Etude géotechnique et hydrogéologique d'aménagements du canal de Provence au nord de Toulon (Var)

Christian Choquet

▶ **To cite this version:**

Christian Choquet. Etude géotechnique et hydrogéologique d'aménagements du canal de Provence au nord de Toulon (Var). Géologie appliquée. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1972. Français. NNT : . tel-00749724

HAL Id: tel-00749724

https://theses.hal.science/tel-00749724

Submitted on 8 Nov 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.

B.U.S. GRENOBLE
D 052 113072 0
Doctorat de 3e cycle
N° d'ordre

DOUBLE
205.142
1972
170 BIS

205142
1972
170 BIS

THESE

PRÉSENTÉE

A L'UNIVERSITE SCIENTIFIQUE ET MEDICALE
DE
GRENOBLE

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR DE 3ème CYCLE

SPECIALITE : SCIENCES DE LA TERRE
MENTION : GEOLOGIE APPLIQUEE

PAR

Christian CHOQUET

ETUDE GEOTECHNIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE d'aménagements du CANAL DE PROVENCE au Nord de Toulon (Var)

SOUTENUE LE 1972, DEVANT LA COMMISSION D'EXAMEN :

BIBLIOTHÈQUE
GRENOBLE - SCIENCES
UNIVERSITAIRE

MM.	R. BARBIER	Professeur	Président
	R. MICHEL	—	Examinateur
	P. VIALON	Maître de conférences	—
	P. ANTOINE	Maître assistant	—
	J. GUILLEN		Invité

205142
1972
170 BIS

Doctorat de 3e cycle
N° d'ordre

THESE

PRÉSENTÉE

A L'UNIVERSITE SCIENTIFIQUE ET MEDICALE
DE
GRENOBLE

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR DE 3eme CYCLE

SPECIALITE : SCIENCES DE LA TERRE
MENTION : GEOLOGIE APPLIQUEE

PAR

Christian CHOQUET

ETUDE GEOTECHNIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE d'aménagements du CANAL DE PROVENCE au Nord de Toulon (Var)

T.73/771

SOUTENUE LE 1972, DEVANT LA COMMISSION D'EXAMEN :

MM.	R. BARBIER	Professeur	Président
	R. MICHEL	—	Examinateur
	P. VIALON	Maître de conférences	—
	P. ANTOINE	Maître assistant	—
	J. GUILLEN		Invité

AVANT-PROPOS

Le travail présenté dans cette thèse est le résultat de seize mois de stage effectués à la Société du Canal de Provence. Aussi je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur R. CLEMENT, directeur des ouvrages généraux et de l'exploitation à la Société du Canal de Provence, qui a bien voulu m'accepter comme stagiaire.

C'est grâce à Monsieur le professeur R. BARBIER que j'ai eu la possibilité et la chance d'effectuer ce stage d'étude prolongée et d'y développer un sujet de géologie appliquée au Travaux Publics. Il me fait un grand honneur en acceptant de présider le jury de cette thèse.

Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont, à un moment ou à un autre, aidé dans ce travail, en particulier :

- Monsieur P. ANTOINE, maître-assistant à la Faculté des Sciences de Grenoble, qui a suivi et orienté mes études ;
- Monsieur J. GUILLEN, géologue à la S. C. P. qui m'a fait profiter de son expérience de la région et des travaux souterrains;
- Monsieur J. PHILIP, maître-assistant à la Faculté des Sciences de Marseille, qui m'a accompagné à plusieurs reprises sur les terrains du Crétacé supérieur du Gapeau et aidé dans les déterminations stratigraphiques ;
- Monsieur P. VIALON, maître de conférences à la Faculté des Sciences de Grenoble, qui s'est intéressé activement à mes recherches sur la fracturation ;
- les ingénieurs du Service "Géotopo" de la S. C. P. qui ont contribué à enrichir ma connaissance dans les domaines paragéologiques ;
- Madame TELMAT et Monsieur CHABERT, à qui je dois la dactylographie soignée et l'impression de ma thèse.

Parvenu au terme de mes études universitaires, je ne saurais oublier l'ensemble du Corps Professoral de l'Institut Dolomieu, qui m'a initié à la géologie et formé à mon futur métier. Que tous trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

SOMMAIRE

Pages

INTRODUCTION

1. - LE PROBLEME DE L'EAU EN PROVENCE 1
2. - BUTS ET PROGRAMME DES AMENAGEMENTS DU CANAL DE PROVENCE 1
3. - AMENAGEMENTS ETUDIES DANS CE MEMOIRE 3
4. - BUT ET PLAN DE L'ETUDE 3

CHAPITRE I - LE CADRE DES AMENAGEMENTS HYDRAULIQUES . 5

1. - CADRE GEOGRAPHIQUE 5
   1.1. - GEOGRAPHIE REGIONALE 5
   1.2. - GEOGRAPHIE DE LA ZONE ETUDIEE 5
      1.2.1. - Situation 5
      1.2.2. - Relief 5
      1.2.3. - Climatologie 6
      1.2.4. - Hydrologie 8
         1.2.4.1. - Généralités - Définitions 8
         1.2.4.2. - Réseau hydrographique 9
         1.2.4.3. - Surface d'alimentation 9
         1.2.4.4. - Module spécifique - Cœfficient d'infiltration 11
         1.2.4.5. - Bilans généraux 12

2. - CADRE GEOLOGIQUE 13
   2.1. - GEOLOGIE REGIONALE 13
      2.1.1. - Introduction historique 13
      2.1.2. - Histoire géologique 14
   2.2. - GEOLOGIE DE LA ZONE ETUDIEE 15
      2.2.1. - Stratigraphie 15
      2.2.2. - Tectonique 18
         2.2.2.1. - Compartiment du Gapeau 19
            2.2.2.1.1. - Le massif d'Agnis 19
            2.2.2.1.2. - L'unité crétacée 19
            2.2.2.1.3. - L'unité triasique et son contact avec le massif du Beausset 19
         2.2.2.2. - Compartiment de Gareoult 22
         2.2.2.3. - Corrélation entre les différentes unités, l'accident du Loou et de Gavaudan 22
         2.2.2.4. - Interprétation tectogénètique 24

CHAPITRE II - ETUDE GEOLOGIQUE APRES TRAVAUX DE LA GALERIE DE SIGNES AVAL

1. - INTRODUCTION 25
   1.1. - BUTS DE L'ETUDE GEOLOGIQUE APRES TRAVAUX 25
   1.2. - SITUATION GEOGRAPHIQUE ET CARACTERISTIQUES DE LA GALERIE 25

Pages

1.3. - CADRE GEOLOGIQUE 26
1.4. - PLAN DE L'ETUDE 26

2. - RESULTATS DU LEVE GEOLOGIQUE DE LA GALERIE 26
2.1. - TECHNIQUE DE CREUSEMENT 26
2.2. - LITHOLOGIE 28
2.2.1. - Nature intrinsèque des roches et stratification 29
2.2.2. - Conséquences pour le creusement et la tenue de la galerie 30
2.3. - FRACTURATION - ANALYSE STATISTIQUE DES DISCONTINUITES 31
2.3.1. - Généralités 31
2.3.2. - Les failles 32
2.3.2.1. - Etude des orientations 32
2.3.2.2. - Etude des écartements 32
2.3.2.2.1. - Mode de prélèvement 32
2.3.2.2.2. - Types de distribution 34
2.3.2.2.3. - Résultats 35
2.3.2.3. - Nature du remplissage 37
2.3.2.4. - Etude de l'orientation des stries 37
2.3.3. - Les diaclases 39
2.3.3.1. - Etude des orientations 39
2.3.3.2. - Etude des écartements 39
2.3.4. - Conclusion sur l'analyse statistique des discontinuités 46
2.3.5. - Influence sur le creusement et la tenue de la galerie 46
2.3.5.1. - Les failles 46
2.3.5.2. - Les diaclases 47
2.3.6. - Influence sur les injections de bétonnage 47
2.4. - HYDROLOGIE 47
2.4.1. - Profil de débit 47
2.4.2. - Concentration des eaux en tritium 50
2.4.3. - Analyses chimiques classiques 50
2.4.4. - Venues d'eau 52
2.5. - KARSTIFICATION 53
2.6. - LE SOUTENEMENT 53
2.6.1. - Les diverses formes de soutènement 53
2.6.2. - Distribution des zones soutenues dans la galerie de Signes aval 54

3. - ESSAI DE GENERALISATION DES DONNEES ACQUISES 54
3.1. - CARACTERISTIQUES GEOLOGIQUES DES ROCHES SEDIMENTAIRES 54
3.1.1. - Roches solides 54
3.1.2. - Roches plastiques 55
3.1.3. - Terrains "non consolidés" et hétérogènes 56
3.1.4. - Hydrologie - Karsts 56
3.2. - DIFFICULTES DE PERCEMENT LIEES A CES CARACTERES ET REMEDES EVENTUELS 56
3.2.1. - Perforation, chargement et tir 56
3.2.2. - Marinage 57
3.2.3. - Hors profils 57
3.2.4. - Tenue de la galerie 61
3.2.5. - Venues d'eau 62
3.3. - TABLEAU RECAPITULATIF 63

4. - COMPARAISON ENTRE LES PREVISIONS ET LE LEVE APRES TRAVAUX 66
4.1. - GENERALITES 66
4.2. - ETUDES ULTERIEURES SUR LE TERRAIN 66
4.2.1. - Etude de la fracturation 66
4.2.1.1. - Photo aérienne 66
4.2.1.2. - Etude microtectonique 66
4.2.1.3. - Comparaison avec la fracturation en galerie 68
4.2.1.4. - Conclusions sur la fracturation - Début d'interprétation tectonique 68

Pages

4.2.2. - Reconnaissances supplémentaires possibles 71
4.2.2.1. - Sondages 71
4.2.2.2. - Etude géologique 71

4.3. - COMPARAISON DES ESTIMATIONS AVEC LA REALISATION 72
4.3.1. - Profils géologiques 72
4.3.2. - Estimations géotechniques 72

4.4. - INTERET DE L'ETUDE APRES TRAVAUX POUR LES CHANTIERS FUTURS 73

5. - CONCLUSIONS SUR L'ETUDE APRES TRAVAUX 74
5.1. - LE PLAN D'UNE ETUDE APRES TRAVAUX 74
5.2. - ETUDE APRES TRAVAUX DE LA GALERIE DE SIGNES AVAL 74
5.3. - EN CONCLUSION 75

CHAPITRE III

ETUDE GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE DES GALERIES DE MONTRIEUX ET VALAURY

1. INTRODUCTION 77
1.1. CONDUITE DE L'ETUDE 77
1.2. SITUATION GEOGRAPHIQUE ET CARACTERISTIQUES DES OUVRAGES 77

2. - ETUDE GEOLOGIQUE REGIONALE 78
2.1. - STRATIGRAPHIE 78
2.2. - TECTONIQUE 79
2.2.1. - Observations générales 79
2.2.2. - Description sommaire des grands accidents tectoniques 79
2.2.3. - Etude de la fracturation du massif 79
2.2.3.1. - Carte des fractures 79
2.2.3.2. - Etude des orientations 81
2.2.3.2.1. - Résultats de la carte 81
2.2.3.2.2. - Analyse structurale 84
2.2.3.2.3. - Corrélations entre les deux échelles 84
2.2.3.2.4. - Interprétation 84

3. - TRAVAUX DE RECONNAISSANCE 84
3.1. - SONDAGES 87
3.1.1. - Choix des emplacements 87
3.1.2. - Technique de sondage 87
3.1.3. - Résultats 87
3.1.4. - Apport des sondages à l'étude géologique du projet 88
3.2. - ETUDE GEOPHYSIQUE 89
3.2.1. - Causes de l'intervention géophysique 89
3.2.2. - Problème posé - Choix de la méthode 89
3.2.3. - Techniques utilisées 89
3.2.3.1. - Sondage électrique 89
3.2.3.2. - Traîné à répétition 90
3.2.3.3. - Représentation des résultats 91
3.2.3.4. - Bilan technique de la campagne géophysique 91
3.2.4. - Etude complète de la galerie de Valaury 92
3.2.4.1. - Sondages électriques 92
3.2.4.2. - Résultats et analyse des planches 36, 37 et 38 93
3.2.5. - Résultats généraux de la campagne 95
3.2.5.1. - Corrélation : résistivité - nature des terrains 95
3.2.5.2. - Profil géotechnique sommaire 96
3.2.6. - Apport de la géophysique à l'étude géologique 96

Pages

3.3. - CARTE A LA COTE DE LA GALERIE 97

4. - ETUDE HYDROGEOLOGIQUE 99
4.1. - PARAMETRES HYDROGEOLOGIQUES 99
4.1.1. - Essai Lugeon 99
4.1.2. - Essai de pompage 101
4.1.3. - Comportement aquifère des différents terrains 101
4.2. - GALERIE DE MONTRIEUX 101
4.2.1. - Les sources de l'aquifère nord 101
4.2.2. - Bilan hydrologique de l'aquifère nord 103
4.2.3. - Relevés piézométriques 103
4.2.4. - Exhaure de la galerie 104
4.2.5. - Influence sur les sources 104
4.3. - GALERIE DE VALAURY 104
4.3.1. - Les sources de l'aquifère sud 104
4.3.2. - Exhaure de la galerie 105
4.3.3. - Influence sur les sources 105

5. - PROPRIETES TECHNIQUES DES DIFFERENTS TERRAINS 105
5.1. - VALEUR LITHOLOGIQUE 105
5.1.1. - Données qualitatives 105
5.1.2. - Données quantitatives 105
5.1.2.1. - Paramètres physiques 105
5.1.2.2. - Analyses chimiques 108
5.1.2.3. - Conséquences 109
5.2. - FRACTURATION 110
5.2.1. - Orientation des plans de fracturation 110
5.2.2. - Mesure de la densité de la fracturation 110
5.2.2.1. - Méthodes d'étude 111
5.2.2.2. - Résultats pour la première méthode 111
5.2.2.3. - Résultats pour la deuxième méthode 112
5.2.2.3.1. - Définition de quelques cœfficients caractérisant la fracturation 112
5.2.2.3.2. - Courbes de fracturation 113
5.2.2.3.3. - Choix des cœfficients les plus représentatifs 116
5.2.2.4. - Mesures sur le terrain 119

6. - LE TRACE DE LA GALERIE 122
6.1. - TERRAINS TRAVERSES 122
6.2. - AVANCEMENT - DIFFICULTES PREVUES 124
6.3. - PROFILS DE SOUTENEMENT 125
6.4. - OUVRAGES ANNEXES 126
6.4.1. - Galerie de Dubliou 126
6.4.2. - Fenêtre de Vignefère 126

CHAPITRE IV - ETUDE HYDROGEOLOGIQUE DE LA PLAINE DE SIGNES

1. - INTRODUCTION 127
1.1. - PREAMBULE 127
1.2. - PROBLEME POSE 127
1.3. - PLAN DE L'ETUDE 127
1.4. - CADRE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE 128

2. - ETUDE HYDROGEOLOGIQUE 128
2.1. - HYDROLOGIE 128

Pages

2.1.1. - Les exutoires 128
2.1.1.1. - Situation géologique 128
2.1.1.2. - Relation : Gapeau - Beaupré 128
2.1.1.3. - Relation : Gapeau - Signes aval 136
2.1.1.4. - Relation : Beaupré - Signes aval 136
2.1.1.5. - Interactions entre ces trois exutoires 139
2.1.1.6. - Tarissement des exutoires 139
2.1.2. - Hydrochimie 143
2.1.2.1. - Analyses chimiques classiques 143
2.1.2.2. - Concentration des eaux en tritium 144
2.1.2.3. - Conclusion 144
2.2. - PIEZOMETRIE DE LA PLAINE DE SIGNES 146
2.3. - CARACTERISTIQUES DE L'AQUIFERE 149
2.3.1. - Limites de l'aquifère crétacé 149
2.3.2. - Caractéristiques hydrodynamiques 149

3. - RESSOURCES EXPLOITABLES 153
3.1. - DEBITS DE L'AQUIFERE CRETACE DE SIGNES 154
3.2. - GALERIE DE SIGNES AVAL 156
3.3. - REALIMENTATION DES SOURCES TARIES ET DES PUITS ASSECHES 156
3.4. - ESSAI DE BILAN DES RESSOURCES UTILISABLES SUR LE VERSANT SUD DE L'AGNIS 156

4. - CONCLUSIONS 157

CONCLUSIONS SUR LA GEOLOGIE REGIONALE 159
CONCLUSIONS GENERALES 161
BIBLIOGRAPHIE 165

LISTE DES FIGURES

Figures — Pages

CHAPITRE I

1 Carte des aménagements du Canal de Provence - Situation des études 2
2 Climatogramme de Saint-Raphaël 6
3 Saint-Maximin - Ajustement des pluviométries annuelles à une loi de Galton 7
4 bis Unités hydrogéologiques 10
4 Implantation géologique générale 16
5 Coupes géologiques à travers les compartiments du Gapeau et de Garéoult 20
6 Schéma structural 22
7 Evolution tectogénétique de la région de Signes-Méounes 23

CHAPITRE II - GALERIE DE SIGNES AVAL

8 Coupe géologique suivant les galeries de Signes aval et Signes amont 27
9 Altérabilité des calcaires marneux de Signes aval 30
10 Diagramme polaire des directions de fractures (accidents majeurs) dans la galerie de Signes aval 33
11 Loi de Gauss 34
11 bis Loi de Galton 35
12 Distribution des écartements entre les failles d'épaisseur supérieure à 1 m (P.M. 1100 à 3460) 36
13 Orientation des stries dans la galerie de Signes aval - Canevas de Wülf 38
14 Orientation des diaclases dans les dolomies - Canevas de Schmidt 40
15 Orientation des diaclases dans les calcaires marneux - Canevas de Schmidt 41
16 Distribution des écartements entre les diaclases. P.M. 1123 43

Figures — Pages

17 Corrélation moyenne écart-type (diaclases) 45
18 Profil de débit dans la galerie de Signes aval 48
19 Evolution des débits en fonction du temps 49
20 Profil hydrochimique 51
21 Niveau des venues d'eau suivant les saisons 52
22 Photo profil du P.M. 2295 58
23 Photo profil du P.M. 2215 59
24 Situation du tunnel par rapport à la stratification 60
25 Carte des fractures du versant sud de l'Agnis 67
26 Diagrammes comparatifs - Versant sud de l'Agnis 69
27 Profils géologiques comparés 72

CHAPITRE III et CHAPITRE IV

28 Carte de la fracturation de l'extrémité orientale du massif du Beausset 80
29 Secteurs d'étude de la fracturation - Localisation des points de mesures 81
30 Diagrammes polaires des directions de fractures (mesures d'après photos aériennes) .. 82
31 " " " " " " ... 83
32 Diagrammes polaires des directions de diaclases (mesures sur le terrain) 85
33 Directions de fracturation - Diagrammes comparatifs 86
34 Schéma du sondage électrique 89
34 bis Schéma du traîné à répétition 90
35 Représentation des sondages électriques 16, 20 et 29 93
36 Coupe des résistivités apparentes 94
37 Traîné de résistivité 95
38 Profil en long électrique ..... --
39 Carte géologique à la cote 300 98
40 Essais de perméabilité type Lugeon 100
41 Essai de pompage dans le S 7 102
42 Essai de compression 106
42 bis Analyse granulométrique du sable dolomitique du S 6 109
43 Coupe du sondage S 5 114
44 } Courbes de fracturation 115
45 }
46 Corrélation entre moyenne et R.Q.D. 117
47 Fracturation et altération dans les sondages 120
48 Variations du R.Q.D. avec la lithologie 121
49 Coupe prévisionnelle des galeries de Montrieux et Valaury (géologie et géotechnique) . 124
50 Corrélation Gapeau - Beaupré 129
51 Relation pluviométrie - débits des exutoires 131
52 Plan de situation générale et schéma des écoulements dans la plaine de Signes 132
53 Développement d'un cône d'appel lors du pompage dans le sondage 4 133
54 Influence du pendage des couches sur la forme du cône de rabattement 135
55 Graphique des volumes cumulés - Gapeau + galerie de Signes aval 137
56 Corrélation Beaupré - Exhaure de Signes aval 138
57 Graphique des débits - Beaupré, Gapeau, Gapeau + galerie de Signes aval 140
58 Courbes de tarissement :
a) galerie de Signes + Gapeau 141
b) Beaupré 141
c) Galerie de Signes 141
59 Concentration en tritium 145
60 Aquifère crétacé de Signes - Cartes de nappe 147
61 Essais de pompage dans le sondage 4 151
62 Forme du cône de rabattement autour du sondage 4 153
63 Influence des pompages sur la piézométrie 155

EN ANNEXE :

- Carte géologique au 1/20 000 : branche de Toulon Est avec échelle stratigraphique

- Carte géologique au 1/10 000 : plaine de Signes avec coupes et blocs diagrammes.

DOCUMENTS

- TOPOGRAPHIQUES

1/200 000 - Carte Michelin n° 84, pli 15
1/100 000 - Carte I.G.N. Toulon
1/50 000 - Carte I.G.N. Cuers, feuille XXXIII 45
Toulon, feuille XXX III 46
1/20 000 - Carte I.G.N., Cuers, n° 2 - 5 - 6 - 7
Toulon, n° 3 - 4

- GEOLOGIQUES

1/80 000 Toulon, 1re édition 1887
" Toulon, 2e " 1951

1/50 000 Cuers (en préparation)
" Toulon 1re édition 1924
" Toulon 2e " en préparation
" Massif de la Sainte-Baume 1939 Corroy
" Feuilles d'Aubagne et de Cuers E. HAUG 1913-1914
B.S.C.G.F., t. XXIII, n° 136, p. 207-220

1/20 000 branche du Var - Toulon Est (S.C.P.) levés personnels janvier 1971
" Cuers n° 2 R. BARBIER S.O.G.R.E.A.H. 1958
1/10 000 plaine de Signes (S.C.P.) février 1970 levés personnels.

INTRODUCTION

1. - LE PROBLEME DE L'EAU EN PROVENCE

La région provençale est bien connue pour son climat dont la douceur permettrait, si l'irrigation était normale, une bonne production agricole. La pénurie en eau n'affecte pas seulement l'agriculture mais aussi le bien-être des populations (tant résidentes que temporaires).

Pourtant les ressources sont loin d'être négligeables ; en effet, la pluviométrie moyenne annuelle ne descend pas au-dessous de 750 mm à l'Est de Marseille (600 mm dans le bassin Parisien). Malheureusement, ces pluies sont assez mal réparties dans l'année et fréquemment de forte intensité. Cela empêche un étalement suffisant des écoulements et la constitution de réserves souterraines importantes, bien que des roches réservoirs existent en bien des points. Cette pénurie a imposé d'aller chercher l'eau ailleurs, là où elle se trouve en abondance.

Depuis fort longtemps déjà, les torrents impétueux de la Durance et de son principal affluent le Verdon, ont assuré la desserte en eau de la Basse Provence occidentale. Il était cependant devenu nécessaire de doubler les ouvrages, parfois fort anciens qui alimentaient les villes d'Aix-en-Provence et Marseille, et de créer un réseau permettant l'irrigation de l'arrière pays toulonnais et de la côte varoise. Telle est l'origine du canal de Provence, ouvrage destiné à combler le retard des régions provençales qui sont privées d'eau par la faiblesse de leurs ressources naturelles.

2. - BUTS ET PROGRAMME DES AMENAGEMENTS DU CANAL DE PROVENCE (*)

Le programme d'aménagement de la Société du Canal de Provence comporte la construction d'un ouvrage de transport et de distribution prenant son origine au partiteur de Boutre établi à l'extrémité du canal mixte construit par l'E.D.F. pour alimenter, à partir du barrage de Gréoux, le canal de Provence et l'usine de Vinon (carte fig. 1).

Cet ouvrage pourra assurer :

- la desserte en eau d'irrigation de 60 000 ha recensés dans les Bouches-du-Rhône et le Var, de l'étang de Berre à l'Ouest jusqu'à la région des Arcs, à l'Est ;
- la livraison d'eau brute aux agglomérations d'Aix-en-Provence, de Marseille, de Toulon et d'Hyères ;
- le renforcement de l'alimentation de 116 communes dans les deux départements ;
- la desserte des zones industrielles comprises dans ce périmètre. L'ensemble comportera un système de télécontrôle qui sera informé automatiquement de la valeur des paramètres : débit, cote des plans d'eau, position des vannes.

Le canal de Provence totalisera une longueur de 250 km, dont plus de 100 km en galeries revêtues ; il se ramifiera ensuite par un réseau de distribution de 3 000 km de longueur. Les dimensions du canal de prise lui permettront de transporter 40 m^3/s et le débit annuel prélevé par l'ouvrage pourra atteindre 650 millions de mètres cubes, à répartir approximativement par tiers au profit de l'agriculture, de l'industrie et des agglomérations urbaines.

(*) On se référera, pour plus de détails, à la thèse de 3e cycle de J. GUILLEN (1969).

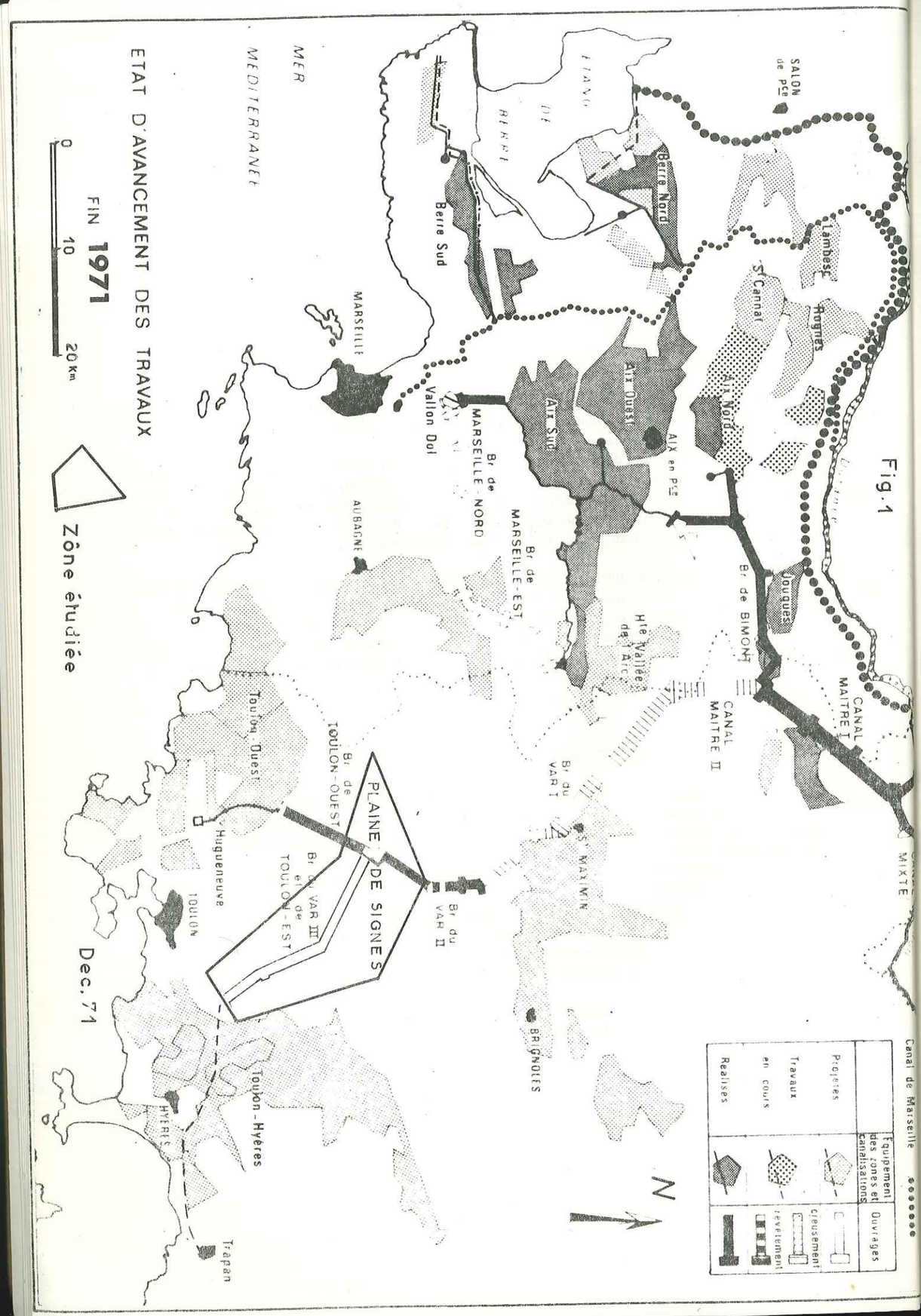


Fig. 1

3. - AMENAGEMENTS ETUDIES DANS CE MEMOIRE

Les études présentées dans ce mémoire en sont à des stades divers du programme d'aménagement (fig. 1).

La galerie de Signes aval (branche du Var 2) est au stade ultime de sa réalisation puisqu'elle est entièrement revêtue. Elle est équipée provisoirement pour capter et drainer les eaux souterraines du massif d'Agnis avant d'en être définitivement isolée lorsque la jonction sera faite en amont avec les ouvrages par lesquels transitera l'eau du Verdon. Cet équipement de la galerie de Signes aval fait partie du plan d'exploitation provisoire des ressources hydrologiques locales pour l'alimentation de la côte varoise en période de sécheresse.

C'est dans cette même optique (exploitation temporaire) qu'a été faite l'étude hydrogéologique de la plaine de Signes.

La branche dite "du Var 3 et de Toulon Est" dont l'ouvrage principal est constitué par les galeries de Montrieux et Valaury, n'en est par contre qu'au stade de projet.

L'étude qui en est faite dans cette thèse a été menée tout d'abord au stade de l'avant-projet. Les conclusions ont été rapportées à la fin de l'année 1970. Puis, les travaux de reconnaissance ayant été poursuivis et complétés, en particulier par les études géophysiques et hydrologiques, nous pouvons présenter l'ensemble des connaissances géologiques et hydrogéologiques acquises au début de l'année 72 qui seront consignées dans l'annexe géologique jointe à l'appel d'offres pour le creusement des galeries de Montrieux et Valaury.

4. - BUT ET PLAN DE L'ETUDE

Les trois études présentées ici semblent n'avoir pour seuls points communs que la proximité géographique des terrains auxquels elles se rapportent et la finalité des aménagements qu'elles concernent (alimentation en eau de la région toulonnaise).

En fait, au cours de l'étude du projet des galeries de Montrieux et Valaury, nous nous sommes rapidement rendu compte de la nécessité, pour faire des prévisions significatives (tenue des terrains, débits rencontrés en galeries, etc.), d'avoir des points de comparaison avec des ouvrages déjà exécutés. Bien que n'ayant pour seule expérience des travaux souterrains le lever géologique après travaux de la galerie de Signes aval, nous avons essayé de rendre compte de l'importance des enseignements à tirer de travaux déjà exécutés pour la réalisation d'ouvrages futurs.

L'étude hydrogéologique de la plaine de Signes s'intègre moins bien au schéma logique des deux premières études. Cependant elle complète et élargit la connaissance restreinte que nous avions de l'hydrologie du versant sud de l'Agnis grâce à l'étude des seuls débits de la galerie de Signes aval (fig. 18).

Après une première partie décrivant d'une manière assez détaillée le cadre géographique et géologique des aménagements étudiés, nous présentons dans une deuxième partie les résultats de l'étude après travaux de la galerie de Signes aval, utilisés dans la troisième partie en complément des reconnaissances géologiques et géotechniques classiques pour le projet des galeries de Toulon Est. La quatrième partie concerne l'hydrogéologie de la plaine de Signes. La conclusion générale fera le point sur ce travail qui, plus qu'une somme de données et de connaissances sur la région en voie d'aménagement, veut être un document sur la manière d'aborder l'étude d'un projet de travaux souterrains.

CHAPITRE I

LE CADRE DES AMENAGEMENTS HYDRAULIQUES

1. - CADRE GEOGRAPHIQUE

1.1. - GEOGRAPHIE REGIONALE

La Provence s'est définie au cours des siècles tant par son histoire que par sa langue et sa culture. Aujourd'hui, elle correspondrait aux départements des Bouches-du-Rhône, du Var, des Alpes-Maritimes (partie située à l'Ouest du Var), du Vaucluse, des Alpes de Haute-Provence.

Couramment on distingue :

- la Haute-Provence, située au Nord de l'axe Verdon-Durance, qui au point de vue géologique, appartient aux Alpes ;
- la Basse-Provence, située au Sud de cette limite est-ouest, qui est la Provence au sens géologique du terme, couvrant les départements des Bouches-du-Rhône et du Var.

La Basse-Provence peut se subdiviser en trois régions naturelles :

- la Basse-Provence rhodanienne,
- la Basse-Provence cristalline, qui correspond aux affleurements de socle constituant les massifs des Maures et de l'Esterel à l'Est de Toulon, enveloppés au Nord par la "dépression permienne" ;
- la Basse-Provence calcaire, pays de modestes chaînons développés au Nord et à l'Ouest de cette dépression permienne, dont les autres limites sont celles de la Basse-Provence.

1.2. - GEOGRAPHIE DE LA ZONE ETUDIEE (Fig. 4 bis et carte au 1/20 000)

1.2.1. - Situation

La zone intéressée par cette étude se situe dans la "Basse-Provence calcaire" (précédemment définie, au Nord Ouest de la dépression permienne), et s'étend selon un parallélogramme dont les sommets sont représentés approximativement par les villages de Signes, Méounes, La Farlède, et au Sud Ouest, Tourris. Elle comprend le versant sud du massif de l'Agnis, prolongement oriental de la chaîne de la Sainte-Baume, englobe intégralement la plaine de Signes et le cours supérieur du Gapeau, couvre l'extrémité orientale du massif du Beausset et s'arrête au Nord du Coudon, colline culminant à 700 m, au-dessus de la dépression permienne.

Notre région d'étude est longée à l'Est par la R N 554, Manosque-Toulon, qui suit le cours du Gapeau jusqu'à son débouché dans la dépression permienne, et traversée au Nord par la RD 2 qui relie Signes à Méounes et la RD 202 qui longe le cours du Haut-Gapeau. La pénétration du massif traversé par les galeries de Toulon Est est facilitée par la route forestière des Morières, reliant Souliès-Toucas à Signes, et par plusieurs chemins d'exploitation carossables dont un partant du couvent de Montrieux-le-Jeune et rejoignant la route forestière, soit au Siou-Blanc, soit près de Morières-les-Vignes.

1.2.2. - Relief

Un fait remarquable ressort de l'examen de la carte topographique couvrant notre secteur : les points culminants atteignent tous des cotes à peu près semblables, aussi bien les sommets dominant au Nord la plaine de Signes (800 m à 830 m) que les hauteurs du massif de Valbelle (778 m), des Morières (775 m), du Jas de Laure (803 m) ou du Grand Cap (783 m). Une hypothèse consiste à considérer que ces points situés à une même altitude seraient les témoins d'une ancienne surface d'érosion, peut-être la surface oligocène qui est peu et mal connue en Provence.

Par contre, une surface arasée sur laquelle reposent en de nombreux points les cailloutis miocènes et discernable dans la topographie actuelle, a été bien étudiée. Elle passe par :

- la plaine de Chibron (415-420 m),
- les Plauques (400 m),
- le replat situé au Sud du Gapeau en bordure du massif de Valbelle (380-400 m),
- les plans qui entourent la vallée sèche de Beaupré à Méounes (410-350 m) empruntée par la RD 2.

C. CORNET (1965) date cette pénéplénation qui affecte dans le même temps d'autres secteurs de la Provence calcaire et cristalline, de l'Aquitano-Burdigalien ou du début du Vindobonien.

Cette physionomie actuelle diffère peu de celle qu'avait la région au Miocène moyen, avec la différence d'un Gapeau entaillant relativement profondément les surfaces pénéplanées (cote 217 m à la papeterie de Méounes), ce surcreusement ayant commencé au Plio-Quaternaire, lors de l'abaissement progressif de la dépression permienne.

La morphologie de cette région est marquée par des formes d'érosion de type karstique :

- les lapiaz (calcaires ou dolomies, très diaclasés et fracturés, érodés par le ruissellement), évoluent dans notre région pour former des chicots ruiniformes séparés par des vallons souvent encombrés de blocs effondrés ;
- souvent se creusent de petites dolines dont le fond tapissé d'argile de décalcification permet le stockage de l'eau de pluie et forme des petites nappes perchées, exploitées parfois par des puits peu profonds (dolines de Morières-le-Cap, Morières-les-Tournes, Polje d'Agnis, dépression de Valbelle).

La plaine de Signes est, à la limite, un grand polje, mais qui, du fait de la présence de Trias imperméable, a un exutoire qui est le Gapeau.

1.2.3. - Climatologie

1.2.3.1. - Le climat provençal

Le climat intervient dans le bilan hydrologique par les précipitations et d'une façon moindre, par les températures auxquelles on peut associer le phénomène d'évapotranspiration.

Il s'agit d'un climat méditerranéen typique. Pour situer le secteur étudié, nous nous bornerons à étudier les limites de la représentativité de deux éléments essentiels du climat : les précipitations et les températures (CAMBON n.d.).

A partir des températures mensuelles moyennes et des hauteurs mensuelles moyennes de pluie observées sur 22 stations météorologiques de la région Provence - Côte d'Azur pendant la période 1891-1930, on a tracé les climatogrammes pluviothermiques de ces stations en reportant sur l'axe horizontal les températures et sur l'axe vertical les hauteurs pluviométriques. On voit que le climat provençal est du type tempéré, avec l'apparition de deux ou trois mois arides pendant la saison estivale. Les climatogrammes des stations de cette région présentent un allongement dont l'axe est parallèle à une des bissectrices du système de coordonnées, les mois les plus chauds devenant également les plus secs. Le climatogramme ci-joint (fig. 2), se rapportant à la station de Saint-Raphaël, montre un maximum pluviométrique centré en octobre, un hiver froid et modéremment pluvieux.

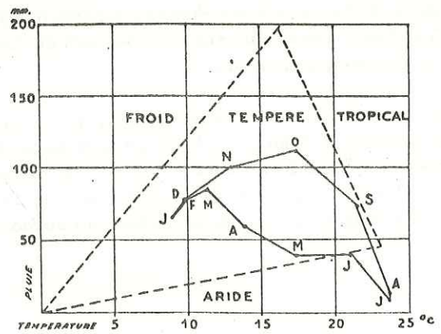


Fig. 2 - climatogramme de Saint-Raphaël

1.2.3.2. - Températures

Les températures représentent une nette différence entre les versants nord et les versants sud. Ainsi à Signes, la température moyenne annuelle est de l'ordre de 16° C, tandis qu'au Plan d'Aups (versant nord de la Sainte-Baume), elle n'est que de 15° C. En tenant compte de l'altitude, qui a une influence certaine, on peut considérer que sur l'ensemble du massif, la température moyenne annuelle est de 14° C. Les températures moyennes mensuelles montrent un minimum en janvier et un maximum en juillet. L'ensoleillement est très important (190 heures par mois à Toulon pendant les périodes 1946 à 1960).

1.2.3.3. - Vents

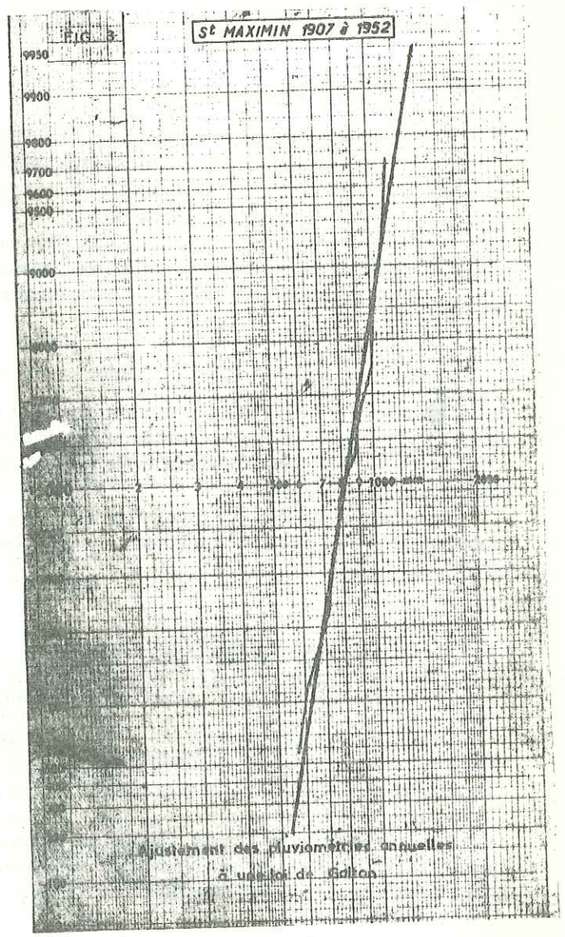
Le vent a une grande importance dans l'évapotranspiration et le vent du Nord appelé "mistral" intéresse les massifs d'Agnis et de Valbelle-Montrieux. Il souffle en moyenne 90 jours par an. Mais les vallées et les versants sud des massifs (sous le vent) sont protégés de son effet. A Toulon, ce sont : le vent d'Ouest, puis le vent d'Est, "le Levant", qui sont prépondérants.

1.2.3.4. - Pluviométrie

Les précipitations ont un régime particulier qui comporte des averses concentrées, intenses, mais peu fréquentes. La pluviométrie n'est pas uniforme sur toute la région et croît avec l'altitude. La moyenne pluviométrique calculée sur 30 ans à Toulon atteint 700 mm alors qu'elle dépasse 900 mm sur les plateaux et sommets de l'arrière-pays. Une étude statistique de la pluviométrie a été faite en se basant sur quatre stations durant de longues périodes, à savoir :

Plan d'Aups	1932-1954
Brignoles	1940-1957
Saint-Maximin	1907-1952
Carcès	1907-1953

On a pu ainsi classer en probabilités les apports d'eau sur la région intéressée. Les calculs sont faits par ajustement à une loi de Galton des totaux annuels de précipitation (voir graphique n° 3 Saint-Maximin)



Ceci conduit aux valeurs suivantes :

	Fréquence de dépassement d'une pluviométrie totale annuelle (en année sur 100)			
	25/100	50/100	75/100	90/100
Plan d'Aups	1 260	1 100	970	860
Saint-Maximin	950	820	720	630
Brignoles	1 080	890	740	625
Carcès	980	860	750	660
Moyenne des 4 stations	1 067,5	917,5	795	694
	en millimètres			

En tenant compte de la différence de pluviométrie en fonction de l'altitude (relation de Mead), et en prenant le Plan d'Aups comme station de référence pour connaître la pluviométrie sur le massif d'Agnis, on arrive à une hauteur d'eau annuelle moyenne égale dans 90 cas sur 100 à au moins 1 000 mm. C'est ce qui ressort d'ailleurs des isohyètes tracées par le Service Météorologique National qui donnent des valeurs variant de 1 000 à 1 100 mm suivant les années.

Pour le massif du Beausset, la carte des isohyètes donne des valeurs plus faibles, de l'ordre de 800 mm par an.

1.2.3.5. Végétation

La végétation est à caractère xérophile et la prédominance des taillis sur la futaie s'accroît du fait de la dégradation causée par l'homme. Enfin le contraste typique entre ubac et adret est extrêmement net. Or, dans la région qui nous intéresse, seul le massif du Grand Cap fournit un ubac. Il est couvert par la vaste forêt domaniale des Morières, essentiellement formée de chênes pubescents.

Les autres unités représentées par leur seul adret sont couvertes de garrigues à chênes-verts (Q. ilex) que l'action répétée de l'homme et des troupeaux a achevé de transformer en terre stérile où l'on note la présence de chênes kermès (Q. coccifera). En altitude, on passe à la lavandaie à pins sylvestres (en particulier vallée du Latay).

1.2.3.6. - Conclusions

La pluviométrie est relativement importante. Pourtant, sa répartition non uniforme et la prépondérance des orages incitent à penser que l'infiltration efficace sera réduite en regard de la pluviométrie totale. L'influence constante du mistral et les températures moyennes élevées sont des observations qui tendraient à prouver la validité de cette hypothèse.

Cependant la karstification poussée des terrains calcaires et dolomitiques situés au cœur des massifs, limitant le ruissellement, est un paramètre favorable à l'infiltration, de même que la faible transpiration due à une végétation clairsemée (sur les adrets).

1.2.4. - Hydrologie

1.2.4.1. - Généralités - définitions

Ce paragraphe sur l'hydrologie de la région étudiée s'impose à deux points de vue.

Tout d'abord, il présente un intérêt dans le domaine de la recherche d'eau à des fins d'exploitation. Nous verrons dans les chapitres II (galeries de Signes aval) et IV (hydrogéologie de la plaine de Signes) que les données hydrologiques sont indispensables pour avoir une idée du débit que l'on pourra extraire du massif, sans détruire l'équilibre entre les apports et les écoulements. L'unité hydrologique intéressée par ces recherches est plus spécialement le versant sud de l'Agnis. Le second aspect de cette étude, par contre, est négatif, puisqu'il conditionne l'exécution des travaux souterrains à travers l'unité orientale du Beausset. Connaissant les débits qui sortent du massif par les sources périphériques

ou sous la forme de transfert à d'autres unités, nous pourrons avoir un ordre d'idée des débits d'exhaure lors du percement des galeries.

L'eau qui tombe sous forme de précipitations sur une région peut, soit ruisseler et alimenter directement le réseau hydrographique, soit s'infiltrer dans le terrain, soit être évapotranspirée.

On peut écrire la relation :

$$P = R + I + E$$

où

P = Pluviométrie
R = Ruissellement
I = Infiltration
E = Evapotranspiration

Cherchons maintenant, en tenant compte du débit écoulé à l'aval de l'unité, à établir un bilan.
Le bilan de surface s'écrit :

$$P - Q = E + p$$

et le bilan de nappe :

$$S + s = I - p$$

Les divers paramètres sont exprimés en volumes, ou en toutes autres unités homogènes entre elles :

P = volume de la pluviométrie
Q = volume écoulé à l'aval de l'unité
E = évapotranspiration réelle
S = volume écoulé aux sources
s = volume prélevé ou donné à la nappe
I = infiltration efficace
p = pertes occultes

Nous définirons le cœfficient d'infiltration α, dans le cas où il n'y a ni pertes, ni apports extérieurs, par la relation suivante :

$$\alpha = \frac{S}{P}$$

Le module (d'une rivière ou d'une source) est le débit moyen annuel (en l/s).

Le module spécifique, exprimé en litres par seconde et par kilomètre carré, représente le module divisé par la surface de bassin versant (ou de bassin d'alimentation, dans le cas d'une source).

1.2.4.2. - Réseau hydrographique

Il est pratiquement inexistant sur les massifs d'Agnis et du Beausset. Quelques ruisseaux temporaires se forment après les orages dans les vallons secs. La plaine de Signes est traversée par le Latay, cours d'eau temporaire qui prend naissance dans la dépression de Chibron.

Au niveau de Signes se fait la confluence avec le Raby dont la source se situe en amont de Châteauvieux. La source du Raby débite en parmanence, mais ses eaux se perdent fréquemment en profondeur pour ressortir un peu plus loin.

Ce n'est finalement qu'au débouché de la plaine de Signes que naît le Gapeau, alimenté par les sources du Gapeau proprement dit, puis par celles de Beaupré. Le cours supérieur du Gapeau draine ensuite le versant nord du massif de Valbelle ; puis la partie moyenne, jusqu'à Solliès-Pont, se grossit de ruisseaux issus des sources réparties tout le long de la retombée orientale du massif du Beausset.

1.2.4.3. - Surfaces d'alimentation (fig. 4 bis)

Versant sud d'Agnis

La superposition de la morphologie du massif aux conditions strictement géologiques précise les surfaces d'alimentation des différents exutoires. Ainsi peut-on délimiter approximativement, pour s'en tenir aux seules sources débouchant dans la plaine de Signes : une zone d'alimentation de Beaupré-Gapeau de 23 km^2 ; une zone d'alimentation du Raby de 7 km^2.

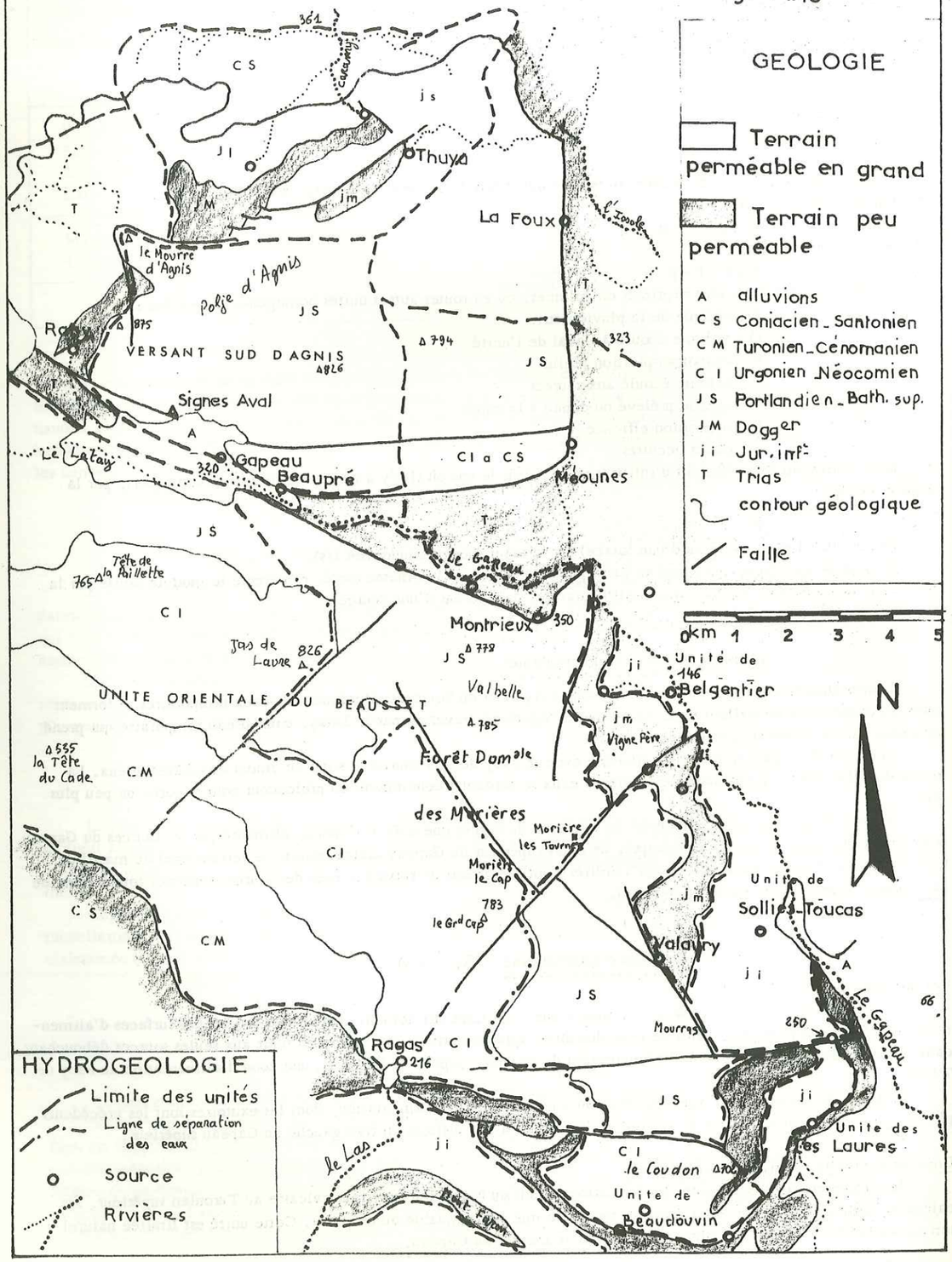
Au total, le versant sud d'Agnis présente 50 km^2 de surface d'alimentation, dont les exutoires sont les précédents plus la source de Méounes, celle de la Foux et les venues d'eau diffuses en rive gauche du Gapeau supérieur.

Unité orientale du massif du Beausset

Nous intégrons dans cette unité les formations allant du Bathonien supérieur calcaire au Turonien supérieur, les calcaires marneux du Dogger étant supposés former le mur imperméable du réservoir. Cette unité est limitée naturellement au Nord par le Trias de Signes, à l'Est par le Dogger du Gapeau.

UNITÉS HYDROGÉOLOGIQUES

Fig. 4 bis



Au Sud, nous l'arrêtons aux massifs du Coudon et du mont Faron non compris, dont les exutoires sont connus (Baudouvin, Saint-Antoine), et qui, pour une cause morphologique, forment d'autres unités hydrologiques. Vers l'Ouest, la ligne de séparation des eaux se fait au niveau des marnes du Sénonien.

1.2.4.4. - Module spécifique - Cœfficient d'infiltration

Les valeurs présentées dans le tableau suivant sont tirées de l'annuaire hydrologique édité par la S. C. P. (S.C.P. 1970).

		1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	moyenne sur 10 ans
Module l/s	Beaupré	107	79	91	131	130	51	49	50	54	68	81
	Gapeau	207	-	154	200	213	76	96	-	45	-	141
MODULE SPECIFIQUE DE GAPEAU + BEAUPRE EN l/s/km^2												9,9
Volume Ecoulé Mm^3	Beaupré	3,4	2,5	2,9	4,1	4,1	1,6	1,6	1,6	1,7	2,1	2,56
	Gapeau	6,5	4,0	4,8	6,3	6,7	2,4	3,0	-	1,4	-	4,39
VOLUME ECOULE GAPEAU + BEAUPRE EN M m^3												6,95
Pluviométrie à Brignoles en mm		1566	1082	799	1122	661	830	944	381	903	830	912

Il ressort de ce tableau plusieurs données intéressantes.

- le module moyen de Gapeau + Beaupré est de l'ordre de 0,2 m^3/s ;
- le module spécifique est de 10 l/s/km^2, ce qui équivaut à une hauteur de précipitations "utiles" de 300 mm. On retrouve cette valeur pour d'autres bassins tels que celui du Caramy, de l'Issole, de la source de Méounes, et pour l'unité de Solliès-Toucas (Lias et Dogger) ;
- le volume moyen écoulé par les deux exutoires du versant sud de l'Agnis, Gapeau et Beaupré, avoisine 7 M m^3/an, chiffre valable avant les travaux de percement de la galerie de Signes aval (1968) ;
- nous prendrons pour valeur moyenne de la pluviométrie sur Agnis 1 000 mm, la hauteur d'eau tombée sur Brignoles étant sensiblement plus faible que ce qui tombe sur le massif.

Massif d'Agnis

Le cœfficient d'infiltration, calculé uniquement sur les surfaces d'alimentation des sources de Gapeau et de Beaupré, est le suivant :

$$\alpha = \frac{S}{P}$$

$S = 7 \times 10^6$ m^3

$P = 23 \times 10^6$ m^2 x 1 m $= 23 \times 10^6$ m^3

$\alpha = 0,3$

Ce résultat est habituel en pays karstique provençal. Il peut être discuté. En effet, la formule utilisée n'est applicable, rappelons-le, que dans le cas où toute l'eau infiltrée dans le massif ressort aux exutoires jaugés. Nous l'avons utilisée ici avec des mesures portant sur plusieurs années, ce qui permet de considérer comme nulle la réalimentation des réserves. En fait, si nous faisons le bilan sur la totalité du versant sud de l'Agnis, représentant 50 km^2, nous nous apercevons que les exutoires jaugés n'écoulent pas la totalité de l'eau réceptionnée (paragraphe 1.2.4.5.).

Il faut donc expliquer cette différence par des pertes occultes, dont une partie peut se déverser vers le karst du Beausset à travers les alluvions de la plaine de Signes, et une autre partie contribuer à des ruissellements diffus le long de la rive gauche du Gapeau. Le cœfficient d'infiltration réel serait donc supérieur au cœfficient apparent calculé.

Unité orientale du Beausset

Les débits moyens des divers exutoires connus de la partie orientale du massif sont les suivants :

Sources alimentant le Gapeau :

Montrieux-le-Jeune	3 l/s
Montrieux-le-Vieux	7 l/s
Gavaudan	5 l/s
Fond de Vin	8 l/s
Foux Lacanal	15 l/s
Source Mathieu	3 l/s
Rouvière	30 l/s
Total	70 l/s

Arrivée occultes entre le Moulin du Gapeau et Montrieux-le-Jeune 150 l/s.

Ragas du Revest, à l'Ouest de Tourris : 480 l/s

Ainsi le débit total aux exutoires : S = 700 l/s = 22 x 10^6 m^3

Superficie du bassin d'alimentation = 120 km^2

Pluviométrie : 800 mm P = 96 x 10^6 m^3

d'où :

$$\alpha = \frac{S}{P} = 0,23$$

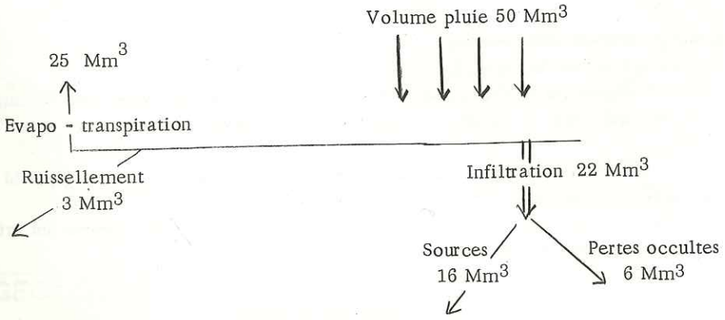
La valeur du cœfficient d'infiltration apparent est plus faible que celle trouvée pour la surface d'alimentation des sources du Gapeau. Cela peut être dû à des pertes occultes plus importantes.

1.2.4.5. - Bilans généraux

Versant sud de l'Agnis (S.C.P. 1965)

Dans les régions karstiques comme le massif d'Agnis, la part due au ruissellement n'excède pas 5 à 10 % de la pluviométrie. L'évapotranspiration, compte tenu du fait que la végétation n'est pas très intense, est de l'ordre de 50 %.

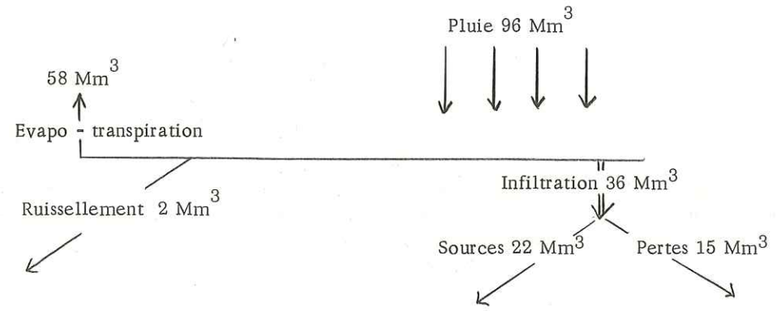
Le volume d'eau infiltrée qui ressort aux sources étant de 30 %, il reste environ 10 % de la pluviométrie qui n'est pas jaugée. C'est ce qu'indique le schéma général suivant, où les volumes indiqués correspondent à une année moyenne.



Extrémité orientale du massif du Beausset

Par analogie avec le bilan précédent qui concerne le versant sud de l'Agnis, cherchons à établir celui de l'ensemble oriental du massif du Beausset.

Sur un impluvium de 120 km^2 (40 km^2 pour le Jurassique des Morières, 50 km^2 pour l'Urgonien du Grand Cap, 30 km^2 pour le Turonien de Maramoye), il tombe annuellement 96 millions de m^3 (pluviométrie 800 mm) qui se répartissent, compte tenu d'un module spécifique moyen de 10 l/s/km^2, (mesuré sur l'unité liasique de Solliès-Toucas), en 36 Mm^3 pour l'infiltration, en 58 Mm^3 pour l'évapotranspiration et 2 Mm^3 seulement pour le ruissellement, la couverture boisée étant plus importante que sur les hauteurs d'Agnis, et les ruisseaux pratiquement inexistants. Les exutoires jaugés donnant au total un débit de 700 l/s, soit 22 Mm^3/an, il reste environ 15 Mm^3 qui vont, soit directement à la mer par les résurgences sous-marines (baie de la Ciotat), soit alimenter d'autres unités (Solliès Toucas, les Laures, le Faron). Les valeurs proposées ici ne sont qu'indicatives. Un bilan plus conforme à la réalité nécessiterait de nombreuses nouvelles mesures dont nous ne disposons pas.



2. - CADRE GEOLOGIQUE

2.1. - GEOLOGIE REGIONALE

2.1.1. - Introduction historique

C'est en Provence que naquît en 1887 la notion de recouvrement (origine de celle des charriages), avec la description de la structure du Beausset par Marcel BERTRAND. Ce dernier la mit en parallèle avec des structures connues de lui dans les Alpes de Glaris et dans le bassin houiller franco-belge. Durant le 19e siècle, les études faites sur la Provence eurent surtout trait à la stratigraphie. Elles sont associées aux noms de Ph. MATHERON, H. COQUAND, A. TOUCAS, L. COLLOT, G. VASSEUR. Les structures tectoniques s'expliquaient alors à l'aide des notions de plis et de failles. A la fin du siècle, Ph. ZURCHER et M. BERTRAND perfectionnèrent ces vues en utilisant le mécanisme des plis dits "sinueux" pour expliquer certaines structures.

M. BERTRAND négligera cette théorie à la suite de ses travaux sur la région du Beausset dont l'aboutissement fut tout d'abord la notion de "recouvrement", puis celle de "charriage". L'usage généralisé que M. BERTRAND fera de ces notions nouvelles le conduira à des excès (?), allant jusqu'à considérer la Provence comme constituée d'une grande nappe de charriage (1899), ce qui suscitera de nombreuses polémiques.

L'école "nappiste" fut essentiellement représentée par E. HAUG (1915 , 1925, 1930), L. BERTRAND et A. LANQUINE qui réalisera également une étude détaillée du Jurassique provençal (1929 à 1935).

Avec L. LUTAUD (1924) sera pris un nouveau tournant dans les conceptions tectoniques. Il montre l'indépendance tectonique de la couverture sédimentaire secondaire, décollée au niveau du Trias moyen au-dessus d'un socle de terrains cristallins surmontés du Permien et du Trias inférieur. Par là même, L. LUTAUD faisait de la Provence une "chaîne de couverture", ramenant au rang d'écailles de couverture de portée plus ou moins grande les chevauchements observés. Quelques années plus tard, L. LUTAUD propose une explication génétique des structures provençales : des phases tectoniques d'âge différent auraient affecté une couverture soumise à autant de phases d'érosion intermédiaires. Ces conceptions annoncent la morphotectonique de L. GLANGEAUD.

Néanmoins, la discussion s'est poursuivie sur l'ampleur réelle des chevauchements. G. CORROY, Cl. GOUVERNET et C. DENIZOT ont cherché à montrer l'enracinement des accidents de couverture sur des accidents de socle. En Provence orientale, A.F. de LAPPARENT (1938) ramena à la dimension de "plis-écailles" la grande nappe que L. BERTRAND et A. LANQUINE y décrivaient encore. J. GOGUEL (1943) montra la dépendance existant entre nature lithologique et style tectonique. G. MENNESSIER devait insister sur la chronologie des mouvements successifs et montrait que certains accidents étaient sans doute des répercussions d'accidents du socle, tandis que J. AUBOIN s'attachait plutôt aux décollements de couverture.

Enfin, plus récemment (1965), C. CORNET décrit l'évolution de la Provence depuis l'Oligocène et met l'accent sur le nombre et l'importance des spasmes orogéniques pendant cette période.

Actuellement de nombreux travaux sont encore en cours sur la Provence, tant sur la stratigraphie (en particulier celle du Trias) que sur la tectogenèse, effectués notamment par des géologues marseillais.

2.1.2. - Histoire géologique

Avant d'aborder la description géologique de la région étudiée, faisons un résumé succinct de l'histoire géologique de la région provençale (AUBOIN et MENNESSIER, 1963).

- Primaire

Pendant la première moitié du Primaire (et peut-être même antérieurement), la région est représentée par un géosynclinal où se déposent des éléments essentiellement pélitiques, qui se trouvent ainsi soumis à un premier métamorphisme.

La phase tectonique hercynienne principale en Provence est d'âge antéstéphanien et correspondrait aux phases sudète et asturienne. Elle est accompagnée d'un métamorphisme général intense et de la mise en place de granite (granite post-tectonique du Plan de la Tour, dans le massif des Maures). Une seconde phase tectonique est post-stéphanienne ; elle amène le plissement, suivant des synclinaux d'axe nord-sud, des dépôts houillers. Par comparaison avec le massif Central, on peut considérer cette phase comme "saalienne".

Enfin, à la phase palatine, de faibles mouvements seraient responsables de la discordance entre le Permien et le Trias. Dès son émersion, au Carbonifère, la chaîne s'érode rapidement et intensément, entraînant une sédimentation importante quoique continentale, qui remplit certains bassins privilégiés. C'est ce qui explique les inégalités brusques de répartition du Permien.

- Secondaire

La transgression du début du Secondaire entraîne une reprise de la sédimentation, d'abord épicontinentale (Trias à faciès germanique) puis marine (Jurassique) ; toutefois, la profondeur ne dépasse que rarement la centaine de mètres. Au Jurassique, la Provence correspond à une dépendance de la mer alpine dont elle constitue le bord méridional. Par opposition au "faciès alpins" on définit des "faciès provençaux" plus néritiques, essentiellement calcaires et dolomitiques.

A l'Albien, un bombement général entraîne l'émersion de l'isthme durancien d'axe est-ouest, sur lequel se formera la bauxite. Cette phase épirogénique sera suivie au Cénomanien d'une transgression en provenance du Sud Ouest (golfe pyrénéo-provençal) qui va envahir l'isthme suivant deux gouttières :

- la gouttière du Beausset, envahie dès le Cénomanien et jusqu'au Campanien supérieur,
- la gouttière du Plan d'Aups-Mazaugues, qui n'est envahie par la mer qu'au Santonien.

Une régression va avoir lieu du Sud Ouest vers le Nord Est, montrant un soulèvement progressif de la zone sud qui entraînera l'exondation définitive.

A la fin du Crétacé supérieur, une phase de plissement met en place les principaux traits structuraux de la Provence actuelle, à savoir les grands bassins synclinaux, séparés par des grandes zones anticlinales qui, alors, devaient être simples. Corrélativement, et jusqu'à l'Eocène se développe une érosion qui attaque particulièrement et profondément les anticlinaux jusqu'au Trias, semble-t-il.

- Tertiaire

A la fin de l'Eocène (Bartonien) va débuter la principale phase tectonique responsable de l'orogenèse provençale (première phase provençale). C'est d'abord la grande phase du décollement de couverture accompagné d'accidents tangentiels témoignant d'une translation générale vers le Nord.

Cette tectonique de couverture est commandée essentiellement par un décollement de la base du Muschelkalk (niveaux argilo-gypseux) sur les niveaux gréseux permotriasiques qui restent solidaires du socle dont ils constituent le "tégument". D'autres décollements existeraient, en particulier dans le Keuper.

Le socle hercynien, lui, est accidenté de failles inverses est-ouest, pinçant le Permien et y induisant des accidents de revêtement.

Ces décollements seraient liés à un soulèvement du "grand massif des Maures", actuellement noyé sous la Méditerranée, et les chevauchements seraient donc de type épiglyptiques (c'est-à-dire "à sec"), en liaison avec la morphologie.

Succédant immédiatement à la précédente a lieu une phase tectonique verticale (deuxième phase provençale) responsable de l'affaissement de divers bassins locaux dans lesquels va se sédimenter l'Oligocène. Dans le même temps, une surface d'érosion se développe, dont on sait peu de chose.

C'est ensuite à la fin de l'Oligocène, le contrecoup de la première phase alpine. Cette phase orogénique est caractérisée par des plis à grand rayon de courbure responsables de l'achèvement des vastes bombements orientés est-ouest, dessinés lors de la seconde phase provençale. Pendant le Miocène se développe une nouvelle surface morphologique, bien connue, caractérisée par l'écoulement d'un réseau hydrographique vers le Nord, depuis le massif des Maures jusqu'au sillon molassique périalpin, au travers de la Provence calcaire.

A la fin du Miocène (Pontien ?), le contrecoup de la deuxième phase alpine entraîne la gauchissement de la surface miocène qui plonge vers le Sud par un mouvement de flexure, à la suite duquel la Méditerranée prend à peu près sa place actuelle. Au Pliocène l'érosion reprend dans de nouvelles conditions. Le réseau hydrographique actuel va se constituer à partir du réseau miocène grâce à diverses captures. Cette érosion va dégager les formes structurales, en particulier la dépression permienne.

- Quaternaire

Le Quaternaire n'apportera plus que des modifications de détail, poursuivant la tendance à l'ennoyage de la Provence vers l'Ouest, ce mouvement de basculement ayant pour pivot la région de Toulon.

2.2. - GEOLOGIE DE LA ZONE ETUDIEE (fig. 4 et cartes en annexe)

2.2.1. - Stratigraphie

2.2.1.1. - Généralités

Les observations stratigraphiques se heurtent à plusieurs difficultés qui ont pour incidence une incertitude dans la détermination précise des ensembles sédimentaires:

- l'allure chaotique des affleurements du Trias, due à leur longue histoire tectonique,
- les variations de faciès,
- la dolomitisation qui envahit irrégulièrement les assises du Jurassique supérieur,
- l'absence de niveaux repères précis, surtout dans le Dogger,
- la grande rareté des fossiles.

Il est toutefois possible d'attribuer une position stratigraphique approximative aux ensembles observés. Dans la région étudiée, les terrains les plus anciens datent du Trias.

2.2.1.2. - Terrains triasiques

Ils apparaissent dans la haute vallée du Gapeau où leur structure plissée extrêmement complexe rend difficile une détermination exacte de la succession lithologique. Nous distinguerons :

- des calcaires compacts, à cassure sombre, en bancs bien lités, présentant souvent des vermiculations noirâtres, à Coenotyris vulgaris, Avicula costata, alternant avec des dolomies qui s'apparentent au Muschelkalk,
- des argiles bariolées, du gypse en amas plissotés, des dolomies et cargneules à grandes cavités à rattacher au Keuper.

2.2.1.3. - Terrains jurassiques

- Rhétien

Cet étage fait généralement corps avec l'Hettangien.

Il est constitué par des alternances de bancs calcaires en plaquettes et de calcaires dolomitiques durs, zonés, et de minces niveaux de marnes vertes. Vers la base s'intercalent des niveaux de lumachelle à Avicula contorta. On note la présence de ces terrains en quelques points de la dépression de Montrieux-le-Jeune où ils semblent être en succession normale au-dessus du Trias.

- Hettangien

On rapporte à l'Hettangien une succession de dolomies gris clair piquetées de petits trous, soit en gros bancs, soit en plaquettes de 10 cm, séparées de minces lits de marnes vertes. Ces dolomies présentent un débit parallélépipédique caractéristique. La dolomitisation englobe probablement aussi le Sinémurien. L'ensemble, épais d'une centaine de mètres, est azoïque.

- Lias supérieur

D'une puissance de 60 m, il est constitué de calcaires à patine rousse, très fossilifères, dont les bancs supérieurs renferment de nombreux nodules de silex gris ou blanc parfois ramifiés. Les faunes recueillies ont permis de reconnaître la présence du Domérien, du Toarcien et de l'Aalénien. Le Lias supérieur forme un ressaut topographique continu très marqué en rive droite du Gapeau, au-dessus de Belgentier et Solliès-Toucas.

- Bajocien inférieur

Il consiste en un mince niveau (quelques décimètres) de calcaires durs, ferrugineux, très fossilifères : "couche à Witchellias" correspondant à un "hard-ground" à ammonites roulées, marquant la limite entre les calcaires du Lias et les marno-calcaires du Dogger.

- "Dogger"

Nous utiliserons ce terme pour désigner la puissante série de calcaires marneux et marnes à Cancellophycus qui en fait ne comprend stratigraphiquement que le Bajocien supérieur et le Bathonien inférieur. Gris sombre à la cassure (présence de matière organique), ils s'altèrent en jaune à l'air libre. Les bancs ont une épaisseur moyenne de 50 cm. Dans le haut de la série, dont l'épaisseur est d'environ 300 m, les bancs calcaires sont plus nombreux et moins argileux.

Le Dogger affleure largement à Vignefère, Valaury et à la tête aval de la galerie de Valaury. Nous l'avons également reconnu dans la galerie de Signes aval.

- Bathonien supérieur

La série marno-calcaire du Dogger est couronnée par une formation néritique et zoogène de 60 à 80 m de puissance, qui forme les premières corniches au-dessus de Vignefère et Valaury. Elle est composée de calcaires compacts beiges et gris, parfois finement sableux et micacés et se termine par des bancs de calcaire oolithique jaune et miel. Localement (sous le couvent de Saint-Hubert, dans quelques sondages, dans la galerie de Signes aval), quelques bancs dolomitiques s'intercalent dans cette succession et quelques couches calcaréo-marneuses minces, parfois sableuses, la terminent.

- Dolomies néojurassiques

Ce sont des dolomies beige clair à gris foncé, saccharoïdes, compactes, à stratification peu nette (sauf dans le haut de la série), créant des reliefs ruiniformes sur le terrain (les Aiguilles, sur le chemin forestier menant à Valbelle ; secteur de la Marseillaise à l'Est de la plaine de Signes). Elles peuvent être sableuses et cargneulisées localement. La présence de nombreux avens prouve qu'un karst s'y développe, dont l'importance sera précisée plus loin.

Limite inférieure : la dolomie grise envahit une formation très réceptive (subrécifale). La dolomie colorée et fine du Bathonien supérieur provient de la contamination de calcaires zoogènes néritiques peu et irrégulièrement réceptifs. La dolomie supra-jurassique serait contemporaine du dépôt, tandis que celle du Bathonien supérieur procéderait d'une épigenèse de sédiments déjà consolidés, par la magnésie de la mer supra-jurassique (C. GOUVERNET).

La dolomitisation envahit donc tous les terrains du Callovien au Portlandien inférieur. L'épaisseur de ces formations est variable : en moyenne de 350 m, elle doit pouvoir atteindre 450 m lorsque la dolomitisation affecte en partie le Bathonien supérieur et le Portlandien.

- Portlandien

Cette appellation désignera les gros bancs réguliers de calcaire blanc sublithographique, à cassure beige, qui surmontent la masse des dolomies néojurassiques. A l'affleurement, ces calcaires sont très lapiazés, ce qui nous laisse supposer qu'un réseau karstique puisse exister en profondeur. La plus grande partie de la barre de calcaires blancs est suprajurassique, la partie supérieure seule pouvant représenter, comme l'écrit LANQUINE, l'extrême base du Valanginien. La limite stratigraphique serait faite par un très fin liséré de marnes vertes azoïques. Puissance 50 à 70 m.

2.2.1.4. - Terrains crétacés

- Néocomien

Cet étage débute par des niveaux de marnes jaunes verdâtres grumeleuses et de calcaires en miches de couleur ocre, alternant avec des bancs (50 cm) de calcaire blanc fin à cassure jaune verdâtre corrodés par les lithophages (épaisseur 15 m). Au-dessus, une barre de calcaires récifaux blancs, fins, d'une trentaine de mètres d'épaisseur présentant de nombreuses sections de petits rudistes, fait la transition avec les calcaires urgoniens dont elle est séparée par un niveau peu épais de calcaires marneux grumeleux correspondant à l'Hauterivien (niveau de Madréporaires). Dans le vallon des Croupatières, au Sud de Signes, se rencontrent des niveaux dolomitisés dans cette barre supérieure. Par contre, vers le Sud (aux Quatre Confronts et sous le Grand Cap), la coupe du Néocomien ne permet pas de distinguer cette barre calcaire supérieure. L'ensemble résulte d'une sédimentation très peu profonde, sur un fond uniforme plat, légèrement incliné vers le Nord. La mer ne s'est jamais retirée, mais le dépôt des sédiments s'est interrompu au milieu du Valanginien, permettant ainsi le développement des lithophages.

- Urgonien

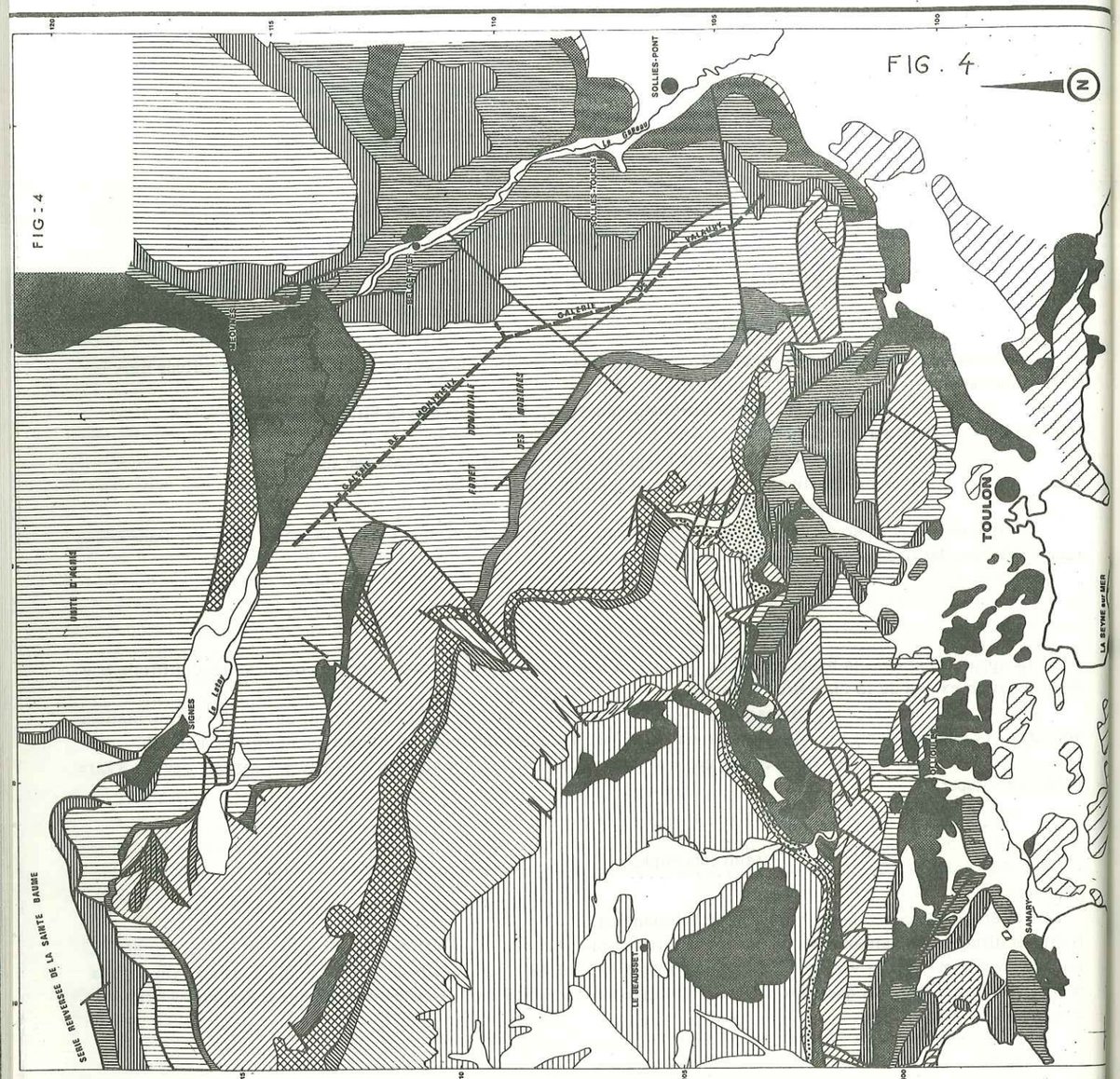
C'est ce faciès du Barrémien qui constitue le sommet du Grand Cap, du Jas-de-Laure et du Coudon. C'est un calcaire blanc, massif, dont les gros bancs parfois mal stratifiés montrent fréquemment des sections de rudistes reconnaissables (Requienia, Toucasia).

La surface en est fortement lapiazée, mais la galerie du Beausset qui a traversé entièrement cet étage en profondeur, n'a pas rencontré de karst important. La puissance de l'Urgonien est d'environ 300 m.

- L'Aptien n'existe qu'au Nord de Toulon (mont Caumes, Revest) et ne dépasse pas à l'Est le méridien de Signes ;
- La lacune de l'Albien correspond à une période d'émersion pendant laquelle s'est formée la bauxite dont l'extension vers le Sud ne dépasse pas le plateau de Mazaugues, car nous sommes sur la bordure sud de l'isthme durancien.

La suite de cette série stratigraphique ne concerne plus que la haute vallée du Gapeau.

FIG. 4



MINISTERE DE L'AGRICULTURE
Direction de L'AMENAGEMENT RURAL ET DES STRUCTURES
Service Spécial du BASSIN de la DURANCE

SOCIETE DU CANAL DE PROVENCE ET D'AMENAGEMENT DE LA REGION PROVENCALE

CANAL DE PROVENCE

BRANCHE DU VAR 3e SECTION ET DE TOULON EST

GALERIES DE MONTRIEUX ET DE VALAURY

IMPLANTATION GEOLOGIQUE GENERALE

MODIFICATIONS — IND. | DATE | DISS. — OBJET

Société du Canal de Provence — Dessiné par : J.P.L. — Echelle : 1/5000 — Surface : 0,96 Cl/cm²

Direction de l'Equipement — Vérifié par :

SERVICE TOPO — 13 - LE THOLONET — Tél : 21.65.50 - 21.62.00

Date — PLAN n° 2.38.2.733 — IND.

Alluvions
Basaltes Miocène
Oligocène Conglomérats calcaire / lacustres et marnes
Sénonien Marnes et marnes gra. zeuses lentilles calcaire à Hippu. rites
Turonien supérieur calcaires lat Turonien inférieur à l'est de Cassis faciès dolomique à la Ciotat
Turonien inférieur marnes et grès
Cénomanien calcaires, calcaires et marnes à Cassis et au Revest
Aptien supérieur marno-calcaire Marnes et marnes grèseuses
Urgonien et Aptien inférieur calcai re Hauterivien et Valanginien sup. érieur dans l'est et dans l'ouest
Valanginien inférieur calcaire argi. Jeux et marnes
Jurassique supérieur et sommet du Jurassique moyen calcaires et dolo mies
Jurassique moyen calcaire argileux et marneux
Lias et intralias calcaires et dolomies
Trias
Permien carbonifère Primaire
Contact stratigraphique
Faille et contact anormal

ECHELLE :

- Cénomanien

La parite nord du vallon du Gapeau constitue le rivage de la transgression cénomanienne qui n'a pas atteint le massif de la Sainte-Baume. Entre Bastide-Blanche et Méounes - au Sud de la Marseillaise - le Cénomanien transgresse donc les formations urgoniennes extrêmement zoogènes dont le développement est maximum au Nord Ouest de Faverolles. Sur l'Urgonien qui se termine par des surfaces taraudées, ferrugineuses, montrant çà et là de minces passées bauxitifères, repose un Cénomanien complet mais réduit. Il débute par un niveau de grès grossier à Ostraces (Exogyra columba et Exogyra flabellata), se poursuit avec des calcaires rognoneux à préalvéolines et une barre récifale à caprinidés couronne le tout. Cet étage n'affleure qu'en pointements réduits du fait de sa localisation sur le trajet de l'accident longitudinal de la bordure sud d'Agnis.

- Turonien

Il débute par des marnes terrigènes gris noir (Ligérien), rares à l'affleurement car souvent laminées le long des accidents, que nous pensons avoir rencontrées en sondage dans la plaine de Signes, sous la masse de calcaire beige fin à rudistes (radiolites) correspondant à l'Angoumien. Puissance de l'Angoumien : 120 m minimum (sondage 4 à Bastide Blanche).

- Coniacien

Il se présente sous deux faciès.
Coniacien inférieur : marnes sableuses à Micraster corbaricus, rhynchonelles, parfois débris de lignite. Puissance : 15 m.
Coniacien supérieur : calcaires spathiques biodétritiques roux en plaquettes soudées, bien visibles en masse à l'Est de Bastide Blanche et au Nord de Beaupré. Puissance : 100 m.

- Santonien

Cet étage est formé essentiellement de calcaires à rudistes comportant de nombreux hippurites, visibles près de la route D 2 de Signes à Méounes, à l'Est de l'embranchement avec la D 202. La présence de niveaux gréseux au sommet de cet étage, près du point coté 366,3, permettrait de faire une corrélation paléogéographique avec les niveaux gréseux du Santonien de Mazaugues.

Ce faciès récifal que l'on retrouve également dans l'Urgonien et dans l'Angoumien entraîne des difficultés de distinction entre les trois étages.

2.2.1.5. - Terrains tertiaires

Les seuls dépôts tertiaires trouvés dans notre région semblent être d'âge miocène. C. CORNET rapporte au Vindobonien des dépôts composés principalement de galets de quartz, de micaschistes et de quartzites, dont la taille varie de 1 cm à 1 m, que l'on rencontre le long de la route de Signes à Méounes, de 1,5 à 3 km à l'Ouest de Méounes. Les argiles brun jaune alternant avec des grès plus ou moins grossiers associés à ces galets se sont avérés azoïques. Ces dépôts, qui reposent toujours sur une surface morphologique à cote constante, proviennent des rivières coulant vers le Nord qui apportaient les produits d'érosion des massifs cristallins situés au Sud de la Ciotat.

2.2.1.6. - Terrains quaternaires

Les terrains récents sont représentés par :
+ des tufs en amas épais tout le long de la vallée du Gapeau dans son trajet nord-sud et au débouché de la source de Gavaudan (captage pour la ville de Belgentier) où ils forment une falaise de 30 m de hauteur,
+ des argiles résiduelles et cailloutis d'altération superficielle que l'on trouve dans les dépressions fermées des massifs dolomitiques (Valbelle, plaine des Selves),
+ les alluvions du Gapeau et les éluvions, qui correspondent à des matériaux ayant effectué un court trajet,
+ des éboulis, relativement peu importants, et localisés au pied des barres calcaires et dolomitiques.

2.2.2. - Tectonique

Nous allons présenter dans ce paragraphe, de façon relativement détaillée car nous n'y reviendrons pas, le compartiment du Gapeau et ses bordures, car c'est lui qui est à l'articulation de la région étudiée, entre le massif d'Agnis et celui de Valbelle-Montrieux. L'interprétation tectogénétique qui pourra être tirée de ces observations et de celles faites, en particulier par C. CORNET, sur le compartiment de Garéoult situé plus à l'Est, s'étend à tout le domaine concerné par nos trois études.

Seule l'étude détaillée de l'extrémité orientale du massif du Beausset sera reprise dans le troisième chapitre de cette thèse.

2.2.2.1. - Compartiment du Gapeau (fig. 5 a)

Du Nord au Sud, nous examinerons les ensembles structuraux suivants :
l'anticlinal d'Agnis, la bande crétacée de Méounes, le Trias du Gapeau et ses relations avec le massif de Valbelle-Montrieux.

2.2.2.1.1. - Le massif d'Agnis

Les hauts plateaux du massif d'Agnis qui culminent à 915 m, sont formés de dolomies néojurassiques, de faible pendage général, sauf au-dessus de la plaine de Signes où les couches plongent jusqu'à 40° vers le Sud Est.

Les bancs supérieurs sont des calcaires sublithographiques de couleur claire attribués au Portlandien, qui affleurent en particulier au-dessus de l'entrée de la galerie de Signes aval, à l'Est du village de Signes. Ces couches se terminent en biseau dans les dolomies vers le vallon de la Panousse.

Ce massif appartient à l'écaille qui, plus au Nord, recouvre le synclinal crétacé autochtone de Mazaugues. La coupe offerte par le front de chevauchement montre que les dolomies néojurassiques du massif reposent normalement sur les autres termes du Jurassique jusqu'à l'Hettangien inclus. Cette masse repose évidemment sur du Trias, mais celui-ci n'a pas suivi jusqu'au front lors du décollement. La galerie du Canal de Provence qui traverse le chevauchement a effectivement recoupé, entre l'Hettangien et le Crétacé supérieur, des niveaux gypseux triasiques.

Les calcaires et dolomies jurassiques sont limités au Sud par un grand accident à peu près rectiligne, de direction N 120° au niveau de l'entrée de la galerie de Signes aval, puis N 100° plus à l'Est (faille de la Marseillaise), qui les met en contact avec le Crétacé supérieur de Beaupré-Méounes.

2.2.2.1.2. - L'unité crétacée (carte au 1/10 000)

Cette unité forme une bande de 10 km de longueur sur 800 m de large au maximum, étirée WNW-ESE depuis l'usine à plâtre au Nord Ouest de Signes jusqu'au-dessus de Méounes. Le Crétacé de Beaupré-Méounes n'est autre que la couverture normale du massif de l'Agnis effondrée entre Agnis et le Trias du Gapeau par les failles de la Marseillaise au Nord, de Méounes au Sud.

Cette unité est composée essentiellement de calcaires récifaux et de calcaires plus détritiques dont les âges vont du Portlandien au Santonien, les terrains les plus récents étant situés à l'Ouest (région de Beaupré). De nombreuses failles affectent le Crétacé et créent des compartiments dont les relations stratigraphiques ne sont pas toujours évidentes du fait du laminage fréquent des niveaux marneux intermédiaires : absence quasi générale du Valanginien entre Portlandien et Urgonien, étirement du Cénomanien. Ces failles au sein du Crétacé semblent être postérieures à la faille de la Marseillaise, qu'elles décalent par endroits dans la partie orientale.

L'étude du pendage des couches effectuée entre la source du Gapeau et le méridien de la Marseillaise fait apparaître deux directions axiales :

N 40° penté 15° vers le SW et N 140° penté 10° vers le NW, dont la conjugaison tend à former une cuvette synclinale à cœur de Coniacien et même de Santonien. Plus à l'Est (carte au 1/20 000), il ne reste plus que le flanc nord du synclinal étiré EW, coupé par la faille de Méounes au niveau de l'Angoumien.

La partie occidentale de la bande crétacée masquée un moment par les alluvions de la plaine de Signes entre les sources du Gapeau et le village de Signes, se rétrécit et se termine au niveau de l'usine à plâtre dans le vallon du Raby où les failles de la Marseillaise et de Méounes se rejoignent pour n'en former plus qu'une seule. A l'affleurement, on se trouve en présence d'une sorte de brèche tectonique à grande échelle, à gros blocs de calcaires spathiques et de calcaires récifaux du Crétacé supérieur. En certains points on trouve dans cette brèche des conglomérats de petits galets de quartz émoussés à ciment rouge argileux.

L'ensemble, appelé Bégudien par de nombreux auteurs, se compose peut-être en fait de deux formations différentes :
- le Crétacé supérieur, prolongation des terrains de Beaupré ;
- des placages d'alluvions stampiennes ;

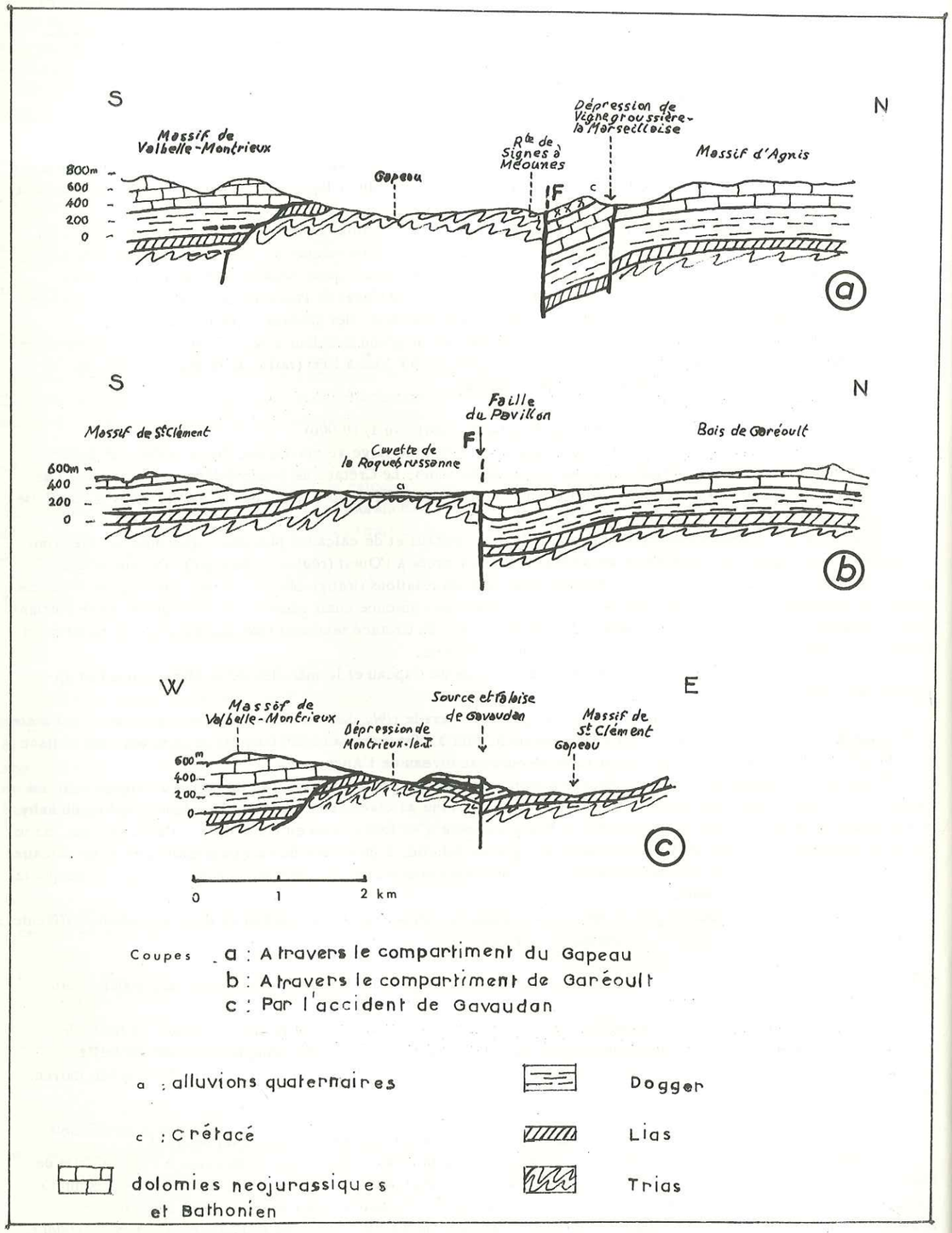
le tout "pris en sandwich" et écrasé entre les failles de la Marseillaise et de Méounes. Nous avons cartographié cette zone sous la légende :

Crétacé supérieur indifférencié, sur la carte au 1/10 000 de la plaine de Signes. La faille de Méounes est postérieure à la phase antésannoisienne puisqu'elle sectionne des dépôts stampiens (miroirs de faille verticaux sur la D 2 à l'Ouest de Méounes). Cependant, n'ayant pas dénivelé les dépôts fluviatiles du Miocène moyen, elle est antévindobonienne.

2.2.2.1.3. - L'unité triasique et son contact avec le massif du Beausset

Le Trias du Gapeau forme une bande à peu près parallèle à la bande crétacée qui se raccorde à l'Est au Trias de Méounes-La Roquebrussane. Juste à l'Est de Beaupré, c'est le Muschelkalk qui affleure. La tectonique en est complexe, les pendages généralement très redressés. Au Nord Ouest de Signes, des pointements de gypse (dont une carrière abandonnée qui alimentait l'usine à plâtre), révèlent la présence de Keuper. La forme générale du Trias est à tendance anticlinale d'axe WNW-ESE avec de nombreux replis internes de même direction générale. Une étude stratigraphique et tectonique détaillée en est faite actuellement par J.P. CARRON.

FIG. 5



Le Trias s'enfonce plus au Sud, sous le massif de Valbelle et il est nécessaire d'étudier de près ce contact.

+ Le contact anormal de Valbelle-Signes

Au Sud des Montrieux, entre le Trias et les dolomies néojurassiques affleurent de l'Hettangien ainsi que du Lias moyen et supérieur très réduits et dont les bancs sont très redressés. Plus à l'Est, les dolomies néojurassiques ont débordé les terrains du Lias et de l'Infralias pour venir recouvrir le Trias. Le contact anormal sinueux fait donc apparaître une sorte de demi-fenêtre dégagée par l'érosion. Ce chevauchement est très localisé. Vers l'Ouest en effet, juste au-dessus de Montrieux-le-Vieux, les terrains liasiques puis infraliasiques disparaissent tandis que le contact devient à peu près rectiligne. Ce sont maintenant les bancs calcaires du Portlandien, parfois recouverts eux-mêmes des marnes vertes du Valanginien, qui sont directement mis en contact - suivant un plan légèrement déversé vers le Nord - avec des dolomies, gypses et cargneules du Trias. Plus à l'Ouest le contact, limitant de nouveau les dolomies néojurassiques, passe sous les alluvions quaternaires de la plaine de Signes et ressort au Nord Ouest de Signes pour reprendre ensuite vers le Nord un contour sinueux, le long duquel le Jurassique supérieur repose successivement sur le Trias, le Lias et même le Bathonien.

+ La faille de la Lauzière

Plusieurs failles, postérieures à la mise en place de l'écaille de Signes (et du chevauchement de Montrieux), puisqu'elles intéressent aussi bien les terrains décollés que le Trias, affectent la région de Signes. La plus importante est la faille de la Lauzière, qui sectionne un peu au Nord de la Lauzière les éléments de l'écaille elle-même et qui se confond sur 2 kilomètres au Nord Ouest de Signes avec le contact entre l'autochtone et l'unité de recouvrement.

En effet le compartiment septentrional, surélevé, a été l'objet d'une érosion plus complète qui a déblayé les terrains chevauchants et mis à nu l'autochtone : d'où la correspondance dans la topographie actuelle du contact de chevauchement et de la faille.

Au Sud Est de Signes, la faille de la Lauzière, masquée par les alluvions, ressortirait toujours confondue avec le contact anormal Trias-Jurassique supérieur, pour se terminer avant Montrieux où le contact redevient sinueux.

+ Interprétation

La mise en évidence d'un décollement n'est plus à faire (C. CORNET, 1957-1958), les contours de la région sont significatifs. Mais dans la région de Montrieux, on constate le débordement du Lias par les dolomies néojurassiques et la disparition du Bathonien et du Bajocien, étages pourtant puissamment développés, formés de calcaires et calcaires marneux.

Nous proposons deux hypothèses :

- la première (C. CORNET, 1965, p. 42) considère que le contact anormal de Valbelle-Signes n'est pas seulement celui d'un décollement. Les structures antésannoisiennes se compliquèrent notablement lors de la surrection oligocène de la voute triasique qui a recoupé les unités sus-jacentes. C'est dans ce cadre que s'explique la disparition du Bajocien et du Bathonien. Enfin, entraîné avec le Trias et arraché comme un copeau par la masse chevauchante, un peu de Lias a été déporté vers le Nord.

- nos levés personnels et les résultats des sondages de reconnaissance effectués par la Société du Canal de Provence sur le massif de Valbelle nous conduisent à modifier sensiblement les coupes géologiques nord-sud et est-ouest en travers du compartiment du Gapeau présentées par C. CORNET (1965, p. 41) et à chercher de nouvelles hypothèses.

Tout d'abord, il ressort de nos levés dans la région des Montrieux que l'Infralias et le Lias qui y affleurent représentent la couverture normale du Trias du Gapeau, très tectonisée par les différentes phases tectoniques d'où leur aspect chaotique et leur laminage. D'autre part, l'étude géologique des divers sondages montre que la portée du chevauchement du massif de Valbelle ne peut être aussi grande que C. CORNET ne l'indique sur ses coupes (plus de trois km) et si le plan de discontinuité est, autour de la dépression des Montrieux, pratiquement horizontal , il est probable qu'il se redresse très vite à l'intérieur du massif. C. CORNET (1958) montre que, outre le dérapage de la couverture secondaire au niveau du Keuper, d'autres décollements ont pu se produire, au sein des assises marneuses du Dogger et à la base des dolomies néojurassiques, permettant l'avancée plus au Nord des niveaux supérieurs.

C'est également ce que nous pensons après avoir remarqué dans plusieurs sondages un niveau souvent bréchique, ou fracturé, ou même parfois sableux vers la base de la formation dolomitique.

Cependant, pour rendre plausible le recouvrement par les dolomies néojurassiques du Trias et du Lias du Gapeau lors de la phase paroxysmale antésannoisienne, il ne suffit pas d'invoquer uniquement l'intense érosion éocène, mais encore faut-il peut-être supposer qu'un accident cassant, dans l'axe de l'anticlinal de Méounes, avait déjà affaisé le compartiment sud, mettant ainsi le sommet de la formation secondaire au niveau du Trias du Gapeau. Après la phase tangentielle, cet accident aurait rejoué à l'Oligocène (mouvements verticaux de socle) pour donner la faille de la Lauzière.

2.2.2.2. - Compartiment de Gareoult

Ce domaine comportant les unités suivantes, du Nord au Sud :

- le massif de la Loube-l'Amarron et la barre de Saint-Quinis,
- le Trias de Garéoult,
- les massifs de Thèmes et Saint-Clément,

est en dehors du terrain que nous avons personnellement levé.

C'est pourquoi nour reprendrons l'étude de C. CORNET (1965, p. 41 à 43) et la coupe géologique (fig. 5b) qu'elle en a tiré.

- Les massifs de la Loube -l'Amarron et de Saint-Quinis

Le complexe de la Loube et de l'Amarron est essentiellement constitué par une voûte anticlinale décollée et chevauchant, vers le Nord, le Crétacé supérieur et le Jurassique du synclinal de Camps-les-Brignoles.

- La faille du Pavillon

Au Nord Est de la cuvette de La Roquebrussane, près de la ferme du Pavillon, une belle brèche de faille montre des morceaux de calcaire blanc portlandien, enrobés dans du Keuper. Malgré le recouvrement d'alluvions quaternaires, rendant inobservables les raccords entre le massif de la Loube et le Trias de la cuvette, on peut penser que la faille se continue à l'Ouest jusqu'à la falaise du Loou et que les contacts entre les anticlinaux de la Loube et de l'Amarron avec la voûte triasique de la plaine de la Roquebrussane-Garéoult soient partout de même nature.

- Le Trias de Garéoult et les massifs de Thèmes et Saint-Clément

Malgré le comblement de la plaine par des alluvions récentes, on peut se convaincre facilement de la continuité du Trias au Sud de la faille du Pavillon : chaque affleurement visible montre du Muschelkalk. Le contact au Sud avec les synclinaux de Thèmes et de Saint-Clément se complique de quelques écailles dues à ce que le massif est légèrement décollé de son soubassement triasique, mais le Trias s'enfonce normalement sous les séries liasiques et jurassiques.

Ce rapide exposé met en lumière l'identité structurale entre les deux régions triasiques du Gapeau et de Garéoult, mais avant de conclure, il est indispensable d'examiner le raccord entre les différentes unités.

2.2.2.3. - Corrélation entre les différentes unités, l'accident du Loou et de Gavaudan

L'identité structurale des régions occidentale et orientale est évidente sur les figures 5 et 6.

L'une comme l'autre offre, du Nord au Sud, un synclinal autochtone chevauché au Sud par un anticlinal qui bute lui-même vers le Sud, par le jeu d'une faille, contre une voûte triasique qui disparaît plus au Sud encore, sous un ensemble liasique et jurassique qui présente une tendance plus ou moins prononcée au décollement. La structure des deux systèmes relève du même style tectonique, mais les unités comparables sont décalées de 6 kilomètres entre les deux compartiments. Ce décalage nord-sud se produit au long d'une zone de cisaillement causée par un décrochement au sein des massifs d'Agnis-la-Loube et de Valbelle - Saint-Clément. Cet accident se suit le long des falaises du Loou et de Gavaudan.

Dans le bassin de Méounes, les deux compartiments sont triasiques, d'où l'impossibilité de suivre la trace du décrochement.

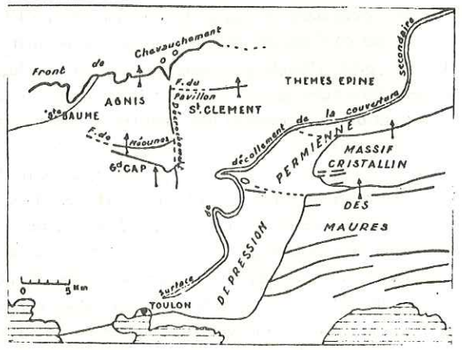
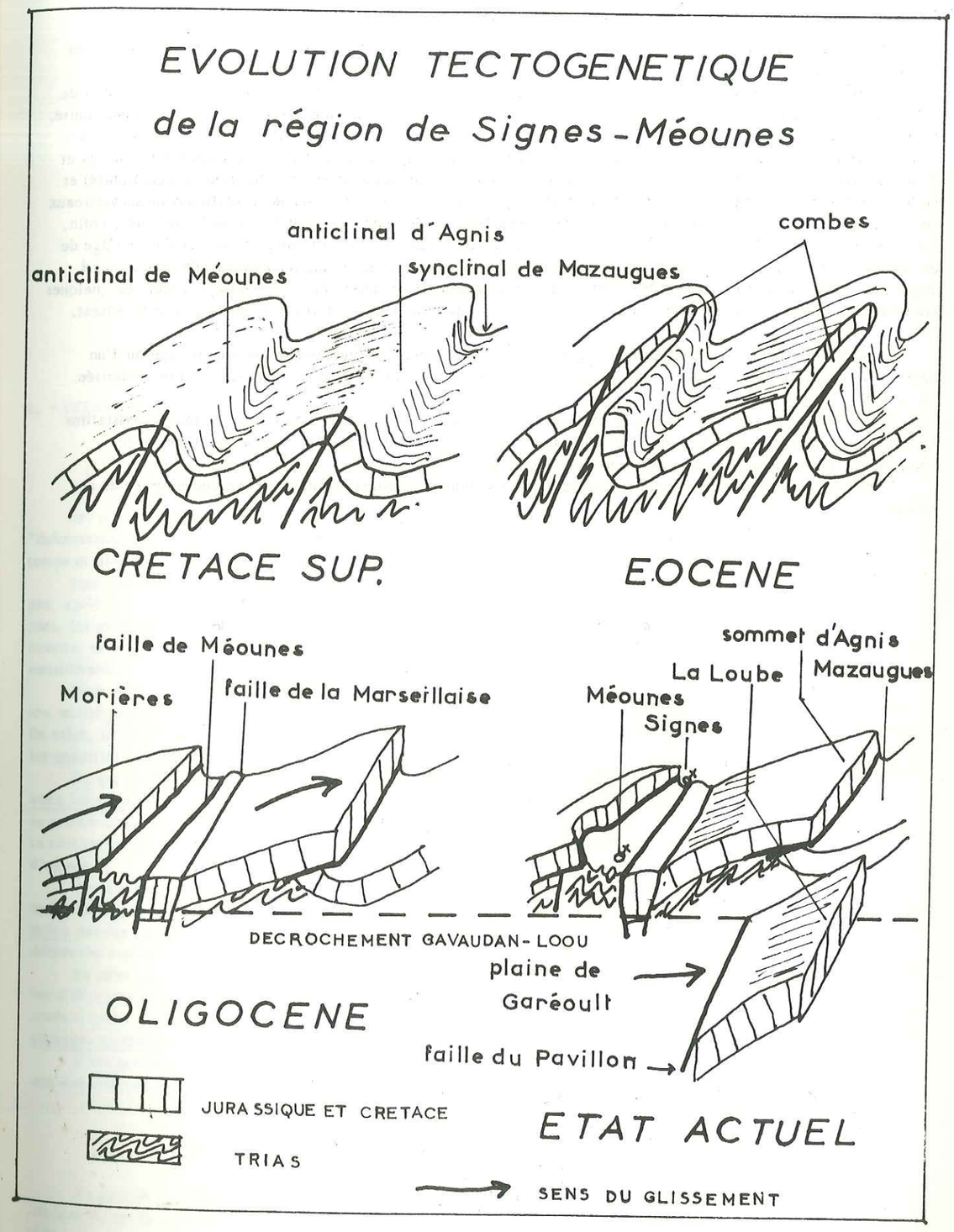


Fig. 6 - Schéma structural (d'après C. CORNET, 1957) -

FIG. 7



2.2.2.4. - Interprétation tectogenètique (fig. 7)

La genèse structurale se dégage aisément. Le décrochement du Loou n'a décalé que tardivement les unités du système oriental par rapport à celles du système occidental. Initialement, les rides anticlinales d'Agnis et de la Loube - Saint-Quinis se situaient sur un même parallèle, ainsi que les aires synclinales de Valbelle-Montrieux et de Saint-Clément-Thèmes. De la sorte, il est clair que les failles de Méounes et du Pavillon étaient aussi en continuité. La phase néocrétacée avait été à l'origine des aires anticlinales et synclinales qui s'écaillèrent lors des mouvements antésannoisiens, donnant ainsi naissance aux recouvrements de Mazaugues et de la Loube, de Valbelle-Montrieux et de Saint-Clément. Plus tard, mais avant le Vindobonien, les failles de Méounes-le Pavillon (alors en continuité) et celle de la Lauzière permirent la montée du Trias du Gapeau et de Garéoult. Ces accidents verticaux ou subverticaux correspondent à une tectonique uniquement cassante caractéristique de mouvements du vieux socle cristallin. Enfin, l'accident du Loou et de Gavaudan décrocha la partie orientale qui progressa de 6 kilomètres vers le Nord - l'âge de cet accident est difficile à préciser -. Ce cisaillement est peut-être à rattacher aux mouvements de reploiements oligocènes décrits par AUBOIN et MENNESSIER (1963), responsables de bombements et de creux de l'ordre de quelques kilomètres au maximum, d'axe sensiblement parallèle à ceux des déformations antésannoisiennes, donc Est-Ouest.

Le moteur des mouvements est inconnu ; s'agit-il d'une tectonique de revêtement due à un serrage ou d'un mouvement de couverture occasionné par le glissement de celle-ci sur l'infrastructure dont elle s'est désolidarisée par le jeu de la gravité ?

Cette dernière hypothèse n'est pas exclue, puisqu'au Sud se dressait une aire culminante de terrains cristallins à l'emplacement des Maures. Décalant les failles de Méounes et du Pavillon qui elles-mêmes sectionnent le Stampien, le décrochement du Loou-Gavaudan est post-stampien.

Il est d'autre part antéaquitanien, la surface d'érosion aquitano-burdigalienne ne portant aucune trace de reploiement.

CHAPITRE II

ETUDE GEOLOGIQUE APRES TRAVAUX DE LA GALERIE DE SIGNES AVAL

1. - INTRODUCTION

1.1. - BUTS DE L'ETUDE GEOLOGIQUE APRES TRAVAUX

Les principaux intéressés au relevé géologique après travaux d'une galerie sont bien sûr les géologues "théoriciens" qui s'attachent à décrire la structure tectonique du massif traversé et à retracer son évolution dans le temps et dans l'espace.

Bien souvent, malheureusement, la société qui finance les travaux, ou l'entreprise qui les exécute ne s'attardent pas, après le creusement, à faire des relevés géologiques précis, dont ils ne voient pas l'intérêt immédiat. D'autre part, les géologues "universitaires" qui travaillent dans la région où se déroulent les travaux ne sont pas toujours avertis, ni autorisés à visiter et à lever la géologie dans les galeries, et si celles-ci sont revêtues, c'est une somme considérable d'informations qui est perdue.

Mais dans le cas d'une galerie hydraulique, qui doit être revêtue, l'intérêt immédiat du levé géologique est son utilité pour la suite des opérations effectuées en galerie, en particulier le bétonnage et les injections de collage. En effet, le relevé des différentes failles, de leur importance, de leur remplissage, permet de contrôler et d'expliquer les quantités de béton utilisées par l'entreprise.

Ce qui est toujours fait dans une étude après travaux est la comparaison des relevés géologiques et géotechniques avec les estimations prévisionnelles. Le levé géologique sera la base de discussions pour régler un contentieux entre le maître d'œuvre et l'entreprise. Par exemple, si les prévisions de percement s'avèrent trop optimistes par rapport à la réalisation, le retard pris dans le creusement ne sera pas imputé à l'entreprise mais pris en charge par le maître d'œuvre.

Cette comparaison montre la marge d'incertitude qui existe lorsque l'on fait les prévisions géologiques et géotechniques d'un ouvrage. Mais on peut aller plus loin en recherchant si ce que l'on rencontre en galerie aurait pu être prévu par des reconnaissances plus complètes sur le terrain. Il s'agit donc d'affiner et de compléter l'étude de terrain, démarche ingrate et peu exaltante dès lors que les travaux sont terminés, mais cependant non stérile.

En effet, pour des chantiers aussi importants que ceux mis en œuvre par la Société du Canal de Provence, dont les différentes galeries traversent souvent des terrains analogues, il est heureusement apparu que le levé géologique après travaux d'un ouvrage apportait des éléments irremplaçables basés sur l'expérience acquise pour la prévision des ouvrages ultérieurs.

C'est pourquoi, depuis le début des travaux de la Société, des études après travaux de plus en plus détaillées ont été effectuées.

1.2. - SITUATION GEOGRAPHIQUE ET CARACTERISTIQUES DE LA GALERIE (fig. 1)

La galerie de Signes aval, orientée NE-SW, de 4 750 m de longueur, dernier ouvrage vers l'aval de la branche du Var II, est la suite vers le Sud de la galerie de Signes amont, elle-même précédée au Nord par la galerie de Mazaugues. Cette galerie traverse les terrains de la retombée sud du massif d'Agnis, avec une pente de 7/10 000 vers la sortie aval, pour déboucher dans la plaine de Signes, à proximité de ce village, à la cote 315,48 m. Son diamètre, après revêtement, est de 3,10 m et une fois mise en charge, elle pourra écouler un débit de 13 m^3/s.

Le déroctage a duré 20 mois et s'est achevé en juillet 1968. La jonction avec la galerie de Signes amont, dont le creusement se poursuivait, a été faite en juillet 1971.

1.3. - CADRE GEOLOGIQUE (fig. 4)

La galerie de Signes aval traverse le flanc sud du massif d'Agnis, grand anticlinal de terrains jurassiques, chevauchant au Nord le synclinal crétacé de Mazaugues. Le versant sud de l'Agnis constitue un simple monoclinal dont les couches plongent vers le Sud Est, avec un faible pendage au centre du massif, puis assez fortement - jusqu'à 45° - au-dessus de la plaine de Signes. Au fur et à mesure qu'elle s'enfonce sous le massif, la galerie rencontre donc des terrains de plus en plus anciens, du Portlandien au Dogger marneux. Les terrains jurassiques d'Agnis sont limités, juste à l'entrée aval de la galerie, par la prolongation de la faille de la Marseillaise qui les met en contact avec un lambeau de Crétacé supérieur, appartenant à la couverture normale d'Agnis, effondré entre le massif et le Trias du Gapeau à la faveur des failles, de la Marseillaise au Nord et de Méounes au Sud.

Pour replacer la galerie de Signes aval dans son contexte géologique, on se reférera à la coupe (fig. 8) effectuée suivant les galeries de Signes aval et Signes amont (Nord-Sud) qui donne la structure générale de tout le massif d'Agnis.

1.4. - PLAN DE L'ETUDE

Cette étude comprend trois parties :

- La première partie rapporte les résultats du levé géologique, géotechnique et hydrologique de la galerie de Signes aval. Ces résultats figurent sous forme analytique sur une coupe au 1/1 000 de la galerie que nous ne pouvons joindre à cette thèse à cause de ses dimensions excessives. Mais les principaux points considérés ont été traités de manière à donner l'aperçu le plus juste de la "personnalité" de la galerie ; en quelque sorte, sa fiche signalétique. Pour chaque caractère considéré, son incidence sur le creusement et les moyens mis en œuvre pour surmonter les problèmes ont été exposés.

- Dans la deuxième partie, nous présentons d'une manière générale, mais en nous appuyant sur des exemples concrets pris dans les différentes galeries que nous avons visitées ou étudiées, - surtout celle de Signes aval -, un essai de synthèse sur la manière dont on peut aborder l'étude du creusement d'une galerie en terrain sédimentaire. Partant des caractéristiques "objectives" des roches sédimentaires, nous considérons leur influence sur le creusement d'une galerie et cherchons quelles solutions ont été choisies par les exécutants. En bref, cette partie se résume en trois mots :

causes, effets, remèdes.

Nous changeons d'optique avec la troisième partie, qui traite de la comparaison entre les prévisions (antérieures ou postérieures au creusement) et la réalité. Nous pourrons en tirer des enseignements sur la manière de conduire une campagne de reconnaissance et nous soulignerons l'importance de l'expérience acquise après percement pour la prévision d'un ouvrage futur.

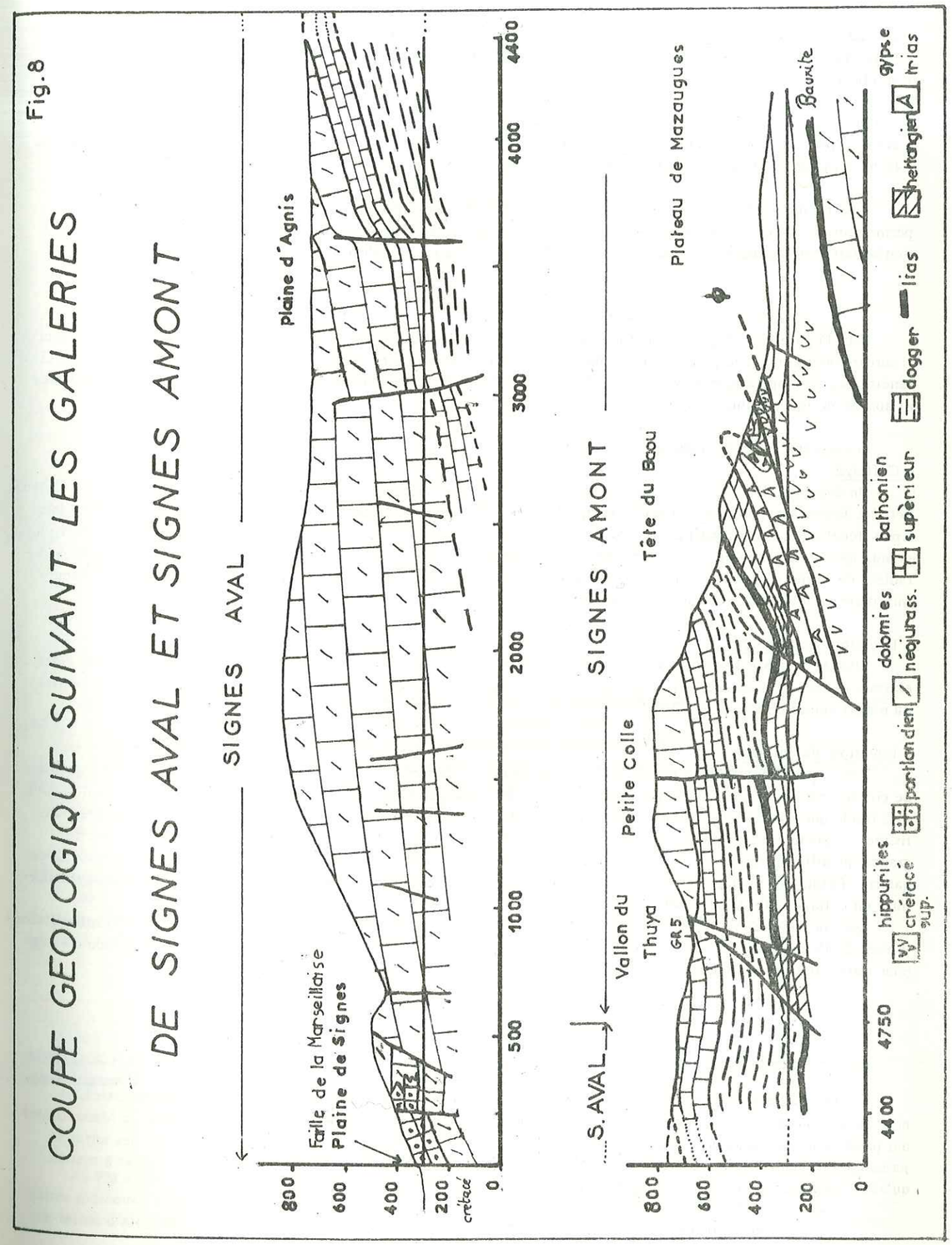
2. - RESULTATS DU LEVE GEOLOGIQUE DE LA GALERIE

2.1. - TECHNIQUE DE CREUSEMENT

Avant d'aborder la description de la galerie, voyons en quelques mots quelle technique a été utilisée pour la réalisation de l'ouvrage. Cette galerie hydraulique destinée à transporter de l'eau sous une charge de quelques bars doit être étanche. Etant donné la perméabilité relativement grande des terrains qu'elle traverse, il est nécessaire de la revêtir entièrement d'une couche de béton armé résistant à la poussée des terrains et à la pression interne de l'eau. C'est pourquoi la réalisation d'une galerie de ce type se fait en deux phases : la phase de déroctage ou percement, sensu stricto ; la phase de revêtement.

Fig.8

COUPE GEOLOGIQUE SUIVANT LES GALERIES DE SIGNES AVAL ET SIGNES AMONT



2.1.1. - Le percement

Il a été effectué, en pleine section et suivant la méthode classique, en trois temps :
- foration des trous de mine à l'aide d'un perforateur du type "jumbo" à fleurets multiples ;
- tir, effectué suivant un schéma variable suivant le terrain ;
- marinage, c'est-à-dire évacuation des déblais correspondant à chaque volée (en moyenne de 3 m) ;
- le pilotage de la galerie est assuré en permanence par une équipe de topographes qui corrigent le cap ;
- en arrière du front, des équipes sont chargées de la pose des boulons d'ancrage, des grillages de protection, des cintres et des palplanches si nécessaires, et installent la voie ferrée sur laquelle circuleront les wagonnets assurant le marinage. Celle-ci nécessite généralement la construction d'un préradier en béton, le roulage des wagonnets étant responsable, par les vibrations qu'il engendre, du décollement de blocs et du fluage des terrains argileux. Au fur et à mesure de l'avancement, la galerie est purgée de ses blocs instables.

A la fin du creusement, des photos profils (3.2.3.) sont prises par les topographes tous les 5 mètres de galerie, permettant de calculer le volume des hors-profils et indiquant les zones dont le profil doit être rectifié. La rectification se fait, soit au marteau-piqueur, soit avec de faibles charges d'explosif.

2.1.2. - Le revêtement

Pour la galerie de Signes aval, il a eu lieu après le percement des 4 750 mètres, et de l'amont vers l'aval. Parfois, il suit immédiatement le percement, en particulier lorsque le terrain est très instable (Signes amont). Mais la simultanéité des deux opérations impose une parfaite coordination dans les manœuvres des rames empruntant la voie ferrée et abaisse de toute manière le rendement de l'une et de l'autre.

Les travaux de revêtement se font en trois temps :

- Coffrage

Un dispositif de coffrage au gabarit exact de la surface d'écoulement est mis en place sur une longueur de 6 mètres, derrière lequel est injecté le béton. Le temps de prise, permettant le décoffrage, varie de 12 heures à plus d'un jour. Après décoffrage, le dispositif est déplacé de 12 mètres. Les passes intermédiaires seront bétonnées après un délai plus grand, lorsque le béton de la première série d'anneaux est bien durci. Seuls la calotte et les piedroits sont revêtus. Le radier, de forme concave, ne sera coulé qu'à la fin, pour permettre aux rames de continuer à circuler. L'épaisseur minimale du revêtement est de 20 centimètres.

- Injections de bourrage

Elles se font par des trous forés en voûte. La pression n'excède pas 2 bars. Le mélange injecté remplit les vides existant encore en couronne et les conduits karstiques qui n'ont pas été bouchés. Le but est de rétablir la "solidarité" du massif autour de l'anneau bétonné.

- Injections de collage

Enfin, pour consolider le massif autour de la galerie et prévenir toute fuite ultérieure, on procède aux injections de collage par des trous forés en quinconce, à raison de 4 forages à angle droit tous les 5 mètres. L'injection du coulis, plus fluide que celui utilisé lors du bourrage, est poursuivie généralement jusqu'au refus, afin d'injecter les moindres fissures, mais la pression peut être limitée à 10 bars ou moins si les terrains trop perméables en absorbent une trop grande quantité. La moyenne, en terrains fissurés, se situe autour de quelques centaines de kilogrammes par mètre de galerie. Enfin, des sondages carottés sont exécutés en certains points de la galerie pour vérifier l'efficacité et l'uniformité du collage entre la roche et le béton.

Les injections de collage n'ont pas encore été faites dans la galerie de Signes aval, afin de ne pas perturber l'écoulement de l'eau dans les fissures, puisque cette eau est captée et doit être utilisée temporairement en période d'étiage pour l'alimentation de Toulon.

2.2. - LITHOLOGIE

La tranchée d'accès à la galerie est creusée dans les terrains du Crétacé supérieur, principalement calcaires, présents ici sous un aspect chaotique dû à la présence d'une grande faille orientée WNW-ESE (faille de la Marseillaise) qui passe juste au niveau de l'entrée de la galerie. La galerie elle-même est creusée uniquement dans les terrains jurassiques du massif d'Agnis, dont les couches pendent en moyenne de 30 à 45° vers le Sud Est. Au fur et à mesure qu'elle s'enfonce sous le massif, la galerie rencontre donc des terrains de plus en plus anciens.

de 0 à 400 m : calcaires du Portlandien
400 à 3 000 m : dolomies néojurassiques
3 000 à 3 560 m : calcaires et dolomies du Bathonien supérieur
3 560 à 4 750 m : calcaires marneux du Dogger.

2.2.1. Nature intrinsèque des roches et stratification

2.2.1.1. - Calcaires du Portlandien

Le Portlandien se présente en bancs de 20 centimètres à 4 mètres d'épaisseur de calcaire sublithographique à cassure claire, esquilleuse. Il n'y a pas d'interbancs marneux, mais la stratification est très nette. Sur les 200 premiers mètres, les couches pendent fortement vers l'entrée de la galerie, puis elles prennent l'orientation générale du versant sud d'Agnis, avec un pendage toujours redressé.

Les propriétés mécaniques du calcaire portlandien sont bonnes. Les essais de compression effectués sur des échantillons provenant du massif des Morières donnent des résistances de 900 bars en moyenne et un module d'élasticité élevé (500 000 bars).

2.2.1.2. - Dolomies néojurassiques

Plusieurs analyses chimiques, effectuées dans le sondage de reconnaissance S 25, à 850 mètres de l'entrée, ont donné les résultats suivants, auxquels on a ajouté les essais de résistance à la compression Rc, la densité, et la résistance à l'usure.

S 25	3,20 m	22,70 m	43,00 m	60,20 m	95,70 m
CO_3 Ca	60,6	60,0	60,4	58,2	60,8
CO_3 Mg	37,7	37,9	38,8	39,9	37,8
Silice	1,33	1,76	0,57	1,62	1,37
RC (bars)	1220	830	498	743	773
Densité	2,75	2,75	2,74	2,71	2,70
Usure (en mm pour 1000 m de parcours)	2,27	2,92	3,2	4,92	4,9

L'essai d'usure se fait avec une meule Dorry sur des éprouvettes parallélépipèdiques, de 6 x 4 x 2 cm découpées dans les carottes. Les éprouvettes sont chargées à 0,25 bar sur l'anneau d'usure.

Le sable, composé à 50 % d'éléments de granulométrie comprise entre 0,1 et 0,2 cm et à 50 % d'éléments compris entre 0,2 et 0,32 cm, s'écoule sur l'anneau à raison de 100 grammes de sable sec par minute, mouillé par un filet d'eau. L'usure est mesurée en millimètres pour 1 000 mètres de parcours.

Une mesure de porosité totale effectuée sur un échantillon prélevé en galerie donne une valeur de 6,8 %.

Il s'agit donc en fait d'un calcaire dolomitique compact et dense. Nous continuerons cependant à appeler dolomies, qui est le terme consacré dans la région, ces roches beige clair à beige foncé, saccharoïdes, qui créent en surface des reliefs ruiniformes caractéristiques.

Ces dolomies sont parfois légèrement sableuses et leur altération poussée peut conduire à la formation de poches de sable d'importance variable. En galerie, la stratification est peu visible et parfois semble-t-il, inexistante. Les pendages qui ont pu y être relevés concordent avec ceux pris en surface, soit N 30° à 50° penté 30° vers le Sud Est.

2.2.1.3. - Calcaires du Bathonien supérieur

Du PM 3 000 au PM 3 560, la galerie a été creusée dans des calcaires beiges compacts, à stratification nette, en alternance avec des calcaires dolomitiques et des dolomies de couleur orangé à roux, à rattacher au Bathonien supérieur qui comporte de telles lentilles dolomitisées.

2.2.1.4. - Marno-calcaires du Bathonien et du Bajocien

Au PM 3560, une zone broyée de quelques mètres d'épaisseur met en contact de l'ensemble précédent les calcaires marneux, à cassure noire et conchoïdale du "Dogger". Le long des joints de circulation d'eau, la roche prend une teinte d'altération ocre ou rouille, témoignant de la présence de fer dans la masse. Certains bancs sont entière-

ment oxydés sur quelques mètres, ce qui donne au terrain un aspect bicolore que l'on retrouve également en surface. Ce phénomène d'oxydation d'une roche formée en milieu réducteur semble donc se faire autant en profondeur sous l'action unique des infiltrations aquifères, qu'en surface au contact de l'air et des agents atmosphériques.

Vers le fond de la galerie, donc plus bas dans la série, apparaissent de minces lits de marnes (5 cm d'épaisseur), tandis que les calcaires marneux sont en bancs de 20 à 40 cm. La direction des couches oscille entre N 20° et N 40°, avec un pendage faible vers le Sud Est. Dans les derniers 300 m, les couches pendent vers l'amont de la galerie. Un échantillon de calcaire marneux compact prélevé au PM 4 510 a une densité de 2,68 et une porosité totale de 4,1 %. L'essai d'altérabilité (normes AS TM C 88), figure 9, effectué dans une solution de sulfate de sodium avec des échantillons de calcaires marneux de Saint-Maximin, de Signes et de calcaires dolomitiques de la galerie de Tourves met en lumière la forte altérabilité des calcaires marneux de Signes qui explique le phénomène évoqué au paragraphe suivant (2.2.2.).

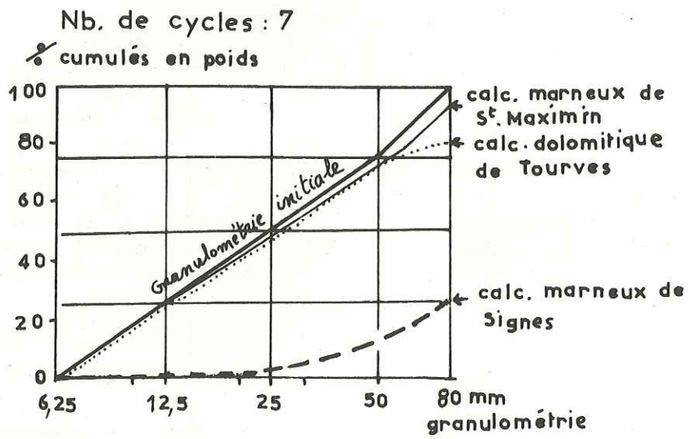


Fig. 9 - Essais d'altérabilité (normes AS TM C 88) -

2.2.2. - Conséquences pour le creusement et la tenue de la galerie

- Portlandien

La stratification (en gros bancs pentés vers l'aval) des calcaires du Portlandien, a nécessité fréquemment un soutènement par cintres et surtout l'épinglage des bancs en calotte. Les hors-profils sont relativement importants ; ils sont dus également à une fracturation très marquée.

- Dolomies néojurassiques et calcaires bathoniens

Dans les dolomies, la nature homogène et massive des roches a facilité en général un très bon découpage de la section et un avancement rapide pratiquement sans soutènement dans les zones saines. L'altération sableuse, due à une cargneulisation poussée, a donné lieu à quelques débourrages, en particulier au PM 3 000, au contact faillé des dolomies et des calcaires bathoniens, où la présence d'eau rendait les "sables" boulants. Le découpage s'est fait également dans de bonnes conditions dans les terrains du Bathonien supérieur où la stratification plus marquée n'était cependant pas un handicap.

- Calcaires marneux

Pour la portion creusée dans les calcaires marneux du Dogger, de 3 600 m à 4 750 m, le cas est assez particulier. En effet, lors du creusement, très peu de cintres furent posés, les calcaires marneux étant de bonne tenue et peu fissurés. Cependant, quelques mois plus tard, un écaillage se produisit tout le long de la galerie, et des blocs se sont mis à se détacher brutalement en calotte et à partir des pieds-droits, précédés par un claquement sec analogue à un coup de fusil. La majeure partie de cette portion de galerie a dû être, soit soutenue par cintres et protégée par des plaques d'envol, soit gunitée.

Nous pouvons proposer trois hypothèses pour expliquer ce phénomène à retardement. Les deux premières sont basées sur les propriétés de gonflement des argiles.

a) Gonflement par décompression de la roche autour de la galerie.

Il est commun à toutes les argiles et fonction de l'intensité des compressions subies antérieurement par la roche. Il se réalise par réabsorption d'eau en proportion limitée. L'emprunt d'eau se ferait, non pas aux dépens de l'air humide de la galerie mais, par circulation capillaire très lente, à partir de l'eau des régions voisines de la galerie, des zones comprimées vers les zones détendues.

b) Gonflement par hydratation

Il ne concerne que les argiles du groupe des montmorillonites, très avides d'eau, dont l'augmentation de volume se mesure dans un rapport de 1 à 10. La pression d'hydratation peut atteindre 10 bars. Il ne semble pas que cette hypothèse soit ici la bonne, aucun gonflement n'affectant des morceaux de calcaires marneux laissés dans l'eau pendant une longue période.

c) Dessication et écaillage

Dans une troisième hypothèse, nous pouvons considérer qu'à l'inverse d'une hydratation, les parois de la galerie sont soumises à une dessication. Parler de dessication dans une galerie dont l'hygrométrie approche souvent 100 % peut sembler inopportun. Il faudrait parler en fait de baisse de la teneur en eau. Lorsque la galerie vient d'être percée, l'eau contenue dans la roche tend à migrer vers la zone de dépression créée par la cavité. Après un temps plus ou moins long, il y a réajustement de l'équilibre des forces dans le massif et il se forme un "anneau de contrainte" à quelques mètres autour de la galerie. A condition que la roche ait une certaine plasticité - c'est le cas des calcaires marneux massifs et isotropes -, on peut imaginer que cet anneau forme un barrage imperméable aux circulations du massif, tout au moins au niveau des microfissures.

La dessication relative des calcaires marneux entraîne la formation de fissures de retrait dans les roches proches des parois de la galerie. Or, la pression sur celles-ci atteint presque 200 bars dans une galerie enfouie à plus de 300 mètres (poussée double de la pression hydrostatique). Au moment où la résistance à la compression de la roche fissurée devient inférieure à 200 bars, des éclats de roches sont brutalement projetés dans la galerie ; c'est ce qui expliquerait le claquement sec précédant la chute des blocs dans la galerie de Signes aval.

Cette hypothèse basée sur le phénomène d'écaillage des parements par dessication est étayée par quelques exemples :

- ce sont les parties sèches de la galerie de Signes aval qui ont commencé à s'écailler et à s'ébouler, suivies par les zones plus humides ;
- dans une autre galerie, on a remarqué que ce phénomène s'était produit localement au-dessus de compresseurs, dégageant de la chaleur, installés dans une niche ;
- des carottes de calcaires marneux ou de marnes laissées à l'air libre se dessèchent en quelques semaines et des fissures de retrait apparaissent, responsables de la desquamation de la roche.

Il est à noter que les zones qui avaient été protégées par un revêtement de béton projeté imperméable au cours du déroctage, n'ont en général pas été affectées par ce phénomène.

2.3. - FRACTURATION - ANALYSE STATISTIQUE DES DISCONTINUITES

2.3.1. - Généralités

Les moyens de description de l'état de fracturation d'un massif sont basés sur l'étude systématique des discontinuités. Celles-ci déterminent des volumes dont les dimensions sont mesurées depuis l'angström jusqu'au kilomètre ; pratiquement en galerie, les discontinuités mesurées vont du centimètre à l'hectomètre.

Les discontinuités qui séparent les volumes élémentaires d'un massif sont, soit originelles (sédimentation), soit la conséquence de déformations déterminées, créant des surfaces de rupture (fissures, diaclases, failles). Ce sont ces dernières que nous étudierons.

On définit un réseau de discontinuités par une orientation moyenne dans l'espace, une extension moyenne et une maille des éléments constitutifs, par l'épaisseur des discontinuités et éventuellement par la matière qui s'y trouve. B. SCHNEIDER (1967) adopte le système de classement suivant, basé sur la morphologie et les moyens de reconnaissance.

- Microdiscontinuités

Discontinuités mécaniques de la roche, décelables au microscope, qui comprennent pratiquement toutes les petites fissures de moins de 5 microns, coupant et contournant les cristaux, mais laissant toutefois l'échantillon entier. Elles présentent donc une certaine cohésion.

- Fissures

Discontinuités décelables à vue à l'affleurement, ne revêtant pas un caractère systématique en orientation et de faible extension. Les épaisseurs n'excèdent pas quelques dizièmes de millimètre.

Il ne faut pas confondre ces fissures existant dans la roche avec des surfaces de rupture plus ou moins irrégulières, que l'on peut observer en paroi de galerie et qui sont dues à l'action mécanique de l'explosif.

- Joints (diaclases, plans de sédimentation)

Discontinuités visibles à l'affleurement revêtant un caractère systématique en direction et présentant des surfaces relativement planes et étendues.

- Cisaillements

Discontinuités où des évidences de mouvements relatifs sont visibles. Les surfaces en contact sont, soit striées, soit revêtues de minéraux d'altération formant miroir, soit même de faibles épaisseurs de mylonite.

- Failles

Discontinuités planes ou non où les rejets sont notables. Les remplissages sont parfois importants, mais surtout l'extension de l'accident est grande.

Notre étude en galerie porte uniquement sur les diaclases et les failles, au sein desquelles on a groupé les cisaillements.

2.3.2. - Les failles

2.3.2.1. - Etude des orientations

Pour traduire les directions de fracturation principales, nous avons porté sur un histogramme enroulé (fig. 10) avec un pas de 10°, la fréquence relative d'apparition d'une faille de direction donnée. Les failles étant généralement verticales, cette représentation est suffisante. Nous n'avons pris en compte que les accidents majeurs reportés sur la coupe géologique au 1/1 000. Chaque faille a la même valeur, quelles que soient ses caractéristiques. Les résultats fournis par l'histogramme enroulé sont les suivants :

- fracturation intense suivant la direction N 95° et, un peu moins fréquente, suivant la direction N 120-130° qui correspond d'ailleurs à l'orientation moyenne de la faille de la Marseillaise ;
- un pic de moindre importance pour la direction N 170° qui se développe surtout dans la partie aval de la galerie ;
- sur un canevas de Schmidt, où nous avons reporté les plans de failles relevés en galerie, une concentration de points ressort en outre suivant la direction N 85° penté 50° vers le Nord.

2.3.2.2. - Etude des écartements

2.3.2.2.1. - Mode de prélèvement

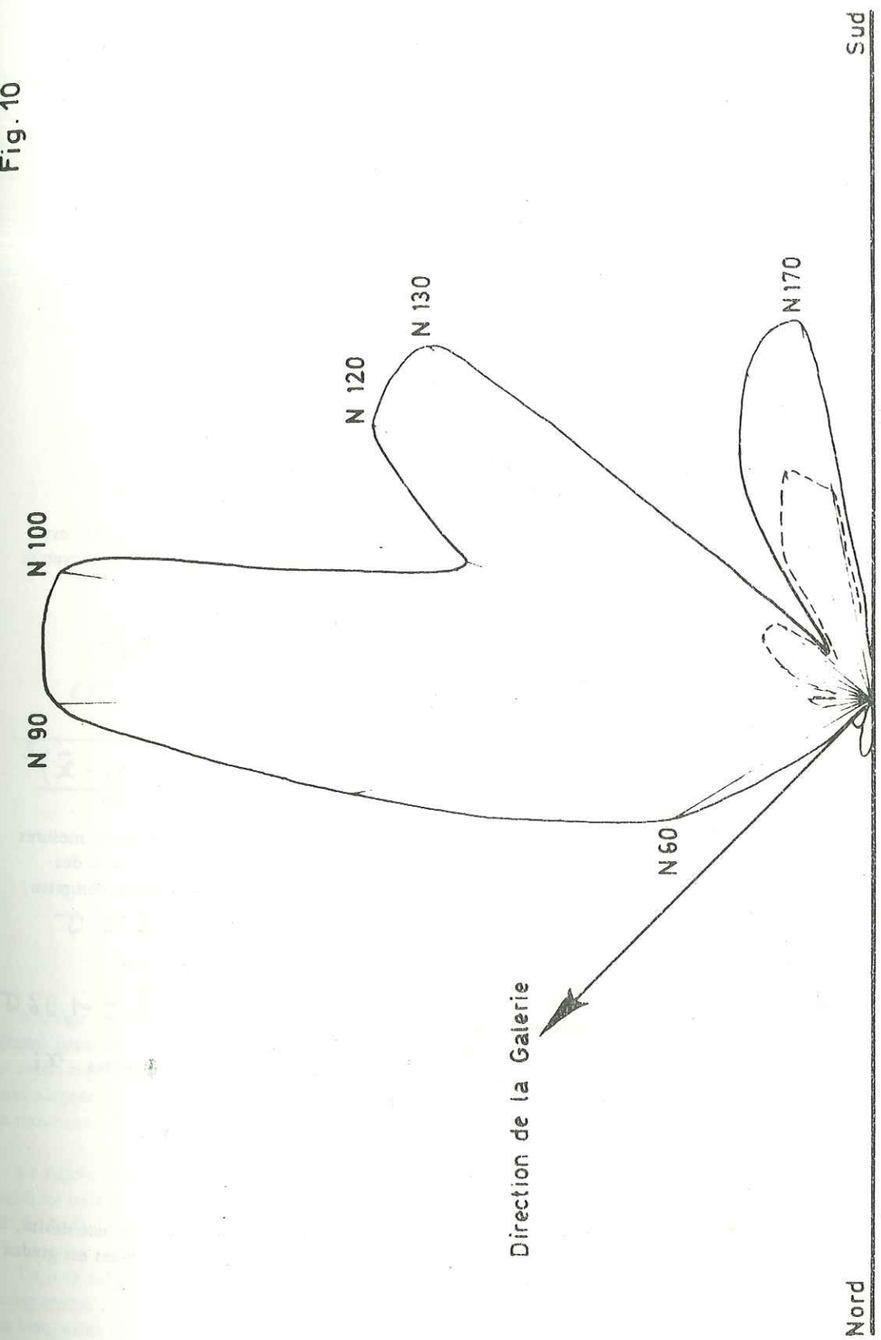
L'intensité de la fracturation se mesure par la fréquence des failles recoupées par la galerie. Elle peut se représenter par l'étude de l'écartement entre failles de même type. Nous prendrons comme critère de distinction l'épaisseur séparant les deux lèvres de la faille. La part que prennent à la fracturation l'une ou l'autre des familles directionnelles déterminées plus haut (2.3.2.1.) pourra être déduite ensuite directement à partir du diagramme des orientations.

Le critère de distinction utilisé est cependant très arbitraire, car il ne tient pas compte de la nature du remplissage de faille, ni de la direction ; il est de plus difficilement applicable au cas d'une zone fracturée comportant sur une courte distance un grand nombre de petites failles. Nous avons distingué trois classes parmi les failles relevées sur le profil géologique au 1/1 000 :

A - Failles d'épaisseur supérieure à 1 m et zones fracturées,
B - Failles d'épaisseur supérieure à 10 cm,
C - Failles d'épaisseur supérieure à 0,5 cm.

Cette étude n'a été faite que sur les dolomies et les calcaires dolomitiques, la partie amont de la galerie, qui représente le Jurassique moyen, étant trop fréquemment masquée par le soutènement.

Fig. 10



Histogramme enroulé figurant la distribution des directions de Fractures (accidents majeurs) dans la galerie de Signes aval.

— Sur les 4750 m de la galerie --- Sur les premiers 1000 m. 183 Mesures

2.3.2.2.2. - Types de distribution

Dans une étude comme celle-ci, comme dans celle qui sera effectuée plus loin sur les écartements entre diaclases, il est nécessaire, tout d'abord, d'examiner comment se distribuent les mesures sur un histogramme des fréquences.

Les phénomènes statistiques naturels ont des répartitions qui suivent le plus souvent l'une des deux lois suivantes :

soit la loi de Laplace-Gauss ou loi normale,
soit la loi de Galton ou loi lognormale.

Loi de Gauss

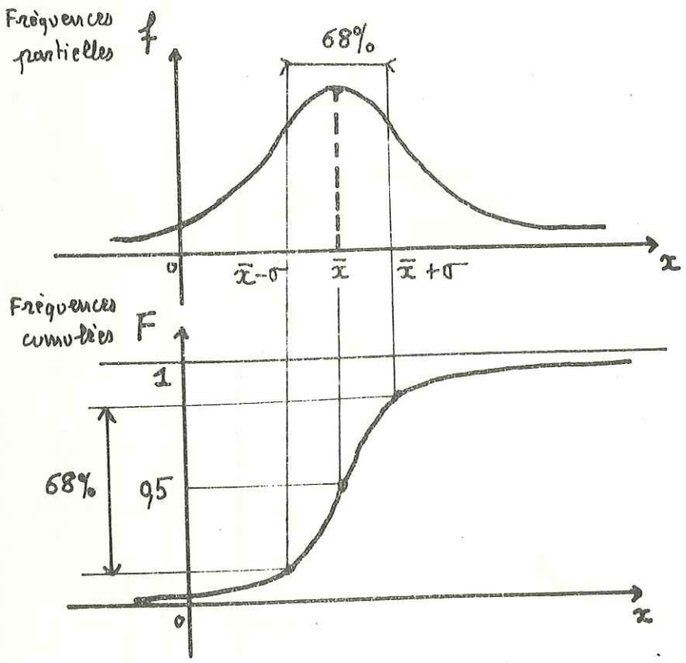


Fig. 11 -

A. - Distribution de Gauss

La courbe de distribution est symétrique par rapport à la moyenne arithmétique :

$$\bar{x} = \frac{\Sigma x_i}{n}$$

L'écart type

$$\sigma = \sqrt{\frac{\Sigma (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

caractérise la dispersion des mesures autour de la moyenne. 68 % des individus ont leur mesure comprise dans l'intervalle $\bar{x} \pm \sigma$

et 95 % dans l'intervalle

$$\bar{x} \pm 1{,}96\,\sigma$$

Nota : Σx_i = somme des x_i

Mise en évidence

La courbe des fréquences cumulées (courbe du bas), appelée "ogive de Galton" se reporte suivant une droite, la "droite de Henry", sur un papier dont l'axe vertical a été gradué à cet effet et dont l'axe des abscisses est gradué linéairement.

052 113072 0

Loi de Galton

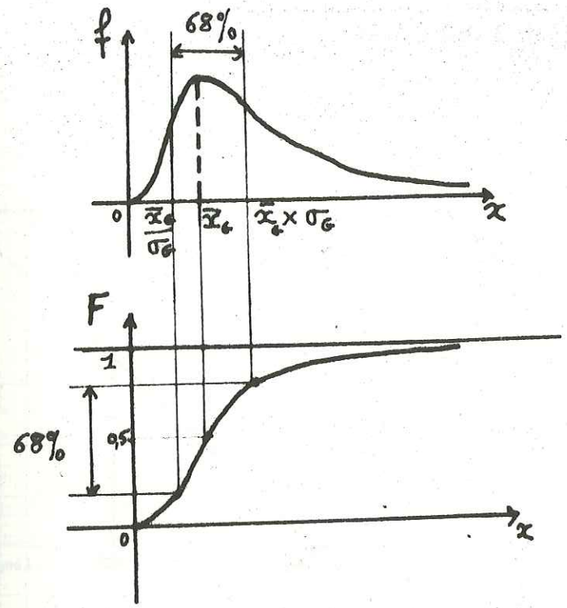


fig. 11 bis -

B. - Loi lognormale ou de Galton

La courbe traduisant la loi lognormale se distingue de la loi normale par sa dissymétrie. On revient à une loi normale en reportant en abscisse, non plus les x, mais leur logarithme. De même pour la courbe des fréquences cumulées (courbe du bas). Une population qui se répartit suivant cette loi est caractérisée par la moyenne géométrique,

$$\bar{x}_G = \sqrt[n]{P(x_i)}$$

et par l'écart géométrique σ_G

tel que :

$$(\text{Log}\ \sigma_G)^2 = \frac{\Sigma \left(\text{Log}\ \frac{x_i}{\bar{x}_G}\right)^2}{n}$$

L'écart géométrique est tel que 68 % des individus ont leur mesure comprise entre $\frac{\bar{x}_G}{\sigma_G}$

et $\bar{x}_G \times \sigma_G$

Nota :
$P(x_i)$ = produit des x_i

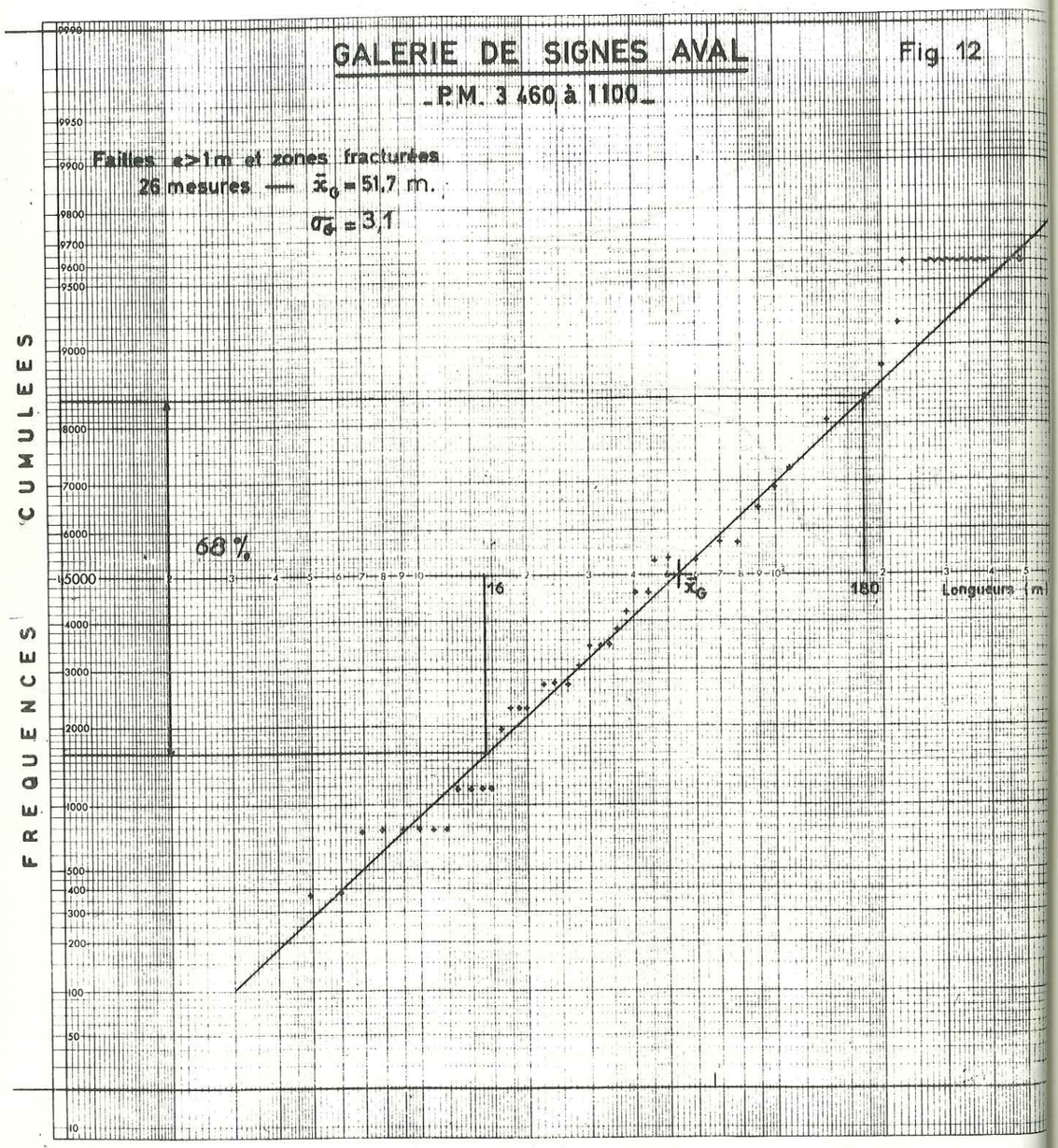
2.3.2.2.3. - Résultats

A l'aide de l'ordinateur de la Société du Canal de Provence, nous avons calculé les fréquences cumulées et les différents paramètres décrits plus haut : moyennes arithmétique et géométrique, écart-type et écart-géométrique. Nous avons reporté point par point les fréquences cumulées sur les papiers caractérisant ces deux lois. Les points étaient alignés avec une bonne précision sur le papier gradué caractérisant la loi lognormale. De plus, la médiane et la moyenne géométrique étaient confondues, ce qui est un caractère de cette distribution.

La figure 12 représente la distribution des écartements entre failles du groupe A précédemment défini. On a indiqué les valeurs $\bar{x}_G/\sigma_G$ et $\bar{x}_G \times \sigma_G$ symétriques de part et d'autre de $\bar{x}_G$, entre lesquelles se répartit 68 % de la population.

Dans le tableau suivant, nous avons indiqué la moyenne géométrique, qui caractérise la position du pic de l'histogramme ; l'écart géométrique, coefficient multiplicateur permettant d'obtenir les valeurs x_1 et x_2 entre lesquelles tiennent 68 % des mesures. Nous avons également indiqué la moyenne arithmétique et l'écart-type, qui n'ont pas une grande signification du fait de la distribution lognormale, mais pourront servir de point de comparaison à des géologues qui n'ont effectué, en d'autres lieux, que les calculs de moyenne et de dispersion arithmétriques. De plus, dans le chapitre III, c'est la moyenne arithmétique qui a été choisie comme caractérisant la fracturation en sondage.

Notons au passage, qu'après avoir calculé les fréquences cumulées, ce qui n'est pas infaisable même sans calculatrice, et tracé la droite caractérisant la distribution, les paramètres de situation $\bar{x}_G$ et de dispersion σ_G s'obtiennent directement sur le graphique avec une relative précision.



Résultats	classe	Nbre de mesures	$\bar{x}_G$ (m)	σ_G	68 % des mesures comprises entre (m) x_1	(m) x_2	$\bar{x}$ (m)	σ (m)
Mesures du P.M. 1100 au P.M. 3460	A	26	51,7	3,1	17	160	92	105
	B	55	27,3	2,5	11	68	38	30
Du P.M. 2161 au P.M. 3460	C	81	6,0	5,0	1	30	15	18

Le cœfficient caractéristique est la moyenne géométrique $\bar{x}_G$

L'écart géométrique σ_G (nombre sans dimension) caractérise une dispersion relativement grande due probablement à l'arbitraire du critère de prélèvement. Nous verrons que la dispersion est plus faible pour les écartements entre diaclases.

2.3.2.3. - Nature du remplissage

Les failles rencontrées dans la galerie de Signes aval sont de trois types, distingués par leur morphologie et par leur remplissage.

1. - Failles de distension

Les efforts tectoniques ayant joué en extension, les failles sont ouvertes, soit vides et élargies par les circulations d'eau, soit remplies d'argile rouge de décomposition emballant des blocs éboulés. Les parois sont parfois tapissées de calcite. Il arrive que des stries soient imprimées dans l'argile indurée.

2. - Failles de compression

Elles sont caractérisées par des plans bien réglés, par des stries imprimées dans la roche ou dans la calcite et témoignant de la direction et parfois du sens du mouvement relatif des deux compartiments. Dans les zones cisaillées et comprimées se développe parfois une brèche tectonique à éléments de dolomie et à matrice dolomitique fine, le tout formant une roche très compacte et mécaniquement homogène.

3. - Failles mixtes

Fréquemment la distinction génétique (distension - compression) est difficile car les failles observées comportent des caractères communs aux deux phénomènes.

Nous avons recherché si chaque famille directionnelle distinguée en galerie pouvait être caractérisée par son remplissage et sa morphologie. En fait, aucun caractère spécifique à chaque famille ne se dégage de notre étude du remplissage. Etaient notés systématiquement : l'épaisseur de la faille, son orientation, le remplissage, la nature des épontes et une appréciation sur l'uniformité des plans : réglés, sinueux, l'orientation des stries.

Cette confusion est due probablement à plusieurs événements tectoniques de directions différentes, responsables du rejeu des cassures préexistantes suivant d'autres modes.

2.3.2.4. - Etude de l'orientation des stries (fig. 13)

Quelques mesures d'orientation des stries sur des plans de failles, prélevées en galerie lors d'un cheminement rapide du P.M. 1 000 au P.M. 3 000, sont un point de départ dans la recherche des directions principales de la déformation du massif.

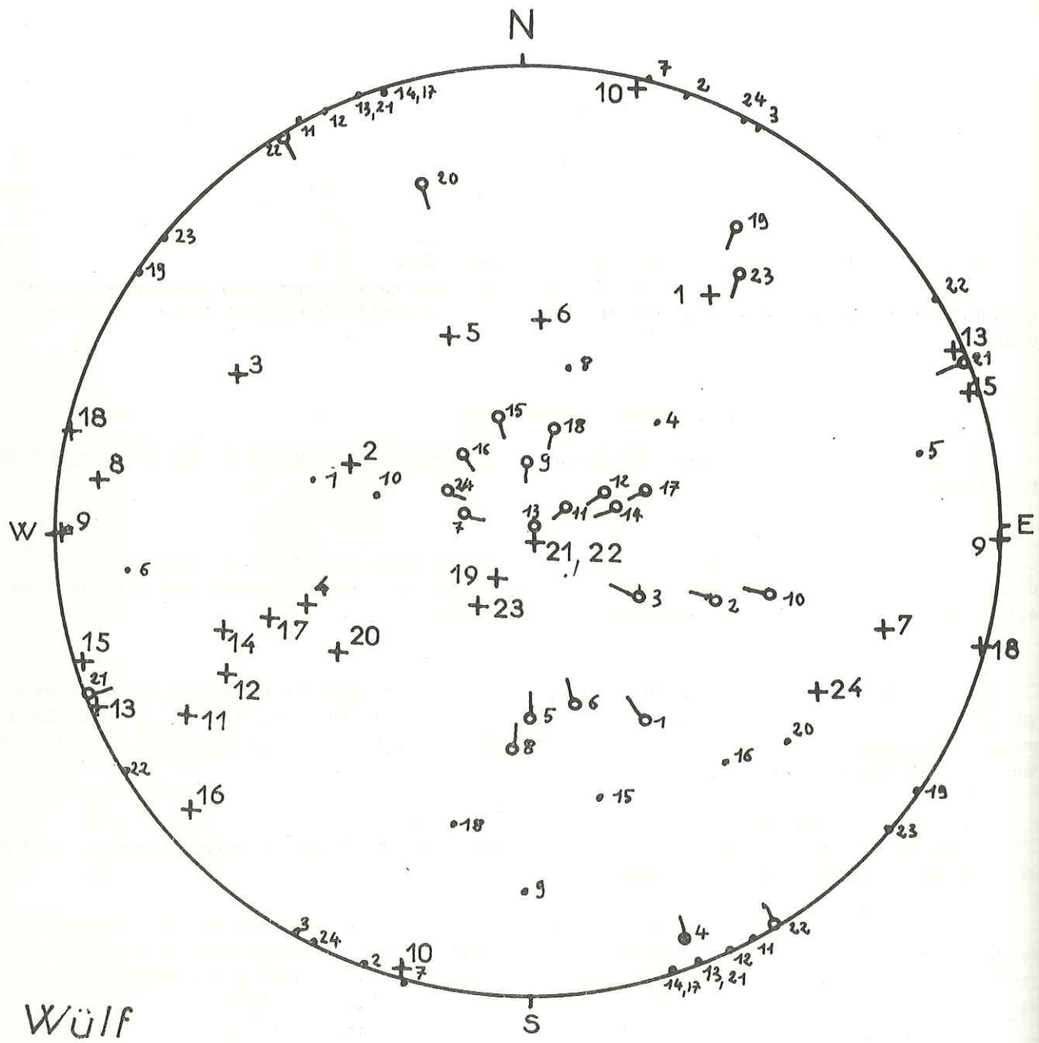
Ces mesures ont été reportées sur canevas de Wülf et analysées à l'aide de la méthode de F. ARTHAUD (1969). Remarquons que le sens relatif du mouvement entre compartiments n'a pas été relevé, d'où une inconnue quant à la direction de contrainte majeure.

On définit à partir des stries et de leur surface porteuse des "plans de mouvements" dont les pôles, dans un schéma idéal, devraient se répartir dans 3 plans orthogonaux, dont les intersections définissent les directions principales de la

Orientation des stries

Fig.13

GALERIE DE SIGNES AVAL



Wülf
hemisphère sup.
24 mesures

3 • surface porteuse
3 ♂ strie
3 + plan de mouvement correspondant

déformation. Vus le nombre restreint (24), et la dispersion des mesures, la grande extension du champ de prélèvement, qui entraîne que certaines stries peuvent être classées à tort dans un même groupe que d'autres d'origine différente, il n'est pas possible d'appliquer la méthode globalement. Si nous décomposons son mécanisme, on peut cependant tirer quelques résultats relativement objectifs. Le diagramme de la figure 13 montre que certains pôles de plans de mouvements se répartissent assez bien suivant un grand cercle passant à peu près par le centre du canevas, dont la situation du pôle traduit un axe horizontal de direction N 10°. Cet axe pourrait être l'une des directions principales cherchées. Pour le moment, nous ne pouvons en dire plus à partir de ce diagramme. Nous y reviendrons munis de nouveaux résultats concernant les directions de fractures du massif au paragraphe 4.2.1.4. ; puis dans les conclusions générales, en tenant compte de toutes les données sur la tectonique de la région, nous proposerons un modèle pouvant expliquer le mécanisme des déformations et les traces qu'elles ont laissées.

2.3.3. - Les diaclases

Les diaclases sont des plans de discontinuité n'ayant provoqué aucun rejet entre les compartiments qu'elles séparent et d'épaisseur très faible, bien que visible.

2.3.3.1. - Etude des orientations

Des mesures de direction et pendage des diaclases ont été faites par l'exécution d'une dizaine de mesures tous les 100 mètres de galerie environ. Les emplacements de mesures étaient choisis de telle manière que le parement soit propre, les diaclases nettes et bien visibles, et à une certaine distance des zones faillées afin que les orientations prélevées correspondent bien à la micro-fissuration de la matrice rocheuse et non pas à celle engendrée par une faille particulière. Les résultats ont été reportés sur canevas de Schmidt (hémisphère supérieur), qui permet un calcul de densité de pôles par pourcentage d'aire, (projection équiaréale). On retrouve à peu près les résultats de l'étude des orientations faite sur les failles de la galerie.

Figure 14 - Diaclases mesurées dans les dolomies néojurassiques.

- Intensité maximale de N 80° à N 100° et autour de N 175° ; donc un système orthogonal de plans verticaux ou subverticaux avec une forte dispersion autour de ces valeurs.

- Un contour maximum autour de l'orientation N 80° penté 45° vers le Nord.
Cette orientation qui ressortait faiblement de l'étude des failles sur canevas de Schmidt, n'apparaît que dans les dolomies. Elle est peut-être liée à la stratification, dont la direction est identique, mais dont le pendage plonge vers le Sud Est, avec un angle tel que cette famille de diaclases recoupe perpendiculairement les strates.

Figure 15 - Diaclases mesurées dans les calcaires du Bathonien supérieur et les calcaires marneux du Dogger (3 000 à 4 750 m).

Intensités maximales centrées autour de N 80° et autour de N 165° avec une faible dispersion autour de ces valeurs, ce qui est dû peut-être à un meilleur amortissement de l'explosion dans ces terrains que dans les dolomies plus fragiles.

N. B. - Nous avons indiqué le pourcentage du nombre de mesures situé à l'intérieur d'un même contour pour chaque secteur et également le pourcentage de points n'entrant pas à l'intérieur des contours. Si la somme de ces pourcentages dépasse 100, il ne faut pas s'étonner, car les plans verticaux, dont les pôles se répartissent le long du périmètre du cercle, sont comptés deux fois.

Exemple : figure 15, 38 % des mesures se situent à l'intérieur du contour, 1,4 % dont les limites sont 1-1.

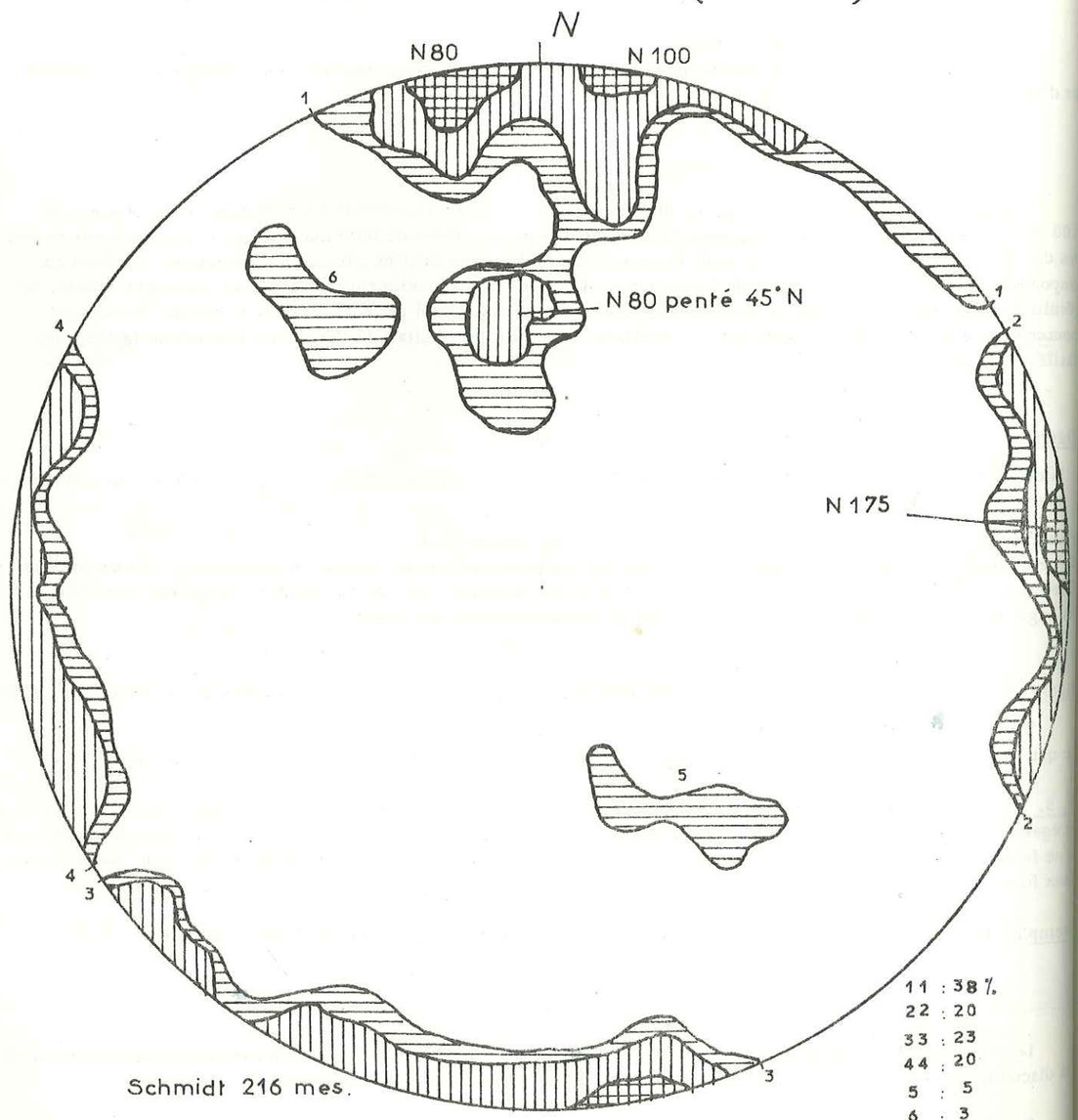
2.3.3.2. - Etude des écartements

Les mesures que nous avons faites concernant les écartements entre plans de diaclases prennent en considération toutes les discontinuités visibles sur le parement de la galerie, même potentielles (non ouvertes par les explosions).

Les longueurs mesurées correspondent :
- soit à la distance minimale séparant deux diaclases de même famille directionnelle (mesure faite orthogonalement à la direction de la famille), famille définie par des mesures préalables d'orientation ;
- soit à la distance minimale séparant deux diaclases d'orientation quelconque, mesurée horizontalement sur le plan du parement.

Fig 14

GALERIE DE SIGNES AVAL Orientation des
Diaclases dans les dolomies (600 - 2800 m)



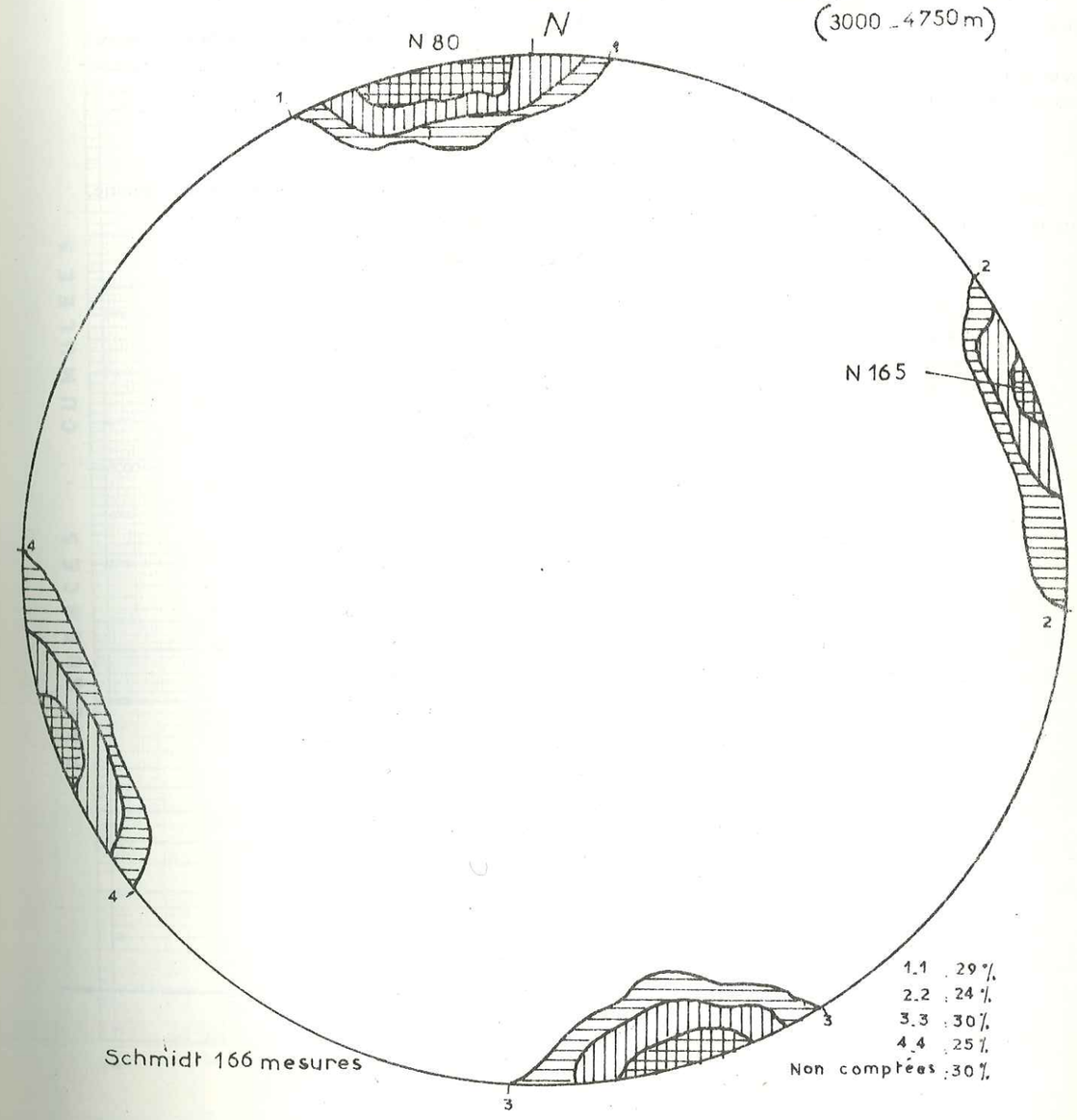
11 : 38 %
22 : 20
33 : 23
44 : 20
5 : 5
6 : 3
Non comptées : 27

Schmidt 216 mes.

Contours 1,4 % 2,3 % 4,6 % par % d'aire –

Fig 15

GALERIE DE SIGNES AVAL Orientation des
Diaclases dans les calcaires et marnes du J.M.
(3000 - 4750 m)



1.1 : 29 %
2.2 : 24 %
3.3 : 30 %
4.4 : 25 %
Non comptées : 30 %

Schmidt 166 mesures

Contours 4,7 % 9,5 % 14,1 % par % d'aire –

Les prélèvements sont effectués en différents points de la galerie, suivant un trait horizontal de 5 à 10 m de longueur tracé à la craie sur un parement de la galerie.

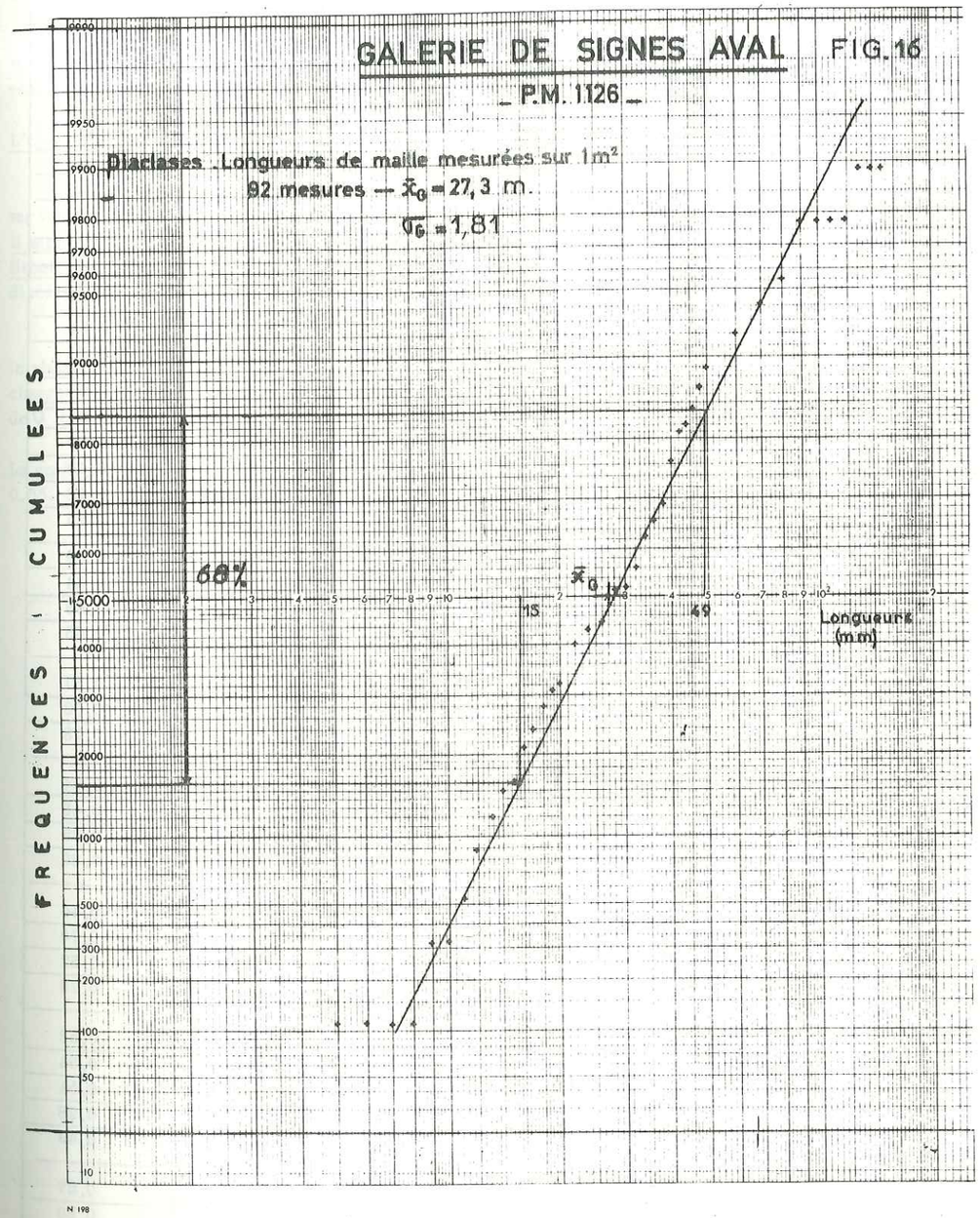
De même que pour la mesure des orientations, nous avons dû choisir les emplacements de mesure en fonction de la propreté du parement et de la mise en évidence des diaclases. A titre de vérification, nous avons en certains points utilisé complémentairement un procédé différent, consistant à mesurer toutes les longueurs d'arêtes découpées par les diaclases sur un carré de 1 mètre de côté, dessiné sur un parement (technique A. PARIS, 1969).

Comme pour l'étude des failles, nous avons caractérisé la loi de répartition des mesures d'écartement . La figure 16 montre par exemple que cette population se distribue selon une loi lognormale.

La pente de la droite, plus redressée que dans le cas des failles, indique une dispersion plus faible des valeurs autour de la moyenne géométrique. Les valeurs x_1 et x_2 entre lesquelles se situent 68 % des individus sont respectivement 15 et 49 millimètres, ce qui est vérifié par la relation $x_1 = \bar{x}_G / \sigma_G$; $x_2 = \bar{x}_G \times \sigma_G$

Les tableaux suivants présentent les résultats des mesures d'écartement effectuées en divers points de la galerie, entre le P.M. 1 100 et le P.M. 3 500 m, dans les dolomies. On a indiqué dans les différentes colonnes :

- la localisation du prélèvement dans la galerie. Le P.M. 0 se situe à l'entrée aval ;
- le nombre de mesures ;
- la moyenne géométrique $\bar{x}_G$ (mm) ;
- l'écart géométrique σ_G
- la moyenne arithmétique $\bar{x}$ (mm)
- le cœfficient de variation $\frac{\sigma}{\bar{x}}$



N 198

P.M.	Familles directionnelles	Nombre de mesures	Moyenne géométrique $\bar{x}_G$ (mm)	Ecart géométrique σ_G	Moyenne arithmétique $\bar{x}$ (mm)	Cœfficient de variation $\sigma/\bar{x}$
1 120 à 1 130	N 50-80 penté S	25	24,9	2,12	32,2	0,73
	N 80 vertical	29	31,9	1,55	35,3	0,50
	N 160 vertical	60	30,2	1,62	33,8	0,47
	Total	114	29,4	1,74	33,9	0,54
1 126	Sur 1 m^2 (en place)	92	27,3	1,81	32,9	0,70
1320 à 1330	N 80-100°	17	29,8	2,03	37,3	0,63
	N 150-180°	15	33,8	1,84	40,9	0,69
	N 45° penté SE	15	35,3	1,70	40,5	0,52
	Total	47	33,0	1,90	39,4	0,62
1385	N 50° penté SE	25	26,5	1,69	30,5	0,60
	N 100°	24	32,7	1,50	35,5	0,40
	N 170°	18	21,2	1,54	23,3	0,42
	Total	65	27,4	1,63	30,8	0,51
	Sur 1 m^2 (prélevés)	119	16,9	1,78	19,9	0,60
1720	Toutes orientations	191	22,9	2,23	31,9	0,96
1840	Toutes orientations	355	28,5	2,21	39,2	0,94
1950	N 80°	31	94,9	1,62	106,8	0,50
	N 0°	11	83,7	1,47	90,3	0,40
	Total	42	91,8	1,59	102,6	0,49
	Sur 1 m^2 (prélevés)	35	58,3	1,66	65,4	0,45
2085	N 130°	34	78,3	1,96	95,0	0,59
2210 à 2220	N 160°	29	60,4	2,04	75,9	0,64
	N 80°	11	39,0	2,45	53,5	0,68
	Total	40	55,1	2,15	70,0	0,65
2830 à 2840	N 20° penté 70° E	48	24,6	1,65	28,1	0,57
	N 100°	23	49,1	1,73	57,9	0,68
	Total	71	30,8	1,84	37,8	0,78
2935 à 2975	Stratification	9	48,7	1,90	62,2	0,84
	N 0°	20	26,3	1,47	28,7	0,48
	N 100°	8	42,5	1,25	43,8	0,25
	Total	37	34,0	1,71	40,5	0,80
3175 à 3185	Stratification	12	99,9	1,67	112,3	0,44
	N 70°	33	39,8	1,78	47,9	0,70
	N 0°	52	38,5	1,79	45,0	0,52
	Total	100	43,7	1,92	54,2	0,70
3320 à 3330	Sur 1 m^2	63	25,9	1,73	30,0	0,58
	N 0°	34	22,8	1,74	36,5	0,54
	N 80°	12	19,7	1,53	21,8	0,51
	Stratification	14	35,2	1,34	36,7	0,28
	Total	60	24,5	1,68	27,9	0,49
3420 à 3430	N 80°	27	17,5	1,86	21,4	0,67
	N 0°	41	21,5	1,86	28,6	0,90
	Total	68	19,8	2,04	25,7	0,86
3460 à 3470	N 10°	44	20,0	1,61	22,3	0,45
	N 100°	27	19,9	2,05	24,6	0,60
	Total	71	20,0	-	23,2	0,50
3525	Toutes orientations	126	17,0	2,20	33,3	0,89

Analyse des tableaux

- Considérons la population représentée par les $\bar{x}_G$ indiqués sur les tableaux précédents. Faisons l'histogramme de leur distribution, en ne considérant que les moyennes totales pour chaque lieu de prélèvement afin de donner le même "poids" à chaque zone de la galerie. La distribution se fait une fois de plus suivant une loi de Galton dont le pic est axé sur 3 cm. Les moyennes se répartissent de 2 à 10 cm.

On voit que les deux techniques de prélèvement (trait horizontal, carré de 1 m sur 1 m) donnent des résultats très proches (P.M. 1120-1130) sauf lorsque les morceaux sont prélevés avant d'être mesurés, ce qui a pour effet de réduire les longueurs d'arête.

L'écart géométrique varie peu : de 1,5 à 2,2

Il traduit une dispersion plus faible que pour les écartements entre failles.

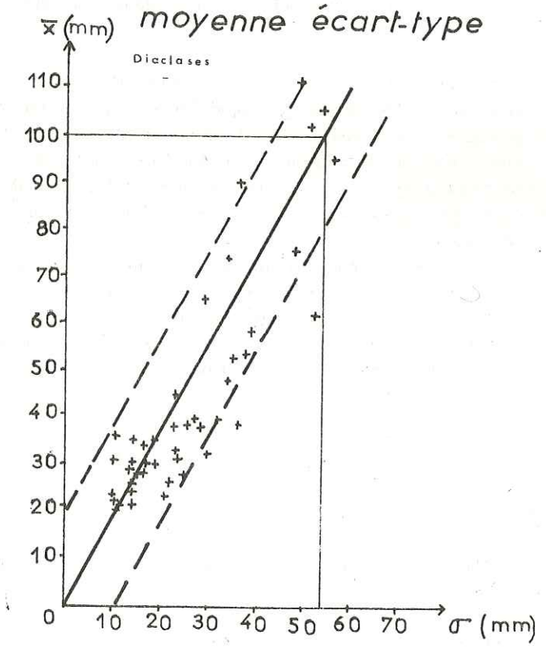
Il n'est pas fonction de la moyenne géométrique, ni du nombre de mesures, ni de la famille directionnelle. Mais ses valeurs varient peu pour une même zone, entre les différentes familles et entre les deux techniques de prélèvement. Il semble donc caractériser surtout le phénomène étudié (diaclasage, faille), peut-être le lieu étudié, mais pas la lithologie, que traduit la moyenne géométrique. Il ne semble pas y avoir de relation entre l'orientation des familles de diaclases et l'écartement moyen.

- Considérons maintenant la moyenne arithmétique et l'écart type. Nous avons montré qu'ils caractérisent mal le phénomène étudié, puisque les mesures s'y rapportant ne s'ordonnent pas suivant une loi de Gauss. On peut cependant chercher quel est le cœfficient de variation représentatif de la galerie toute entière, en faisant le graphe $\bar{x}$ en fonction de σ (fig. 17). On obtient un nuage de points comportant un axe linéaire passant par l'origine :

l'écart-type croît linéairement avec la moyenne arithmétique.

Le cœfficient de variation représentatif de la galerie correspond à la pente $\sigma/\bar{x}$ de cette droite axiale et sa valeur est 0,55. Ceci est tout à fait compatible avec le fait que l'écart géométrique est presque constant.

Fig.17 CORRELATION moyenne écart-type



On voit, en se reportant à l'histogramme de la distribution lognormale, que plus le pic se déplace vers la droite sur l'axe des abscisses, plus il sera large.

Les mesures n'ont été faites que dans les dolomies.

Dans les calcaires marneux, où nous n'avons pu faire d'étude systématique, la maille était généralement plus lâche, allant de 5 à 15 cm, la roche pouvant être parfois absolument massive ; ce que nous traduirons en disant que les dolomies sont fragiles par rapport aux calcaires marneux.

Nos observations concordent avec celles de A. PARIS (1969, p. 109 à 111), sur les points suivants :

- relations entre la maille de la fracturation et la lithologie :

A. PARIS met en évidence que la maille dans les calcaires néocomiens est plus petite (2 cm) que dans les dolomies (pic de l'histogramme sur 10 cm) ;

Dans les marnes et calcaires marneux, la maille est encore beaucoup plus lâche.
- Les histogrammes des pages 110 et 111 ont généralement un profil caractérisant la loi de distribution lognormale. Il ressort très nettement que la dispersion augmente avec la maille. Soulignons une nouvelle fois que cette relation n'est pas caractéristique de la fracturation, mais liée seulement au fait que la distribution est lognormale.

Interprétation

La maille des petits parallélépipèdes découpés par la fracturation semble être indépendante de la fracturation à plus grande échelle responsable des failles cartographiables.

En effet, que ce soit à proximité d'un accident important, créant de part et d'autre de ses épontes un feuilletage bien marqué, ou dans une zone saine, l'écartement entre diaclases est à peu près constant et de l'ordre de quelques centimètres.

Ce qui varie est le relief du parement, plus accusé lorsque la zone est fracturée.

Nous comparerons ces valeurs dans le chapitre III, avec celles mesurées sur les carottes de sondage. Nous verrons que la maille moyenne en sondage est beaucoup plus lâche, dans des roches identiques et vraisemblablement de même histoire tectonique. Nous pensons que la fissuration mesurée en galerie est due principalement au choc des explosions lors de la phase de tir.

Mais d'après les définitions de B. SCHNEIDER, les fissures ainsi créées n'ont pas d'orientation particulière, alors que les discontinuités que nous avons mesurées se répartissent en familles, d'où leur dénomination de diaclases. L'ébranlement, par l'onde de choc, de la matrice rocheuse est responsable de l'apparition de ces plans de discontinuité qui avaient été auparavant "mis en mémoire" lors des épisodes orogéniques et peut-être même de l'histoire sédimentaire dans certains faciès. De même, le passage d'une faille crée un feuilletage de la roche à l'échelle de la maille préexistante mais non apparente, suivant l'une des trois directions enregistrées dans la matrice rocheuse.

2.3.4. - Conclusion sur l'analyse statistique des discontinuités

Le fait nouveau concernant la distribution des mesures d'écartement mis en lumière dans les paragraphes précédents nous semble devoir être souligné.

Lorsqu'un géologue travaille sur une population de discontinuités, il cherche à déterminer leurs orientations principales et la fréquence correspondante. Pour déterminer les orientations, on peut procéder à la mesure systématique de tous les plans apparents sur une certaine distance. Le géologue est alors tenté, s'il est certain de n'avoir omis un seul plan, d'utiliser ces mesures pour obtenir directement l'intensité de la fracturation. C'est là qu'il commet une erreur. En effet, s'il a, par exemple, mesuré dix diaclases de même orientation moyenne suivant une ligne de 10 mètres de long, orthogonale à leurs plans, il sera tenté de dire que l'écartement moyen dans cette famille est de 1 m. Or, nous avons vu que ce résultat ne caractérise pas avec exactitude la population.

Pour avoir le droit de caractériser une population par sa moyenne arithmétique, il faut s'assurer au préalable que sa distribution suit une loi normale. Ce n'est pas le cas pour la population "écartement entre diaclases" ou "écartement entre failles" qui suit une loi lognormale et se caractérise donc par sa moyenne géométrique.

Après avoir défini des familles de direction, le géologue devra donc reprendre les mesures concernant les écartements. Leur moyenne géométrique caractérisera vraiment la maille de la fracturation et l'écart géométrique, sa dispersion.

2.3.5. - Influence sur le creusement et la tenue de la galerie

2.3.5.1. - Les failles

Les failles sont responsables, surtout à cause de leur remplissage argileux, de la mauvaise tenue de la galerie :
- éboulement de blocs,
- débourrages d'argile et de sable,
- poussée de l'argile sur les cintres et les plaques d'envol,
- instabilité des coins formés par l'intersection de deux fissures,
- hors-profils.

L'orientation des failles par rapport à la galerie est d'une certaine importance. Il est évident qu'une faille presque directionnelle à la galerie sera recoupée sur une longue distance alors qu'une faille orthogonale, sera recoupée pratiquement sur une distance égale à son épaisseur. De plus l'orientation des failles a une influence sur le profil en travers de l'ouvrage. Celui-ci sera d'autant plus proche du profil type que la faille approchera l'angle droit avec l'axe de la galerie. On voit sur la figure 9, où la direction de la galerie a été portée, que les deux systèmes de fractures font un angle d'au moins 45° avec elle, ce qui a été relativement favorable à sa bonne tenue.

2.3.5.2. - Les diaclases

Le rôle des diaclases, telles que nous les avons définies en galerie, est donc finalement très limité dans son influence sur le creusement.

Leur maille varie avec la lithologie ; elle est plus lâche dans les roches marneuses, ce qui a son importance lors du marinage, les blocs étant alors de plus grande taille.

La tenue des terrains n'est pas altérée par l'intensité du diaclasage, à condition que celui-ci ne soit pas ouvert. Au contraire, les dimensions réduites de la maille sont un facteur favorable à un bon découpage de la section.

2.3.6. - Influence sur les injections de bétonnage

La fracturation intervient également sur les quantités de béton injectées dans le massif. Une étude serait à mener dans ce sens. Il s'agirait de se procurer les valeurs des quantités de béton injectées lors des opérations de collage et d'étudier leurs variations suivant les tronçons de galerie. Il existe peut-être une corrélation, soit avec la maille des diaclases, soit avec la densité des failles, leur épaisseur ou leur remplissage. On pourrait ainsi chiffrer la fracturation par une relation avec le volume de coulis injecté dans les fissures. Les injections de collage n'ayant pas encore été exécutées dans la galerie de Signes aval, nous n'avons évidemment pas pu effectuer cette étude, qui serait fastidieuse, mais probablement riche d'enseignements.

2.4. - HYDROLOGIE

2.4.1. - Profil de débit

Depuis le mois de juin 1968, des mesures de débit des eaux circulant dans la cuvette sont effectuées chaque mois en plusieurs points de la galerie de Signes aval par le Cabinet d'Etudes Ruby (fig. 18).

Le profil des débits cumulés ainsi obtenu permet de déterminer plusieurs zones de "drainage" de la galerie et de suivre l'évolution des débits de chaque zone en fonction du temps (fig. 19).

On distingue ainsi deux zones d'alimentation différentes :
- l'une correspondant sensiblement aux dolomies, qui s'étend approximativement entre le P.M. 1000 et le P.M. 3 000 ;
- l'autre correspondant à la zone des calcaires marneux du cœur du massif qui s'étend entre le P.M. 3 560 et le fond de la galerie de Signes aval.

On voit sur le profil de débit que les 1000 premiers mètres sont situés généralement au-dessus de la surface piézométrique, sauf en période de crue où l'eau sourd par le radier. Le régime de la circulation des eaux dans les dolomies est nettement influencé par la pluviométrie. Cela correspond à un écoulement rapide de type karstique. La courbe des débits cumulés montre un pallier au passage des niveaux calcaires du Bathonien supérieur.

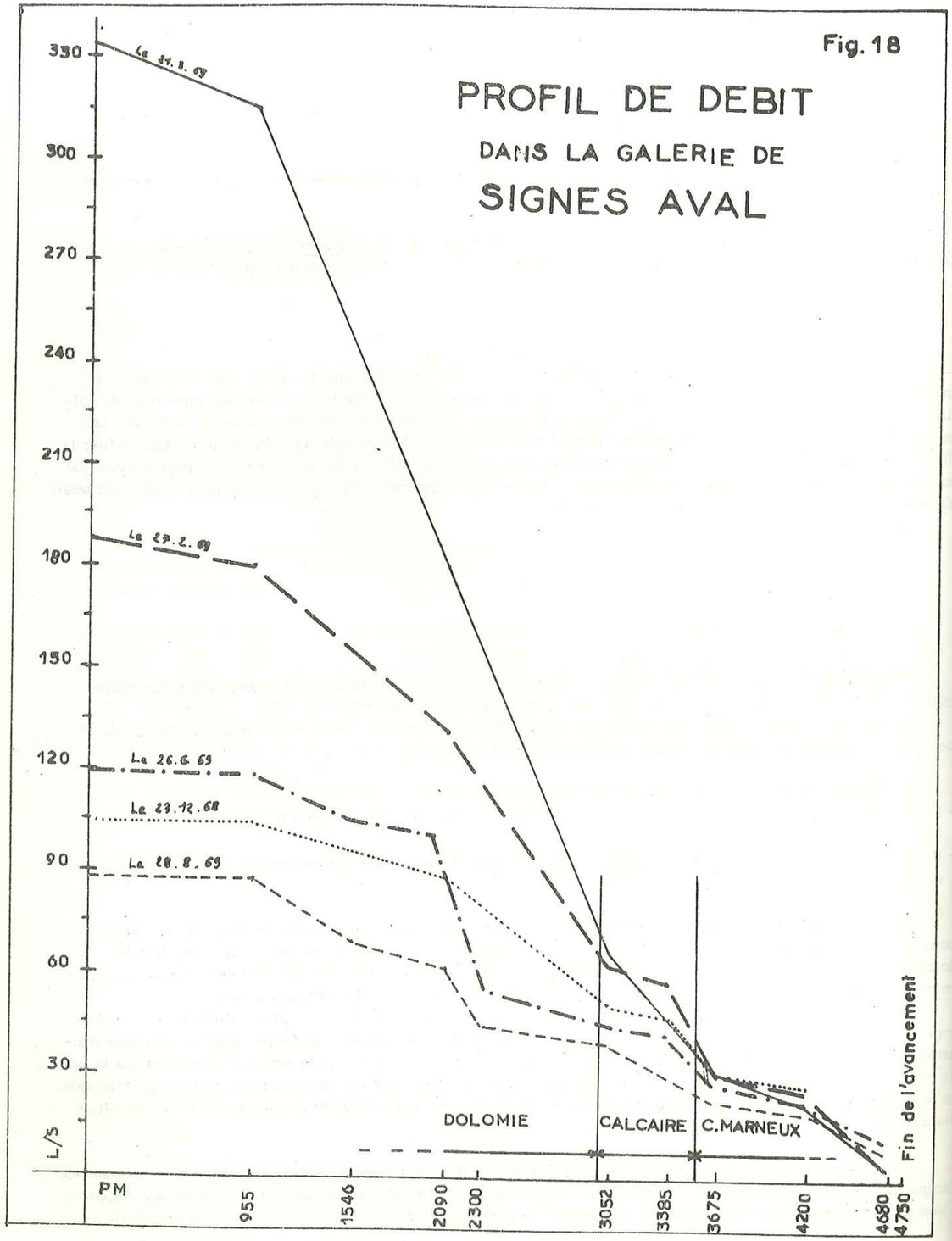
La zone entourant l'accident géologique du P.M. 3 560 est au contraire drainante. En période de pluviométrie importante, les eaux superficielles affluent par cette zone de faiblesse du massif. Par contre, dans les calcaires marneux, les débits ne varient pratiquement pas entre l'étiage et les périodes de crue. On note simplement depuis la fin du creusement une baisse sensible du débit de drainage de ces calcaires marneux, montrant par là que la galerie vide un réservoir qui se renouvelle très lentement. En un an, entre 1969 et 1970, le débit a baissé de 50 %. Les résultats des dosages du tritium nous confirmeront ces hypothèses (2.4.2.).

Au fond de la galerie, un manomètre, placé à l'extrémité d'un petit sondage drainant, indiquait en permanence une pression d'au moins 10 bars, ce qui équivaut, compte tenu des pertes de charge dans les fissures et dans l'appareil, à une hauteur d'eau de plus de 100 mètres au-dessus de la galerie. Or, des P.M. 3 900 m à 4 400 m, la galerie est

Fig. 18

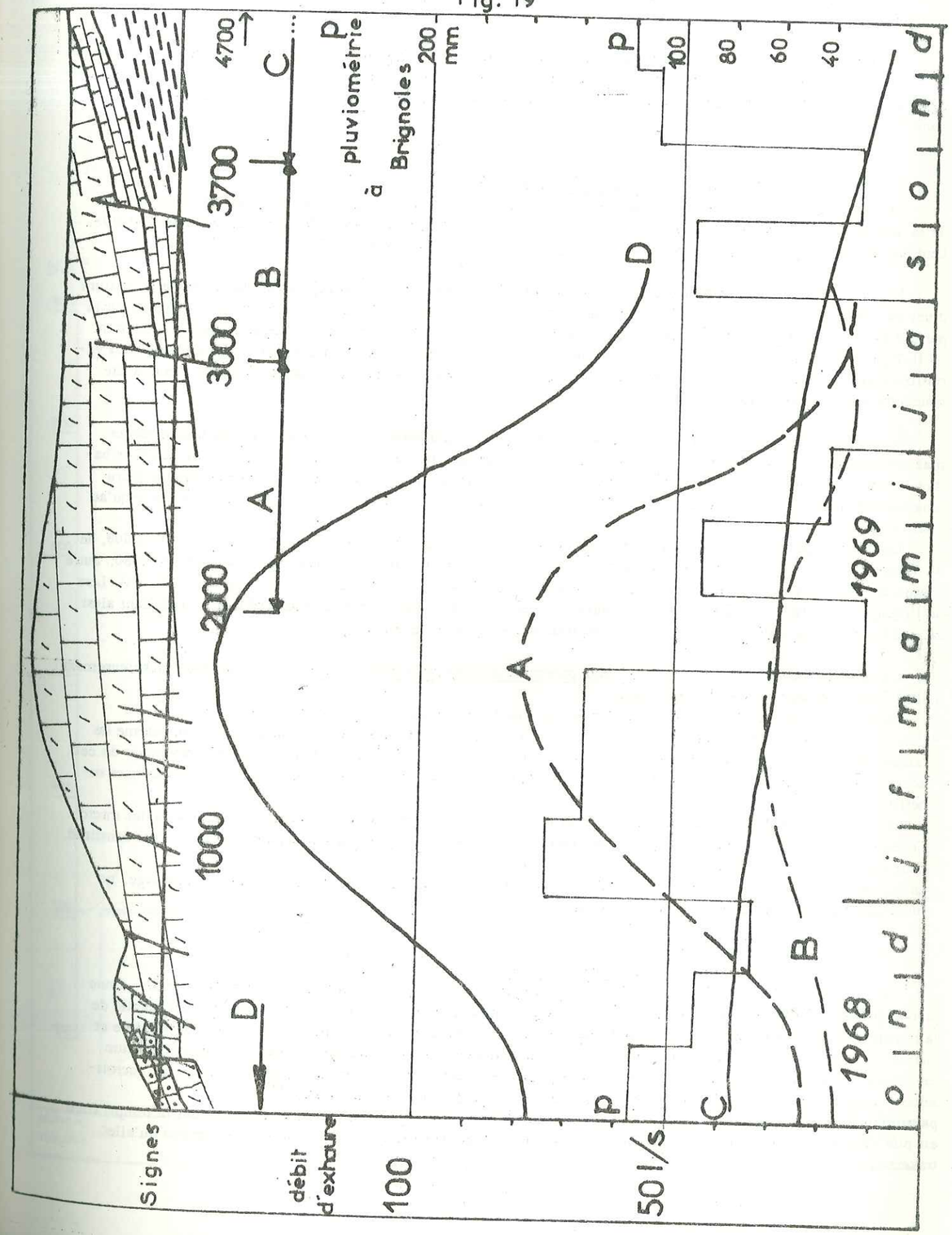
PROFIL DE DEBIT

DANS LA GALERIE DE SIGNES AVAL



EVOLUTION DES DEBITS en fonction du TEMPS

Fig. 19



absolument sèche, de même que lors du creusement. La roche très compacte, la teneur en argile des calcaires marneux et de leurs interbancs de marnes, la forme anticlinale qui affecte les terrains justement dans cette zone, peuvent expliquer cette sécheresse de la galerie, qui n'a cependant pas empêché le phénomène de décompression dont nous avons parlé plus haut (2.1.2.).

En résumé, les dolomies réagissent aux crues et doivent être les premières atteintes par le tarissement, alors que les calcaires marneux du fond réagissent peu aux crues, mais fournissaient en 1968, pour deux fois moins de longueur de contact en galerie que les dolomies, plus de 60 % du débit d'étiage. Depuis, le débit de cette portion a considérablement baissé.

2.4.2. - Concentration des eaux en tritium

Des prélèvements d'eau, destinés à déterminer la concentration en tritium, ont été effectués en plusieurs lieux de la galerie de Signes aval. Les analyses ont été faites par le laboratoire du Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble. Leur but est de "dater l'eau", donc de caractériser le renouvellement des réserves.

Les spécialistes considèrent qu'il n'y a aucun phénomène d'absorption ou d'adsorption et que la teneur en tritium d'une eau souterraine est égale à celle des précipitations qui lui ont donné naissance, compte tenu évidemment de la perte d'activité naturelle (période du tritium : 12,5 années). A l'état naturel, l'eau de pluie a une teneur d'environ 20 U.T. (unité tritium). Depuis les expériences thermonucléaires de 1954 et celles qui ont suivi, on a observé des variations considérables de cette teneur. Pendant l'hiver 1968-69, la station pluviométrique de Grenoble a connu une concentration moyenne voisine de 400 U.T.

Dans la galerie de Signes, la concentration en tritium de l'eau d'exhaure au front de taille est passée par un maximum quand celui-ci se trouvait au P.M. 3 600, point correspondant à la zone de contact entre les calcaires bathoniens et les marno-calcaires du Dogger. Ensuite, au fur et à mesure de l'avancement, la concentration a décru progressivement pour passer en dessous de 10 U.T. entre 3 800 m et 4 400 m et s'est maintenue à ce niveau jusqu'au P.M. 4 750.

Les eaux en provenance de la partie aval de la galerie se maintiennent entre 20 et 40 U.T.. Au P.M. 3 600, le 23 décembre 1968, la concentration est montée à 48 U.T. traduisant l'influence d'eaux récentes. Au P.M. 1880, autre station de prélèvement, la concentration est également montée à 40 U.T. lors de la crue de la galerie (170 l/s). Lors de l'étiage d'août 1968, les prélèvements en sortie de galerie ont diminué jusqu'à atteindre 10 U.T., traduisant ainsi la prédominance des venues d'eau à faible concentration des calcaires marneux.

On est ainsi amené à admettre que les eaux provenant du fond de la galerie de Signes sont tombées antérieurement à 1954 et qu'elles ont au moins 15 ans d'âge.

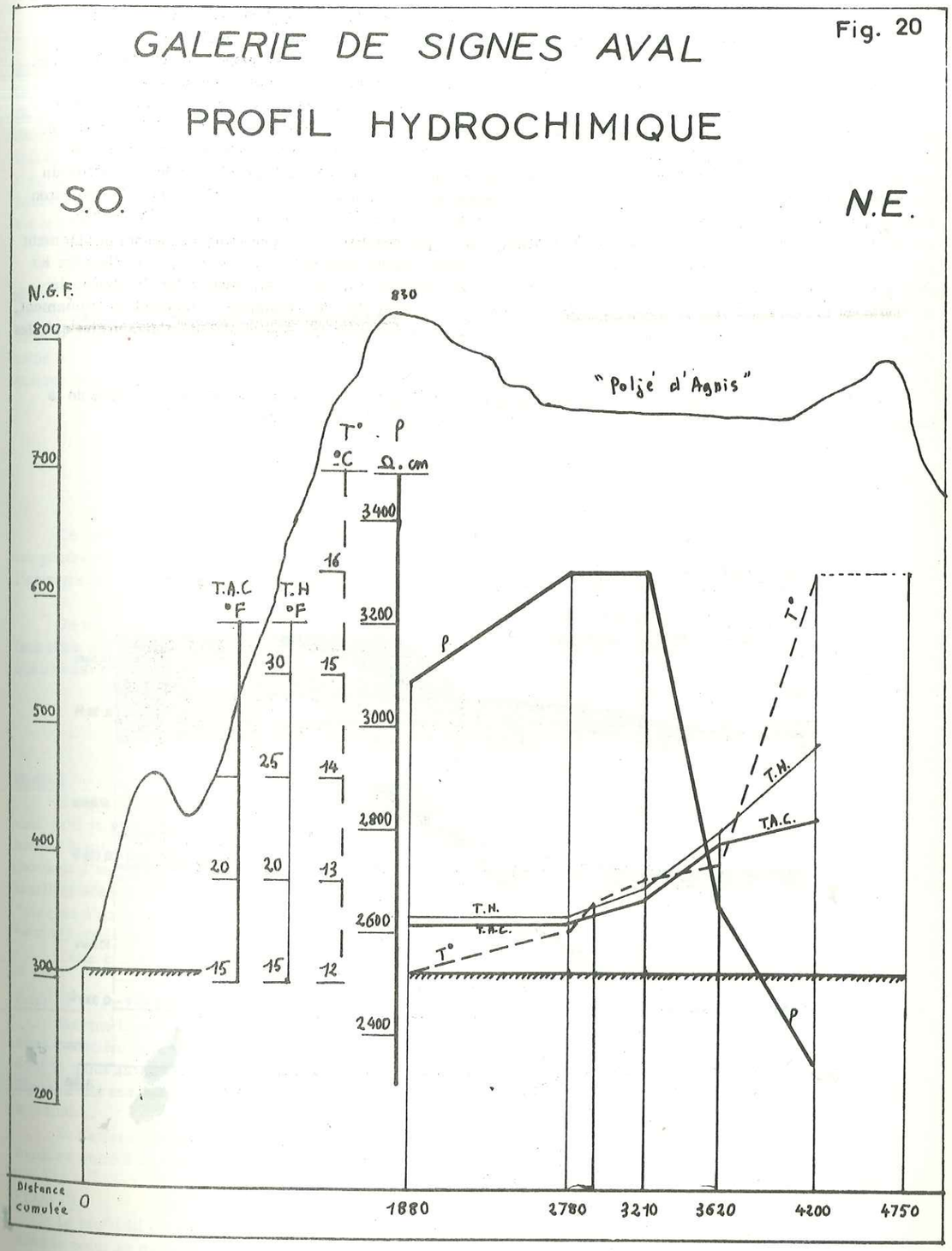
En d'autres termes, les analyses du tritium ont permis de caractériser 3 types d'aquifères :

- l'un que l'on peut appeler l'aquifère "superficiel", dans lequel l'eau circule relativement vite, par un système de failles, de diaclases, de chenaux, en liaison directe avec les conditions météorologiques. Les eaux provenant de cet aquifère sont à rattacher au cycle hydrologique annuel. Il correspond en particulier aux dolomies néojurassiques superficielles ;
- l'autre, aquifère "profond", véritable réservoir où les circulations sont lentes et se font par des fissures ou des microfissures, qui réagit peu et lentement à la pluviométrie, et qui fournit un débit assez régulier. Celui-ci s'est constitué dans les calcaires marneux ;
- enfin, un aquifère intermédiaire (partie aval de Signes aval) qui procède des deux précédents et où en étiage, ne subsistent que les caractères de l'aquifère profond.

2.4.3. - Analyses chimiques classiques

Le profil hydrochimique de la galerie (fig. 20) suggère les remarques suivantes : la minéralisation croît, d'une façon générale, de l'orifice de la galerie vers le centre du massif. Il convient toutefois de noter la chute brutale de la résistivité (2 640 ohm.cm) au P.M. 3 620 : les venues d'eau provenant de ce contact ont une résistivité faible et une concentration en sulfate élevée (double de celle des dolomies), ce qui, joint au fait que leur teneur en tritium est élevée, tend à prouver qu'elles proviennent d'un aquifère différent. Le rapport $\frac{r\,Ca^{++}}{r\,Mg^{++}}$ indique un accroissement de la concentration relative en ions Mg lorsque l'on pénètre au cœur du massif, parallèlement à une augmentation de la teneur en sulfate. Ceci est peut-être dû au fait que l'eau, dont la température est plus élevée au cœur du massif, a dissous moins facilement que les eaux froides le calcaire des terrains qu'elle traversait.

Fig. 20



2.4.4. - Venues d'eau

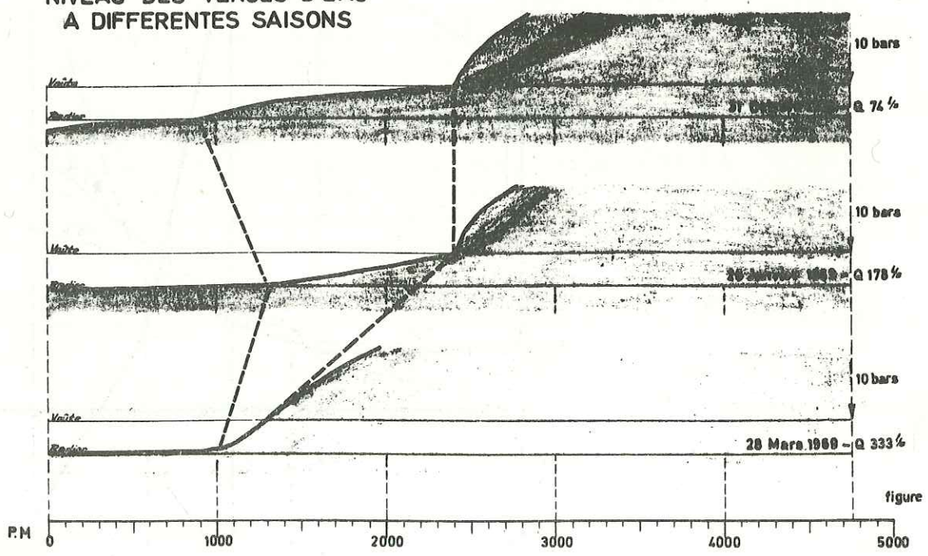
Le lecteur se reportera au paragraphe 3.2.5. pour avoir une idée des difficultés généralement posées par les venues d'eau en galerie. Dans le cas de la galerie de Signes aval, l'épuisement des eaux était facilité par le fait que le radier était légèrement en pente vers l'orifice de la galerie. Au front de taille, cependant, les venues d'eau étaient fréquemment de plusieurs litres/seconde, jusqu'à 15 l/s, créant des conditions de travail difficiles pour les mineurs. Ces venues d'eau s'amortissaient, en un point donné, au fur et à mesure de la progression du front de taille. Elles étaient de l'ordre de 20 à 50 l/s par kilomètre de galerie suivant la saison et la portion considérée.

Un caniveau taillé dans le radier au pied d'un des pieds-droits collectait les eaux de ruissellement, tandis que tous les 600 à 800 mètres, un batardeau permettait l'installation de pompes qui refoulaient l'eau jusqu'à l'extérieur par des conduites longeant la galerie. Après creusement de la galerie, dans le cadre de la fourniture en eau à la région toulonnaise en période d'étiage, une cunette de plus grande dimension permettant de véhiculer la totalité du débit de crue (plus de 300 l/s) fut creusée suivant l'axe médian du radier, bétonnée, et recouverte de dalles en béton dont les joints étaient étanchéifiés afin de ne pas souiller l'eau d'exhaure. Dans le même temps, de nombreuses venues d'eau, dans les calcaires marneux en particulier, étaient captées grâce à des tubes souples menant directement à la cunette. Ce dispositif permet l'extraction des eaux du massif, même après revêtement de la galerie. Lorsque les ouvrages seront mis en service, l'étanchéité entre la galerie (en charge) et le massif sera assurée par l'injection de la cunette et des captages. Les venues d'eau dans la galerie, si elles ont posé des problèmes au moment du creusement, n'ont pourtant pas nécessité de colmatage par injection dans le massif comme dans Signes amont, d'autant plus qu'elles étaient destinées à être exploitées.

Le rabattement réalisé par la galerie sur la nappe du massif d'Agnis varie avec les saisons. Les positions de la nappe pour les débits d'étiage, de crue, et intermédiaire sont indiquées sur la figure 21.

GALERIE DE SIGNES AVAL — Fig. 21

NIVEAU DES VENUES D'EAU A DIFFERENTES SAISONS



2.5. - KARSTIFICATION

La karstification se développe essentiellement dans les "dolomies" des 3 000 premiers mètres, et elle n'a qu'une importance limitée. Il n'a pas été rencontré de véritable réseau visitable, comportant éventuellement des rivières souterraines ou des puits communiquant avec la surface, comme dans les calcaires portlandiens de la galerie de Mazaugues ou le Turonien de la galerie du Beausset. Les seuls phénomènes karstiques se limitent à des cavités de quelques mètres de diamètre, généralement remplies d'argile de décomposition des dolomies. De nombreuses failles ouvertes ont été agrandies par l'action des circulations, mais l'extension et le diamètre de ces chenaux sont limités. La cheminée de 15 mètres de haut, 3 mètres de large, remplie de sable fin, rencontrée par la galerie au contact dolomies - calcaire bathonien au P.M. 3 000 peut être groupée avec ces phénomènes karstiques. Ce sable est le résultat de l'altération poussée des dolomies (cargneulisation).

Les difficultés occasionnées par les poches karstiques sont dues surtout à l'argile qui les comble et dont le gonflement a nécessité, soit un soutènement lourd, soit simplement la pose de plaques d'envol. Les poches sableuses sont les plus redoutées, à cause du danger d'éboulement soudain qu'elles représentent en terrain sec, mais surtout lorsque se produit le phénomène de boulance (massif aquifère). L'étude des sédiments sortant avec l'eau des trous de mine à l'avancement peut permettre de prévoir l'existence de telles poches. Les venues d'eau, dans les dolomies, étaient fréquemment localisées dans des conduits karstiques, ce qui était plutôt un avantage pour les capter.

2.6. - LE SOUTENEMENT

Ce paragraphe sur le soutènement nous paraît s'imposer dans cette étude après travaux, car c'est le critère qui est généralement retenu pour classer les terrains. C'est sur cette classification que se basent le maître-d'œuvre et l'entrepreneur pour estimer le coût de l'ouvrage.

On trouvera au paragraphe 3.2.3. quelques détails sur les profils types du chantier de Signes aval, avec illustration par des photos profils. Il faut noter que ces profils types peuvent varier suivant les chantiers et suivant la qualité des terrains ; en général, les têtes d'ouvrages et les zones très mauvaises sont traversées en profil circulaire.

2.6.1. - Les diverses formes de soutènement

Profil I

Lorsque les terrains sont de bonne qualité, les parements et la calotte de la galerie tiennent d'eux-mêmes sans qu'il soit nécessaire après les phases de tir et de marinage de les soutenir. Il est fréquent cependant d'être amené à enfoncer dans des trous forés, des barres de fer de plusieurs mètres de longueur et de diamètre 36 millimètres (boulons d'ancrage à expansion) que l'on boulonne à leur extrémité au-dessus de plaques d'appui pour maintenir les feuillets décompressés ou des bancs en déséquilibre. Pour maintenir une zone ébouleuse peu étendue, on utilise des "plaques d'envol" maintenues par deux boulons d'ancrage. Ce sont des plaques métalliques percées de trous utilisées pour les pistes sur les aérodromes "de fortune".

Cette classe de terrains correspond au profil I.

Profil II

Lorsque le terrain devient plus fracturé, que les pieds-droits exercent une poussée vers la galerie, on pose alors en arrière du front, si la galerie peut tenir pendant un certain laps de temps sans soutènement, des cintres dont le poids au mètre linéaire n'excède pas 29 kg. Ils sont posés régulièrement (tous les 1,4 m dans la galerie de Signes aval) et reliés entre eux par des plaques d'envol ou des plaques de blindage partout où des chutes de blocs sont à craindre.

Si l'effet de la dessication (ou de l'hydratation) d'une zone argileuse doit être redouté, on garnira le soutènement en outre d'un enduit imperméable (gunitage) - C'est le profil II.

Profil III

Le profil III est prévu pour des terrains dont la tenue est très mauvaise. Il nécessite un soutènement par cintres dont le poids au mètre linéaire est égal ou supérieur à 36 kg.

Généralement, on procède à un enfilage à l'avancement, c'est-à-dire que des palplanches métalliques s'appuyant sur les derniers cintres sont enfoncées à force en calotte pour prévenir l'éboulement des terrains après le tir. Fréquemment, des injections de coulis de consolidation sont effectuées à l'avancement dans les terrains très fracturés ou les terrains meubles poreux. On attaque ensuite à l'explosif le massif ainsi consolidé.

2.6.2. - Distribution des zones soutenues dans la galerie de Signes aval

Sur 400 mètres de Portlandien, 215 mètres ont été soutenus, soit 50 %.
Sur 2 600 mètres de dolomies néojurassiques, 200 mètres ont été soutenus, soit 8 %.
Sur 550 mètres de Bathonien supérieur, 110 mètres ont été soutenus, soit 20 %.
Quant aux 1 200 mètres de calcaires marneux du fond de la galerie, ils ont été intégralement soutenus plusieurs mois après la fin du creusement, lorsque les éboulements commencèrent à se produire.

En général, les zones cintrées correspondent aux failles de grande épaisseur avec remplissage d'argile ou de mylonite, aux zones karstiques, et pour les premiers 400 mètres de la galerie, aux calcaires en gros bancs fracturés du Portlandien.

En résumé, sur les premiers 3 600 mètres de galerie, c'est-à-dire dans les calcaires et les dolomies, 6/7 de la galerie est en profil I, 1/7 en profil II et le profil III n'a pratiquement pas été utilisé.

En ce qui concerne les calcaires marneux, il est possible qu'un gunitage systématique en cours d'avancement aurait laissé un plus grand délai avant que le phénomène de décompression ou de dessication des parements ne nécessite le soutènement. En tous cas, si la phase de revêtement avait pu suivre immédiatement le creusement de cette portion, ce soutènement à retardement n'aurait pas été nécessaire.

3. - ESSAI DE GENERALISATION DES DONNEES ACQUISES

Nous reprenons dans ce paragraphe les différents points développés dans la première partie, en les présentant suivant une classification utilisable par le projecteur, qui n'a comme connaissance au départ que les caractéristiques géologiques des terrains, déterminées par les reconnaissances sur le terrain et les essais de laboratoire, et qui désire savoir quels genres de problèmes se poseront au creusement et comment les résoudre.

Dans une première partie, on trouvera donc les principaux caractères définissant les roches sédimentaires. Dans la deuxième partie, nous avons traité ensemble les difficultés de creusement et leurs solutions techniques. Nous avons tenu compte, pour élargir le domaine de nos investigations, de caractères observés dans d'autres galeries que celles de Signes aval, en particulier dans Signes amont, Mazaugues, la galerie du Beausset, dont le percement était, soit en cours, soit terminé.
Enfin, un tableau récapitulatif en trois colonnes résume les deux premiers paragraphes.
Il est bien entendu que cet essai de synthèse s'appuie seulement sur notre expérience personnelle de quelques galeries de faible diversité géographique et géologique, et qu'il n'a pas l'ambition de concerner tous les cas possibles de massifs géologiques traversés par des ouvrages souterrains.

3.1. - CARACTERISTIQUES GEOLOGIQUES DES ROCHES SEDIMENTAIRES

Nous allons passer en revue les divers types de roches sédimentaires, classées dans une optique de creusement en roches solides, roches plastiques, terrains non consolidés et hétérogènes.

3.1.1. - Roches solides

+ Nature intrinsèque

La nature intrinsèque d'une roche sédimentaire solide se mesure sur des échantillons de roche saine, formant la matrice du massif. Les essais se font généralement au laboratoire pour mesurer les paramètres suivants :

- résistance à la compression Rc,
- module d'élasticité $E = C \cdot \left(\frac{\ell}{\Delta \ell}\right)$

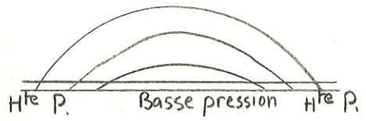
- résistance à l'usure : essai normalisé,
- altérabilité : essai normalisé,
- densité,
- porosité (efficace, totale),
- composition chimique : les paramètres intéressant le creusement sont surtout la teneur en argile et en silice,
- dureté de la roche.

+ Stratification - litage

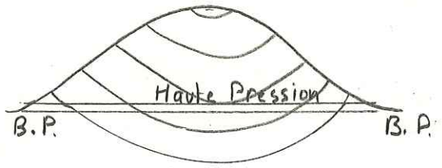
La stratification des terrains, qui est une discontinuité originelle du massif, est à considérer au même titre que les discontinuités formées ultérieurement par rupture sous l'effet des mouvements orogéniques. Elle est la cause de l'anisotropie des terrains, anisotropie parfois uniquement mécanique lorsque certains niveaux lithologiques n'ont pas de stratification visible.

+ Plissements - formes structurales

Lorsque les couches formées par la stratification sont soumises à une poussée tectonique, dans le cas où les terrains sont relativement incompétants, elles peuvent s'ordonner en plis anticlinaux et synclinaux. L'état de contrainte existant dans les terrains est alors variable suivant la position structurale dans laquelle se trouvera la galerie. Si l'on traverse perpendiculairement à l'axe un pli anticlinal, les sections d'entrée sont soumises à des pressions élevées tandis que le cœur de l'anticlinal est sous une faible pression.



Anticlinal



Synclinal

- Variation de la pression orthogonalement à l'axe d'un anticlinal et d'un synclinal -

+ Fracturation

La fracturation, qui résulte des efforts subis par les roches, est particulièrement développée dans les régions tectonisées. Nous pouvons simplement distinguer, dans l'étude de la fracturation :

- les failles, caractérisées par leur épaisseur, la nature du remplissage entre les épontes, leur direction et leur fréquence ;
- les diaclases, plans de discontinuité n'ayant favorisé aucun rejet entre les compartiments qu'elles séparent, d'épaisseur négligeable et affectant la matrice rocheuse uniformément. Les diaclases ont été caractérisées par leurs orientations, qui se regroupent en familles autour de mêmes directions principales, et par leur densité.

3.1.2. - Roches plastiques

Argiles et terrains argileux

Leurs caractéristiques mécaniques sont mesurées en laboratoire, par essai triaxial pour connaître la résistance à la compression, ou par d'autres essais pour la résistance au cisaillement, à l'étirement, etc. Leur comportement est souvent déroutant, à cause de leurs propriétés spécifiques, et du fait qu'un temps de réaction plus ou moins prolongé est parfois nécessaire pour que celles-ci manifestent leurs effets.

- La résistance au cisaillement diminue progressivement à l'occasion d'une réhydratation ou d'une dessication, mais celle-ci se réalise dans un délai très variable (jusqu'à quelques mois).

- Fluage: la prévision en est délicate, car on ignore à quelle vitesse le matériau va réagir à la modification du champ des contraintes que provoque l'ouverture de la galerie. Le déplacement de matière se produit sans variation appréciable de volume : on va donc constater l'apparition concomitante d'un affaissement.

- Gonflement : par hydratation (montmorillonites)
par décompression (cf. 2.2.2.)

Anhydrite - gypse

Le sulfate de calcium (anhydrite) SO_4Ca se transforme par hydratation en gypse SO_4Ca, $2\,H_2O$ avec augmentation de volume de un tiers environ. Cette transformation doit être considérée comme un processus courant, démontré par le fait que les massifs d'anhydrite sont souvent enveloppés de gypse, au voisinage de la surface du sol.

En ce qui concerne la rapidité de cette transformation, les données sont variables. Dans certaines galeries, la transformation se faisait pendant le creusement lui-même ; d'autre part, des échantillons d'anhydrite conservés dans l'eau pendant plusieurs mois ne montrent pas trace de gonflement.

3.1.3. - Terrains "non consolidés" et hétérogènes

Dans les terrains non consolidés, nous regroupons les terrains meubles ébouleux tels que le sable, les alluvions, les éboulis, les moraines et également les roches dont la matrice est si complètement désorganisée, sous l'action d'une fissuration très intense, qu'elles n'ont plus aucune cohésion. Au sein d'un massif sédimentaire, les terrains meubles rencontrés consistent surtout en sables.

Ils peuvent correspondre, soit au remplissage d'un karst par l'extérieur, à une époque géologique donnée, soit à une altération sur place de la roche, dans le cas des dolomies, soit bien sûr à une non consolidation génétique des niveaux.

Les terrains hétérogènes sont différents en ceci qu'ils sont composés de plusieurs "phases" de qualités mécaniques très différentes. Ce sont principalement les zones mylonitiques composées de brèches à gros blocs à ciment principalement argileux ou sableux. Les karsts, comblés ou non de sables et d'argiles.

3.1.4. - Hydrologie - Karst

La présence d'eau dans le massif est un facteur de grande importance qui peut être prévu par l'étude hydrologique de la région et dont la cote piézométrique éventuelle peut être connue par les sondages de reconnaissance. Si le régime est purement karstique, on ne peut plus parler de nappe piézométrique et les circulations s'effectuent suivant des chenaux privilégiés dont la reconnaissance est extrêmement aléatoire.

3.2. - DIFFICULTES DE PERCEMENT LIEES A CES CARACTERES ET REMEDES EVENTUELS

Les critères géologiques précédemment définis déterminent les difficultés que les travaux rencontrent dans chaque étape de la réalisation d'un souterrain.

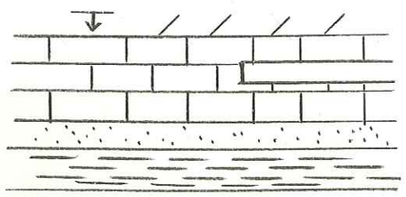
Nous allons considérer successivement les différentes phases du creusement et les problèmes qui se posent lors du percement, et envisager les moyens mis en œuvre pour les surmonter.

3.2.1. - Perforation, chargement et tir

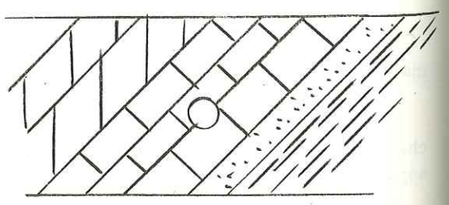
Les difficultés de perforation des trous de mines sont dues :

- à la dureté de la roche, ou à la présence de silice qui use plus rapidement les fleurets et qui allonge anormalement le temps de cette opération ;
- à l'orientation de la galerie par rapport aux couches ou aux systèmes de fracturation ;
- à la densité de la fracturation.

Galerie parallèle aux couches

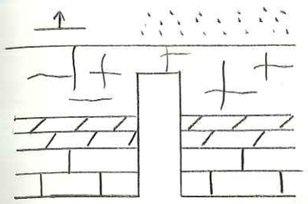


Vue en plan

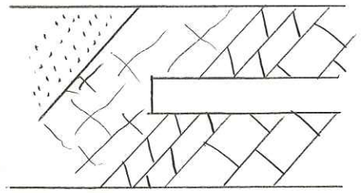


Vue en coupe

Galerie perpendiculaire à la direction des couches



Vue en plan



Vue en coupe

Lorsque la galerie est parallèle à la direction des couches, ou du système de fissures, les trous de mines coïncident fréquemment avec une discontinuité, et les fleurets se coincent. Dans le cas opposé où la stratification, ou la fissuration, sont de direction orthogonale à la galerie, la foration est facilitée, mais c'est l'énergie lors du tir qui se dissipe dans les nombreux joints recoupant le trou de mine, l'explosion perdant ainsi une partie de son efficacité destructrice.

Lorsque les trous forés rencontrent des niveaux argileux, c'est le chargement des explosifs qui peut être difficile, les argiles en gonflant risquant d'obstruer le conduit.

Cas du creusement en continu (appareil tunnelier)

Nous n'envisageons, dans ce travail, que la méthode de percement classique en trois temps : perforation (à l'aide du "jumbo"), tir, marinage.

Notons cependant que dans la foration en continu, effectuée par une machine semblable à une grosse foreuse, l'appareil tunnelier, le principal problème n'est pas la dureté de la roche - il suffit d'utiliser des outils plus durs - mais son hétérogénéité, due aux fractures plus ou moins argileuses, sur lesquelles les taillants se bloquent à chaque rotation des "couronnes", ce qui finit par ébranler et casser les pièces. Le grand avantage de ce système est qu'il fore une galerie rigoureusement au diamètre voulu, sans hors profils, prête à être immédiatement revêtue. L'une de ces machines est en fonctionnement pour le percement de la galerie de Saint-Maximin. Son avancement est extrêmement faible (moins de 0,5 m par jour) par rapport au système classique pour un même diamètre de galerie (5 à 10 mètres par jour), à cause, justement, de l'hétérogénéité du terrain (dolomies fissurées argileuses).

3.2.2. - Marinage

L'opération de marinage consiste en l'évacuation, après le tir, des déblais provenant du front de taille. Lorsque la fracturation est particulièrement intense, les éléments sont réduits en une sorte de sable, et s'il y a de l'argile, le marinage est plus délicat, les engins étant conçus pour ramasser des blocs de dimension moyenne. Il faut donc prévoir des engins rentables dans ces terrains hétérogènes où la granulométrie des déblais est très variable.

3.2.3. - Hors profils

Lors du creusement d'une galerie, l'idéal serait évidemment de limiter l'abattage au gabarit exact prévu pour celle-ci et son revêtement. Le marché passé avec l'entrepreneur fait état en réalité d'un gabarit un peu supérieur qui doit être atteint en tout point.

Les vides apparaissant au-delà de ce gabarit sont les hors profils, qui ne lui sont pas payés ou le sont suivant un tarif dégressif, et représentent donc une perte à plusieurs chefs : excèdent de marinage, surépaisseur du revêtement, accroissement des injections de bourrage.

Les photos profils

Les photos profils (fig. 22 et 23) sont les seuls documents irréfutables sur lesquels se base le maître d'œuvre pour payer l'entreprise. La ligne intérieure correspond à la section d'écoulement de la galerie, la ligne médiane est la ligne minimale sur pointes et la ligne la plus externe correspond au gabarit un peu supérieur au-delà duquel les vides sont considérés comme des hors profils.

L'épaisseur minimale de béton est de 20 cm et la ligne la plus externe est encore à 10 cm. Le volume théorique de déroctage et le volume de béton sont payés suivant un prix forfaitaire. La planimétrie de la section d'après les photos donne le volume des hors profils payés à 30 %. Seuls les accidents géologiques sont payés à la quantité réelle de béton utilisé.

Rive droite

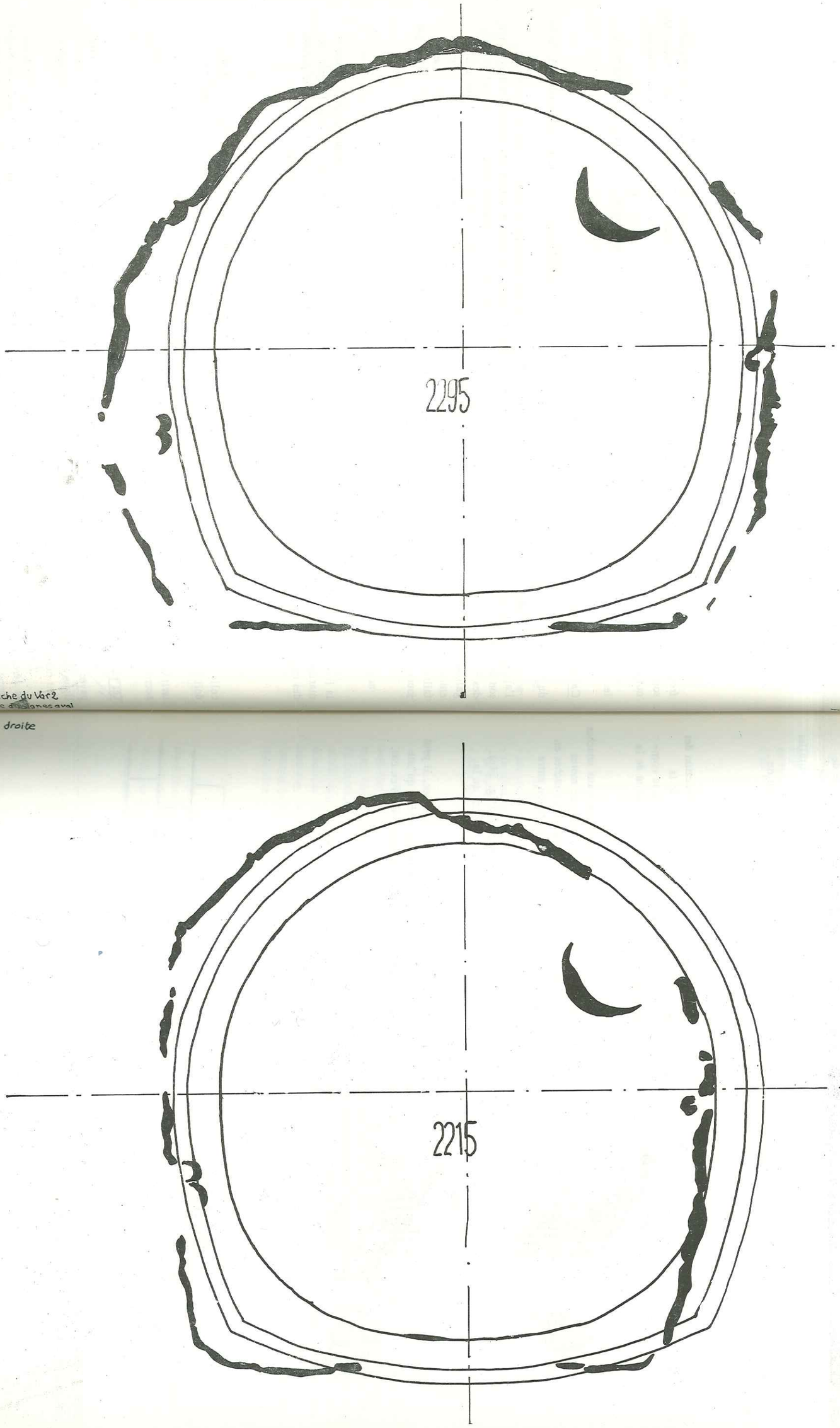


Fig 22

Rive gauche

Echelle : 1/25

Branche du Var 2
Galerie de Signes aval

Rive droite

Fig 23

Rive gauche

Echelle : 1/25

Branche du Var 2
Galerie de Signes aval

Une photo profil est prise tous les 5 mètres de galerie. La photo du P.M. 2 295 présente un profil convenable avec cependant un hors profil en rive droite, celle du P.M. 2 215 montre qu'un déroctage supplémentaire au marteau piqueur sera nécessaire en rive gauche et en calotte pour atteindre le profil type. Ces profils décalés vers la gauche semblent dus, en fait, à une erreur de pilotage systématique.

Les facteurs qui interviennent dans les hors profils sont : la densité des surfaces de discontinuité, la méthode de creusement (explosifs plus ou moins brisants), dans certains cas la dimension du tunnel, et surtout à notre avis, les anisotropies de la roche. Elles sont dues à la stratification, ou à la fracturation quand celle-ci se traduit par des familles directionnelles de failles ouvertes, soit vides, soit remplies d'argile ou de brèche.

Suivant la situation du tunnel par rapport à la stratification (ou à la fracturation) les hors profils seront plus ou moins importants.

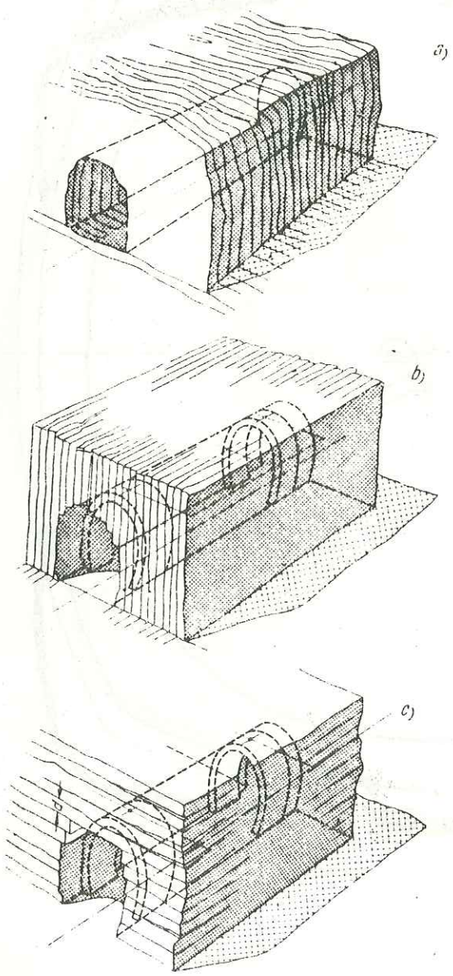


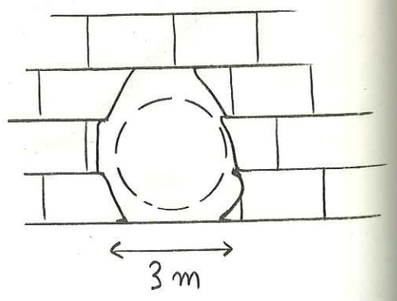
Figure 24 - Situation du tunnel par rapport à diverses orientations de la stratification

Si la galerie est perpendiculaire à la direction des couches verticales (fig. 24a), le découpage de la section se fait parfaitement et chaque niveau se comportant comme un arceau indépendant, la tenue de la galerie est excellente.

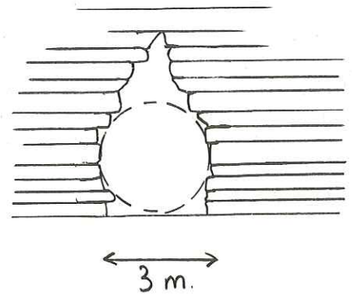
Dans le cas d'une galerie longitudinale aux couches verticales (fig. 24b), le découpage s'effectue moins régulièrement et la seule force retenant les couches en couronne est due à la friction et à la cohésion entre niveaux adjacents.

Dans le cas de couches horizontales (fig. 24c), l'épaisseur des bancs par rapport à la largeur de la galerie intervient.

Si les couches sont relativement épaisses, il peut se former d'importants hors profils dus au fait qu'une couche doit être abattue intégralement ; dans ce cas, la tenue des terrains est excellente.



Si les couches sont minces, elles se brisent en voûte pour former naturellement un cloche de forme ogivale, ce type de profil correspondant en effet à la réalisation d'un équilibre du massif.



3.2.4. - Tenue de la galerie

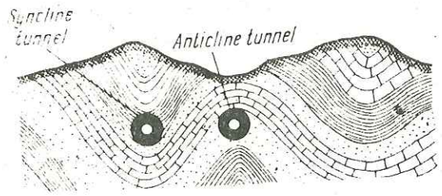
La tenue de la galerie, creusée dans des roches solides, est conditionnée par plusieurs facteurs :
- les propriétés mécaniques des roches,
- la situation structurale de la galerie,
- la nature anisotrope et hétérogène des terrains,
- dans tous les cas, les dimensions de la galerie.

3.2.4.1. - Les propriétés mécaniques des roches solides

Les propriétés mécaniques intrinsèques des terrains, dans le cas du creusement dans des roches solides, n'interviennent que dans des cas particuliers : terrains dont la résistance à la compression est très faible (argile, gypse), recouvrement énorme (tunnel du Mont-Blanc). En effet, la pression exercée par les terrains sur les parois, égale à peu près lors du creusement au double de la pression hydrostatique, ainsi que les contraintes résiduelles résultant d'épisodes orogéniques antérieurs, sont généralement faibles par rapport à la résistance à la compression des roches telles que les calcaires ou les dolomies, dans le cas de galeries à profondeur moyenne (telles que celles du Canal de Provence). Dans un rocher massif, isotrope, la redistribution des pressions n'introduit que des modifications de détail dans la forme de la section, surtout lorsque celle-ci est voisine d'un cercle. Le rocher se comporte d'emblée, dans ce cas, comme le ferait une voûte de maçonnerie : on parle d'ailleurs d'"effet de voûte" pour caractériser cette réaction favorable.

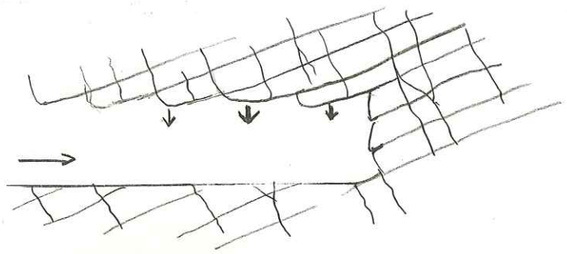
3.2.4.2. - Situation structurale de la galerie

Nous avons vu (3.1.1.) que la distribution des pressions se fait différemment dans un anticlinal ou dans un synclinal. Dans le cas où le tunnel doit suivre la direction des plissements, il est toujours préférable qu'il soit localisé en position anticlinale. Les pressions seront plus faibles qu'en position synclinale et les venues d'eau seront moins à craindre et moins violentes que dans le cas contraire (galerie de Signes aval, galerie sèche du P.M. 3 900 à 4 400, structure légèrement anticlinale).



3.2.4.3. - Nature anisotrope et hétérogène des terrains

Les propriétés mécaniques intrinsèques des roches, aussi bonnes soient-elles, ne suffisent pas toujours à caractériser un terrain au point de vue du creusement. L'anisotropie des terrains, dont la stratification et la fracturation sont responsables, intervient au premier chef dans la tenue de la galerie. Nous avons déjà étudié au paragraphe 3.2.3. les différentes positions de l'axe de la galerie par rapport à la direction des couches (ou de la fracturation principale) et porté une appréciation sur la tenue de la galerie correspondant à chaque cas.



Un autre cas particulièrement défavorable se produit lorsque la stratification est faiblement pentée vers la sortie de la galerie et que de plus les strates sont fissurées. A chaque volée, les bancs de la voûte, qui ne sont plus soutenus, menacent de se détacher en bloc, obligeant à des opérations de purge ou à des épinglages en calotte.

Lorsque la galerie rencontre des terrains hétérogènes (karst, mylonites, chevauchements), toutes les opérations du creusement en sont affectées : l'imprévision des terrains rencontrés d'une volée à l'autre peut être totale ; pour le marinage, les outils appropriés à un type de déblais ne conviennent plus à un autre type ; enfin, la tenue de la galerie est compromise et nécessite tout l'arsenal de matériel de soutènement, depuis les boulons d'ancrage jusqu'aux cintres lourds et aux palplanches pour l'enfilage à l'avancement.

Rappelons le cas particulier des argiles, dont les propriétés de gonflement et de fluage, ont des conséquences parfois tardives sur la tenue de la galerie.

3.2.4.4. - Dimensions de la galerie

Dans tous les cas, une galerie de plus petit diamètre aura une meilleure tenue, et sera plus facile à soutenir qu'une galerie de grand diamètre. C'est d'ailleurs pourquoi certains tunnels routiers de grandes dimensions sont creusés à partir de plusieurs petits tunnels. Dans certains cas (autoroutes), on préfère même creuser deux galeries distinctes. Il y a cependant une limite inférieure conditionnée par les dimensions des engins de creusement : jumbos, pelleteuses, trains ; et les conduits divers passant dans la galerie (canars de ventilation, air comprimé , etc.).

3.2.5. - Venues d'eau

En galerie, les phénomènes hydrologiques se traduisent par des venues d'eau, diffuses ou localisées. Les venues d'eau, lors du creusement d'une galerie, posent toujours des problèmes, à commencer par celui de la protection des ouvriers. Celle-ci est assurée par la mise en place en voûte d'une simple tôle ondulée dans les zones trop ruisselantes.

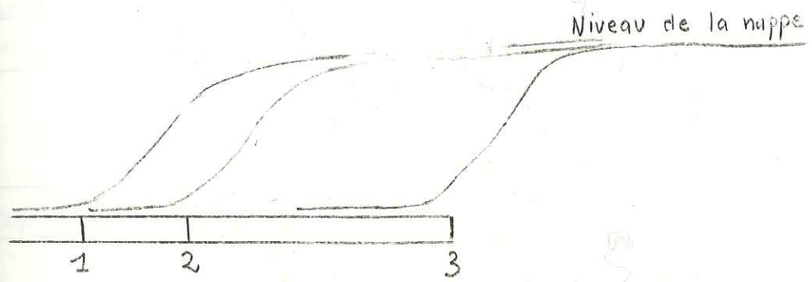
Lorsqu'une galerie doit traverser un massif que l'on prévoit être aquifère, il est préférable de lui donner une pente légèrement montante depuis les fenêtres d'attaque, afin que l'écoulement se fasse, au moins en partie, naturellement, et pour limiter les risques d'immersion du chantier au cas où les pompes viendraient à être insuffisantes pour évacuer un débit soudain. Dans les zones karstiques, on peut s'attendre à des débits de l'ordre de 1/2 m^3/s. La galerie de Signes amont était creusée de l'amont vers l'aval, et les conditions de travail au front étaient pénibles, malgré les puissantes pompes qui y avaient été installées. L'arrêt du pompage, dû à une grève d'électricité d'une journée, a suffit pour que, à la sortie de la galerie de Signes aval, la nappe remonte de plus d'un mètre au-dessus du radier de la galerie. On voit les conséquences graves qu'entraînerait la panne d'une pompe dans une galerie à attaque descendante.

Hormis le cas où les venues d'eau ont un débit supportable et n'introduisent pas de sujétions trop lourdes dans la poursuite des travaux de percement (c'est le cas de Signes aval), la lutte contre leur irruption va s'imposer toutes les fois où, sous le toit d'une nappe, le chantier doit traverser, soit des roches broyées ou largement fissurées (Signes amont), soit des niveaux poreux meubles, comme les sables par exemple, ces derniers entraînant de surcroît le risque de boulance.

Les modes de traitement utilisés sont les suivants :
- rabattement par drains forés à l'avancement,
- injections à l'avancement de coulis, dont la composition, dans les dolomies hettangiennes fissurées de Signes amont, était essentiellement à base de silice. Les forages d'injection, disposés à la périphérie du front, sont légèrement divergents par rapport à l'axe du tracé, de telle sorte que la zone traitée a la forme d'un tronc de cône. Les injections ont le double avantage de diminuer le débit des venues d'eau et de consolider le terrain finement fissuré.

Assèchement des sources

Les venues d'eau au front de taille sont souvent abondantes puis s'amortissent lorsque le creusement se poursuit dans le massif. Le drainage ainsi causé par la galerie créé un rabattement de plus ou moins grande extension pouvant assècher un certain nombre de sources périphériques.



Avancement de la galerie.

Il faut donc prévoir avant les travaux de réalimenter les communes ou les propriétaires lésés, éventuellement en utilisant les eaux drainées par la galerie.

3.3. - TABLEAU RECAPITULATIF

Dans le tableau suivant, nous avons fait figurer les points importants développés dans les paragraphes précédents. En face de chaque caractère géologique défini au paragraphe 3.1. (première colonne du tableau) figure quelle difficulté principale il entraîne et quelle phase de creusement est affectée (deuxième colonne).

La troisième colonne indique les moyens qu'ont les projeteurs et les exécutants pour surmonter ces difficultés.

Caractéristiques géologiques des roches sédimentaires	Phases de creusement influencées - Difficultés	Remèdes
A. Roches solides a - Nature intrinsèque Composition chimique : dureté (présence de quartz)	Perforation : usure des outils	- taillants plus durs (dans le cas de creusement avec tunnelier) - fleurets spéciaux
Altérabilité : (présence d'argile)	Tenue de la galerie à longue échéance	- gunitage - soutènement - bétonnage immédiat après déroctage - boulonnage des blocs décollés
Propriétés mécaniques : Rc et E	Tir	- choix et quantité d'explosif - dispositif de mise à feu
	Tenue de la galerie dans les cas extrêmes : 1) Rc très faible 2) Recouvrement énorme	- Soutènement
b - Stratification	Hors profils	- choix du tracé - dispositif de tir (prédécoupage)
	Tenue des terrains	- boulonnage - épinglage des bancs - purge
c - Forme structurale anticlinal/synclinal	Tenue de la galerie — Forte poussée des terrains Faible poussée des terrains	- choix du tracé
d - Fracturation Orientation Fréquence Nature du remplissage	Foration : coincement des fleurets Efficacité du tir Hors profils Tenue des terrains	- choix du tracé - quantité d'explosif Soutènement : - épinglages - plaque d'envol boulonnée (dans le cas du remplissage argileux) - cintres
B. Roches plastiques a - argile	Marinage	Prévision d'engins spéciaux
Résistance au cisaillement	Affaissement flambage des cintres	- soutènement lourd - vérification périodique des cintres
Fluage	Dû en particulier au roulage	Construction d'un préradier en béton
Gonflement	chargement des trous de mine Tenue de la galerie Chute de blocs	Soutènement : du gunitage au soutènement lourd
b - Gypse Gonflement lors de la transformation anhydrite en gypse	Ecrasement de la galerie	Soutènement lourd Gunitage ?
Composition chimique : sulfate	Agressivité des eaux sulfatées	Revêtement extérieur en ciment spécial
C. Terrains non consolidés et hétérogènes Sable Sable + eau	Eboulement Boulance	- sondages de reconnaissance systématique en galerie - coffrage général de la galerie à l'avancement - enfilage à l'avancement - injections de silicates

Tableau (suite)

Caractéristiques géologiques des roches sédimentaires	Phases de creusement influencées - Difficultés	Remèdes
Eboulis	Eboulement Risque de sous cavage de gros blocs	Soutènement lourd avec protection par palplanches métalliques
Terrains hétérogènes	Succession rapide de techniques de creusement très différentes	
	Manque d'unicité dans la technique de creusement	
Zones mylonitiques Macro-brèches argileuses	Imprévisibilité fréquente	- examen des sédiments sortant des trous de mine - sondage de reconnaissance
	Fluage	- Soutènement
	Chute des blocs emballés dans l'argile	- Gunitage - Soutènement avec grillage de protection métallique
D. Hydrologie	- Venues d'eau - Submersion du chantier	Protection des ouvriers (tôle de protection) Attaque montante Epuisement - captages - pompes - cunette Drains : sondages au front Injection de colmatage
	Tarissement des sources du massif	Prévoir la réalimentation des propriétaires lésés
E. Karsts	Chute de blocs	- grillages de protection - bétonnage de la voûte - injections de bourrage de la cloche
	Débourrage de sable ou d'argile	- sondages prévisionnels - injections de silicates à l'avancement
	Passage de la galerie au-dessus de rivières souterraines	- ouvrages spéciaux : 1) ponts 2) barrages souterrains des conduits karstiques

4. - COMPARAISON ENTRE LES PREVISIONS ET LE LEVE APRES TRAVAUX

4.1. - GENERALITES

La comparaison entre les prévisions figurant sur l'annexe géologique de l'appel d'offre et le levé après travaux, offre au géologue la possibilité de tirer des enseignements précieux sur la manière d'utiliser efficacement et avec justesse les résultats des reconnaissances. Ces enseignements portent également sur l'organisation des reconnaissances, que l'on pourra critiquer après réalisation de l'ouvrage, en cherchant dans quels domaines elles auraient pu être plus efficaces et si certaines difficultés non attendues auraient pu être prévues.

La comparaison entre profils géotechniques intéresse surtout l'ingénieur. Plus encore que la géologie, les prévisions géotechniques doivent se baser sur l'expérience acquise. Pour une appréciation aussi subjective que celle portant sur la tenue des terrains, il est très délicat de faire des pronostics ; la prévision du matériel qui sera utilisé est donc assez aléatoire. C'est pourquoi il faut toujours calculer les quantités statistiquement sur une grande longueur de galerie et tenir compte des résultats antérieurs, concernant les mêmes terrains placés dans une situation analogue.

L'annexe géologique de l'appel d'offre pour la galerie de Signes aval, lancé en janvier 1966, était très réduit. Les études sur le terrain et les reconnaissances mécaniques se limitaient au minimum. Actuellement, les dossiers d'appel d'offres à la S. C. P. sont beaucoup plus complets, mais les études préliminaires deviennent évidemment plus longues et plus coûteuses.

L'étude géologique de la galerie de Signes aval se limitait à :
un rapport géologique (stratigraphie, tectonique) ; quelques analyses chimiques et essais de résistance des roches ; une carte géologique détaillée au 1/20 000 (Cuers n° 2) ; un profil en long géologique effectué à partir de la carte et de trois sondages, dont deux situés à peu de distance de la tête aval, et le troisième (G.R. 5) (fig. 8) plus au Nord sur le trajet de la galerie de Signes amont.

C'est pourquoi, dans un premier paragraphe, nous allons présenter quelques résultats acquis ultérieurement sur le terrain, concernant la fracturation et considérer rapidement quelles reconnaissances supplémentaires auraient fourni des renseignements intéressants pour le percement.

4.2. - ETUDES ULTERIEURES SUR LE TERRAIN

4.2.1. - Etude de la fracturation

4.2.1.1. Photo aérienne

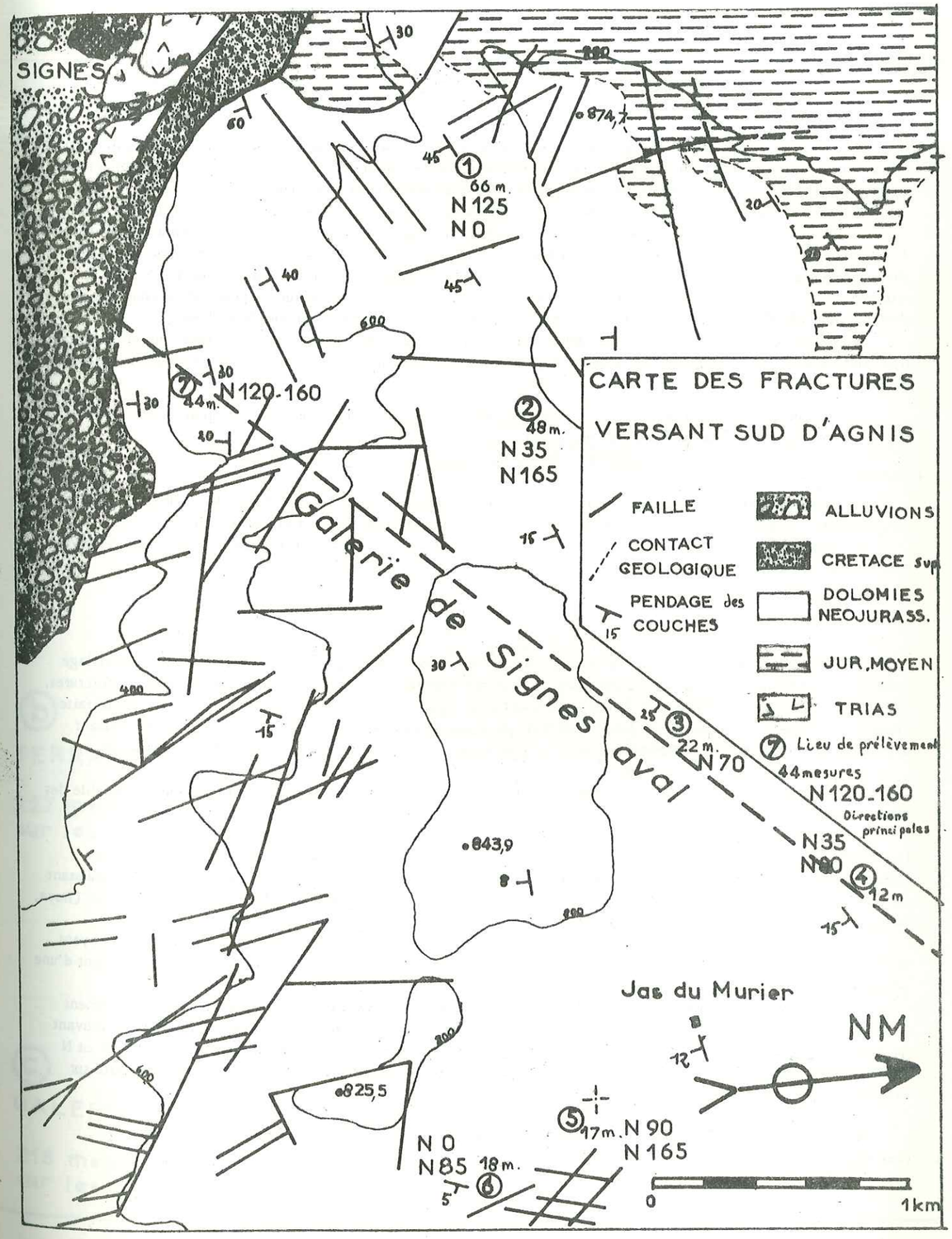
A partir des photos aériennes couvrant le versant sud d'Agnis, nous avons reporté la trace des cassures visibles sur la carte au 1/20 000. Le secteur inventorié a la forme d'un rectangle qui s'étend sur 5 kilomètres suivant un parallèle à l'Est de Signes et 2,5 km vers le Nord suivant un méridien (fig. 25). Nous n'avons recensé que les fractures situées dans les dolomies. Dans ce cas les cassures ne sont visibles que sur le versant où l'érosion a dégagé les lignes de moindre résistance tandis que sur le plateau, les failles ne sont plus visibles car masquées par l'altération sur place.

L'étude de la répartition des directions de fracture a été faite à l'aide de la représentation polaire. Chaque classe directionnelle de 10° de latitude est représentée par un trait dont la longueur est fonction de la longueur de faille visible, orientée suivant ce secteur. On voit sur la figure 26a que se dessinent nettement trois pics dont le principal est suivant la direction N 170°, et les deux autres N 125° et N 75°.

4.2.1.2. - Etude microtectonique

On a reporté sur la figure 25 les lieux des mesures de diaclases sur le terrain, ainsi que le nombre de mesures et la direction principale en ce point. Ainsi le résultat global (fig. 26b) peut-il être expliqué en fonction de l'origine des mesures. Les directions N 160° à N 180° semblent prépondérantes vers le Sud (lieux 1, 2 et 7) ainsi qu'une pointe autour de N 125°. Plus au Nord apparaissent des directions N 70° à N 90°. Il est à noter que les diaclases méridiennes (Nord-Sud) sont fréquemment calciteuses.

Fig. 25



4.2.1.3. - Comparaison avec la fracturation en galerie

Le champ de l'étude des orientations de fractures en photo aérienne et sur le terrain couvre un secteur que la galerie traverse sur environ 3 000 mètres. Nous avons établi un diagramme analogue aux précédents utilisant des mesures de direction de diaclases relevées à peu près tous les 100 m sur les 3 000 premiers mètres de la galerie (fig. 26c). Deux directions majeures apparaissent autour de N 0° et de N 90° avec une forte dispersion.

Il peut être intéressant de distinguer deux groupes de comparaison, l'un concernant les diaclases étudiées sur le terrain et en galerie (fig. 26 b, c), l'autre, les fractures vues en photo aérienne (fig. 26 a) et les failles relevées en galerie (fig. 9), que nous supposerons correspondre à un phénomène similaire quant à leur formation.

Du premier groupe, concernant les diaclases, il ressort deux directions principales, N 170° et N 80° à 100°.

Du second groupe, portant sur les fractures d'extension et d'épaisseur moyenne - quelques centaines de mètres de longueur, au moins 10 cm d'épaisseur -, on dégage : la direction N 170°, qui est la direction majeure sur les photos aériennes, et qui n'est majeure en galerie que sur les 1 000 premiers mètres ; la direction N 125°, qui se retrouve sur les deux diagrammes ; la direction est-ouest, qui est peu développée sur les photos du versant sud de l'Agnis, mais qui est prépondérante en galerie dans la partie centrale et septentrionale de celle-ci.

Si l'on constate quelques divergences dans le développement de l'une ou de l'autre des directions de fracturation, suivant que l'on a étudié les diaclases ou les failles, sur le terrain ou en galerie, on peut cependant mettre en évidence un point commun aux quatre diagrammes :

les secteurs de diagramme où ne se développe que très peu la fracturation. Ces minimums correspondent, avec une assez grande précision, aux directions suivantes :

N 40°-50° et N 135°-150°

On aurait pu craindre, au vu des résultats du paragraphe 2.3.2.1. (fig. 9), que le faible nombre d'accidents directionnels à la galerie (N 45°) relevé pour le profil géologique était dû à une erreur systématique.

Il s'agit bien en fait d'un minimum dû à la tectonique, et c'est ce qui a favorisé, entre autres, une relative bonne tenue de la galerie.

4.2.1.4. - Conclusions sur la fracturation. Début d'interprétation tectonique

L'étude de la fracturation à partir des photos aériennes et sur le terrain, qui ne nécessite, ni un appareillage coûteux, ni un temps très long, donne avec une assez bonne approximation les orientations principales des fractures, à petite et à moyenne échelle. Dans le cas de la galerie de Signes aval, elle n'aurait servi, si elle avait été faite avant le percement, qu'à confirmer que l'orientation de l'axe de la galerie était favorable, les fractures faisant généralement un angle suffisamment grand avec la galerie pour ne pas l'affecter sur de trop grandes distances.

Nous allons chercher, en nous aidant de modèles, quel peut être le mécanisme de déformation responsable des discontinuités observées.

Donnons tout d'abord quelques précisions sur les systèmes directionnels définis plus haut :

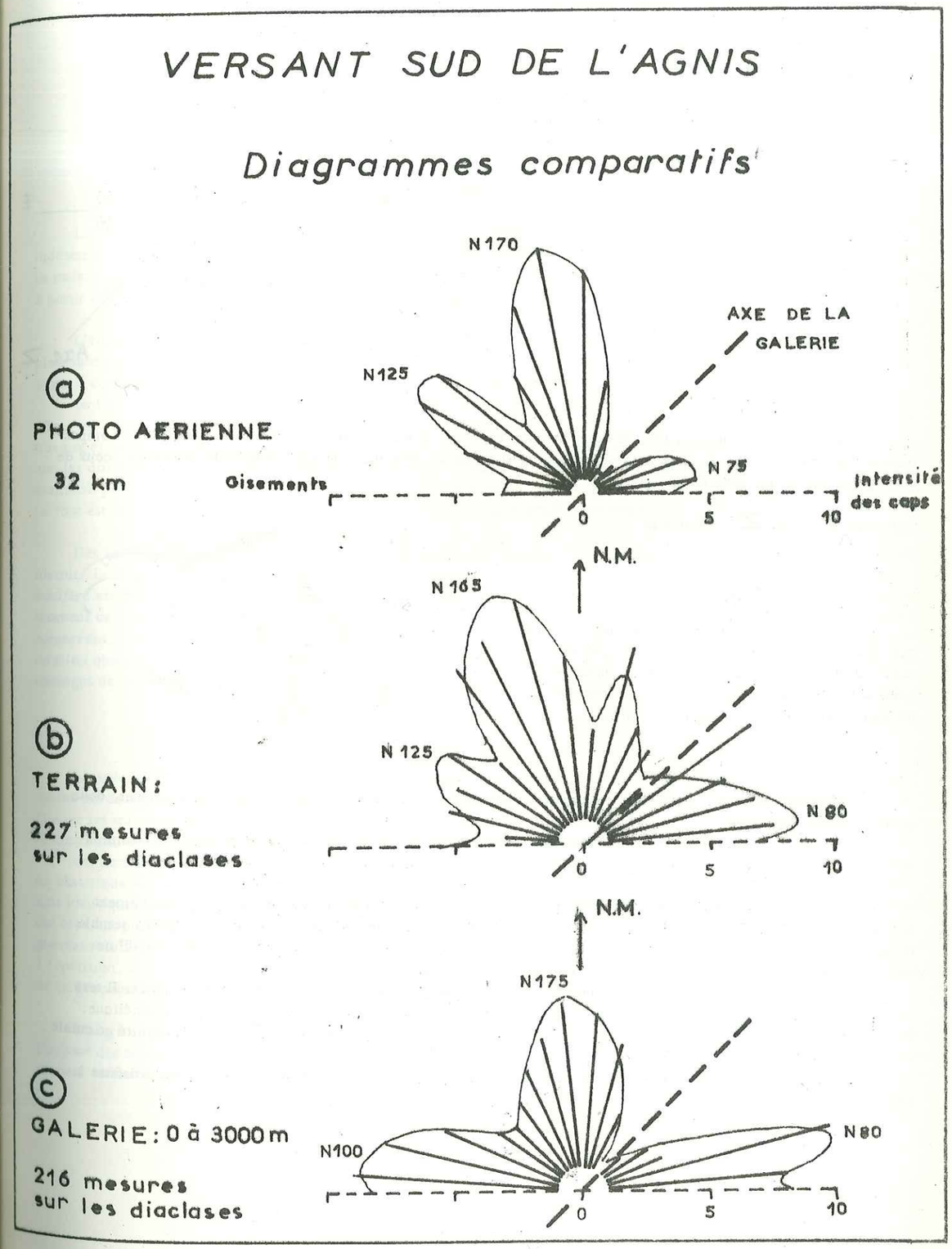
La famille de direction est-ouest se retrouve cartographiquement sous la forme de failles verticales ou pentées légèrement vers le Nord, parfois striées suivant leur ligne de plus grande pente (fig. 11, stries 9, 15, 18), abaissant les compartiments sud dans la moitié sud du massif et jouant dans le sens opposé dans la moitié nord (faille du Thuya, faille de la Petite Colle) avec un pendage sud (fig. 8).

La famille méridienne est prépondérante dans le Sud du massif d'Agnis (fig. 9 et 25). Certaines failles ayant cette direction sont ouvertes et encombrées de blocs mêlés à l'argile, mais certaines sont minces et témoignent d'une compression. Les diaclases relevées sur le terrain sont souvent calciteuses.

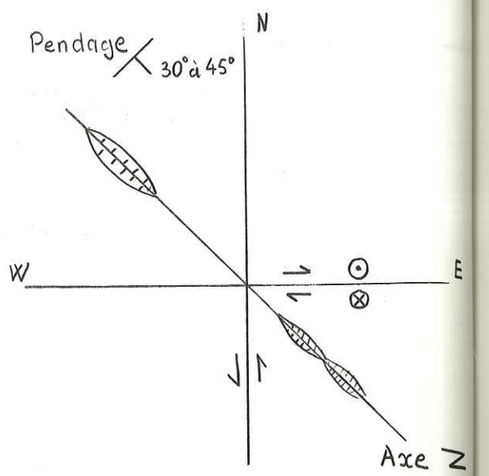
La famille N 130° est formée de plans subverticaux dont on ne peut distinguer s'ils traduisent un mouvement de compression ou un mouvement d'extension, les éléments permettant de différencier l'un ou l'autre se retrouvant en quantité égale. Cependant, la figure 13 témoigne de stries pratiquement horizontales sur des plans N 150° et N 160° et également sur des plans N 40°, N 65°, N 70° (cette direction NE-SW présente un minimum d'intensité sur tous les diagrammes polaires).

A partir de ces données, on peut échaffauder les modèles suivants, pour deux orientations de Z (axe de raccourcissement).

Fig. 26



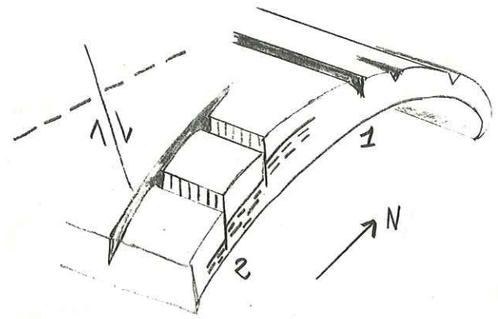
Hypothèse A - Axe Z : NW-SE



Les directions de fracture nord-sud et est-ouest forment un système de cisaillement conjugué dont la bissectrice NW-SE (N 135°) est une troisième famille de fracture confondue avec l'axe de raccourcissement maximum.

Du fait du pendage des couches, le décrochement est-ouest se traduit par un abaissement apparent des compartiments sud. Dans ce cas, les plans nord-sud et est-ouest devraient témoigner de mouvements de coulissage, ceux de direction N 135° d'une forte extension.

Hypothèse B - Axe Z : Nord-Sud



On se rappelle qu'il s'agit du flanc normal d'un anticlinal chevauchant vers le Nord. Les systèmes nord-sud et est-ouest peuvent alors être considérés comme la conséquence normale de la courbure d'un pli anticlinal, suivant le modèle ci-contre.

Les accidents est-ouest ont joué en extension à l'extrados du pli (cassures perpendiculaires aux couches, donc pentées vers le Nord) : type 1 ;

ou, lors d'une phase ultérieure de relaxation faisant rejouer des accidents préexistants, comme failles normales effondrant les compartiments du flanc sud de l'anticlinal en "marches d'escalier" : type 2.

A ce système témoignant d'un axe Z orienté Nord-Sud est associé généralement un réseau de cisaillement faisant environ 45° de part et d'autre de cet axe. On retrouve le réseau NW-SE, mais son conjugué NE-SW semble presque totalement absent. La présence de quelques stries horizontales repérées sur des plans N 150° et N 45° ne suffit pas à prouver qu'ils appartiennent à ce système de cisaillement.

Nous n'avons pour le moment aucune preuve permettant d'opter pour l'un ou l'autre modèle proposés. Il sera nécessaire de tenir compte des données structurales des régions environnantes et de leur évolution tectogénétique. Dans le chapitre suivant, au paragraphe 2.2.3.2., on trouvera une étude similaire effectuée sur l'extrémité orientale du massif du Beausset.

Nous essayerons alors, dans les conclusions sur la géologie régionale, de présenter un modèle qui satisfasse à toutes ces données.

4.2.2. - Reconnaissances supplémentaires possibles

4.2.2.1. - Sondages

Le nombre optimum de sondages, à effectuer sur le trajet d'une galerie future est influencé par plusieurs facteurs. Les principaux sont les suivants :

- la structure géologique de la zone traversée,
- l'épaisseur des terrains de recouvrement,
- le type de galerie et son diamètre.

La structure de la région, mise en évidence par la carte géologique et des coupes, crée dans certains cas une indétermination totale des niveaux que rencontrera la galerie et nécessite des sondages en des points précisés à partir de la surface. Dans le cas du versant sud d'Agnis, la structure monoclinale permettait des estimations relativement correctes à partir des contours géologiques et des mesures de pendage relevées en surface.

L'épaisseur du recouvrement est grande au-dessus de la galerie de Signes aval : 400 mètres au minimum sous le plateau d'Agnis. Ce facteur entraîne à la fois, une imprécision dans la connaissance du sous-sol à la cote de la galerie à partir de la surface, et un prix de revient élevé des reconnaissances mécaniques.

Le type de galerie et son diamètre devront décider finalement de l'importance à donner aux reconnaissances. En effet, on admet que le prix des reconnaissances ne doit pas dépasser un certain pourcentage du prix prévu pour les travaux effectifs. On peut ainsi laisser subsister une certaine part d'indétermination dans les prévisions lorsque l'on estime que les difficultés techniques n'entraîneront pas un dépassement prohibitif des prix, dans le cas d'une galerie en petit diamètre par exemple. Actuellement en effet, la technique permet de franchir à peu près n'importe quelle difficulté. Le tout est de savoir équilibrer le budget total pour effectuer les études et les travaux au meilleur prix.

Dès lors que les sondages sont exécutés, il faut essayer d'exploiter au maximum les renseignements qu'ils peuvent fournir. La description lithologique et stratigraphique est faite systématiquement ; la cote piézométrique de la nappe aquifère est connue ponctuellement. On peut regretter que l'étude de la fracturation des carottes n'ait pas été menée au moment de l'exécution des sondages pour la reconnaissance de la galerie de Signes aval, car les caisses n'ayant pas été conservées, nous n'avons pu les examiner nous-mêmes. Or, il eût été intéressant d'établir des corrélations entre la fracturation observée en sondage et en galerie, pour prévoir, lors de chantiers ultérieurs, la tenue de la galerie à partir des sondages de reconnaissance.

4.2.2.2. - Etude géophysique

L'exploration du sous-sol par des moyens géophysiques n'était pas encore utilisée à la S. C. P. lors des reconnaissances au-dessus de la galerie de Signes aval. Depuis, la méthode électrique a été utilisée avec un certain succès pour étudier les tracés de galerie sous faible recouvrement (une centaine de mètres). Les renseignements qu'elle apporte sont intéressants, mais l'interprétation des profils demande une grande prudence.

On trouvera au chapitre III (3.2.) un exemple d'investigation géophysique à grande profondeur, pour les galeries de Montrieux et Valaury. Le recouvrement est analogue par endroits à celui de la galerie de Signes aval. Les terrains sont identiques. Des différences marquées dans la résistivité des terrains permettent de distinguer les dolomies et calcaires des niveaux plus marneux du Dogger, même à grande profondeur. Les karsts ne ressortent que si leurs dimensions sont grandes relativement à l'épaisseur de terrain qui les sépare de la surface. Les failles sont mises en évidence par le traîné à répétition. Il faudra cependant attendre que se réalisent les galeries de Toulon Est pour juger du bien fondé des résultats de la géophysique sur cette branche du canal de Provence.

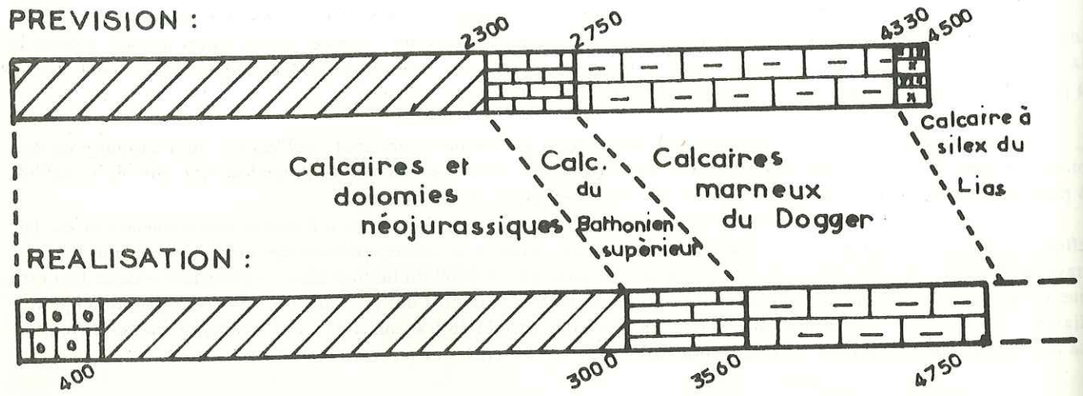
Malgré la prudence que l'on doit apporter à son interprétation et l'incertitude des informations qu'elle apporte - à l'opposé des sondages mécaniques -, la méthode géophysique électrique est un précieux complément aux autres reconnaissances, surtout à cause de la continuité de son exploration.

4.3. - COMPARAISON DES ESTIMATIONS AVEC LA REALISATION

4.3.1. - Profils geologiques

Nous avons dessiné les profils comparés des prévisions géologiques et de la réalisation (fig. 27).

Fig. 27



On voit que le profil réalisé est décalé de 700 m environ vers l'amont par rapport au profil prévisionnel. De plus, les premiers 400 mètres de la galerie ont rencontré les calcaires portlandiens à la stratification très nette, qui présentent un aspect très différent des dolomies avec lesquelles ils avaient été groupés. Il est probable que l'étude géophysique et un sondage supplémentaire dans le polje d'Agnis auraient précisé l'avant métré de la galerie.

Après réalisation des travaux, on peut se demander si cette dépense supplémentaire investie dans les reconnaissances se serait imposée, car les divergences dans les profils géologiques ne semblent pas avoir eu de répercussion technique et économique importante sur les modalités de percement.

4.3.2. - Estimations géotechniques

Les estimations au point de vue exécution des travaux (quantité de matériel, délais) et le bilan technique après travaux ne sont pas du ressort du géologue. Nous avons tenté de faire la comparaison entre les prévisions et la réalisation, mais le devis estimatif joint à l'appel d'offre ne recouvrait que le matériel correspondant à une première tranche de travaux. Il faisait état de trois types de profil, qui ne correspondent pas à ceux que nous avons défini au paragraphe 2.6.1., mais à des sections de déroctage plus ou moins grandes. Ainsi étaient prévus sur 2 750 m de galerie : 1 830 m en profil 1 de section 11,97 m^2 ; 900 m en profil 2 de section 13,27 m^2 ; 20 m en profil 3 de section 13,94 m^2. On prévoyait ainsi le volume des déblais, permettant de chiffrer le prix du déroctage.

Sur cette même longueur, l'appel d'offre prévoyait 120 cintres légers et 15 cintres lourds. Il a fallu en utiliser à peu près le double.

Bornons-nous à formuler quelques remarques. Les délais ont été à peu près respectés. Le temps prévu pour la réalisation complète de 4 500 m de galerie était de 33 mois. Compte tenu d'une tranche supplémentaire de 250 m de galerie, qui a prolongé les délais, il n'y a pas eu de retard. La moyenne d'avancement au déroctage, a été d'environ 8 m/jour pour la totalité de la galerie. Travail à trois postes. Dans les dolomies, elle a été de 8,3 m/jour, dans les calcaires du Bathonien supérieur de 6,6 m/jour et dans le Dogger de 8,5 m/jour, sans compter le soutènement de cette dernière portion, effectué plus tard. La vitesse maximale d'avancement en un mois a été de 400 mètres. L'avancement minimum a été de 90 mètres en un mois, soit 3 m/jour en moyenne (mois de février : période de crue et passage de l'accident du P.M. 3 560).

Pour terminer ce paragraphe, il nous reste à souligner l'importance du choix de l'entreprise dans le percement d'une galerie. La connaissance de toutes les données sur la résistance des roches, le pendage des couches, les directions tectoniques principales, l'hydrologie, ne nous permet cependant pas de préjuger des conditions dans lesquelles le creusement sera effectué. En effet, suivant l'entreprise et l'expérience qu'elle a de ce genre de travail, suivant les relations qui s'établissent entre elle et le maître d'œuvre, suivant la technique qui est mise en œuvre, les délais et le coût de la réalisation pourront varier du simple au double. Car rien n'est plus subjectif que de juger si un terrain doit ou non être soutenu, ou de définir si des mesures de consolidation du terrain à l'avancement s'imposent.

Les prévisions géologiques et géotechniques ne sont donc à considérer que comme des indications permettant le choix des techniques à utiliser et faisant état des difficultés que pourra rencontrer l'entreprise au cours du percement. Par analogie avec des réalisations antérieures, on leur accorde une valeur indicative avant de chiffrer approximativement le coût de l'ouvrage, en prenant de préférence l'hypothèse la plus pessimiste de manière à ne pas avoir de surprise lors de l'exécution des travaux.

4.4. - INTERET DE L'ETUDE APRES TRAVAUX POUR LES CHANTIERS FUTURS

Lorsque la réalisation d'un tunnel est achevé, on dispose des documents suivants :

a) - L'annexe géologique de l'appel d'offre, qui comporte :
- les renseignements de surface (géologie régionale, carte géologique) ;
- les coupes de sondages et les profils géophysiques, avec leur interprétation ;
- les résultats des essais de laboratoire ;
- les données sur l'hydrologie de la région ;
- la coupe prévisionnelle de la galerie.

b) - Le dossier d'après travaux comportant (à la S. C. P.) :
- une coupe géologique de la galerie (au 1/1000 généralement) indiquant, par le "levé en couronne", le pendage des couches, les failles, les karsts, éventuellement les venues d'eau, les zones cintrées et toute observation pouvant être située géographiquement sur la coupe ;
- un rapport synthétique sur tous les phénomènes géologiques observés ;
- un bilan technique qui fait état de la quantité de matériel utilisé, des délais des diverses phases de la réalisation, et du coût de l'ouvrage.

A partir de ces documents, il est possible d'établir des corrélations entre les observations en surface et en galerie, de chercher l'origine des difficultés rencontrées en souterrain et de définir éventuellement si elles étaient prévisibles avant les travaux. Ceci nous amène à déterminer quelles reconnaissances supplémentaires auraient pu fournir les renseignements manquants.

Lors de l'étude d'un projet de tunnel, on fera donc exécuter, dans un ordre déterminé (cf. III - 1) les reconnaissances déjà effectuées pour la galerie achevée, et en plus, celles qui avaient semblé devoir apporter un précieux complément d'information. Après dépouillement des résultats de ces études, en s'appuyant sur les corrélations faites sur la galerie achevée, on aura une idée plus exacte de ce qui peut être rencontré en profondeur.

Les indications de la galerie achevée seront d'autant plus intéressantes qu'elles s'appliqueront à des terrains analogues, placés dans une situation structurale semblable. Cette analogie existe entre les galeries de Signes aval et Montrieux-Valaury. C'est pourquoi les données sur les vitesses d'avancement et le matériel de soutènement de la galerie de Signes aval seront intéressantes pour les prévisions géotechniques de la branche Toulon Est. On verra, au début du chapitre suivant, quelle méthodologie peut être suivie dans la conduite d'une campagne de reconnaissance.

5. - CONCLUSIONS SUR L'ETUDE APRES TRAVAUX

5.1. - LE PLAN D'UNE ETUDE APRES TRAVAUX

Le plan d'une étude après travaux est généralement le suivant :

- rappel du projet : description des ouvrages,
- situation géographique,
- prévisions géologiques du projet - profil en long,
- réalisation des travaux : unités réellement rencontrées,
- comparaison du levé géologique et de la coupe prévisionnelle,
- comparaison entre les prévisions et la réalisation au point de vue exécution des travaux.

Nous avons suivi ce plan sans nous appesantir sur les prévisions géologiques et géotechniques qui étaient très sommaires, et avons préféré faire part de quelques observations personnelles faites sur le terrain ultérieurement, concernant la fracturation, et montrer quelles autres reconnaissances auraient pu être faites.

Dans un essai récapitulatif, nous avons tenté d'esquisser un tableau présentant les propriétés géologiques des terrains et leur comportement lors du percement d'une galerie (paragraphe 3).

5.2. - ETUDE APRES TRAVAUX DE LA GALERIE DE SIGNES AVAL

Cette étude a mis particulièrement en évidence les points suivants :

5.2.1. - Lithologie

Les calcaires marneux du Dogger sont altérables : sous l'action d'un changement d'hygrométrie, il y a risque de desquamation de la roche en feuillets, puis de rupture fragile sous la forte poussée des terrains de recouvrement. Le remède semble être, soit le gunitage, soit le revêtement peu de temps après déroctage (2.2.2.).

5.2.3. - Fracturation

Elle est caractérisée par l'orientation des plans de fractures, et par une "densité" de fracturation.

L'étude de l'orientation des plans de discontinuités, dont l'extension va du mètre (pour les diaclases) au kilomètre (pour les failles), a été fructueuse. Elle prouve que, dans ce cas particulier tout au moins, les orientations en galerie et en surface sont analogues, quelle que soit l'importance des discontinuités sur lesquelles elles ont été mesurées (4.2.1.3.).

Des directions spécifiques se dessinent, caractérisant la région : Nord-Sud, Est-Ouest et Nord Ouest, Sud Est (4.2.1.4.).

Afin de définir un "indice de fracturation" représentatif en galerie, nous avons procédé à une analyse statistique des discontinuités (2.3.). Elle a porté sur les failles et sur les diaclases. Les écartements entre discontinuités de même type se distribuent suivant une loi lognormale caractérisée par la moyenne et l'écart géométriques (2.3.2.2.2.).

La moyenne, confondue avec le pic de l'histogramme, pourra être prise comme "indice de fracturation". Il y aura donc un indice par type de discontinuité.

Celui correspondant aux diaclases varie avec la lithologie et également pour un même terrain suivant les lieux (de 2 à 10 cm pour les dolomies). Mais on ne peut établir de corrélation précise entre la maille du diaclase et la fracturation liée aux grands accidents. Tout nous porte à penser que la fissuration mesurée en galerie est due principalement au choc des explosions. Au sein du massif non perturbé, seules les zones proches d'un grand accident auraient une maille aussi serrée, celle-ci correspondant à une anisotropie potentielle de la matrice rocheuse (2.3.3.2. et comparaison avec la fracturation mesurée dans les sondages. Chapitre III - 5.2.2.).

5.2.3. - Hydrologie

L'étude de l'hydrologie dans la galerie a amélioré notre connaissance de l'hydrologie du massif d'Agnis. Elle permet de mettre en évidence trois aquifères : l'un correspondant au cycle annuel (teneur en tritium élevée), l'autre formé par des eaux très anciennes (teneur en tritium très faible), le troisième émanant des deux autres. L'hydrologie

a été spécialement bien étudiée, car il est prévu d'utiliser l'exhaure pour alimenter en eau la côte varoise et Toulon en période d'étiage. On a une idée du débit que l'on peut s'attendre à avoir dans une galerie traversant des dolomies fissurées, lorsque la nappe est 150 mètres au-dessus du radier. Il est de l'ordre de 20 à 50 l/s par kilomètre.

La karstification dans les dolomies est responsable surtout de poches argileuses ou sableuses.

5.2.4. - Le soutènement

Sans compter la portion creusée dans les calcaires marneux qui a été soutenue ultérieurement, 1/7 de la galerie a été soutenu lors du déroctage.

5.2.5. - Observation

Le levé géologique a été effectué, pour la galerie de Signes aval, entre la phase de déroctage et celle du revêtement. Lorsque le revêtement suit immédiatement le déroctage, il doit être fait au fur et à mesure des travaux. De toute façon, il serait préférable qu'il puisse être effectué au cours du percement, car de nombreuses zones qui étaient cintrées et cachées par des plaques de blindage ont échappé à nos observations, et c'étaient évidemment les zones les plus intéressantes quant à la nature et à l'orientation des failles. On ne soulignera jamais assez l'importance qu'il y a à affecter un géologue en permanence à chaque ouvrage en cours de réalisation.

5.3. - EN CONCLUSION

D'une manière générale, le levé géologique après travaux est intéressant à plusieurs points de vue.

Le géologue chercheur peut observer les faciès et les structures souvent mieux que sur le terrain, où ils sont parfois masqués par la végétation ou l'altération superficielle. Les études statistiques (fracturation, pendage) peuvent être effectuées absolument en continuité (sauf dans les zones cintrées) et aucune mesure ne passe inaperçue, les conditions de reconnaissance du phénomène étudié étant partout identiques, ce qui assure l'objectivité des mesures. Il faut néanmoins tenir compte du fait que l'orientation de la galerie peut entraîner une erreur systématique sur les mesures en renforçant l'intensité suivant certaines directions et en masquant éventuellement celles qui sont parallèles à la galerie.

Le percement d'un tunnel est une occasion unique d'observer les terrains et on peut regretter le manque de coordination existant entre les universités et le secteur privé, qui offre rarement la possibilité au géologue d'étudier à fond la géologie de ces ouvrages.

Nous pensons qu'une utilisation immédiate des relevés systématiques des discontinuités peut amener à prévoir les quantités de béton qui seront injectées après le revêtement. Ceci demande évidemment un étalonnage préalable entre un "indice de fracturation" et les volumes de béton injectés.

L'expérience acquise au cours des travaux et la comparaison avec les prévisions donnent une base valable pour des prévisions à faire sur un projet de galerie. Cette comparaison avec les estimations offre également une base de discussion pour le paiement des travaux.

Le champ d'investigation offert par l'ouverture d'une galerie représente un intérêt primordial, dans le domaine purement géologique comme dans l'expérience acquise pour la réalisation d'autres travaux.

CHAPITRE III

ETUDE GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE DES GALERIES DE MONTRIEUX ET VALAURY

1. - INTRODUCTION

1.1. - CONDUITE DE L'ETUDE

L'étude géologique et géotechnique des galeries de Montrieux et de Valaury en est actuellement au stade du projet et les appels d'offre auprès des entreprises pour le percement seront lancés fin 1973. Examinons le déroulement des études et des reconnaissances depuis le début.

Au départ, on dispose de données concernant le but et les caractéristiques générales de l'ouvrage d'une part, de la carte géologique de la région au 1/50 000 ou au 1/80 000 ainsi que des renseignements concernant la géologie régionale, d'autre part. Il est nécessaire dans un premier temps d'effectuer un levé géologique de la région traversée à plus grande échelle (1/20 000) et même plus précis dans certains cas (implantation des têtes, fenêtres, études détaillées de régions à structure complexe). Les photos aériennes et des relevés sur le terrain de coupes lithostratigraphiques détaillées ainsi que des mesures d'analyse structurale complètent la carte géologique, à partir de laquelle pourront être extrapolées des coupes transversales et longitudinales à la galerie.

A partir de ces documents sera définie une campagne de sondages sur le tracé de la galerie suivie de reconnaissances géophysiques étalonnées sur les coupes des sondages mécaniques. Après le dépouillement et l'interprétation de ces résultats, présentés sous la forme de coupes et d'un profil en long plus précis, éventuellement d'une carte géologique à la cote de la galerie, les indéterminations restantes pourront être levées grâce à quelques nouveaux sondages implantés judicieusement.

Dès le début du projet, des stations climatologiques et des déversoirs permettant de jauger les rivières et les sources ont été mis en place dans la région, afin que les mesures portent sur plusieurs années précédant les travaux. La connaissance de l'hydrologie du massif est complétée par la mesure du niveau d'eau dans les sondages, soit en continu (limnigraphe), soit à intervalles réguliers, et éventuellement d'essais de pompage ou d'essais Lugeon donnant une idée des caractéristiques de l'aquifère.

Les qualités mécaniques des terrains traversés et l'état de fracturation du massif sont connus après des essais de laboratoire portant sur des échantillons carottés, et le dépouillement de mesures statistiques effectuées, soit sur le terrain, soit sur les carottes de sondage.

Une dernière synthèse de toutes les connaissances est présentée sous la forme d'un profil en long géologique et géotechnique commenté où sont indiqués les terrains traversés et les difficultés prévues à l'avancement. Afin de chiffrer en gros le coût de l'ouvrage, les divers tronçons de la galerie sont classés en trois types de profils correspondant à des terrains de qualité médiocre, moyenne ou bonne.

1.2. - SITUATION GEOGRAPHIQUE ET CARACTERISTIQUES DES OUVRAGES

La cuvette de Signes, dernier ouvrage vers l'aval de la branche du Var II, se termine au partiteur de Signes qui dirigera les eaux du Verdon, d'une part vers la branche de Toulon-Ouest (galerie du Beausset), d'autre part vers la

branche du Var III et de Toulon-Est (fig. 1). Celle-ci débute par les 865 mètres de la cuvette de Malegorgue, à laquelle fait suite la galerie de Dubliou (703 mètres) menant, par la cuvette du Moulin du Gapeau de 1 450 mètres de longueur à l'ouvrage principal de la branche de Toulon-Est, constitué par la galerie de Montrieux de direction NW-SE (6 802 m) et par la galerie de Valaury de direction moyenne NNW-SSE (6 700 m), les deux tronçons se raccordant au bout de la fenêtre de Vignefère (405 m) (fig. 4). A l'entrée amont de la galerie de Montrieux, un ouvrage de filtration et de mise en pression de l'eau par gravité fait passer la cote du radier de 316,53 m (à l'extrémité de la cuvette du Moulin du Gapeau) à 307,10 m (dans la galerie de Montrieux). Les deux galeries de Montrieux et de Valaury comportent en leur milieu un point haut qui permettra l'écoulement gravitaire des eaux drainées par la galerie lors du creusement. A l'aval (cote du radier : 295,41 m), le brise-charge et le partiteur des Laures marqueront la fin de la branche du Var III et de Toulon-Est.

La galerie traverse l'extrémité orientale du massif du Beausset dont les points culminants atteignent presque 800 mètres. Le point le plus élevé du terrain naturel à l'aplomb de la galerie se situe à la cote 730 m (forêt domaniale des Morières), soit à plus de 400 m au-dessus du radier. Sur 4 kilomètres, à l'amont de la fenêtre de Vignefère, le recouvrement au-dessus de la galerie égale ou dépasse 250 mètres. Le recouvrement minimum est de l'ordre de 25 mètres (la Mort de Gautier).

Choix du tracé

Le tracé de la galerie, depuis la plaine de Signes jusqu'au partiteur des Laures, est loin d'être rectiligne. Les raisons en sont de plusieurs ordres.

Le premier angle, à partir de l'amont, est dû à la nécessité d'ouvrir une fenêtre, et se fait à la hauteur de Vignefère, environ à mi-distance des deux entrées de galeries. Le creusement pourra ainsi s'effectuer sur quatre chantiers à la fois, réduisant les délais de percement de moitié.

Plus au Sud, un nouveau coude a été motivé par les conditions topographiques, le recouvrement au-dessus de la galerie dans la région des Pourraques étant trop faible.

Au niveau de la Mort de Gautier, c'est la présence d'un terrain militaire où s'effectuent des tirs d'explosifs qui a contraint les projeteurs à repousser le tracé de la galerie vers l'Ouest, dans la mesure où les conditions topographiques le permettaient.

Enfin, le dernier angle répond à des impératifs déterminés par les résultats de l'étude géologique et géotechnique, afin d'éviter le franchissement de la colline des Baux Rouges, nœud tectonique important, qui a été pressenti comme particulièrement délicat lors du creusement.

2. - ETUDE GEOLOGIQUE REGIONALE

La partie du massif du Beausset que traverse la galerie correspond à la terminaison périclinale orientale du synclinal du Beausset, due à la surélévation de son grand axe est-ouest. Elle est constituée des terrains jurassiques et crétacés inférieur qui forment le soubassement du synclinal. Cet ensemble, qui se relie à l'Ouest au synclinal du Beausset est bien délimité : au Nord, par la dépression de Signes-Méounes correspondant à une remontée du Trias sur lequel coule le Gapeau ; à l'Est par la vallée du bas Gapeau qui entaille profondément les séries jurassiques, puis par la dépression permienne ; au Sud, par les collines nord toulonnaises.

2.1. - STRATIGRAPHIE

On se reportera pour la description stratigraphique des terrains au chapitre I (2.2.1.). Une échelle stratigraphique est donnée sur le dépliant de la carte au 1/20 000.

Les terrains constituant le domaine que traversera la galerie vont du Trias à l'Urgonien.

2.2. - TECTONIQUE

2.2.1. - Observations générales

Ce qui frappe immédiatement l'esprit lorsque l'on regarde la carte géologique de la région traversée par la galerie, c'est la présence de multiples failles verticales qui découpent le massif en compartiments bien individualisés. Le pendage des couches, relativement régulier dans chaque compartiment, offre l'aspect d'un monoclinal rompu sous l'effet de contraintes tectoniques, sans que les terrains aient pu réagir souplement à celles-ci. Le rattachement de cette région au synclinal du Beausset, dont il représente la terminaison périclinale orientale, est visible à grande échelle. En effet, les pendages mesurés au Sud de la plaine de Signes sont franchement Sud, tournent au Sud Ouest dans le massif des Morières, pour être Nord Ouest à la sortie aval de la galerie au-dessus de la dépression de la Valette. Le jeu des failles individualise cependant des compartiments dont le comportement ne suit pas la règle générale.

2.2.2. - Description sommaire des grands accidents tectoniques

Le massif de Valbelle-Montrieux est limité au Nord par les terrains triasiques de la dépression de Signes-Méounes. Le contact se fait par un grand accident de direction moyenne WNW-ESE qui débute à l'Est du village de Signes (faille de la Lauzière) où il est vertical, poursuit son trajet sous les alluvions de la plaine de Signes, réapparaît au Sud du Moulin du Gapeau où il prend une allure déversée vers le Nord qui évolue en un petit chevauchement au-dessus du couvent de Montrieux avant de se bloquer sur la faille méridienne de Gavaudan. Nous avons parlé dans le premier chapitre des hypothèses tectogénétiques expliquant l'allure de cet accident.

La faille de Gavaudan est responsable de la falaise dolomitique dominant la vallée du Gapeau à l'Ouest de Belgentier. Son contour légèrement sinueux indique un faible déversement vers l'Est. Cette faille est à relier à celle du Loou qui la prolonge au Nord, mais son trajet dans les terrains triasiques n'a pas été suivi. D'après les conclusions de C. CORNET (1965) il s'agit d'un grand décrochement ayant fait avancer de plusieurs kilomètres vers le Nord le compartiment oriental.

Vers le Sud, on voit apparaître au-dessus des calcaires marneux du Dogger du compartiment oriental, la corniche calcaire du Bathonien supérieur, puis les dolomies néojurassiques au sein desquelles la faille s'amortit.

Les deux grandes directions de fractures forment entre elles un angle d'environ 90°. Ce sont les directions N 40°-50° et N 130°-150°. La première peut être : soit la plus récente, puisqu'elle décale l'autre, soit, dans le cas où les deux systèmes seraient associés à une orogène commune effectuant sa poussée vers le Nord, la direction de décrochement du système de cisaillement.

La faille du Jas de Laure, de direction N 40°, qui prend le relais de la faille de la Barillère, née dans le Turonien calcaire, effondre le compartiment nord ouest d'environ 250 mètres. Elle recoupe la galerie un peu au Nord Ouest du sondage 7 avec un rejet encore conséquent et s'amortit plus au Nord.

La faille de Morières-les-Tournes, orientée Sud Ouest-Nord Est, débute dans le ravin du Cierge au-dessus du barrage du Revest, passe sous le sommet du Grand Cap et poursuit son influence jusqu'au Sud de Belgentier. Elle décale, par un mouvement senestre, les failles de direction orthogonale, à la sienne : de Morières-le-Cap, qui juxtapose directement l'Urgonien du Grand Cap aux dolomies néojurassiques des Morières ; et des Pourraques, dont le rejet de plus de 350 mètres correspond à toute l'épaisseur des dolomies.

Cette dernière met en contact légèrement chevauchant les dolomies néojurassiques de Mourras successivement sur le Dogger, le Lias supérieur et l'Hettangien de la dépression de Valaury. Elle se bloque sur le grand accident est-ouest de Solliès-Ville dont le rejet à regard sud égale 450 mètres dans la région du Matheron.

2.2.3. - Etude de la fracturation du massif

2.2.3.1. - Carte des fractures (fig. 28)

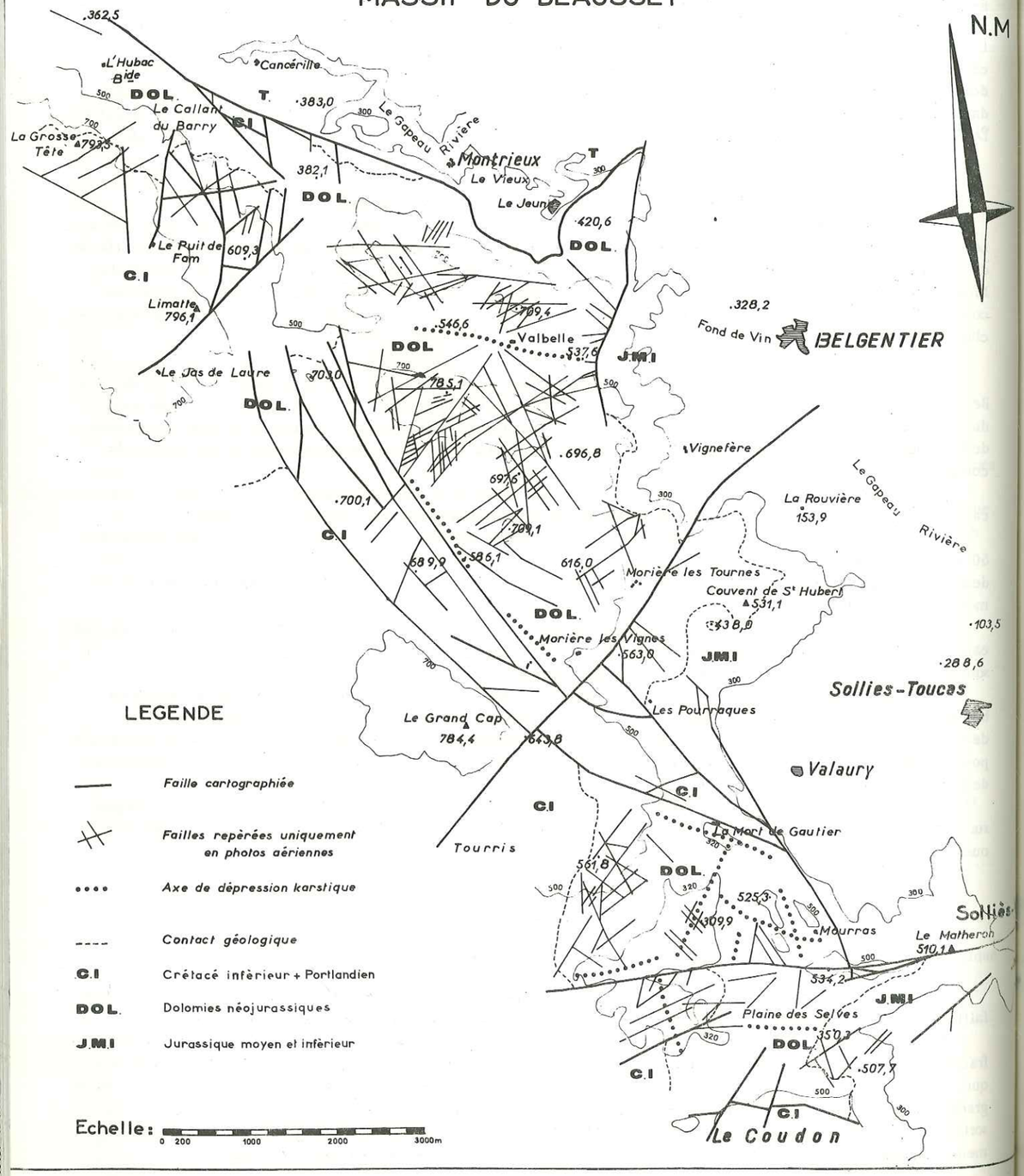
Sous le vocable "fractures", nous avons groupé dans notre étude l'ensemble des discontinuités (fissures, diaclases, failles) visibles et reconnaissables en observation stéréoscopique des photographies aériennes et sur le terrain.

L'étude des photos aériennes couvrant la majeure partie du terrain étudié nous a permis d'en mieux connaître la fracturation, car la seule étude sur le terrain n'avait permis de déceler, par leur rejet, que les accidents tectoniques qui affectaient deux ou plusieurs terrains. Les photos aériennes nous ont été précieuses en particulier pour l'étude de la grande étendue de dolomies néojurassiques qui correspond à la forêt domaniale des Morières. Les discontinuités ressortent, en général très bien dans les dolomies, dont l'altération spécifique fait apparaître le cheminement, relativement bien lorsqu'elles affectent des calcaires, mais ne sont pas décelables dans les marno-calcaires.

Fig. 28 CARTE DE LA FRACTURATION

extremité orientale du

MASSIF DU BEAUSSET



La grande difficulté rencontrée dans cette étude des photos aériennes est due à la végétation qui recouvre inégalement les surfaces, variant suivant l'exposition, l'altitude et la situation des terrains. C'est pourquoi nous n'avons pas fait l'étude de la densité du réseau de fracture, étude qui nécessite un terrain de nature homogène, et des mesures systématiques.

Le résultat de cette étude se traduit par la carte de fracturation, sur laquelle nous avons porté, en les distinguant; les accidents tectoniques cartographiés, les discontinuités repérées uniquement en photo aérienne, et également les axes de dépressions fermées, qui coïncident en général avec les directions générales de fractures.

2.2.3.2. Etude des orientations

2.2.3.2.1. - Résultats de la carte

A partir de la carte des fractures, nous avons cherché à faire ressortir les directions tectoniques principales. Les accidents étudiés étant en général verticaux, la représentation statistique de WÜLF (projection stéréographique) n'a donc pas été utilisée. Chaque fracture est définie par son gisement (direction par rapport au Nord magnétique) exprimé en degrés, et sa longueur en mètres. Ces données sont classées, pour chaque secteur, dans des groupements de gisements, dont le pas est ici de 10°. Nous avons adopté la représentation graphique des "diagrammes polaires". On porte les valeurs obtenues : caps moyens et longueur correspondante (pondérée), en représentation polaire, qui a pour origine, l'Ouest à gauche (gisement 270°), l'Est à droite (gisement 90°) et le Nord au centre (gisement 0°).

Nous avons défini plusieurs secteurs limités entre eux par les grandes cassures décrites au paragraphe 2.2.2. (fig. 29).

Fig. 29

CARTE DES SECTEURS
d'étude de la fracturation

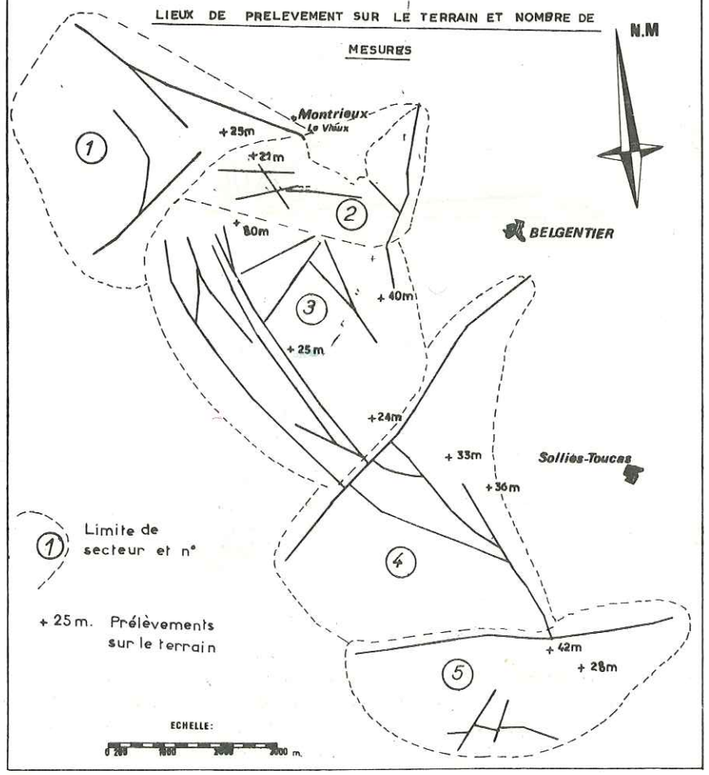
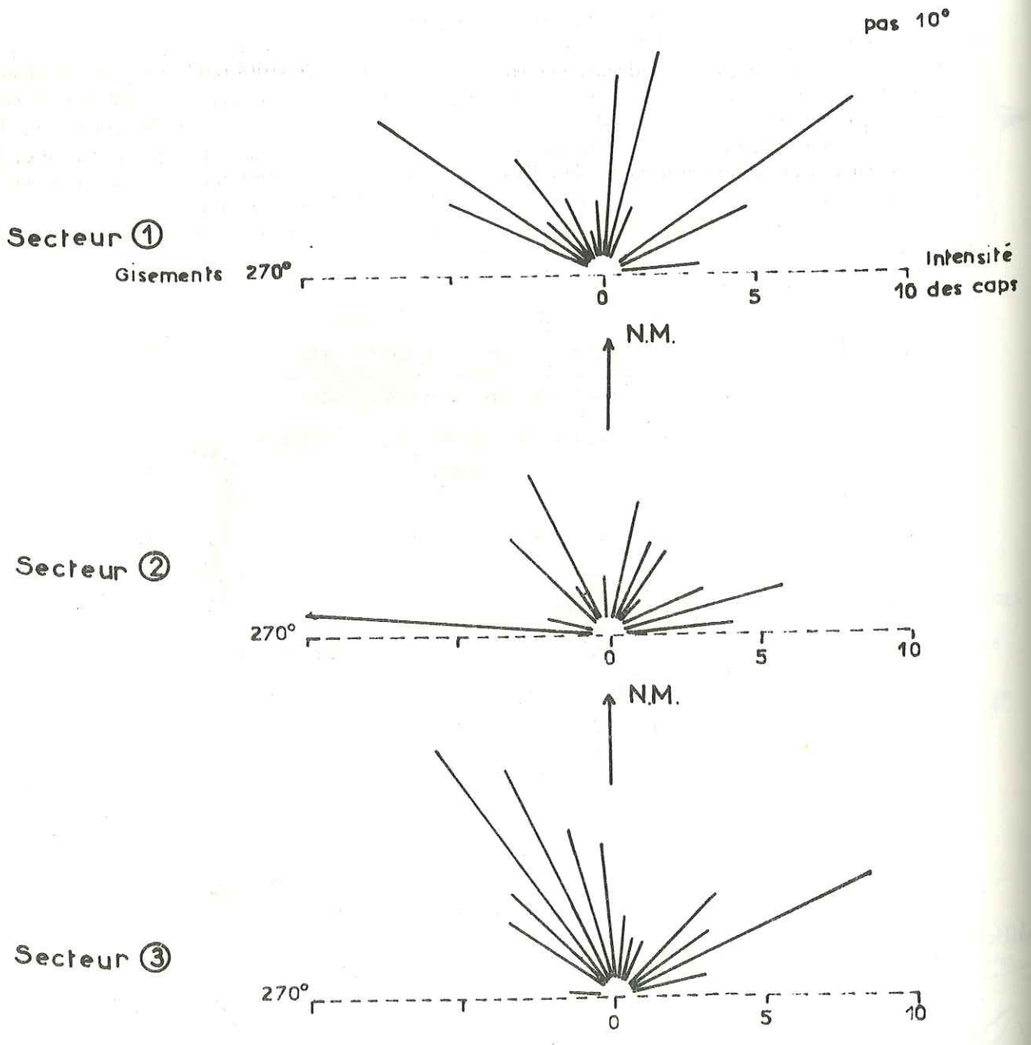


Fig. 30 Diagrammes polaires

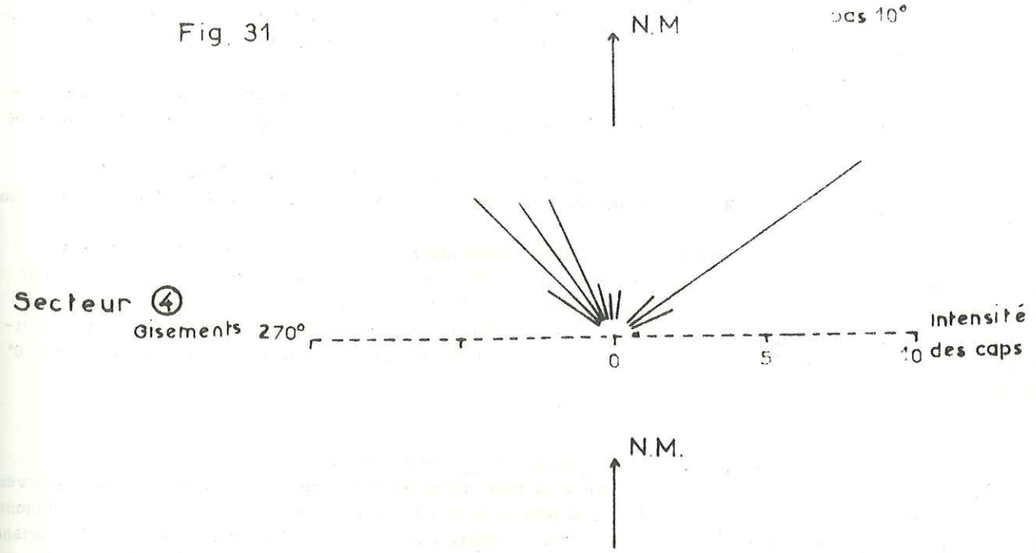
des directions de fractures

(Photos aériennes)



La figure 30 nous montre que le diagramme du secteur I (Callant du Barry, Jas de Laure) présente des maximums pour les caps N 120°-130°, N 10° et surtout N 60°, dus à la faille du Jas de Laure. Le secteur II (partie nord du massif de Montrieux) montre une direction principale de fracture est-ouest et des fa sceaux d'intensité moindre orientés N 150°, N 10°-30° et N 70°. Le secteur III (forêt domaniale des Morières, entre la dépression de Valbelle et la faille N 55° - non comprise - des Morières) présente deux groupes de directions de fractures, l'un dont la médiane se situe vers 150°, l'autre vers N 30°. Les deux systèmes sont donc orthogonaux.

Fig. 31



Sur la figure 31, le secteur IV (compris entre la faille des Morières incluse et la faille des Baux Rouges exclue) montre les mêmes directions que le précédent secteur, la direction N 55° étant prépondérante à cause de la prise en compte de l'importante faille des Morières. Le diagramme du secteur V (partie située au Sud de la faille des Baux Rouges incluse) montre un maximum très net pour la direction est-ouest, qui correspond à la faille des Baux Rouges, et des directions mineures allant de 18° à 90°.

Le dernier diagramme polaire, qui fait la synthèse de tous les secteurs, présente nettement deux faisceaux de direction, le premier d'intensité maximale dont la direction moyenne est N 145° ; le second d'intensité à peine moindre, de direction moyenne N 55°. Ce système de fractures à angle droit admet suivant ses bissectrices un système d'intensité non négligeable, orienté N 5° et N 90°.

2.2.3.2.2. - Analyse structurale

Nous avons procédé, en plusieurs points du massif de Montrieux, au relevé systématique des directions de fractures sur les diaclases, mises à jour par le talus d'une route par exemple. La localisation des points de prélèvement est indiquée sur la figure 29.

Les résultats ont été reportés sur les diagrammes polaires analogues aux précédents, avec la différence que l'intensité d'un cap est fonction du nombre de mesures s'y rapportant, alors que dans le paragraphe précédent, ce nombre était pondéré par la longueur de la faille qui était prise en considération.

La figure 32 présente les diagrammes de directions de diaclases relevées en plusieurs points.

Le premier diagramme met en évidence deux directions distinctes à angle droit N 40° et N 130° dans les dolomies de la région des Aiguilles.

Le deuxième et le troisième diagrammes correspondent à des mesures effectuées à la fois dans les calcaires marneux du Dogger et sur la corniche calcaire du Bathonien les dominant. Les mesures du deuxième diagramme ont été faites au-dessus de Valaury, celles du troisième diagramme à la sortie aval de la galerie au Sud du Matheron.

Ces diagrammes font ressortir les directions N 50° et N140°dans les calcaires,donc des directions presque identiques à celles relevées dans les dolomies. Dans le Dogger, par contre, les directions dominantes sont centrées sur N 0° et un degré moindre sur N 80°.

2.2.3.2.3. - Corrélations entre les deux échelles

Si nous comparons les directions de fracturation relevées en photo sur un secteur et les mesures de terrain relevées en plusieurs points de ce secteur, commecela a été fait pour le secteur III sur la figure 33, il apparaît immédiatement que les directions principales se retrouvent sur l'un et l'autre diagramme, et avec des intensités similaires. Et pourtant, dans un cas, l'intensité d'un cap correspond simplement au nombre de mesures tombant dans la même tranche directionnelle, alors que dans l'autre cas, l'intensité d'un cap est fonction de la longueur de faille mesurée sur la carte dans une même direction, pondérée par la longueur totale de faille dans le secteur.

On peut de même comparer les deuxième et troisième diagrammes de la figure 32 avec les diagrammes obtenus à partir des photos aériennes respectivement au-dessus des secteurs IV et V (fig. 31). La direction N 90° anormalement intense qui ressort du diagramme du secteur V correspond à la faille est-ouest des Baux Rouges qui avait été intégrée dans ce secteur de façon artificielle.

On peut donc conclure, que les fractures du massif se répartissent dans les mêmes directions à l'échelle de l'affleurement comme à celle de la photo aérienne.

2.2.3.2.4. - Interprétation

Il nous paraît intéressant d'essayer de chercher une interprétation tectonique à ces directions singulières de la fracturation. Nous sommes en effet tentés de rechercher, par analogie avec ce qui se produit lorsqu'on écrase un échantillon de roche en laboratoire, les directions des contraintes principales auxquelles a été soumis le massif. Il faut reconnaître que la bonne corrélation qui existe entre la fracturation à grande et à petite échelle est un facteur favorable à une extrapolation des phénomènes de laboratoire aux phénomènes concernant le massif tout entier.

Schématiquement, les cassures provoquées par le phénomène de poussée se produisent dans quatre directions :

1) cassures perpendiculaires à la poussées et parallèles aux axes des plis (par exemple chevauchements et failles inverses) ;
2) décrochements parallèles à la direction de poussée, tenant au fait que l'intensité de celle-ci est variable suivant les points ;
3) et 4) cassures faisant un angle de 30° à 45° avec les précédentes, correspondant à un réseau de cisaillement.

Bornons-nous à faire les remarques suivantes :

la direction N 0° correspond au décrochement du Loou-Gavaudan ;

le chevauchement de Montrieux a une direction à peu près est-ouest ;

les directions suivant lesquelles se sont formées les failles et diaclases observables dans le massif se répartissent généralement autour des bissectrices du système N 0° - N 90°, sauf dans le Dogger où elles sont NS - EW.

La direction de contrainte principale serait donc orientée du Sud vers le Nord. Ce résultat est habituel en Provence et connu depuis longtemps. Le réseau de fractures sillonnant le massif aurait donc été créé, d'après ce que nous connaissons de l'évolution tectogénétique de la région, soit à la fin du Crétacé, lorsque se formaient les rides anticlinales et synclinales orientées est-ouest, soit à l'Eocène lors de la grande phase tangentielle nord-sud. La dispersion relativement importante des orientations serait due aux mouvements des derniers épisodes tectoniques (fin de l'Oligocène), dont la direction recoupait obliquement les directions antérieures.

Une interprétation commune aux deux massifs sera proposée dans les conclusions sur la géologie régionale.

Fig. 32

Diagrammes polaires des directions de diaclases

(Mesures de terrain)

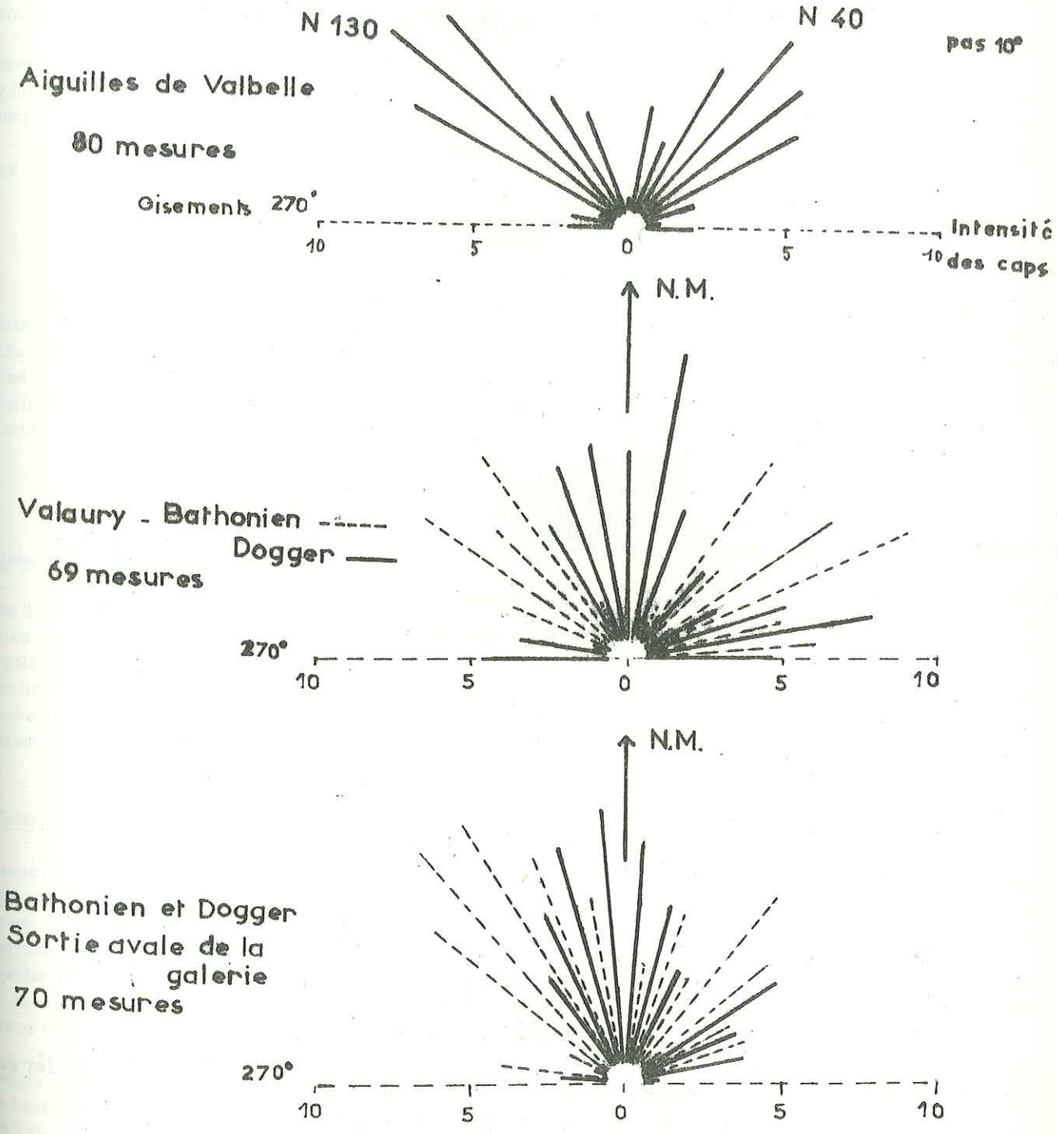
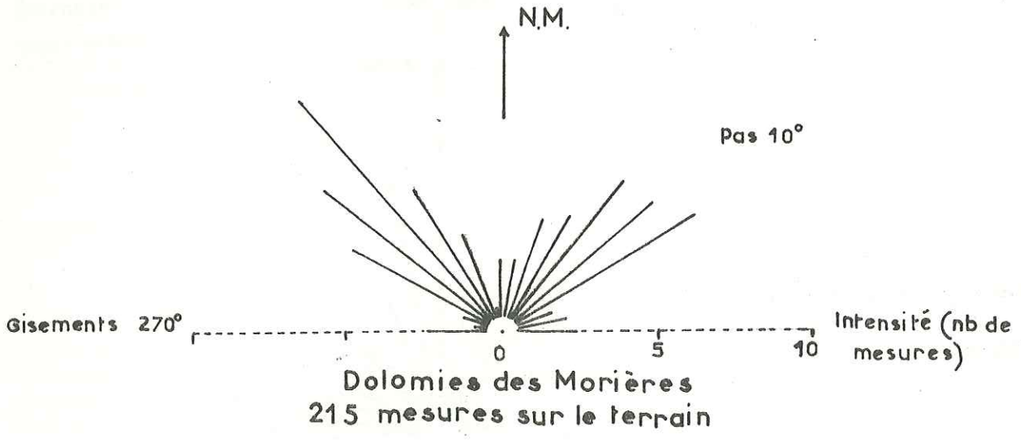


Fig. 33

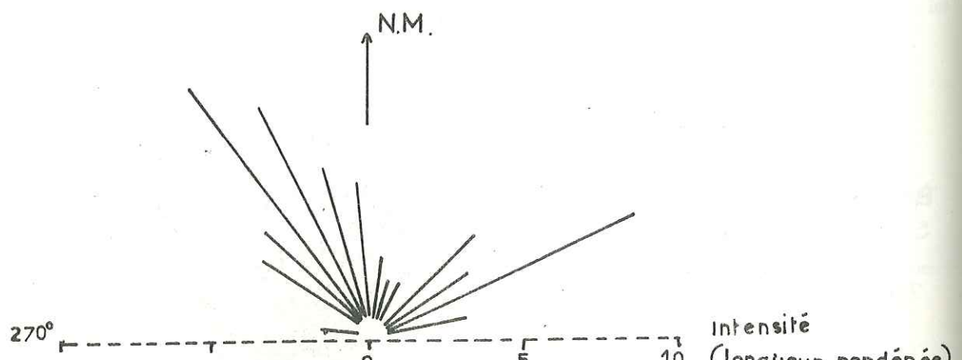
DIRECTIONS DE FRACTURATION

Diagrammes comparatifs:

MESURES DE TERRAIN et PHOTO AERIENNE



Dolomies des Morières
215 mesures sur le terrain



Secteur ③ F.D. des Morières
Photo aérienne 66 km

3. - TRAVAUX DE RECONNAISSANCE

3.1. - SONDAGES

3.1.1. - Choix des emplacements

La reconnaissance par sondages de la galerie de Montrieux - Valaury présentait des difficultés, dues, d'une part au recouvrement important, d'autre part à l'absence de voies d'accès et de points d'eau au cœur du massif. Le premier point nécessitait une restriction du nombre de sondages profonds, afin que le coût de la reconnaissance ne soit pas prohibitif en regard du coût de la galerie elle-même. Il en résulte une faible densité de points de reconnaissance sur le tronçon de Montrieux qui traverse la forêt domaniale des Morières, les sondages ayant été implantés aux cotes les plus basses du profil topographique. Pour résoudre le second problème, des pistes ont été tracées, et à partir des points d'eau périphériques (sources de Montrieux, source de Solliès-Ville), des kilomètres de tuyaux et des pompes refoulantes ont été installés.

Un premier lot de sondages comprenant le S 4 sur Dubliou, puis les sondages n° 1, 5, 7, 6, 3, 8, 9, 10, 11 du Nord au Sud, a permis de reconnaître le tracé, de le retoucher, et d'étalonner la géophysique. Après la campagne géophysique, trois autres sondages ont été implantés en divers points du tracé pour vérifier certaines anomalies constatées par la géophysique. Ce sont : le S 12 sur la galerie de Dubliou, le S 13 à proximité du S 5 et le S 14 au Sud du S 8.

Le S 2, 800 mètres au Nord du S 7, très en dehors du tracé, correspond à une reconnaissance effectuée en 1959 sur un ancien tracé.

3.1.2. - Technique de sondage

Les sondages étaient effectués en continu au carottier double. Les carottes devaient avoir en fin de sondage un diamètre minimum de 86 mm afin de pouvoir être utilisées pour des essais en laboratoire de compression et d'élasticité. Elles étaient mises dans des caisses de 1 mètre de longueur. Pour le sondage profond S 6 qui a été prolongé de 50 m sous le niveau de la galerie pour reconnaitre les marnes du Dogger, on a utilisé la technique du carottier à cable, qui évite les longues manœuvres de sortie du carottier ; mais à cause du grand poids de la colonne de forage, on ne pouvait creuser le trou en un diamètre supérieur à 75 mm.

3.1.3. - Résultats

Galerie du Dubliou

Le sondage S 4, traversant une zone très fracturée due à la proximité de la grande faille de Montrieux, rencontre sur 30 mètres un mélange broyé de marnes vertes et de calcaires orangés valanginiens et de calcaire sublithographique clair du Portlandien, le tout reconsolidé par de la calcite. Il recoupe ensuite les dolomies néojurassiques sommitales également fracturées et lardées de filonnets de calcite. Le S 12, implanté après l'étude géophysique, était légèrement incliné vers le Nord et cherchait à recouper la zone de très faible résistivité décelée par la géophysique, qui pouvait correspondre à la présence du Trias argileux et gypsifère. Il ne rencontre en fait sur 61,50 m que les dolomies néojurassiques plus ou moins broyées et argileuses.

Galerie de Montrieux

A l'entrée amont de la galerie, le S 1 a parfaitement confirmé les hypothèses selon lesquelles la faille de Montrieux commençait à être déversée vers le Nord, puisqu'après 20 m de calcaire portlandien morcelé, il recoupe une zone broyée argileuse importante à laquelle fait suite le gypse rouge et noir du Keuper alternant avec des argiles grises. Le S 13 et le S 5 (coupe, fig. 43), bien que situés à peu de distance l'un de l'autre, ont des coupes différentes, laissant penser qu'une faille orientée NNW-SSE les sépare. Le premier, après quelques mètres dans les calcaires portlandiens, s'enfonce dans les dolomies néojurassiques où s'intercalent cependant des niveaux calcaires ; tandis que le second, qui débute par une quinzaine de mètres de marnes vertes et de calcaires grumeleux du Valanginien, traverse jusqu'à 70 mètres les calcaires fissurés et calciteux du Portlandien.

Le sondage 7, implanté sur la route forestière venant de Montrieux-le-Jeune, traverse sur 100 mètres les dolomies beiges relativement compactes puis les dolomies sombres saccharoïdes repérées en de nombreux endroits comme étant la base des formations dolomitiques du Jurassique supérieur. De fait, les derniers mètres du sondage recoupent les bancs de calcaire beige fin du sommet du Bathonien supérieur. Nous avons donc là un bon repère qui nous permettra d'interpoler les terrains rencontrés sous les collines de Montrieux.

Le sondage 2, situé en dehors du tracé de la galerie, à 800 mètres au Nord du S 7, n'a rencontré sur 130 mètres que des dolomies, ce qui est logique puisque à quelques mètres de là affleurent les calcaires du Portlandien les surmontant.

Au creux de la dépression de Valbelle, le S 6 a traversé 175 mètres de dolomies néojurassiques typiques. Après une poche de 17 mètres de haut remplie de sable dolomitique fin, le sondage traverse jusqu'à 208 mètres les dolomies sombres à gros grains déjà signalées dans le S 7. Puis apparaissent les niveaux de calcaire oolithique beige du Bathonien supérieur. Vers 270 mètres de profondeur et jusqu'à la fin du sondage à 304 mètres viennent s'intercaler entre les bancs calcaires des niveaux marneux de plus en plus épais. Ces assises peuvent être attribuées au sommet du Dogger.

Galerie de Valaury

Le S 3 recoupe sur toute sa hauteur (200 mètres) les dolomies néojurassiques, souvent finement cargneulisées, parfois altérées jusqu'à former un sable dolomitique.

Le S 8, près des Pourraques, reconnaît le calcaire bicolore compact, parfois à intercalations marneuses, du Bathonien supérieur.

Le S 14, exécuté dans une deuxième lot, devait expliquer la baisse de résistivité remarquée lors du traîné électrique de la campagne géophysique. Il se situe dans la zone d'influence de la faille des Pourraques et de ce fait comporte plusieurs passées broyées et argileuses dans une coupe équivalente à celle du S 8.

Le S 9 (Mort du Gautier) est entièrement creusé dans les calcaires blancs du Portlandien.

Le S 10, situé près des ruines de Mourras traverse 100 mètres de dolomies néojurassiques compactes, puis les calcaires oolithiques et calcaires dolomitiques colorés du Bathonien supérieur jusqu'à 140 mètres. Par un contact mylonitisé correspondant certainement à une faille oblique, on passe sans transition aux calcaires marneux et marnes du Dogger. A 175 mètres, une brèche tectonique de un mètre d'épaisseur nous fait passer aux argiles vertes et aux dolomies à débit parallélépipédique de l'Hettangien. Cette mylonite correspond au passage de la faille des Hubacs, orientée NW-SE et cartographiée sur le terrain, ce qui permet de calculer son pendage qui est environ de 60° vers le Sud Ouest. A la suite de ce sondage, le tracé de la galerie a été repoussé plus à l'Ouest d'environ 180 mètres, afin d'éviter la rencontre de cet accident avec la galerie, dont la direction est pratiquement la même, et pour éviter à celle-ci la traversée des terrains de l'Hettangien, qui, on l'a vu dans la galerie de Signes amont, présente de grandes difficultés techniques lors du creusement (éboulements et mauvaise tenue du terrain dus à la microfissuration des bancs de dolomie).

Sondage 11, ce sondage reconnaît les terrains du dernier tronçon de la galerie et permet d'en calculer l'avant-métré avec une relativement bonne précision. Jusqu'à 53 mètres il recoupe les dolomies néojurassiques. Puis il traverse 100 mètres de calcaires du Bathonien supérieur et enfin dans le bas atteint les niveaux sommitaux du Dogger.

Le pendage des couches obtenu à partir de ce sondage et des données de surface est de 10° à 15° vers le Nord Ouest. L'épaisseur de la barre calcaire du Bathonien supérieur serait alors de 70 mètres.

3.1.4. - Apport des sondages à l'étude géologique du projet

L'intérêt des sondages porte sur cinq domaines :

- vérification de structures extrapolées à partir du levé de surface,
- connaissance de l'état de fracturation et d'altération des assises,
- prélèvement d'échantillons en place pour essais géotechniques,
- connaissance des paramètres hydrologiques (niveau de la nappe, karsts, perméabilité du terrain),
- étalonnage de la géophysique.

N'envisageons que les deux premiers aspects, portant sur l'apport géologique.

- La délimitation de contacts géologiques nous permet de calculer l'épaisseur des formations (compte tenu du pendage des couches) et de situer leur niveau dans le massif, tout particulièrement lorsqu'aucune coupe naturelle n'existe dans la région. Exemple : les sondages 6 et 7, situés en plein cœur du massif dolomitique où aucun niveau repère ne peut être distingué.
- Le recoupement d'accidents tectoniques repérés uniquement en surface nous donne l'inclinaison du plan de discontinuité. Exemples : S 1 : contact chevauchant des dolomies néojurassiques sur le Trias ; S 10 : contact chevauchant du Jurassique supérieur sur l'Hettangien. Ce sondage a permis le déplacement du tracé de la galerie en vue d'éviter le franchissement des terrains médiocres de l'Hettangien.
- La reconnaissance par sondage nous a permis de quantifier l'état de fracturation des assises rencontrées, ce qu'une étude structurologique de surface, même minutieuse, ne peut en aucun cas remplacer, bien qu'apportant des données complémentaires (orientation des systèmes de fractures). Quant à l'état d'altération des assises profondes, il ne peut être connu que par sondage, toute corrélation, pour un terrain donné, entre l'altération superficielle et l'altération profonde pouvant conduire à de graves erreurs d'appréciation.

3.2. - ETUDE GEOPHYSIQUE

3.2.1. - Causes de l'intervention géophysique

L'étude géologique de surface est complétée avec précision par les sondages qui fournissent, outre les résultats purement géologiques (contacts stratigraphiques, failles, chevauchements), des renseignements sur l'état d'altération et de fracturation des assises en profondeur, informations cependant trop ponctuelles.

Le prix des sondages interdisant leur multiplication, on a eu recours à la méthode géophysique, moins précise certes, mais moins onéreuse, d'une mise en œuvre plus rapide et couvrant la totalité du tracé d'une manière continue.

3.2.2. - Problème pose - Choix de la méthode

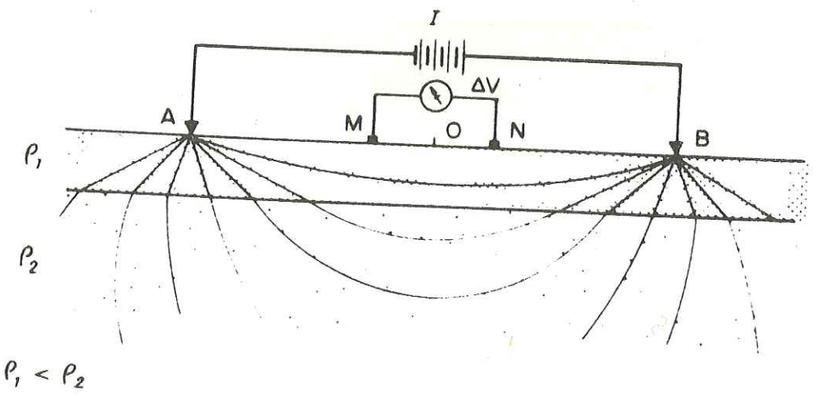
L'étude géophysique, en s'appuyant sur le lever de surface et les sondages mécaniques profonds, devait déterminer la nature et la qualité des différents horizons qui seront recoupés par la future galerie. Trois principaux problèmes étaient à résoudre détection des failles et des zones broyées ; précision des contacts géologiques en profondeur et principalement détermination du toit des marnes et calcaires marneux du Jurassique moyen ; repérage des karsts et des zones karstiques.

L'expérience et les enseignements dégagés de précédentes études, réalisées à l'aplomb des galeries amont (Sainte Victoire, Saint-Maximin et Tourves), amenèrent à préconiser l'emploi des méthodes électriques type Schlumberger (sondages électriques et traîné de résistivité) pour tenter de résoudre les problèmes posés. C'était cependant la première fois, parmi toutes les études effectuées par la Compagnie Générale de Géophysique (C. G. G.) pour le compte de la S. C. P., que la profondeur d'investigation était si grande, sur une partie importante du trajet, rendant délicate et moins précise l'interprétation des résultats au niveau de la galerie.

3.2.3. - Techniques utilisées

3.2.3.1. - Sondage électrique (fig. 34)

Fig. 34 SCHÉMA DU SONDAGE ELECTRIQUE



Avec le sondage électrique (S. E.) on étudie la variation de la résistivité apparente du sous-sol en fonction de la profondeur d'investigation.

Pour mener à bien cette opération sur le terrain, on envoie dans le sol, au moyen de piles (ou d'un groupe électrogène), un courant d'intensité I entre deux pôles A et B et on mesure avec un potentiomètre (ou un enregistreur) la différence du potentiel Δ V qui se produit par effet ohmique entre deux électrodes M et N. Sur la même station, on procède à une série de mesures, en augmentant chaque fois la longueur de ligne AB. Les valeurs ainsi obtenues correspondent à des compartiments du sol chaque fois plus épais.

Avec le dispositif Schlumberger (quadripôle) on choisit la ligne de mesure MN suffisamment petite par rapport à AB afin de pouvoir introduire la notion de champ électrique et faciliter les calculs théoriques. En appliquant la loi d'Ohm, on peut calculer pour chaque longueur de AB une valeur de la résistivité apparente définie par la formule :

$$\rho_{a\ ohm.m.} = K \frac{\Delta V}{i}$$

où K est un cœfficient géométrique linéaire dépendant des positions relatives des électrodes MN et AB.

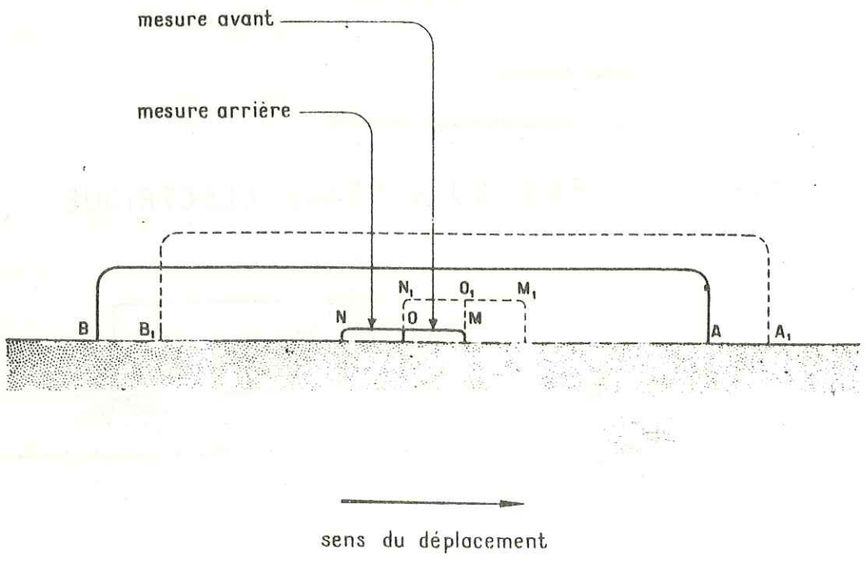
Le diagramme du sondage électrique s'obtient en reportant sur une grille à échelle bilogarithmique en abscisse les demi-longueurs AB en mètres et en ordonnée les résistivités apparentes correspondantes en ohm mètres.

L'analyse de ces diagrammes, et leur comparaison entre eux et avec des abaques théoriques calculés, permettent de déterminer dans la majeure partie des cas (quand il y a un contraste suffisant de résistivité), la succession verticale des horizons électriques et ainsi de distinguer la nature des différents terrains rencontrés si ceux-ci ont des résistivités caractéristiques.

Le rapprochement de ces résultats avec ceux des forages existants dont on connaît la coupe géologique, permet une interprétation plus précise sur la nature des horizons définis par géophysique.

3.2.3.2. - Traîné à répétition (fig. 34 bis)

Fig. 34bis SCHÉMA DU TRAINÉ A RÉPÉTITION



Le paramètre physique employé (résistivité) reste le même, cependant, on conserve ici toujours le même dispositif symétrique AMONB , à trois électrodes de mesures M, O, N que l'on déplace le long d'un profil.

Pour une même disposition de AB, on mesure la différence de potentiel (ΔV) entre M et O (mesure arrière) et entre O et N (mesure avant), puis l'ensemble du dispositif est décalé d'un bond égal à MO. La nouvelle mesure arrière correspond donc à la mesure avant de la précédente station.

On obtient ainsi :

1°) - en chaque station, deux valeurs de la résistivité apparente,

2°) - pour la même tranche de terrain investi (avec deux positions successives de AB) deux valeurs distinctes ou identiques de la résistivité apparente permettant de chiffrer donc d'éliminer les "à coups de prises" dus au passage des électrodes AB sur des terrains de nature différente.

Par ce procédé, la profondeur d'investigation restant approximativement la même, on explore une tranche de sous-sol d'épaisseur sensiblement constante.

Si la composition du volume de terrain est identique, les résistivités apparentes mesurées conserveront une valeur moyenne.

Par contre, les hétérogénéités provoqueront de brusques variations de résistivité. Ces discontinuités ou anomalies résistantes ou conductrices pourront avoir des causes géologiques (changement de nature de la roche, variations de faciès, failles, zones broyées...) ou artificielles (galeries, conduites). Mais il est nécessaire que la cause ait des dimensions suffisantes par rapport à sa profondeur pour être décelée.

De par son principe, cette méthode ne donne que des résultats qualitatifs.

Enfin, une ultime amélioration de ce dispositif peut être réalisé en procédant avec deux longueurs de ligne AB pour un même dispositif d'enregistrement MON. En chaque station on effectuera ainsi quatre mesures permettant d'éliminer en partie les perturbations superficielles et surtout de reconnaître les terrains à deux profondeurs distinctes. Le choix de la (ou des) longueur (s) de ligne AB est toujours fait à partir des diagrammes de sondages électriques.

3.2.3.3. - Représentation des résultats

3.2.3.3.1. - Coupe des résistivités apparentes

Au droit de chaque S. E., on a reporté verticalement, à l'échelle logarithmique, les valeurs de la résistivité apparente mesurées pour les différentes longueurs de ligne. C'est une représentation, sous une autre forme, des diagrammes de S. E. On obtient ainsi une représentation verticale de chaque S. E. qui permet ensuite une corrélation latérale d'un S. E. à l'autre.

3.2.3.3.2. - Profil de résistivité - Traîné à répétition

Ces profils sont généralement doubles, les deux séries de vecteur correspondent aux deux longueurs de ligne AB et A'B', étant soit confondues, soit distinctes.

Les longueurs AB et A' B' sont choisies en fonction du recouvrement, de telle manière que les tranches de terrains explorées encadrent la galerie dessus et dessous. La position relative des deux séries de vecteurs, les variations de la résistivité apparente moyenne le long du trajet, fournissent des renseignements complémentaires, en particulier sur la situation des failles, les changements de nature lithologique en profondeur, les karsts ..., que les sondages électriques ne faisaient pas toujours ressortir.

3.2.3.3.3. - Profil en long - Coupe électrique

Cette coupe fait la synthèse des résultats du traîné à répétition et de l'interprétation quantitative des sondages électriques. Au droit de chaque S. E., et suivant l'échelle des altitudes, elle indique la valeur réelle de la résistivité des terrains. Avec l'aide du traîné, les résistivités vraies des terrains ont été interpolées quand cela était possible au niveau de la galerie.

3.2.3.4. - Bilan technique de la campagne géophysique

La campagne géophysique a été confiée à la Compagnie Générale de Géophysique. Les travaux débutèrent le 21 décembre 1970 et se poursuivirent, après une interruption d'une dizaine de jours, jusqu'au 15 mars 1971. Enfin, pour complément d'informations, ils furent repris pendant cinq jours au mois d'octobre 1971.

Pendant ces différentes périodes et sur l'ensemble des galeries on exécuta :

- 38 sondages électriques (S.E.) se répartissant en :
  . 15 S.E. en longueur de ligne AB d'envoi de courant inférieure à 1 000 mètres
  . 8 S.E. en longueur de ligne AB d'envoi de courant comprise entre 1 000 et 2 000 mètres
  . 15 S.E. en longueur de ligne AB d'envoi de courant égale ou proche de 6 000 mètres.

- 12,860 km de profil continu de résistivité, effectué en trafné à répétition en double longueur de ligne variant suivant l'altitude du terrain naturel. Quatre dispositifs distincts avec deux MN différents furent ainsi réalisés :

  - MN = 10 m - AB = 100 - 200 m
  - AB = 200 - 400 m
  - AB = 400 - 800 m

  - MN = 30 m - AB = 1 000 - 1 500 m

Le pas (distance entre deux stations de mesure) retenu fut égal à la longueur séparant les deux électrodes MN d'enregistrement, soit 10 à 30 mètres selon le cas.

Aussi, l'exécution de ce profil nécessita 1 088 stations d'enregistrement, 4 312 mesures pour 12 200 mètres de terrain réellement investis (la différence avec la longueur globale du trafné provenant du recouvrement ou embrayage nécessaire lors du changement de dispositif.

3.2.4. Etude complète de la galerie de Valaury

Allant de la fenêtre de Vignefère jusqu'au débouché sur la plaine de Solliès-Ville, cette section est la plus diverse du point de vue géologique, et les profils géophysiques traduisent bien cette diversité.

Les levers de surface ont fait apparaître de nombreuses fractures ou failles à rejet important mettant en contact anormal les différents terrains que rencontrera la galerie. Constitué par une ligne brisée en quatre tronçons, le tracé de la galerie de Valaury, long de 6 700 mètres, a nécessité à lui seul l'exécution de 18 sondages électriques et de 3 changements successifs de longueurs de ligne de trafné de résistivité (AB = 400 - 800 m ; AB = 100 - 200 m, puis reprise en AB = 400 - 800 m).

3.2.4.1. - Sondages électriques

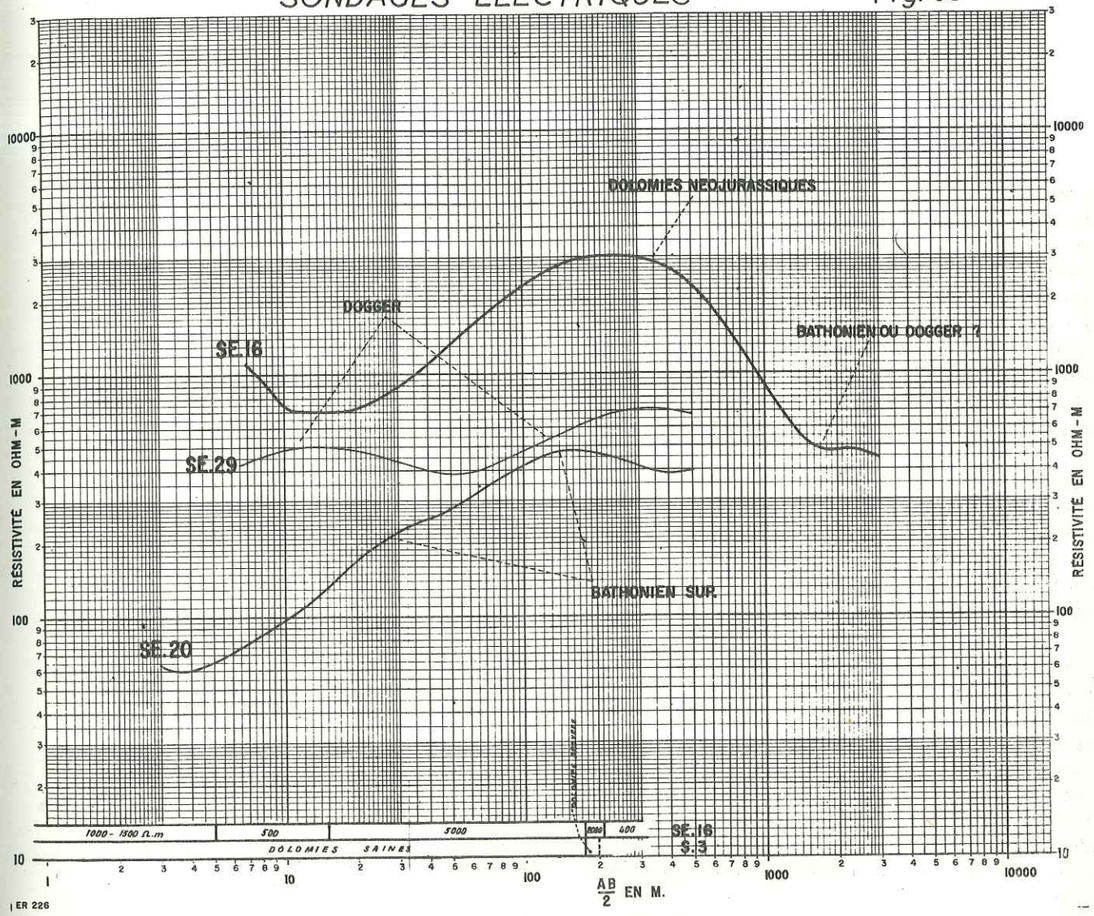
Les sondages électriques de la figure 35 représentent catégoriellement l'ensemble des sondages électriques réalisés sur cette section.

Alors que les S.E. de la galerie de Montrieux faisaient ressortir deux niveaux résistants correspondant aux dolomies néojurassiques et aux calcaires du Bathonien supérieur, le S.E. 16, situé sur les dolomies et à une soixantaine de mètres du forage S 3, ne possède plus qu'un seul et unique horizon résistant. Ce dernier se montre d'ailleurs complexe puisque décomposable en deux niveaux de résistivité décroissante (5 000 et 2 000 ohm.m). Le Bathonien supérieur dont la résistivité à l'aplomb de la galerie de Montrieux était comparable aux dolomies néojurassiques, semble avoir une résistivité plus basse, due probablement à une variation de faciès qui augmente sa teneur en argile, ou bien, être masqué par les sédiments sus-jacents.

En fonction du diagramme du S.E. 20, le Bathonien supérieur et (ou) inférieur qui affleure au droit de cette station, n'offre plus que des résistivités inférieures ou au plus égales à 1 000 ohm. m. Le Dogger ou le Jurassique moyen (S.E. 29), en principe plus marneux, présente également des résistivités comparables à celles du Bathonien inférieur.

On remarque donc qu'il sera dans l'avenir difficile, pour ne pas dire impossible, de séparer électriquement ces deux étages dont les "valeurs électriques" s'avèrent à la fois voisines et disparates. Leurs horizons résistants ne dépassent toutefois pas 1 500 ohm. m. Les dolomies, lorsqu'elles sont saines ont une résistivité fréquemment supérieure à 3 000 ohm. m.

SONDAGES ELECTRIQUES Fig. 35



3.2.4.2. - Résultats et analyse des planches 36, 37 et 38

Les planches 37 (coupe des résistivités apparentes) et 38 (profil en long électrique), à l'échelle du 1/10 000, couvrent la totalité de la galerie de Valaury depuis la fenêtre de Vignefère. Par contre, la planche 36 (trafné à répétition), au 1/4 000, ne recouvre qu'une partie de ce tracé, que nous avons jugé la plus représentative. Elle débute deux cents mètres en aval du S.E. 19 (près des Pourraques) et se termine au S 11. Nous procéderons à l'examen des profils du Nord vers le Sud, c'est-à-dire de l'amont vers l'aval. On note dans la partie sommitale des S.E. 16 et 36, l'apparition d'un horizon conducteur (ρ = 500 ohm. m - PL. 38) signalé entre autres sur la planche 37 par l'incurvation de l'équirésistance 1 000 ohm. m. Ceci doit refléter l'existence d'une zone karstifiée affectant le toit des dolomies sur au maximum 50 mètres de profondeur.

A priori, elle n'intéresse donc pas le trajet proprement dit de la galerie où cependant des dolomies broyées ou microfissurées pourraient être tangentées à l'aplomb du S.E. 36.

Entre les S.E. 17 et 18 on retrouve les dolomies néojurassiques à résistivités élevées ($\rho \neq 6\,000$ ohm. m) dont les pendages sont en vis-à-vis de part et d'autre d'une faille importante dont le passage est tout juste discernable par traîné de résistivité. Cet accident n'engendre donc pas de zone de broyage intense et met en contact des sédiments de nature et de faciès sensiblement équivalents. Il s'agit de la faille NE-SW de Morières-les-Tournes.

Au S.E. 19, les résistivités sont légèrement décroissantes par rapport à celles rencontrées à l'aplomb des stations précédentes.

De plus, un horizon relativement conducteur ($\rho = 1\,000$ ohm. m), signalant probablement la base moins compacte des dolomies, se poursuit en profondeur jusqu'à une cote voisine de celle présumée du futur ouvrage.

L'interprétation (Pl. 38) de la partie située entre les S.E. 19 et 22 intègre les données géologiques superficielles aux résultats dégagés de la lecture du traîné et de la décomposition des S.E. A partir de la mesure 24 (Pl. 36), entre les S.E. 19 et S.E. 20, les vecteurs de résistivité prennent une orientation oblique et leur valeur décroît progressivement d'un millier d'ohm. m à 200 ou 300 ohm. m.

On note également l'inversion des profils correspondant aux lignes AB 200 - AB 100. En amont, la ligne la plus longue montre des résistivités faibles en profondeur par rapport à la ligne la plus courte.

Vers le S.E. 20, c'est l'inverse qui se produit, et le profil double retrouve une allure plus habituelle : résistivités égales ou plus fortes pour la plus longue ligne.

Ce profil caractérise l'apparition progressive d'une limite stratigraphique inclinée vers l'amont. En effet, c'est la longueur de ligne la plus grande qui réagit la première aux couches de faible résistivité.

En termes géologiques : on doit passer progressivement des dolomies néojurassiques au Bathonien, d'abord calcaire, puis beaucoup plus marneux, la mesure 35 marquant la séparation de ces deux faciès du Bathonien. Celui-ci, sous forme de calcaire marneux relativement compact en profondeur (forage S 8) se poursuit normalement jusqu'à l'aval du S.E. 21 avec, cependant, une interruption (karstique ?) possible d'une vingtaine de mètres répartie de part et d'autre de ce S.E. (résistivités vraies très faibles). Les niveaux compacts rencontrés dans le S 8 en fin de sondage correspondent peut-être au sommet du Dogger, et expliqueraient le décalage des deux courbes du traîné.

Au-delà de la mesure 57 et jusqu'à la faille mettant en contact anormal Bathonien et Portlandien, apparaît une importante zone de broyage supputée par l'entrecroisement des vecteurs de traîné et les basses valeurs des différents horizons du S.E. 35 et confirmée par le forage postérieur S 14 (alternance de Bathonien compact et de zones broyées principalement entre 35 et 50 mètres). Enfin, sur la planche 37, on observera la mise en exergue de ce panneau bathonien conducteur coincé entre deux compartiments plus résistants.

Le démarrage à l'intérieur du Portlandien se montre de meilleure qualité que la partie aval proche du S.E. 22 (ρ AB 200 = ρ AB 100). Le changement à partir de la mesure 132 correspond peut-être aussi au changement de direction du tracé. La planche 37 reflète bien l'existence de deux formations résistantes distinctes séparées par une langue conductrice. La confrontation des coupes des S.E. 22 et 23 avec celle du forage 9 (Pl. 38) permet d'effectuer les corrélations suivantes :

- la partie supérieure du Portlandien coïncide avec l'horizon à 5 000 ohm. m ;
- les zones fracturées et bréchiques rencontrées en sondage de 16 à 38 mètres détermineraient le conducteur intercalaire de résistivité égale à 700 ohm. m ;
- le marqueur résistant à 2 500 - 3 000 ohm. m doit rassembler le mur du Portlandien et les dolomies néojurassiques ;
- enfin, le conducteur terminal ne peut s'expliquer autrement que par un niveau karstifié dans les dolomies ou par une défaillance du matériel, car les niveaux marneux du Dogger qui pourraient l'expliquer sont enfouis beaucoup trop profondément pour être touchés par les mesures.

Les résultats, difficilement explicables, du traîné entre les mesures 180 et 200 peuvent cependant signaler une passée calcaire plus ou moins bréchique du Portlandien en profondeur. Inversement, au-delà du S.E. 23 (mesures 204 à 220), sur environ 150 mètres, le calcaire oolithique compact et massif doit se subsistuer aux sédiments précédents (ρ AB 200 > ρ AB 100), à moins qu'il ne s'agisse d'un compartiment élevé entre deux failles et que la ligne AB 200 reconnaisse les dolomies néojurassiques sommitales compactes.

Le S.E. 24 se trouve dans l'emprise du compartiment faillé, aussi, sa décomposition est soumise à caution. Toutefois, on observe que les résistivités de ses différents marqueurs sont plus faibles que celles rencontrées tant à l'amont qu'à l'aval. Suite à cette zone broyée et (ou) argilisée, liée à l'accident oblique à la galerie dont le traîné suppute la puissance à 70 mètres, débute l'ultime grand compartiment géologique de cette étude.

La planche 37, qui ne présume point de la tectonique, illustre assez bien la descente dans la série géologique par une décroissance progressive des résistivités et une remontée en surface "du fond" conducteur. La fin des planches 36 et 38 permet, par contre, de rentrer plus intensément dans le détail.

RECONNAISSANCE PAR PROSPECTION GEOPHYSIQUE
SUR LE TRACÉ DE LA GALERIE DE VALAURY

—

les POURRAQUES - S 11

—

PROFILS DES RESISTIVITES APPARENTES

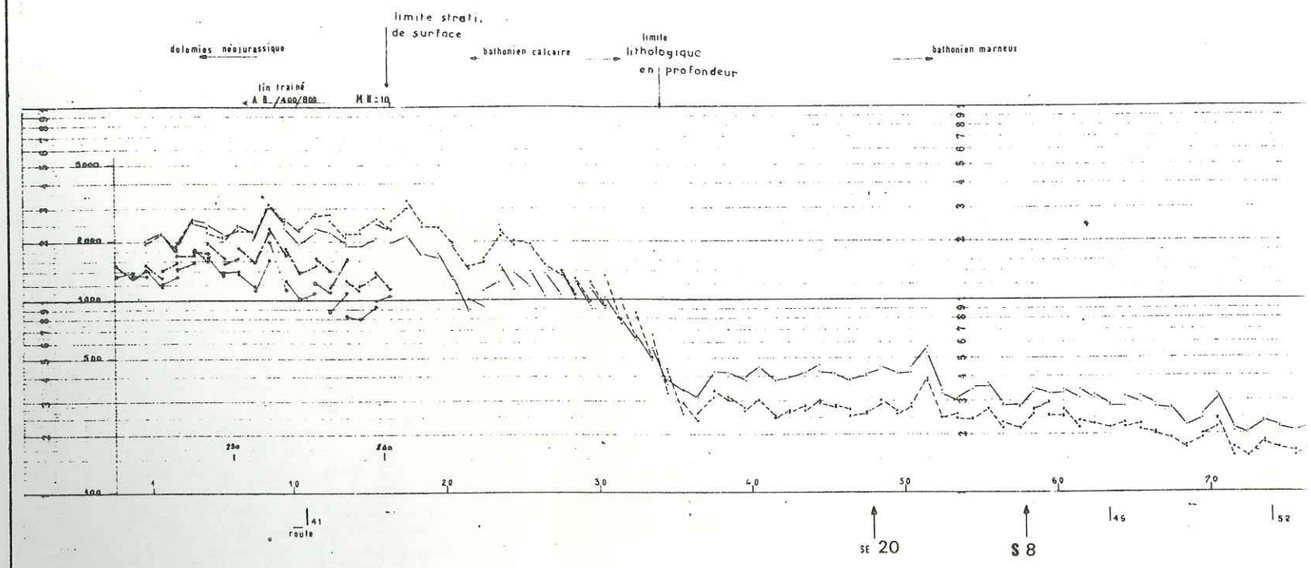
(TRAINE A RÉPÉTITION)

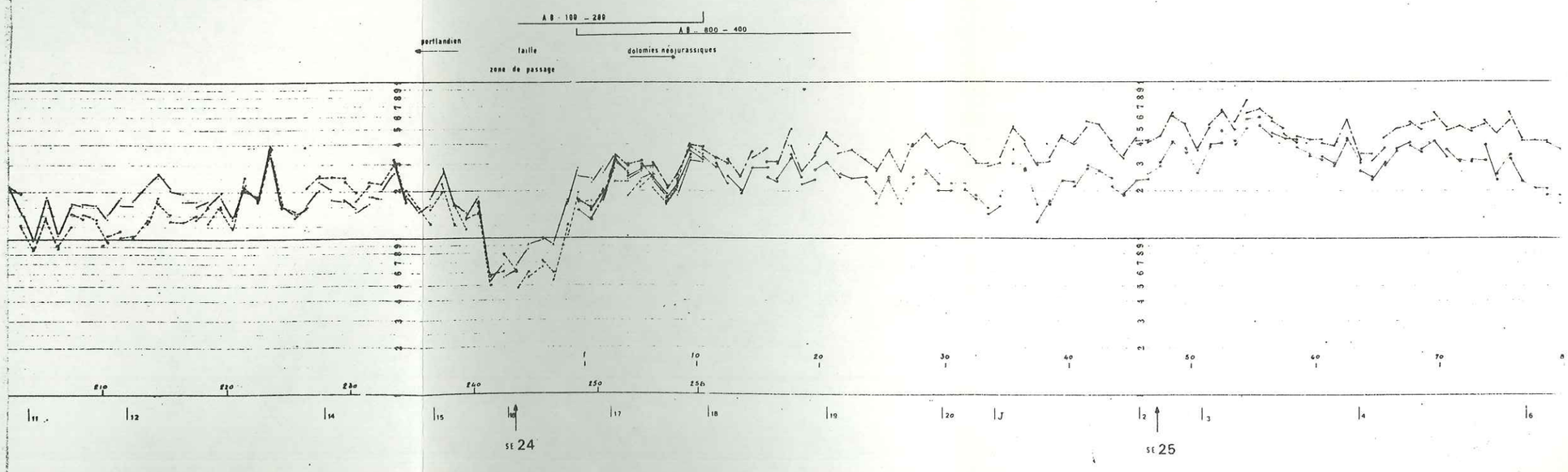
ECHELLE HORIZONTALE 1/4000

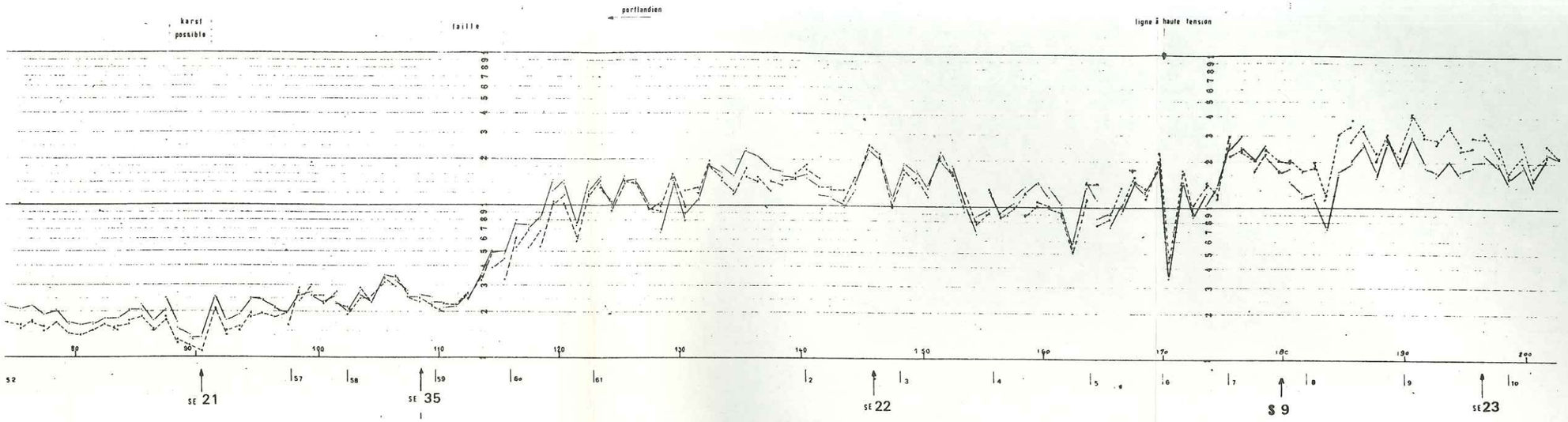
MN : 10 m

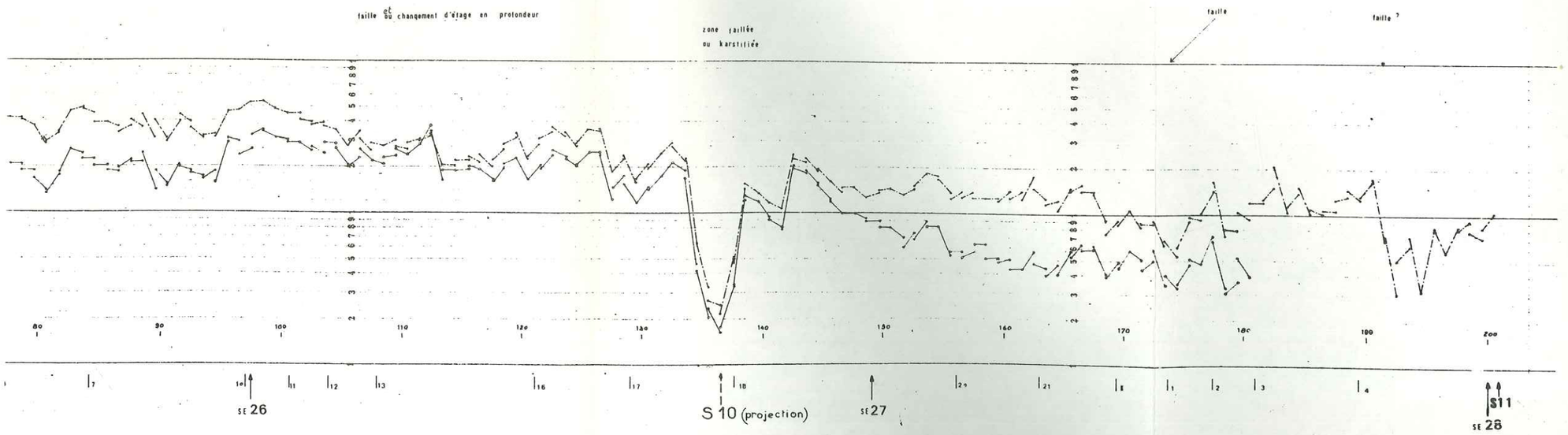
AB : 200 m.
A'B' : 100 m
AB = 800 m.
A'B' = 400 m.

PL. 36






karst possible
faille
portlandien
ligne à haute tension
80
90
100
110
120
130
140
150
160
170
180
190
200
S2
I57
I58
I59
I60
I61
I2
I3
I4
I5
I6
I7
I8
I9
I10
SE 21
SE 35
S 14
SE 22
S 9
SE 23


faille et/ou changement d'étage en profondeur
zone faillée ou karstifiée
faille
faille ?
80
90
100
110
120
130
140
150
160
170
180
190
200
I7
tel
I11
I12
I13
I16
I17
I18
I29
I21
I8
I1
I2
I3
I4
SE 26
S 10 (projection)
SE 27
S11
SE 28

RECONNAISSANCE PAR PROSPECTION GEOPHYSIQUE
SUR LE TRACÉ DE LA GALERIE DE MONTRIEUX ET DE VALAURY

PROSPECTION ELECTRIQUE

COUPE DES RESISTIVITÉS APPARENTES

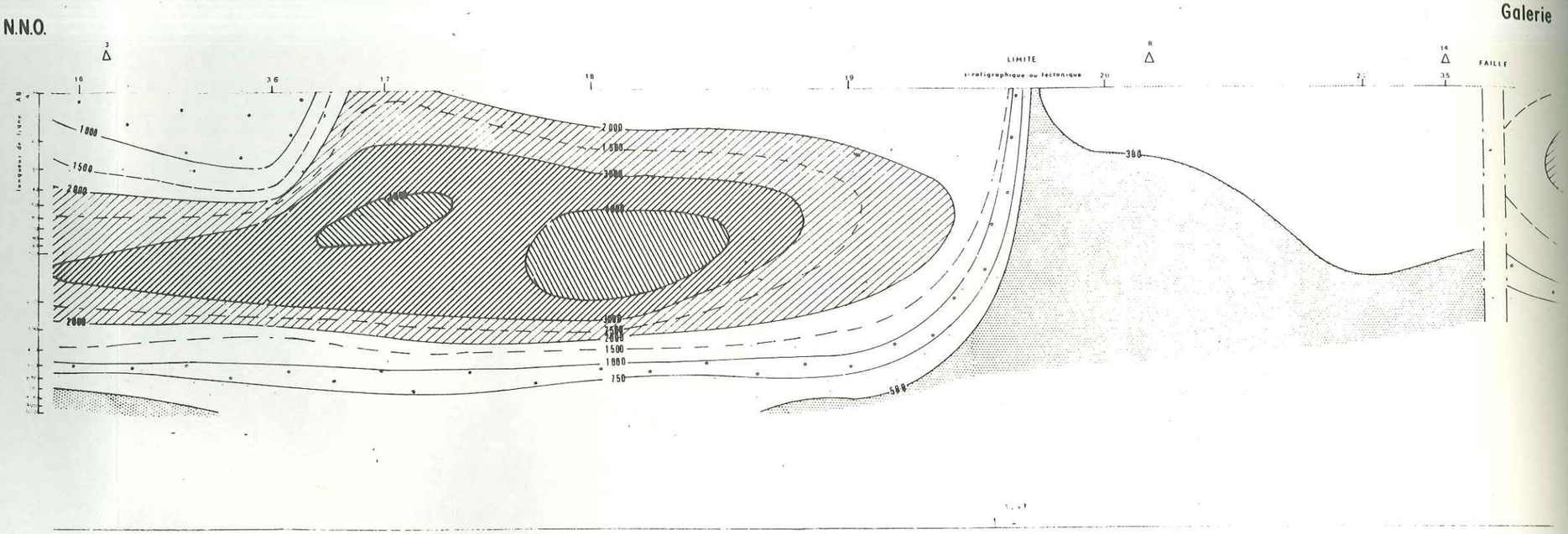
ECHELLE HORIZONTALE 1/10000

..... VERTICALE $\frac{AB}{4}$ en m

ECHELLE DES TEINTES

100 300 500 750 1000 2000 3000 4000 ohm m

PL: 37



RECONNAISSANCE PAR PROSPECTION GEOPHYSIQUE
SUR LE TRACE DE LA GALERIE DE VALAURY

PROSPECTION ELECTRIQUE

COUPE
(PROFIL EN LONG)

AB = 800m A'B' = 400m
AB = 200m A'B' = 100m
MN = 10m

ECHELLE 1/10000

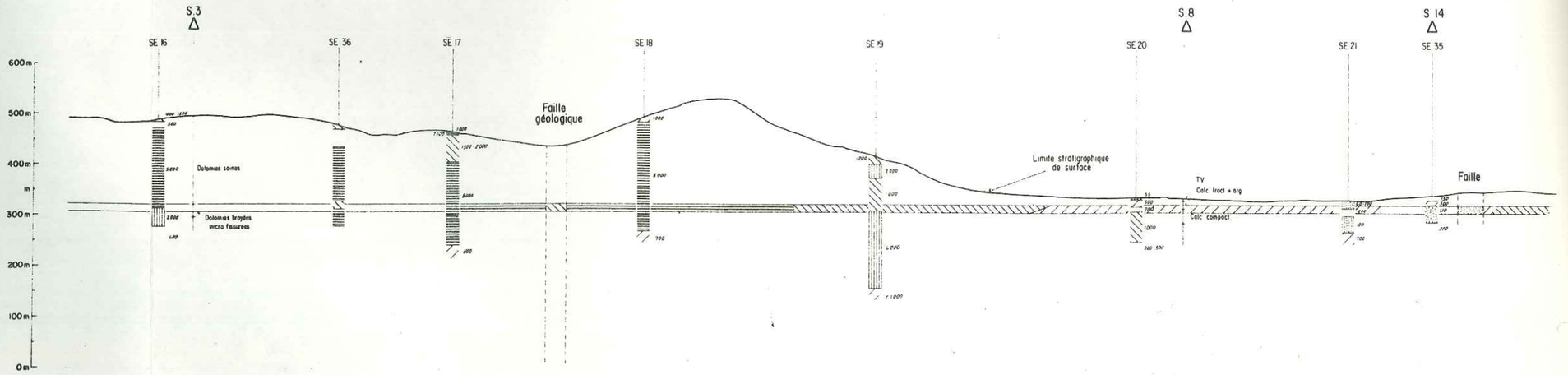
S.4
SE.3

Sondage électrique et son numéro
Forage sur le profil
Valeur de la résistivité vraie en ohm.m

PL. 38

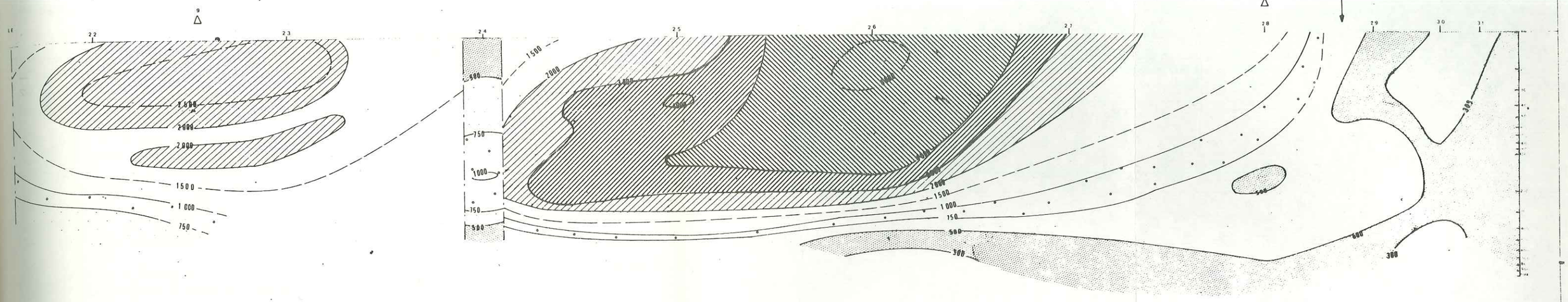
ECHELLE DES TEINTES

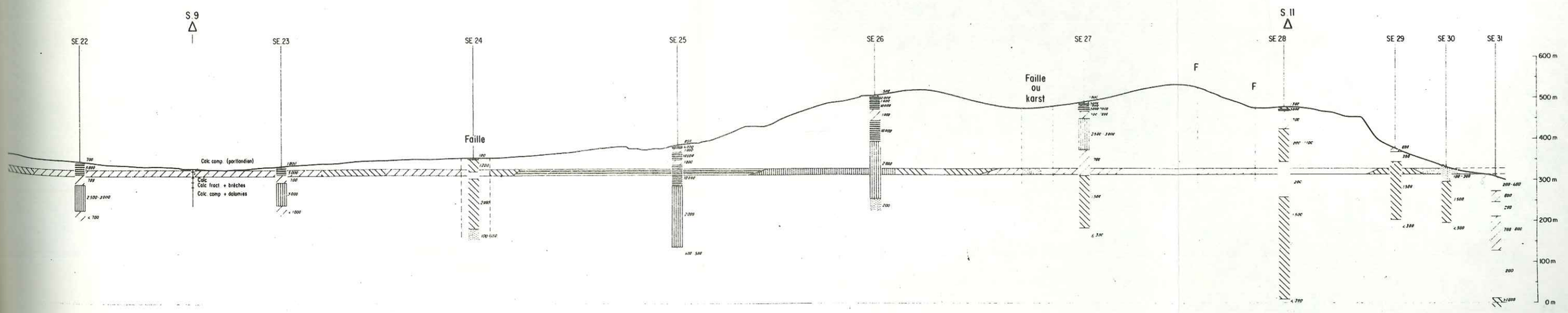
200 500 1000 2000 4000 ohm m



de VALAURY

S.S.E.





A proximité de la dernière faille rencontrée, les dolomies peuvent être encore légèrement altérées ou recristallisées (agitation des vecteurs du traîné). Par la suite, jusqu'à l'aval du S.E. 26, l'ouvrage devrait rencontrer d'abord des dolomies (partie amont), puis les calcaires compacts du Bathonien. La valeur plus faible de la longueur de ligne la plus forte (ρ AB 800 < ρ AB 400) provient, soit des fortes résistivités de la couche dolomitique superficielle, soit du fait que la ligne AB 800 atteint les niveaux argileux de la base du Bathonien.

Une rupture de pente des profils de résistivité (mesure 113) jointe à une baisse d'ensemble des résistivités apparentes, semble refléter l'existence en profondeur d'un accident ou d'un incident géologique ; faille ou simplement passage brutal du Bathonien supérieur au Dogger. La très légère remontée des résistivités qui lui font suite suggère un léger affaissement du compartiment sud abaissant le Dogger conducteur.

Entre les mesures 133 et 143, une chute importante des résistivités (2 000 à 200 ohm. m) "prévoit" un karst ou une zone faillée, peut-être un contact anormal avec les argiles et dolomies fissurées de l'Hettangien, rencontré dans le S. 10 dont la projection perpendiculaire à la galerie tombe justement dans cette zone. Les faibles résistivités enregistrées par les S.E. 25 à 27 (Pl. 38) en profondeur, correspondent éventuellement au contact anormal penté sud ouest de 60° de la faille des Hubacs.

Au-delà de ce phénomène, les résistivités décroissent régulièrement jusqu'à la mesure 180 où elles ne dépassent plus, en profondeur, 500 ohm. m en résistivité apparente (pour AB = 800 m). Ceci, confirmé par la faible résistivité des horizons conducteurs et résistants des S.E. 27 et 28, présume du passage de la galerie dans les sédiments calcaréo-marneux du Bathonien ou du Dogger. De plus, un accident géologique, prévu par les relevés de surface (faille des Baux Rouges) et confirmé par la planche 36, rencontre le tracé de l'ouvrage à la hauteur du piquet K 1. La relative remontée des résistivités en aval, indique qu'une nouvelle fois les terrains conducteurs du Dogger sont affaissés, ce qui est vérifié sur le terrain par le sens du rejet de la faille des Baux Rouges.

La présence de falaises à l'aval n'a pas permis la poursuite du traîné en double longueur après la mesure 180. Pour la même raison, le profil de résistivité s'interromp définitivement au droit du S.E. 28.

Cependant il semblerait que les mesures 190, 191, 192 et suivantes (vecteurs obliques par rapport à la direction du profil) soient perturbées par la présence d'un nouvel accident géologique (faille).

A partir du S.E. 28, lui-même perturbé par la géologie locale mais aussi par la topographie, on a été obligé, en l'absence de mesures de traîné de résistivité, d'extrapoler entre les sondages électriques.

La galerie devrait en principe se poursuivre dans les calcaires marneux et marnes du Bathonien et du Bajocien (résistivités inférieures ou au plus égale à 200 ohm. m). Un niveau relativement résistant (ρ = 1 500 ohm. m) fait son apparition au droit du S.E. 29. On doit donc admettre qu'il existe des horizons plus calcaires et plus compacts au sein du Dogger. De petites failles sont peut-être responsables du décalage de ces niveaux conducteurs et résistants. Le pendage des couches relevé en surface interdit de penser à un repli anticlinal comme il apparaît sur la coupe électrique.

Etant donné les épaisseurs des étages lithologiques, le niveau de base ρ < 300 ohm.m indiqué au droit du S.E. 28 pourrait correspondre à l'Hettangien ou au Trias.

3.2.5. - Résultats généraux de la campagne

3.2.5.1. - Corrélation : résistivité - Nature des terrains

On a essayé de classer les terrains situés à la cote probable de la galerie, non pas en entités géologiques, mais d'après leurs caractéristiques électriques d'où peuvent se déduire certaines qualités mécaniques.

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

Horizons électriques en ohm. m	Nature probable des terrains correspondants
classe 3 : 25 - 500	argiles gypseuses triasiques - zones broyées ou karstifiées Bathonien et Dogger marneux (?) dolomies et argiles hettangiennes
classe 2 : 500 - 1 000	Bathonien calcaréo-marneux sain - dolomies très fracturées argileuses - Portlandien bréchique
classe 1 : 1 000 - 2 000	Portlandien oolithique peu fissuré - Dolomies néojurassiques fissurées
classe 0 : 2 000 - et au-dessus	Dolomies néojurassiques saines Bathonien supérieur calcaire

3.2.5.2. - Profil géotechnique sommaire

Compte tenu de ces hypothèses, les galeries de Montrieux et de Valaury pourront traverser les terrains suivants :

- de l'attaque amont jusqu'à l'accident triasojurassique : classe 3, puis jusqu'à l'aval du S.E. 5, sur près de 800 m, la galerie passe soit dans les calcaires du Portlandien, soit dans les dolomies néojurassiques sommitales, terrains tantôt sains, tantôt broyés, d'où leur alternance en classe 1 et 3 ;
- après la faille, dont le rejet met en contact le Portlandien et les dolomies néojurassiques, la classe 0 apparaîtra sur plus de 700 mètres.

Par contre, entre les S.E. 7 et S 7, les dolomies fissurées provoqueront un passage en classe 1 qui pourra être injecté de passées (d'une vingtaine de mètres chacune) de classe 2 dans les zones karstifiées. Le passage de la faille du Jas de Laure, à 110 mètres en amont du S 7, n'introduit aucun broyage. Mais son rejet important entraîne une inversion des profils du trafné.

Plus de 1 200 mètres du tracé n'ont pas été reconnus par la géophysique (falaises abruptes, topographie agitée) ;

- à partir du forage 6, 200 mètres de classe 1 précèdent quelques 500 mètres de classe 2 pouvant correspondre à la base des dolomies. Inversement, à mi-distance entre les S.E. 11 et 12 et jusqu'à la hauteur de ce dernier, la classe 0 annonce l'arrivée dans le Bathonien supérieur calcaire. Par une faille 80 mètres à l'aval du S.E. 12, la galerie entre dans le Dogger ou dans le Bathonien marneux. Bien que de classe 3, ces derniers terrains peuvent être d'excellente tenue;
- de l'amont du S.E. 14 jusqu'à une centaine de mètres à l'aval du S.E. 15, on note une reprise de classe 0, précédant une rechute en classe 1 où cependant les calcaires un peu plus argileux qu'à l'amont, devraient présenter une bonne compacité ;
- 200 mètres en amont de la fenêtre de Vignefère débute sur le trafné une zone sourde (vecteurs très agités) qui se poursuit jusqu'au S.E. 17, due sans doute à la présence d'argiles en surface. La résistivité moyenne est cependant élevée (S.E. 16, 36, 17 - Pl. 38). Au niveau de la fenêtre, on se trouve probablement à la base des calcaires du Bathonien supérieur de bonne tenue. Puis la galerie remonte la série jusqu'à rentrer dans les dolomies basales fracturées près du S.E. 16;
- la classe 0 reprendra certainement aux abords du S.E. 17 et à une interruption près (faille) se continuera jusqu'à 100 à 150 mètres à l'amont du S.E. 19 où dolomies puis Bathonien calcaire n'offriront plus qu'une classe 1 jusqu'au passage dans le Bathonien marneux (P.M. 8 700).

Ce dernier compartiment est de classe 2, sauf dans le voisinage du S.E. 21 et en aval du S 14, à classer 3. Mais son matériau de base calcaréo-marneux doit posséder une bonne cohésion et offrir un avancement aisé ;

- au-delà de l'accident bathono-portlandien, la classe 2 (calcaires fracturés et (ou) bréchiques) prédominera jusqu'au S.E. 24. Seuls quelques centaines de mètres de calcaire oolithique compact, de classe 1, pourront être rencontrés à l'amont du S.E. 22 et entre les S.E. 23 et 24 ;
- suite à une traversée de faille vraisemblablement difficile de classe 3, sur une soixantaine de mètres (S.E. 24), on retrouvera pour la dernière fois la classe 0 jusqu'à l'aval du S.E. 26, mais avec un changement de nature de la roche aux alentours du P.M. 11 680 (entre S.E. 25 et S.E. 26, on rentre dans le Bathonien calcaire) ;
- les derniers 1 500 mètres se distingueront par des changements plus ou moins brutaux d'allure, de compacité ou de composition des sédiments traversés. La classe 1 ne pourra être rencontrée que sur environ 150 mètres au Sud du S.E. 26 et éventuellement sur une cinquantaine de mètres au niveau du S.E. 29. Ailleurs, les sections alternantes de classe 2 et 3 souligneront les pénétrations dans des zones tendres (Jurassique moyen marneux) ou plus compactes, correspondant à l'alternance calcaires - calcaires marneux du Dogger.

3.2.6. - Apport de la géophysique à l'étude géologique

Le premier point à souligner est que la géophysique n'apporte que des connaissances qualitatives sur les assises que rencontrera la galerie. Nous avons vu que la corrélation résistivité-lithologie n'est pas rigoureuse et que des terrains très différents peuvent entrer dans une même classe de résistivité. Ce facteur principal qui intervient dans la résistivité d'un terrain est son pourcentage d'argile.

Cette argile peut être liée à la roche depuis sa genèse, comme pour les calcaires marneux du Dogger. Dans ce cas, la faible résistivité n'a pas grande signification au point de vue géotechnique, car les calcaires marneux sont en général compacts et sains. Elle peut provenir de la fracturation et de l'altération de la roche, auquel cas la chute de résistivité enregistrée correspond bien à un affaiblissement des qualités du terrain (failles, karsts, etc.).

Par contre, les profils géophysiques sont d'un grand intérêt pour localiser les grandes discontinuités tectoniques. Les S.E. déterminent des compartiments résistants et des compartiments conducteurs, dont la limite est mise en évidence par le trafné électrique.

Les discontinuités déjà observées lors de l'étude de terrain sont ainsi confirmées et localisées en profondeur avec une relative précision. Les limites de terrain peuvent être déterminées en profondeur, lorsque les terrains ont des propriétés électriques très différentes (calcaires et dolomies - calcaires marneux).

Les discontinuités affectant un seul terrain en surface, donc difficilement cartographiables lors du lever, peuvent ressortir sur le trafné et le sens de leur rejet peut éventuellement être déterminé, si la résistivité moyenne a changé. Nous nous sommes basés essentiellement sur la géophysique pour localiser les failles et déterminer les terrains situés au niveau de la galerie entre le S 6 et le S 3, distants de 3 500 mètres. En effet, sur ce parcours n'affleurent que les dolomies néojurassiques de la forêt domaniale des Morières et aucun sondage n'a été fait, car le recouvrement est très important.

3.3. - CARTE A LA COTE DE LA GALERIE

Après dépouillement des résultats de travaux de reconnaissance, nous avons en notre possession suffisamment de données pour établir le profil en long géologique de la galerie et quelques profils en travers. Le profil en long géologique et géotechnique (fig. 49) est décrit dans le paragraphe 6 de ce chapitre.

Les renseignements qu'il apporte sont relativement sûrs et précis, puisque basés sur des sondages mécaniques, électriques et les levers de surface. Cependant une telle coupe géologique ne prévoit pas la moindre modification du tracé de la galerie, puisque celle-ci se ferait dans un plan horizontal orthogonal au plan de la coupe. Pour le cas dont nous nous occupons, c'est le plan de cote 300.

C'est pour permettre de visualiser rapidement ce qu'un éventuel changement de tracé de la galerie changerait dans les prévisions géologiques, et également pour donner une idée de la structure profonde de la région, que nous avons tenté d'établir cette carte géologique.

Le dessin en est relativement juste aux abords du tracé de la galerie et près de la courbe de niveau 300 qui ceinture le massif, mais les déterminations de terrains sont évidemment interpolées ou extrapolées pour le reste du massif.

La carte à la cote 300 (fig. 39) met en évidence dans la moitié nord une structure anticlinale d'axe NW-SE à cœur de Jurassique moyen, qui n'apparaissait pas sur la carte géologique de surface où seules les dolomies affleurent. La galerie est située sur le flanc sud ouest de cette structure, avec une direction à peu près parallèle à celle des couches.

Elle serait généralement au sein des calcaires compacts du Bathonien supérieur dont l'épaisseur atteint seulement une soixantaine de mètres, mais des variations de la résistivité font penser qu'elle pourra se situer dans des niveaux sus ou sous-jacents.

On voit pourquoi la détermination des terrains que rencontrera l'ouvrage sur cette portion a été délicate et qu'il reste toujours une bonne part d'hypothèse, surtout entre le sondage 6 et le sondage 3 distants de plus de 3 kilomètres.

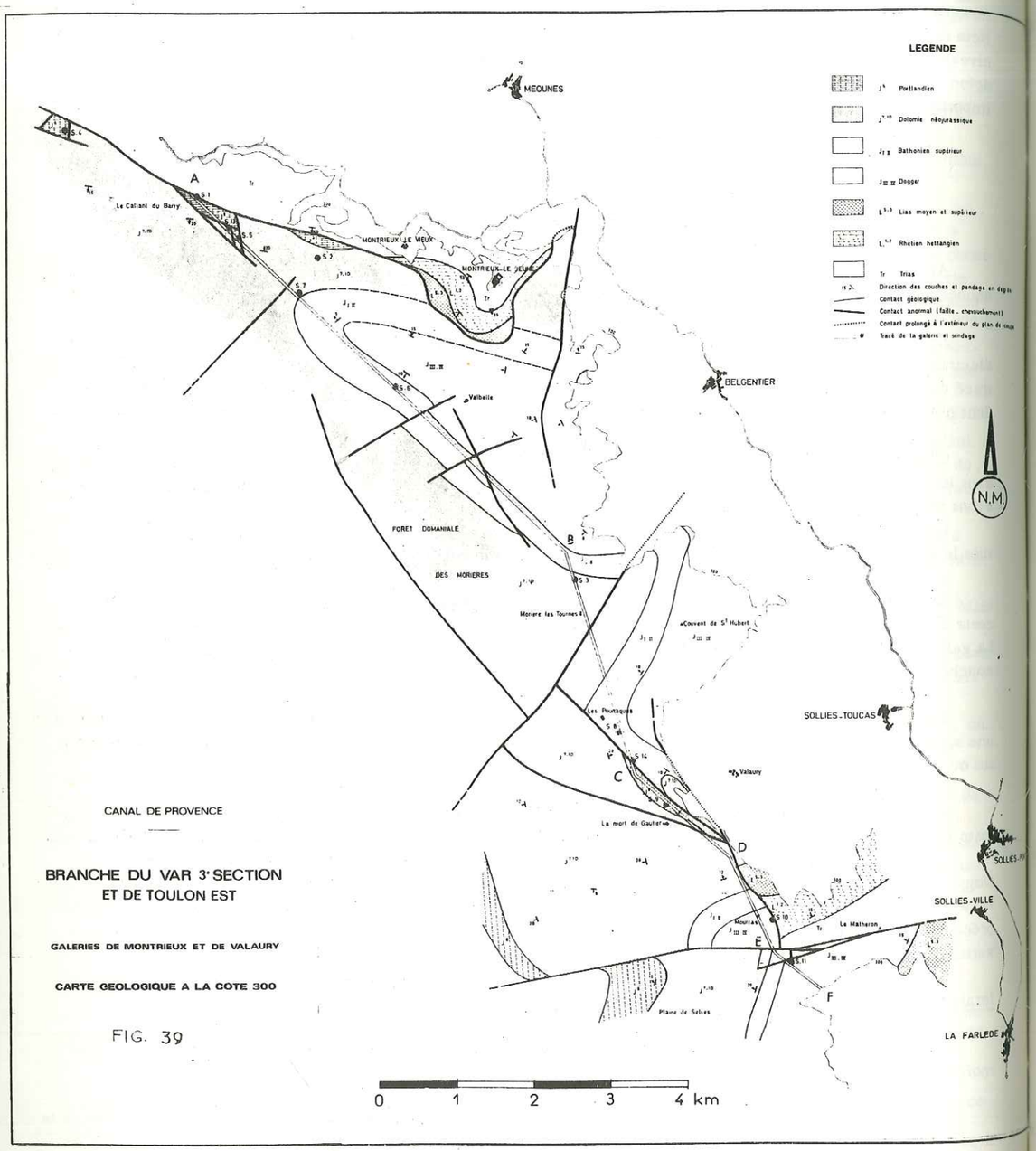
Au point de vue géotechnique, la distinction est importante suivant que la galerie se situera au sommet du Dogger, au sein du Bathonien supérieur ou à la base des dolomies. Dans les deux premiers cas, les conditions de creusement sont bonnes, bien que la présence de niveaux marneux au sommet du Dogger nécessite de prendre certaines précautions. Par contre, la base des dolomies a généralement été reconnue comme étant plus altérée, fissurée et karstifiée que le reste de l'étage.

La question qui se pose est donc la suivante : sera-t-il rentable d'effectuer un sondage complémentaire, qui ferait 400 m de profondeur, pour lever cette indétermination ?

Pour la suite du tracé, les déterminations des limites géologiques sont plus précises, car le recouvrement est moins grand et la géologie de surface plus variée.

La carte à la cote 300 traduit bien le "nœud tectonique" de la région de Mourras et du Matheron. On voit, à la situation du sondage 10, que le trajet primitif allait traverser la faille chevauchante de Mourras puis rencontrer les terrains médiocres de l'Infralias et du Trias, avant de repasser dans le compartiment jurassique de la plaine des Selves par l'intermédiaire de la grande faille du Matheron.

C'est cette perspective pessimiste qui avait amené à modifier le tracé, modification qui se justifie donc.



CANAL DE PROVENCE

BRANCHE DU VAR 3e SECTION
ET DE TOULON EST

GALERIES DE MONTRIEUX ET DE VALAURY

CARTE GEOLOGIQUE A LA COTE 300

FIG. 39

4. - ETUDE HYDROGEOLOGIQUE

Cette étude a deux objectifs :

1. - estimer l'exhaure probable des galeries de Montrieux et de Valaury ;
2. - rechercher l'influence des travaux sur le régime des sources du massif.

Ainsi que nous le montrerons dans ce rapport les deux tranches de travaux intéressent deux aquifères différents.

- La couverture de la galerie de Montrieux est un massif dolomitique très épais karstique et fortement diaclasé. La couverture de la galerie de Valaury est plus hétérogène, elle est sillonnée de failles importantes.

- Les aquifères de ces deux zones se situent à des niveaux différents.

La nappe intéressée par la galerie de Montrieux s'écoule en grande partie vers le Nord en direction du Gapeau. Au Sud de la faille sud ouest nord est de Morières-les-Tournes, la nappe s'enfonce rapidement à l'intérieur des calcaires marneux.

4.1. - PARAMETRES HYDROGEOLOGIQUES

On a cherché à déterminer les caractéristiques hydrodynamiques des terrains, par des essais Lugeon et par un essai de pompage.

4.1.1. - Essais Lugeon

Des essais Lugeon ont été effectués systématiquement dans les sondages, à la cote prévue pour la galerie.

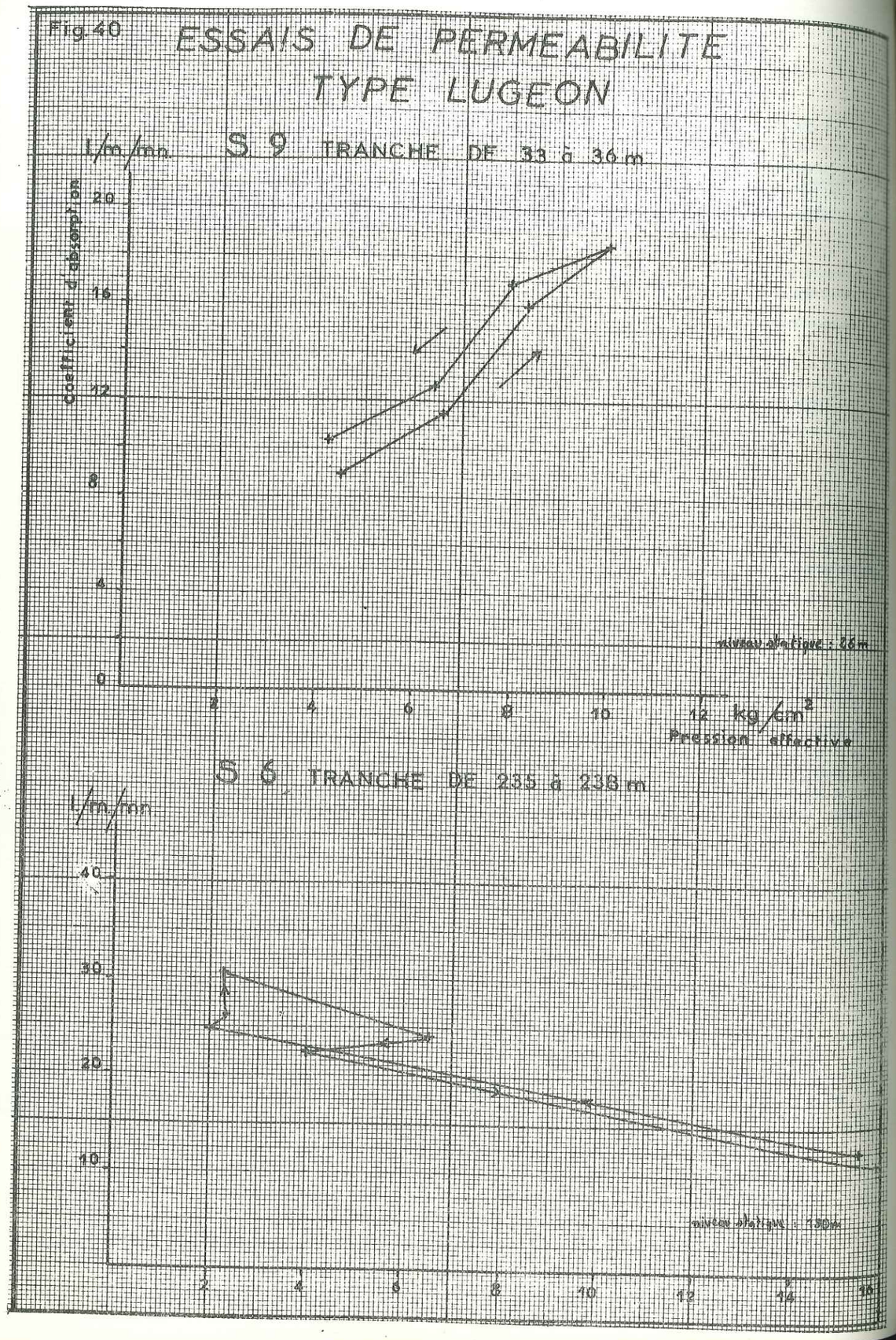
Les résultats sont significatifs dans les sondages peu profonds (jusqu'à 70 mètres) mais aberrants à grande profondeur, où le débit injecté diminue quand la pression effective calculée augmente.

- Le Trias, représenté dans le S 1 par des gypses et argiles, est étanche.
- Le Dogger, testé dans les sondages 10 et 11 n'absorbe aucun débit.
- Le Bathonien supérieur : l'essai effectué dans le S 6 de 235 à 238 mètres (fig. 40) donne une courbe pression - débit inverse des courbes habituelles. En effet, du fait des pertes de charge énormes dues à la longueur de conduites dans le sondage, la pression effective calculée est plus faible lorsqu'on injecte un fort débit qu'à faible débit.

Le tableau ci-après explique le phénomène :

Pression au mano. Kg/cm^2	Durée de l'essai (mn)	Débit moyen l/mn	Charge statique Kg/ cm^2	Pression effective Kg/ cm^2 (*)	Cœfficient d'absorption l/m/mn
2,5	10	37	18	15,5	12,3
5	10	76	18	1,9	25,3
7,5	10	80	18	2,2	26,7
10	10	91	18	2,2	30,3
7,5	10	72	18	6,5	24
5	10	71	18	4	23,7
2,5	10	34	18	16,2	11,3

(*) La pression effective tient compte des pertes de charge.



La courbe (fig. 40) indique une absorption de 10 l/m/mn pour une pression effective de 10 bars, mais ce résultat est sujet à caution.

Dans les S 8 et S 14, le calcaire grumeleux légèrement argileux attribué au Bathonien supérieur a une absorption inférieure à 10 Lugeons.

- Les dolomies néojurassiques donnent des résultats variables suivant les sondages et le niveau d'investigation. De 20 Lugeons en moyenne dans les sondages 7, 12 et 13, on passe à 100 Lugeons dans le sondage 4 (galerie de Dubliou), et à un débit de plus de 10 l/m/mn dans les dolomies morcelées de la base du S 3, à 200 m de profondeur, la pression du manomètre extérieur n'ayant pu dépasser 1 bar.
- Le Portlandien a des absorptions variables suivant les sondages. Dans le S 5 où les carottes sont recristallisées par de la calcite, l'absorption est pratiquement nulle. Dans le S 9, l'essai traduit un léger débourrage causé par la montée en pression (fig. 40).

4.1.2. - Essai de pompage

L'essai a eu lieu le 11 février 1971 dans le puits n° 7 situé à 15 mètres du piézomètre de mesure S 7. La transmissivité, calculée à partir de la courbe de descente du piézomètre sur un cycle logarithmique de temps, donne une valeur relativement peu élevée de $6 \cdot 10^{-4}$ m²/s.

Le cœfficient d'emmagasinement est de l'ordre de 3 % (fig. 41).

4.1.3. - Comportement aquifère des différents terrains

Par analogie avec ce que l'on a vu dans le massif d'Agnis, on peut différencier deux types d'écoulement :

1 - écoulement karstique turbulent,
2 - écoulement de fissure, turbulent ou laminaire suivant son épaisseur.

Un troisième type, l'écoulement interstitiel laminaire peut se rencontrer dans les cas spéciaux de fissuration intense très mince ou à travers des sables fins.

- Keuper : pas d'écoulement ou de type 3.
- Hettangien : type 2 surtout et 3 (analogie avec Signes amont : ruissellement diffus à travers les moindres fissures).
- Lias : type 2.
- Dogger : type 2.
- Bathonien supérieur : type 2 et parfois 1.
- Dolomies néojurassiques : types 1 et 2, éventuellement 3 lors de la traversée de chaos sableux résultant de la dissolution préférentielle du squelette de carbonate de calcium du calcaire dolomitique.
- Portlandien : types 1 et 2.

4.2. - GALERIE DE MONTRIEUX

4.2.1. - Les sources de l'aquifère nord

Les sources se répartissent sur le pourtour du massif, au Nord et à l'Est et vont alimenter le Gapeau. La localisation des principales sources est indiquée sur la carte géologique au 1/20 000.

Leur point d'émergence est situé :

1) - au contact des dolomies avec les terrains sous-jacents moins perméables ; ce sont des sources de débordement.

. Sources de Cancerille : ces deux sources proches de la tête de la galerie sont situées sur le contact Jurassique - Trias. Elles tarissent rapidement en été.

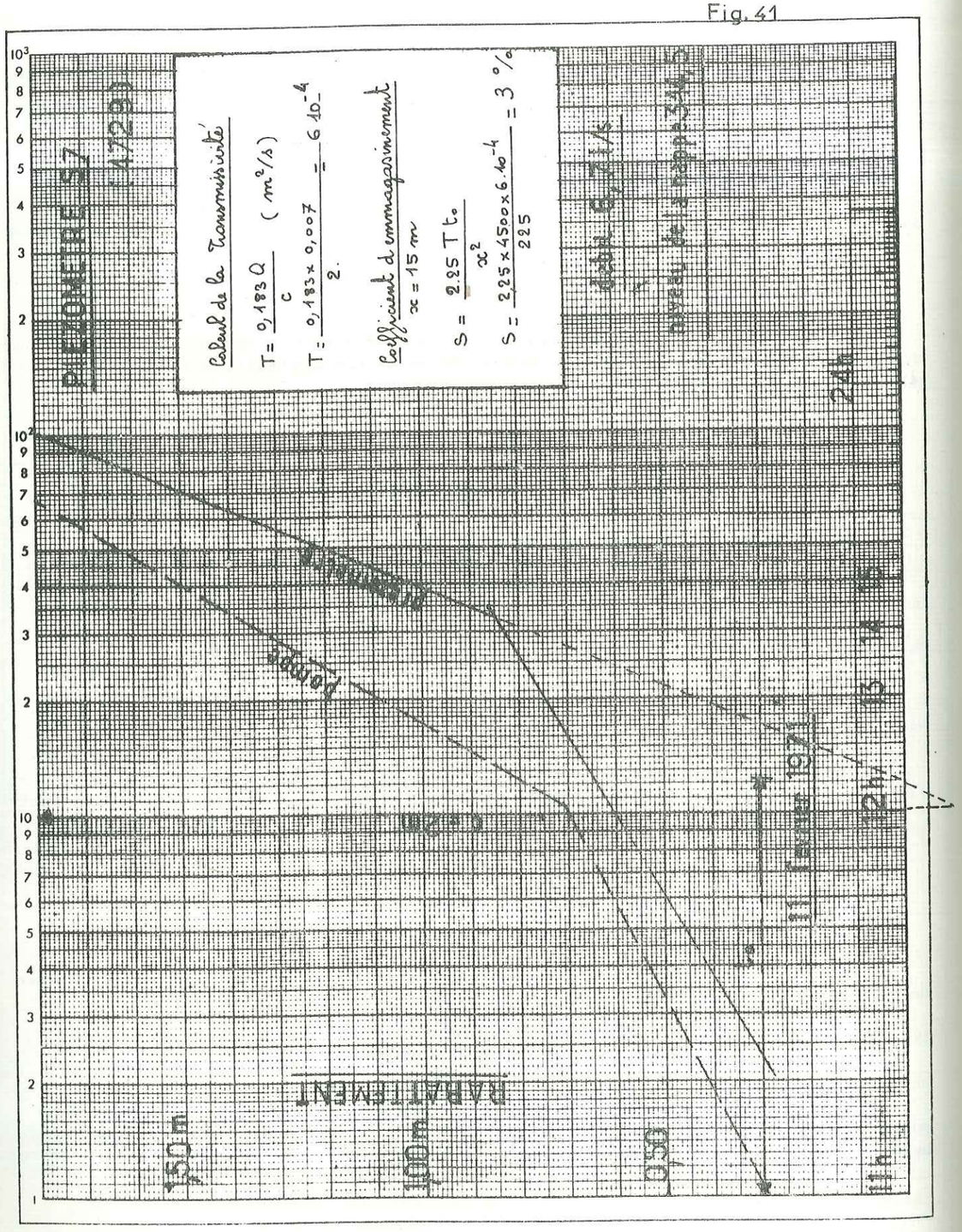
. Sources de Montrieux-le-Jeune : ces sources au nombre de 4 dont la plus élevée est à la cote 350 m jalonnent le contact chevauchant des dolomies néojurassiques sur les calcaires du Lias, les dolomies hettangiennes ou le Trias. Le débit d'étiage de l'ensemble est de 7 l/s.

. Source de Gavaudan : (290 m) cette source située au contact des dolomies et des calcaires marneux du Dogger, sur le trajet de la faille méridienne de Gavaudan est captée pour l'alimentation de la commune de Belgentier. Son débit d'étiage est de 4 l/s.

. Sources de la falaise de Belgentier : au Sud de la précédente et dans la même situation géologique se trouvent trois sources : une source pérenne, les Escavalins, à la cote 300 ; deux sources intermittentes qui sont, en hautes eaux, les exutoires de réseaux karstiques.

a) une grotte proche de la source de Gavaudan à la cote 390,
b) la Baume obscure dans le prolongement de la dépression de Valbelle, à la cote 430.

Fig. 41



N° 2024

2) plus bas, dans la série.

. Montrieux-le-Vieux : (253 m) au contact des dolomies hettangiennes et du Keuper imperméable. Le débit d'étiage est de 5 à 7 l/s. Elle n'écoule qu'une faible partie des eaux du massif. En effet, en étiage le débit du Gapeau s'accroît de 60 l/s de l'aval de la source de Beaupré au gué de Montrieux-le-Jeune.

. Fond d'Ouvin : (250 m) source située à la base des calcaires marneux du Dogger, en contrebas de la résurgence temporaire de la Beaume Obscure.

Son alimentation semble provenir directement du massif dolomitique. En effet, lors de la perforation du forage S 6, il a paraît-il été observé la trace de boue dans les eaux de la source.

. Vigne Fère (250 m) : cette source de faible débit sort des calcaires marneux.

. Foux Lacanal (180 m) : cette source est sur le trajet de la faille sud ouest - nord est de Morières-les-Tournes, dans les calcaires marneux. Le débit, de 2 l/s en étiage peut s'élever jusqu'à 10 l/s.

4.2.2. - Bilan hydrologique de l'aquifère nord

En étiage, le débit total fourni par les sources reconnues se situe entre 30 et 40 l/s. A ces chiffres il convient d'ajouter les 60 l/s qui sont distribués au Gapeau. Le débit total d'étiage est proche de 100 l/s.

Les sources du massif d'Agnis (Gapeau + Beaupré + Méounes + Caramy) ont un débit moyen d'étiage de 180 l/s pour un impluvium de 35 km^2. Nous avions calculé que le cœfficient d'infiltration apparent α de l'unité orientale du Beausset était légèrement inférieur à celui d'Agnis (I - 1.2.4.). Le calcul englobait alors un impluvium de 120 km^2 pouvant admettre des pertes occultes vers les unités occidentales du massif.

En admettant pour le massif des Morières - moins susceptible de pertes occultes - les mêmes conditions hydrologiques que pour Agnis, le bassin d'alimentation de l'aquifère nord aurait une surface de 20 km^2.

Le périmètre formé par le Gapeau, la falaise de Belgentier, la faille de Morières-les-Tournes, la faille NW-SE de Morières-le-Cap et sa prolongation jusqu'à Dubliou, en englobant les dolomies du Jas de Laure, limite une surface de 20 km^2

Il est donc fortement probable que nous ayons sur ce périmètre une unité hydrologique indépendante.

Le drainage se fait donc à la fois vers le Nord (contact du Trias), vers l'Est, et au Sud par la faille de Morières-les-Tournes qui alimente la source de la Foux Lacanal.

Les piézomètres implantés le long de la galerie donnent un aperçu des écoulements dans le massif.

4.2.3. - Relevés piézométriques

Nous disposons de 5 piézomètres et des niveaux d'affleurement des sources.

Altitude N. G. F.

	Basses eaux	Hautes eaux	Amplitude	Vitesse de descente
Piézo 1	306	343	37	7 m/mois
Piézo 2	316	368	52	10 m/mois
Piézo 5	311	360	49	10 m/mois
Piézo 7	340	380	40	3 m/mois
Piézo 6	374	?		
Piézo 3	340	340		
Source de Montrieux le Jeune	350	350		
Gavaudan	360	360		
Baume Obscure	-	430		

Au Nord, la cote 300 correspond approximativement au contact Jurassique - Trias. Les amplitudes importantes sont, soit l'indice d'une faible transmissivité dans les dolomies, soit l'indice d'un engorgement en crue, dû à la faible perméabilité des terrains triasiques qui en étiage arrivent à drainer l'apport du massif dolomitique.

L'altitude de l'eau au sondage 2 et au sondage 5 montre que les équipotentielles dans cette zone sont parallèles au contact Jurassique - Trias. La dénivelée entre les eaux du S 7 et du S 2 donne un ordre de grandeur du gradient d'écoulement en étiage :

$$Q = K.H. \overline{\text{grad } P}$$

$K.H. = 6.10^{-4}$ (essai de pompage au S 7)

$\overline{\text{grad } P} = 24/800.$

Sur un front d'écoulement de 1000 m le débit est égal à 18 l/s.

Sur un front de 4 km (longueur de la faille) le débit total est de 64 l/s ce qui est l'ordre de grandeur des apports au Gapeau.

Entre le S 6 et le S 3, sur le tracé de la galerie, doit se situer un point haut (à la cote 400 environ en étiage), au Sud duquel les écoulements se font vers l'Est (Vignefère) et le Sud (faille de Morières-les-Tournes).

4.2.4. - Exhaure de la galerie

La galerie draine l'aquifère nord sur sa limite ouest, la charge d'eau sur cette galerie est de 6 mètres à l'origine et de 80 mètres sous la plaine de Valbelle.

La faible transmissivité du terrain permet d'envisager l'hypothèse d'une exhaure assez faible.

En admettant un partage des eaux par moitié (Gapeau, galerie), l'exhaure serait donc de l'ordre de 10 l/s au km en étiage, plus un débit provenant de la vidange des terrains proches de la galerie.

Dans la galerie de Signes aval, ce débit, analogue au débit de Beaupré était de 40 l/s, soit 10 l/s au km (IV - 2.1.1.5.). Or, il provenait d'un réservoir de calcaires marneux de faible renouvellement situé au cœur du massif. Ce n'est pas le cas du massif de Montrieux, puisque la galerie se trouve au-dessus de ce noyau peu perméable de calcaires marneux.

Un débit continu minimum de 20 l/s au km est cependant possible. Au front d'attaque, l'essorage rapide du massif risque de donner des débits comparables à ceux observés à Signes amont, soit 20 à 40 l/s.

En saison pluvieuse, les pointes de débits observés à Signes aval (150 à 300 l/s) peuvent se retrouver dans la galerie de Montrieux, les couvertures étant identiques.

4.2.5. - Influence sur les sources

Au voisinage des fenêtres d'attaque du moulin du Gapeau, les sources ouest de la plaine de Cancerille risquent d'avoir leur régime perturbé.

L'influence sur les autres sources du massif n'est pas évidente.

La faible perméabilité du réservoir conduit à une surface de rabattement très creuse mais plus étendue de part et d'autre de la galerie.

Les sources situées à une cote supérieure à la galerie risquent bien sûr de voir leur débit diminuer. Cependant le rabattement de la nappe au NE de la galerie sera assez rapidement stoppé grâce à la présence du bombement anticlinal à cœur de calcaires marneux - mis en évidence sur la figure 39 - dont la galerie longe le flanc sud ouest.

4.3. - GALERIE DE VALAURY

4.3.1. - Sources de l'aquifère sud (carte au 1/20 000)

. Source de la Rouvière (160 m) : cet exutoire du type vauclusien situé dans les calcaires marneux se caractérise par un débit d'étiage constant (30 l/s) et de 800 l/s en pointes de crues. En crue, la composition chimique des eaux est modifiée avec disparition d'ions Mg et apparition d'ions Ca. Ceci peut être l'indice d'un drainage en crue d'un important aquifère situé dans les calcaires marneux. En fait, un cheminement rapide des eaux doit se faire par des fractures dans les calcaires du Bathonien et les calcaires marneux du Dogger depuis le toit dolomitique.

. Source de Valaury (200 m) : elle est sur le trajet de la faille des Hubacs, au contact des calcaires du Bathonien et des calcaires marneux du Dogger. Elle alimente le hameau de Valaury et son débit est de l'ordre de 1 l/s.

. Source du Gabet (300 m) : indiquée sur la carte topographique au sein des assises dolomitiques de l'Hettangien. Elle n'a pas été reconnue sur le terrain.

. Sources de Solliès-Ville (250 m) : ces sources sont situées à proximité de la faille est-ouest des Baux Rouges dans le Trias.

. Source de la Tourne : Cette source draine une nappe perchée. Elle se situe sur un contact dolomie-calcaire marneux. Le contexte géologique et le niveau de la source montrent qu'il s'agit d'une unité indépendante.

. Sources de Solliès-Toucas, de fort débit (Font Nègre, Font de Taon), elles concernent l'unité liasique de Solliès-Toucas délimitée sur la figure 4 bis.

4.3.2. - Exhaure de la galerie

Le débit continu est assez difficile à chiffrer, aucune nappe d'eau n'étant reprérée au-dessus de la galerie. En période pluvieuse, il n'est pas exclu de pouvoir observer des venues d'eau plus ou moins importantes. Les grandes failles drainantes que recoupe la galerie (Morières-les-Tournes, Baux Rouges) occasionneront de fortes venues d'eau localisées.

Ces débits pourront facilement atteindre 200 l/s : valeurs observées lors du percement de la galerie de Signes aval.

4.3.3. - Influence sur les sources

Ces sources (à l'exception de la Tourne) sont situées à des niveaux très bas ; ainsi que le montrent les relevés piézométriques, leur alimentation semble s'effectuer à partir de nappes qui sont à des cotes inférieures à 300 mètres.

La galerie contribuera uniquement à réduire leur débit de crue en détournant une partie de l'infiltration.

5. - PROPRIETES TECHNIQUES DES DIFFERENTS TERRAINS

5.1. - VALEUR LITHOLOGIQUE

5.1.1. - Données qualitatives

- Terrains triasiques

Les terrains que rencontrera la galerie à l'amont correspondent uniquement au Keuper. Ils seront constitués en majeure partie de gypses en amas de couleur noire, blanche ou rouge montrant des rubanements dus aux contraintes tectoniques, englobant des blocs de dolomies ou de cargneules. Les gypses du Keuper sont de bonne tenue, mais un ciment spécial devra être utilisé lors du bétonnage. Certaines assises seront formées d'argile (résistivité très faible).

- Terrains du Jurassique moyen

Les calcaires marneux et marno-calcaires du Dogger se délitent facilement aux variations d'hygrométrie. Ils ne nécessitent pas de soutènement particulier lorsqu'ils sont sains et secs, mais leur altérabilité peut être arrêtée par du béton projeté. Au cœur du massif, la galerie ne rencontrera que leurs assises terminales, dont les interbancs marneux sont minces, par rapport aux bancs calcaires, ce qui sous forte charge hydrostatique peut entraîner des décollements en voûte. Les niveaux plus marneux ne seront rencontrés qu'à l'aval de la galerie où les terrains seront théoriquement secs.

Les calcaires du Bathonien supérieur seront de très bonne tenue. Ils sont très compacts, non karstifiés et peu fracturés.

- Terrains du Jurassique supérieur

Les dolomies néojurassiques représentent également de bons terrains lorsqu'elles sont saines. Elles sont parfois assez fracturées et fréquemment cargneulisées en petit (altération sableuse). Les zones de broyage tectonique et de dissolution peuvent provoquer des chutes de blocs, et des débourrages de poches sableuses sont à attendre, surtout à la base de ces terrains (15 m de sable dolomitique dans le sondage 6 de Valbelle, de 175 à 190 m).

Les calcaires du Portlandien sont un bon terrain au point de vue géotechnique. Dans les sondages 4 (Dubliou) et 5 (Tirassades), ils sont très fracturés mais reconsolidés par des filonnets de calcite.

5.1.2. - Données quantitatives

5.1.2.1. - Paramètres physiques

Nous avons mesuré la densité, la résistance à la compression et le module de déformation sur une série d'échantillons prélevés parmi les roches que rencontrera la tracé de la galerie.

5.1.2.1.1. - Mode opératoire

Les mesures ont été effectuées sur carottes prélevées au carottier double, apparemment compactes. Elles ont été sciées à l'élancement 2. Leur diamètre était généralement de 85 mm. La densité initiale des échantillons est mesurée par immersion.

Une fois découpées, les carottes sont surfacées avec un enduit à base de soufre. Elles sont alors écrasées par une presse dont la vitesse de chargement est de 20 bars par seconde.

Sur certains échantillons ont été effectués plusieurs cycles de chargement à la vitesse de 20 bars seconde. Nous avons mesuré, pendant les cycles les déformations de la hauteur totale de la carotte pour différents cas de charge. Les courbes correspondantes représentent les variations de la hauteur de la carotte en fonction de la charge. Le module d'élasticité est mesuré sur la partie rectiligne de la courbe (fig. 42).

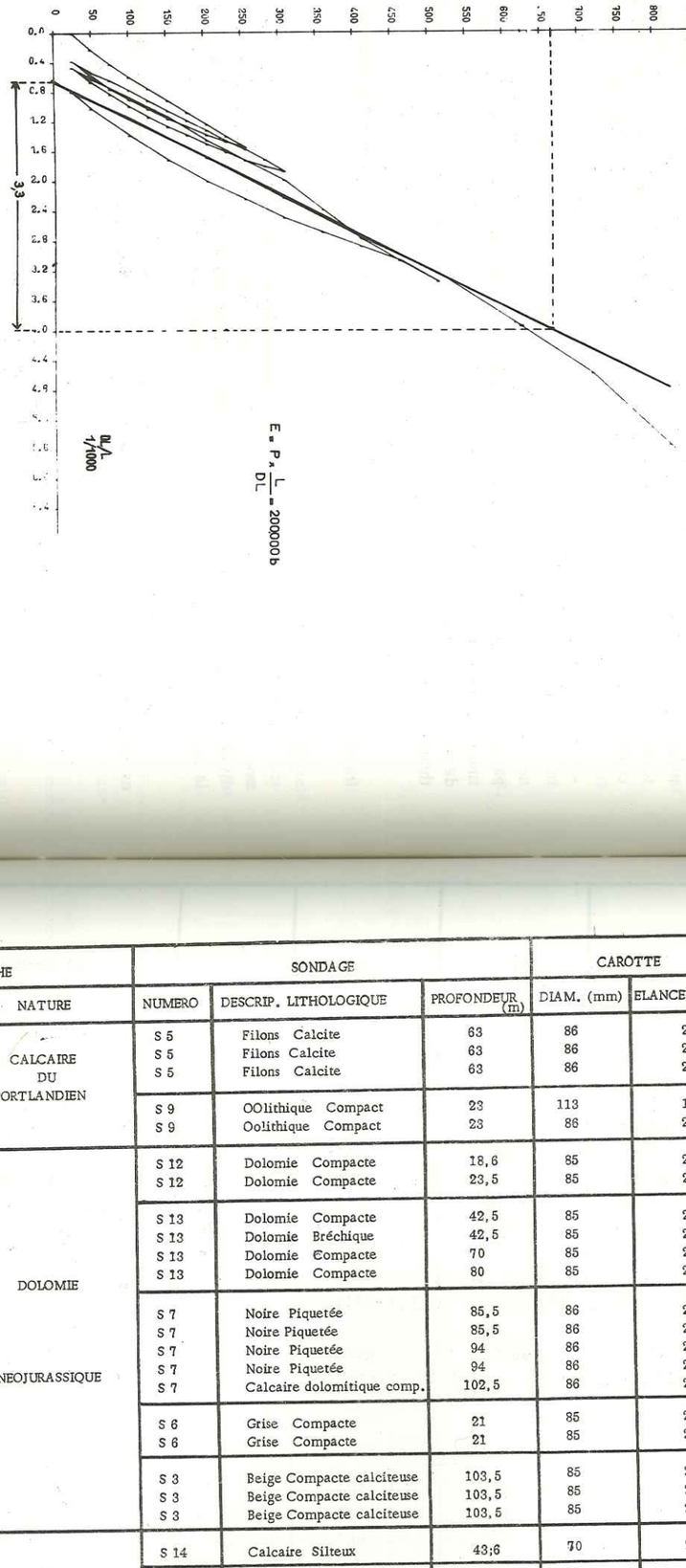


Fig. 42

5.1.2.1.2. - Résultats

TABLEAU DES RESULTATS DES ESSAIS MECANIQUES

ROCHE		SONDAGE			CAROTTE		CARACTERISTIQUES		
ETAGE	NATURE	NUMERO	DESCRIP. LITHOLOGIQUE	PROFONDEUR (m)	DIAM. (mm)	ELANCEMENT	DENSITE	RESIST. COMP. (bar)	COEFFICIENT ELAS. (bar)
JURASSIQUE SUPERIEUR	CALCAIRE DU PORTLANDIEN	S 5	Filons Calcite	63	86	2		815	
		S 5	Filons Calcite	63	86	2		815	
		S 5	Filons Calcite	63	86	2		1000	530.000
		S 9	OOlithique Compact	23	113	1,25	2,66	650	
		S 9	Oolithique Compact	23	86	2	2,70	1030	450.000
	DOLOMIE NEOJURASSIQUE	S 12	Dolomie Compacte	18,6	85	2	2,70	1450	
		S 12	Dolomie Compacte	23,5	85	2	2,74	870	
		S 13	Dolomie Compacte	42,5	85	2	2,64	1230	
		S 13	Dolomie Bréchique	42,5	85	2	2,70	1500	
		S 13	Dolomie Compacte	70	85	2	2,62	1300	
		S 13	Dolomie Compacte	80	85	2	2,66	1200	
		S 7	Noire Piquetée	85,5	86	2	2,67	815	410.000
		S 7	Noire Piquetée	85,5	86	2	2,67	735	
		S 7	Noire Piquetée	94	86	2	2,72	780	
		S 7	Noire Piquetée	94	86	2	2,67	565	
		S 7	Calcaire dolomitique comp.	102,5	86	2	2,75	1340	420.000
		S 6	Grise Compacte	21	85	2		730	
		S 6	Grise Compacte	21	85	2		285	
		S 3	Beige Compacte calciteuse	103,5	85	2	2,74	585	
		S 3	Beige Compacte calciteuse	103,5	85	2	2,76	750	
		S 3	Beige Compacte calciteuse	103,5	85	2	2,76	1180	480.000
JURASSIQUE MOYEN	CALCAIRE DU BATHONIEN SUPERIEUR	S 14	Calcaire Silteux	43;6	70	2	2,64	1230	
		S 6	Grumeleux gris	214,5	47	2		1400	
		S 6	Grumeleux gris	214,5	47	2		1000	
		S 6	Grumeleux gris	214,5	47	2		1300	
		S 6	Beige compact	214,5	47	2		800	
		S 8	Beige oolithique grumeleux	7	113	1,25	2,68	660	
		S 8	Beige oolithique grumeleux	7	113	2	2,69	805	
		S 8	Beige oolithique grumeleux	29	86	2	2,69	1060	460.000
		S 8	Beige oolithique grumeleux	29	86	2	2,70	1060	
		S 8	Gris foncé	36	86	2	2,68	970	380.000
		S 10	Gris foncé grumeleux	160	72	2	2,69	945	370.000
		S 10	Gris foncé grumeleux	163	72	2	2,63	904	380.000
		S 11	Bicolore calciteux	112	71	2	2,68	770	360.000
		S 11	Bicolore compact	179	71	2	2,66	835	200.000
JURASSIQUE INFERIEUR	DOL. HETTANG.	S 10	Compact	177	72	2	2,73	652	360.000
TRIAS	KEUPER	S 1	Gypse	61	85	2		160	95.000
		S 1	Gypse	64,5	85	1,6		230	155.000
		S 1	Dolomie grain fin	66,8	85	2		1000	430.000

5.1.2.2. - Analyses chimiques

N° SONDAGE ET PROFONDEUR	S 1 (66,8)	S 6 (214,3)	S 6 (243,5)	S 6 (295,5)	S 13 (70)	S 14 (43,6)	S 14 (47,8)
NATURE ROCHE ET ETAGE	DOLOMIE (Keuper)	CALC. GRIS (Bath. Sup.)	CALC. BEIGE (Bath. sup.)	CALC. MARNEUX (Dogger)	DOLOMIE (Juras. Sup.)	CALC. SILTEUX (Bath. sup.)	CALC. BEIGE (Bath. sup.)
ANALYSE ELEMENTAIRE (%)							
Silice SiO_2	1,80	5,57	21,20	2,75	.85	17,55	16,85
Alumine Al_2O_3	1,00	1,75	4,15	1,20	.80	3,30	6,45
Oxyde de fer Fe_2O_3	.35	.46	1,25	1,10	.30	1,25	1,60
Chaux Ca O	29,80	47,80	39,80	51,75	30,85	42,00	40,50
Magnésie Mg O	20,00	2,67	.68	.70	20,20	.69	.48
Anhydride carbonique CO_2	44,30	40,45	32,00	41,30	46,45	33,75	32,35
Anhydride sulfurique SO_3	2,00	.08	.02	.25	.02	.02	.01
Matières organiques	.35	.90	.12	.67	.00	.00	.00
Eau d'hydratation	.20	.00	.20	.00	.30	1,30	1,50
Pertes et non dosés	.20	.32	.58	.28	.23	.14	.27
ANALYSE PAR ATTAQUE SELECTIVE (%)							
Quartz (par acide phosph.)	1,00	2,50	17,75	1,10	.60	9,80	6,50
COMPOSITION DEDUITE DES ANALYSES (%)							
Quartz	1,00	2,50	17,75	1,10	.60	9,80	6,50
Sulfate de calcium ($CaSO_4$)	3,40	.14	.03	.43	.03	.03	.01
Carbonate de calcium ($CaCO_3$)	.70	78,58	69,34	90,35	4,57	73,25	71,12
Dolomie Théor. $Ca, Mg(CO_3)_2$	92,00	12,28	3,13	3,22	92,92	3,18	2,21
Matières organiques	.35	.90	.12	.67	.00	.00	.00
Eléments phylliteux et siliceux hydratés (par différence)	2,55	5,60	9,63	4,23	1,88	13,74	20,17
Soit en éléments simples							
Carbonate de calcium ($CaCO_3$)	50,70	85,25	71,04	92,10	55,07	74,98	72,32
Carbonate de magnésium ($MgCO_3$)	42,00	5,61	1,43	1,47	42,42	1,45	1,01
				85,92			
				1,05			

5.1.2.3. - Conséquences

Les roches dans lesquelles la galerie va être creusée ont en général de bonnes caractéristiques mécaniques (800 bars < Rc < 1 400 bars). Le module d'élasticité va de 400 à 500 000 bars pour les dolomies néojurassiques et approche de 400 000 bars pour les calcaires légèrement marneux du Bathonien supérieur. Il faut spécifier que les échantillons prélevés pour essais étaient des carottes de roche saine, ne présentant aucune fissuration ou altération visible à l'œil nu (sauf les calcaires veinés de calcite du sondage 5). Il faut noter la faible résistance à la compression des gypses du Keuper.

La couverture de terrain au-dessus de la galerie est grande (400 m maximum), mais pour la roche rencontrée, c'est surtout son état de fracturation et d'altération qui influera sur le soutènement.

Seules les alternances de calcaires marneux et de marnes du Dogger pourraient sous la forte charge des terrains de couverture poser des problèmes de détente entraînant le décollement des bancs calcaires en voûte.

L'analyse chimique met en évidence deux points importants :

- la présence de quartz (17,75 %) en grains très fins dans certains niveaux des calcaires du Bathonien supérieur ainsi que de mica (dont les paillettes sont visibles à l'œil nu sur les cassures des carottes).
- le faible pourcentage d'argile contenu dans les niveaux sommitaux du Dogger, alors que certains "calcaires" du Bathonien supérieur contiennent jusqu'à 20 % d'éléments phylliteux (S 14).

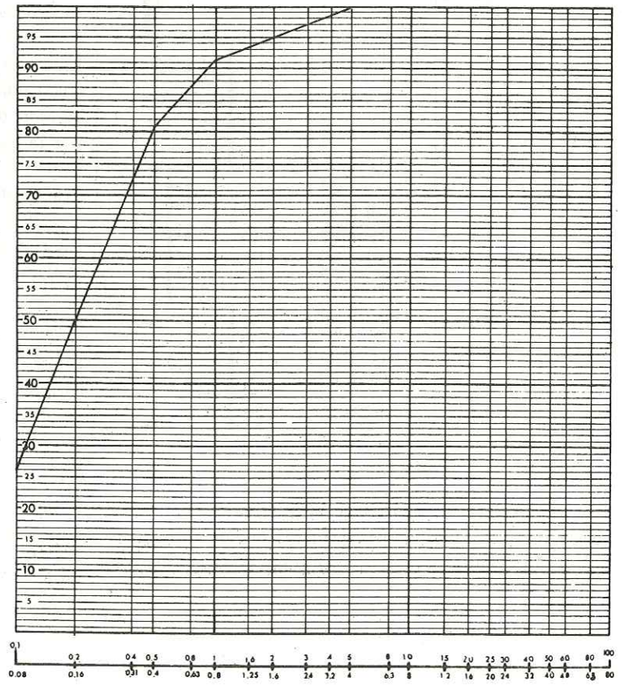
L'analyse granulométrique du sable prélevé de 179 à 192 m dans le sondage 6 montre que l'on a affaire à un sable dolomitique fin (50 % des éléments sont plus petits que 0,2 mm) qui en émulsion dans l'eau pourrait envahir la galerie dans le cas où celle-ci rencontrerait une poche de cette importance.

ANALYSE GRANULOMETRIQUE Aix le 4.11.1970

Chantier : Montrieux

Prove. ance : S. 56 de 179 m à 192 m

Nature : Sable naturel E.S : 55



5.2. - FRACTURATION

5.2.1. - Orientation des plans de fracturation

L'orientation des plans de fracturation est responsable dans une certaine mesure des difficultés de perforation et de la tenue de la galerie (II - 3.2.). Schématiquement, on peut dire que les fractures faisant un angle supérieur à 30° avec l'axe de la galerie n'affectent pas outre mesure le creusement et la tenue de celle-ci. L'étude de l'orientation des plans de fractures a été faite au paragraphe 2.2.3. Il ne nous reste qu'à comparer les directions successives prises par la galerie aux directions de fracturation, elles-mêmes variables suivant les régions.

Nous présentons les résultats sous la forme d'un tableau où la galerie a été divisée en ses différents tronçons directionnels. (définis sur la figure 39).

galerie tronçon	direction degrés	longueur km	ORIENTATION DES FRACTURES PAR RAPPORT AU NORD MAGNETIQUE 0 20 40 60 80 100 120 140 160 180	OBSERVATIONS
AB	N 135°	2,0		Une direction parallèle à la galerie, mais orientation en moyenne favorable
AB	N 135°	1,8		Une famille presque directionnelle
AB	N 135°	3,0		Trajet de la galerie presque confondu sur une grande distance avec celui d'une fracture vue en photo aérienne
BC	N 165°	3,0		Orientation favorable. Bon angle d'attaque de la faille des Morières. Faible incidence avec la faille des Pourraques
CD	N 130°	1,6		Fracturation faisant un angle de 20° maximum avec la galerie. Faille de la Mort du Gautier recoupée en sifflet par la galerie.
DE	N 155°	1,3		Fracturation liée à la faille des Hubacs parallèle à la galerie. Angle favorable pour le passage de la faille des Baux Rouges.
EF	N 130°	0,8		Bathonien : N 50° et N 140° Dogger : N 90° et N 170° Orientations favorables

5.2.2. - Mesure de la densité de la fracturation

La densité de la fracturation a été étudiée principalement sur les carottes de sondage. Sur le terrain, la mesure en est mal aisée. Nous verrons plus loin ce qui a été tenté et la comparaison avec les mesures en sondage.

GALERIE DE MONTRIEUX

Sondage de reconnaissance géologique

S.5

x 891.257,50
y 113.589,20
z 370,29

Vertical

Commencé le 08.08.70
Terminé le 28.08.70

Fig. 43

OUTIL	TUBAGE	CIMENTATION	BATTAGE	PROFONDEUR	TERRAIN
				0.70	Cailloutis calcaire et terre végétale
					Morceaux de carottes de calcaire fin gris verdâtre grumeleux et argile rouge à cailloutis
				2.00	
					Marne argileuse verte et jaunâtre désagrégée
				3.70	
					Marne silteuse verdâtre assez compacte
				4.50	
					Calcaire marneux bicolore gris bleu et verdâtre grumeleux
				5.10	
					Marne verdâtre peu compacte
				7.30	
					Calcaire fin jaune verdâtre peu compact à 8.80m, pendage à 30°
				9.50	
					Marno-calcaire vert compact
				10.30	
					Marne argileuse verte ou bleutée très délitée
				12.90	
					Calcaires verdâtres fins à joints de sédimentation peu réguliers parfois soulignés par de l'argile verte. Pendage environ 40°
				15.10	
					Brèche tectonique
				16.80	
					Morceaux de calcaire beige parcourus d'innombrables filonnets de calcite
				19.20	
					Morceaux de carotte composée à part égale de calcaire et de calcite
				21.60	
					Calcaire beige fin. Nombreux filonnets de calcite dans la masse. Fissures argileuses verticales
				23.20	
					Calcaire crème fin avec nombreux filonnets de calcite
				24.50	
					Passée fracturée
				25.80	
					Calcaire parfois oolithique à pâte fine, beige, lardé de filonnets de calcite, passées fracturées à : 25.80 m. - 28.50 m - 29.30m - 31.40m.
				34.90	
					Calcaire beige très fin fracturé
				37.10	
					Calcaire beige très fin.

OUTIL	TUBAGE
C.S. ϕ 168	T ϕ 168
2.60	3.00
C.D ϕ 146	T ϕ 140
12.90	13.00
C.D ϕ 116	

CAROTTAGE % : 0 20 40 60 80 100 — 5 % — 9 %

FRACTURATION : m > 30 : 3 2 1 — m < 30 : 5 10 30

PERMEABILITE

Pose d'un piezomètre tube 1" 1/2

crépiné de 50,00 m à 70,00 m

Lissé de 0.00 m. à 50.00 m.

Mise en place d'une buse de protection ϕ 120 mm.

ETAGES

Valanginien

Portlandien

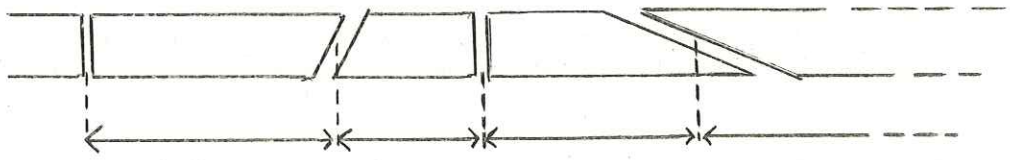
5.2.2.1. - Méthodes d'étude

1re méthode (analytique)

Sur les coupes de forage, on a séparé en deux classes les morceaux de carottes : morceaux dont la longueur est supérieure à 30 cm et morceaux dont la longueur est inférieure à 30 cm. Pour des tranches données du forage (généralement 1 m), on a compté le nombre de morceaux appartenant à chaque classe dimensionnelle et reporté ces chiffres dans des colonnes parallèles au log lithologique sous forme de zones ombrées. Cette méthode analytique permet d'avoir une idée, à la simple lecture des éléments constitutifs de la coupe, de la fracturation du terrain traversé.

2e méthode (synthétique)

Cette méthode plus globale a pour principe la mesure de la longueur de chaque élément de carottes. Nous nous sommes efforcés de faire les mesures de longueur linéairement suivant un axe confondu avec l'axe du sondage, de telle manière que la somme des longueurs mesurées soit égale à peu près à la longueur de sondage étudié. Cette méthode a l'inconvénient de ne pas tenir compte des fissures rigoureusement verticales qui partageraient la carotte longitudinalement. Elle a le mérite de réduire l'influence du diamètre de la carotte et de normaliser quelque peu la technique de prélèvement des mesures qui peut changer notablement suivant la personne qui échantillonne.



Ces éléments sont classés par ordre croissant de 1 cm à 100 cm, cette dernière longueur étant considérée comme maximale puisqu'elle correspond à la longueur d'une caisse de carottes. On reporte ensuite les pourcentages cumulés dans chaque classe dimensionnelle de façon à obtenir une "courbe granulométrique" du forage (courbe supérieure). Le graphique inférieur représente sous forme d'histogramme la fréquence de sortie des données dans chaque classe dimensionnelle. On peut ainsi comparer les divers résultats obtenus entre eux et tirer des conclusions sur l'état de fracturation d'un terrain donné ou d'un ensemble de terrains différents situé dans une même position structurale (anticlinal, chevauchement).

5.2.2.2. - Résultats pour la première méthode

. Le sondage 1 présente, sous 8 mètres d'éboulis consolidés, des calcaires relativement compacts jusqu'à 22 m de profondeur. Puis sur 15 m, une zone broyée correspond au grand accident séparant les calcaires et dolomies du Jurassique supérieur, du Trias du Gapeau. Le reste du sondage est formé de gypse compact pour lequel on ne peut parler de fracturation étant donné la plasticité relative au matériau.

. Sondage 3 : sur les 130 premiers mètres, la fracturation est peu importante (en général, moins de 5 morceaux par mètre). Elle devient de plus en plus intense dans la suite du sondage, jusqu'à donner des carottes comportant plus de 30 morceaux par mètre dans les 15 derniers mètres.

. Sondage 4 : ce sondage présente sur 30 mètres des carottes de calcaires très calciteux et marnes vertes, brisées en plus de 5 morceaux par mètre. Ensuite, le sondage est un peu plus sain dans les dolomies néojurassiques sommitales.

. Sondage 5 (fig. 43), il est très fracturé dans les 15 premiers mètres qui correspondent aux marnes et calcaires du Valanginien. Les calcaires portlandiens qui font suite ont de nombreuses fissures recimentées par de la calcite, d'où la compacité relative des carottes (généralement moins de 10 morceaux par mètre).

. Sondage 6, il montre des dolomies normalement fracturées et altérées sur les 60 premiers mètres. Puis vient une zone très fracturée, soulignée par l'ombrage continu de la colonne de droite : n > 30 morceaux par mètre, de 60 à 93

mètres. Jusqu'à 175 mètres, la fracturation redevient normale (pas plus de 10 morceaux par mètre). Après la poche de sable de 18 mètres de hauteur, le sondage est très sain jusqu'à 270 mètres dans les niveaux de base des dolomies néojurassiques tout d'abord, puis dans les calcaires du Bathonien supérieur. La fin du sondage (profondeur 304 mètres) est plus morcelée du fait de l'apparition de petits joints marno-calcaires.

. Sondage 7 : sondage sain sur toute la longueur, hormis quelques niveaux fracturés (de 30 à 45 m, de 75 à 80 m)

. Sondage 8 : fracturation peu intense dans ces calcaires du Bathonien. Les carottes cassées sont dues à la présence de joints de sédimentation onduleux argileux.

. Sondage 9 : le calcaire fin du Portlandien est relativement cassant, comparé au calcaire du Bathonien supérieur, ce qui explique une moyenne de 5 à 10 morceaux par mètre de carottes.

. Sondage 10 : les dolomies néojurassiques et les calcaires du Bathonien supérieur sont très sains (moins de 5 morceaux par mètre sur 140 mètres).

Par une faille, on arrive dans les alternances de calcaires marneux et de marnes du Dogger, ce qui explique le déplacement vers la droite du figuré de fracturation.

. Sondage 11 : de même que pour le sondage précédent, la courbe de fracturation montre le très bon état des dolomies néojurassiques et des calcaires bathoniens.

. Sondage 12 (galerie de Dubliou). Ce sondage incliné est assez fracturé sur les 20 premiers mètres, formés de calcaires dolomitiques et de dolomies. Ensuite il traverse les dolomies néojurassiques saines avec des niveaux cargneulisés.

. Sondage 13 : fracturation peu intense hormis quelques passées très fracturées et argileuses, notamment de 10 à 19 mètres.

. Sondage 14 : sondage qui traverse le Bathonien supérieur basal, et peut-être les niveaux sommitaux du Dogger, comporte quelques passées de terrain compact, mais le nombre de morceaux par mètre dépasse souvent 10 surtout vers la fin du sondage, de 40 à 50 mètres.

5.2.2.3. - Résultats pour la deuxième méthode

L'utilisation de l'ordinateur de la Société du Canal de Provence nous a seule permis tous les résultats qui vont suivre. Les opérations de classement des données, calcul de moyennes, traçage des courbes de fracturation étaient en effet pratiquement irréalisables manuellement. L'étude de la fracturation en sondage a été faite par tranches de 10 m, qui ont été regroupées ensuite par étage lithologique pour donner les caractéristiques de chaque terrain, dans sa position particulière.

5.2.2.3.1. - Définition de quelques cœfficients caractérisant la fracturation

+ Moyenne : il s'agit de la moyenne arithmétique de la longueur de tous les morceaux de carotte dans le tronçon de sondage considéré. Nous verrons plus loin pourquoi ce cœfficient a été choisi.

+ Pourcentage de vide, sable et argile : les vides, l'argile et le sable (comprenant les morceaux de moins de 1 cm) ont été groupés pour représenter l'importance des discontinuités dans le massif. Ce pourcentage de vide est le complément du "pourcentage de carottage", utilisé par tous les sondeurs, à la différence près, qu'il comprend également les morceaux inférieurs à 1 cm.

+ R. Q. D. (Rock Quality Designation) : cet indice, proposé par le professeur DEERE dans un rapport au 8e Symposium de Mécanique des Roches de l'Université de Minnesota (U. S. A.), s'attache également à définir l'état de fracturation des carottes de sondage. Le R. Q. D. est un pourcentage de carotte modifié, dans lequel seules les carottes de roche saine de plus de 10 cm de longueur sont prises en compte, les carottes ou débris plus courts étant considérés comme provenant de zones cisaillées, faillées ou altérées.

Un R. Q. D. de 100 % dénote un massif d'excellente qualité, avec des propriétés voisines de celles d'un petit échantillon de roche intacte. Des valeurs de R. Q. D. situées entre 0 et 50 % sont le signe au contraire d'un massif de mauvaise qualité n'ayant qu'une fraction des propriétés mécaniques de l'échantillon intact.

Nous avons également calculé deux autres cœfficients que visualisent les courbes de fracturation (5.2.2.3.2.).

+ Aire caractéristique

Il s'agit de l'aire comprise entre la courbe des fréquences cumulées et les axes. On voit que l'aire est d'autant plus faible que le sondage est sain. A la limite, une tranche de sondage dont toutes les carottes mesureraient un mètre aurait une aire caractéristique nulle.

+ Médiane M

Elle est telle que les éléments de 50 % (en longueur) du sondage lui sont supérieurs et 50 % inférieurs.

5.2.2.3.2. - Courbes de fracturation

Nous avons étudié la forme des courbes de fracturation (analogues à des courbes granulométriques) tracées par l'ordinateur, en particulier en nous aidant des cœfficients d'uniformité :

$$C_u = \frac{D60}{D10}$$ et de courbure : $$C_c = \frac{(D30)^2}{D10 \times D60}$$ et en cherchant à définir un type de courbe caractéristique pour chaque terrain et son degré de fracturation. Les essais de corrélation entre : nature du terrain, R.Q.D., moyenne et ces cœfficients n'ont donné aucun résultat positif.

- La distribution des longueurs de morceaux, étudiée de la même manière que les écartements entre diaclases dans la galerie de Signes aval, se fait ici également suivant une loi lognormale, sauf dans les longueurs proches du mètre. Ceci est imputable à la limite arbitraire imposée par la longueur des caisses de carottes.

En fait, la répartition des longueurs de carottes ne traduit jamais aussi bien que dans la galerie de Signes aval la distribution lognormale. De nombreuses distorsions l'affectent, qui proviennent principalement du fait que les carottes ne se cassent pas systématiquement - comme dans Signes aval - suivant des diaclases, d'autant plus que celles-ci sont généralement parallèles à l'axe du sondage, mais en des endroits qu'aucun phénomène géologique ne pourrait expliquer, excepté dans le cas de roches bien stratifiées. Les discontinuités séparant les morceaux de carottes traduisent trop de phénomènes pour que la répartition des longueurs de carottes soit traduite d'une manière simple statistiquement (stratification, diaclasage, carottage, cassures artificielles pour la mise en caisse).

La distribution ne pouvant être définie simplement, c'est la moyenne arithmétique qui a été calculée, donnant tout de même une certaine idée de la maille des discontinuités.

L'intérêt de ces courbes réside essentiellement en ce qu'elles permettent une visualisation de la fracturation, montrant immédiatement :

+ le pourcentage d'éléments de taille inférieure ou égale à 1 cm ;
+ la dispersion des mesures autour de la médiane ;
+ l'aire comprise entre la courbe et les axes, qui traduit bien, en variant dans le même sens, l'intensité de la fracturation.

Leur comparaison peut donner une idée globale sur les ressemblances et différences des étages lithologiques dont elles décrivent l'état de fracturation et d'altération.

A titre d'exemple, considérons quelques courbes (fig. 44 et 45).

. Sondage 5 : les courbes de fracturation, qui intègrent les marnes valanginiennes et les calcaires portlandiens, montrent (courbe du bas) la prépondérance des morceaux de 2 à 5 cm et indiquent (courbe des fréquences cumulées) que le sondage ne comporte pas de morceaux dépassant 50 cm de longueur.

. Sondage 6 : 0 - 208 m : dolomies néojurassiques

Courbe régulière, presque symétrique par rapport à la médiane, dont l'aire égale à 76,62 est due au fort pourcentage d'argile et d'éléments inférieurs ou égaux à un centimètre.

208 - 250 m : calcaires bathoniens

Le Bathonien calcaire est traduit par sa courbe de fracturation comme un terrain compact montrant une faible dispersion autour de sa médiane.

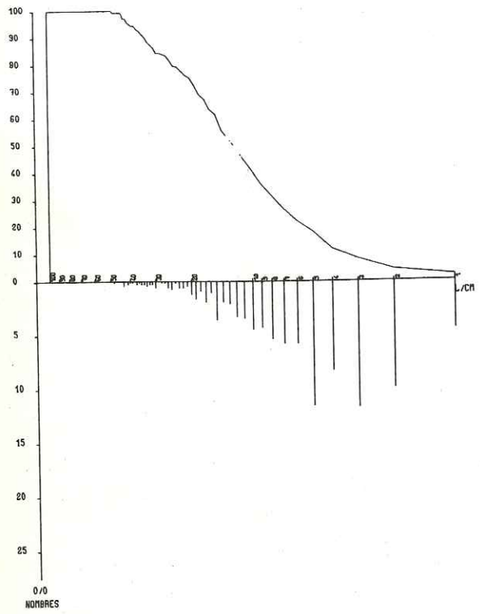
Aire caractéristique = 42,76.

. Sondage 9 : Portlandien

Faible cœfficient d'uniformité : la courbe est redressée dans sa partie médiane. Très peu d'argile et de vide. Peu de morceaux de grande longueur. Aire caractéristique relativement élevée : 61,90. La courbe inférieure (histogramme) à peu près symétrique autour de 6 cm, traduit bien la distribution lognormale des mesures (l'échelle est logarithmique).

GALERIE DE MONTRIEUX S 5
CAROTTIER DOUBLE
MARNES VALANGINIENNES
JUSQU'A 20M PUIS CALCAIRES
PORTLANDIENS

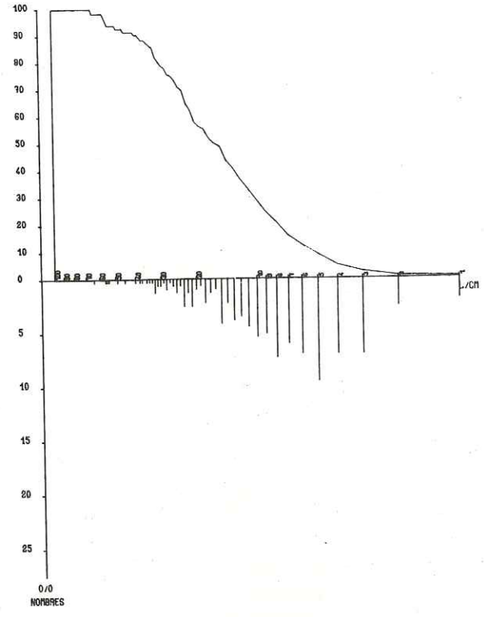
COURBE DE FRACTURATION
(SONDAGE TOTAL)



GALERIE DE VALAURY S 9
CAROTTIER DOUBLE 116 MIN.
CALCAIRE PORTLANDIEN

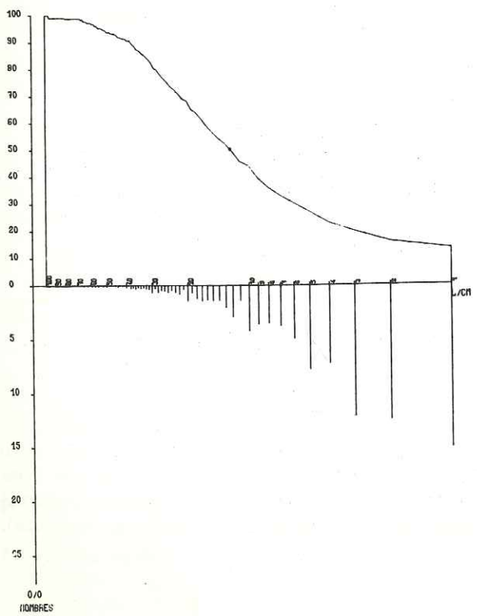
COURBE DE FRACTURATION
(SONDAGE TOTAL)

Fig. 44



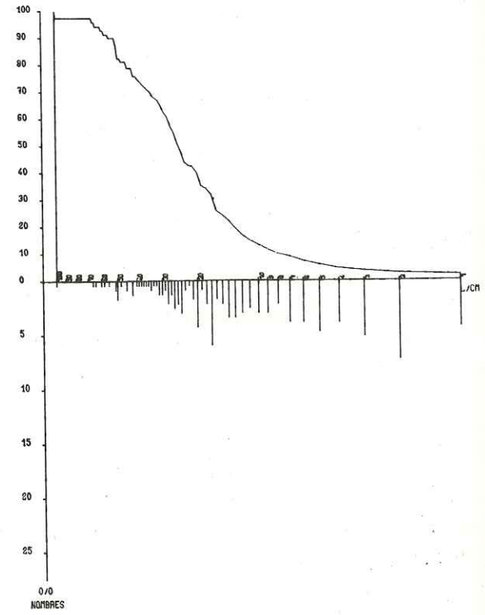
GALERIE DE MONTRIEUX S 6
DE 0 A 208M
DOLOMIES NEOJURASSIQUES

COURBE DE FRACTURATION
(SONDAGE TOTAL)



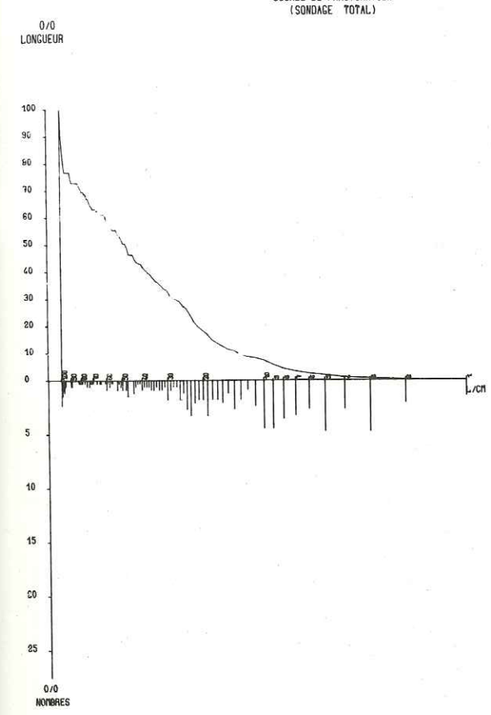
GALERIE DE MONTRIEUX S 6
CAROTTIER A CABLE 75
CALCAIRE DU BATHONIEN SUP

COURBE DE FRACTURATION
(SONDAGE TOTAL)
DE 209 A 250 M



GALERIE DE VALAURY S 10
CAROTTIER DOUBLE 116 MIN.
DOLOMIES NEOJURASSIQUES 0 à 100 m

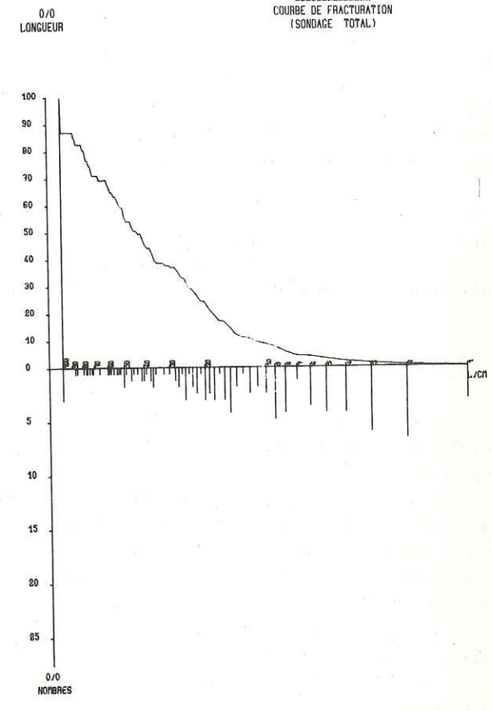
COURBE DE FRACTURATION
(SONDAGE TOTAL)



GALERIE DE VALAURY S 10
CAROTTIER DOUBLE 116 MIN.
CALCAIRE ET DOLOMIE DU
BATHONIEN SUPERIEUR
DE 100 A 140 M.

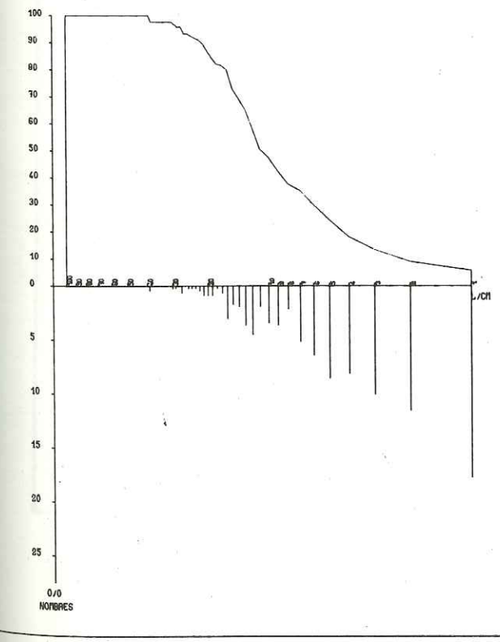
COURBE DE FRACTURATION
(SONDAGE TOTAL)

Fig. 45



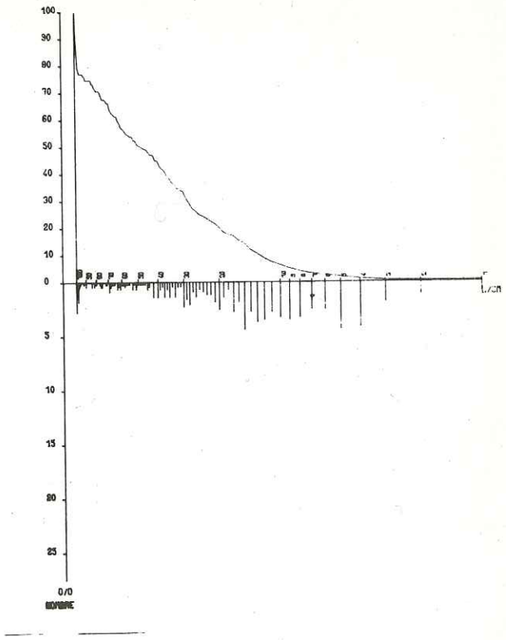
GALERIE DE VALAURY S 10
CAROTTIER DOUBLE 116 MIN.
CALCAIRE MARNEUX DU DOGGER
DE 140 A 175 M.

COURBE DE FRACTURATION
(SONDAGE TOTAL)



Galerie de Valaury n 11
Calcaires bath. sup.
de 54 m à 1?1 m

COURBE DE FRACTURATION
SONDAGE TOTAL



. Sondage 10 : les courbes représentant les dolomies néojurassiques (0-100 m) et les calcaires du Bathonien supérieur (100-140 m) sont presque identiques et témoignent de roches massives d'excellente qualité. Aires respectives : 29,12 et 33,66. Le Dogger, par contre, a une courbe très différente montrant qu'aucun morceau ne dépasse 40 cm, une valeur médiane de 11 cm, la présence d'argile et de nombreux éléments de petite taille ; tout ceci contribue à donner à l'aire contenue sous la courbe une valeur élevée (80,92).

. Sondage 11 : 54-181 m : calcaires et dolomies du Bathonien supérieur. Exemple de courbe très dissymétrique par rapport à la médiane du fait que la longueur des carottes est limitée artificiellement à un mètre.

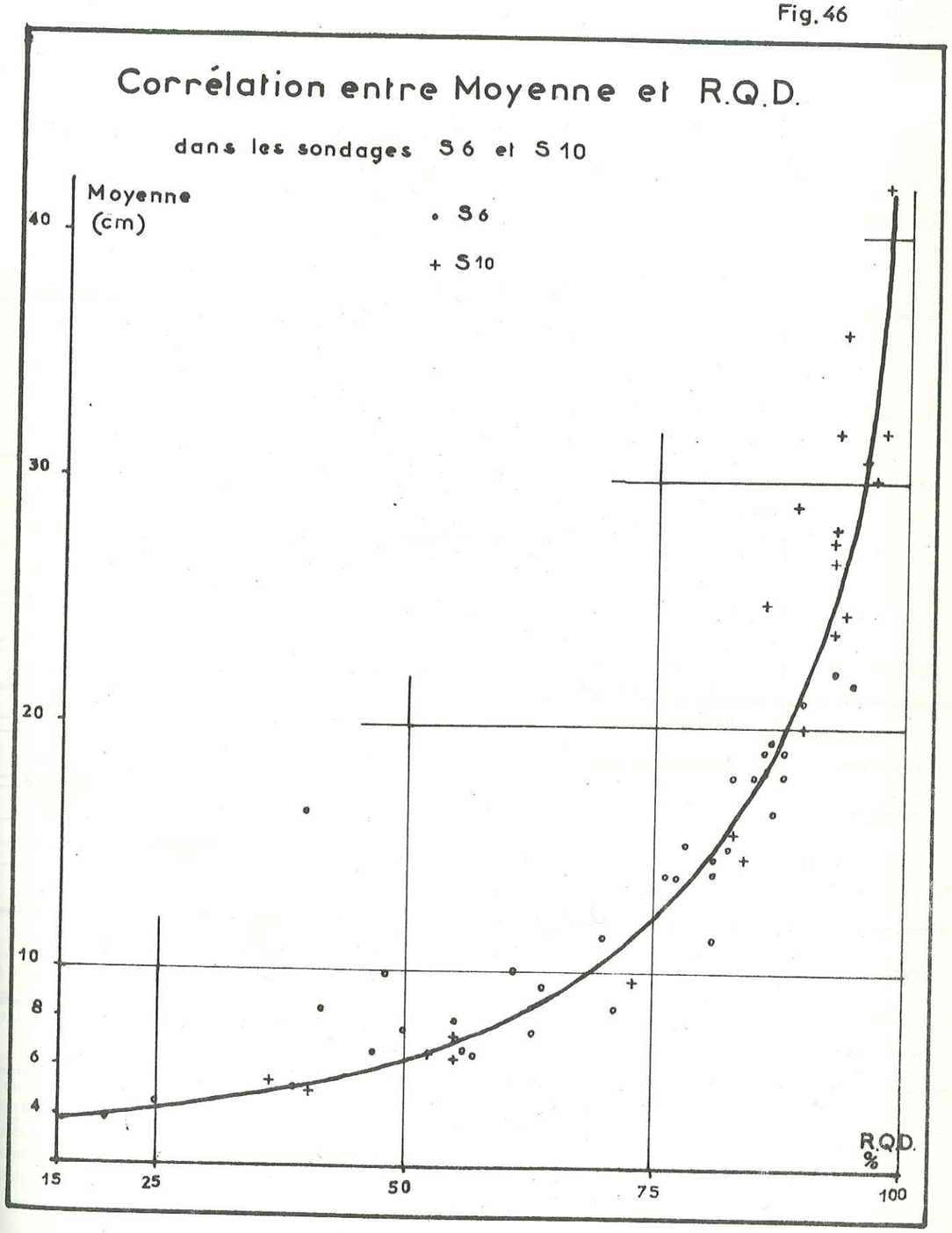
Il y a un faible pourcentage de morceaux de taille inférieure à 10 cm. L'aire caractéristique est très réduite. Les calcaires et dolomies du Bathonien sont ici en excellent état.

5.2.2.3.3. - Choix des cœfficients les plus représentatifs

Des essais de corrélation entre ces différents cœfficients nous ont montré que moyenne et médiane se corrélaient linéairement entre elles, ainsi que R. Q. D. et aire caractéristique. Par contre, entre ces deux groupes, les corrélations ne sont plus linéaires. Prenons par exemple le graphique de corrélation : moyenne - R. Q. D. établi sur la totalité des sondages 6 et 10 (fig. 46). Pour une moyenne évoluant de 4 à 15 cm, le R. Q. D. varie de 10 à 80 %. Au-dessus de 15 cm et jusqu'à 50 cm, le R. Q. D. ne varie alors que de 80 à 100 %. La sensibilité du R. Q. D. n'est bonne que pour des valeurs de la moyenne inférieures à 15 ou même 20 cm. Pour faire des distinctions dans un sondage de très bonne qualité, le cœfficient à utiliser serait la moyenne ou un R. Q. D. modifié où la longueur minimale prise en compte serait cette fois 20 cm ou plus. Nous garderons comme cœfficient caractéristique le R. Q. D. classique, pour les raisons suivantes :

- ce qui intéresse les travaux publics n'est pas la description de sondages de très bonne qualité, mais la prévision des zones très fracturées. Le R. Q. D. 10 cm décrit bien ces zones de mauvaise qualité.
- le R. Q. D. est un cœfficient relativement simple à calculer. Il ne nécessite pas comme pour "l'aire caractéristique" l'usage d'un ordinateur, et ne demande pas comme pour la moyenne ou la médiane de mesurer dans les caisses de carottes tous les morceaux, les éléments de longueur inférieure à 10 cm étant considérés comme brèche tectonique et de ce fait non pris en compte.
- il a l'avantage sur la moyenne de tenir compte du pourcentage de vide et d'argile du sondage.
- enfin, le R. Q. D. est un cœfficient dont l'usage se répand sur de nombreux chantiers de travaux publics et qui peut, par son universalité, permettre des comparaisons entre des sites différents et de prévoir, grâce à l'expérience qu'on aura eu en d'autres lieux, comment se comportera le massif lors des travaux envisagés.

Fig. 46



FRACTURATION PAR SONDAGE ET PAR ETAGE LITHOLOGIQUE

Etage	Lithologie	Sondage N°	Sondage Profondeur (m)	Pourcentage de vide	R.Q.D. (%)	Moyenne (cm)
PORTLANDIEN	Calcaire blanc, fin calciteux	1	de 10 à 20	5	45	6,3
		4	0 - 30	4,7	45	6,8
		5	10 - 65	1,7	59	8,7
	Calcaire fin	9	3 - 40	0,3	70	11,9
DOLOMIES NEOJURASSIQUES	Dolomies de couleur beige à brune parfois finement cargneulisées	3	0 - 140	2,3	75	13,3
			140 - 200	1,8	61	6,7
		4	30 - 65	5,6	74	12,8
		6	0 - 208	11,7	56	8,3
		7	10 - 103	2,5	75	12,1
		10	3 - 100	0,0	93	27,7
		11	0 - 54	2,9	80	13,2
		12	0 - 60	2,3	84	15,7
	Dolomies et calcaires dolomitiques	13	0 - 80	6,7	83	19,0
BATHONIEN SUPERIEUR	Calcaire bicolore	6	208 - 270	1,2	86	17,6
	Calcaire bicolore et Dolomie colorée	10	100 - 140	0,0	91	23,2
		11	54 - 181	0,4	94	28,4
	Calcaire grumeleux	8	5 - 45	2,8	85	17,4
		14	0 - 50	-	77	12,0
DOGGER	Calcaires minces Niveaux marneux	6	270 - 304	1,7	53	6,8
	Calcaires marneux et marnes	10	140 - 175	3,1	52	6,7
HETTANGIEN	Dolomie cendrée et marne verte	10	175 - 181	12,9	63	11,5

5.2.2.3.4. - Résultats

Dans les tableaux généraux et figures sur la fracturation, nous avons conservé la moyenne et fait figurer le pourcentage de vide, argile et sable qui correspond à (100 - R. Q. $D._1$).
Les résultats du tableau ci-contre ont été reportés sur la coupe au 1/50 000 (fig. 47).

+ Etude analytique des variations du R. Q. D. dans les sondages

L'étude de la variation du R. Q. D. au sein du même étage lithologique a été faite en prenant comme support unitaire des tranches de sondage de 10 m de longueur.

La figure 48 (variations du R. Q. D. avec la lithologie) représente la variation du R. Q. D. en fonction de la profondeur dans tous les sondages, chaque sondage étant replacé à son niveau sur l'échelle stratigraphique. La courbe de variation figurée est adoucie par pondération sur trois points consécutifs.

Il ressort de l'étude de ces courbes les points suivants :
- les sondages débutent généralement par une zone altérée sur une plus ou moins grande épaisseur ;
- à un niveau identique au sein du même étage lithologique, la qualité du terrain peut varier légèrement suivant la localisation géographique, mais elle reste dans le même ordre de grandeur sauf exception ;
- à la base des dolomies, au-dessus du niveau décamétrique de dolomies sombres grenues, le R. Q. D. accuse un net fléchissement correspondant à des terrains très fracturés et altérés. Nous avons déjà parlé de ce niveau comme pouvant être un niveau de décollement du massif, dans la première partie;
- les calcaires du Bathonien supérieur ont un R. Q. D. très élevé (presque toujours supérieur à 80 %) ;
- le faible R. Q. D. du Dogger s'explique par la présence de minces joints marneux se répétant tous les 10 à 20 cm, responsable de la scission de la carotte en plusieurs morceaux.

+ Pourcentage de vide, argile et sable

L'étude globale faite sur tous les sondages du pourcentage de vide, argile et sable, donne les résultats suivants :

TERRAIN	Longueur du terrain recoupé en sondage	POURCENTAGE DE VIDE
Portlandien	135 m	2,9
Dolomies néojurassiques	837 m	5,0
Bathonien supérieur	270 m	0,9
Dogger	69 m	2,4

5.2.2.4. - Mesures sur le terrain

La mesure de densité de fracturation sur le terrain est généralement difficile à effectuer. En photo aérienne, cela n'a pas été possible à cause d'une végétation inégalement répartie et de la diversité des lithologies. Sur le terrain, il nous fallait trouver un affleurement fraîchement dégagé, pour qu'il ne soit pas altéré par les agents superficiels, afin de retrouver des conditions analogues à celles rencontrées par les sondages ou la galerie.

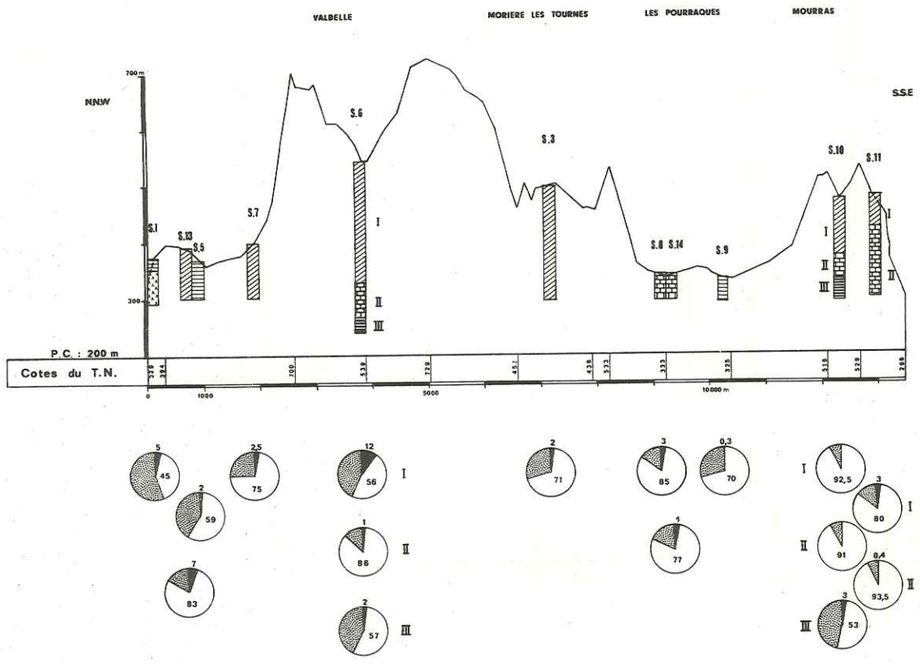
La route forestière allant à Valbelle offre, au-dessus des aiguilles, dans un virage, un talus vertical présentant les qualités requises.

Nous y avons fait des mesures d'orientation de plans de diaclases (2.2.3.2.2., fig. 32a) et, sur une trentaine de mètres, la mesure des écartements minimums entre diaclases, de la même manière que dans la galerie Signes aval (mesures effectuées suivant un trait horizontal tracé à la craie sur le parement). Par analogie avec les mesures effectuées dans les sondages, nous avons calculé le R. Q. D. et le pourcentage d'argile.

Fig. 47

GALERIE DE MONTRIEUX VALAURY

FRACTURATION ET ALTERATION DANS LES SONDAGES



LEGENDE

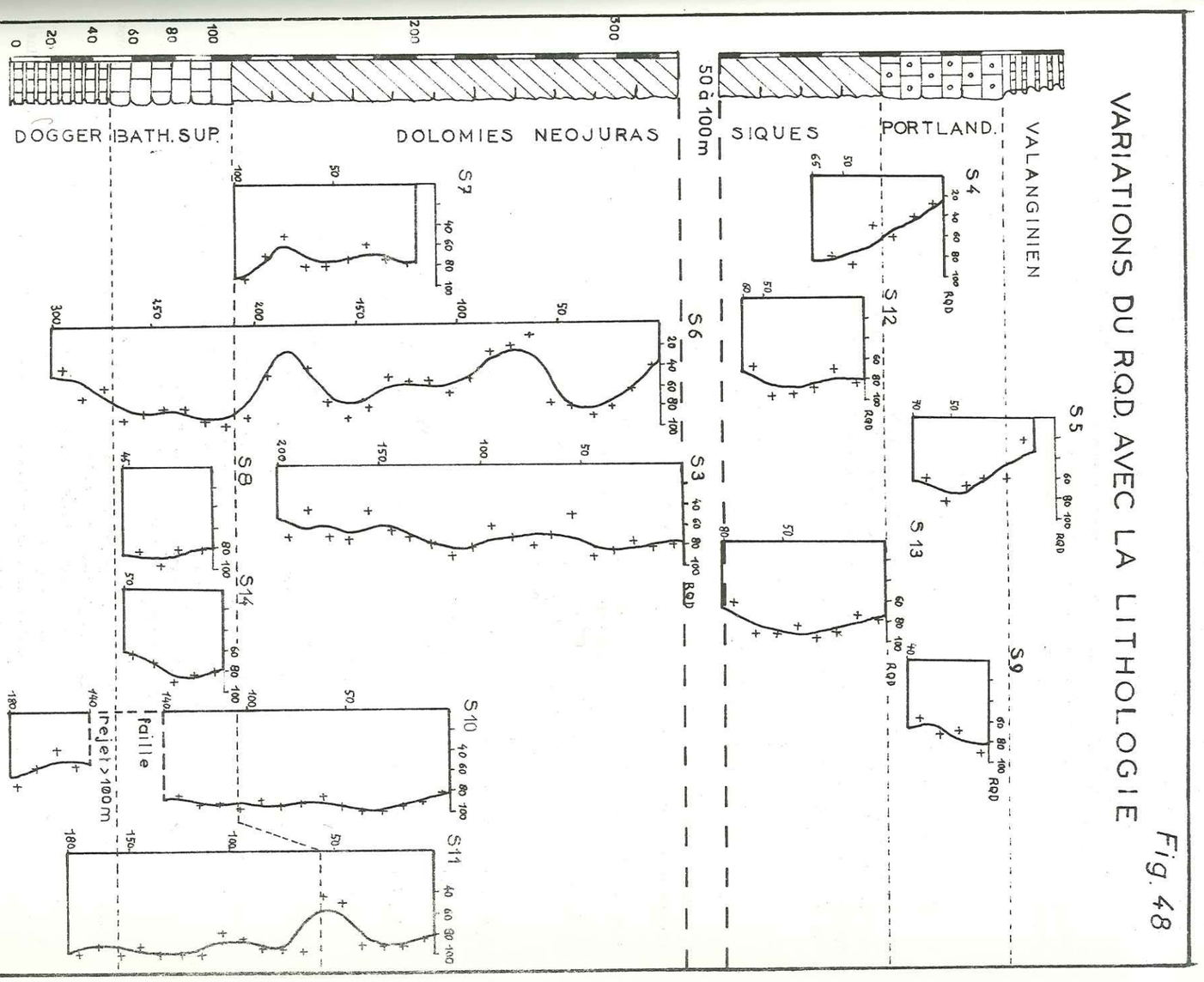
- Calcaire portlandien
- Dolomie néojurassique
- Calcaire bathonien supérieur
- Calcaire marneux du Dogger
- Gypse du trias

% de vide, sable ou argile

RQD en %

Fig. 48

VARIATIONS DU RQD AVEC LA LITHOLOGIE



Les résultats sont les suivants :

Longueur totale	2 799 cm
Nombre de mesures	226
Moyenne arithmétique	12,4 cm
R. Q. D. 10 cm	78 %
Argile	5 %

Ces résultats sont absolument comparables avec ceux obtenus dans les sondages. Il y a pourtant la différence que les mesures ont été prélevées suivant une horizontale dans un cas et suivant une verticale dans l'autre.

Rappelons que ces résultats ne donnent pas la représentation exacte de ce qui sera la réalité en galerie, en ce qui concerne l'écartement entre diaclases, de nombreuses discontinuités potentielles devant s'ouvrir sous l'onde de choc de l'explosion lors du percement (II - 2.3.3.2. interprétation).

6. - LE TRACE DE LA GALERIE

Ce paragraphe a pour but de définir, avec la meilleure précision, les terrains rencontrés par la galerie et les difficultés qui se présenteront à la perforation. Nous envisagerons la question sous l'aspect structural (structures traversées) puis sous l'angle technique de la valeur des terrains en souterrain et des difficultés dans la réalisation, en nous aidant des observations consignées au chapitre II (3).

6.1. - TERRAINS TRAVERSES

Les terrains sont envisagés au fur et à mesure de l'avancement, chaque tronçon étant limité par des P.M., le P.M.0 correspondant à l'entrée amont de la galerie de Montrieux.

P.M. O - P.M. 150 - Après les éboulis de l'entrée, la galerie entrera dans la masse homogène de gypse emballant des blocs de dolomies et cargneules, du Keuper.

P.M. 150 Accident faisant chevaucher les dolomies et calcaires du Jurassique supérieur sur le Trias. Zone broyée. L'angle entre l'accident et la galerie (en plan) est de 20°. Le pendage - vers le Sud - de l'accident est d'environ 60°.

P.M. 150 - P.M. 550 - Calcaires portlandiens fracturés. Niveau dolomitisé probable à la base.

P.M. 550 - P.M. 750 - Compartiment dolomitique surélevé reconnu par le S 13.

P.M. 750 - P.M. 900 - De nouveau les calcaires portlandiens fracturés, traversés par le S 5.

P.M. 900 - P.M. 1750 environ - Compartiment de dolomies néojurassiques situé entre deux failles verticales.

P.M. 1750 - Zone faillée effondrant le compartiment nord de plus de 100 m (non mise en évidence sur le terrain). Il s'agit de la prolongation de la faille SW - NE du Jas de Laure.

P.M. 1750 - 4150 -La galerie pénètre d'abord dans les dolomies sombres grenues de base que reconnaît le S 7 ; vu le pendage des couches, elle doit descendre dans la série. Entre le S 7 et le S 6, aucune prospection ne nous renseigne sur la nature du sous-sol. Il est probable que la galerie sera creusée principalement dans les calcaires massif du Bathonien supérieur, mais des cassures décelées uniquement en photo aérienne peuvent être responsables de rejets plus ou moins importants.

P.M. 4150 - 6800 -Plusieurs failles, décelées par la géophysique et confirmées pour certaines par l'examen des photos aériennes affectent cette portion de galerie.
On ne peut que faire des hypothèses basées sur la géophysique et les mesures de surface pour la prévision des terrains rencontrés.
Les mesures de pendage de surface entre les sondages 6 et 3 témoignent d'un mouvement synclinal suivant la coupe de la galerie.

Fig. 49 a

GALERIE DE MONTRIEUX

N.W. — le Callant du Barry — les Tirassades — R.F.

PROFIL GÉOLOGIQUE

S 1 — S 13 — S 5 — S 7

800 / 700 / 600 / 500 / 400 / 300 / 200

P.C. 100 m

Distances cumulées: 150 — 550 — 750 — 900 — 1750 — 3200

Résistivités

RQD 10cm moyen

Venues d'eau

PROFIL GÉOTECHNIQUE

VENUES D'EAU
- Débits élevés
- Ruissellements diffus
- Venues localisées (écoulements karstiques)

Fig. 49 b

GALERIE DE VALAURY

N.N.W. — Morières les Tournes — les Pourraques

S 3 — S 8 — S 14

800 / 700 / 600 / 500 / 400 / 300 / 200

1/10000 — 1/10000 — 0 100 200 m

P.C. 100 m

Distances cumulées: 6965 — 7150 — 7950 — 8450 — 8700 — 9650 — 9700

Résistivités

R.Q.D. moyen

Venues d'eau

PROFIL GÉOTECHNIQUE

GEOLOGIE
- Valanginien
- Portlandien
- Dolomies du J.S.
- Bathonien sup.
- Dogger
- Lias et infralias
- Trias

Résistivités vraies

200 500 1000 2000 4000 ohm/m

R.Q.D. 10

0 50 75 90 100%

hachuré: pourcentage de mauvais terrain

GALERIE DE MONTRIEUX

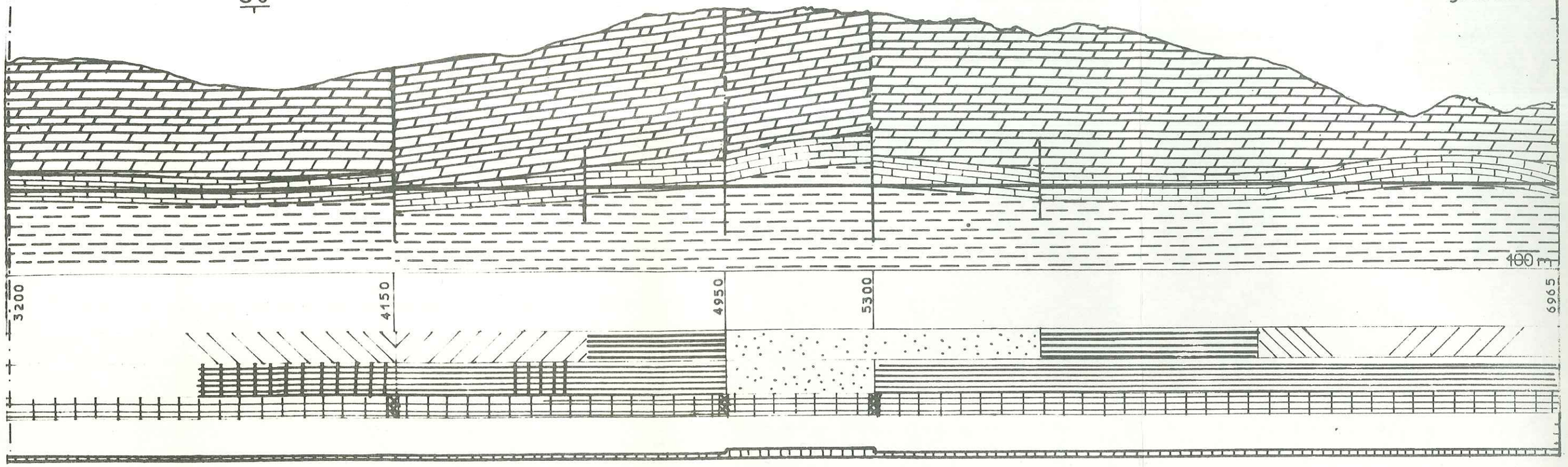
coude → S.E.

Valbelle

S 6

Forêt Domaniale des Morières

Fenêtre de Vigne. fère



GALERIE DE VALAURY

coude

la Mort de Gautier

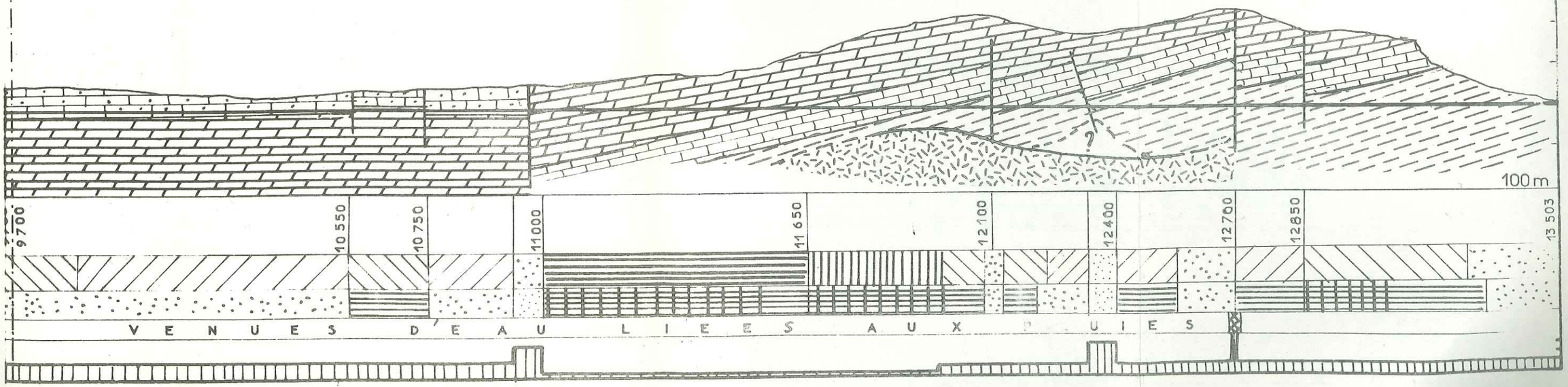
S 9

coude S.S.E.

les Baux Rouges

S 10 (projection)

S 11



Les mesures géophysiques montrent que le cœur de la forêt domaniale des Morières a une faible résistivité, explicable par la présence du Dogger marneux. La forme anticlinale que cette hypothèse appelle peut être due uniquement aux seuls rejets des failles qui hachent le massif.
Au niveau du coude (P.M. 6800 environ) faisant la séparation entre les galeries de Montrieux et de Valaury, et où aboutit la fenêtre de Vignefère, on se trouve à l'extrême base des calcaires du Bathonien.

P.M. 6800-8450 - Du fait de la nouvelle orientation de la galerie, on s'éloigne de la falaise dominant Vignefère et la galerie remonte la série jusqu'aux dolomies néojurassiques.
Au P.M. 7 950, la galerie passe la faille verticale de Morières-les-Tournes avec un angle de 45°. Il s'agit d'une faille de décrochement et non d'extension, c'est pourquoi on peut s'attendre à rencontrer des roches broyées et mylonitisées, mais relativement compactes.
De l'autre côté, on est toujours dans les dolomies jusqu'aux environs du P.M. 8 450 où les couches calcaires du Bathonien supérieur réapparaissent.

P.M. 8450-9650 - Le Bathonien supérieur peut être subdivisé en un niveau supérieur calcaire et inférieur plus marneux. Le terrain est néanmoins compact. C'est ce qu'il ressort des sondages et de la géophysique.

P.M. 9650 - Faille des Pourraques d'un rejet égal à toute l'épaisseur des dolomies. Angle de 30° avec la galerie.

P.M. 9650-11000 - Compartiment effondré de Jurassique supérieur. La galerie sera, soit au sein des calcaires blancs du Portlandien, soit au sommet des niveaux dolomitiques sous-jacents.

P.M. 11000 - Faille de la Mort de Gautier. Angle de 20° avec la galerie : elle traversera la zone d'influence de la faille sur une distance assez grande.

P.M. 11000-12700 - On arrive dans le dernier grand compartiment géologique de cette étude. Les couches étant pentées maintenant vers le Nord Ouest, la galerie va effectuer une descente progressive dans la série. Vers le P.M. 11650 apparaissent les calcaires bathoniens. A 12100 m, une faille (décelée par la géophysique) affaisse probablement le compartiment sud. Vers le P.M. 12 400, une baisse brutale de résistivité du traîné géophysique indique une anomalie au niveau de la galerie. D'après le levé du S 10, situé 200 m au NE, elle peut être due :

- soit à la présence du contact de la faille des Hubacs (déversé de 60° vers le NE dans cette région) ;
- soit à un karst de grande importance situé à la base des dolomies, donc n'intéressant pas la galerie ;
- soit à une faille correspondant à celle qui dans le S 10 met directement en contact les calcaires et dolomies du Bathonien supérieur avec les niveaux très marneux du Dogger moyen.

Sur la coupe géologique de la figure 49 a été indiquée la trace possible de l'intersection de la faille inclinée des Hubacs avec le plan de coupe. Cette trace a été déterminée à partir des sondages électriques de cette portion qui accusent tous une chute brutale de résistivité à leur base.
Ensuite, jusqu'au P.M. 12 700, la galerie entre plus profondément dans le Dogger marneux, ce que traduit la baisse générale de résistivité du traîné.

P.M. 12 700 - Faille verticale des Baux Rouges de direction est-ouest. Affaissement du compartiment sud d'une centaine de mètres.

P.M. 12 700-13 503 - La galerie est toujours dans le Dogger, mais une faille au P.M. 12 850 affaisse une nouvelle fois le compartiment sud, et au droit du S 11, les terrains correspondant au sommet de cet étage sont encore compacts et peu marneux. C'est ensuite une alternance de niveaux calcaires et marno-calcaires jusqu'à la sortie aval de la galerie, au P.M. 13 503.

6.2. - AVANCEMENT - DIFFICULTES PREVUES

P.M. 0 - P.M. 150 - Les argiles et le gypse - ou l'anhydrite - du Keuper, dont la résistance à la compression n'excède pas 200 bars, devront être soutenus par cintres sur une grande partie de ce tronçon, à moins qu'on ne procède immédiatement au revêtement de la galerie, ce qui arrêtera le phénomène de gonflement résultant de la transformation de l'anhydrite en gypse.
L'accident géologique situé autour du P.M. 150 nécessitera un enfilage sur cintres à l'avancement sur une distance assez grande, car la galerie le recoupe très obliquement.

P.M. 150 - P.M. 900 - Les calcaires et dolomies du Jurassique supérieur sont très fracturés, mais souvent consolidés par de la calcite recristallisée. C'est pourquoi les soutènements pourront être réduits à des plaques d'envol et à des boulonnages de sécurité. Les venues d'eau seront faibles.

P.M. 900 - P.M. 1750 - Après la faille du P.M. 900 (drainante), la galerie traversera environ 900 m de dolomies de résistivité comprise entre 2 et 4 000 ohm.m qui peuvent être localement karstifiées. La charge d'eau sur cette section n'est pas grande, mais on peut attendre un débit d'étiage continu d'une vingtaine de litres/seconde (III - 4.2.4.).

P.M. 1750 - Accident dont le positionnement ne peut être établi avec précision, car il ressort mal sur le trafné géophysique et n'a pas été mis en évidence sur le terrain. Il ne doit pas entraîner un broyage important.

P.M. 1750-4150 - Hormis les 100 premiers mètres situés à la base des dolomies néojurassiques qui peuvent comporter des poches karstiques, cette grande portion de galerie mal connue ne doit pas poser de grands problèmes, car elle sera creusée principalement dans les calcaires massifs du Bathonien dont le R. Q. D. 10 cm est de l'ordre de 90 %. Les venues d'eau seront de type fissural.

P.M. 4150 - P.M. 6800- Suivant que l'une ou l'autre des hypothèses présentées plus haut se réalisera, les difficultés de percement seront différentes.
Le cas le plus favorable serait que la galerie rencontre, comme nous l'indiquons sur la coupe, les niveaux calcaréo-marneux du Dogger sommital. Il faudrait prévoir dans ce cas l'utilisation de béton projeté afin d'arrêter un éventuel écaillage des calcaires marneux comme cela s'est produit à Signes aval.
Si, par contre, les faibles valeurs de résistivité enregistrées entre 4950 et 5300 m révèlent la base fracturée et karstifiée des dolomies néojurassiques, il sera prudent d'effectuer des sondages au front afin de déceler d'éventuelles poches sableuses. L'avancement pourrait alors être ralenti par des opérations de consolidation du terrain par injections de coulis. La charge hydrostatique peut atteindre 10 bars.

P.M. 6800-P.M. 8450 - Depuis le coude (P.M. 6800) la galerie traverse pendant 400 m encore les calcaires massifs du Bathonien puis entre lentement dans les dolomies néojurassiques, que les derniers mètres du sondage 3 ont reconnues comme extrêmement morcelées à leur base. La résistivité des dolomies situées plus haut dans la série étant très élevée ($\rho >$ 4 000 ohm.m) elles doivent être relativement compactes.
Le niveau de l'eau dans le massif est encore situé 40 m au-dessus de la galerie, aussi des venues d'eau à écoulement turbulent sont-elles encore à prévoir. La faille du P.M. 7950 occasionnera de forts débits lors de sa traversée.

P.M. 8450-P.M. 9650 - Le Bathonien calcaire et marno-calcaire montre une nette baisse de résistivité, mais le R.Q.D., situé entre 75 et 90 %, et la résistance élevée de ces niveaux font prévoir un faible pourcentage de soutènement.
Le passage de la faille des Pourraques, de grand rejet, et que la galerie attaque avec un faible angle d'incidence, nécessitera l'utilisation de cintres sur une distance de plusieurs dizaine de mètres.

P.M. 9650-P.M. 11000 - Les calcaires portlandiens sont très fracturés (R. Q. D. compris entre 50 et 75 %) et malgré leur grande résistance à la compression devront être cintrés ou du moins épinglés en voûte.
Les venues d'eau seront en relation directe et rapide avec la pluviométrie car le recouvrement est faible et les calcaires très lapiazés en surface.
La faille de la Mort de Gautier sera recoupée sur une grande distance, ce qu'atteste le trafné géophysique qui accuse une forte baisse de résistivité sur plus de 50 mètres.

P.M. 11000-P.M. 11650 - La traversée des dolomies très compactes et de résistivité élevée sera sans problème ; les venues d'eau seront localisées et liées à la pluviométrie.

P.M. 11650-P.M. 12100 - Sur 450 m, les calcaires bathoniens et peut-être le sommet du Dogger offriront un avancement aisé.

P.M. 12100-P.M. 12700 - Portion creusée principalement dans les niveaux supérieurs du Dogger. Sur une soixantaine de mètres autour du P.M. 12400, les faibles résistivités nous font attendre : soit une zone broyée, soit un karst, soit les dolomies hettangiennes finement fissurées alternant avec de minces lits marneux reconnues à la base du S 10. De toute façon, un soutènement lourd pourra être nécessaire.
La faille du P.M. 12700 sera recoupée presque orthogonalement, donc sur une faible distance. Elle a probablement un rôle drainant qui sera sensible en hautes eaux.

P.M. 12700-P.M. 13503 - Les alternances de bancs calcaires et d'interbancs marneux pourront nécessiter des boulonnages de bancs décollés en voûte, et le pendage général vers l'amont créera quelques hors profils.

La coupe prévisionnelle de la figure 49 fait la synthèse des observations présentées ci-dessus.

Sous la coupe géologique des galeries de Montrieux et Valaury ont été indiquées certaines caractéristiques des terrains traversés pouvant apporter des renseignements sur leur comportement au creusement.

- Les valeurs de résistivité vraie proviennent de la coupe électrique établie après la campagne géophysique.
- Le R.Q.D. 10 cm d'une portion de galerie creusée dans un certain terrain, correspond au R.Q.D. moyen calculé sur la portion de sondage qui recoupait ce même terrain, dans la même région. Ainsi, d'une partie à l'autre de la galerie, le R.Q.D. d'un même niveau lithologique pourra être différent.
- La colonne du dessous donne une idée des zones où l'on peut attendre de forts débits, et du type d'écoulement des venues d'eau. Aucun chiffre de débit n'a été fourni, afin d'éviter tout contentieux avec l'entreprise au moment du percement. De toute façon, on ne peut que donner un ordre de grandeur de l'exhaure sur une grande longueur de galerie. C'est ce qui a été fait au paragraphe "hydrogéologie" de ce chapitre.
- Le profil géotechnique figurant en dernière colonne indique le pourcentage de "mauvais terrain" intégré sur chaque portion de lithologie différente de la galerie. Cette représentation veut donner une idée des qualités relatives des sections les unes par rapport aux autres, sans mettre en cause les profils de soutènement, que nous avons défini au chapitre II (2.6.1.).

6.3. - PROFILS DE SOUTENEMENT

Les profils de soutènement peuvent être calculés en pourcentages sur le tracé global de chaque galerie, par analogie avec les résultats d'ouvrages réalisés, mais il serait aventureux de faire des prévisions sur des portions plus restreintes.

Les résultats globaux qui suivent ont été établis à partir de l'avant métré en supposant que les étages lithologiques rencontrés par la galerie comportaient, suivant qu'ils étaient secs ou aquifères, suivant leur niveau et suivant la région, un pourcentage de terrain soutenu allant de :

50 à 75 % pour le Keuper argilo-gypseux
20 à 40 % pour le Dogger marno-calcaire
10 à 20 % pour le Bathonien calcaire
10 à 40 % pour le Jurassique supérieur dolomitique
30 à 50 % pour le Portlandien calcaire.

Plus de 75 % pour les zones faillées dont la largeur est estimée d'après le traîné géophysique ou sur le terrain.

Les longueurs des différents profils sont (en m) :

profil \ galerie	Montrieux	Valaury	Total
P I	4 850	5 000	9 850
P II	1600	1450	3 050
P III	350	250	600
		Total	13 500

Soit : 73 % de profil I
23 % de profil II
4 % de profil III

6.4. - OUVRAGES ANNEXES

6.4.1. - Galerie du Dubliou

Cette galerie de 703 m de longueur traverse longitudinalement une butte étirée Est-Ouest au Sud de Latay, dont le point culminant est coté 362,5 m sur la carte au 1/20 000. Le sommet de cette butte et sa partie ouest sont constitués de calcaires portlandiens très broyés et reconsolidés par de la calcite engrenée, en masses parfois importantes. Cette zone broyée est due à la présence proche du grand contact tectonique bordant au Sud la vallée du Gapeau.

Le sondage 4, effectué au sommet de la colline, traverse d'abord 30 m de calcaires portlandiens mêlés aux marnes verdâtres valanginiennes, puis les dolomies néojurassiques sommitales. Les essais Lugeon effectués à la cote de la galerie dans ce forage n'ont donné aucun résultat car il a été impossible de monter en pression. La perméabilité de la roche est donc très grande. Aucune venue d'eau n'est cependant à craindre, le sondage étant sec.

Le sondage montrant très peu d'argile dans les fissures, nous pensons que malgré l'intensité de la fracturation dans les calcaires portlandiens, la galerie sera d'assez bonne tenue, compte tenu de la calcite de recristallisation soudant les blocs entre eux et du fait qu'il n'y aura pas d'eau. Le S 12 (incliné), foré dans la partie orientale, rencontre les dolomies légèrement fracturées et argileuses.

Il devait expliquer la chute brutale des résistivités sur cette section de la galerie, chute qui pouvait être due à la proximité des terrains triasiques. La galerie rencontrera successivement, de l'amont vers l'aval, 200 m de calcaires recristallisés du Portlandien, puis 500 m de dolomies néojurassiques, probablement altérées vers la sortie aval.

On peut prévoir de 30 à 50 % de terrains soutenus, les zones cintrées étant localisées surtout dans la partie ouest qui est la plus fracturée, et aux deux fenêtres.

6.4.2. - Fenêtre de Vignefère

Cette fenêtre de 405 m de longueur sera creusée presque entièrement dans les calcaires et calcaires marneux du sommet du Dogger. Il est probable que le début de la fenêtre sera creusé dans des terrains secs mais qu'assez vite des infiltrations d'eau se produiront, pouvant causer des problèmes de tenue de la voûte (épinglage des bancs).

L'emploi de béton projeté au cours de l'avancement suffira peut-être à empêcher les chutes de blocs.

CHAPITRE IV

ETUDE HYDROGEOLOGIQUE DE LA PLAINE DE SIGNES

1. - INTRODUCTION

1.1. - PREAMBULE

Cette dernière étude s'inscrit à part dans ce travail concernant principalement les travaux de galeries hydrauliques. Elle apporte cependant des données complémentaires sur l'hydrogéologie du versant sud d'Agnis, que traverse la galerie de Signes aval, et met en relief l'influence de cette dernière sur le régime des sources de la plaine de Signes.

Le travail personnel et inédit fourni pour cette étude a résidé surtout dans le lever géologique des terrains crétacés s'étendant de Signes à Méounes. Les cartes géologiques qui en résultent (voir en annexe) permettent de faire la jonction entre les secteurs étudiés dans le deuxième et troisième chapitres.

Les essais de pompage dans les puits d'exploitation, les jaugeages de sources, les analyses chimiques, ont été effectués et souvent interprétés par le Cabinet d'Etudes Ruby. A ce point de vue, notre travail a consisté à regrouper les résultats intéressant principalement la plaine de Signes et le versant sud de l'Agnis à partir de données qui concernaient le massif tout entier, pour présenter uniquement les possibilités d'exploitation par pompage de l'aquifère crétacé de Signes. Chaque fois que nous le pouvions, une explication géologique des phénomènes hydrologiques observés a été donnée.

1.2. - PROBLEME POSE

Les besoins en eau toujours croissants de la région toulonnaise obligent à faire appel à l'ensemble des ressources hydrauliques de la région, en attendant la jonction avec les galeries et canaux du réseau principal du Canal de Provence qui achemineront l'eau du Verdon. La branche du Var 2e section traverse l'extrémité orientale du massif de la Sainte-Baume et son percement a montré l'existence de nappes souterraines de grande importance. Il a été prévu de capter les eaux drainées par les galeries de Mazaugues, Signes amont et Signes aval, et éventuellement une partie du débit d'exhaure des mines de bauxite Péchiney, sur le plateau de Mazaugues. Enfin, et c'est le sujet de cette étude, le Crétacé de la plaine de Signes est supposé constituer un réservoir aquifère exploitable dont il est intéressant de lever les limites et d'étudier les caractéristiques.

1.3. - PLAN D'ETUDE

Ce chapitre se compose de deux parties :

La première traite des caractéristiques hydrogéologiques de la plaine de Signes et également du versant sud d'Agnis. En effet, il n'est pas possible de borner géographiquement l'étude à la seule plaine, celle-ci dépendant étroitement au point de vue hydrologique du massif qui la domine au Nord.

Nous présenterons successivement : les exutoires du massif, ainsi que leurs relations mutuelles ; l'hydrochimie, qui permettra de distinguer plusieurs aquifères ; la piézométrie dans la plaine et son évolution suivant les époques ; enfin les caractéristiques de l'aquifère, déterminées à partir des sondages et des coupes géologiques.

La deuxième partie définit, à partir de ces données et des essais de pompage, les possibilités d'exploitation de la nappe et les modalités de cette exploitation.

1.4. - CADRE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE

La plaine de Signes est une vaste dépression, constituant une sorte de polje, allongée dans le sens WNW-ESE, de 5 km de long sur 1 km de large environ, dont le seul exutoire est le cours du Gapeau qui s'encaisse vers l'Est dans des gorges, avant de se diriger, à partir de Méounes, vers le Sud et la dépression permienne, qu'il rejoint à Solliès-Pont.

La plaine de Signes et, à l'Est, la bande de collines bordant au Nord le Gapeau jusqu'à Méounes, constituent une entité structurale bien différenciée, entre les deux massifs jurassiques d'Agnis et du Beausset. La description stratigraphique de ces terrains, et les ensembles structuraux qui se dégagent, ont fait l'objet d'un paragraphe détaillé au chapitre I (2.2.).

Rappelons simplement que sous les alluvions, dont l'épaisseur peut atteindre 20 mètres, on distingue en effet deux unités allongées selon la direction est-ouest, qui ressortent à l'Est de la plaine de Signes, comprenant au Nord une bande de terrain d'âge crétacé supérieur et au Sud, une bande de terrain triasique. Les contacts entre les deux unités et avec les massifs jurassiques qui les bordent, se font par de grandes failles subverticales (carte géologique de la plaine de Signes au 1/10 000, blocs diagrammes, coupes au 1/5 000 : en annexe).

2. - ETUDE HYDROGEOLOGIQUE

2.1. - HYDROLOGIE

Nous avons déjà traité, au chapitre I (1.2.4.) de l'hydrologie de la région. Le réseau hydrographique, les limites de surfaces d'alimentation, le bilan hydrologique, sont l'objet de paragraphes sommaires auxquels on pourra se reporter avant d'aborder l'étude plus détaillée.

2.1.1. - Les exutoires

2.1.1.1. - Situation géologique

Les sources de la plaine de Signes sont situées sur le contact faillé séparant le Crétacé supérieur du Trias (voir la carte au 1/10 000 et les blocs diagrammes).

La source du Gapeau se trouve dans les calcaires spathiques roux du Coniacien, de même que la source de Beaupré qui alimente un plan d'eau situé en bordure de la route de Signes à Méounes. La cote de l'eau est à 314,5 m pour les deux. Les sources de Lou Pracabat, situées entre Gapeau et Beaupré, de plus faible débit, jalonnent également le contact Crétacé - Trias. Nous sommes en présence de sources de déversement d'une nappe aquifère à la faveur d'un barrage imperméable. La source du Raby, située au Nord du village de Signes, apparaît à la faveur d'une faille qui met en contact les calcaires marneux du Dogger et les calcaires du Lias.

La galerie de Signes aval, dont le creusement a été terminé en juillet 1968, constitue un drain artificiel du massif dolomitique d'une grande influence sur le débit de l'aquifère qui alimente la source du Gapeau et sur la piézométrie de la plaine.

2.1.1.2. - Relations Gapeau - Beaupré

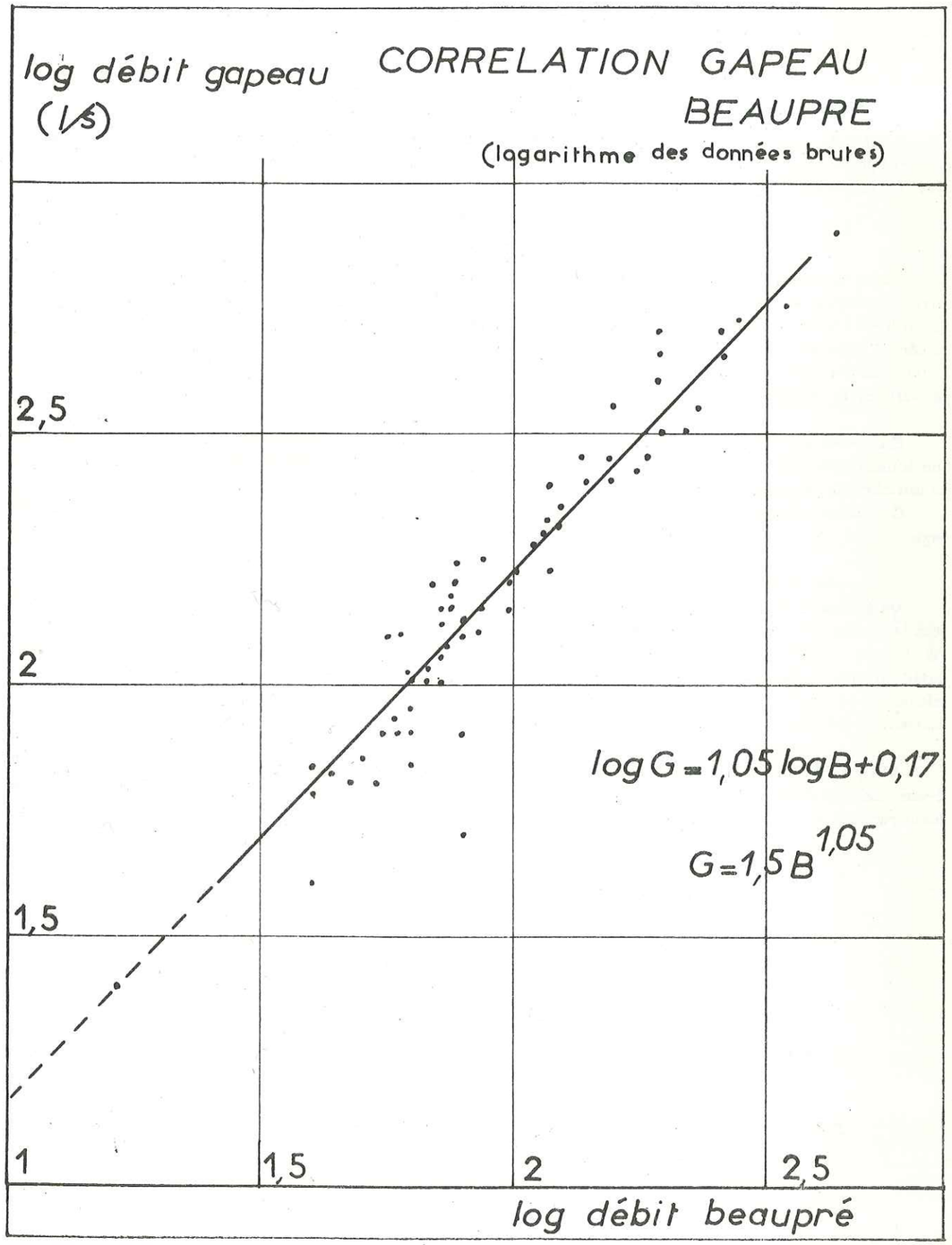
2.1.1.2.1. - Corrélation entre les débits

Une relation simple établie graphiquement et assez bonne pour les bas débits relie les débits du Gapeau et de Beaupré, avant les travaux de Signes aval (fig. 50).

La relation qui figure sur le graphique peut s'écrire d'une manière approchée plus simple :

Q Gapeau = 3/2 Q Beaupré.

Fig. 50



On a reporté sur la figure 51 la pluviométrie à Brignoles, les débits moyens mensuels mesurés aux exutoires du Gapeau et de Beaupré depuis 1964 et les débits mensuels du rejet de la galerie de Signes aval depuis 1967. On a pu porter également sur cette figure le graphique des débits reconstitués du Gapeau à partir de Beaupré par la relation précédente. On peut constater qu'il y a similitude d'évolution entre les débits des différents exutoires et entre les exutoires eux-mêmes.

D'une façon générale, on peut dire que ce sont principalement les précipitations d'automne et d'hiver qui provoquent la recharge de l'aquifère, les crues de Beaupré étant amorties par rapport à celles du Gapeau.

A partir de mai 1967, on assiste à un décrochement des débits mesurés sur le Gapeau par rapport à ceux calculés par corrélation : une partie du débit de l'aquifère qui alimente la source du Gapeau est drainée par la galerie de Signes aval. On reviendra plus loin sur ce problème (2.1.1.3.).

2.1.1.2.2. - Réactions aux pompages dans la nappe

L'essai de pompage effectué du 28 au 31 juillet 1969 dans le sondage 4, situé à peu près à mi-distance entre les sources du Gapeau et celle de Beaupré, a asséché, après 24 heures, les sources de Lou Pracabat qui débitaient avant l'essai 5 à 6 l/s, et le débit du Gapeau a baissé d'une vingtaine de l/s environ en trois jours (2.3.2.2.). L'extension du cône d'influence est très grande, en tout cas vers l'amont, puisque l'on a enregistré sur le piézomètre S C 2 situé à 1 700 m au NW du S 4, une baisse de 0, 05 m environ (plan de situation : fig. 52). Par contre, le débit de Beaupré n'a pas varié après ces trois jours de pompage.

Existe-t-il une discontinuité imperméable entre les deux sources ? Cette discontinuité pourrait être une faille, un bombement anticlinal formant écran, une remontée de terrains imperméables. Nos levés de surface ne témoignent pas de tels obstacles au cheminement de l'eau. (voir les coupes géologiques).

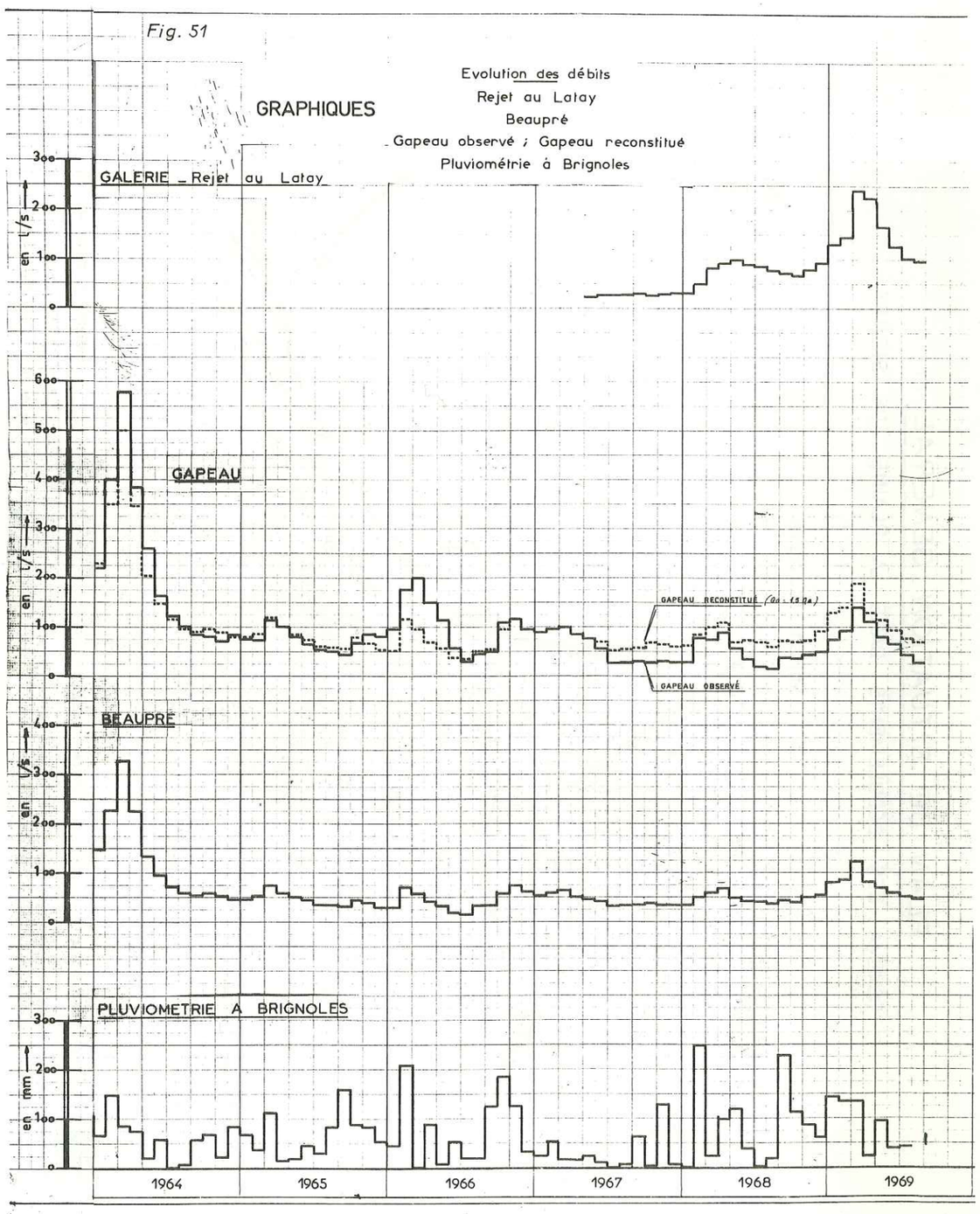
Considérons d'autres hypothèses pouvant expliquer les différences de comportement des deux sources à un pompage.

- Cône d'appel

Un pompage effectué dans une nappe crée une perturbation dans son écoulement et il se forme un "cône d'appel" dont la concavité est tournée vers l'amont. Les filets de courant situés à l'intérieur du cône d'appel se dirigent tous vers le puits, tandis que les filets extérieurs sont seulement déviés par le pompage. Le schéma (fig. 53), uniquement qualitatif montre comment, dans l'hypothèse où la nappe s'écoulerait du NNW vers le SSE, la source de Beaupré pourrait ne pas être influencée par un pompage effectué dans le sondage 4, en raison de sa position extérieure au cône d'appel; ce qui n'est pas le cas de la source du Gapeau.

S'il y a du vrai dans cette hypothèse, il faut cependant noter que le schéma 53 ne représente pas la réalité, c'est-à-dire que : les deux sources sont à la même cote exactement ; les cartes de nappes (2.2.) traduisent plutôt un écoulement perpendiculaire à la limite imperméable.

Fig. 51



PLAN DE SITUATION GENERAL ET

SCHEMA DES ECOULEMENTS DANS LA PLAINE DE SIGNES

Fig. 52

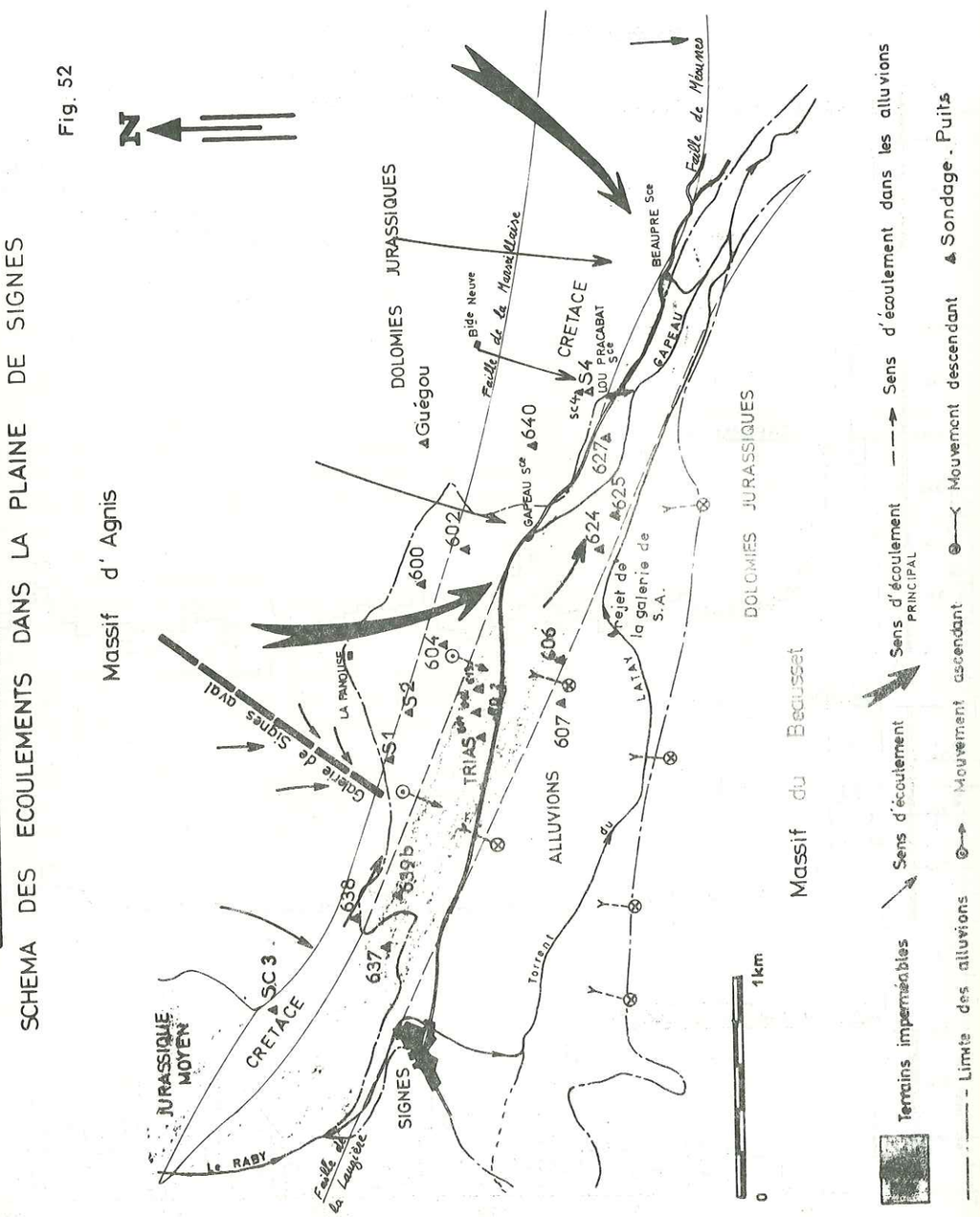
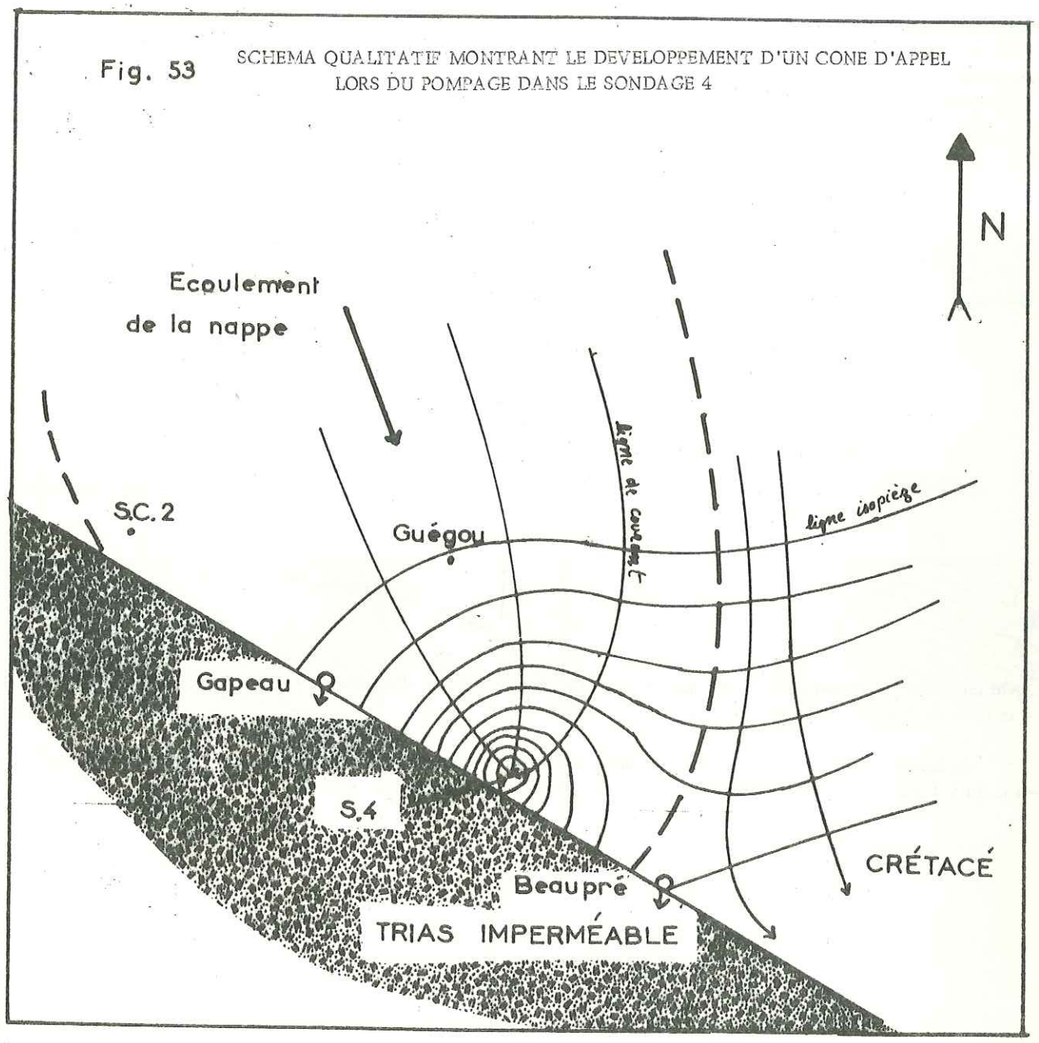


Fig. 53 SCHEMA QUALITATIF MONTRANT LE DEVELOPPEMENT D'UN CONE D'APPEL LORS DU POMPAGE DANS LE SONDAGE 4



- Pendage des couches

La géologie montre que les pendages des terrains crétacés sont d'orientation générale N 60° et pendent vers le Sud Est. On peut penser que la circulation des eaux se fait plus facilement suivant les plans de stratification que perpendiculairement aux bancs, et que de ce fait la source du Gapeau est influencée plus rapidement que Beaupré. En nous aidant des résultats des pompages effectués dans le S 4 en juillet 1969 à un débit de 30 l/s, nous allons calculer les transmissivités moyennes et théoriques des terrains suivant les directions :

S 4 ⟶ Gapeau ; S 4 ⟶ Beaupré

Nous utiliserons la formule du rayon d'action tirée de la formule de Theis sur les régimes non permanents, en faisant toutes réserves sur ses conditions d'application :

$$h = \frac{2,3\,Q}{4\pi T} \log \frac{2,25\,T\,t}{r^2\,S}$$

r = distance au puits
h = rabattement correspondant
Q = débit pompé

t = temps après le début du pompage
T = transmissivité
S = cœfficient d'emmagasinement ou porosité utile (nappe libre).

Le rayon d'action R est tel que h = 0

d'où :

$$\log \frac{2,25\ T\ t}{r^2\ S} = 0$$

et :

$$R = 1,5 \sqrt{\frac{T\ t}{S}}$$

Le rayon d'action est indépendant du débit pompé mais croît avec le temps.

1) La source du Gapeau a été influencée 24 heures après le début du pompage dans le S 4.

donc :

R = 800 m = distance du S 4 à la source du Gapeau
S = 10^{-2} = cœfficient d'emmagasinement (ou porosité utile)
t = 24 heures = 86 400 secondes

$$T = \left(\frac{R}{1,5}\right)^2 \times \frac{S}{t}$$

$$T = 3 \times 10^{-2}\ m^2/s$$

Ce chiffre est beaucoup plus élevé que celui trouvé par le Cabinet d'Etudes Ruby à l'aide des piézomètres SP 4 et SC 4 proches du S 4 ($T = 5 \times 10^{-3}\ m^2/s$).

2) Beaupré n'ayant pas été influencé après trois jours de pompage à 60 l/s, nous supposerons que le rayon d'action du S 4 n'avait pas dépassé 600 m (la distance du S 4 à Beaupré est de 700 m).

R = 600 m
S = 10^{-2}
t = 3 jours = 258 000 secondes

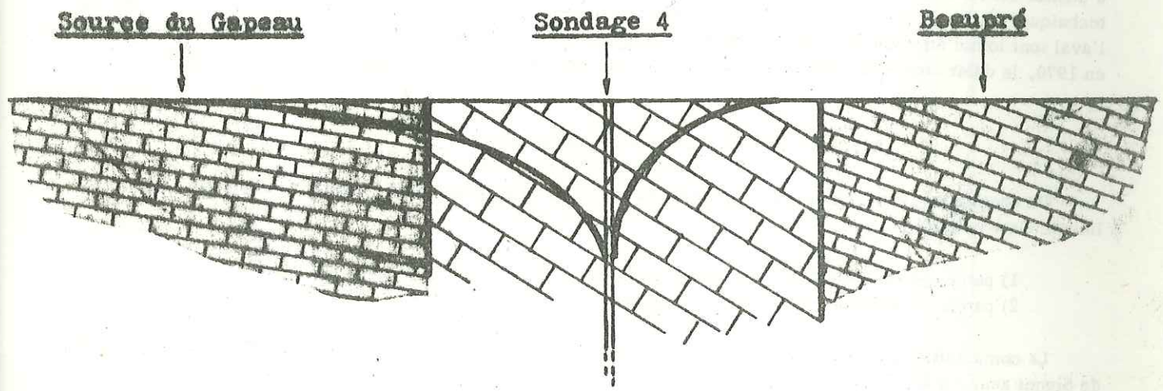
$$T = 6 \times 10^{-3}\ m^2/s$$

Ceci nous donne une transmissivité dans le sens perpendiculaire aux couches cinq fois plus faible que la précédente.

Ces calculs sont évidemment très théoriques et les résultats chiffrés ne doivent être pris en considération que comparativement. La figure 54 montre la forme possible du cône de rabattement après 24 heures de pompage. Il est possible que l'action d'un pompage prolongé dans le sondage 4 influencerait à la longue le débit de Beaupré. Pourtant le drainage par la galerie de Signes aval se fait sentir aux sources du Gapeau, nous l'avons vu sur les graphiques de la figure 51, et pas à Beaupré.

Fig. 54 **COUPE SCHEMATIQUE MONTRANT L'INFLUENCE DU PENDAGE DES COUCHES SUR LA FORME DU CONE DE RABATTEMENT**

Schéma 3



Calcaires spathiques roux du Coniacien

Calcaires à rudistes de l'Angoumien

- Pluralité des zones d'alimentation

Le manque de points de mesures du niveau piézométrique à l'Est des sources de Beaupré ne nous permet que de faire des hypothèses quant à l'écoulement de la nappe dans cette région. La source de Beaupré est sans doute alimentée comme la source du Gapeau par les eaux du massif d'Agnis (leur chimisme est semblable), mais elle draine un secteur plus oriental (quartier de la Marseillaise) et l'eau emprunte la cuvette synclinale du Crétacé avant d'émerger au contact du Trias (fig. 52) tandis que la zone d'apport pour la source du Gapeau se situe plus précisément au droit de la galerie de Signes aval, ce qui explique l'influence des drainages effectués dans celle-ci pendant les travaux, sur le débit du Gapeau.

Cette dernière hypothèse nous paraît la plus vraisemblable, mais il est possible que les deux phénomènes évoqués plus haut aient leur rôle à jouer lorsque l'on pompe dans le sondage 4.

2.1.1.3. - Relation : Gapeau - Signes aval

On peut se demander s'il existe une relation entre la différence des débits du Gapeau reconstitué (Q Gapeau = 1,5 Q Beaupré) et du Gapeau observé, et les débits de la partie aval depuis le percement de la galerie. Si on porte sur un même graphique (fig. 55) les volumes cumulés écoulés par le Gapeau depuis 1965 et à partir de juin 1967 les volumes cumulés écoulés par : Gapeau + galerie de Signes, partie aval, on constate que ceux-ci s'alignent sensiblement sur une même droite en période d'étiage (année 1967 très sèche) sauf depuis fin 1968 où un excèdent de volume a été écoulé.

Il semble qu'en hiver, on extrait au total de la partie sud du massif de l'Agnis un débit supérieur à celui qu'aurait extrait le Gapeau seul. Ce fait est intéressant pour l'exploitation du côté sud de l'Agnis. De cette constatation était née l'idée de faire un stockage souterrain à partir de la galerie de Signes aval des débits d'hiver, et d'utiliser ces réserves en été. L'étude de ce projet dépasse le cadre de ce chapitre. Soulignons seulement les difficultés techniques posées par un tel ouvrage dans un terrain aussi perméable qu'un massif dolomitique, dont les limites vers l'aval sont loin d'être étanches. Nous verrons au paragraphe 2.1.1.5., que, les mesures de débit ayant été poursuivies en 1970, le débit supplémentaire extrait du massif se retrouve même lors des étiages et qu'il a été chiffré.

2.1.1.4. - Relation : Beaupré - Signes aval

On cherche à relier les débits de la galerie à ceux d'une source "stable" du massif. Le choix de Beaupré au lieu de Gapeau a été fait :

1) parce que les bas débits sont mesurés avec une meilleure précision à Beaupré ;
2) parce que les débits de Beaupré n'ont pas été influencés par la galerie (ou l'ont été faiblement).

La comparaison a porté sur les débits mesurés les 1er et 16 de chaque mois, de juillet 1968 - fin du percement de Signes aval - à décembre 1970.

Posons x = Q Gal. = débit d'exhaure de la galerie
et y = Q B. = débit de Beaupré.
Les couples (x, y) se répartissent suivant un nuage de points, relativement groupés dont nous allons chercher les droites de moindres carrés (fig. 56).

Pour cela, il faut connaître les moyennes et écarts types de x et y, ainsi que leur covariance, qui nous permettent de calculer le cœfficient de corrélation. N = nombre de couples (x, y).

Moyenne des x : $\bar{x} = \frac{\sum xi}{N}$; écart type $\sigma x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x)^2}{N}}$

Moyenne des y : $\bar{y} = \frac{\sum yi}{N}$; $\sigma y = \sqrt{\frac{\sum (yi - y)^2}{N}}$

Covariance des deux variables x et y : $\mu xy = \frac{\sum (xi - \bar{x})\ (yi - \bar{y})}{N}$

Cœfficient de corrélation $\rho = \frac{\mu xy}{\sigma x \,.\, \sigma y}$

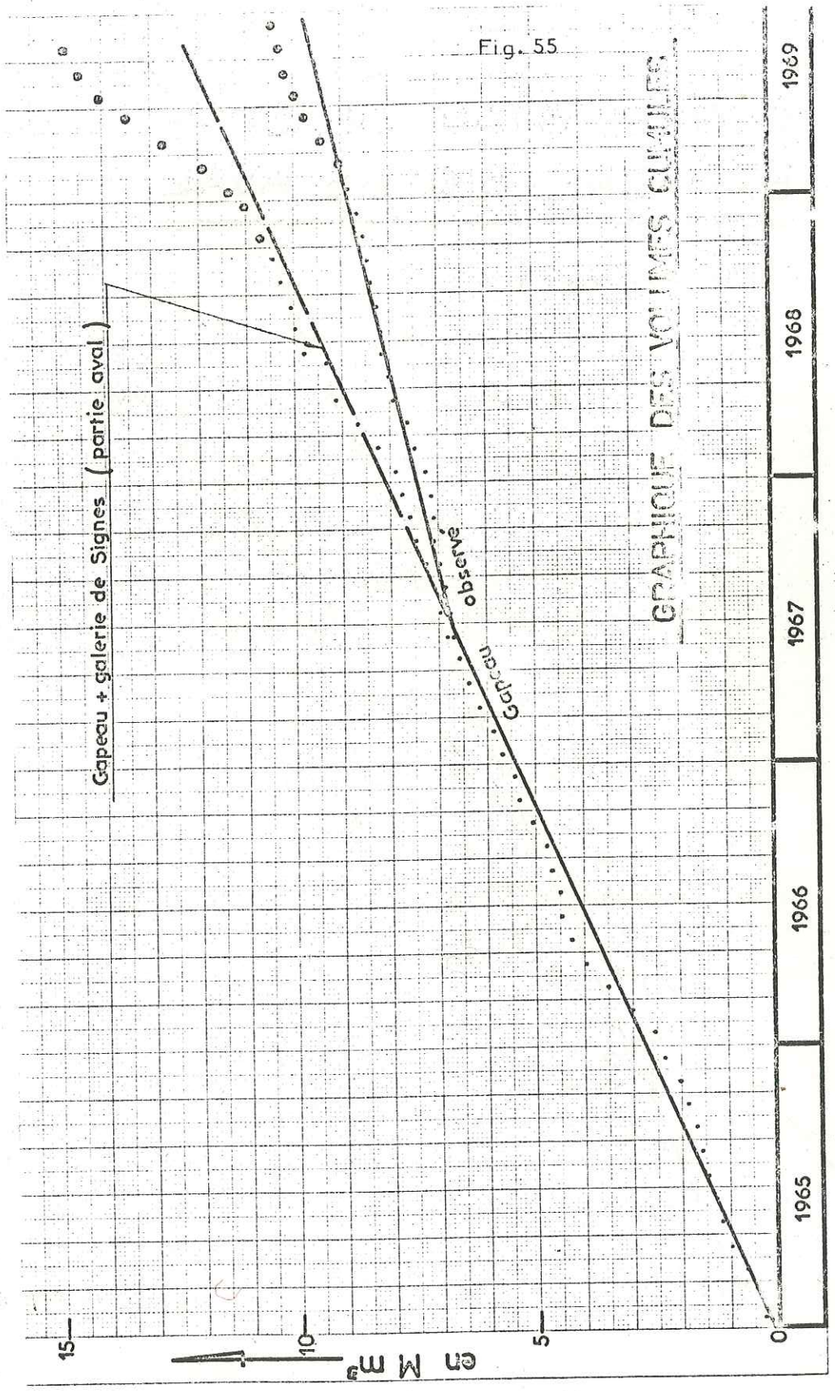
La droite des moindres carrés de y en x a pour équation :

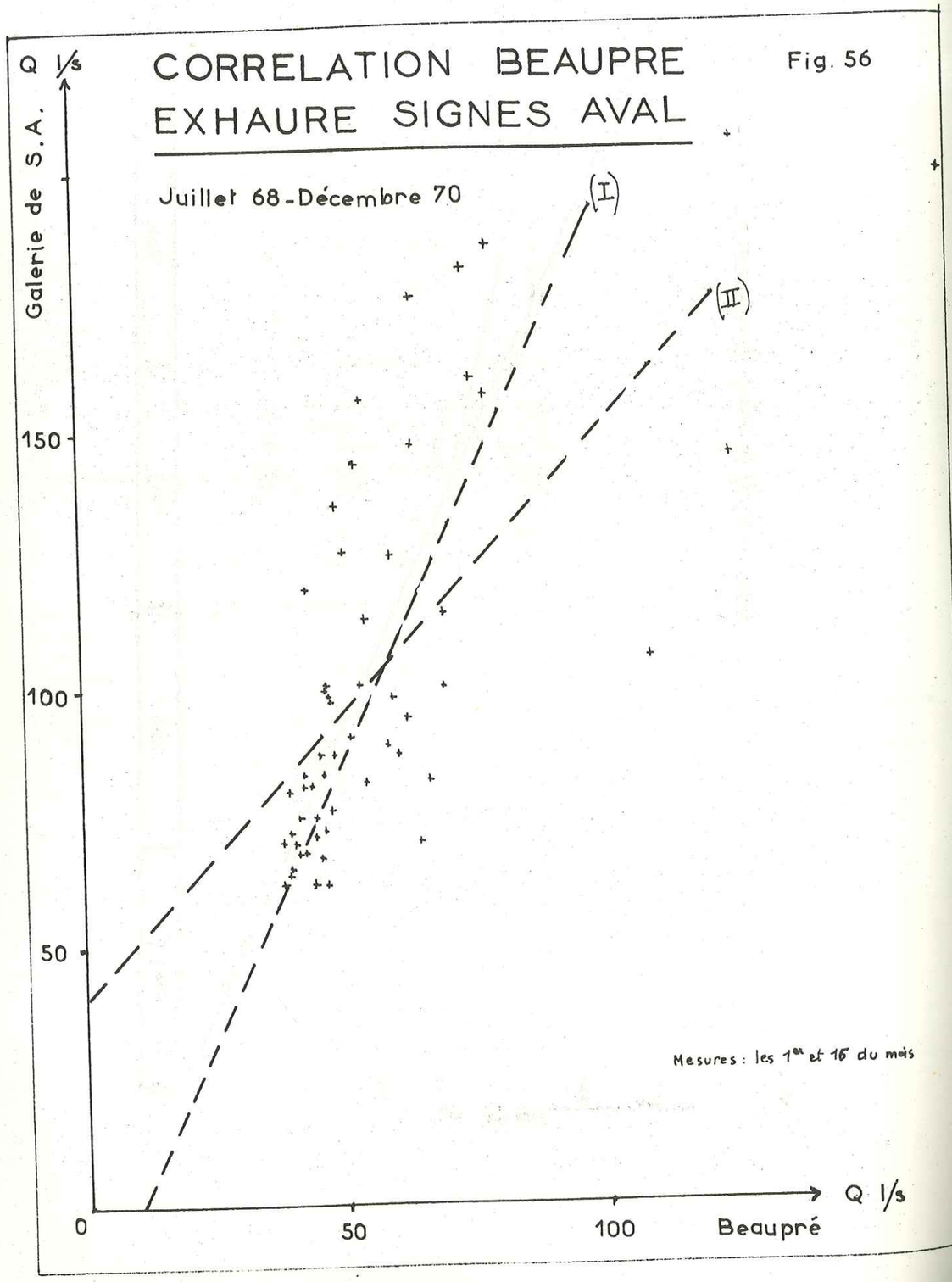
$$y = \bar{y} + \rho \frac{\sigma y}{\sigma x} (x - \bar{x})$$

La droite des moindres carrés de x en y a pour équation :

$$x = \bar{x} + \rho \frac{\sigma x}{\sigma y} (y - \bar{y})$$

Fig. 55





Les calculs ont été effectués sur l'ordinateur de l'Institut Dolomieu et portent sur une cinquantaine de couples de mesures.

Les résultats sont les suivants :

$\overline{x}$ = 109,6 l/s σ_x = 47,0 l/s
$\overline{y}$ = 61,9 l/s σ_y = 30,0 l/s

Le cœfficient de corrélation, qui sert à chiffrer l'intensité de liaison des variables x et y est ρ = 0,71. Rappelons qu'une corrélation parfaite - relation fonctionnelle - entre x et y aurait un ρ = 1. La corrélation n'est donc pas excellente. Il faut noter que nous n'avons éliminé aucun couple de débits, bien que certains fussent visiblement aberrants. Un calcul de corrélation effectué par le C.E.R. sur ces mêmes sources, mais sur une période plus courte donne une corrélation meilleure : 0,87. Les valeurs extrêmes avaient probablement éliminées au préalable et les mesures avaient été lissées, ce qui atténue les crues secondaires brutales.

Les équations des droites des moindres carrés sont les suivantes :

y = 0,46 x + 12 (I)
x = 1,10 y + 41 (II)

On voit leur graphe sur la figure 56

L'élimination des points extrêmes, correspondant à des crues soudaines et particulières à Beaupré, nous porte à considérer que la droite (I) traduit le mieux la corrélation entre les deux exutoires. Si nous admettons que la droite doit passer par l'origine - en effet, les deux exutoires étant sensiblement à la même cote, le tarissement de l'une implique celui de l'autre -, la relation s'écrit sous la forme simplifiée :

$$Q_{Gal} \# 1,8\, Q_B$$

Ce résultat appelle des réserves ; en effet, il existe une autocorrélation importante entre les valeurs successives des débits. L'extrapolation de cette relation doit donc être faite prudemment. Par exemple, en juillet 1966, le débit de Beaupré étant tombé à 20 l/s (fig. 57), le débit en galerie aurait été inférieur à 40 l/s.

2.1.1.5. - Interactions entre ces trois exutoires

Nous avons admis (2.1.1.2.1., fig. 50) que le débit naturel du Gapeau était égal à 1,5 fois le débit de la source de Beaupré. La figure 57 met en évidence le bien fondé de cette hypothèse.

Les débits des deux sources en fonction du temps ont été reportés sur graphiques semi-logarithmiques. Un décalage des ordonnées logarithmiques de 1,5 permet une bonne superposition des deux courbes jusqu'au début du creusement de la galerie (1967).

Par la suite, si l'on admet que Beaupré n'a pas été influencé, le Gapeau observé est très nettement déficitaire par rapport à Beaupré x 1,5.

On a reporté sur le graphique l'évolution des débits cumulés galerie + Gapeau. Le fait que la courbe correspondante soit nettement supérieure à partir de 1968 à une fois et demi le débit de Beaupré (voir aussi la figure 55) peut s'interpréter de deux façons :

- le débit de Beaupré a été influencé par les travaux,
- la galerie permet d'extraire du massif plus de débit que ne le pourrait le Gapeau tout seul et (ou) permet de récupérer de l'eau qui, sans elle, se perdrait vers le bassin du Beausset.

La première hypothèse est difficile à admettre. Les variations de débit de Beaupré de 1960 à 1966 sont en effet analogues à celles enregistrées actuellement et depuis 1968. Comme l'on constate (par glissement des graphiques semi-logarithmiques) que :

Gapeau + galerie # 2,5 Beaupré, le débit supplémentaire est équivalent à celui observé à Beaupré.

2.1.1.6. - Tarissement des exutoires

L'étude du tarissement des divers exutoires d'un aquifère peut fournir des renseignements intéressants, notamment sur l'importance du volume en réserve au-dessus de la cote des exutoires. Considérons la figure 58 C qui représente la courbe de tarissement de la galerie de Signes en 1969.

GRAPHIQUE DES DÉBITS

Fig. 57

BEAUPRE

GAPEAU

GAPEAU + GAL. DE SIGNES aval

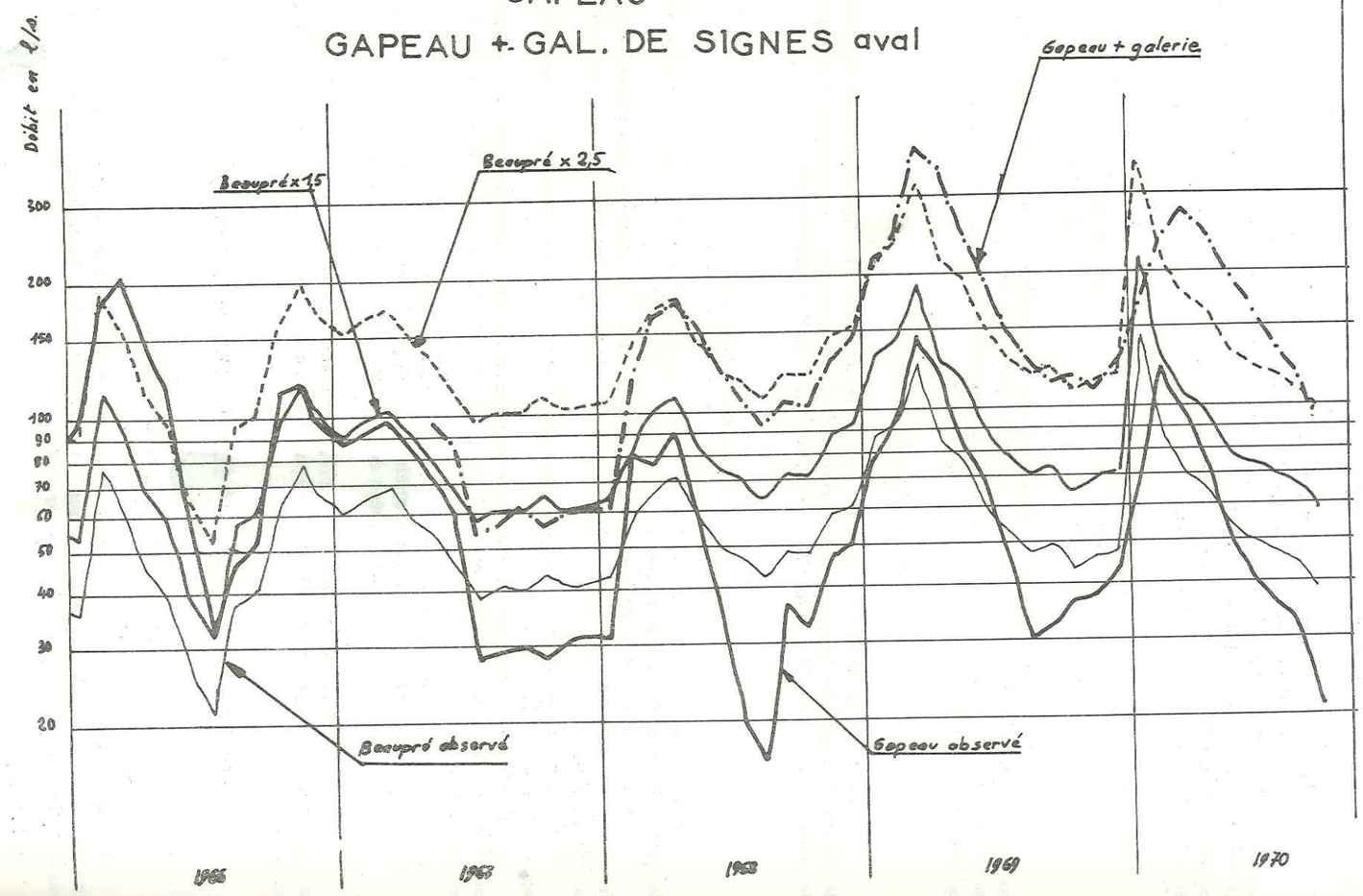
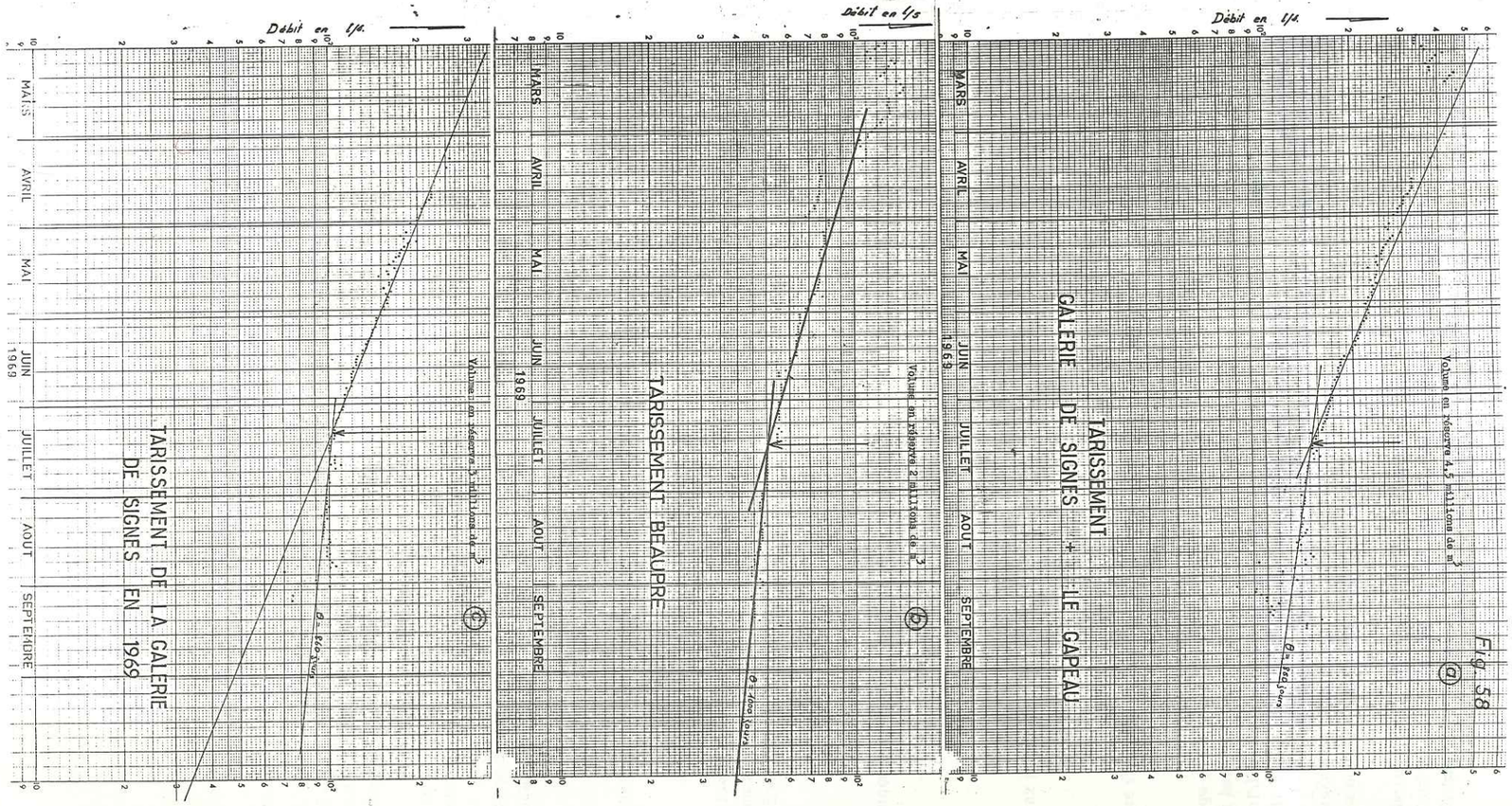


Fig. 58

TARISSEMENT DE SIGNES + LE GAPEAU

TARISSEMENT BEAUPRE

TARISSEMENT DE LA GALERIE DE SIGNES EN 1969



La première droite fortement inclinée montre que le débit perd 90 % de sa valeur en 250 jours (temps correspondant à un cycle logarithmique des débits). Une deuxième droite, de pente plus douce, d'une période de 860 jours pour un cycle logarithmique, intersecte la première à une ordonnée qui correspond à un débit de 100 l/s environ.

On peut donner l'explication suivante à ce phénomène : dans un aquifère karstique du type de celui d'Agnis, il existe deux régimes différents.

- L'un correspondant aux chenaux, diaclases ouvertes, dans lesquels l'eau peut s'écouler en régime turbulent et qui est directement lié au régime des hautes eaux, donc temporaire.
- L'autre correspondant à un aquifère finement fissuré, à écoulement laminaire permanent et dont l'importance ressort particulièrement pendant l'étiage. Le tarissement se fait selon une loi exponentielle décroissante. Si Q est le débit de l'exutoire au temps t,

Q_o le débit au temps origine,

α un cœfficient propre à chaque exutoire,

on peut écrire (formule de Maillet)

$$Q = Q_o e^{-\alpha t}$$

En passant aux logarithmes

$$\text{Log } Q = \text{Log } Q_o - \alpha t$$

$$\alpha t = \text{Log } Q_o - \text{Log } Q$$

$$\alpha = \frac{\text{Log } \frac{Q_o}{Q}}{t}$$

Si nous considérons la période correspondant à une décroissance du débit sur un cycle logarithmique, $\frac{Q_o}{Q} = 10$

d'où

$$\alpha = \frac{2,3}{t}$$

L'intégration de la formule de Maillet entre le temps O, que l'on fixe au point de brisure des deux droites, et l'infini - pour simplifier les calculs - donne approximativement le volume en réserve au début de l'étiage. Si t est exprimé en jours, Q_o en litres par seconde, le volume en réserve exprimé en mètres cubes s'écrit :

$$V = \frac{Q_o}{\alpha} \times 86,4$$

Exemple : (fig. 58 c) tarissement de la galerie de Signes en 1969 :

$t = 860$ jours

$Q_o = 100$ l/s

$V \# 3\,000\,000\ m^3$

Les pompages de juillet et septembre 1969 sur le forage S 4, au lieu-dit la Bastide Blanche, ayant démontré qu'il n'y avait pas de relation directe entre l'aquifère de Beaupré et celui du Gapeau, il faut, pour étudier le tarissement de l'aquifère de Signes (Jurassique supérieur et Crétacé), étudier d'une part la source de Beaupré seule et d'autre part le cumulé galerie de Signes + source du Gapeau.

C'est ce qui a été fait sur les graphiques 58 a et b.

Par extrapolation et intégration de la formule de Maillet, on estime le volume encore en stock, au début de l'étiage, au-dessus des exutoires à :

4,5 M m^3 pour l'ensemble galerie + Gapeau, dont 3 M m^3 pour la galerie seule

2 M m^3 pour Beaupré.

2.1.2. - Hydrochimie

2.1.2.1. - Analyses chimiques classiques

Plusieurs campagnes de prélèvement ont été effectuées sur les exutoires du massif de l'Agnis dans le but de connaître le chimisme des eaux.

Au cours du mois de décembre 1967 une tournée de prélèvements aussi complète que possible a été effectuée sur les différents exutoires de l'Agnis. Ces prélèvements offrent l'intérêt d'avoir été réalisés à une époque où l'aquifère de l'Agnis avait subi un étiage extrêmement sévère. Ils ont été soumis à une analyse simplifiée dont les résultats sont les suivants :

Désignation	CO_3H^-		Cl^-		Ca^{++}		Mg^{++}		TH	ρ	$\frac{r\,Ca}{r\,Mg}$
Unités	d° F	mg/l	d° F	mg/l	d° F	mg/l	d° F	mg/l	d° F	Ωx cm	
Beaupré	22,25	271	0,75	5,3	13,2	53	10,0	24,3	23,2	2640	1,32
Gapeau	22,5	275	1,50	10,6	14,6	58	10,2	24,8	24,8	2460	1,43
La Foux	26,5	323	1,0	7,1	16,8	67	12,0	29,2	28,8	2240	1,40
Signes (aval) à la sortie de la galerie	19,25	235	1,0	7,1	11,2	45	8,8	21,4	20,0	2950	1,27
Source de Méounes (auberge)	26,0	317	1,0	7,1	33,8	135	28,0	68,0	43,2	1370	1,21
Raby	24,0	293	1,0	7,1	23,6	94	5,6	13,6	29,2	1900	4,21
Herbette	23,75	290	1,25	8,9	21,8	87	8,4	20,4	30,2	2000	2,60
Caramy	20,5	250	1,25	8,9	17,6	70	7,2	17,5	24,8	2470	2,44
Vallon du Thuya	27,5	335	1,25	8,9	17,4	69	12,0	29,2	29,4	2100	1,45

Pour la localisation des unités, on se reportera à la carte de la figure 4 bis.

En considérant le rapport : $\frac{r\,Ca}{r\,Mg}$, on peut grouper les eaux en trois familles :

1) Gapeau, Beaupré, aval de la galerie de Signes, Foux, Vallon du Thuya, avec des valeurs de 1,32 ; 1,43 ; 1,27 ; 1,4 et 1,45. L'importance relative de la quantité d'ions Mg^{++} est liée à la dolomie ; ce sont des eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes.

2) Herbette, Caramy, Raby avec comme valeur du rapport 2,60 ; 2,44 ; 4,21. Ces eaux sont bicarbonatées calciques.

3) La source de Méounes, par sa valeur de $\frac{r\,Ca}{r\,Mg} = 1,21$ semble se rapprocher du groupe des eaux du Sud de l'Agnis. Mais toutes les autres composantes montrent que la forte minéralisation de cette eau la classe à part ($\rho = 1370 \Omega$. cm équivaudraient à 570 mg/l). L'eau qui sort près de l'auberge de Méounes a été probablement en contact avec les formations salifères du Trias, ce qui n'est pas le cas pour la source de la Foux.

Par ailleurs, dans la galerie de Signes, des prélèvements d'échantillons sur certaines venues d'eau bien individualisées ont été soumis à une analyse chimique simplifiée. Nous en avons déjà exposé les résultats au chapitre II. On constate que ces eaux se classent pratiquement dans la même famille que les sources de Beaupré et du Gapeau. L'eau du forage 4 de Bastide Blanche a un chimisme absolument semblable à celui de Beaupré. Les renseignements donnés par les analyses chimiques permettent de conclure à une indépendance des eaux du versant sud de l'Agnis (Gapeau, Beaupré, galerie de Signes aval) et des eaux des versants nord et est (Caramy).

2.1.2.2. - Concentration des eaux en tritium

Nous avons exposé au chapitre II les possibilités offertes par l'étude de la concentration en tritium des eaux de la galerie de Signes aval. Trois types d'aquifères ont été ainsi mis en évidence :

- un aquifère superficiel, en liaison directe avec les conditions météorologiques ;
- un aquifère profond, où la circulation se fait très lentement, et dont la teneur en tritium, inférieure à 20 unités, date les eaux de plus de 15 ans ;
- un aquifère intermédiaire qui procède des deux précédents, où prédomine tantôt l'un, tantôt l'autre suivant les saisons.

Des prélèvements ont été effectués depuis 1966 à intervalles réguliers aux différents exutoires du massif. Les analyses permettent de mettre en évidence trois familles d'exutoires correspondant aux trois types d'aquifères reconnus sur le trajet de la galerie :

- les eaux qui se tiennent au-dessus de 100 U.T. : ce sont les eaux de la retombée nord de l'Agnis, avec en plus la source du Raby (famille 1) ;
- les eaux qui se maintiennent au-dessous de 80 U.T., et même parfois descendent en dessous de 20 U.T. Ce sont les eaux qui sortent du flanc sud de l'Agnis en période normale (famille 2) ;
- enfin les eaux du fond des galeries de Signes aval et Signes amont dont la concentration est inférieure à 10 U. T. (famille 3).

Afin d'avoir une idée du renouvellement des réserves, faisons la comparaison entre les teneurs en tritium des précipitations et des eaux des différents exutoires.

On a porté graphiquement sur un papier semi-logarithmique (fig. 59), l'évolution de la teneur en tritium des précipitations observées à Marseille - Marignane, de la source du Caramy (famille 1), de la source de Beaupré (famille 2) et des eaux du fond de la galerie de Signes aval (famille 3).

On constate qu'il y a similitude d'évolution entre les teneurs en tritium des précipitations et de la source du Caramy. D'autre part, étant donné que ce sont principalement les pluies d'automne et d'hiver qui rechargent les nappes aquifères, on en déduit que les eaux du Caramy et par conséquent, les eaux issues du flanc nord du massif de l'Agnis ont un cycle annuel.

Les eaux en provenance du cœur du massif (fond de la galerie de Signes aval, famille 3), n'ont aucune liaison avec les précipitations actuelles. Leurs teneurs en tritium, inférieures à 10 U. T., indiquent qu'elles se sont infiltrées avant 1954.

Enfin, les eaux de la source de Beaupré (famille 2) subissent à la fois l'influence du cycle hydrologique et celle des eaux profondes. On remarque que les eaux du Caramy ont une concentration 3 fois supérieure à celle de Beaupré (les deux courbes sont à peu près parallèles, mais décalées de Log 3 sur la graphique).

Cependant il serait simpliste de dire que les eaux du flanc sud sont constituées pour un tiers d'eau du cycle hydrologique annuel (type Caramy, famille 1) et de deux tiers d'eau de famille 3. En réalité, il est notable que des eaux moins "vieilles" interviennent également dans le mélange.

Les mesures de concentration en tritium ne sont faites que depuis 1966. La période n'est pas suffisante pour pouvoir établir des corrélations entre la teneur en tritium des précipitations et celle d'un type d'aquifère non influencé dont l'âge est supérieur à 6 ans. C'est le cas des eaux du cœur du massif. Seule une augmentation continue de la teneur en tritium prouverait que les eaux ont été apportées par la pluie après les expériences thermonucléaires de 1954.

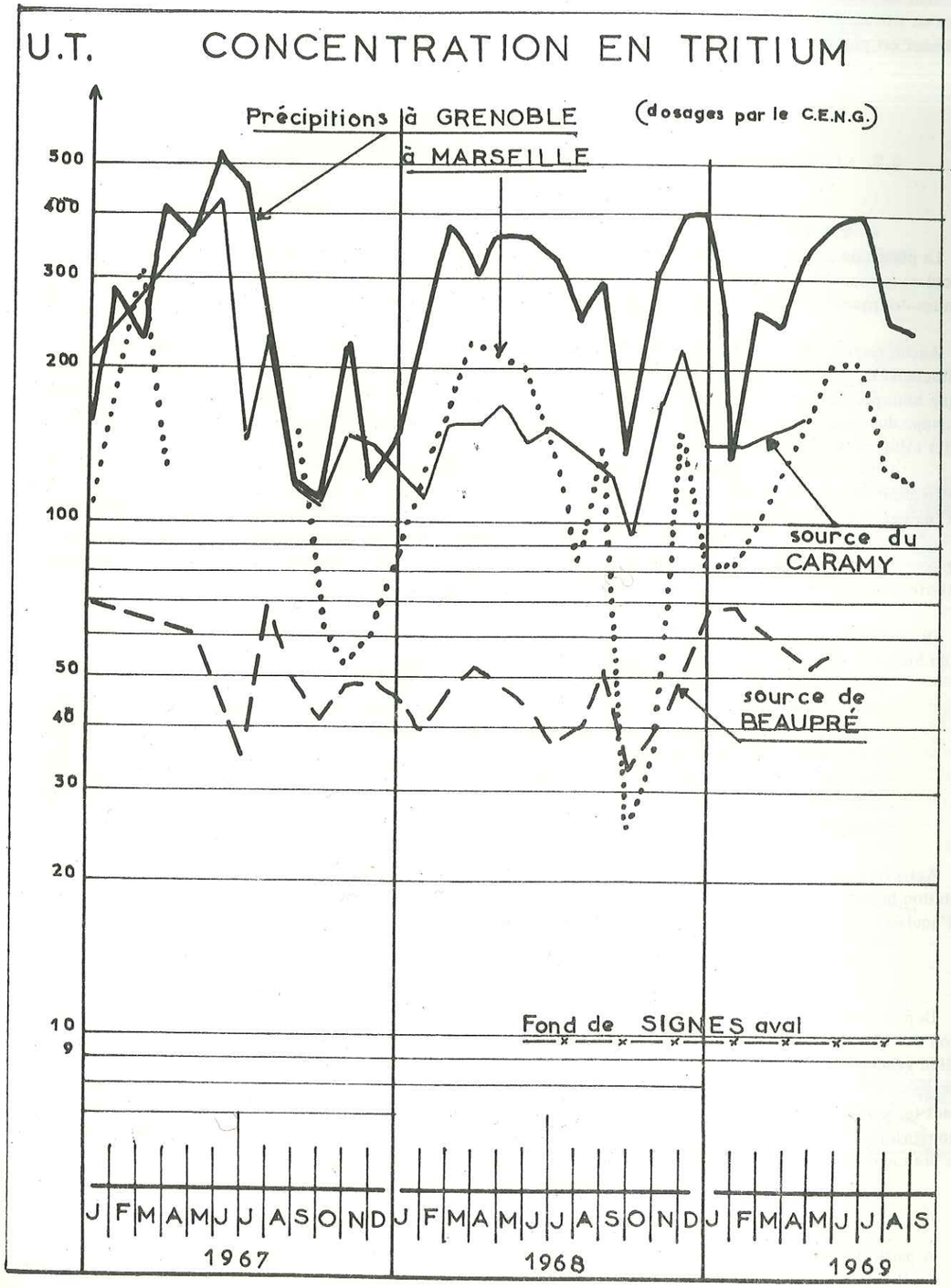
Ainsi, dans l'état actuel il n'est pas possible d'avoir une idée de la possibilité de renouvellement des eaux issues du cœur du massif.

2.1.2.3. - Conclusion

L'aquifère qui alimente les exutoires de la plaine de Signes a été bien défini par les études hydrochimiques.

Les eaux qui sortent des sources et de l'exhaure de la galerie sont formées par un mélange variable entre un aquifère profond de type "fond de Signes aval" et un aquifère lié au cycle annuel, ces deux aquifères passant en fait de l'un à l'autre sans discontinuité. Cette distinction artificielle provient uniquement du souci de classification des phénomènes pour faciliter la compréhension.

Fig 59



Ces eaux sont bicarbonatées calciques et magnésiennes ; le TH est faible (23° français à Beaupré en étiage). Les eaux sont potables : la source du Gapeau est d'ailleurs captée à l'un des griffons par une société d'embouteillage. L'origine des eaux est évidente : c'est le massif dolomitique d'Agnis qui alimente ces sources, par l'intermédiaire cependant de la bande de terrains crétacés calcaires. A l'étiage il y a prépondérance des apports d'Agnis : concentration en tritium faible, eaux magnésiennes. En période de crue, l'apport par les terrains calcaires augmente, l'écoulement est plus rapide d'où une concentration en tritium plus élevée.

2.2. - PIEZOMETRIE DE LA PLAINE DE SIGNES

2.2.1. - Généralités

La plaine de Signes est constituée à partir de deux unités géologiques bien distinctes : les calcaires crétacés au Nord et les couches triasiques au Sud ; ces deux formations étant limitées elles-mêmes au Nord et au Sud par les dolomies des massifs d'Agnis et du Beausset. Les contacts entre ces unités se font tous par failles.

Aucun essai de perméabilité n'a été effectué dans les terrains du Trias. Cependant, les calcaires compacts du Muschelkalk, les argiles, gypses et dolomies du Keuper témoignent d'une étanchéité suffisante pour être considérés comme hémiperméables vis-à-vis des terrains crétacés. En effet, le Trias fait en quelque sorte office de déversoir à la nappe du Crétacé qui s'écoule au niveau des points bas du barrage par les sources du Gapeau, de Beaupré et sous les alluvions de la plaine de Signes.

- Les dolomies néojurassiques jouent des rôles hydrologiques très différents suivant que l'on considère celles qui affleurent au Nord de la plaine (galerie de Signes aval), et celles que l'on retrouve sous les alluvions dans le Sud de la plaine. Nous y reviendrons.
- Le Crétacé coincé entre le massif jurassique d'Agnis et le Trias imperméable du Gapeau, a été rapidement considéré comme un drain vis-à-vis du massif, drain pouvant être plus intéressant dans la recherche d'eau que la galerie elle-même, du fait de sa grande surface de contact avec la masse des dolomies.

Des sondages de reconnaissance, S C1 et S C2 à proximité de l'entrée de la galerie et S C4 plus à l'Est près de Bastide Blanche, ont permis d'établir la coupe suivante :

- des alluvions et colluvions dont l'épaisseur varie de 0,50 à 20 m ;
- une série de calcaires plus ou moins fissurés, allant de la micrite à Millioles plus ou moins argileuse au calcaire récifal à rudistes pour le sondage 4, avec des niveaux de calcaire gréseux dans les S C1 et S C2, à rattacher à l'Angoumien ;
- des couches de marne sombre, d'épaisseur variable qui appartiennent, soit encore à l'Angoumien, soit déjà au Ligérien. Quelques essais réalisés sur le sondage S C4 ont donné une valeur de la perméabilité comprise entre 10^{-4} et 10^{-5} m/s suivant les horizons testés.

Actuellement l'aquifère de Signes est peu exploité par des puits qui servent en partie à l'irrigation et à l'alimentation humaine. Ils captent soit la nappe des calcaires, soit une nappe dans les éboulis et les alluvions alimentés par l'aquifère crétacé (et un peu par la pluviométrie locale).

2.2.2. - Mesures piézométriques

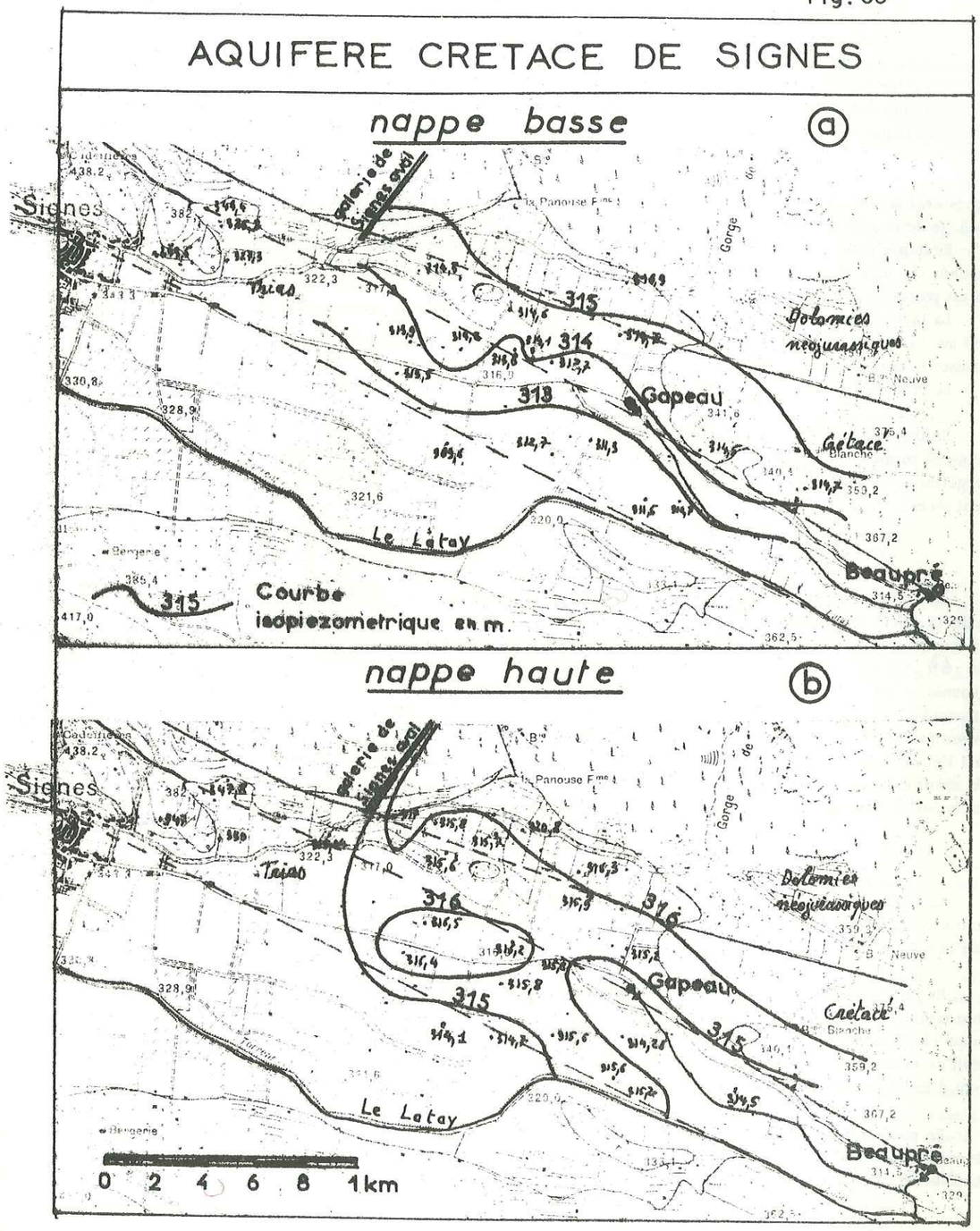
Depuis 1964, la S. C. P. procède à des mesures mensuelles sur les puits et piézomètres de la plaine de Signes. Si l'on suit l'évolution piézométrique des puits avec la pluviométrie, on constate que les maximums piézométriques ont lieu généralement en mars - avril, c'est-à-dire après les pluies d'automne et d'hiver qui provoquent la recharge des nappes. Les minimums piézométriques s'étendent d'août à octobre, et les amplitudes piézométriques varient suivant les points de 1 à 4 mètres. On a assisté, depuis 1964 et jusqu'en fin 1968, à une baisse continue des minimums piézométriques, baisse qui semble liée en grande partie au déficit pluviométrique, et aussi, pour certains, à l'influence drainante de la galerie. Depuis l'automne et l'hiver pluvieux de 1968 - 1969 la baisse paraît stabilisée.

2.2.3. - Cartes piézométriques

A partir des relevés des niveaux piézométriques, des cartes de la nappe ont été établies parmi lesquelles on a choisi celles qui paraissent les plus représentatives, c'est-à-dire :

- carte de nappe basse de septembre 1969, le débit moyen du Gapeau étant de 30 l/s (fig. 60 a) ;
- carte de nappe haute de mars 1969, le débit moyen du Gapeau étant de 140 l/s (fig. 60 b).

Fig. 60



La nappe s'écoule du versant jurassique vers la plaine. Elle est manifestement alimentée par l'aquifère contenu dans les calcaires et les dolomies du Jurassique supérieur. Elle se déverse, au travers de la faille de la Marseillaise, à la fois dans les calcaires du Crétacé supérieur et dans les alluvions plus ou moins épaisses de la plaine.

Ces alluvions étant très limoneuses par endroits, leur transmissivité est plus faible que celle des calcaires crétacés et des dolomies fissurées. C'est ce qui expliquait, avant le percement de la galerie, les inondations fréquentes en nappe haute dans les moindres dépressions de la plaine et surtout aux abords de l'actuel chantier à la fenêtre de Signes aval. La nappe se trouvant actuellement, au maximum, au niveau du radier de la galerie qui fait office de drain, le Crétacé suffit à "éponger" le flux aquifère venant du massif. Donc en nappe haute, la galerie de Signes aval draine ; par contre, en période de basses eaux le niveau de la nappe ne semble pas influencé par le drainage de la galerie, qui ne se fait sentir qu'à partir d'une certaine profondeur (P.M. 1000).

En nappe haute, on remarque une alimentation importante par le Latay et un drainage sensible au niveau du Gapeau. On note également un bombement anormal de la surface piézométrique au niveau des puits 611 - 612 - 613 qui est probablement dû à la présence du contact Crétacé - Trias.

La lame d'eau qui déborde au-dessus du barrage triasique imprègne les alluvions de transmissivité plus faible, d'où une vitesse d'écoulement plus faible, élévation du niveau piézométrique qui peut même en période de crue dépasser la cote du terrain naturel.

Le gradient hydraulique, calculé en nappe basse est en moyenne de 4 ‰, ce qui est relativement fort.

Enfin, au Sud de la plaine, après avoir circulé sur le Trias, la nappe alluviale plonge rapidement à travers les dolomies perméables du massif du Beausset. Cette partie de la plaine ne comporte aucun puits (fig. 52) ; les seules margelles aperçues concernent des citernes ; la galerie du Beausset (branche de Toulon-Ouest, figure 1) est absolument sèche.

2.2.4. - Amplitude du battement de la nappe

La comparaison des nappes hautes et basses permet d'établir la carte d'isoamplitude des variations annuelles. Celle-ci donne les résultats suivants : les variations annuelles vont de 1 à plus de 4 m, suivant les endroits, les différences les plus sensibles se situant sur des puits implantés à proximité du Latay (puits 624 : $\Delta h > 4,60$ m ; puits 625 : $\Delta h > 4,60$). D'une façon générale les amplitudes les plus fortes se rencontrent au Sud de la route Signes - Méounes, c'est-à-dire pratiquement au Sud du contact Crétacé - Trias, ce qui semble indiquer que cette nappe n'est alimentée à l'étiage que par le déversement de la nappe du Crétacé, juste écrêtée par le Trias. L'évolution des piézomètres 606 et 607 est liée à celle du Latay. En hiver, lorsque le Latay est en crue, la nappe est très haute alors qu'à l'étiage, le Latay étant sec, la nappe, "aspirée" par un fond perméable - les dolomies du Beausset -, baisse très sensiblement d'où des amplitudes parfois supérieures à 4 m (piézomètre 606). Il est d'ailleurs intéressant de noter que depuis le rejet de l'exhaure de la galerie de Signes au Latay en 1968, les étiages sont beaucoup moins sévères.

2.2.5. - Débit de la nappe

La formule de Dupuit : $Q = K H i L$ permet d'évaluer le débit Q d'une nappe si l'on connaît la largeur L du front d'écoulement, l'épaisseur H de l'aquifère, la perméabilité K des alluvions (ou la transmissivité K H) et la pente i de la surface piézométrique.

En faisant toutes les réserves d'usage (aquifère fissuré du Crétacé et milieu alluvial hétérogène - variations de transmissivité constatées lors des pompages) on peut essayer pour se fixer les idées, de calculer le débit de la nappe en période d'étiage sans attacher à la valeur du débit trouvé plus de précision qu'il n'en a ; nous parlons ici du débit de la nappe qui, traversant les alluvions de la plaine de Signes, se déverse dans les dolomies du Beausset. Le front d'écoulement s'étend donc de la source du Gapeau au village de Signes.

En prenant L = 2 000 m ; $K H = 5$ à $10 \cdot 10^{-3}$ m^2/s et i = 4 ‰, on obtient Q = 40 à 80 l/s, débit à rapprocher de celui drainé par le Gapeau et les autres sources (35 à 40 l/s). Le débit déversé par la nappe vers l'aquifère du Beausset serait donc du même ordre ou à peine supérieur à celui drainé par les sources.

2.3. - CARACTERISTIQUES DE L'AQUIFERE

2.3.1. - Limites de l'aquifère crétacé

2.3.1.1. - Epaisseur

Les trois sondages carottés ont rencontré un mur marneux d'épaisseur variant de 5 m (S C1, S C4) à 30 m (S C 2), à des profondeurs de 50 m pour S C 1 et S C 2 et 100 m pour S C 4. Ces bancs marneux appartiennent sans doute à l'étage Angoumien, mais rien ne permet de dire qu'ils sont un niveau constant de cet étage. L'Angoumien comporte probablement plusieurs niveaux marneux et les sondages auraient rencontré des niveaux non correspondants, à moins bien sûr qu'il ne s'agisse de variations de faciès très rapides, ce qui est concevable dans les conditions écologiques de la mer turonienne.

De toute façon, étant donné la tectonique cassante même à petite échelle des terrains crétacés, aucun de ces niveaux ne peut plus former de mur imperméable et l'on peut considérer qu'il n'y a qu'un seul aquifère dans le Crétacé de Signes. Ceci est d'autant plus vrai que l'on se dirige vers l'Ouest où le Crétacé est disloqué entre les grandes failles de la Marseillaise et de Méounes.

Le véritable mur serait constitué par les marnes ligériennes (Turonien inférieur) que les sondages ne semblent pas avoir recoupées. Nous prendrons pour épaisseur de l'aquifère la valeur de 100 m qui représente une valeur par défaut de l'épaisseur réelle, qui varie d'ailleurs d'un endroit à l'autre par le jeu des failles (voir les coupes géologiques en annexe). Cette valeur correspond de plus à la tranche utile explorée par les sondages.

2.3.1.2. - Extension en plan

L'extension en plan du réservoir crétacé est mieux connue que son extension en profondeur. La limite sud, comme nous l'avons vue, est le Trias qui forme une barrière quasi rectiligne de direction WNW - ESE. Au Nord, le contact avec les dolomies néojurassiques, par l'intermédiaire de la faille de la Marseillaise, ne semble pas former une barrière au point de vue hydrologie. L'extension vers l'Est est très grande puisque les terrains crétacés, toujours essentiellement calcaires, se poursuivent jusqu'à Méounes. A l'Ouest, le Crétacé se termine en biseau entre le Trias et les calcaires et calcaires marneux du Jurassique moyen, terrains relativement imperméables, mais desquels jaillit la source du Raby (origine tectonique).

2.3.1.3. - Volume d'eau stocké dans le Crétacé

Le calcul d'estimation est effectué de la manière suivante :
Nous calculons la surface d'affleurement des terrains crétacés intéressés par les forages d'exploitation, prenons pour épaisseur de l'aquifère 100 m et comme porosité utile le chiffre obtenu lors des essais dans les forages S 1 et S 2, soit 1 %.

La surface du Crétacé à l'Ouest du méridien situé à mi-chemin entre le sondage S 4 et la source de Beaupré est de 1 km^2. Cette surface correspond au domaine qui serait influencé par les pompages dans S 1, S 2 et S 4, en supposant que seul le Crétacé peut donner rapidement de l'eau. Le volume stocké serait donc de l'ordre 1 M m^3 ; la plus grande partie de ce volume n'est exploitable que par pompage puisqu'elle se situe sous le niveau de débordement de la barrière triasique.

Les mesures faites à partir des courbes de tarissement du Gapeau et de Signes aval (2.1.1.6.) font état de volumes en réserve, en début de tarissement, de 4,5 M m^3 pour l'ensemble galerie + Gapeau et de 3 M m^3 pour la galerie seule. Ces résultats ne concernent que la tranche utile de la nappe, c'est-à-dire celle située au-dessus du niveau de la barrière de débordement. On voit immédiatement que le volume stocké utilisable se situe en grande partie dans les dolomies jurassiques, dont les caractéristiques hydrodynamiques doivent être proches de celles du Crétacé.

2.3.2. - Caractéristiques hydrodynamiques

Les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère, transmissivité, perméabilité et porosité utile ont été déterminées grâce à des essais de pompage réalisés sur les forages S 1 et S 2 au cours de l'été 1968 et sur le forage S 4 au cours des mois de juillet et septembre 1969.

2.3.2.1. - Essais de 1968

Des essais de pompage couplés ont été pratiqué sur les forages S 1 et S 2 situés dans la plaine de Signes près de l'entrée de la galerie de Signes aval au cours de l'été 1968. Durant ces essais, le débit global était de 90 l/s ; la totalité des volumes extraits a été de 135 000 m^3. Les rabattements de niveaux au bout de 192 heures de pompage continu s'établissaient à 5,74 m pour un débit de 55 l/s sur S 1 et à 11,64 m pour un débit de 35 l/s sur S 2 (pour ce dernier forage, le rabattement se faisait dans les alluvions dont l'épaisseur approche 20 m). Les puits avoisinants ont été partiellement asséchés. Les sources du Gapeau ont été sensiblement influencées, allant jusqu'au tarissement du griffon de la source de la "Roche Bleue" (société d'embouteillage).

L'interprétation des courbes de descente et de remontée du niveau de l'eau dans les puits et dans les piézomètres permet d'avancer les valeurs moyennes suivantes :

transmissivité K H = 10 . 10^{-3} m^2/s

porosité utile S ≠ 1 %.

2.3.2.2. - Essai de pompage n° 1 de juillet 1969

2.3.2.2.1. - Déroulement de l'essai et observations

L'essai de pompage entrepris sur le forage S 4 du 28 juillet à un débit moyen de 60 l/s a permis de faire les constatations suivantes :

après 72 heures d'essai, on observe une baisse importante des niveaux piézométriques : 11 m sur S 4 ; 7 m sur le piézomètre profond S C4 situé à 20 m en amont et 6,50 m sur le piézomètre court S P 4 situé à 40 m en aval.

L'extension du cône d'influence est très importante puisque l'on a sur le piézomètre S C 2, situé à 1 700 m au Nord Ouest du forage S 4, une baisse de 0,05 m environ. Il n'y a pas de tendance à la stabilisation sur les piézomètres proches.

Les sources de Lou Pracabat qui débitaient avant l'essai 5 à 6 l/s se sont asséchées dans le courant de la soirée du 28 juillet et le débit du Gapeau a baissé d'une vingtaine de litres/seconde environ en trois jours.

Par contre, aucune variation n'a été décelée sur la source de Beaupré (voir 2.1.1.2.).

2.3.2.2.2. - Dépouillement et interprétation de l'essai

On peut étudier l'évolution du rabattement au cours du temps à l'aide de la relation de Jacob (simplification logarithmique de la relation de Theis).

$$\Delta h = \frac{2,3\,Q}{4\,\pi\,K\,H} \log 2,25 \frac{K\,H\,t}{r^2\,S} \qquad (1)$$

où :

h est le rabattement à la distance r du puits (m)
Q le débit d'exhaure (m^3/s)
K la perméabilité (m/s)
H l'épaisseur de l'aquifère (m)
S la porosité utile (pourcentage)
t le temps écoulé depuis le début du pompage (s)

En portant sur un papier semi-logarithmique les rabattements en fonction du logarithme du temps, les points doivent théoriquement s'aligner - cette relation n'est valable qu'au bout d'un temps suffisamment long de pompage. Il faut en effet que le terme :

$$\frac{2,25\,K\,H\,t}{r^2\,S}$$

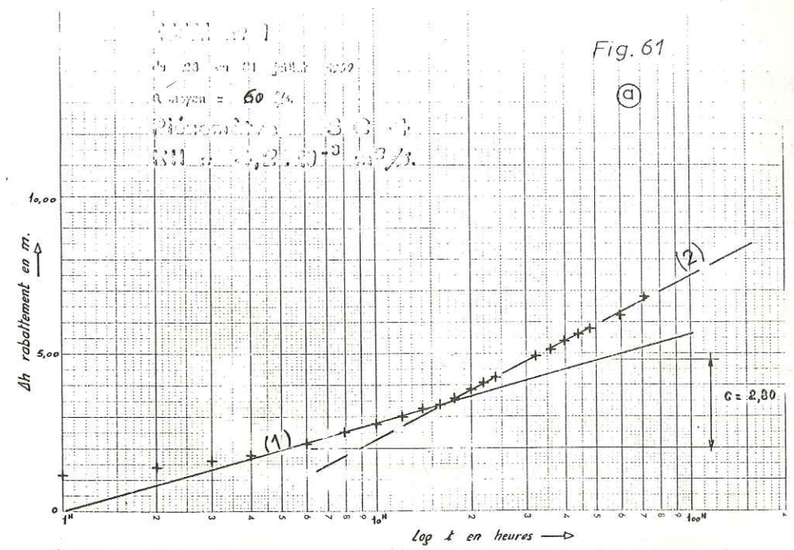
soit supérieur à 10 - c'est ce qui a été fait pour les piézomètres situés de part et d'autre du forage (voir la courbe pour le piézomètre S C 4, figure 61 a).

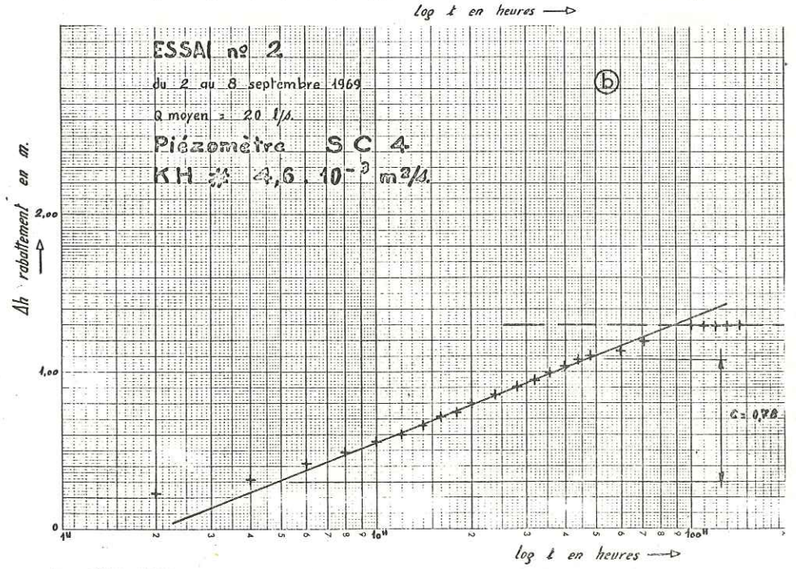
On constate que dans la réalité on a deux segments de droite (1 et 2) ; le segment 2 ayant une pente double de celle du segment 1, le point d'inflexion se situant après 18 heures environ de pompage. On peut penser que l'effet d'une limite imperméable s'est fait sentir très rapidement après le début de l'essai.

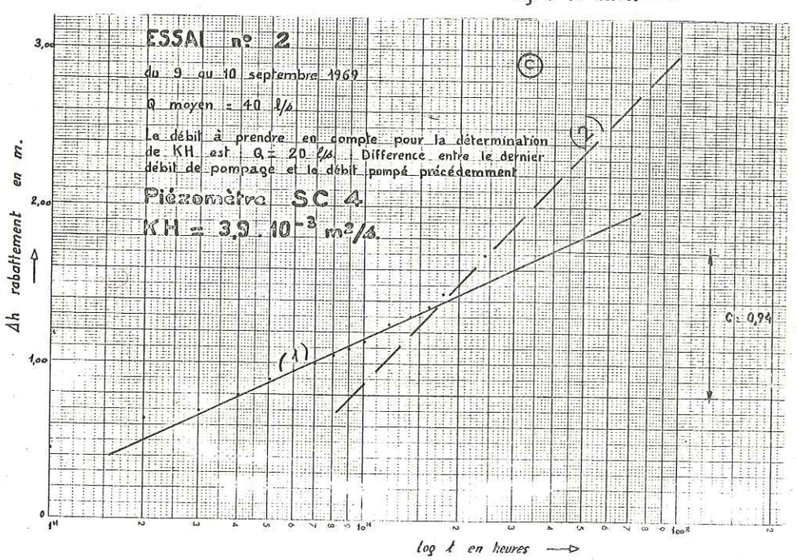
2.3.2.2.3. - Détermination de la transmissivité et de la porosité utile

La détermination des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère se fait sur le premier segment. Soit C la variation du rabattement pour un cycle logarithmique de t. L'équation (1) devient :

Fig. 61







$$K H = \frac{2,3\,Q}{4\,\pi\,C}$$

La transmissivité obtenue pour S C4 et S P4 s'élève à $4,3 \cdot 10^{-3}$ m²/s.
Si on admet une épaisseur d'aquifère de 100 m, on aura une perméabilité moyenne de $5 \cdot 10^{-5}$ m/s. Cette valeur ne correspond à rien de réel dans des calcaires du type karstique puisque les circulations se font par des chenaux de forte perméabilité.

En prolongeant la première partie de la droite jusqu'à son intersection avec l'axe des temps, on obtient une valeur t_o de t correspondant à un rabattement nul ; dans ce cas, d'après l'équation (1) on a :

$$\log \frac{2,25\,K H\,t_o}{r^2\,S} = 0 \quad \text{donc } S = 2,25\,K H\,\frac{t_o}{r^2}$$

on obtient un cœfficient d'écoulement qui varie entre 8 % (S C4) et 4 % (S P4). Ces valeurs paraissent anormalement élevées. Elles n'ont prabablement qu'une valeur très localisée.

Après arrêt du pompage, on peut dire que la remontée était achevée après trois jours, les sources du Gapeau et de Lou Pracabat ayant retrouvé leur débit d'origine (respectivement 34 l/s et 5 à 6 l/s).

L'influence de la limite imperméable rend l'interprétation de la remontée assez délicate et ne permet pas de mieux préciser les résultats obtenus à la descente.

Il ne semble pas, compte tenu des observations précédentes, que la nappe soit capable de fournir de façon continue des débits très élevés.

2.3.2.3. - Essai de pompage n° 2 de septembre 1969

Afin de compléter les observations et les résultats obtenus sur le premier essai, un second essai a été réalisé sur le forage S 4 au début du mois de septembre.

2.3.2.3.1. - Déroulement de l'essai et observations

Cet essai a commencé le 2 septembre et s'est poursuivi jusqu'au 9 du mois à un débit de 20 l/s, puis on est passé à un débit de 40 l/s qui a été maintenu pendant 24 heures.

Après trois jours de pompage à 20 l/s, on peut faire les observations suivantes :

- les rabattements observés sur le forage S 4 et les piézomètres S C 4 et S P 4 sont respectivement de 1,60 m, 1,20 m et 1,10 m, soit environ 5 fois moins importants que ceux observés lors de l'essai n° 1 après la même durée de pompage. On observe une nette tendance à la stabilisation des niveaux piézométriques. Il n'y a pas d'influence notable sur les points plus éloignés (forage Guégou, S C 2). On observe une baisse régulière du débit des sources de Lou Pracabat et une baisse de 5 l/s du Gapeau. Il n'y a toujours aucune influence sur la source de Beaupré.

2.3.2.3.2. - Dépouillement et interprétation de l'essai

Le dépouillement par la méthode de Jacob des mesures effectuées sur les piézomètres (fig. 61 b) permet de calculer une transmissivité K H voisine de 5.10^{-3} m²/s.

La stabilisation des niveaux après 100 heures de pompage nous permet de calculer la perméabilité par la formule de Dupuit valable en régime permanent. Cette formule traduit la forme du cône de rabattement. Utilisée d'abord à partir des valeurs du rabattement dans le puits et dans un piézomètre, puis à partir des deux piézomètres, les valeurs de transmissivité correspondantes vont de 40.10^{-3} m²/s à 15.10^{-3}m²/s, c'est-à-dire qu'elles sont supérieures de 3 à 8 fois aux valeurs trouvées en régime transitoire.

Remarque : le dépouillement de cet essai ne fait pas apparaître sur les graphiques des piézomètres un changement de pente comme on l'avait observé lors de l'essai n° 1 après 18 heures de pompage.

Pour lever cette contradiction, il a été décidé de poursuivre l'essai pendant 24 heures à un débit de 40 l/s ; la nappe ayant été préalablement à peu près stabilisée, nous avons pu l'interpréter comme un nouveau pompage sur une nappe non influencée (fig. 61 c). On retrouve après 18 heures à 40 l/s le point d'inflexion. Il faut remarquer qu'après une dizaine d'heures de pompage à 40 l/s, les sources de Lou Pracabat ont tari.

Explication : les sources de Lou Pracabat constituent un déversement de la nappe du Crétacé au contact avec le Trias "imperméable".

Pour les faibles débits (20 l/s) le rabattement n'est pas suffisant pour provoquer le décrochement de la nappe au niveau des sources ; par contre, dès que le débit augmente (40 l/s ou 60 l/s), les rabattements deviennent plus importants ; il y a tarissement des sources, donc décrochement de la nappe à ce niveau et, dans ce cas, influence de la limite imperméable.

Le schéma ci-après explique le phénomène (fig. 62).

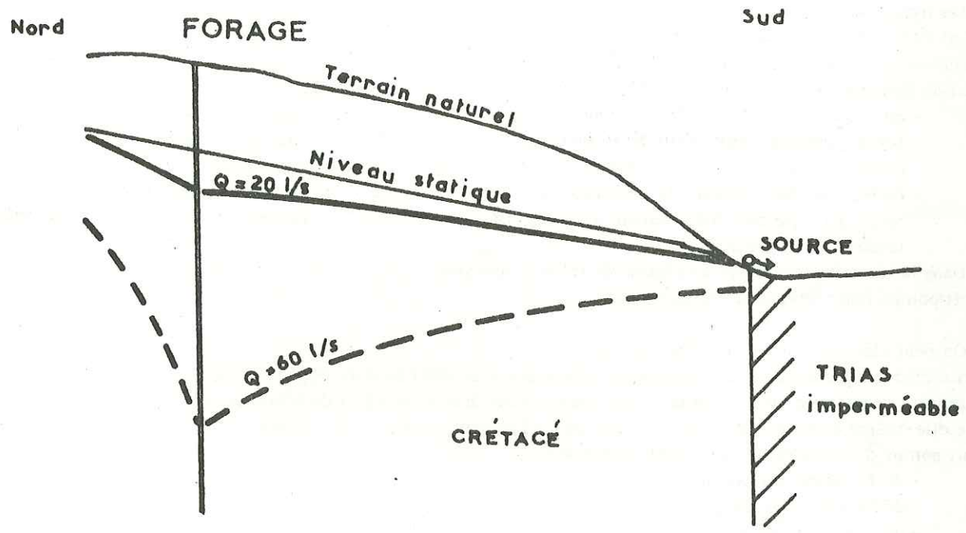


Fig. 62

En résumé, cet essai confirme les résultats obtenus précédemment, bien que la valeur de la transmissivité puisse être considérée comme au moins égale à $10 \cdot 10^{-3}$ m²/s suite aux calculs effectués en régime permanent. L'absence de liaison entre l'aquifère exploité et la source de Beaupré est une fois de plus confirmée.

On ne doit pas espérer pomper sur ce forage un débit d'exploitation supérieur à 20 l/s ; on a vu que pour des débits supérieurs les rabattements, compte tenu de l'effet de limite "imperméable", augmentent dans des proportions incompatibles avec un pompage d'exploitation de longue durée.

3. - RESSOURCES EXPLOITABLES

L'étude hydrogéologique de la plaine de Signes a été menée dans le but d'une exploitation de la nappe aquifère en période d'étiage pour l'alimentation du littoral varois. Parallèlement à cette étude, la S.C.P. s'intéressait à toutes les ressources en eau offertes par le massif d'Agnis (versant nord et versant sud). Pour étudier l'hydrologie de la plaine, nous avons été amené à considérer ses relations avec le reste du massif. De même, dès lors que nous récapitulons les ressources exploitables, il nous faut tenir compte des interactions entre les différents exutoires - artificiels ou naturels - de la plaine de Signes.

C'est pourquoi nous présenterons les possibilités d'exploitation offertes, à la fois par les pompages dans la plaine et par le détournement d'une partie du débit d'exhaure de la galerie de Signes aval rejeté en temps normal dans le Gapeau.

3.1. - DEBITS DE L'AQUIFERE CRETACE DE SIGNES

3.1.1. - Influence du pompage sur la piézométrie

On a cherché à voir quelle serait l'influence sur les niveaux piézométriques d'un pompage continu pendant trois mois, au débit total de 120 l/s répartis en 60 l/s sur S 1 ; 40 l/s sur S 2 et 20 l/s sur S 4.

Les hypothèses de calcul sont les suivantes :
- au Sud du Crétacé, le Trias est imperméable et constitue une frontière à l'écoulement ;
- la transmissivité moyenne est de 5.10^{-3} m^2/s et la porosité utile de 1 % ;
- on est de plus obligé de faire une hypothèse sur le contact Crétacé - Jurassique :
  + ou bien ce contact est suffisamment perméable pour que le débit "appelé" par le pompage soit fourni instantanément ; autrement dit le Jurassique a une transmissivité semblable à celle du Crétacé et le rabattement se propage à l'intérieur du massif. C'est une hypothèse optimiste,
  + ou bien la transmissivité du Jurassique est nettement inférieure à celle du Crétacé et le rabattement ne se propage que très difficilement à l'intérieur du massif. Le débit pompé est alors prélevé en presque totalité sur le Crétacé.

Dans la réalité on obtiendra un régime de rabattement intermédiaire, une partie certainement non négligeable du débit pompé étant fournie par le Jurassique.

On peut alors tenir le raisonnement suivant :
La partie du débit prélevée sur le Jurassique le sera d'abord au détriment du Gapeau et de la partie aval de la galerie. A la limite on constatera un asséchement total de ces deux drains. Le débit du Jurassique sera alors prélevé sur la réserve elle-même et donc mobilisera de l'eau qui, autrement, serait restée inemployée. On peut donc penser que le débit pompé dans le Crétacé de Signes proviendra :
- de la réserve du Crétacé,
- de la réserve du Jurassique,
- de la totalité du Gapeau.

Pour un débit réel du Gapeau (Gapeau mesuré + aval galerie) de 40 l/s en étiage, le débit effectif prélevé sur les réserves serait donc de 80 l/s pour 120 l/s pompés. C'est ce qu'il ressort des bilans effectués au paragraphe 3.4. de ce chapitre.

Le schéma de la figure 63 présente les deux cas extrêmes de rabattement correspondant aux deux hypothèses extrêmes présentées plus haut, pour un prélèvement de 80 l/s sur les réserves. Le rabattement réel sera très certainement intermédiaire.

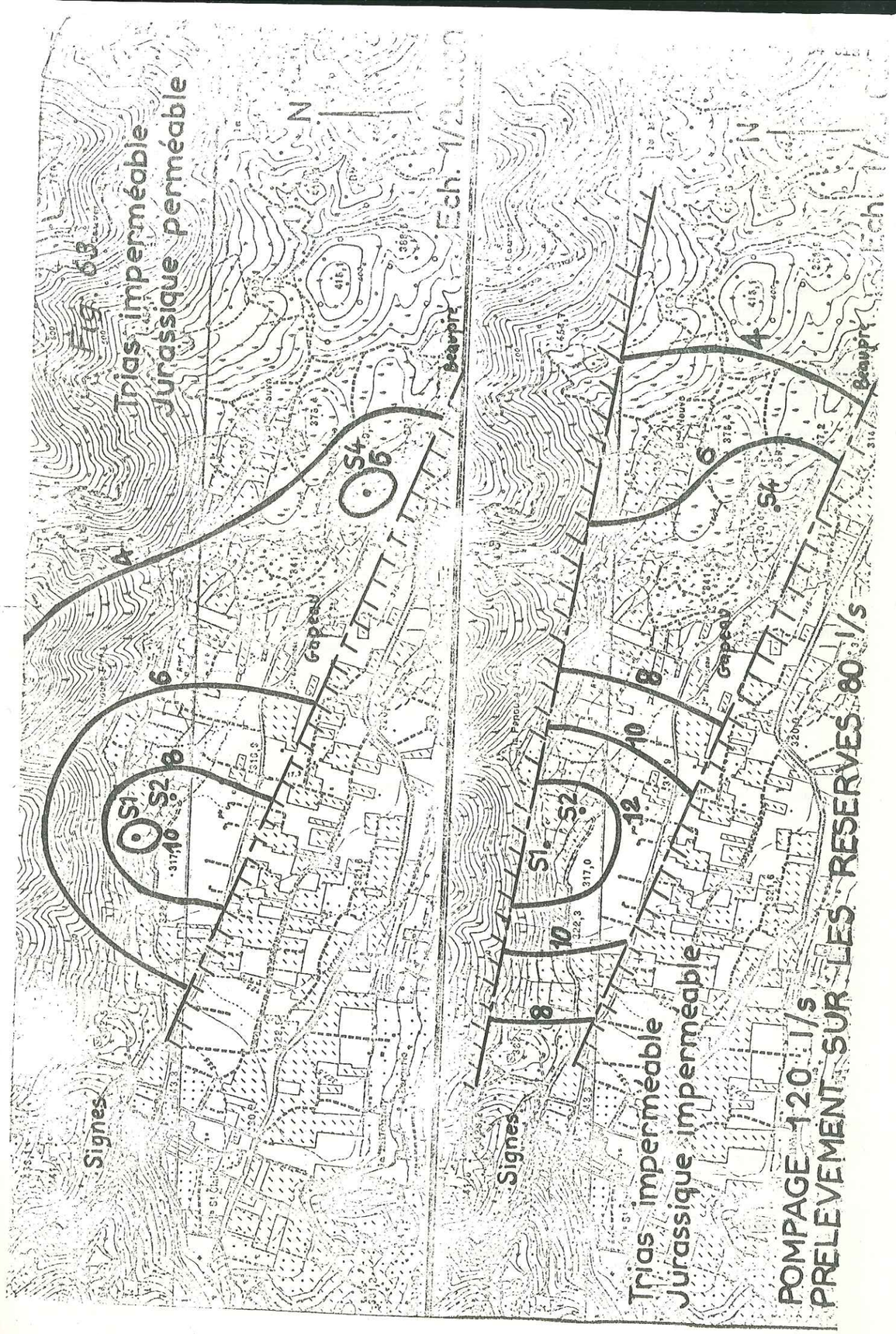
3.1.2. - Reconstitution de la réserve

Le volume prélevé dans l'aquifère crétacé devra être reconstitué pendant l'hiver et le printemps. Il le sera par l'intermédiaire du massif de l'Agnis et par celui de la pluie tombée "in situ". On peut envisager également d'aider à sa reconstitution en injectant dans la nappe crétacée le débit drainé par le fond de la galerie et qui ne servira, en hiver, qu'à augmenter inutilement le débit superficiel du Gapeau. L'injection pourrait se faire assez facilement par les forages eux-mêmes (méthode israëlienne).

L'aquifère crétacé serait alors considéré comme un réservoir naturel utilisable pendant les mois d'étiage, une partie du volume étant mise en réserve à partir des débits d'hiver.

3.1.3. - Réalisation des pompages

Après restitution du débit du Gapeau (40 l/s à l'étiage), restent disponibles 80 l/s qui sont prélevés uniquement sur les réserves (soit 700 000 m^3 en trois mois). Les forages d'exploitation étant peu éloignés de la limite imperméable du Trias, ce sont les réserves représentées par la tranche morte du Crétacé qui fourniront le principal du débit. C'est pourquoi les débits pompés dans chaque forage devront être soigneusement surveillés pour éviter le dépassement du point critique après lequel le niveau dans le puits chute brutalement. Si un forage complémentaire devait être fait dans la plaine de Signes afin d'équilibrer les prélèvements dans la nappe, il devrait être creusé à notre avis, plus près du massif dolomitique où il puiserait dans des réserves plus rapidement renouvelables et où la présence de la limite imperméable ne se ferait pas sentir. D'une manière pratique, il pourrait se situer à mi-chemin entre S 2 et S 4, donc au droit des sources du Gapeau, ce qui permettrait une réalimentation plus facile des utilisateurs touchés par l'asséchement des sources et des puits fermiers, comme l'utilisateur de la Roche Bleue (société d'embouteillage) ou l'élevage de truites par exemple.



3.2. - GALERIE DE SIGNES AVAL

Nous avons vu que le creusement de Signes aval a provoqué une diminution importante des sources du Gapeau. Or, la somme des débits drainés par la galerie et le Gapeau dépasse largement le débit naturel des sources du Gapeau. Il a été possible d'estimer (2.1.1.5. et fig. 57) le gain, variable dans le temps suivant les conditions climatiques, à un débit équivalent à celui de la source de Beaupré.

Il semble donc que l'on puisse dériver à partir de la galerie de Signes aval sans préjudice pour les avaliers un débit équivalent à celui de la source de Beaupré, soit 40 l/s (le reste étant restitué au Gapeau).

- Notons que cette estimation suppose que la nappe n'est pas perturbée par un pompage dans la plaine de Signes -.

Le volume d'eau en cause peut provenir soit d'une meilleure "récupération" par l'aquifère des hautes eaux, ce qui est sans importance pour les avaliers, soit d'une réduction des "fuites" du massif vers le bassin du Beausset.

Par ailleurs, il est intéressant de rappeler que l'essentiel du débit de la galerie est drainé entre les P.M. 0 et 3 000.

Le "fond" de la galerie, creusé dans les calcaires marneux peu perméables, ne fournit presque plus d'eau comme le laissait prévoir le tarissement observé depuis la fin du creusement. L'aquifère exploité par la galerie de 3 600 m semble bien correspondre à une "poche" d'eaux anciennes dont le renouvellement s'opère sur plusieurs années.

3.3. - REALIMENTATION DES SOURCES TARIES ET DES PUITS ASSECHES

On a vu que déjà les essais de pompage de courte durée avaient asséché quelques sources et puits et perturbé l'utilisation qu'on peut en faire actuellement. Il est nécessaire de rappeler que :

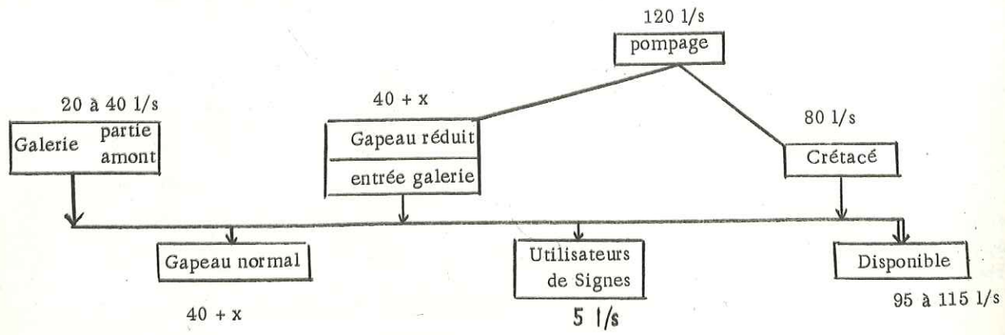
- la source du Gapeau est utilisée par une société d'embouteillage (Roche Bleue) et par un éleveur de truites,
- le débit du Gapeau est utilisé quelques jours par semaine pour l'irrigation,
- quelques puits fermiers sont utilisés pour l'alimentation domestique et pour l'irrigation.

Il faut donc envisager la réalimentation des utilisateurs pour un débit minimum de 30 l/s : on peut tabler en effet sur environ 5 l/s continus pour les puits fermiers, y compris l'embouteillage de la Roche Bleue, et sur 25 l/s environ pour l'élevage des truites. Ce dernier débit peut servir ensuite à l'irrigation.

3.4. - ESSAI DE BILAN DES RESSOURCES UTILISABLES SUR LE VERSANT SUD DE L'AGNIS

Au terme de cette analyse des débits disponibles ou utilisables, on peut se hasarder à dresser un bilan des possibilités d'exploitation des ressources du versant sud de l'Agnis. Les hypothèses sont les suivantes :

- l'exploitation des ressources a lieu pendant 3 mois ;
- on prélève 80 l/s sur les réserves du Crétacé, par pompage ;
- on restitue au Gapeau la totalité de son débit normal avant percement de la galerie (calculée par corrélation avec Beaupré) ;
- on restitue 5 l/s pour les utilisateurs de la nappe de Signes.



Ces chiffres correspondent au minimum disponible pendant 3 mois d'été, l'automne et l'hiver précédents ayant été secs. Dans un cas plus favorable, le débit de la galerie, partie amont (au-delà du P.M. 3 000), peut atteindre 40 l/s. Le débit du Gapeau réduit et de l'entrée de la galerie est supérieur de x litres par seconde à 40 l/s, mais ce gain serait restitué au cours du Gapeau.

4. - CONCLUSIONS

L'étude hydrogéologique de la plaine de Signes avait pour but de déterminer si l'aquifère contenu dans les calcaires du Crétacé était susceptible d'être exploité pendant les mois d'étiage, afin de contribuer à l'alimentation en eau de Toulon et de la côte varoise.

Cette étude a fait l'objet de nombreux rapports qui portaient en fait sur l'hydrologie de l'ensemble du massif d'Agnis. C'est le Cabinet d'Etudes Ruby qui a été chargé par la Société du Canal de Provence de centraliser et de faire toutes les mesures utiles concernant la pluviométrie, les débits, la composition chimique de l'eau des exutoires, l'interprétation des essais de pompages, etc.

Notre travail a consisté :

- à préciser la situation géologique de l'aquifère crétacé et de ses exutoires ;
- à établir la synthèse de tous les travaux et études effectués dans le but d'exploiter les ressources en eau du versant sud de l'Agnis, et plus particulièrement du drain naturel du massif que forment les terrains crétacés de la plaine de Signes.

Les principaux résultats et renseignements sont les suivants :

- les qualités physico-chimiques des eaux fournies par les exutoires du flanc sud de l'Agnis (Gapeau, Beaupré) et par la galerie de Signes aval, correspondent aux qualités requises pour la consommation humaine (2.1.2.1.)

- L'étude de la concentration en tritium des eaux souterraines a permis de classer les eaux du massif de l'Agnis. Celles du versant sud proviennent à la fois d'eaux du cycle hydrologique annuel et d'eaux beaucoup plus anciennes du cœur du massif (calcaires marneux) (2.1.2.2. et chapitre II - 2.4.2.).

- L'étude du tarissement du massif a mis en évidence deux sortes d'écoulement d'eau souterraine : l'écoulement rapide des chenaux et celui plus lent des fissures (2.1.1.6.).

- Le pourcentage du volume tombé sur le bassin versant hydrogéologique par rapport aux volumes sortis aux exutoires est de l'ordre de 30 % (chapitre I - 1.4.). Or, il est possible que les pertes occultes vers le bassin du Beausset atteignent 40 à 80 l/s (à travers les alluvions de la plaine de Signes) (2.2.5.), soit 5 à 10 % du bilan pluviométrique du versant sud de l'Agnis. Le cœfficient d'alimentation des nappes souterraines serait donc plus élevé.

Le Crétacé de Signes constitue en quelque sorte un drain vis-à-vis des formations calcaires et dolomitiques du Jurassique supérieur du massif de l'Agnis. Une nappe aquifère unique s'y développe.

- L'écoulement de la nappe se fait du Nord vers le Sud, c'est-à-dire qu'il y a alimentation par la retombée sud du massif d'Agnis et drainage par les sources du Gapeau, de Beaupré et de Lou Pracabat, ou, plus généralement, déversement de la nappe au contact du Crétacé et du Trias peu perméable (2.2.3.).

- Bien qu'étant dans une situation géologique analogue et ayant des propriétés physico-chimiques identiques, les exutoires du Gapeau et de Beaupré doivent être distingués. En effet, la source de Beaupré n'est influencée, ni par le drainage de la galerie de Signes aval, ni par les pompages effectués dans le Crétacé (2.1.1.2.).

- L'étude des courbes de tarissement montre que les réserves s'élèvent en début d'étiage à 4,4 M m^3 pour l'ensemble galerie + Gapeau et à 2 M m^3 pour Beaupré, ce qui traduit que l'alimentation des exutoires provient principalement du massif jurassique (2.1.1.6.).

- Les caractéristiques hydrodynamiques ont été obtenues par des essais de pompage ; on peut admettre que la transmissivité est en moyenne de 5 à 10. 10^{-3} m^2/s et la porosité utile d'environ 1 % (2.3.2.).

L'épaisseur de l'aquifère est donnée par les trois sondages. Elle varie de 50 à 100 m, mais les niveaux marneux rencontrés en sondage ne semblent pas constituer le véritable mur de l'aquifère.

Exploitation de l'aquifère crétacé de Signes

En se basant sur une exploitation de 3 mois, on peut attendre un débit par pompage simultané sur les trois forages de l'ordre de 120 l/s, sans décrochement brutal des niveaux ; ce qui correspond, compte tenu d'un débit d'étiage de 40 l/s pour le Gapeau, à un prélèvement de 80 l/s sur les réserves (3.1.1.).

Afin d'équilibrer les prélèvements dans la nappe, il faudrait compléter le premier dispositif de captage par un ou deux forages supplémentaires situés entre les sondages S 4 et S 2, de préférence à proximité du massif jurassique, afin que les rabattements ne soient pas perturbés par la limite imperméable triasique (3.1.3., 2.3.2.3.2.).

La recharge de l'aquifère se ferait, à la fin de l'étiage, à partir du débit d'exhaure de la galerie par réinjection dans la nappe par les forages d'exploitation.

En ajoutant le débit capté par la galerie (20 à 40 l/s), et compte tenu de la réalimentation du Gapeau et des puits asséchés, on peut espérer disposer à partir de l'ensemble du versant sud de l'Agnis d'un débit au moins égal à 100 l/s pendant les trois mois d'étiage (3.4.).

L'aquifère crétacé de Signes constitue un réservoir dont l'exploitation peut donner, à l'étiage, un apport supplémentaire non négligeable pour l'alimentation en eau du littoral varois.

CONCLUSIONS SUR LA GEOLOGIE REGIONALE

+ Des directions de fracturation propres à chaque massif ont été mises en évidence à partir des mesures effectuées sur les diaclases, et en photo aérienne sur les fractures d'extension hectométrique à kilométrique.

- Le champ de fracture du massif d'Agnis comporte les directions principales Nord-Sud, Est-Ouest et moins nettement Nord Ouest - Sud Est.

- Le massif de Valbelle-Montrieux présente nettement les directions nord est - sud ouest et nord ouest - sud est, relativement dispersées. Ces résultats concordent avec ceux de R. MONTEAU (n.d) obtenus par l'examen des photos aériennes couvrant la partie orientale du Turonien du Beausset.

Interprétation des résultats

D'après R. MONTEAU , la contrainte principale majeure de l'auréole turonienne du synclinal d'axe est-ouest du Beausset est une contrainte nord, suivant la théorie de la rupture. Les diagrammes polaires établis sur l'extrémité orientale du massif confirment une telle hypothèse. Le cône exempt de fractures correspondant aux contraintes de cisaillement (dont l'angle minimum est de l'ordre de 70°) admet en effet la direction nord-sud pour bissectrice.

x - Pour Agnis, nous avons vu que les directions nord-sud et est-ouest pouvaient s'expliquer suivant deux modèles. L'axe de racourcissement maximum est : soit NW-SE, soit NS.

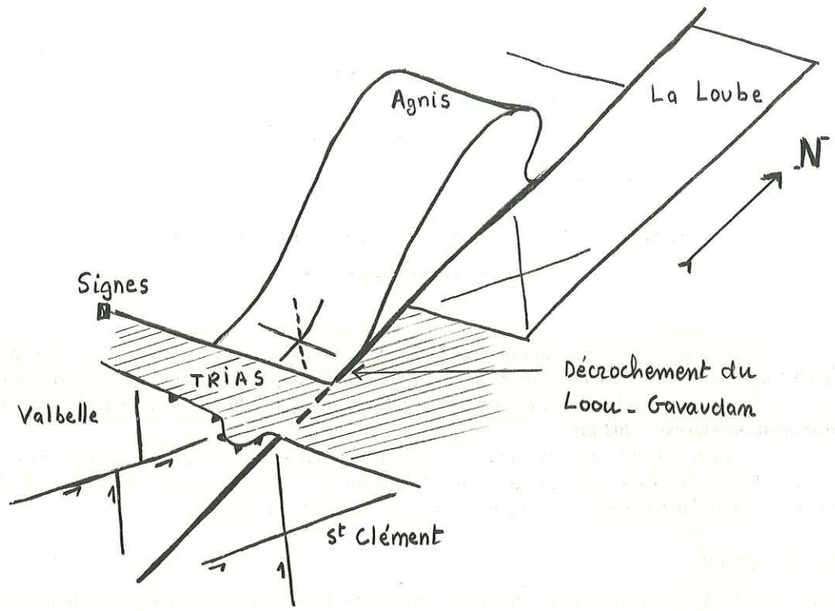
x - Les éléments communs aux deux massifs au point de vue structural sont les suivants :
- tous deux sont chevauchants vers le Nord,
- le décrochement du Loou-Gavaudan est orienté Nord-Sud et décale le compartiment oriental de plus de 5 km.

Pour admettre que la même contrainte sud est responsable de la fracturation des deux massifs, il faut expliquer l'absence quasi complète des directions de cisaillement sur Agnis et l'absence des directions parallèles et perpendiculaires à la poussée sur le massif du Beausset.

x - Pour Agnis, on peut empiriquement proposer l'explication suivante :
la direction guidant le cisaillement sur Valbelle semble être SW-NE (faille de Morières-les-Tournes). Cela concorde avec le fait que c'est le compartiment oriental qui a avancé vers le Nord le long du décrochement du Loou-Gavaudan. La poussée s'exercant sur le compartiment occidental a, par contre, accentué la forme anticlinale du massif d'Agnis en créant un chevauchement (voir schéma).

Ainsi la fracturation SW-NE s'est engagée dans le compartiment oriental et de ce fait ne s'est pas traduite à l'Est, alors que l'on retrouve faiblement la direction associée N 130°. On devrait, suivant cette théorie, retrouver sur les massifs de la Loube-L'Amarron et de Saint-Clément les directions de cisaillement repérées sur le massif du Beausset.

x - Sur le massif de Valbelle, les directions NS et EW se retrouvent sur certains secteurs (Nord du massif, près du chevauchement) et dans les calcaires marneux du Dogger. On peut penser que l'apparition des directions de fracturation est conditionnée en partie par la lithologie.



En partant du postulat suivant :

Le champ de fractures qui apparaît sur un massif rocheux est le témoin peu transformé par les orogenèses ultérieures, des premiers efforts tectoniques auxquels il a été soumis,

il est possible d'attribuer à une même contrainte venant du Sud les fractures qui se développent dans les massifs d'Agnis et du Beausset.

Cette condition suppose donc que les fractures créées sous l'action d'autres contraintes soient guidées par les directions, même potentielles, de la première génération, ces nouvelles contraintes se chargeant d'amplifier certaines cassures préexistantes et de masquer certaines autres.

De nouvelles observations sur les deux massifs (étude des stries dans les galeries à percer) et sur les massifs de la Loube-l'Amarron et de Saint-Clément, permettront peut-être de confirmer ces hypothèses, de déterminer l'époque des premières contraintes et d'établir la chronologie des phases tectoniques suivantes.

CONCLUSIONS GENERALES

Arrivés au terme de cet ouvrage, nous allons essayer en quelques lignes de dégager l'essentiel des résultats auxquels nous sommes parvenus, et de montrer dans quels domaines on pourra effectuer avec profit de nouvelles recherches.

1. - PROBLEMES POSES

Les bases de départ de nos travaux sont : d'une part, l'étude d'une galerie déjà creusée (Signes aval), d'autre part l'étude d'un projet de galeries (Montrieux et Valaury). Les conditions géologiques de leur implantation présentent une analogie stratigraphique et tectonique.

Ainsi le fil directeur de nos recherches a-t-il été de dégager les éléments géologiques et géotechniques qui permettraient - par comparaison avec la galerie de Signes aval - une meilleure prévision des difficultés de creusement des galeries de Montrieux-Valaury. L'étude de ces éléments de comparaison nous a amené à des résultats inédits, dans le domaine de la géologie appliquée, comme dans celui de la géologie régionale (voir conclusions sur la géologie régionale).

Par ailleurs, la Société du Canal de Provence procédait à une étude approfondie de l'hydrogéologie du massif de l'Agnis (traversé par la galerie de Signes aval) et de ses bordures, dans le but d'exploiter les ressources hydrauliques locales afin d'alimenter la ville de Toulon et la côte varoise pendant les mois d'étiage. Nous avons tenté de faire une synthèse de ce sujet - en le limitant au versant sud du massif - à partir des nombreux rapports qui le concernaient et d'observations personnelles.

2. - METHODE D'ETUDE ET RESULTATS

La recherche d'éléments de comparaison entre une galerie achevée et une autre en projet nous a conduit d'abord à établir une relation entre les observations dans la galerie et en surface. Celles-ci ont porté principalement sur l'état de fracturation du massif.

- Plusieurs "indices de fracturation" ont été définis, suivant l'échelle de mesure (II - 2.3.4.). Ces indices ne peuvent être calculés que si l'on a caractérisé la distribution des écartements entre discontinuités de même type. Il ressort de plusieurs milliers de mesures que la distribution caractérisant les écartements entre les diaclases (et également les failles) suit une loi de Galton (II - 2.3.2.2.2.).

- Les orientations des discontinuités sont semblables en profondeur et en surface à toute échelle (II - 4.2.1.3.). Ceci est important pour l'avenir car nous pourrons prévoir, dans le cas d'un massif semblable à Agnis - dalle monoclinale rigide - que les orientations mesurées en surface se retrouveront en profondeur.

Les sondages de reconnaissance traduisent également l'intensité de la fracturation d'un massif. Une étude comparée des divers cœfficients pouvant traduire la fracturation des carottes nous a conduit à choisir le R.Q.D. comme le plus significatif et également le plus simple à calculer (III - 5.2.2.3.3.).

La comparaison des "indices de fracturation" déterminés à partir des mesures en galerie et en sondage met en évidence que la maille de la microfissuration est plus petite en galerie qu'en sondage. L'action des explosifs en galerie doit être responsable de l'ouverture de fissures qui ne sont qu'à l'état potentiel dans la matrice rocheuse. Les conséquences pratiques ne sont pas primordiales car il semble que ce soit les accidents majeurs qui motivent principalement le soutènement.

Ces fissures, dont l'extension est de quelques mètres et dont les plans sont relativement bien réglés, ne s'orientent pas de manière quelconque, mais suivent au contraire les directions de fracturation générale du massif.

Dans la même optique d'une contribution à la réalisation de tunnels futurs, nous avons tenté, à partir des observations faites dans plusieurs galeries du Canal de Provence, un essai de généralisation des données acquises en associant à chaque caractère géologique - déterminable par reconnaissance lors d'un projet - l'influence qu'il aura sur le creusement et les moyens que l'on a d'y remédier le cas échéant (II - 3.).

On trouvera dans le chapitre III l'étude intégrale d'un projet de galeries (Montrieux-Valaury). La méthodologie des études et reconnaissances sur ce projet, ainsi que la publication des principaux résultats aboutissant à un profil en long géologique et géotechnique, doivent pouvoir servir de modèle pour d'autres chantiers de travaux souterrains.

Les recherches pour l'exploitation des eaux du massif d'Agnis et de la plaine de Signes ont fait appel à des méthodes à la fois classiques et originales dont les principaux résultats ont été exposés.

- Les courbes de tarissement des exutoires traduisent deux types d'écoulement des eaux, caractéristiques des terrains karstiques : un écoulement turbulent lié aux chenaux, un écoulement lent lié au fissures.
- Le dosage du tritium dans les eaux des exutoires devait permettre de caractériser le renouvellement des réserves. Il fait apparaître trois sortes d'aquifère :
  . un aquifère profond correspondant aux calcaires marneux du fond de la galerie de Signes aval, dont les eaux ont plus de 15 ans ;
  . un aquifère lié au cycle hydrologique annuel ;
  . un aquifère intermédiaire, formé par le mélange des deux précédents.
- La nappe du Crétacé supérieur de la plaine de Signes, alimentée par le massif d'Agnis, a fait l'objet d'essais de pompage qui ont permis de déterminer ses caractéristiques. Son exploitation par pompage est intéressante, mais nécessitera la réalimentation des puits fermiers et des sources asséchés. L'étude des relations entre les différents exutoires du massif permet de prévoir leurs réactions à un pompage dans l'aquifère qui les alimente ou à un drainage artificiel (galerie de Signes aval).

3. - DOMAINES DE RECHERCHE

Plusieurs des problèmes abordés dans cette étude n'ont pu être entièrement résolus ; ils nécessitent, pour être mieux cernés, soit de nouvelles mesures, soit des interprétations basées sur d'autres études.

Ces recherches porteraient surtout sur des points concernant l'état de fracturation d'un massif rocheux.

La variation des orientations et des écartements dans un même massif en fonction de la lithologie. En galerie cette étude n'a été possible que sur les dolomies. Les diagrammes polaires de la figure 32, portant sur les mesures d'orientations de diaclases effectuées sur deux terrains proches, de lithologie différente, traduisent de grandes différences d'orientations.

Les éléments d'analyse structurale portant sur les microdiscontinuités de faible extension (quelques centimètres), dont les plans sont onduleux et "non pénétrants", par opposition aux diaclases. Cette étude ne peut se faire qu'en galerie, puisque l'origine de ces discontinuités semble être un ébranlement du massif rocheux. Une étude en lame mince permettrait d'atteindre une maille encore plus petite.

L'analyse des écartements entre discontinuités mesurées en surface : sur les diaclases, cela peut se faire sans problème. Sur photo aérienne, il est nécessaire d'étudier une région favorable sans végétation ni dénivelées, où toutes les discontinuités soient visibles (exemple : plateau oriental du Vercors au Sud de la Moucherolle).

La détermination d'un "indice de fracturation" correspondant à chaque type de discontinuité et le choix de l'indice le plus caractéristique pour un type d'ouvrage. Pour une galerie, les discontinuités prépondérantes peuvent être des accidents majeurs, mais il est probable que pour un calcul de porosité du massif, on tiendra compte surtout des diaclases et des microdiscontinuités.

Dans une perspective directement appliquée, la comparaison des volumes de ciment qui seront consommés lors des injections de collage dans Signes aval, avec la densité de fissuration des terrains correspondants, permettrait de faire des prévisions sur les volumes à injecter lors de cette phase dans les galeries de la branche de Toulon-Est. Ces injections auront lieu prochainement. Il serait souhaitable que les résultats soient recueillis soigneusement.

Les reconnaissances sur les tracés des galeries de Montrieux et de Valaury ayant été relativement poussées, l'étude pendant et après travaux débouchera certainement sur des résultats extrêmement intéressants, tant du point de vue géotechnique, que dans les domaines de la mécanique des roches et de la géologie régionale.

Nous souhaitons avoir apporté, dans cette thèse, la preuve de l'intérêt des études après travaux, qui sont faites couramment à l'étranger, mais ne font pas encore partie des habitudes en métropole.

BIBLIOGRAPHIE

Abréviations :

B.S.C.G.F. = Bulletin du Service de la Carte Géologique de la France
B.S.G.F. = Bulletin de la Société Géologique de la France
C.R.A.S. = Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Paris
C.R.S.G.F. = Comptes Rendus Sommaire des Séances de la Société Géologique de France - Paris

---

GEOLOGIE REGIONALE ET ETUDES DIVERSES SUR LA REGION

AUBOIN (J.), 1953. - Un ensemble de tectogenèse en Provence. - C.R.S.G.F., p. 230 - 232.

AUBOIN (J.) et CHOROWICZ (J.), 1967. - Le chevauchement sud-provençal : de l'Etoile à la Sainte-Baume. - B.S.G.F. (7), IX, p. 600 à 609.

AUBOIN (J.) et MENNESSIER (G.), 1960. - 1963. - Essai sur la structure de la Provence. Extrait du livre à la mémoire du professeur P. FALLOT, p. 45 - 98, tome II. Mémoires hors série de la S.G.F.

BARBIER (R.), 1958. - Alimentation en eau à partir du Verdon. Massif de la Sainte-Baume. - Rapport S.O.G.R.E.A.H.

BARBIER (R.) et DOUVILLE (F.), 1963. - Tectonique à l'Est du massif de la Sainte-Baume. B.S.G.F. (7), V, p. 1029-1034.

BELLAIR, 1938. - Sur le style tectonique des accidents provençaux. - C.R.A.S., t. 206, p. 924-925.

BURGEAP (Bureau d'Etudes de Géologie Appliquée). Données générales en vue d'une meilleure exploitation des ressources en eau de l'arrière-pays toulonnais.

CAMBON (J.P.) (n.d). - Bassin versant du Gapeau - Etude du complexe physique. - Bulletin technique du Génie rural n° 105. - C.E.R.A.F.E.R., 92 Antony.

CORNET (C.), 1957. - Etude tectonique et morphologique de la région de Méounes et la Roquebrussane. - Revue de Géographie physique et de Géologie dynamique (2) t. 1, fascicule 2, p. 113-118 ; fascicule 4, p. 235-245.

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

-- 1965. - Evolution tectonique et morphologique de la Provence depuis l'Oligocène. Mémoires de la S.G.F., n° 103 nouvelle série, t. XLIV, fascicule 2.

CORROY (C.), 1939. - Le massif de la Sainte-Baume + carte 1/50 000. - B.S.C.G.F., t. XLI, n° 201.

-- 1944. - L'accident du Latay - Saint-Cassien. - C.R.S.G.F., p. 18 - 20.

-- 1962. - L'évolution paléogéographique post-hercynienne de la Provence. Livre à la mémoire du professeur P. FALLOT, t. II, Mémoires hors série de la S.G.F., p. 19-43

DELLERY, DUROZOY, GOUVERNET, JONQUET, 1967. - Inventaire des ressources hydrauliques du bassin du Beausset. Données géologiques et hydrogéologiques. Rapp. B.R.G.M. - Fac. Sci. Marseille.

DUROZOY, GOUVERNET, JONQUET, 1968. - Inventaire des ressources hydrauliques dans le bassin du Beausset. Résultats de la campagne de jaugeages 1965-1967. Rapp. B.R.G.M., Fac. Sci. Marseille.

FABRE (S.), 1939. - Le Crétacé supérieur de la Haute-Vallée du Gapeau. - C.R.S.G.F., p. 30-32.
-- 1940. - Le Crétacé supérieur de la Basse Provence occidentale. Thèse. Annales Fac. Sci. Marseille 2e série, t. XIV, 355 p.

GOGUEL 1943. - Essai de synthèse tectonique de la Provence. B.S.G.F. (5), t. XIII, p. 367-382.
GOUVERNET (C.), 1963. - Structure de la région toulonnaise. Mémoires C.G.F.
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 3e cycle, Grenoble.

HAUG (E.), 1913. - Note sur les nappes du versant méridional de la Sainte-Baume. C.R.A.S., t. 157, p.1480-1482.
--- 1915. - La tectonique du massif de la Sainte-Baume. B.S.G.F. (4), XV, p. 113-190.

LANQUINE, 1934. - Remarques stratigraphiques et tectoniques sur la bordure des massifs jurassiques au Sud et au Nord Ouest de Méounes. C.R.S.G.F., p. 161 - 163.

MONTEAU (n.d). - Le karst des formations turoniennes du bassin du Beausset. 2 livres. D.E.S. Centre Universitaire de Marseille-Luminy.

NICOD (J.), 1967. - Recherches morphologiques en Basse Provence calcaire. Editions Ophrys. "Méditerranée n° 5".

PARIS (A.), 1969. - Relation entre la déformation et la fracturation des roches en Provence occidentale. Thèse 3e cycle, Grenoble.
PHILIP (J.), 1970. - Les formations calcaires à rudistes du Crétacé supérieur provençal et rhodanien. Thèse, Marseille.

RISER (J.), (n.d.). - Le plateau d'Agnis et ses bordures. Géomorphologie, D.E.S. Fac. Lettres Aix.
RUBY (Cabinet d'Etudes), 1969-1970. - Etude hydrologique de l'extrémité orientale du massif de la Sainte-Baume.

S.O.G.R.E.A.H., 1958. - Alimentation en eau à partir du Verdon - Massif de la Sainte-Baume. - R. BARBIER.

BIBLIOGRAPHIE

GEOLOGIE APPLIQUEE ET OUVRAGES TECHNIQUES

ARTHAUD (F.), 1969. - Méthode de détermination graphique des directions de raccourcissement d'allongement et intermédiaire d'une population de failles. B.S.G.F., 7e série, t. XI, p. 729-737.

BADGLEY, 1965. - Structural and tectonic principles. Harper and Row, New-York.
BARBIER (R.) et GIGNOUX (M.), 1951. - Géologie des barrages et des aménagements hydrauliques. Masson, Paris.
BREMOND (R.) (n.d.). - Contribution à l'interprétation des mesures de débit et de rabattement dans les nappes souterraines. Gauthiers Villars.

CAMBEFORT (H.), 1957. - Forages et sondages. Leur emploi dans les Travaux Publics. Comité International des Grands Barrages, 2e édition, Eyrolles, Paris.
CASTANY (G.), 1967. - Traité pratique des eaux souterraines, 2e édition, Dunod.

DUFFAUT (P.), 1967. - C.R. du 1er Congrés de Mécanique des Roches de Lisbonne, 1966. Revue de l'Industrie Minérale, vol. 49, n° 5.

GOGUEL, 1967. - Applications de la géologie aux travaux de l'Ingénieur, 2e édition, Masson.
-- 1971. - Géologie et Mécanique des Roches. Revue Industrie Minérale. Cahier 3.
GROLIER (J.), 1961. - La projection stéréographique et ses applications en géologie. Revue de l'Industrie minérale n° 43, p. 169-194.

KIRALY (L.), 1969. - Statistical analysis of fractures. Geolog. Rundschau. 59/1; p. 125-151.

LETOURNEUR (J.) et MICHEL (R.), 1971. - Géologie du Génie Civil. Collection U. Armand Collin.
LOUIS (C.), 1970. - Ecoulements à trois dimensions dans les roches fissurées. Revue Industrie minérale, cahier 2.
LOUIS (C.) et WITTKE (W.), 1971. - Etude expérimentale des écoulements d'eau dans un massif rocheux fissuré, Tachien project, Formose. The institution of civil engineers. London SW 1.

MOUGIN (J.P.), 1970. - Analyse statistique. Tome 1. Institut Dolomieu.

RAMSAY (J.G.), (n.d.). - Folding and Fracturing of rocks.
ROCHET (L.), 1971. - Les composantes du coût des tunnels et les apports de la Mécanique des Roches. Revue Industrie minérale, cahier 3.

SCHNEIDER (B.), 1967. - Moyens nouveaux de reconnaissance des massifs rocheux. Annales ITBTP, n° 235-236, p. 1055-1093.
SCHOELLER (H.), 1962. - Les eaux souterraines. Paris, Masson.
STRUILLON (R.), 1969. - Prévision de l'altérabilité des matériaux employés en Génie Civil. Colloque de Géotechnique. Toulouse - Mars 1969.
SZECKY (K.), 1967. - The art of tunnelling. Akademiai Kiado, Budapest.

TALOBRE, 1967. - La mécanique des roches et ses applications. Dunod

TERZAGHI (K.), PECK (R.), 1965. - Mécanique des Sols appliquée. Dunod.
TRUPIN (G.), (n.d.). - Manuel pratique d'essais de pompage. Publication du B.R.G.M.
TURNER and WEISS. - Structural analysis of métamorphic tectonites.

BIBLIOTHEQUE
GRENOBLE - SCIENCES
UNIVERSITAIRE

Vu,
Grenoble, le
Le Président de la thèse

R. BARBIER

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

M. SOUTIF

205142

MINISTERE DE L'AGRICULTURE

DIRECTION DE L'AMENAGEMENT RURAL ET DES STRUCTURES

SERVICE SPECIAL DU BASSIN DE LA DURANCE

1972

170

SOCIETE DU CANAL DE PROVENCE

ET D'AMENAGEMENT DE LA REGION PROVENÇALE

Branche du VAR

3eme SECTION

TOULON EST

BIBLIOTHEQUE
GRENOBLE - SCIENCES
UNIVERSITAIRE

CARTE GEOLOGIQUE

SERVICE GEOTOPO

JANVIER 1971

890

895

115

Vallon d'Agnis

Cauvet

la Marseillaise

la Pérouse

la Grande Terre

la Grosse Tête

Montagnoux

Montrieux-le-Vieux

Montrieux-le-Jeune

Méounes

Fouton

Ligne Grousière F.

J^{7-1D}

J^{8}

$C_{n\text{-}III}$

C^{6b}

C^{7aC}

C^{7aM}

C^{7bC}

a^{2}

T_r

S.1

S.2

S.4

S.5

115

Vallon d'Agnis

Cauvet

la Marseillaise

Montrieux-le-Vieux

Montrieux-le-Jeune

Méounes

Vigne Grousière

le Martinet

Beaumont

Fauques

Gaillau

Fontanille

Coloquinton

Favorelle

Jas de Marvon

la Vergueine

la Pinouse

la Grotte

la Grosse Tête

la Limite

le Cellant du Bas

Ginestet

Fouton

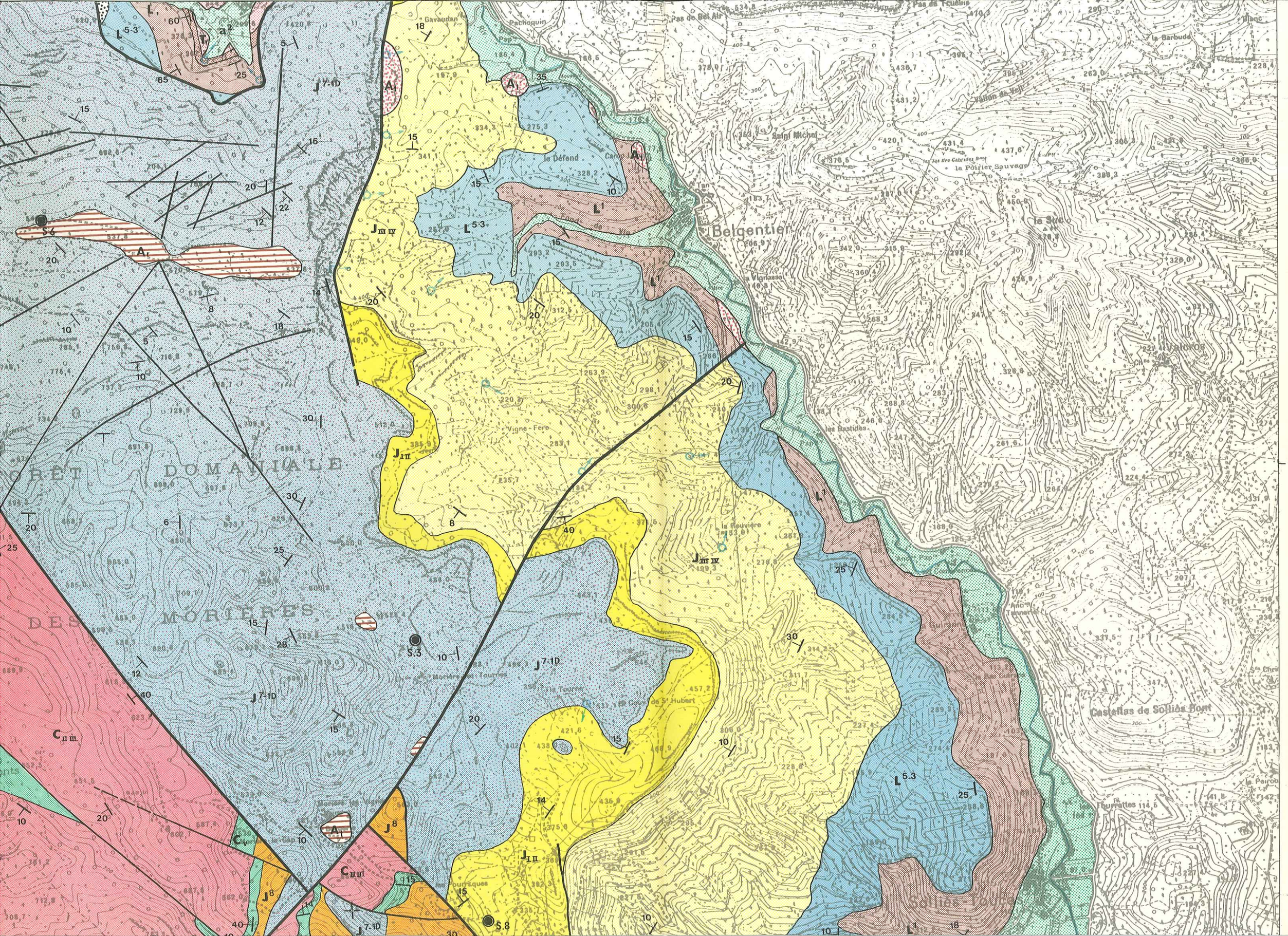
Jas de Rouveau

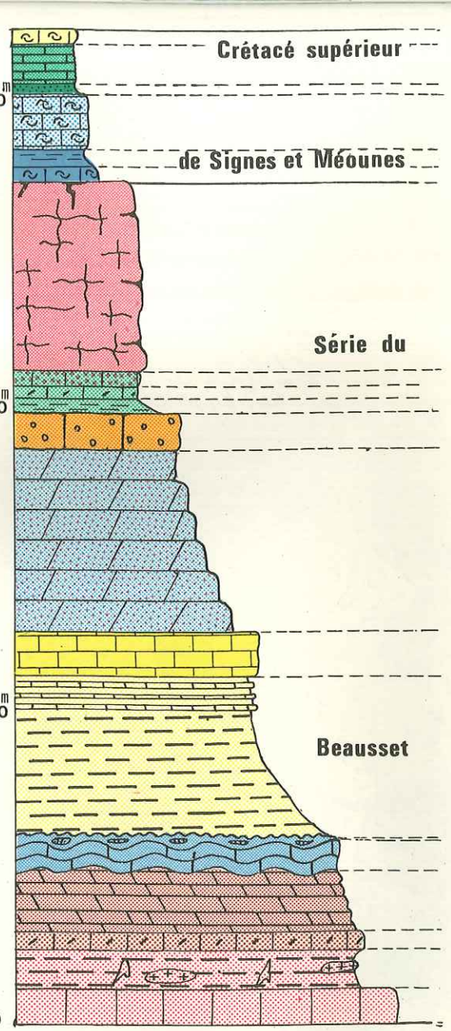
Jas de Bonnet

Jas de Bonnet

Jas de Bonnet

Série Stratigraphique

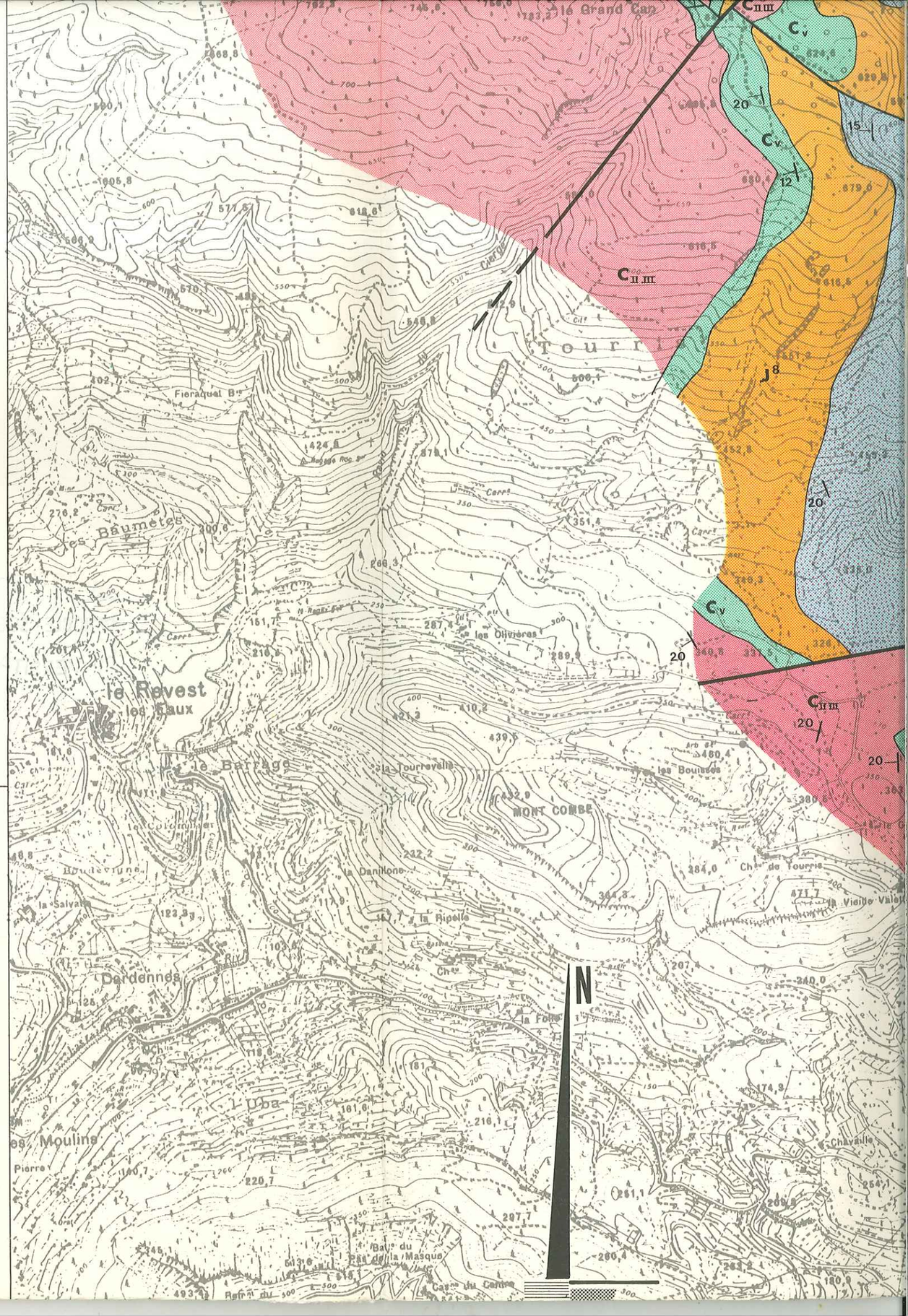

FORÊT DOMANIALE
DES MORIÈRES
Belgentier
Gavaudan
Pachoquin
le Défend
Saint Michel
la Poirier Sauvage
le Suc
la Barbude
Vallon de Vely
Vigne-Fero
la Rouvière
Castellas de Sollias Bont
Sollias-Toucas
les Bastides
Vallons
J 7-1D
L 5-3
L 1
A r
J III IV
J II
C II III
C V
J 8
S.3
S.8
110



	C^{7bC}	Santonien	Calcaire récifal à Hippurites
	C^{7aC}	Coniacien supérieur	Calcaire spathique
	C^{7aM}	Coniacien inférieur	Marnes gréseuses
	C^{6b}	Angoumien	Calcaire récifal
	C^{6a}	Ligérien	Marnes
	C^{5}	Cenomanien superieur	Calcaire récifal
	$C_{II\,III}$	Urgonien	Calcaire massif
	C_V	Néocomien	Barre calcaire Niveaux dolomitisés Marnes et calcaires marneux
	J^{8}	Portlandien	Calcaire fin parfois oolithique
	$J^{7\text{-}1D}$	Dolomies néojurassiques	Dolomies sombres massives
	$J_{I\,II}$	Bathonien supérieur	Calcaire bicolore
	$J_{III\,IV}$	Dogger	Calcaires marneux et marnes grises
	J_{IV}	Bajocien inférieur	Couche à "Witchellia"
	$L^{5\,3}$	Lias moyen et supérieur	Calcaires biodétritiques roux
	$L^{2\,1}$	Sinémurien Hettangien	Dolomies gris clair en plaquettes
	L_1	Rhetien	Calcaire dolomitique
	T_r	Keuper	Argiles gypse, cargneules
		Muschelkalk	Calcaires noirs

Légende

Alluvions et Eluvions	a^2	Urgonien	$C_{II\,III}$
Dépression Karstique : argile d'altération	A_r	Valanginien calcaire	C_V
Zone broyée		Valanginien marno-calcaire	C_V
Eboulis	A	Portlandien	J^8
Tuf quaternaire	A_t	Dolomie néojurassique	$J^{7.1D}$
Cailloutis et argile Miocéne	m	Bathonien supérieur	$J_{1\,II}$
Santonien	$C^{7.bC}$	Dogger	$J_{III\,IV}$
Coniacien supérieur	$C^{7.aC}$	Lias moyen et supérieur	$L^{5.3}$
	$C^{7.aM}$		L^1



105

$C_{II\,III}$ C_V J^{7-10} J^8 $J_{III\,IV}$ $J_{I\,II}$ A_r L^1 L^{5-3} L_3

S.9 S.10 S.11

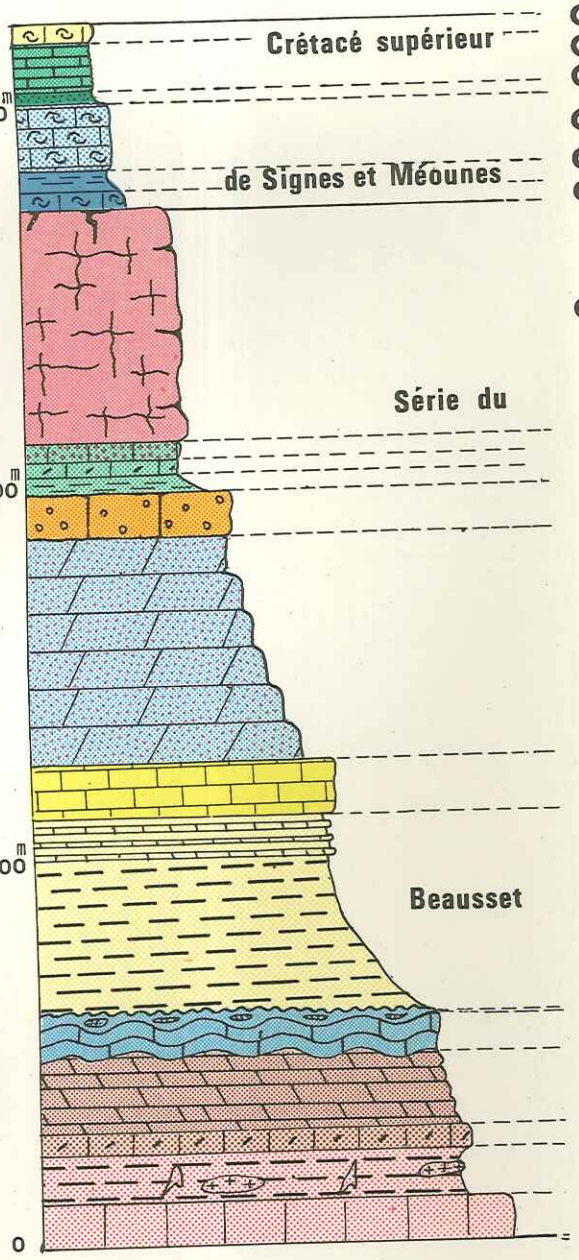
le Grand Cap · Tourris · les Oliviéres · les Bouisses · MONT COMBE · la Tourrevelle · la Goudron · la Vieille Violette · la Ripelle · la Folie · la Chaberte · Chavaille · la Bromone · les Masques · Cas.de du Centre

Valaury · les Sénes · les Terrins · les Aquiéres · les Combes · SOLLIES-PONT · le Ricard · Aubran · les Gachers · les Fournis · les Grands · les Laures · Pierrascas

LE CUDON · Nord · Bat.s Sud · Bros Rooter

N

Série stratigraphique



C^{7bC}	Santonien	Calcaire récifal à Hippurites	
C^{7aC}	Coniacien supérieur	Calcaire spathique	
C^{7aM}	Coniacien inférieur	Marnes gréseuses	
C^{6b}	Angoumien	Calcaire récifal	
C^{6a}	Ligérien	Marnes	
C^{5}	Cenomanien superieur	Calcaire récifal	
$C_{II\,III}$	Urgonien	Calcaire massif	
C_V	Néocomien	Barre calcaire Niveaux dolomitisés Marnes et calcaires marneux	
J^{8}	Portlandien	Calcaire fin parfois oolithique	
J^{7-1D}	Dolomies néojurassiques	Dolomies sombres massives	
$J_{I\,II}$	Bathonien supérieur	Calcaire bicolore	
$J_{III\,IV}$	Dogger	Calcaires marneux et marnes grises	
J_{IV}	Bajocien inférieur	Couche à « Witchellia »	
$L^{5\,3}$	Lias moyen et supérieur	Calcaires biodétritiques roux	
$L^{2\,1}$	Sinémurien Hettangien	Dolomies gris clair en plaquettes	
$L_{,}$	Rhetien	Calcaire dolomitique	
T_r	Keuper	Argiles gypse, cargneules	
	Muschelkalk	Calcaires noirs	

Légende

Alluvions et Eluvions	a^2	Urgonien	$C_{II\,III}$
Dépression Karstique : argile d'altération	A_r	Valanginien calcaire	C_V
Zone broyée		Valanginien marno-calcaire	C_v
Eboulis	A	Portlandien	J^{8}
Tuf quaternaire	A_t	Dolomie néojurassique	J^{7-1D}
Cailloutis et argile Miocéne	m	Bathonien supérieur	$J_{1\,II}$
Santonien	C^{7bC}	Dogger	$J_{III\,IV}$
Coniacien supérieur	C^{7aC}	Lias moyen et supérieur	$L^{5.3}$
Coniacien inférieur	C^{7aM}	Hettangien	L^{1}
Angoumien	C^{6b}	Rhétien	$L_{,}$
Cénomanien Ligerien	$C^{5\,6a}$	Trias	T_r

Contact géologique

Contact anormal (faille, chevauchement) : Principal ; Secondaire ; Supposé

Sondage, Source — S.1

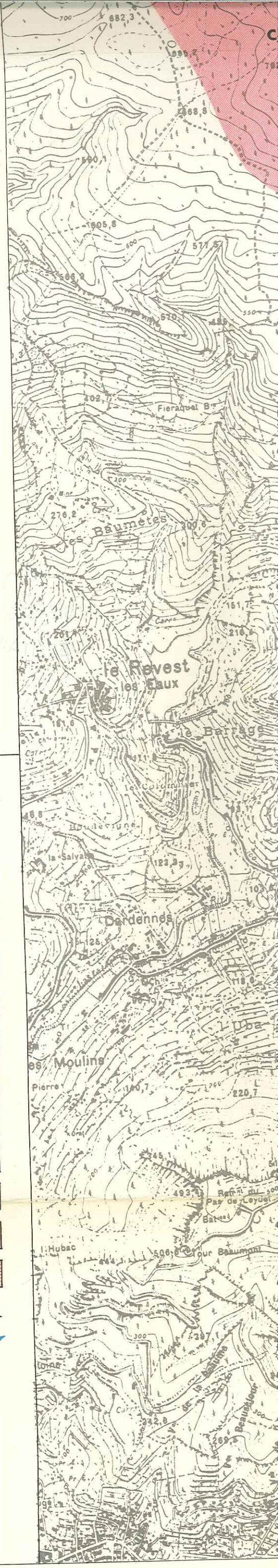
Pendage — 20

Horizontalité

Verticalité

ECHELLE : 1/20.000e

0 500 1000 2000 m



890

Carte dressée par Mlle C. CHOQUET — Imprimerie LOUIS-JEAN — 05 - GAP

MINISTERE DE L'AGRICULTURE
DIRECTION DES AMENAGEMENTS RURAUX
SERVICE SPECIAL DU BASSIN DE LA DURANCE

205142
1972
170

SOCIETE DU CANAL DE PROVENCE
ET D'AMENAGEMENT DE LA REGION PROVENÇALE

BRANCHE DU VAR

PROGRAMME HYDRAULIQUE VAROIS

ADDUCTION D'EAU DE LA SAINTE BAUME

BIBLIOTHÈQUE
GRENOBLE - SCIENCES
UNIVERSITAIRE

CARTE GEOLOGIQUE
DE LA PLAINE DE SIGNES

SERVICE GEOTOPO

FEVRIER 1970

LEGENDE
DE LA CARTE AU 1/10000°

- Alluvions — a
- Crétacé supérieur indifférencié — $C_{.s}$
- Santonien : calcaire à hippurites — C^{7-bc}
- Coniacien
  - Calcaire spathique — C^{7-ac}
  - Marnes gréseuses — C^{7-aM}
- Angoumien : calcaire à rudistes — C^{7-c}
- Cénomanien : calcaire à huitres — C^{5}
- Urgonien : calcaire blanc — C_{I-II}

LEGENDE

DE LA CARTE AU 1/10 000°

Alluvions — a

Crétacé supérieur indifférencié — C.s

Santonien : calcaire à hippurites — C^{7-bc}

Coniacien
- Calcaire spathique — C^{7-ac}
- Marnes gréseuses — C^{7-aM}

Angoumien : calcaire à rudistes — C^{7-c}

Cénomanien : calcaire à huitres — C^{5}

Urgonien : calcaire blanc — C_{I-II}

Valanginien : marnes vertes et calcaires — C_{va}

Portlandien calcaire — J^{8}

Jurassique supérieur
- Dolomies — $J^{7.5}$
- Calcaires fins — $J^{7.5}$

Jurassique moyen calcaire — J^{4}

Jurassique moyen marneux — J^{3}_{III}

Trias calcaires, dolomies, gypse — T_r

DU BLOC ET DES COUPES

Alluvions — a

Crétace supérieur indifferencié — C.s

Santonien — C^{7-bc}

Coniacien
- Calcaire spathique — C^{7-ac}
- Marnes gréseuses — C^{7-dM}

Angoumien
- Calcaire à rudistes — C^{7-c}
- Niveau marneux — C

Cénomanien — C^{5}

Urgonien : calcaire blanc — C_{I-II}

Portlandien calcaire — J^{8}

Jurassique supérieur : dolomies — J^{7-5}

Jurassique moyen calcaire (1) marneux (2) — $^{1}J^{4}$ / $J^{3}_{III\ 2}$

Trias calcaire, dolomie, gypse — T_r

Accident majeur

Faille secondaire

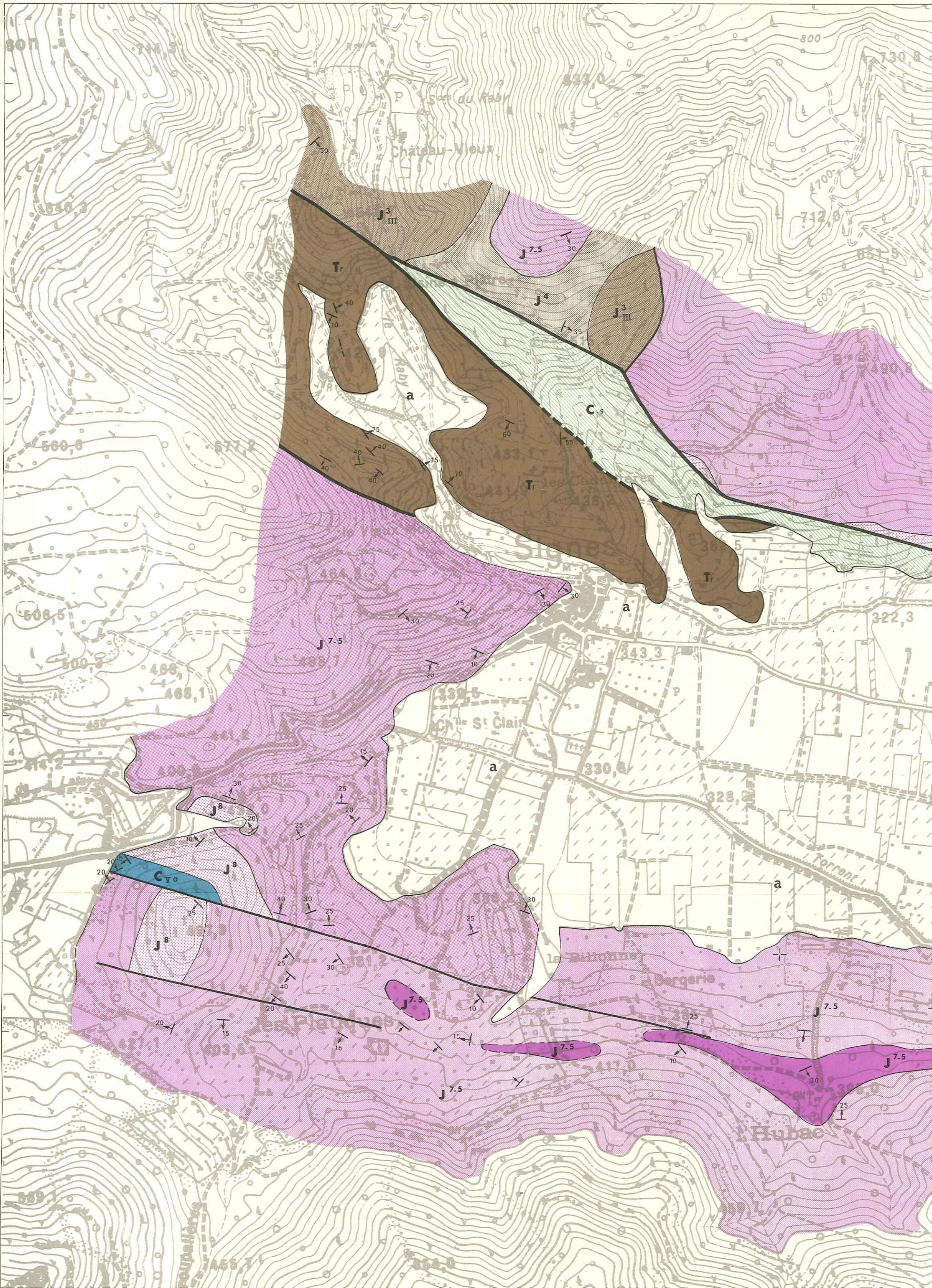
Contact normal

Contact supposé

Direction et pendage des couches ↘15

Vertical

Horizontal


Château-Vieux
Ch.e St Clair
Torrent
Tr
a
J 7-5
J 8
J 4
C V a
C 5

745,7
Jas de Marrou
Abri
823,4
836,0
833,7
818,7
838,6
797,3
730,8
712,0
851,5
800
700
600
500
400
Vallon
35
50
20
25
25
J 7-5
40
30
65
35
20
Tr
322,3
317,0
C-s
322,1
a
2
1
C 1 H
C 7-c
C 7-ac
C 7-aM
316,9
328,5
321,6
320,0
J 7-5
Bergerie
Hubac
Mazegorgue
382,5
352,5
359,5
10
30
25
20
40
35
Torrent
Ravin
Lavey

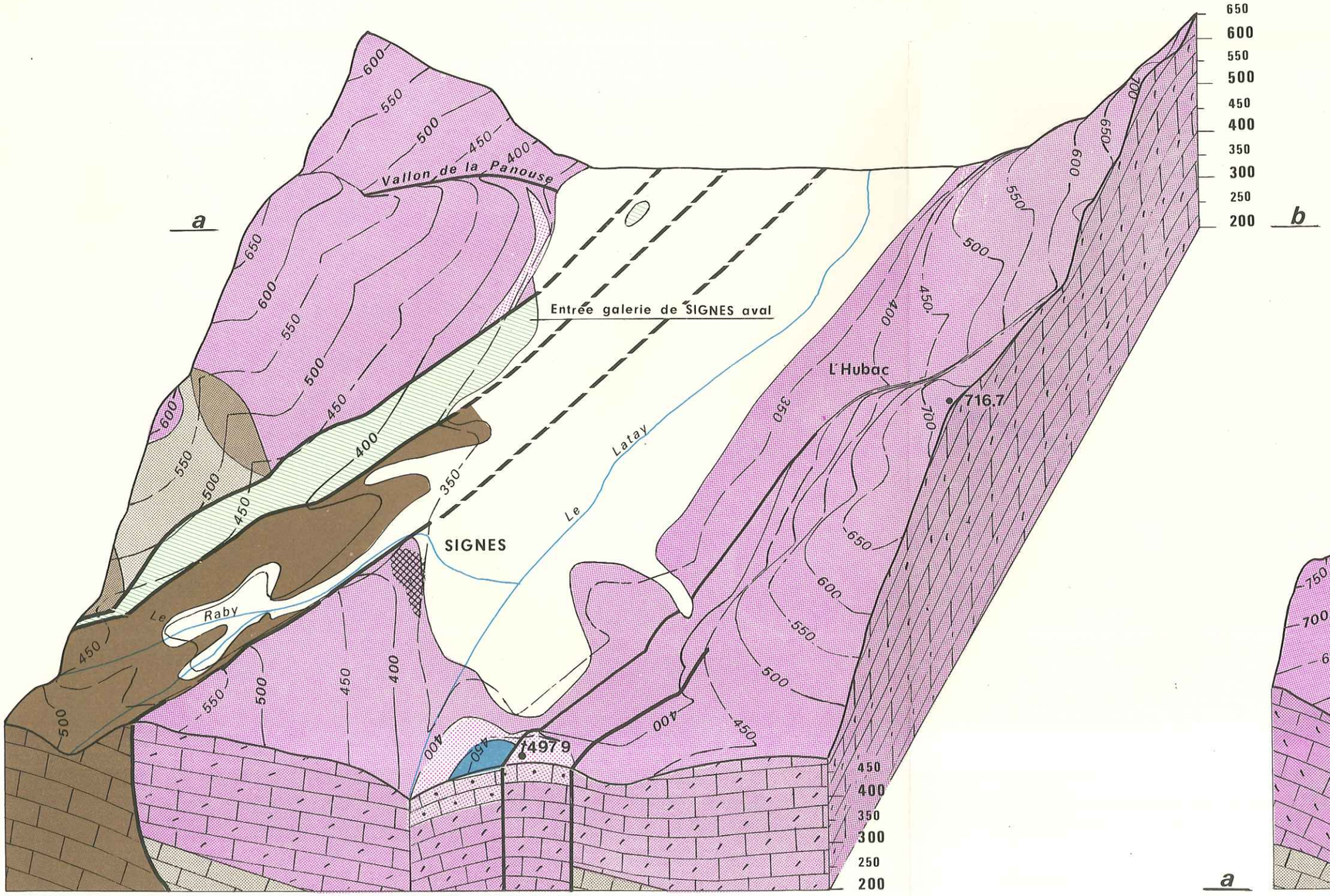
Abri
823,4
836,0
833,7
841,9
843,9
824,0
825,5
705
Vallon d'Agas
764
776
780,4
652,7
600
500
700
800
la Cauvet
530
454,7
475,8
la Marseillaise
460,4
483,4
359,3
400,1
Bide Neuve
375,4
365,1
400
Bide Blanche
382,5
314,5
Latay
Dubliou
317,4
Gapeau
Fme
Cancerille
Hubac B
a
1
2
J 7-5
C I II
C 7-c
C 7-ac
C 7-aM
C 7-bc
C 5
Tr
5 à 20

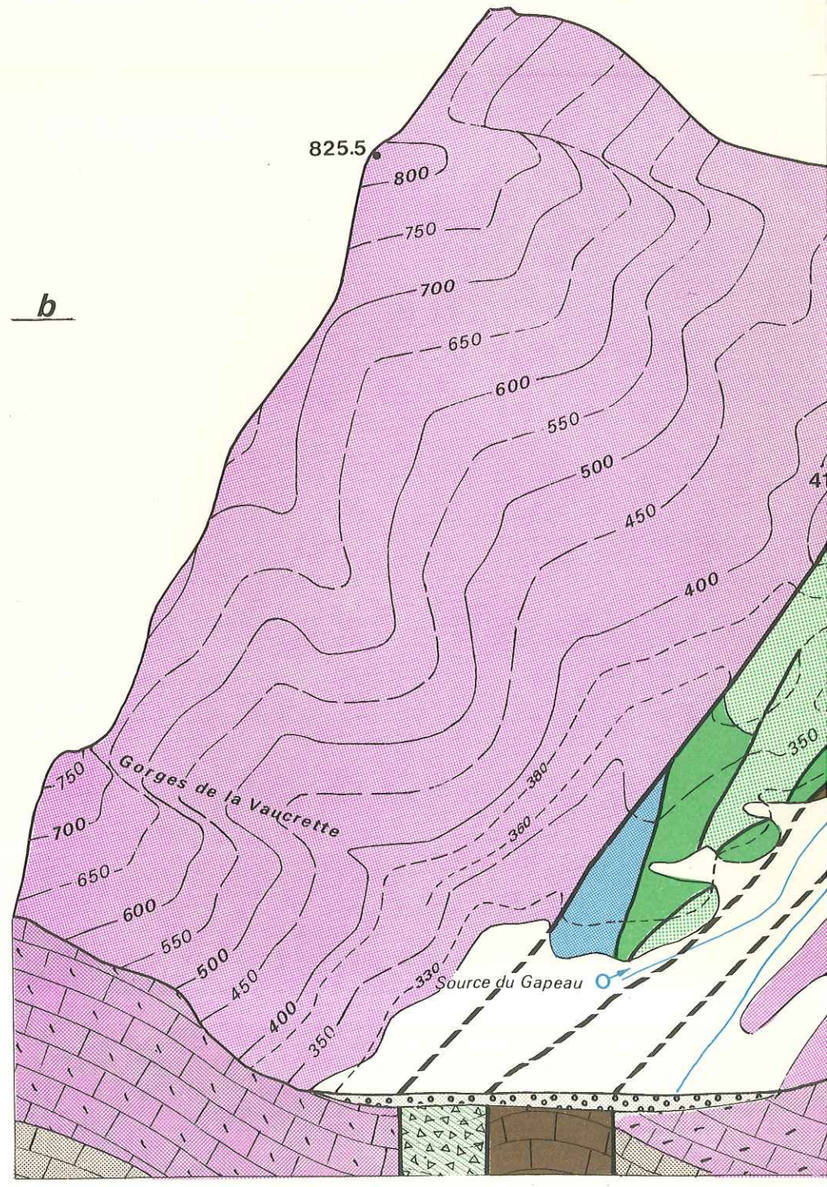
ECHELLE : 1/10 000

114

885 886 887 888

BLOC DIAGRAMME





ECHELLES : Hauteur 1/10 000 Longueur 1/20 000

889 890 891 892

483.6 415.1 Beaupré

300 250 200

b

COUPES

NNW — SSE

1 Bastide Neuve — Beaupré

400 350 300 250 200

NNE — SSE

2 Bastide Blanche — S.4

ECHELLE : 1/5 000