particulière de 5 cm/s .

Il convient de noter que ces valeurs sont données pour des constructions en infrastructures , en particulier des bâtiments , pour lesquels les vibrations peuvent entraîner des déformations importantes . Pour une galerie faisant corps avec le terrain environnant , la vitesse particulière admissible doit être supérieure .

2 - RESULTATS

Plusieurs essais ont été effectués . On peut en déduire que l'explosion d'une charge de 45 kg réalisée à 1,50 m au dessus du sol et à 850 m de la galerie, engendre des phénomènes vibratoires dont la vitesse particulière est inférieure à 0,02 mm/s .

3 - INTERPRETATION

Les résultats ainsi énoncés montrent que les tirs effectués ne mettent pas en danger la galerie . Même en admettant un seuil très bas et seulement égal à 1 cm/s , on obtient , dans le cas présent , une valeur de la vitesse particulière 500 fois plus faible .

4 - CRITIQUE

Plusieurs considérations sont à noter :

- L'extrapolation de ces résultats aux ondes sismiques semble très aléatoire . En effet , les dommages dus aux tremblements de terre sont fonction de l'accélération (le plus souvent peu supérieure à 0,2 g) alors que pour les vibrations dues aux tirs de mine , le terme caractéristique est la vitesse particulière . De nombreux tirs de mine donnent des accélérations supérieures à 1 g sans dégât .

* vitesse particulière = vitesse à laquelle une particule parcourt le trajet sinusoïdal relatif à une période . Elle dépend de l'amplitude et de la fréquence .

- Des études sur l'influence de la charge ont montré que c'est la quantité d'explosif par unité de mise à feu (par micro-retard) qui importe et non la charge totale mise en oeuvre .

- Le type de tir réalisé est aérien , puisque la charge est disposée à 1,50 m du sol .

Dans ces conditions , les vibrations transmises dans le terrain ne sont produites que par le souffle de l'explosion et sont , par conséquent , nettement plus faibles que si la charge avait été disposée dans un forage pratiqué dans le sol .

V - CONCLUSION

Après l'étude des caractères géologiques et hydrogéologiques du secteur , ce chapitre décrit quelques conséquences dues au percement de la galerie du Canal de Provence .

Deux sortes de prévisions sont à envisager :

- Les prévisions intéressant le projet , c'est-à-dire susceptibles d'éviter les grandes difficultés lors du dessin du tracé , aboutissent à l'élaboration du document dont le principal est le profil avant travaux qui tient compte des observations de terrain , des prospections électrique et gravimétrique ainsi que des campagnes de sondages .

- Les prévisions permettant de guider l'entreprise dans ses travaux de percement ou de revêtement sont basées sur le levé géologique avant et après travaux et sur l'étude microsismique en galerie .

Les résultats obtenus sur la galerie de Var III sont satisfaisants , car l'ensemble des prévisions s'est trouvé justifié . Ces prévisions se sont avérées pessimistes en ce qui concerne l'hydrogéologie , le régime des eaux souterraines paraissant exclure l'existence d'une nappe de fissures .

Seuls deux secteurs particuliers ont créé de sérieux problèmes . La découverte de très grandes cavités karstiques était insoupçonnable depuis la surface , mais il est à noter que trois sur quatre des grands karsts rencontrés avaient été signalés comme étant des zones de mauvaise tenue , grâce à la prospection électrique .

Dernier point de divergence entre les études avant et après travaux : la terminaison Sud de la galerie . Cette zone très fracturée a dû être contournée par les travaux , ce qui a entraîné une modification du tracé prévu .

On doit donc souligner la bonne concordance entre les observations faites sur le terrain et en galerie , ce qui permet des prévisions géotechniques valables .

CONCLUSION GENERALE

Au terme de ce travail, il est bon de rappeler quels en furent les points principaux et ce qu'ils apportent à la géologie régionale et générale.

LES BUTS RECHERCHES

Au départ, ce mémoire devait, à partir de levés après travaux, rendre compte de l'hydrogéologie du secteur. Compte tenu des nombreux résultats obtenus par la Société du Canal de Provence et de l'intérêt que présentent les nouvelles méthodes de géophysique ainsi que celles de la géologie appliquée aux travaux souterrains, nous avons préféré étendre le cadre de l'étude en présentant une discussion sur toutes ces méthodes. Leur application sur la galerie de Var III sert d'exemple et les résultats obtenus facilitent la compréhension des phénomènes géologiques du secteur étudié.

LES METHODES UTILISEES

Les difficultés susceptibles d'entraver le percement d'une galerie en pays karstique sont :

- Une mauvaise tenue des terrains rencontrés, notamment due à une densité de fracturation élevée ou à des remplissages argileux.
- La présence de grandes fractures.
- La présence d'eau.
- La présence de phénomènes karstiques de dimensions importantes.

L'analyse structurale est donc le point le plus important de l'étude géologique. Elle doit mettre en évidence la densité de la fracturation et les caractéristiques des grands accidents.

La connaissance de la position des zones favorables à la karstification découle très souvent de ces résultats qui sont également employés pour l'étude hydrogéologique.

Le levé avant travaux est le document récapitulatif de toutes les données prévisionnelles.

Les méthodes géophysiques permettent de détailler et de compléter les résultats obtenus par l'étude géologique.

Les campagnes de prospection électrique et de gravimétrie, adaptées à la détection des zones de faiblesse ou des vides, entrent dans le cadre des études préliminaires.

Ces méthodes doivent aboutir à une appréciation des caractères des terrains rencontrés et permettre de ce fait d'éviter les difficultés lors du creusement de la galerie .

L'étude microsismique qui intervient ultérieurement dans l'étude au même titre que le levé après travaux, donne les caractéristiques des terrains rencontrés .

LES RESULTATS OBTENUS SUR LE SECTEUR ETUDIE

Du Trias jusqu'à l'Urgonien , les terrains rencontrés sont essentiellement des dolomies et des calcaires formant un monoclinal à faible pendage vers le S-W.

L'étude géologique a donc été orientée préférentiellement vers l'analyse structurale . En effet , seuls quelques problèmes particuliers tels que la dolomitisation , la différenciation des faciès portlandien et urgonien complétée par leur étude en lames minces présentaient un intérêt pour l'étude géotechnique , tandis que l'analyse de la fracturation en représentait un élément fondamental .

Nous avons pu mettre en évidence deux directions majeures N 140 et N 45 jouant en décrochement conjugué , tandis que les orientations N 0 et N 90 venaient se greffer à ce modèle .

Ce sont des orientations privilégiées pour les circulations souterraines et la karstification . L'étude des formations perméables (méthode L. Kiraly , essais Lugeon) et des sources (méthode A. Mangin) , permet de comprendre l'hydrodynamique souterraine et de définir les caractères hydrogéologiques de chaque formation . L'étude des phénomènes karstiques confirme ces résultats qui peuvent se résumer en quelques mots . L'impluvium constitué par les dolomies néojurassiques est un aquifère poreux où les circulations s'effectuent le long de très minces fissures , à travers les pores des dolomies qui sont peu favorables à la formation de grandes cavités . Les calcaires du " Bathonien " sont fortement karstifiés et recèlent des salles de dimensions très importantes . A une échelle moindre , le " Dogger " présente une karstification de chenaux . L'âge de ces cavités est difficile à apprécier , mais , compte tenu d'indices topographiques et de la superficie du bassin versant , il semblerait qu'elles datent du Jurassique supérieur . Actuellement , une reprise d'activité de certaines galeries est à noter . Dans ces formations , l'eau se comporte comme dans un ruisseau et émerge lorsque la topographie ou la lithologie le permet . C'est ainsi qu'un bon nombre de sources sont situées dans le " Dogger " qui présente d'abondantes passées d'argile imperméable .

Lors du creusement de la galerie , ces caractères ont été vérifiés . Les venues d'eau correspondaient à des veines qui , en général , s'asséchaient rapidement , détruisant ainsi l'hypothèse d'une nappe de fissures préalablement envisagée . Malgré la précision du levé avant-travaux , certains de ces résultats divergent de la réalité .

La zone de Montrieux , par exemple , ne correspond pas à un grand chevauchement , mais à un réseau de failles inverses de pendage d'environ 70° S-E.

De même , les dimensions considérables des karsts rencontrés n'avaient pas été prévues , l'existence de telles cavités n'étant pas soupçonnée depuis la surface .

SYNTHESE

Les méthodes utilisées et les résultats obtenus sur le secteur étudié nous amènent à un certain nombre de réflexions .

Tout d'abord , il a été nécessaire d'adapter les méthodes aux problèmes bien particuliers présentés par le secteur étudié . Ainsi ce sont la géologie de surface et surtout l'analyse structurale qui ont permis de déterminer les caractéristiques hydrogéologiques des terrains rencontrés . Par contre , les résultats des essais Lugeon étendus à l'hydrogéologie n'apparaissent pas comme représentatifs de l'ensemble d'une formation , mais ces essais restent parfaitement valables pour l'étude géotechnique au niveau de la galerie .

Il est indéniable que l'étude géologique et plus précisément l'étude de la fracturation étaient indispensables à la compréhension des circulations souterraines , car l'étude hydrologique et l'analyse des courbes de tarissement n'auraient pu fournir seules tous les éléments nécessaires à leur connaissance . Il aurait cependant été souhaitable de mettre en évidence l'influence de la fracturation sur le comportement hydrogéologique des diverses formations lors de l'étude préliminaire , ce qui aurait permis d'éviter l'appel à la notion de " nappe de fissures " au sein des dolomies néojurassiques .

Les méthodes géophysiques qui servent de complément à l'étude géologique et permettent de détailler des points particuliers ont fourni des résultats plus ou moins probants . Sur le secteur étudié , si la prospection électrique donne de bons résultats , la gravimétrie laisse planer trop d'incertitudes pour pouvoir être jugée satisfaisante . Par contre , la microsismique donne des indications appréciables à l'entreprise . Elle peut donc être utile lors de l'étude géotechnique en notant toutefois le domaine limité de son utilisation .

En résumé , au terme de cette étude , il apparaît que peu de résultats importants de l'étude préliminaire ont été infirmés , mais il est certain que les aspects divers de l'hydrogéologie qui n'avaient pas été abordés tant par l'étude de la fissuration que par celle des sources et de leur tarissement ou encore par l'étude des karsts et de leur évolution au cours du temps auraient dû faire l'objet de recherches dès cette phase .

La durée des observations nécessaires pouvait paraître peu compatible avec les délais prévus pour l'établissement des prévisions , mais en raison de l'extrême importance des problèmes posés par les circulations souterraines en massifs calcaires , une connaissance de l'hydrogéologie de la région étudiée aurait été là comme dans beaucoup d'autres régions une base sûre pour le projet , tant en ce qui concerne les ouvrages eux-mêmes que leurs répercussions dans l'environnement plus ou moins éloigné .

L'étude hydrogéologique d'une région devrait s'intégrer dès le début dans les études géotechniques et ceci montre la complémentarité de toutes les disciplines géologiques qu'il convient de ne jamais oublier .

LES EXTENSIONS POSSIBLES DE L'ETUDE

Il serait intéressant , lors de travaux ultérieurs , d'étendre la zone d'étude afin de vérifier si les méthodes et les données proposées dans ce mémoire sont applicables et comparables dans un secteur voisin de la région .

Du point de vue hydrogéologique , par exemple , il y a de fortes chances pour que les eaux , au delà de la faille des Pourraques et Morières le Cap , ne suivent plus le même chemin et alimentent la zone du Revest au S-W.

L'interprétation que nous proposons pour expliquer la zone chevauchante de Montrieux serait à développer à l'échelle de la région géologique et notamment au Nord vers la terminaison du chevauchement de la Sainte-Baume et de la montagne de La Loube .

ANNEXES

ANNEXE I - Sources et sondages

EMERGENCES : Liste des principales sources

Nom	Feuille IGN	Coordonnées			Géologie	N° S.C.P	Observations
		x km	y km	z m			
La Rouvière	1045.7	897.600	109.550	160	Jurassique	739	2 émergences dont une temporaire
La Foux Lacanal	1045.7	896.730	110.950	185	-	737	
Font d'Ouvin	1045.7	896.00	111.930	245	-	734	
Cavaudan	1045.7	895.540	112.560	300	-	700	
Font Saint- Jacques	1045.7	897.240	111.470	155	Lias	732	2 émergences
Montrieux Vieux	1045.7	893.390	113.500	253	Jurassique supérieur	706	
Montrieux Jeune	1045.7	894.690	112.440	350	-	703	
Font Nègre	1045.7	899.84	107.20	92	Trias	757	Massif de Cuers Commu- ne de Solliès
Font de Thon	1045.7	899.240	107.010	104	Lias	751	
Valaury (Gaou)	1064.3	899.340	106.950	110	-	755	(Source plus ruissellement Valaury)

CODAGE S. C. P. DES PRINCIPALES SOURCES

N O M	N°	N O M	N°
Léouves	704	Baral	715
Du Péou	705	Vigne Fère	733
Font de Toule	706	Saint-Mathieu	738
Montrieux le Couvent	707	Font de Pouille	759
Bassin de Montrieux	708	Communale de Solliès- Ville	770
La Vierge	712	Alibran	774
Saint-Joseph	713	Fabre	791

SONDAGES : Liste des principaux sondages de recherche d'eau

Désignation	Feuille I G N	Coordonnées			Géologie	Profondeur m	Résultat	Observations
		x km	y km	z m				
Solliès- La Cerisaie								
S. 1	1045.7.92	898.38	110.00	130	Muschel- kalk	84	positif	Forages Compagnie des Eaux du S-E. Confid- dential
S. 2	93	898.44	109.85	130	-			
S. 3	94	898.18	110.30	130	-	78	-	-
S. 4	95	898.31	110.16	140	-	51	-	-
Solliès- Tourrettes	1045.7.13	899.98	107.960	107	-	70	-	-
-	14	900.02	107.92	107	-	-	-	-
Font de Thon	1045.7.91	899.14	107.010	104	Lias	42	négatif	
Valaury	1064.3.81	898.910	106.620	110	-	70	positif	
Font St- Jacques à Belgentier	1045.7.96	897.24	111.32	150	-		-	
Montrieux	1045.7.4	892.42	113.28	430	Jurassi- que supé- rieur	134	Recon- naiss.	Société du Canal de Provence

CODAGE S. C. P. DES PRINCIPAUX PIEZOMETRES

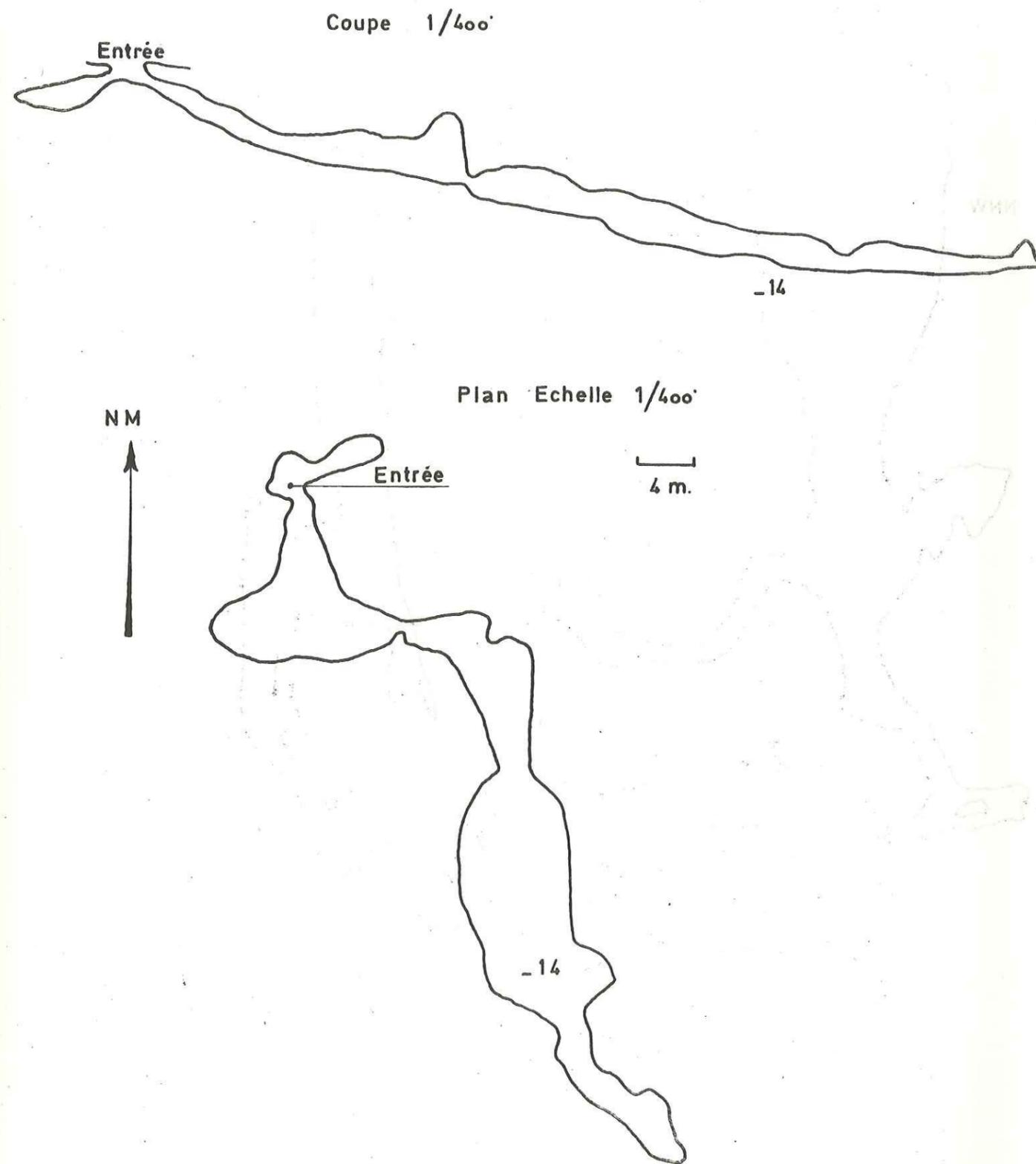
N O M	N°
Piézomètre S 7	729
Piézomètre S 5	730
Puits Hubagues	731
Puits Pierredon	752
Puits Boullidou	754

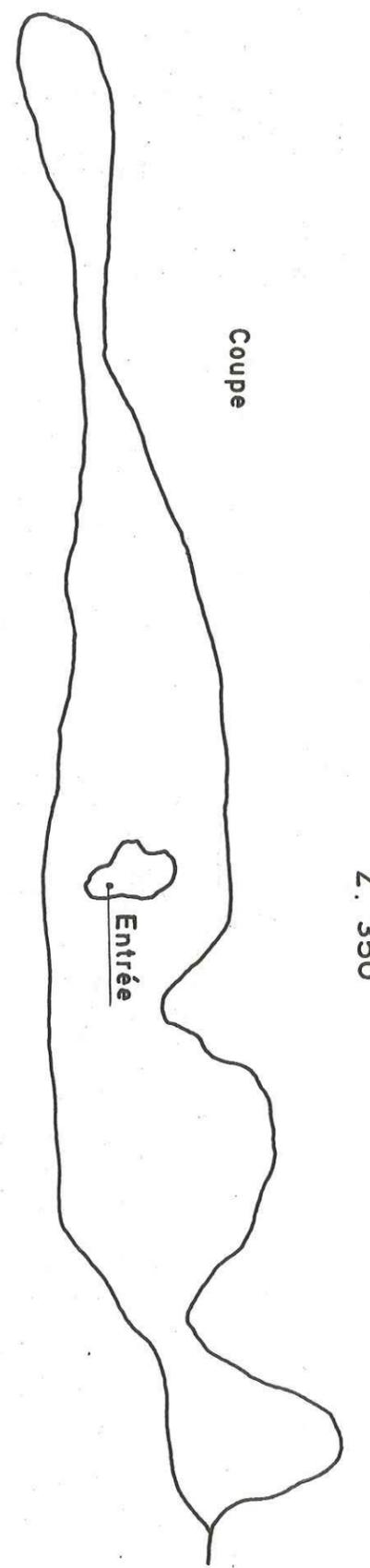
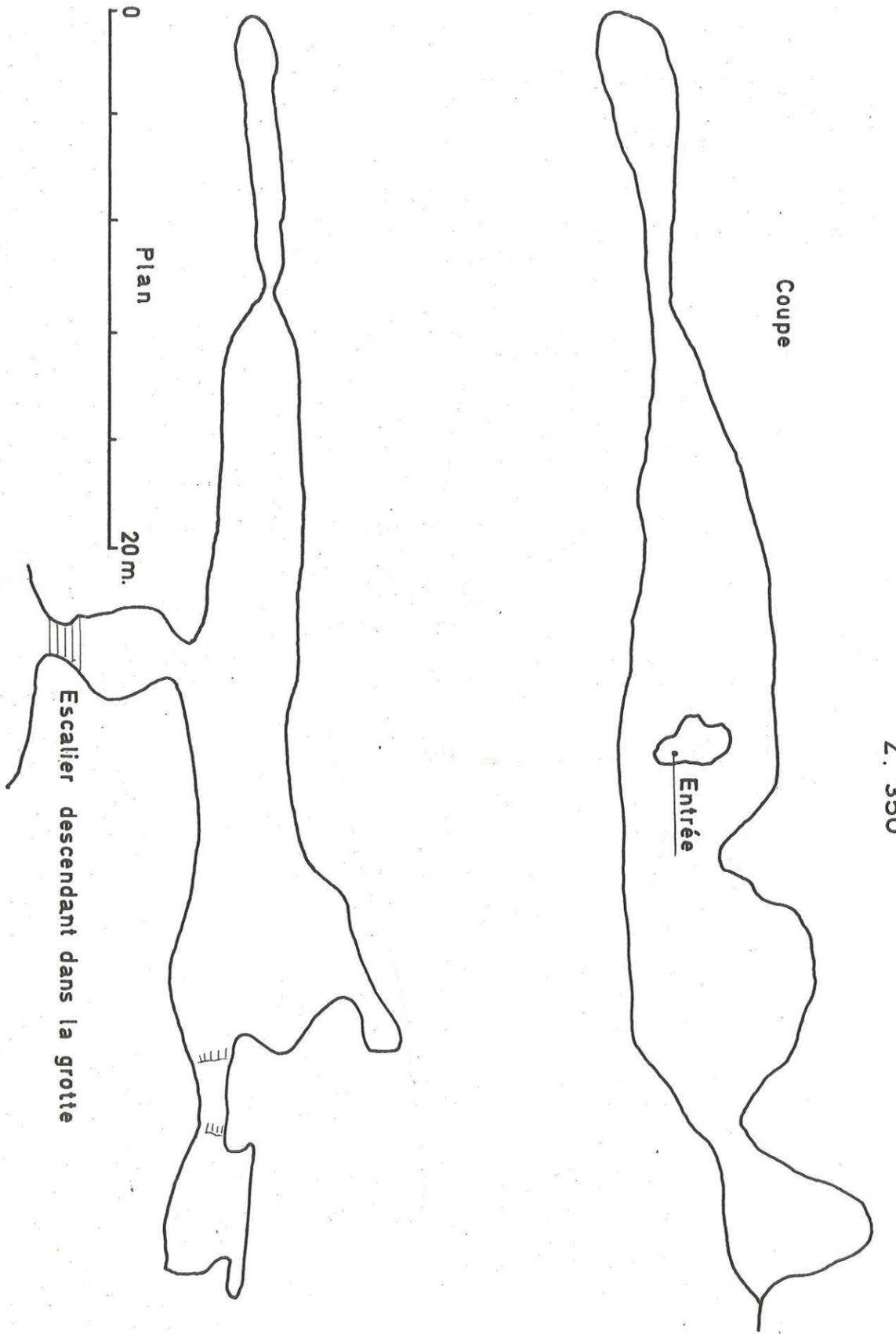
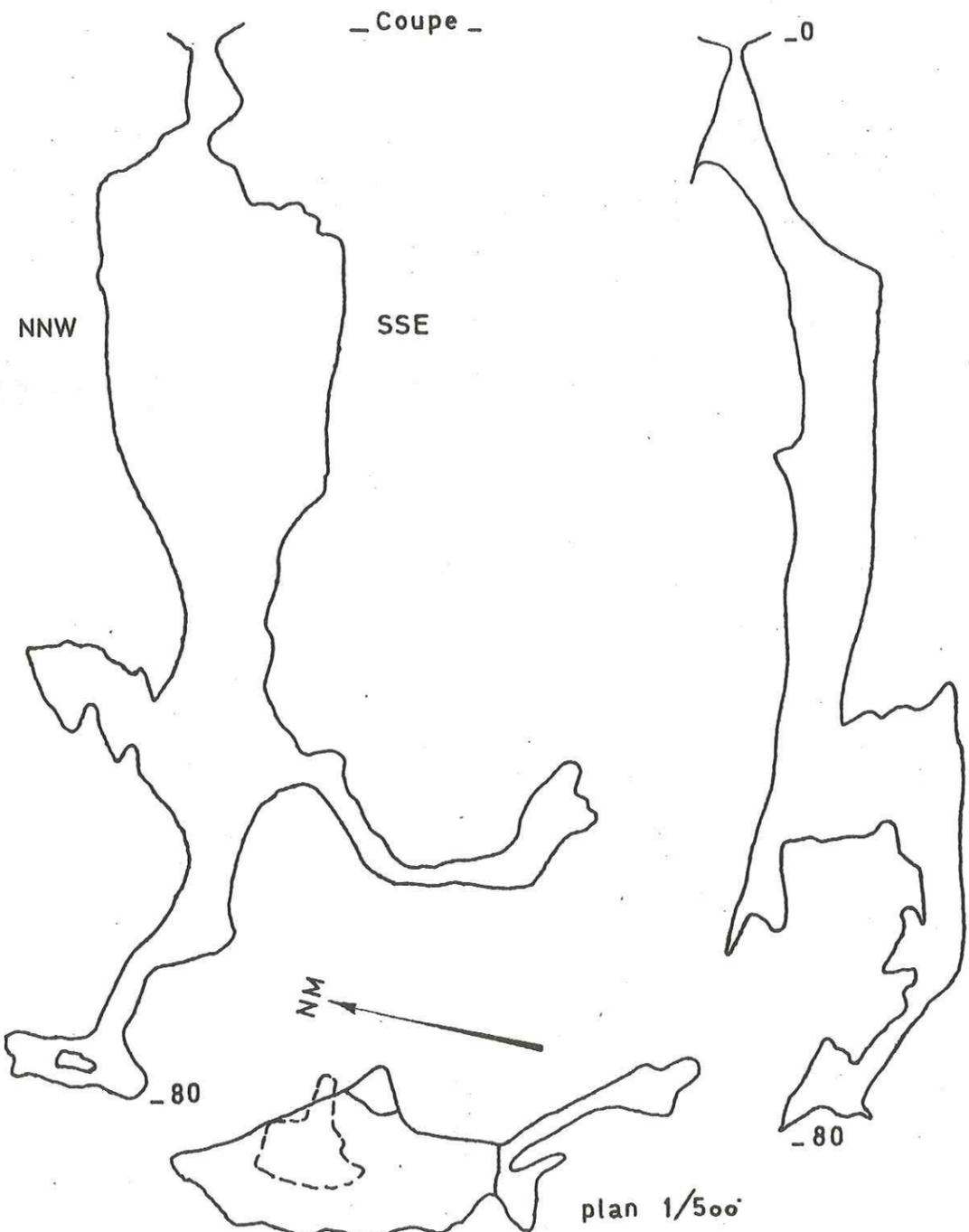
ANNEXE II · Localisation des karsts reconnus

Schémas des principaux karsts étudiés

N O M	N°	Feuille I G N	Coordonnées			Profondeur explorée m
			x km	y km	z m	
Aven du Palan	1	1045.7	891,10	110,10	588	- 107
Aven Malleron	2	"	891,25	109,60	630	- 118
Aven B. B.	3	"	890,50	108,81	630	- 40
Aven du Corbeau	4	"	891,05	109,10	630	- 31
Grand aven du Jas de Laure	5	"	890,30	110,82	702	- 136
Petit aven du Jas de Laure	6	"	890,38	110,72	700	- 45
Aven Chalidumo- gida	7	"	890,31	110,37	690	- 22
Aven d'Egypte	8	"	890,25	110,22	705	- 22
Aven du Nouvel An	9	"	890,10	109,50	678	- 38
Grotte de la Surprise	10	"	890,12	109,52	670	L = 10
Aven Jean-Pierre	11	"	890,01	109,19	690	- 26
Aven Jean-Pierre Claustre	12	"	890,00	109,12	685	- 100
Aven sans nom	13	"	890,44	109,08	665	-
Aven de la tirelire	14	"	890,50	109,19	655	- 25
Aven P 14	15	"	890,89	110,11	665	- 14
Aven de Pierre	16	"	891,20	109,80	625	- 18
Aven de Siou Blanc	17	"	891,20	109,75	630	- 14
Aven de Quiberon	18	"	893,38	111,47	545	-
Aven du Légion- naire	19	"	894,51	111,56	610	-
Aven de la Tête de Cheval	20	"	892,90	109,60	610	-
Aven des Aigles	21	"	893,64	108,58	610	- 18

N O M	N°	Feuille I G N	Coordonnées			Profondeur explorée m
			x km	y km	z m	
Aven Guy Dumois	22	1045.7	892,57	109,76	607	- 36
Aven de l'Espérance	23	"	891,95	110,25	652	- 28
Grotte Remy	24	"	892,73	110,14	645	L = 8
Aven du Braco	25	"	892,26	110,43	630	- 15
Aven Jean-Marie	26	"	892,14	110,69	625	- 54
Aven du Requin	27	"	892,38	110,65	625	-
Aven du Tanck N°2	28	"	895,13	108,87	612	- 14
Aven du Tanck N°1	29	"	895,19	108,82	610	- 79
Aven du Menhir	30	"	895,10	108,68	612	- 35
Aven de la Galerie	31	"	895,12	108,67	605	- 65
Résurgence de Montrieux-le- Jeune	32	"	894,70	112,50	350	Galerie de 30 m puis siphon
Exurgence de la Baume Escure	33	"	895,12	112,25	420	Fig. 26
Résurgence de La Rouvière	34	"				
Aven de la Solitude	35	"	891,72	109,34	654	- 203
Baume des Lumes	36	"	893,80	110,15	690	Schéma annexé
Aven des Embruns	37	"	892,55	110,01	635	- 60
Ragage des Fenouils	38	"	894,92	106,76	629	Schéma annexé
Grotte des Selves	39	"	897,50	103,96	350	"
Trou de la Cordière N°2	40	"	896,28	104,94	306	"
Ragage de l'Assassin	41	"	892,44	109,80	612	- 5
Baume des Enfers	42	"	893,20	110,30	700	Schéma annexé



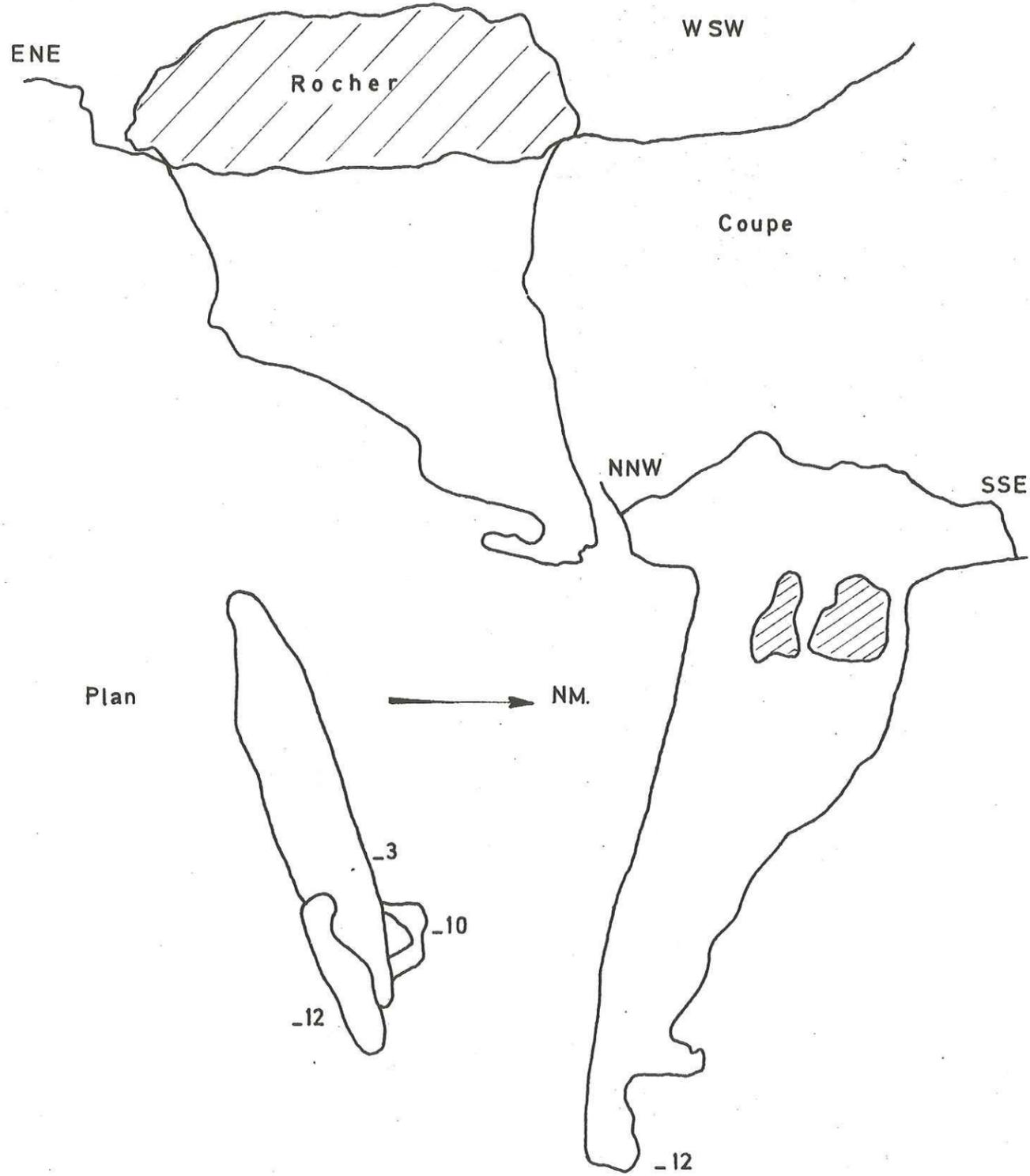


TROU DE LA CORDIERE N°2 - N°40

X. 896.280

Y. 104.940

Z. 306

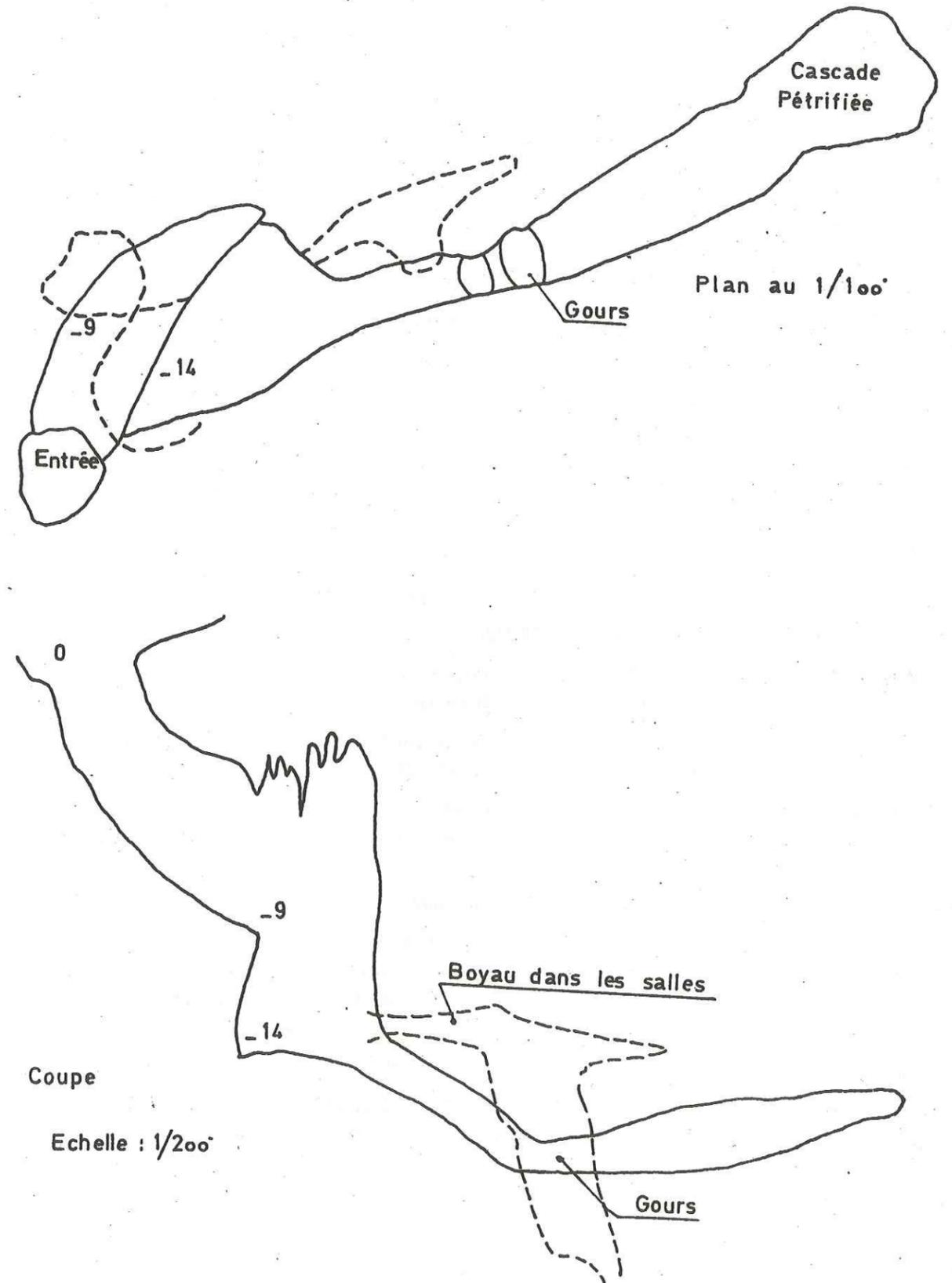


BAUME DES ENFERS - N°42

X. 893.200

Y. 110.300

Z. 700



BIBLIOGRAPHIE

LISTE DES ABREVIATIONS UTILISEES

- B. R. G. M. Bureau de Recherches Géologiques et Minières
- B. S. N. S. N. Bulletin de la Société Neuchateloise des Sciences Naturelles
- C. R. A. S. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Paris
- C. R. S. G. F. Comptes Rendus de la Société Géologique Française - Paris

AUBOUIN J. 1953
Un ensemble de tectogenèse en Provence .
C.R.S.G.F. p. 230-232

AUBOUIN J., MENNESSIER G. 1960, 1963
Essai sur la structure de la Provence .
Extrait du livre à la mémoire du professeur P. Fallot .
tome II , S. G. F. p. 45-98

AUBOUIN J. , CHOROWICZ J. 1967
Le chevauchement sud-provençal : de l'Etoile à la Sainte-
Baume .
Bull. S.G.F. , t. IX, n° 7, p. 600-609

AUBOUIN J. , CHOROWICZ J. , THIELE R. 1976
La terminaison orientale du chevauchement sud-provençal
de la Sainte-Baume à La Loube et au Candelou (Var) .
Bull. S.G.F. (7), t. XVIII, n° 1, p. 179-190

BARBIER J. L. 1971
Découverte et tarissement d'un aquifère karstique , réseau de
la Luire-Bournillon (Vercors - Drôme)
C.R.A.S. Paris, t. 272, p. 2860-2863

BARBIER J. L. 1972
Etude hydrogéologique de la haute vallée de la Vernaion
et de ses bordures .
Thèse de 3ème cycle , Grenoble . 135 p.

BARBIER J. L. , COMBES A. 1976
Méthodes d'étude d'un aquifère karstique en vue de travaux
souterrains .
Ile Colloque d'hydrogéologie en pays karstiques . Besançon.

BARBIER R. , DOUVILLE F. 1963
Tectonique à l'Est du massif de la Sainte-Baume .
Bull. S.G.F., t. V, n° 6, p. 1029-1034

BOUCARUT M. 1975
Arguments en faveur d'un rhexmatisme d'âge alpin en
Provence et de ses relations avec le volcanisme de même
âge .
Rev. Géog. Phys. et Géol. Dyn. (2), vol. XVII, fasc. 4, p. 393-398

B. R. G. M. 1968
Etude des ressources hydrologiques et hydrogéologiques
du S-E de la France .
Fascicule n° 7

CASTANY G. 1967
Introduction à l'étude des courbes de tarissement .
Chronique d'hydrogéologie du B.R.G.M., n° 10

CASTANY G. 1967
Traité pratique des eaux souterraines .
Dunod

CHARMET J. P. 1976
Hydrogéologie des massifs jurassiques , crétacés et du
Trias du S-W varois .
Thèse de 3ème cycle , Marseille .

CHOQUET C. 1972
Etude géotechnique et hydrogéologique d'aménagements du
Canal de Provence au Nord de Toulon (Var) .
Thèse de 3ème cycle , Grenoble , 167 p.

CORNET C. 1957
Etude tectonique et morphologique de la région de Méounes
et de la Roquebrussanne .
Re. Géog. Phys. et Géol. Dyn. (2), t. 1, fascicule 2, p. 113-118, fascicule 4, p.235-245

CORNET C. 1958
Terminaison occidentale du chevauchement de Valbelle -
Montrieux près de Signes .
C.R.S.G.F., p. 83-85

DROGUE C. 1967
Essai de détermination des composantes de l'écoulement des
sources karstiques .
Evaluation de la capacité de rétention par chenaux et fissures.
Chronique hydrogéologique du B.R.G.M. n° 10

EISENLOHR B. , GUIEU G. , MASSE J. P. , PHILIP J. 1973
Sur l'existence du Néocimien , du Cénomanién et du Turonien
marins dans le massif de la Loube (Var) . Conséquences
paléogéographiques et tectoniques .
C.R.A.S. Paris, t. 277, p. 2461-2463

FERRANDINI J. 1973
Etude géologique et géotechnique de la galerie de Saint -
Maximin .
D. E. A. , Marseille , 27 p.

FRANCIS F. 1970
Etude du mouvement de l'eau dans les massifs fissurés .
Thèse de docteur - ingénieur , Grenoble . 269 p .

GOGUEL 1943
Essai de synthèse tectonique de la Provence .
Bull. S.G.F. (5), t. XIII, p. 367-382

GOVERNEMENT C. , GUIEU G. , ROUSSET C. 1971
La Provence
Guides géologiques régionaux . Masson. 230 p.

GRILLOT J. C. , GUERIEU R. 1975
Tectonique , microtectonique et directions des écoulements
souterrains : Exemple de relations dans le bassin karstique
du Haut-Vidourle (Gard , France) .
Rev. Géog. Phys. et Géol. Dyn., vol. XVII, fasc. 1, p.45-60

GUIEU G. 1968
Etude tectonique de la région de Marseille .
Thèse Marseille

GUILLEN J. 1969
Etude géologique et géotechnique des aménagements du Canal
de Provence entre Rians et Saint-Maximin .
Thèse de 3ème cycle , Grenoble . 98 p.

HAUG E. 1925
Les nappes de charriage de la Basse Provence : la région
toulonnaise .
Mém. Carte Géol. France. t. VIII, 304 p

KIRALY L. 1969
Statistical analysis of fractures (orientation and density)
Geologische Rundschau. Bd 59, Stuttgart, p. 125-151

KIRALY L. 1969
Anisotropie et hétérogénéité de la perméabilité dans les
calcaires fissurés .
Ecloga géol. helv, vol. 62/2, Bâle, p. 613-619

KIRALY L. 1970
L'influence de l'hétérogénéité et de l'anisotropie de la
perméabilité sur les systèmes d'écoulement .
Bull. Ver. Schweiz. Petrol. - Géol. u. - Ing., vol. 37,
Nr. 91, S. 50-57

KIRALY L. , MATHEY B. , TRIPET J. P. 1971
Fissuration et orientation des cavités souterraines :
région de la grotte de Milandre (Jura tabulaire) .
B.S.N.S.N. t. 94. p. 99-114

LANQUINE A. 1929
Le Lias et le Jurassique des chaînes provençales I :
Le Lias et le Jurassique inférieur .
Bull. Serv. Carte Géol. France, t. XXXII, n° 173, 385 p.

LANQUINE A. 1934
Remarque stratigraphique et tectonique sur la bordure
jurassique au S et au N-W de Méounes .
C.R.S.G.F., p. 161-163

LANQUINE A. 1935
Le Lias et le Jurassique des chaînes provençales II :
Le Jurassique moyen et supérieur .
Bull. Serv. Carte Géol. France, t. XXXVIII, n° 191, p. 183-317

LETOURNEUR J. , MICHEL R. 1971
Géologie du génie civil .
Paris , A. Colin . 727 p.

LEVEN J. 1971
Bassin de la Roquebrussanne . Essai d'hydrologie et
d'hydrochimie karstique .
D. E. S. de géographie , Aix-Marseille .

LOUIS C. 1974
Introduction à l'hydraulique des roches .
Chronique d'hydrogéologie du B.R.C.M., n°4, p. 284-355

MANGIN A. 1970
Contribution à l'étude des aquifères karstiques à partir de
l'analyse des courbes de décrue et tarissement .
Annales spéléologiques, t. XXV, Fasc. 3

MANGIN A. 1970
Méthode d'analyse des courbes de décrue et de tarissement
dans les aquifères karstiques .
C.R.A.S., t. 270, n° 10, p. 1295-1297

MANGIN A. 1975
Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques .
Thèse Dijon .

MASUREL Y. 1964
Provence cristalline et ses enveloppes sédimentaires .

MATHEY B. , SIMEONI G. P. 1971
Fluctuation du niveau péizométrique dans les réservoirs
calcaires du Jura neuchâtelois .
B.S.N.S.N., t. 94, p. 115-118

MATHEY B. , BERTRAND J. , MORNOD L. 1973
Inversion temporaire du gradient hydraulique dans un karst
et hétérogénéité de la perméabilité .
B.S.N.S.N., t. 96, p. 97-103

RAMSAY J.G. 1967
Folding and fracturing of rocks .
Mc Graw-Hill , New-York , 568 p .

RENAULT P. 1971
La formation des cavernes .
P. U. F. Coll. Que sais-je ? n° 1400

ROBERT J. P. 1976
Les décrochements , fracturations et mouvements des blocs
associés . Exemple des massifs subalpins dauphinois .
Thèse de 3ème cycle . Grenoble .

ROUSSET C. 1968
Contribution à l'étude des karsts du S-E de la France .
Altérations porphologiques et minérales .
Thèse Marseille , 533 p.

SARROT-REYNAULD J. 1962
Hydrogéologie karstique dans le massif du Vercors .
Mémoire du Congrès international de géologie d'Athènes .

SCHOELLER H. 1962
Les eaux souterraines .
Masson , Paris , 643 p.

SCHOELLER H. 1967
Hydrodynamique dans le karst (écoulement et emmagasi-
nement) .
Chronique d'hydrogéologie du B.R.C.M., n° 10, p. 7-21

SIMEONI G. P. , KIRALY L. 1971
Structure géologique et orientations des cavités karstiques :
la grotte de " chez le Brandt " (Jura neuchâtelois) .
B.S.N.S.N., t. 94, p. 91-97

SIMEONI G. P. , JAMIER D. 1975
Relations entre éléments structuraux et morphologie dans
la région du plateau de Bure (Jura tabulaire) .
B.S.N.S.N., t. 98, p. 163-173

TEMPIER C. 1972
Le faciès calcaire du Jurassique provençal .
Thèse Marseille , 361 p .

TROMBE F.
La spéléologie .
P. U. F. , Coll. Que sais-je ? n° 709

VIALON P. 1966
Méthodes de l'analyse structurale . Application à la géologie
alpine .
Thèse Grenoble . 2e sujet . 52 p.

ZAMAN KHAN 1975
Hydrogéologie du bassin versant de Moharlu . Hydrodynamique
des massifs calcaires de la région de Chiraz (Iran) .
Thèse Grenoble . 216 p.

DOCUMENTS UTILISES

- Carte géologique au 1/50000e - TOULON , 2e édition 1969
Carte géologique au 1/50000e - CUERS , 1974
Carte topographique I.G.N. au 1/50000e - TOULON XXXIII - 46
Carte topographique I.G.N. au 1/50000e - CUERS XXXIII - 45
Carte topographique I.G.N. au 1/20000e - CUERS N° 6
Carte topographique I.G.N. au 1/20000e - TOULON N° 3
Carte topographique de la zone de Montrieux au 1/10000e
(agrandissement du 1/20000e)
Carte touristique de TOULON-NORD au 1/50000e
- Excursionnistes toulonnais -

Photographies aériennes :

- | | |
|--------------|--|
| Mission 1958 | CUERS - COLLOBRIERES |
| Mission 1972 | Couverture au 1/30000e
CUERS - COLLOBRIERES |
| Mission 1972 | Couverture au 1/50000e
CUERS et TOULON |

LISTE DES FIGURES

- 1 - Ouvrages du Canal de Provence
- 2 - Situation dans le contexte régional
- 3 - Carte de situation
- 4 - Schéma géologique régional
- 5 - Carte géologique
- 6 - Etude pétrographique
- 7 - Carte interprétative du secteur de Montrieux
- 8 - Morphotectonique provençale
- 9a - Exemple de tableau utilisé pour l'échantillonnage
- 9b - Exemple de relevé en galerie
- 9c - Exemple de relevé en galerie
- 10 - Carte structurale
- 11 - La fracturation dans la galerie
- 12 - Répartition de la fissuration
- 13 - Carte oro - hydrographique
- 14 - Températures de la station de Cuers
- 15 - Pluviométrie
- 16 - Coupe du sondage S 14
- 17 - Perméabilité et fracturation
- 18 - Courbe théorique de la loi de A. Mangin
- 19 - Courbe de tarissement (Fond de Vin)
- 20 - Courbe d'infiltration
- 21 - Courbe de tarissement (La Rouvière)
- 22 - Résultats des courbes de tarissement
- 23 - Schéma interprétatif des circulations au niveau de La Rouvière

- 24a - Hypothèses sur les circulations souterraines
- 24b - Carte du mur des dolomies néojurassiques
- 25 - Carte de la karstification reconnue
- 26 - Exurgence de la Baume Escure
- 27 - Schéma du karst du PK 8.330
- 28 - Schéma du karst du PK 9.930
- 29a - Fracturation et orientation des cavités
- 29b - Proportion du Ca CO_3 dans les roches carbonatées
- 30 - Tableau récapitulatif des zones karstifiées
- 31 - Profil gravimétrique
- 32 - Principe de la prospection gravimétrique
- 33 - Géologie et microsismique
- 34 - Exemples de représentation en prospection électrique
- 35 - Exemple de document prévisionnel
- 36 - Profil avant et après travaux (Attaque A et B)
- 37 - Profil avant et après travaux (Attaque C et D)
 - Schémas des principaux karsts reconnus - Annexe II -
 - Coupes d'interprétation des dispositifs microsismiques - Annexe III - (hors texte)

TABLE DES MATIERES

Avant-propos

Sommaire

Introduction 6

Chapitre 1 : Situation - Etude géologique 9

 Situation géographique..... 12

 Situation géologique 14

 I - Cadre géologique régional..... 14

 1 - Situation générale..... 14

 2 - Histoire géologique régionale 14

 2.1. - Historique des connaissances 14

 2.2. - Evolution stratigraphique 15

 3 - Etude de la structure régionale..... 16

 3.1. - Evolution structurale 16

 3.2. - Style structural..... 17

 4 - Présentation de la carte régionale 18

 4.1. - Les ensembles régionaux 18

 4.2. - Le secteur dans la région..... 18

 II - Cadre géologique du secteur étudié 18

 1 - Etude stratigraphique 18

 1.1. - La série stratigraphique 26

 1.2. - Problèmes lithostratigraphiques 26

 2 - Etude cartographique..... 29

 - Présentation de la carte géologique..... 29

 3 - Etude de quelques particularités géologiques..... 30

 3.1. - Etude pétrographique 30

 3.2. - Etude du chevauchement de Montrieux..... 32

 Conclusion 34

Chapitre 2 : Etude structurale 34

 I - Introduction..... 37

 1 - Problème de l'échelle..... 37

 2 - Echantillonnage des mesures..... 37

 II - Etude de la fracturation..... 41

 1 - Mesure de la fracturation 41

 1.1. - Mesures sur le terrain..... 41

 1.2. - Mesures sur les photographies aériennes... 43

 1.3. - Mesures en galerie 43

 2 - Représentation des résultats 45

 3 - Interprétation des résultats 45

 4 - Conclusion 45

III - Critique de la méthode 50

 1 - Précision de l'échantillonnage 50

 2 - Relations entre les mesures 50

IV - Essai d'interprétation structurale..... 51

 1 - Cadre théorique..... 51

 2 - Interprétation régionale..... 51

V - Conclusion 53

Chapitre 3 : Etude hydrologique 54

 I - Topographie..... 58

 II - Hydrographie..... 58

 1 - Implantation des sources et des appareils..... 58

 de mesures 58

 2 - Le Gapeau 58

 III - La végétation..... 59

 IV - Données météorologiques..... 59

 1 - Le climat..... 59

 2 - Le vent 59

 3 - Les températures..... 59

 4 - La pluviométrie..... 61

 5 - L'évapotranspiration..... 61

 V - Présentation des sources étudiées 63

 VI - Conclusion..... 64

Chapitre 4 : Etude hydrodynamique 66

 Relations entre hydrogéologie et fracturation..... 68

 I - Essai de calcul des perméabilités 68

 1 - But de l'étude..... 68

 2 - Principe 68

 3 - Méthode..... 68

 4 - Résultats..... 69

 4.1. - Calcul en galerie..... 69

 4.2. - Calcul sur le site de la Rouvière..... 70

 4.3. - Calcul sur le site de Fond de Vin..... 71

 4.4. - Conclusion..... 71

 4.5. - Autres résultats 71

 5 - Interprétation des résultats 72

 6 - Critique de la méthode 72

 II - Interprétation des essais Lugeon 73

 1 - But de l'étude 73

 2 - Résultats 73

 3 - Interprétation des résultats 74

 4 - Critique de la méthode 75

 III - Essai de corrélation entre les méthodes..... 77

Etude des circulations souterraines.....	80
I - Etude des sources par leur courbe de tarissement.....	80
1 - Principe.....	80
2 - Méthode.....	81
3 - Résultats.....	83
3.1. - Source présentant un régime laminaire..	83
3.2. - Source présentant un régime turbulent..	85
4 - Interprétation des résultats.....	87
II - Essai d'évaluation des réserves.....	88
1 - Principe.....	88
2 - Résultats.....	89
3 - Interprétation des résultats.....	89
III - Conclusion.....	91
Conclusion.....	93
Chapitre 5 : Les phénomènes karstiques	96
Introduction.....	99
Aspects de la karstification.....	99
I - Les indices de surface.....	99
1 - Recensement des phénomènes karstiques.....	99
2 - Reconnaissance des cavités karstiques.....	101
II - Les karsts de la galerie de Valaury.....	103
1 - Le karst au niveau du PK 8.330.....	103
1.1. - Observations.....	103
1.2. - Origine.....	103
2 - Le karst au niveau du PK 9.930.....	105
2.1. - Observations.....	105
2.2. - Origine.....	105
III - La géologie et la karstification.....	107
1 - La pétrographie et la karstification.....	107
2 - La fissuration et la karstification.....	107
3 - Essai de datation des phénomènes karstiques.....	107
3.1. - Les épisodes régionaux de la karstifi-	107
cation.....	107
3.2. - Datation des karsts observés.....	109
IV - Conclusion.....	110
Détection des zones karstiques par les méthodes géophysiques.....	112
I - Le problème du karst dans les travaux souterrains.....	112
II - La gravimétrie appliquée à la recherche des vides.....	112
1 - But recherché.....	112
2 - Principe et méthode.....	113
3 - Résultats.....	113
3.1. - Lecture.....	113
3.2. - Interprétation.....	113
4 - Critique de la méthode.....	115

III - La microsismique à l'approche du karst.....	115
1 - But recherché.....	115
2 - Principe.....	118
3 - Méthode.....	118
4 - Résultats.....	119
4.1. - Lecture.....	119
4.2. - Interprétation.....	119
5 - Critique.....	119
IV - Comparaison entre les méthodes géophysiques et les rele-	120
vés de la géologie.....	120
Conclusion.....	124
Chapitre 6 : Etude géotechnique	126
I - Caractéristiques de la galerie de Toulon-Est.....	128
II - Etude comparative des résultats.....	128
1 - Evaluation des risques.....	128
1.1. - Prospection électrique.....	128
1.2. - Méthode utilisée.....	131
1.3. - Document proposé.....	131
2 - Etude après travaux.....	134
2.1. - Galerie de Montrieux.....	134
2.2. - Galerie de Valaury.....	135
2.3. - Conclusions.....	141
III - Applications aux caractéristiques de l'ouvrage.....	147
1 - La tenue des terrains.....	147
2 - Le calcul de revêtement.....	147
3 - La prévision des injections.....	147
4 - Les travaux effectués sur la galerie de Toulon-Est	148
IV - Comportement de la galerie face aux vibrations.....	148
1 - Critère de sécurité.....	149
2 - Résultats.....	149
3 - Interprétation.....	149
4 - Critique.....	149
V - Conclusion.....	150
Conclusion générale	152
Annexes	
Annexe I : Sources et sondages.....	160
Annexe II : Localisation des karsts reconnus	
Schémas des principaux karsts étudiés...	162
Annexe III : Profil microsismique (hors texte)	
Bibliographie	169
Liste des figures	176
Table des matières	178

Dernière page d'une thèse

Vu

Grenoble , le

Le Président de la thèse

Vu, et permis d'imprimer

Grenoble, le

Le Président de l'Université
Scientifique et Médicale

SOCIETE DU CANAL DE PROVENCE

ET D'AMENAGEMENT DE LA REGION PROVENCALE

GALERIE DE VALAURY

Branche du Var - III^e Section

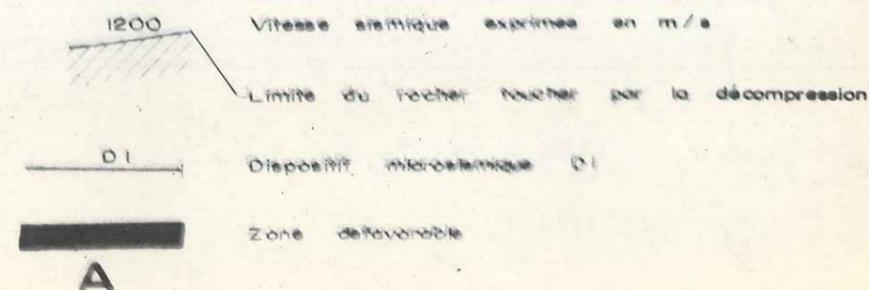
Attaque C

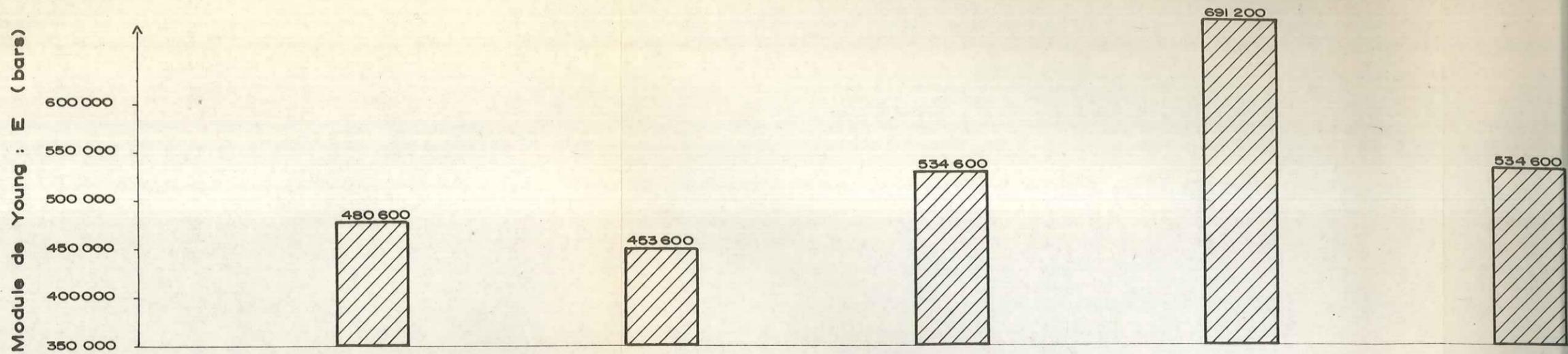


COUPES D'INTERPRETATION
DES DISPOSITIFS MICROSISMQUES

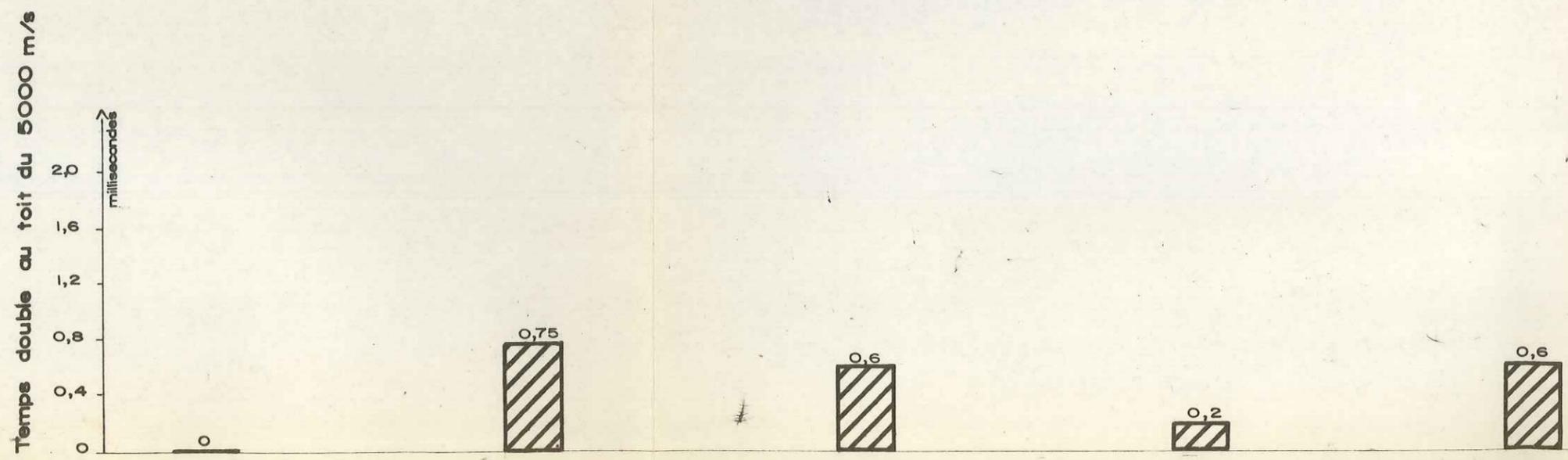
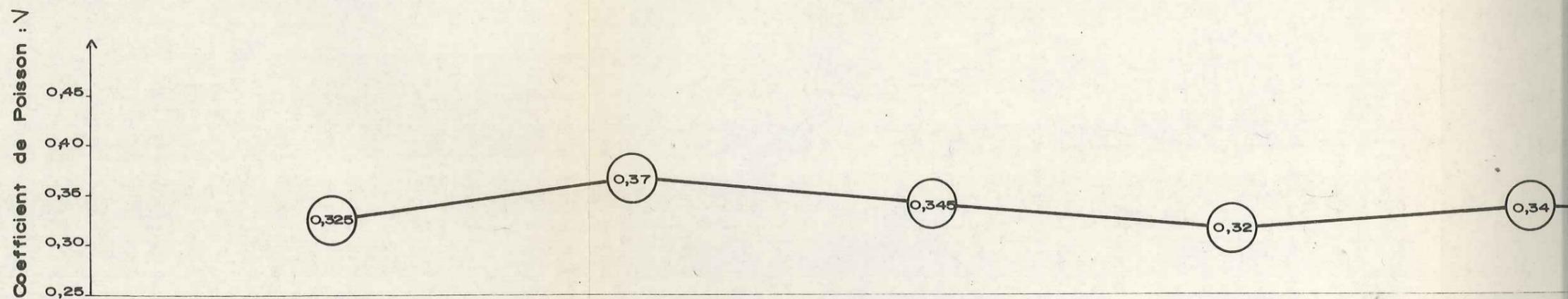
CARACTERISTIQUES DYNAMIQUES DU CALCAIRE

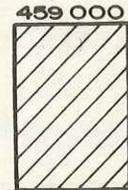
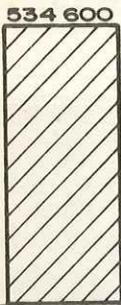
Echelles H. 1/500
V. 1/50





VITESSE LONGITUDINALE	5050	5400	5550	6060	5500
VITESSE TRANSVERSALE	2580	2460	2700	3100	2700





5500
2700

5480
2750

5025
2500

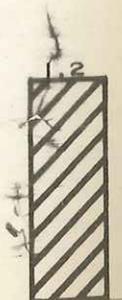
0,34

0,33

0,335



0,05





0,36

0,275

0,31

0,19

4700
2900

5100
2380

4360
2380

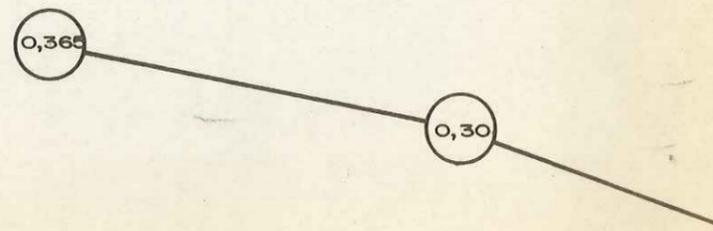
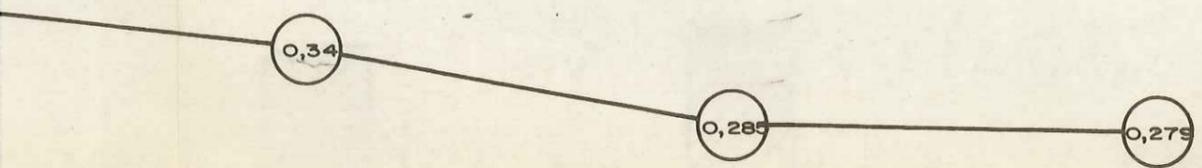
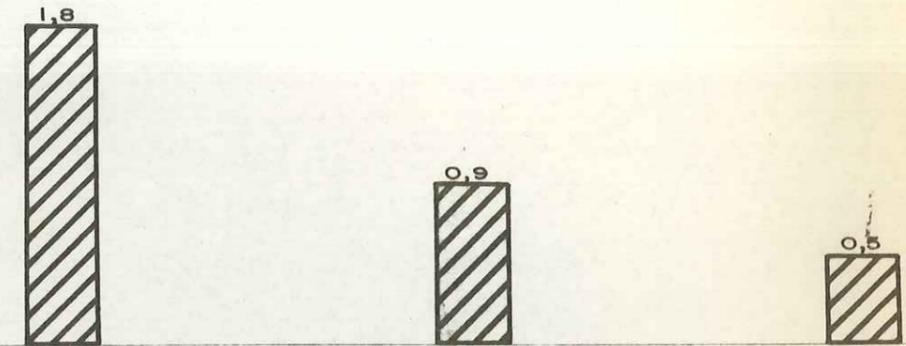
5340
2800

540000

418 500

391 500

562000



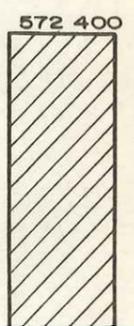
5580
2740

4820
2650

4500
2490

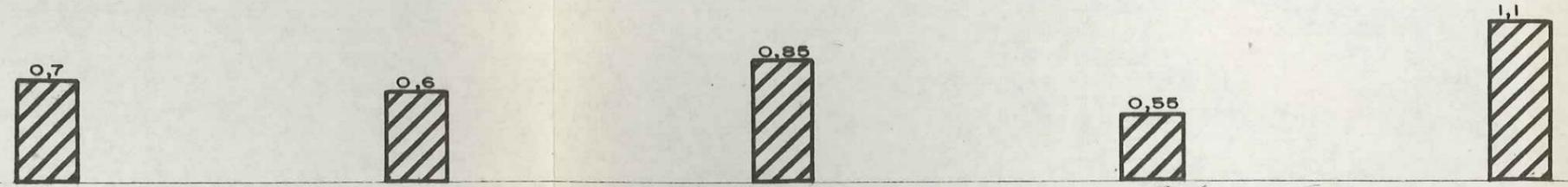
5650
2600

5350
2850

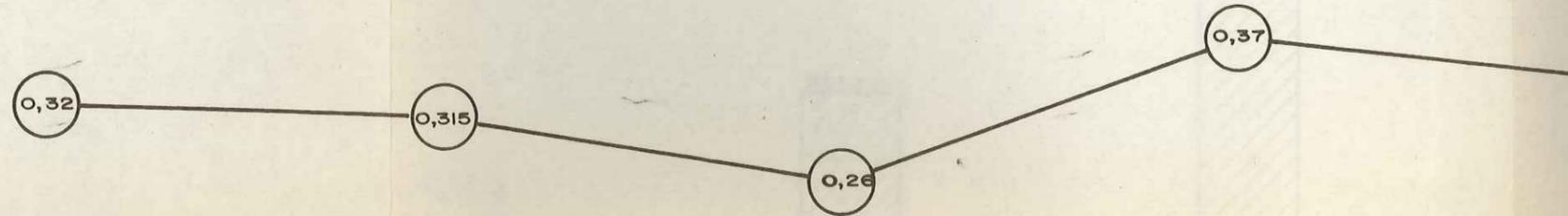


Temps double au toit du 5000 m/s
millisecondes

1,6
1,2
0,8
0,4
0



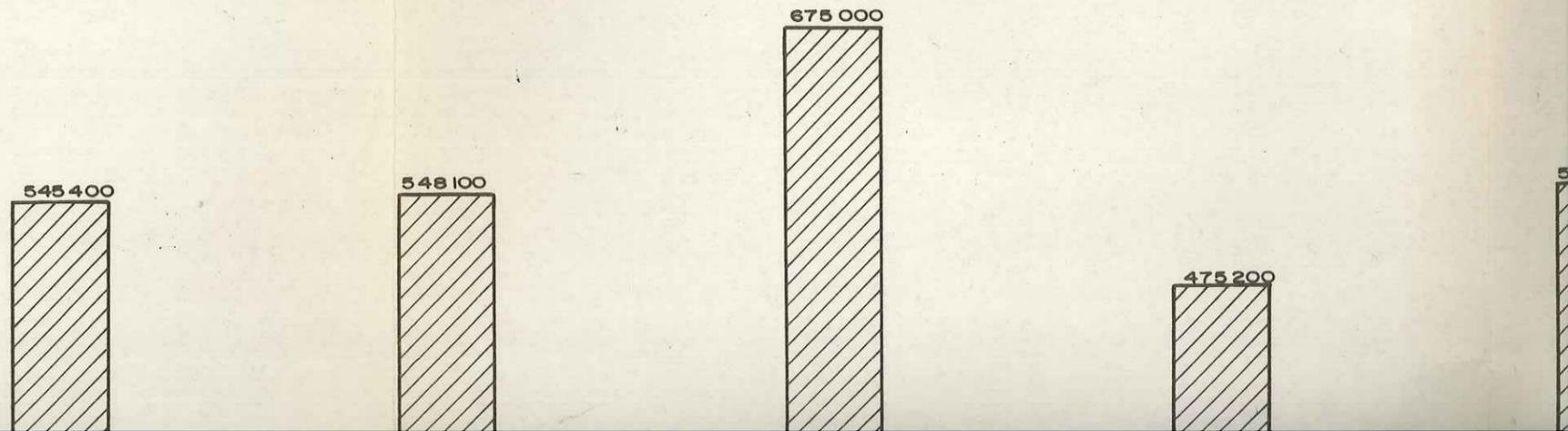
Coefficient de Poisson: ν
0,40
0,35
0,30
0,25
0,20
0,15

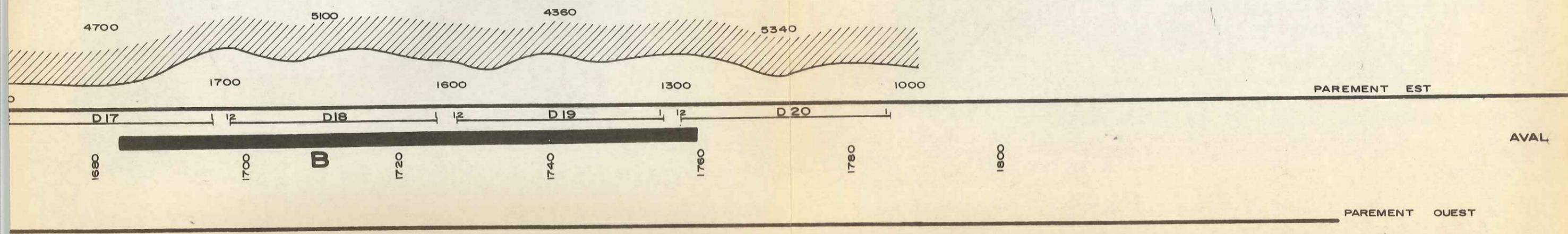


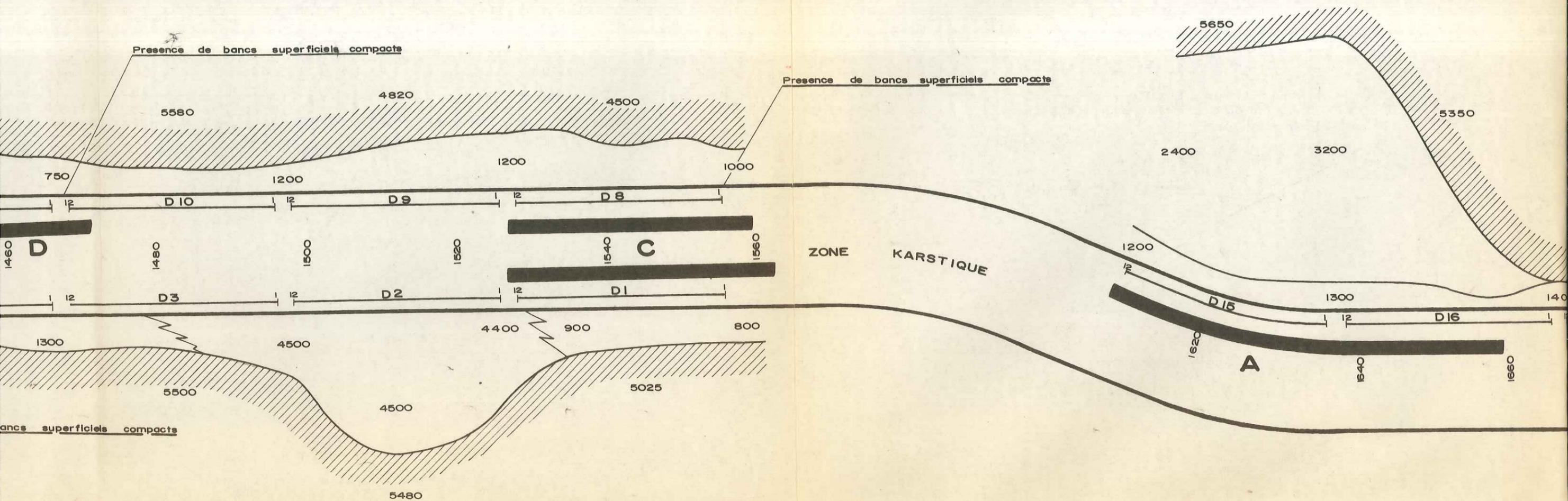
VITESSE LONGITUDINALE	5320	5320	5550	5600	5
VITESSE TRANSVERSALE	2750	2760	3150	2525	2

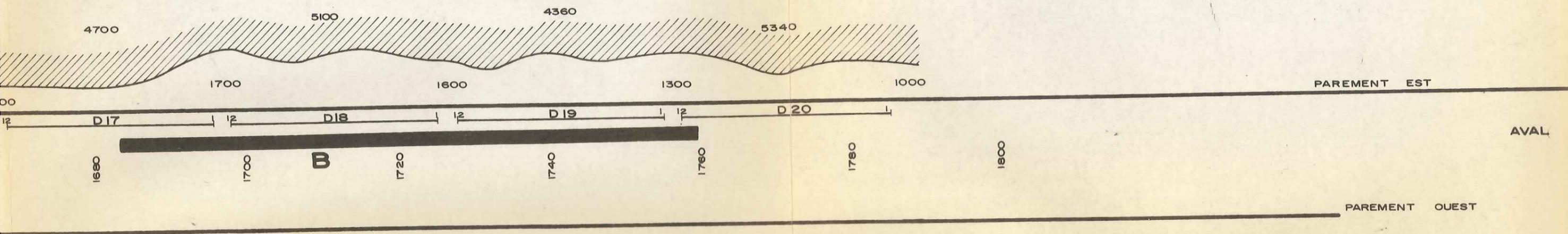
Module de Young : E (bars)

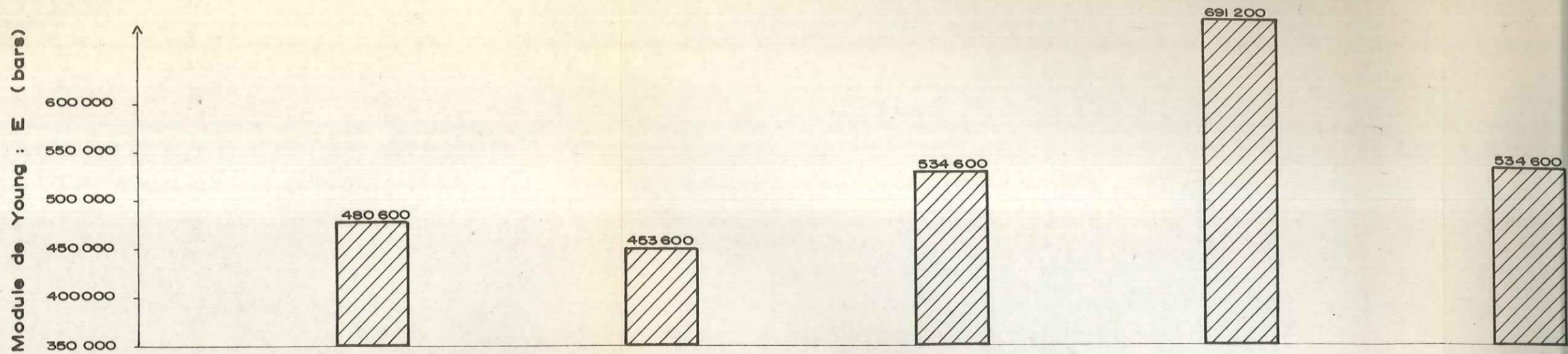
700 000
650 000
600 000
550 000
500 000
450 000
400 000



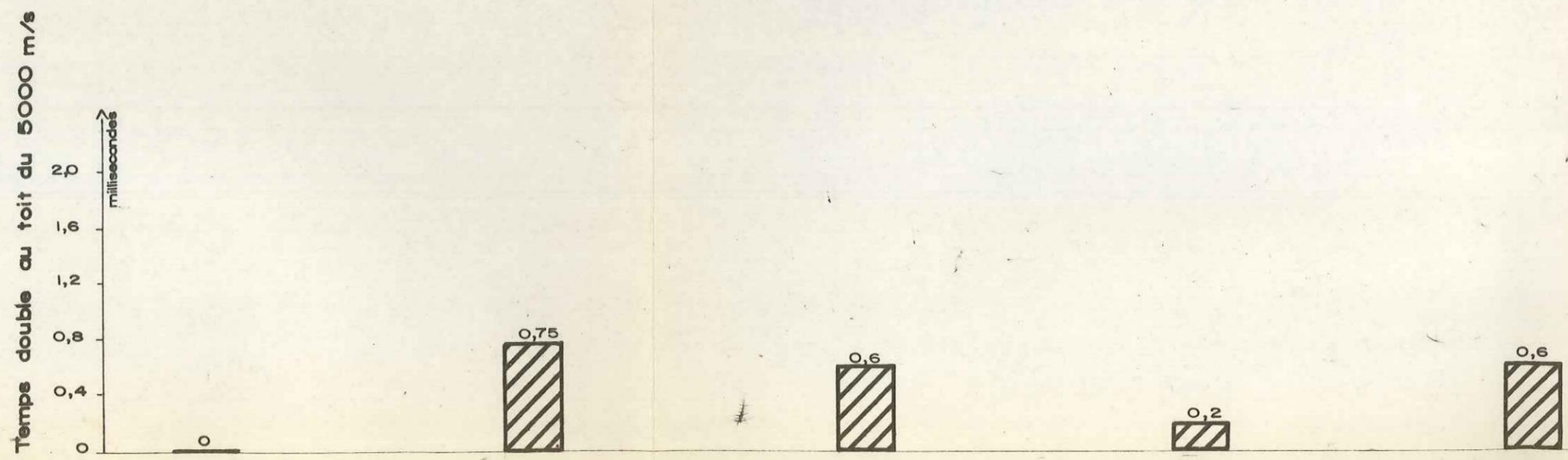
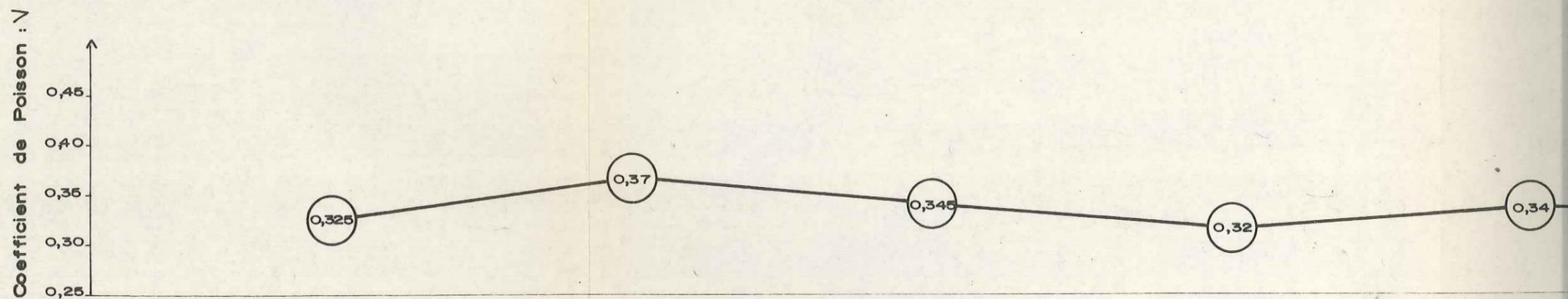


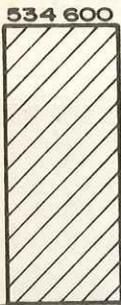






VITESSE LONGITUDINALE	5050	5400	5550	6060	5500
VITESSE TRANSVERSALE	2580	2460	2700	3100	2700





5500
2700

5480
2750

5025
2500

0,34

0,33

0,335



0,05

