



HAL
open science

Etude géologique et géotechnique des aménagements du canal de Provence entre Rians et Saint Maximin (Var)

Jacques Guillen

► **To cite this version:**

Jacques Guillen. Etude géologique et géotechnique des aménagements du canal de Provence entre Rians et Saint Maximin (Var). Géologie appliquée. Université de Grenoble, 1969. Français. NNT : . tel-00695271

HAL Id: tel-00695271

<https://theses.hal.science/tel-00695271>

Submitted on 7 May 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.

1^{er} - 2^e -GA 5
GR. (Provence)

THESE

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

POUR OBTENIR

- 4 DEC. 1971

LE GRADE DE DOCTEUR DE 3^{ème} CYCLE

Spécialité : Sciences de la Terre

Mention Géologie appliquée

PAR

JACQUES GUILLEN

ETUDE GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE DES AMENAGEMENTS
DU CANAL DE PROVENCE ENTRE RIANES ET SAINT MAXIMIN

(VAR)



Soutenu le - 8 MARS 1969

devant la Commission d'Examen

MM.

R. BARBIER

Professeur

Président

R. MICHEL

J. SARROT REYNAULD

sans CHAIRE

P. ANTOINE

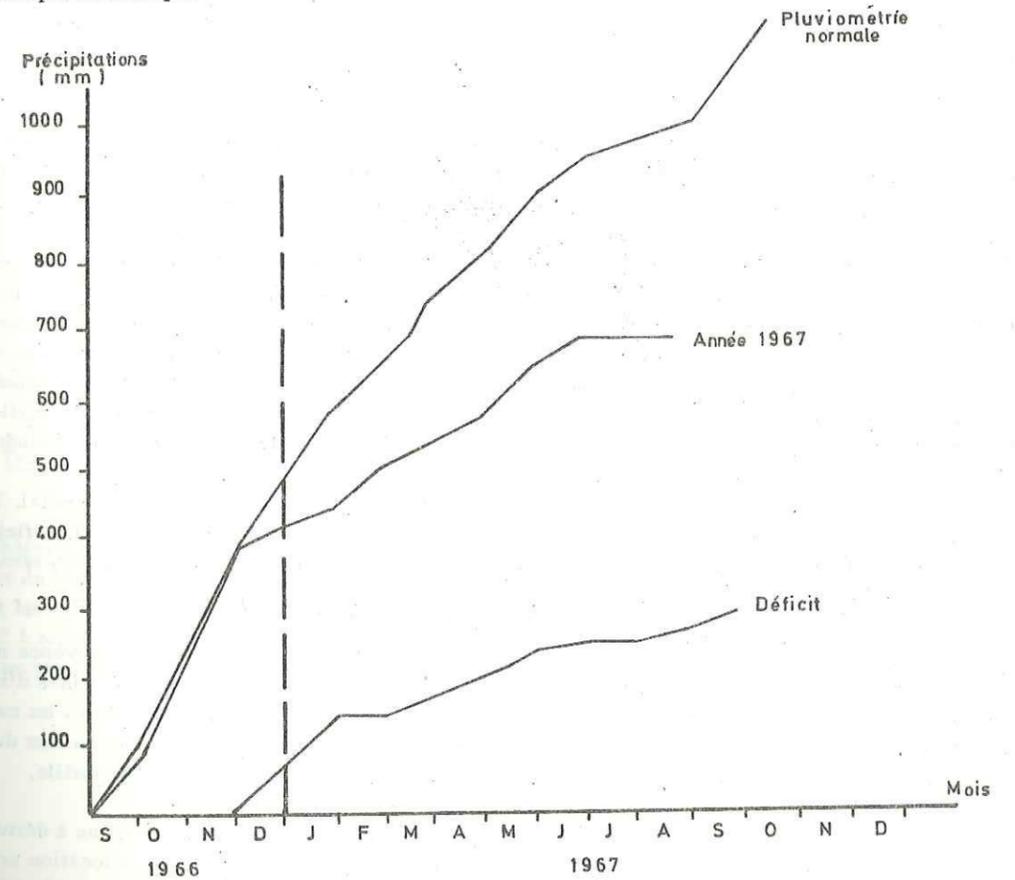
Maître-Assistant

Examineurs

INTRODUCTION

I - LE PROBLEME DE L'EAU EN PROVENCE : PLUVIOMETRIE ET EXPANSION REGIONALE

A l'instar de beaucoup d'autres pays et plus particulièrement de pays méditerranéens, l'eau constitue un facteur vital pour la région provençale. Tous les aspects de son expansion en sont tributaires : agriculture, industrialisation, tourisme, habitat. Les ressources locales, même exploitées avec un rendement satisfaisant (ce qui est loin d'être le cas) sont notoirement insuffisantes. La pluviométrie, fort capricieuse, ne peut procurer une ré-alimentation stable aux réserves naturelles et les sécheresses imposent de sérieuses restrictions. A ce titre, les derniers mois de 1966 et l'année 1967 ont été particulièrement désastreux. Le graphique ci-après correspond aux moyennes mensuelles cumulées au Plan d'Aups (station de la Sainte-Baume) en 1967 et met directement en lumière le déficit pluviométrique.



Par ailleurs, une étude plus complète de M. ORIEUX ("L'Irrigant", septembre 1967), portant sur l'ensemble de la Provence, fait ressortir pour une durée de dix mois (juillet 1966 à mai 1967) la différence entre les pluies normalement espérées et les pluies réellement reçues. Ce déficit pluviométrique atteint le chiffre considérable de 196 mm pour un total espéré de 276 mm. Au-delà du mois de mai 1967, ce phénomène s'est poursuivi : la station du Tholonet fournit les chiffres suivants :

	Evapo-transpiration potentielle en mm	Pluie en mm
2ème quinzaine d'avril	41,5	-
Mai	134,1	10
Juin	156,7	21
1ère quinzaine de juillet	115,8	-
TOTAL	448,1	31
DEFICIT	417,1 mm	

Comparée aux cent années de pluviométrie observées, la sécheresse de 1967 est une des plus sévères du siècle.

Face à ce facteur climatique, quels sont les besoins et les ressources en eau de ce que l'on a coutume d'appeler la "Provence maritime", c'est-à-dire la région située à l'Est d'Aix et de Marseille, comprise entre la Durance, le Verdon et la mer ?

Les besoins en eau sont fonction de trois facteurs :

Un premier facteur est de nature démographique : la population de la Provence maritime, qui était de 1.395.070 habitants en 1962, sera de 2.275.000 habitants en 1985 et en 1996 supérieure à 3.000.000 d'habitants. Actuellement, les débits prélevés par le citoyen sont en moyenne de 250 litres par jour. On estime raisonnable de prévoir que l'accroissement annuel doublera d'ici quinze ans.

Les exigences à prévoir pour l'industrie ne sont pas moindres. Le développement industriel dépend, en effet, fortement des quantités d'eau susceptibles d'être fournies à des entreprises en voie d'expansion ou de création. A titre d'exemple, les usines pétrochimiques de Shell-Berre consomment près d'un mètre cube d'eau par seconde, soit un volume supérieur à celui qui est nécessaire aux villes d'Aix et Arles réunies. A elle seule, la région de l'Etang de Berre, où le développement industriel est intense, connaît un taux de croissance annuel de sa population de plus de 4% alors que la moyenne nationale est de 0,9%. L'évolution des superficies industrielles envisagée laisse prévoir qu'elles passeront de 1702 ha en 1962 à 3715 ha en 1985 pour atteindre 8495 ha à la fin du siècle, le taux d'accroissement annuel se situant entre 5 et 8%.

Enfin, la mise en valeur des territoires agricoles constitue un domaine primordial. La superficie totale de ceux-ci est estimée à 100.000 ha. L'agriculture, actuellement axée sur la vigne, bénéficiera, après la mise en irrigation, d'un éventail plus large de ressources, tandis que les cultures existantes seront plus riches et plus précoces. 75.000 ha très bien exposés pourraient ainsi être équipés.

En dehors de petits cours d'eau, vite taris en été, la desserte en eau de la Basse-Provence ne peut être assurée que par la Durance et ses affluents (Verdon principalement). Depuis les Romains, l'idée d'irriguer la Provence est demeurée le souci constant des hommes ; parmi les travaux les plus connus citons : les canaux de Senas (1303), de Craponne (1559), des Alpilles (fin XVIIIème). Plus récemment construits, les canaux du Verdon et de Marseille ont largement contribué à la prospérité des régions d'Aix-en-Provence et de Marseille.

Divers lois et décrets autorisent les départements du Var et des Bouches-du-Rhône à dériver un certain débit sur les 1225.10⁶ m³ que le Verdon apporte chaque année à la Durance. Cette allocation est de 21 m³ par seconde en moyenne annuelle, ce débit pouvant être porté à 35 m³ par seconde pendant la période estivale. Cependant, le respect des droits des avaliers de la Basse Durance ne permettait pas ce prélèvement sans qu'une régularisation importante du Verdon ne soit réalisée. L'aménagement hydroélectrique de la Durance et du Verdon, entrepris par l'E.D.F., permet la réalisation de grands ouvrages de retenue au bénéfice simultané de

l'industrie et de l'agriculture. A l'aval des ouvrages à vocation énergétique de Castillon, Sainte-Croix, Quinson, la dérivation des eaux s'opère à partir de la retenue de Gréoux. 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.

II - LES AMENAGEMENTS DU CANAL DE PROVENCE

1° - Buts et programme des aménagements

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 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.

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'Etang 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 près 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 m³/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.

2° - Tracé et caractéristiques des ouvrages

Le réseau principal du canal de Provence, qui alimentera le réseau final de distribution, se développe sensiblement selon un axe Nord-Sud, en suivant approximativement la limite des départements des Bouches-du-Rhône et du Var. Il se ramifie d'Est en Ouest et d'Ouest en Est par des branches principales et secondaires qui empruntent les vallées parallèles à la côte pour atteindre les zones d'irrigation et les villes qui y sont installées. La figure n° 1 représente l'extension géographique des différents ouvrages dont le tableau ci-dessous fournit les caractéristiques principales.

	Débit m3/s	Canaux L en m	Galeries revêtues		Siphons Conduites L en m	Nombre d'ouvrages de		Longueur totale en m
			L en m	Ø en m		franchis- sement	régula- tion	
Branches principales								
Canal maître I	40	1.983	10.560	5,05	555	8	2	13.098
Canal maître II	30	8.520	9.880	4,55	170	23	3	18.570
Branche du Var I	16	7.350	5.710	3,35	360	18	3	13.420
Branche du Var II	13	1.600	13.497	3,10	215	4	1	15.097
Branche de Bimont	10	6.690	11.248	3,00	1.000	15	4	18.938
Branche de Marseille Est I	14	14.000	7.310	3,00	480	40	4	21.790
Branche de Marseille Est II	11	1.160	17.100	2,95	792	5	1	19.019
Totaux		<u>41.303</u>	<u>75.305</u>		<u>3.572</u>	<u>113</u>	<u>18</u>	<u>119.932</u>
Branches secondaires								
Branche du Var III	10,5	2.350	6.420	2,50		2	1	8.770
Branche du Var IV	2,5		2.220		4.350	66	61	57.580
Branche de Toulon Ouest ..	2,5	51.010	8.380	2,20			1	8.380
Branche de Toulon Est	6		4.780	2,25	1.320	5	5	12.940
Branche de Marseille Nord .	4	6.840	5.250	2,20	780		1	6.030
Totaux		<u>60.200</u>	<u>27.050</u>		<u>6.450</u>	<u>73</u>	<u>69</u>	<u>93.700</u>
TOTAUX POUR L'ENSEMBLE DES BRANCHES		101.503	102.355		10.022	186	87	213.632

Les ouvrages étudiés ici sont le canal maître 2ème section et la branche du Var 1ère section.

a) Le canal maître

Le canal maître prend son origine au partiteur de Boutre, ouvrage implanté sur l'aménagement hydro-électrique de la chute de Vinon et assurant la répartition des eaux provenant du barrage de Gréoux entre le canal de Provence et le canal usinier de la centrale de Vinon. Il se développe sur une longueur de près de 32 km dans le département du Var.

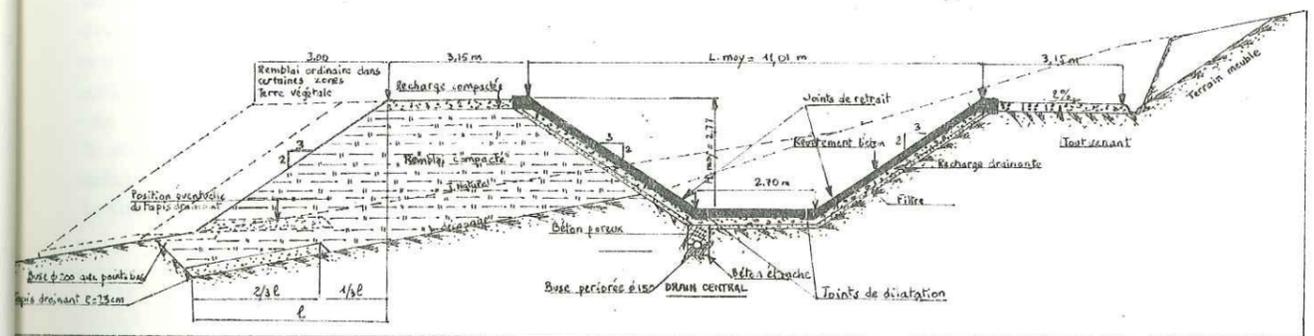
- Le canal maître 1ère section, actuellement en voie d'achèvement, long de 12.648 m, équipé pour l'écoulement d'un débit de 40 m3/s, est compris entre le partiteur de Boutre et Rians. Son extrémité méridionale aboutit à un brise-charge à l'aval duquel se poursuit le canal maître 2ème section et se détache la branche de Bimont.

- La 2ème section du canal maître, objet principal de la présente étude, long de 18.570 m, équipé pour un débit de 39 m3/s entre Rians et Pourcieux, comprendra :

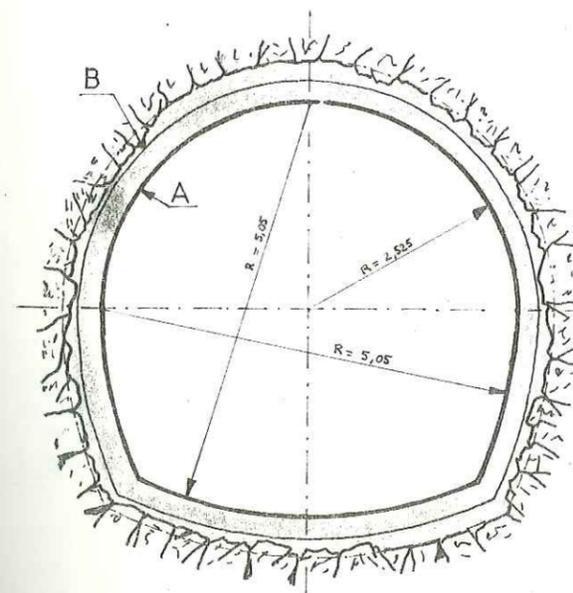
- un tronçon de 1.500 m environ en canal, empruntant une partie de l'ancien canal du Verdon,
- une galerie, dite "de Sainte-Victoire", qui, malgré son nom, ne traverse le massif que bien à l'Est de la célèbre montagne. Cette galerie, en forme de fer à cheval et

CANAL MAITRE

PROFIL EN TRAVERS DE CUVETTE



PROFIL EN TRAVERS DE GALERIE



A : Surface d'écoulement : 21,15 m²
 B : Surface minimum sur pointes : 26,47 m²
 Epaisseur minimum sur pointes : 30 cm .

entièrement revêtue, longue de 10.000 m, sera en charge. Elle aboutira au brise-charge de Pourrières où prendra son origine la branche de Puylobrier, dérivant vers l'Ouest un débit de 2 m³/s,

- un tronçon de 7 km environ en canal, entre Pourrières et Pourcieux, empruntera le bord Nord et Nord-Est du bassin de l'Arc pour aboutir au partiteur de Pourcieux. Ce canal sera divisé en deux biefs par des ouvrages de régulation automatique. Le partiteur de Pourcieux donnera naissance à la branche de Marseille Est et à celle du Var.

b) La branche du Var

La branche du Var a été divisée en quatre tronçons distincts, équipés pour un débit décroissant de l'amont vers l'aval. Succédant à l'ouvrage de répartition de Pourcieux, la 1ère section de la branche du Var, équipée pour un débit de 18 m³/s, pénètre aussitôt sous les contreforts du Mont Aurélien par une galerie longue de 5.710 m et d'un diamètre de 3,35 m. Cette galerie, dite "galerie de Saint-Maximin", s'ouvrira par un brise-charge à vannes automatiques sur deux canaux : les canaux de Saint-Maximin et de Rougiers, totalisant une longueur de 7.350 m et divisés en quatre biefs par trois jeux de vannes automatiques commandées par l'aval. Les deux canaux seront séparés par le siphon du Cauron permettant de franchir le ruisseau du même nom. La branche secondaire de Biagnoles prendra naissance sur la rive gauche de l'extrémité aval du canal de Rougiers. La seconde section de la branche du Var, en cours de réalisation, traverse de part en part le massif de la Sainte-Baume par une galerie de 14 km et débouche à Signes où elle donne naissance vers l'Ouest à la branche secondaire qui dessert la côte entre La Ciotat et l'Ouest de Toulon. Elle se poursuit ensuite vers l'Est et donne naissance à la branche qui domine la basse vallée du Gapeau et dessert Toulon et Hyères. La dernière section remonte en direction des Arcs le flanc Nord de la dépression permienne du département du Var.

3° - Les principes de construction

Trois faits principaux ont conditionné le tracé et les caractéristiques principales des ouvrages :

- L'intérêt d'une mise en pression gravitaire des réseaux de distribution a conduit à l'adoption d'un tracé et d'un profil en long qui permettent aux branches secondaires de dominer les terres à arroser, à une altitude suffisante pour que les réseaux de distribution disposent d'une pression minimale dynamique de 3 kg/cm². Le relief de cette partie de la Provence, divisée en bassins séparés par des chaînes calcaires, s'y prête heureusement.

Compte tenu de la prise sur le Verdon et des pertes de charge sur l'ensemble des différentes sections, les pentes des lignes d'eau à débit maximum sont en mètres par kilomètre :

Ouvrages	Sections en galerie	Sections en canal
Canal maître II	0,50	0,26
Branche du Var I	0,70	0,29

- La structure géologique très compliquée de la région et l'existence de hauts reliefs, dont la traversée exige obligatoirement des galeries de grande longueur, ont contraint à une étude et à de nombreux travaux de reconnaissance. Le tracé reste généralement dans les calcaires jurassiques et crétacés inférieurs et évite dans toute la mesure du possible les argiles, gypses ou cargneules triasiques, les marnes du Crétacé supérieur et du Tertiaire.

Les travaux exécutés jusqu'à présent n'ont pas rencontré de difficultés.

- Le dernier élément dont dépendent les caractéristiques de l'ouvrage est la variation saisonnière très importante du débit en relation avec la variation saisonnière de la consommation (agricole et littorale en été). Pour stabiliser ces irrégularités, des réserves de petite importance (quelques 100.000 m³ généralement) ont été constituées, la nature géologique de la région ne permettant pas la construction de grands ouvrages de retenue.

Finalement, la variation mensuelle de débit du canal maître sera la suivante :

Janvier	14,0 m ³ /s
Février	15,0 m ³ /s
Mars	15,7 m ³ /s
Avril	20,0 m ³ /s
Mai	24,8 m ³ /s
Juin	26,3 m ³ /s
Juillet	30,5 m ³ /s
Août	28,6 m ³ /s
Septembre	17,1 m ³ /s
Octobre	14,0 m ³ /s
Novembre	14,0 m ³ /s
Décembre	14,0 m ³ /s

4° - Conclusion

Tels sont les buts et la physionomie générale des aménagements du canal de Provence. Certains de ses ouvrages sont en voie d'achèvement (canal maître 1ère section, branche de Bimont, branche de Marseille Nord) et leur première mise en eau est prévue pour 1969. La réalisation et l'étude des autres ouvrages sont actuellement à des degrés divers d'évolution qui laissent présager pour 1980 l'équipement hydraulique complet de la Provence méridionale. Les études géologiques et géotechniques interviennent à tous les stades de gestation des ouvrages, qu'il s'agisse de canaux ou de galeries, depuis l'étude préliminaire (avant-projet sommaire) jusqu'à la phase ultime de l'exécution.

Les études dont il est question dans le présent travail concernent des ouvrages au stade de projet. Le canal de Rians, la galerie de Sainte-Victoire, le canal de Pourrières-Pourcieux sont arrivés à l'étape du projet d'exécution. La branche du Var 1ère section (galerie de Saint-Maximin) n'en est qu'au niveau de l'avant-projet sommaire qui permet de dégager les lignes directrices de l'étude ultérieure plus détaillée.

oOo

PREMIERE PARTIE : LE CADRE DES AMENAGEMENTS HYDRAULIQUES

I - CADRE GEOGRAPHIQUE

1° - GEOGRAPHIE REGIONALE

Les distinctions d'ensembles géographiques abondent en Provence. Assez curieusement ces ensembles correspondent à des entités à la fois géologiques, climatiques et humaines. C'est ainsi que la région de Rians-Ginasservis, qui correspond à une transition géologique entre les faciès provençaux et alpins, est une frontière climatique et humaine entre une région d'aspect méditerranéen au Sud et d'affinité basse alpine au Nord. A cette latitude, se situe la distinction courante entre Haute et Basse Provence.

La Haute Provence est localisée au Nord de la Durance et du Verdon dans leurs cours Est-Ouest. La Basse Provence, "qui est la Provence au sens géologique du terme", car son style tectonique correspond aux mouvements dits "provençaux", est située au Sud de ce même axe.

On subdivise encore la Basse Provence en trois régions naturelles qui sont :

- la Basse Provence rhodanienne,
- la Basse Provence cristalline qui correspond aux affleurements cristallins méridionaux du Var (région toulonnaise, Maures, Tanneron), couronnés au Nord par la dépression des terrains permien à coulées rhyolitiques,
- la Basse Provence calcaire qui s'étend au Nord et à l'Ouest de cette dépression permienne et au Sud de l'axe Durance-Verdon. Elle est constituée de petits massifs allongés Est-Ouest, d'extensions horizontales et verticales réduites. Les méridionaux ne s'y sont pas trompés puisqu'ils les ont baptisés "collines". Seuls quelques chaînons ont échappé à cette dénomination en raison de leur aspect imposant : tels sont le Mont Aurélien, la montagne Sainte-Victoire ...

2° - GEOGRAPHIE DE LA ZONE ETUDIEE

a) Situation

La zone intéressée par cette étude se situe en Provence Nord occidentale, à l'Est d'Aix-en-Provence et s'étend selon un parallélogramme dont la grande diagonale est Nord - Nord-Ouest/Sud - Sud-Est. Elle englobe du Nord au Sud la partie occidentale du bassin de Rians et la partie orientale de la chaîne de Sainte-Victoire et du bassin de l'Arc.

L'angle Sud-Est de ce quadrilatère comprend les reliefs du Mont Aurélien qui ferment à l'Est le bassin de l'Arc et dominent les dépressions de Rougiers et de Saint-Maximin. Ce secteur, délimité en fonction des exigences du tracé des ouvrages, ne présente aucune homogénéité géographique ou géologique, les grands ensembles étant essentiellement de direction Est-Ouest dans cette partie de la Provence.

b) Relief

L'opposition est fortement marquée entre les bassins synclinaux (Rians, Arc) remplis de terrains continentaux d'âge Crétacé supérieur et Tertiaire, où la présence de l'eau a rendu possibles le peuplement et

la culture des terres, et les massifs calcaires, arides et déserts, recouverts d'un épais maquis de chênes verts poussant à la faveur des diaclases remplies d'argile résiduelle.

Ces massifs sont :

- Au Nord, le massif de Sainte-Victoire/Sambuc et ses prolongements orientaux séparant le bassin de Rians au Nord du bassin de l'Arc au Sud, essentiellement constitués de Jurassique supérieur calcaire et dolomitique où vient seulement trancher le lambeau Crétacé supérieur de Puits de Rians.

En dehors de la montagne Sainte-Victoire elle-même, ces massifs présentent une topographie très évoluée de dômes et de vastes surfaces planes que traversent de petites vallées méandriformes fossiles.

- Au Sud, le massif de l'Olympe-Aurélien où une série jurassique très complète surmonte le bassin de l'Arc. Cet ensemble rejoint le massif de Sainte-Victoire par l'intermédiaire d'une zone basse de calcaires (bande jurassique d'Ollières), brusquement surélevée au Défends de Saint-Maximin à son contact avec l'Aurélien. Cette bande de terrain sépare ainsi le bassin de l'Arc des vastes dépressions de Saint-Maximin et de Rougiers.

c) Hydrologie générale

Le réseau hydrographique actuel est fort peu développé.

L'Arc et le Bearn assurent le drainage symbolique des deux grands bassins synclinaux. Leur régime est de type oued. Les massifs qui les séparent sont pratiquement dépourvus d'eau. L'infiltration des précipitations y est instantanée et les exutoires superficiels (source de l'Argens) sont sans commune mesure avec la superficie des bassins versants.

Le trajet de l'eau reçue est en fait entièrement souterrain, en rapport avec un niveau de base sans doute profond. Les débits importants enregistrés dans les exploitations minières de Gardanne et au puits de Rousset sont sans doute en relation avec cet écoulement.

La morphologie des massifs calcaires présente par contre un réseau hydrographique entièrement fossile, témoignant d'une période fort active. Nous reviendrons plus loin sur ce problème qui appartient à l'histoire géologique de cette région.

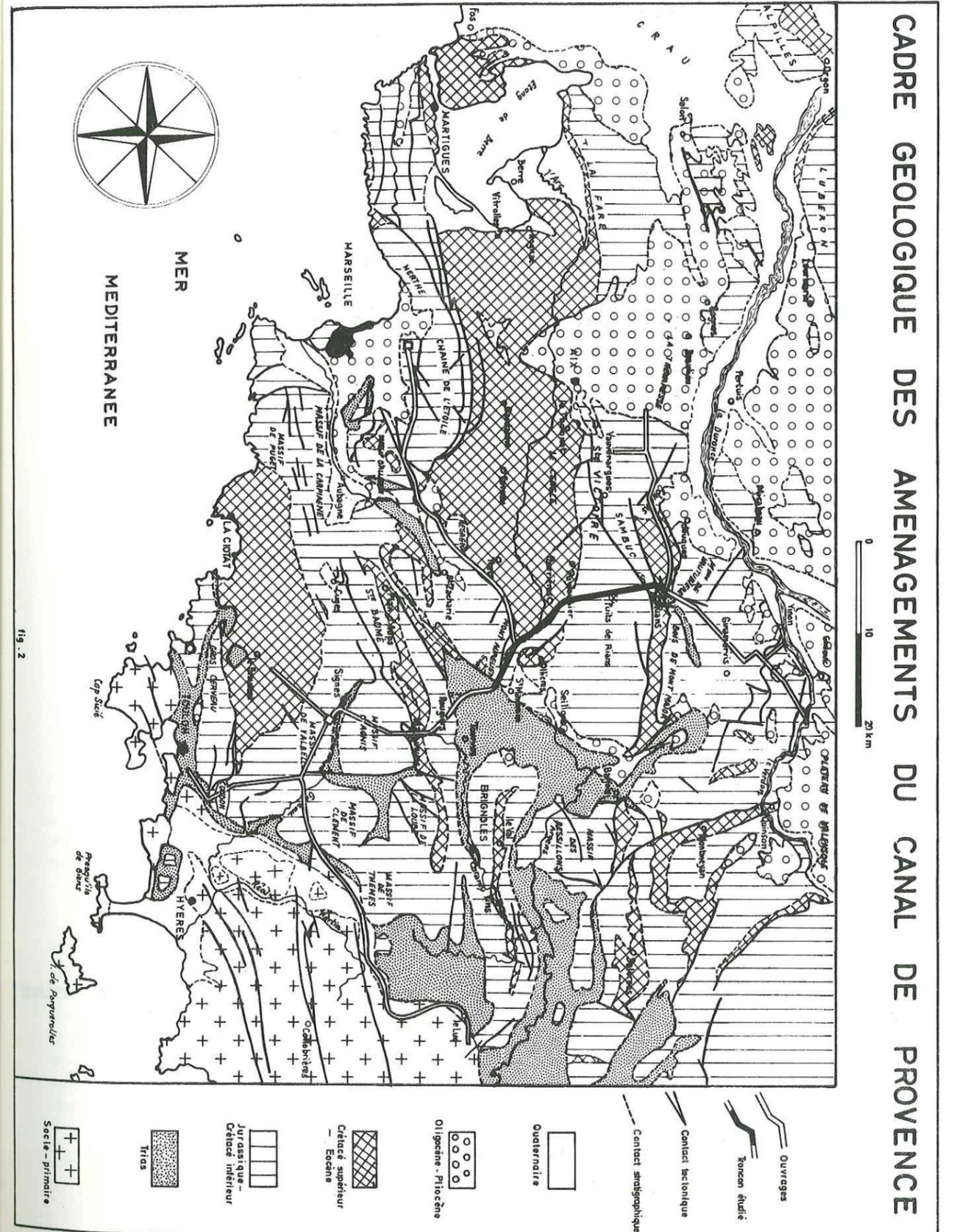
Les seules zones actives du massif de la Sainte-Victoire sont constituées par la vallée de Vauvenargues et le vallon des Vacons où quelques petites sources, en rapport avec la remontée d'un niveau de base marneux (Jurassique moyen et inférieur), constituent l'alimentation de maigres ruisseaux, généralement secs.

II - CADRE GEOLOGIQUE

1° - GEOLOGIE REGIONALE

Il n'est pas dans notre dessein de développer ici une monographie géologique de la région provençale. Un tel travail a été déjà entrepris et mené à bien par un grand nombre d'auteurs. Parmi les synthèses en référence, citons les travaux de MM. CORROY, AUBOIN et MENNESSIER parus dans le tome II du "Livre à la mémoire du Professeur Paul Fallot" (3). C'est la publication de MM. AUBOIN et MENNESSIER que nous résumerons, ceci à seule fin de replacer le secteur étudié dans son contexte géologique et de faciliter l'exposé ultérieur plus détaillé.

On trouvera des exposés stratigraphiques généraux dans les études de C. CORNET (24) et de G. CORROY (31).



MORPHOTECTONIQUE PROVENCALE

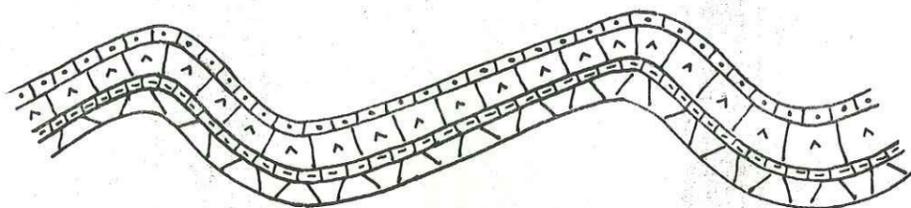
d'après L. LUTAUD et C. CORNET

fig. 3

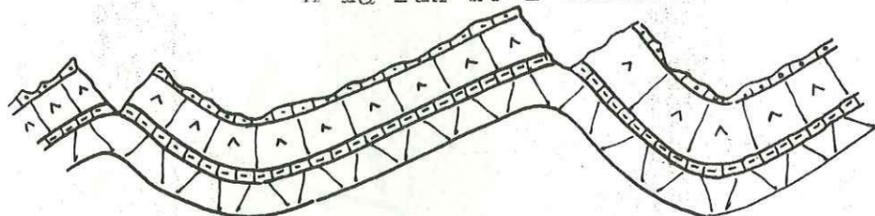
SUD

NORD

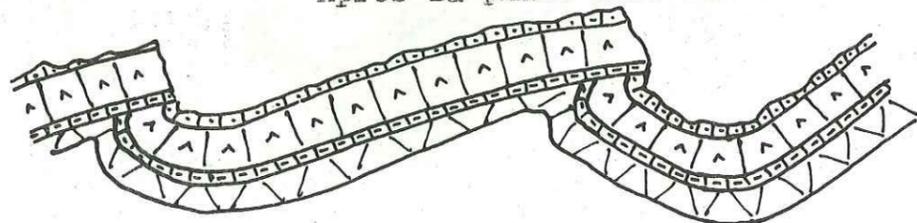
A la fin du Crétacé



A la fin de l'Eocène



Après la phase anté sannoisienne



Crétacé



Jurassique



Lias



Trias

a) Historique

En Provence naquit en 1887 la notion de recouvrement, à l'origine de celle de charriage, avec la description de la structure du Beausset par Marcel BERTRAND. Durant le siècle dernier, les études 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" à laquelle succédera celle de "charriage" ; l'usage généralisé qu'il en fera pour expliquer les structures provençales suscitera de nombreuses polémiques. Les charriages eurent essentiellement pour défenseurs E. HAUG (1915, 1925, 1930), L. BERTRAND et A. LANQUINE, qui réalisa également une étude détaillée du Jurassique provençal (1929, 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 constitué de terrains cristallins surmontés du Permien et du Trias inférieur. La Provence devient ainsi une chaîne de couverture et les divers chevauchements observables prennent la valeur d'écaillages de couverture, d'amplitude plus ou moins importante. Cette conception rallie actuellement la plupart des géologues provençaux, conjointement à une notion de charriage ramenée à sa juste valeur.

Quelques années plus tard, L. LUTAUD propose une explication génétique des structures provençales : des phases tectoniques d'âges différents auraient affecté une couverture soumise à autant de phases d'érosion intermédiaires. Chronologiquement, les anticlinaux élaborés au Crétacé supérieur auraient été érodés à l'Eocène, puis repris au cours de la phase antéoligocène, amenant des chevauchements et des écaillages au niveau des charnières ainsi entamées par l'érosion.

Citons L. LUTAUD (61) : "Le facteur topographique est de toute première importance dans la tectogénèse, car il est évident que l'érosion intertectonique aboutit, suivant les conditions régionales antérieures qui commandent son action et suivant la durée de cette action, à des résultats morphologiques plus ou moins accomplis et surtout très variés. Ce qui explique que lors de la reprise tectonique suivante l'influence exercée sur celle-ci est également très diverse localement. Et, selon moi, cette variété topographique, telle qu'elle sera acquise en Provence au cours du cycle d'érosion postcrétacé et antéoligocène, est une des meilleures explications que l'on puisse trouver pour comprendre les différences qui existent entre les éléments tectoniques de la région, notamment en ce qui concerne la localisation morcelée, ainsi que les variations locales de style et d'ampleur qui affectent les écaillages et les nappes provençales". Ces conceptions annonçaient la morpho-tectonique de L. GLANGEAUD.

Les études ultérieures s'attachèrent à déterminer dans tous les cas observables les limites de validité de ces théories générales. G. CORROY, Cl. GOUVERNET et C. DENIZOT ont cherché à démontrer l'enracinement des accidents de couverture sur des accidents de socle.

En Provence orientale, A. F. de LAPPARENT ramena à la dimension de plis-écaillages les nappes qui y avaient été décrites. J. GOGUEL montra la dépendance existant entre nature lithologique et style tectonique. G. MENNESSIER définit avec précision les divers types tectoniques et décrivit les interférences structurales entre les zones alpines et provençales. J. AUBOIN, de son côté, s'attacha aux décollements de couverture et récemment, enfin, une étude de C. CORNET décrit l'évolution tertiaire et quaternaire de la Provence depuis l'oligocène et met l'accent sur le nombre et l'importance des spasmes orogéniques pendant cette période.

Il nous paraît intéressant de clore ce rapide panorama de l'histoire des études géologiques en Provence par les remarques suggérées à MM. BELLAIR et RONDEAU par l'excursion des "géologues du Sud-Est" de mai 1967.

M. BELLAIR constate qu'il n'y a pas de divergence entre les théories de charriage et les théories des chevauchements successifs enracinés. Le fait indéniable demeure l'existence de chevauchements de grande amplitude en Provence. Pour M. BELLAIR, les caractères principaux de la tectonique provençale sont les suivants :

- elle est pelliculaire, c'est-à-dire que l'épaisseur des séries déplacées est faible en rapport des déplacements observés. Le rapport est de l'ordre de 10,
- corollaire du caractère précédent, la tectonique est discontinue et chaotique car les séries, au moment de leur déplacement, étaient déjà tronçonnées par l'érosion.

La recherche des rapports tectoniques entre les unités séparées avant mouvement ne présente alors plus grand sens. On ne peut donc postuler de continuité géométrique, mais seulement rechercher une unité de dynamique tectonique.

Pour M. RONDEAU, preuve est faite de l'importance des chevauchements en Basse Provence calcaire et de la prolongation de ces mouvements au-delà de la phase pyrénéo-provençale classique (phase maestrichtienne). Cette tectonique chevauchante appelle d'autre part les remarques suivantes :

- les tronçatures basales sont des surfaces d'érosion et rarement des couches lubrifiantes. Cette absence de "glissement" explique les klipptes et les mylonites. Les paquets cisailants se sont mis en place sur leurs propres piedmonts où devaient subsister des reliefs résiduels en roche dure entraînés dans le mouvement. L'observation des surfaces récentes plissées (notamment surface anté-tortonienne) permet d'imaginer les surfaces plissées sur lesquelles ont glissé les "nappes". Cela tend à prouver une permanence dans le style tectonique et des rapports entre les mouvements du sol et l'érosion, en dépit des différences entre les phases tectoniques,
- il est délicat de fixer un âge aux plissements qui ont affecté les différentes surfaces car, en dehors des difficultés de datation des formations continentales, il est impossible de trouver une couche non dérangée,
- les manifestations de mouvements et de plissements sont observables à tous les stades du Miocène et du Plio-quaternaire. La Provence est en fait soumise à des déformations continues et se trouve en pleine orogénèse.

De ces théories, nous dégagerons les deux idées suivantes :

- les mouvements orogéniques sont plus ou moins continus depuis le Crétacé inférieur jusqu'au Quaternaire ; il y a permanence du style tectonique, même si les manifestations en sont diverses,
- il y a une relation étroite entre paléogéographie et tectonique ; les limites des zones paléogéographiques correspondant, à toutes les époques, à des discontinuités tectoniques importantes. Ce n'est là qu'une transposition à un domaine continental d'une théorie largement vérifiée dans le domaine marin des Alpes.

Après ce bref exposé des principales théories qui ont marqué l'étude géologique de la Provence, nous reprendrons, en le résumant, l'essai sur l'évolution tectogénétique de la Provence de MM. J. AUBOIN et G. MENNESSIER, qui représente la synthèse des travaux ayant trait à cette région.

b) Evolution tectogénétique

(d'après J. AUBOIN et G. MENNESSIER)

On observe en Provence l'existence de deux grandes périodes orogéniques, l'une d'âge hercynien, l'autre d'âge alpin (ou provençal), qui se situe pendant le secondaire et le tertiaire.

- L'orogénèse hercynienne a intéressé ce que l'on convient actuellement d'appeler le "socle" par opposition à tout ce qui le surmonte à partir du Trias. Ce socle révèle la succession de trois phases d'âge primaire qui permettent de rattacher le domaine provençal à la cordillère de l'Europe moyenne.

On distingue chronologiquement une phase sudète très importante, accompagnée de métamorphisme général et de montées granitiques. Une seconde phase "saaliennne" ayant eu pour conséquence le plissement Nord-Sud des synclinaux stéphaniens. Une troisième phase, sans doute palatine, est post-permienne et anté-triasique, et simplement marquée par la discordance du Trias sur tous les termes antérieurs. C'est dans le massif des Maures, du Tanneron et dans la région toulonnaise que sont localisés ces affleurements "anté-triasiques".

- Le cycle provençal, qui débute avec le Trias, présente un plus grand intérêt, car c'est de lui que dépend la physionomie actuelle de la Provence.

- Au Trias, la région provençale fait partie de la mer germanique. Il semble, par ailleurs, qu'il y ait lacune du Trias inférieur.

- Au Jurassique et au Crétacé inférieur, la Provence représente le bord méridional de la mer alpine. Les niveaux deviennent, en effet, de plus en plus néritiques lorsqu'on se dirige vers le Sud. Cependant, la limite entre les faciès alpins et provençaux est assez fluctuante et varie en latitude au cours du Jurassique. Cet aspect est encore souligné par les variations de faciès et les lacunes fréquemment observées au sein des séries jurassiques. Un fait nouveau est cependant sensible dès le Jurassique supérieur et le Crétacé inférieur : il s'agit d'un approfondissement dans le sens de l'Est vers l'Ouest, caractère encore sensible actuellement.

- A la fin du Crétacé inférieur, la Provence s'individualise par une série de mouvements débutant dès l'Aptien. Ces mouvements se traduisent par l'émersion du domaine durancien allongé Est-Ouest. La bauxite, formation éluviale, est le témoin de cette émersion que l'on date de l'Albien. L'âge du mur de la bauxite reflète l'allure de la surface morphologique fossilisée par son dépôt. D'une façon générale, le mur est de plus en plus ancien vers le Nord-Est (au Sud, termes récents du Crétacé inférieur, Aptien excepté ; au Nord, Jurassique supérieur ; à l'Est, Jurassique moyen). Ces mouvements ont une incidence primordiale sur l'histoire de la Provence : cette étape traduit une évolution du domaine provençal indépendante du domaine alpin, tandis qu'elle laisse apparaître des directions Est-Ouest, qui seront des directions majeures dans la tectonique de cette région.

Les séries sédimentaires, ayant subsisté après l'érosion albienne, sont beaucoup plus épaisses à l'Ouest qu'à l'Est, ce qui explique la différence entre le style tectonique de la Provence orientale (style fragmentaire) et le style tectonique de la Provence occidentale (style plus continu). En outre, les limites paléogéographiques de cet isthme durancien seront reprises par des discontinuités tectoniques, ce qui implique une permanence

dans l'évolution structurale de cette région : c'est ainsi que dans le massif de la Sainte-Baume un chevauchement met en contact des terrains à bauxite et des terrains sans bauxite. Enfin, s'accroît à cette période l'ébauche d'inflexion axiale Est-Ouest, déjà signalée au Jurassique supérieur et au Crétacé inférieur.

- Au Crétacé supérieur se développe une transgression se dirigeant progressivement du Sud-Ouest vers le Nord-Est aux dépens du domaine émergé durancien, où s'individualisent des "gouttières" sédimentaires d'axe Ouest-Est se rétrécissant vers l'Est. Leur âge est d'autant plus récent qu'elles sont situées plus au Nord. L'axe de sédimentation se déplace donc progressivement vers le Nord.

Du Sud au Nord et, par conséquent, chronologiquement, on distingue :

- la gouttière du Beausset où la transgression marine débute au Cénomaniens et se poursuit jusqu'au Santonien. Au-dessus, un régime lagunaire s'instaure avec le Campanien,
- la gouttière du synclinal de l'Arc, du Plan d'Aups-Mazaugues et du Val, située 30 km plus au Nord, n'est atteinte qu'au Santonien par la transgression marine. Le Campanien lagunaire la surmonte et les séries continentales se poursuivent jusqu'à l'Oligocène,
- la gouttière de Rians, 15 km plus au Nord, n'est pas atteinte par la transgression marine et des dépôts fluvio-lacustres s'y accumulent durant le Danien, l'Eocène inférieur et l'Oligocène.

Ce déplacement vers le Nord des zones de sédimentation semble donc en relation avec un soulèvement concomitant des régions méridionales de la Provence, associé à une onde de surrection. L'individualisation de la gouttière de Rians est postérieure à la transgression crétacée supérieure du golfe de Basse Provence proprement dit. Elle est à mettre en relation avec des mouvements généralisés postérieurs à la fin du Crétacé supérieur. Les conséquences de cette transgression sont tout d'abord l'affirmation des directions Est-Ouest, le dépôt de séries plus épaisses dans les gouttières Sud-Ouest que dans les gouttières Nord-Est, ce qui renforce encore les caractères précédemment évoqués lors de l'érosion bauxitique.

Enfin, cette évolution du golfe de Basse Provence est à mettre en relation avec les structures pyrénéennes, ce qui justifie l'appellation pyrénéo-provençale attribuée aux ensembles géologiques provençaux.

- La fin du Crétacé supérieur, et plus exactement le Maestrichtien, est caractérisée par une phase de surrection générale de la Provence qui se manifeste par l'apparition de faciès lagunaires au Campanien (étages locaux Valdornien et Fuvélien). Au Maestrichtien, l'émersion est complète et de véritables plissements se produisent. C'est ainsi que des formations bréchiqes envahissent le sous-étage Bégudien, discordant sur les précédents.

Les zones anticlinales qui séparaient alors les cuvettes synclinales étaient le siège d'une érosion intense pouvant aller jusqu'au Trias, ainsi qu'en témoignent les éléments des brèches. Cette période orogénique est très importante : les grands traits structuraux s'élaborent, l'exondation du domaine provençal sera définitive, les transgressions ultérieures ne l'atteindront pas, mais le contourneront. Ainsi, l'évolution tectonique tertiaire et plio-quadernaire sera liée à l'évolution morphologique et se produira "à sec".

- L'Eocène est une période d'évolution continentale pendant laquelle s'accumulent d'épaisses séries fluvio-lacustres (bassin de l'Arc et de Rians), témoignant encore de la continuité des spasmes orogéniques crétacés (brèche du Tholonet) et d'une évolution morphologique accentuée dont on suppose qu'elle aboutit à l'établissement d'un relief de type jurassien.

- Une troisième phase orogénique, dite "première phase provençale", se situe entre l'Eocène moyen et l'Eocène supérieur. Le plus souvent, on parle de mouvements "antésannoisiens". Le style tectonique est celui de décollements de couverture avec translations généralement dirigées vers le Nord. Ces décollements ont affecté des séries continentales déjà évoluées morphologiquement (cf. LUTAUD 1937-1957) et les chevauchements sont localisés sur l'emplacement des têtes anticlinales maestrichtiennes érodées.

- Une quatrième phase, dite "seconde phase provençale", intervient immédiatement après la précédente. Elle correspond à des mouvements verticaux sans lien défini avec les mouvements tangentiels. Les affaissements conditionnent les directions des bassins oligocènes qui ne coïncident pas avec les axes des bassins mis en place à la suite des mouvements tangentiels.

- Durant l'Oligocène se poursuit l'évolution continentale en fonction des structures nouvellement mises en place. Il en résulte l'accumulation d'importants dépôts détritiques dans les bassins. Cette évolution se situe essentiellement pendant le Sannoisien.

- Une cinquième phase orogénique, que les études de C. CORNET situent au Stampien et que les travaux précédents qualifient d'anté-aquitaniennes, marque la fin de l'Oligocène (première phase alpine). On rattache à cette phase des repliements d'écailles, la surrection d'un méga anticlinal dans le massif des Maures et un certain nombre de structures transversales. Sont dans ce dernier cas les grands arcs triasiques (Barjols, Huveaune, Rougiers), ainsi que des champs de fracture orientés Nord-Ouest, Sud-Est et Nord-Est, Sud-Ouest.

L'Aquitaniens terminera ce cycle oligocène par une pénéplanation.

- Le Miocène inférieur et moyen s'inscrivent normalement dans la phase d'évolution morphologique post-orogénique oligocène. La mer miocène contourne la Provence à l'Ouest et au Nord-Ouest, ainsi qu'au Sud-Est. Le domaine provençal proprement dit voit se développer un réseau hydrographique drainant tout le secteur méridional vers le sillon marin situé au Nord-Ouest.

- A la fin du Miocène se développe une sixième phase de mouvements que l'on rapporte au Pontien s. l. C. CORNET (24) en fait un cycle orogénique complet (seconde phase alpine). Le résultat le plus important de ces mouvements est l'affaissement de toute la partie de la Provence sous la Méditerranée actuelle par l'intermédiaire d'une flexure. Le réseau hydrographique se trouve alors inversé en direction du Sud. Certains épanchements basaltiques datent également de cette époque. Les effets de ces mouvements orogéniques sont mal connus en Provence calcaire, mais il est certain qu'ils sont d'une grande importance, comme en témoignent de nombreuses études récentes (BILLEREY).

- Le Pliocène correspond à une évolution continentale fonction du nouveau niveau de base situé au Sud. Ainsi vont s'opérer de nombreuses captures d'anciens cours d'eau.

- Au Quaternaire, l'évolution morphologique se poursuit tandis que des gauchissements et des remaniements de structure se produisent (11). La tendance permanente à l'envoyage vers l'Ouest, déjà ébauchée au Jurassique supérieur, s'accroît, comme le dénotent les grandes accumulations alluviales de la Camargue.

c) Conclusion

Ce rapide résumé de l'évolution tectogénétique de la Provence permet de se rendre compte de la complexité de son histoire géologique, principalement à partir du moment où elle s'est érigée en domaine autonome. Il n'est pas de notre ressort de prendre position sur le style tectonique des mouvements provençaux. Nous souscrivons néanmoins à l'opinion qui se généralise et qui tend à considérer le domaine provençal en perpétuelle tectogénèse. Certaines périodes de "crise" s'apparentent à des "phases" classiques, mais les retouches nombreuses qui s'impriment de façon continue n'en contribuent pas moins à l'élaboration des structures. Ces petites déformations sont obliérées par les déformations plus importantes ; si l'on considère que la tectonique provençale a affecté un domaine continental, on peut mesurer la difficulté d'une reconstitution chronologique rigoureuse.

M. GIGNOUX, à la suite d'une excursion en Provence, traduisait ainsi son avis sur la tectonique provençale : "Tectonique désordonnée, se résolvant en une véritable marquetterie de petits compartiments où les laminages, les failles, les recouvrements locaux et en tous sens sont si déconcertants pour les géologues habitués aux grandes ondes régulières de la tectonique alpine".

2° - GEOLOGIE GENERALE DE LA ZONE ETUDIEE

La région qui nous intéresse se situe en Provence calcaire Nord occidentale et constitue l'environnement montagneux oriental des bassins de Rians et d'Aix.

Ce dernier bassin, individualisé au Santonien, comprend une épaisse série continentale allant du Campanien à l'Eocène.

Le bassin de Rians, individualisé après la phase maestrichtienne, est rempli par une série continentale dano-éocène.

Entre ces deux bassins, le massif de Sainte-Victoire/Sambuc développe une succession de plis complexes dans le Jurassique. Il chevauche les deux bassins qui le bordent au Nord et au Sud. Seules ses terminaisons orientales seront décrites.

Enfin, le massif jurassique de l'Aurélien et du Défends de Saint-Maximin fait suite à l'Est au cortège de massifs qui chevauchent au Sud le bassin d'Aix. Il est relié au massif de la Sainte-Victoire par l'étroite bande jurassique d'Ollières qui sépare le bassin de l'Arc de la plaine triasique de Saint-Maximin.

oOo

DEUXIEME PARTIE : ETUDES GEOLOGIQUES ET GEOTECHNIQUES
DES OUVRAGES

I - LE CANAL DE RIANIS

1° - INTRODUCTION

a) Situation géographique et caractéristiques de l'ouvrage

L'ouvrage est situé dans le bassin de Rians, à l'Ouest de la bande triasique qu'occupe le village. Le bassin est à ce niveau bien individualisé entre les reliefs de la Montagne de Vautubière au Nord et les reliefs du Massif du Sambuc au Sud.

Premier tronçon du canal maître 2ème section, ce canal prend naissance dans le bassin de dissipation du brise-charge de Rians, à l'endroit où le canal maître 1ère section se bifurque, l'autre branche se dirigeant vers l'Ouest (branche de Bimont).

Long de 1.427 m, le canal de Rians franchit par un remblai de 4 m le haut vallon du Béarn, ruisseau qui assure le drainage du bassin de Rians. L'ouvrage se superpose ensuite au tracé de l'ancien canal du Verdon, qui sera mis hors service, et suit le flanc Nord de la colline des Taillades sur 800 m. Puis le canal oblique vers le Sud pour se raccorder à la tête amont de la galerie de Sainte-Victoire. Le débit maximum à véhiculer a été fixé par les études de besoins en eau à 32 m³/s pour ce canal. La pente est de 0,23 m/km et le profil en long est parallèle à la ligne piézométrique. La pente des berges est prévue à 2 pour 1, la largeur du radier calculée pour la débitance optimum est de 3,0 m.

L'ouvrage de raccordement canal de Rians-galerie de Sainte-Victoire est destiné à assurer la mise en charge des eaux à la tête de la galerie de Sainte-Victoire.

Long de 35 m, cet ouvrage comporte :

- une zone de raccordement assurant le passage progressif de la section trapézoïdale du canal à la double section rectangulaire des pertuis,
- deux passes symétriques munies de rainures à batardeaux et équipées de grilles avec un appareil dégrilleur,
- une zone de mise en charge et de raccordement entre la section rectangulaire des passes et la section pseudo-circulaire de la galerie, ainsi qu'un puits de 4,65 m de diamètre pour le passage de la boule de curage.

Le drainage du canal est assuré par des buses perforées de 150 mm de diamètre intérieur en communication avec la recharge drainante du canal. Ces buses déverseront dans des ovoïdes, placés en général au fond des thalwegs traversés, et qui sont également destinés à assurer le passage des eaux de ruissellement des bassins versants et des eaux des fossés de pied de digue.

L'ovoïde de passage du ruisseau du Béarn, calculé pour un bassin versant de 48 km², pouvant débiter 7 m³/s maximum, a 46 m de long et des dimensions de 100x108 cm.

b) Cadre géologique général

Située au Nord du bassin d'Aix, la dépression de Rians correspond à la plus septentrionale des gouttières d'âge Crétacé-Eocène de Provence. Elle n'a pas subi la transgression marine du Crétacé supérieur, mais s'est trouvée comblée après la période orogénique maestrichtienne par une épaisse série continentale (torrentielle et lacustre) englobant principalement le Danien et l'Eocène, et de façon moins nette l'Oligocène et le Miocène.

Le Miocène marin est par contre présent à l'Ouest de Rians (Tortonien marin de Jouques), tandis que le pied de la Montagne de Concors, entre Jouques et Rians, a vu s'établir à cette même époque un régime littoral).

Le synclinal de Rians est allongé suivant une direction sensiblement Est-Ouest. Il est séparé en deux parties par une bande anticlinale triasique occupée par le village, suite vers l'Est de l'anticlinal du Sambuc, relayé vers le Nord-Est par l'anticlinal triasique de la plaine de Valavès. Il s'agit d'une virgation imposée au pli du Sambuc par l'interférence de deux directions de plissement métachrones et d'axes peu différents. A l'Est de cette bande de Trias se développe un synclinal éocène, entre les massifs jurassiques du Mont Major et d'Artigues. Les contacts entre le synclinal et ses bordures sont tectoniques. A l'Ouest de la bande triasique de Rians, le synclinal s'épanouit largement entre la Montagne de Vautubière au Nord (anticlinal déjeté à coeur de Bathonien) et les plis du Sambuc (anticlinaux jurassiques déversés au Nord).

Entre la ferme de la Louvière et Rians, on observe, au front du chevauchement du Sambuc, la surrection d'un anticlinal danien isolant ainsi le synclinal principal d'un petit synclinal éocène très perturbé.

La fermeture du synclinal à l'Ouest est normale, au pied des reliefs de l'anticlinal du Bois de Concors et des assises du Crétacé inférieur (Hauterivien et Valanginien), ces dernières bientôt recouvertes par la transgression miocène en direction de Jouques.

2° - ETUDE GEOLOGIQUE REGIONALE

a) Stratigraphie

Les séries crétacées-éocènes du bassin de Rians ont été étudiées en détail par A. de LAPPARENT (1938). Signalons avant tout que ces séries sont entièrement continentales ; elles s'apparentent le plus souvent à des zones d'épandage torrentiel et sont donc très irrégulières. Nous ne ferons donc que les compléter par les données que nous ont fournies les sondages.

Les terrains les plus anciens sont représentés par le Danien. La base de cet étage n'est pas observable dans le secteur intéressé. On peut néanmoins lui rattacher un affleurement de grès blonds, à ciment carbonaté, qui apparaissent en flanc inverse écaillé sous le chevauchement du Sambuc, dans le vallon au Sud de la Bourguède.

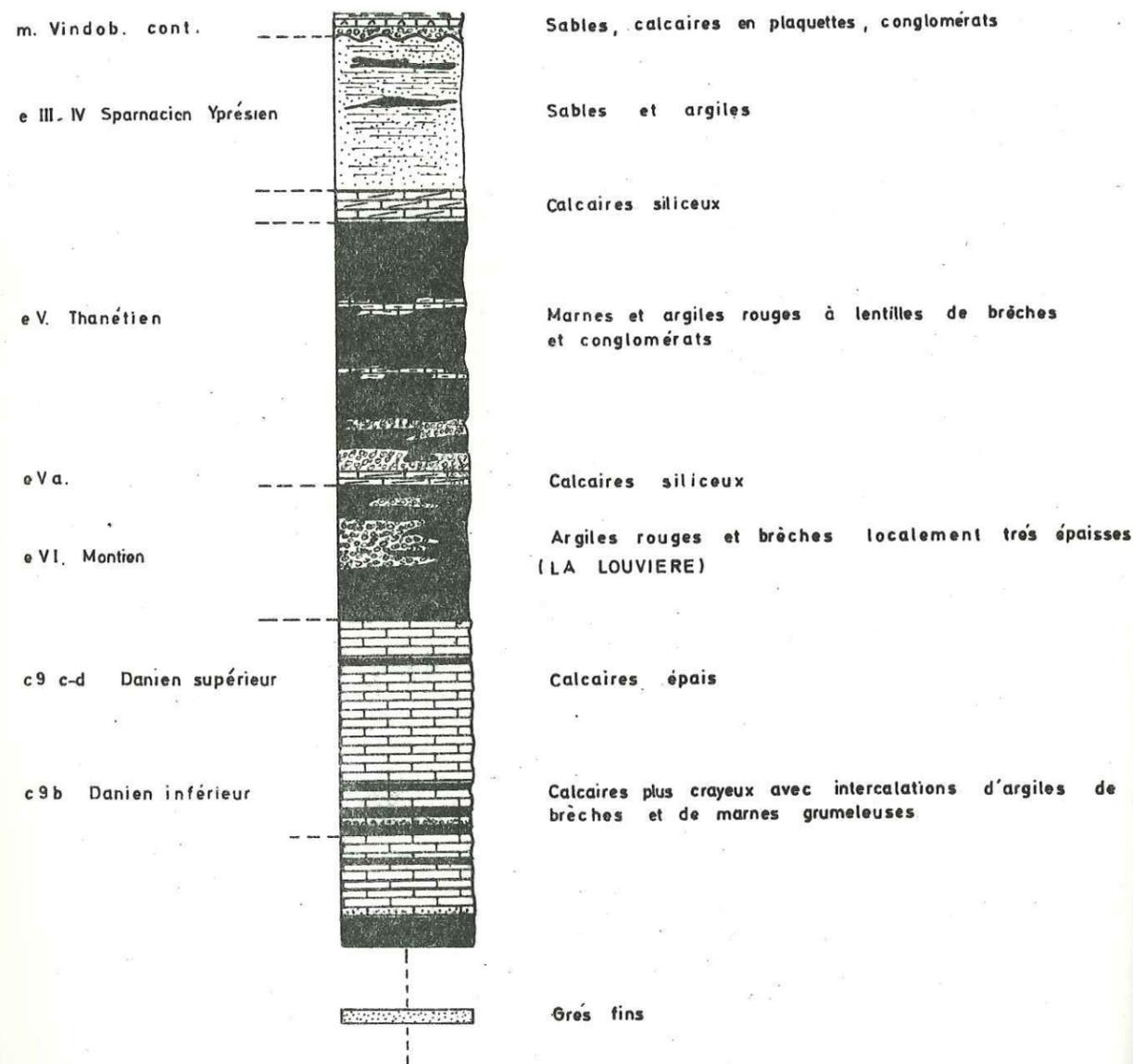
L'épaisseur de cette formation est indéterminable.

Une série de l'ordre de 70 m, très variée, surmonte probablement ces grès. Nous ne la connaissons avec précision que par les sondages, car les affleurements qui correspondent à cet ensemble sont très altérés. Il s'agit d'une alternance irrégulière de marnes grumeleuses, bariolées, localement ligniteuses, de calcaires lacustres tendres et crayeux et de brèches intraformationnelles. On peut penser que les variations latérales au sein de ces séries sont rapides, deux sondages voisins n'ayant permis aucune corrélation dans les séquences.

SERIE STRATIGRAPHIQUE DU BASSIN DE RIANs

Ech = 1/2.500

fig. 4



A cet ensemble marno-calcaire font suite des calcaires compacts en bancs à peu près métriques où les interlits marneux rougeâtres sont peu développés. Localement, on observe des bancs à pisolithes qui marquent généralement la base de ces calcaires. Le sommet de cette formation est beaucoup plus crayeux et tendre et fournit *Bauxia bulimoides*. Cet ensemble calcaire a environ 60 m d'épaisseur.

La dépression qui fait suite, au Nord, aux calcaires daniens de la Louvière est remplie par des formations marno-argileuses rouges, violacées et blanchâtres, attribuées au Montien. Vers la ferme de la Louvière, ces assises passent à des "brèches" très compactes à ciment rouge argilo-gréseux et à éléments sub-roulés de calcaires et dolomies jurassiques. Les éléments les plus anciens sont du Jurassique moyen. C'est la "brèche fleurie" de la Louvière décrite par Collot (20).

L'ensemble a 50 m d'épaisseur.

Surmontant ces marnes, une petite barre de calcaires lacustres (5 m maximum), à lits siliceux très irréguliers, marque le début du Thanétien. Ces calcaires sont surmontés d'une brèche identique à la brèche montienne de la Louvière et qui se présente sous la forme de lentilles irrégulières au sein de marnes gréseuses rouges. Vient ensuite une épaisse série d'argiles gréseuses à passées bleuâtres sableuses où on rencontre des bancs sporadiques plus indurés calcaires ou gréseux. Le Thanétien a 100 m de puissance environ.

Le Sparnacien, qui lui fait suite, débute par quelques bancs de marnes gris clair. Ces bancs sont surmontés par une barre de 15 m de calcaires siliceux, se présentant le plus souvent en plaquettes. Les moules de *Bythinia* y sont fréquents. L'Yprésien est représenté par 80 m environ de sables micacés, localement consolidés en grès, et d'argiles rouges quartzeuses.

Les faciès continentaux du Miocène moyen que l'on trouve dans les environs de Rians sont sans importance structurale ; on leur attribue quelques placages de tufs, des argiles brun rouge et des poudingues à galets de quartz.

Le Pontien et le Quaternaire ne sont représentés que par des épandages limoneux ou caillouteux, correspondant, pour les divers exutoires, à des périodes de crue sous climats variés. Quelques thalwegs sont comblés par des éboulis cryoclastiques (au pied de Vautubière et du Sambuc) plus ou moins cimentés par des argiles. Les éboulis de pente sont pelliculaires.

En résumé, la série lacustre du bassin de Rians s'étend du Danien à l'Yprésien. Elle présente de grandes analogies avec les séries du bassin d'Aix pendant le Crétacé supérieur, mais s'en distingue à l'Eocène. Il faut remarquer enfin que le bassin de Rians représente la limite septentrionale des faciès lacustres du Danien.

b) Tectonique

La tectonique influence peu la zone d'implantation de l'ouvrage. Cette zone se situe au centre du synclinal dans sa première partie et englobe la retombée régulière Nord de l'anticlinal daniens de la Bourguède, que nous décrivons dans la partie consacrée à la galerie de Sainte-Victoire. Le tracé recoupe ainsi des assises de plus en plus anciennes, depuis le Sparnacien-Yprésien, sur lequel est fondé le brise-charge de Rians, jusqu'au Montien. Les pendages ont des valeurs faibles et sont tous dirigés vers le Nord. A partir du PK. 0, 600 (1), le tracé longe le

(1) Dans le texte, PK signifie "point kilométré", PM "point métré"

flanc Nord de la colline des Plantiers, constituée par les calcaires lacustres du Thanétien inférieur recouverts par les brèches et argiles supérieures. Le canal est ainsi taillé dans ces formations puisqu'il suit les séries en direction. Il n'atteint les calcaires du Thanétien inférieur et les marnes du Montien que lorsqu'il oblique vers le Sud en direction de la tête amont de la galerie de Sainte-Victoire. Cette jonction se fait à la faveur d'une discontinuité dans les calcaires du Thanétien inférieur, sorte d'ensellement dû à l'existence d'une faille de direction Nord 5°.

c) Conclusion

Les reconnaissances par sondages réalisés à ce stade ont confirmé toutes les données géologiques précédentes. En outre, elles n'ont laissé prévoir que peu de difficultés pour l'exécution de l'ouvrage :

- Pour les déblais :

- peu de terrains plastiques, les argiles possédant toujours un important pourcentage de sable,
- existence d'une nappe essentiellement alimentée par les fuites de l'actuel canal du Verdon qui sera mis hors service pendant les travaux,
- faible pendage des couches,
- terrains en place peu altérés.

- Pour les remblais :

- pas de sols très compressibles, les marnes étant toujours drainables, sauf dans la traversée des abords du ruisseau du Béarn où un curage s'impose,
- pas de terrains instables risquant d'être mis en mouvement par le remblai.

Ces données ont été complétées par l'étude géotechnique des matériaux rencontrés. Cette étude est matérialisée par les campagnes de sondages et des mesures en laboratoire.

3° - RECONNAISSANCE GENERALE

a) Résultats des sondages

Les terrains de fondation de l'ouvrage ont été reconnus lors de deux campagnes de sondages :

- la première campagne, destinée à reconnaître un tracé initial, comporta dix sondages mécaniques (G. 25 à G. 34) n'excédant pas 10 m de profondeur et 49 forages à la tarière à main pouvant atteindre 3,60 m (T. 1 à T. 49).

Les forages à la tarière à main, au-delà d'une couche d'une quarantaine de centimètres de terre végétale, ont rencontré des séries variées.

Les forages T. 1 à T. 27 ont permis d'observer des terrains d'altération, limoneux ou sableux, localement graveleux. Il s'agit, le plus souvent, du remaniement des brèches thanétiennes. Les terrains alluviaux sont le résultat des débordements de crue du Béarn dont le régime est de type oued.

Les forages T. 28 à T. 49 ont recoupé les termes d'altération sur place des brèches et argiles thanétiennes.

Les sondages mécaniques G. 25 à G. 30, sous une couche alluviale de 2 m environ, ont rencontré les formations marneuses avec lentilles de grès du Thanétien. Ces terrains se sont révélés, soit saturés, soit très peu perméables.

Les sondages G. 31 à G. 34 ont rencontré les brèches thanétiennes à éléments calcaires sous les marnes sableuses rouges.

- La deuxième campagne intéresse la zone d'emprise de l'ouvrage définitif et comprend 16 sondages rotatifs de 86 mm, dont 11 ont fait l'objet de mesures de perméabilité en place. Cette campagne a confirmé l'étude géologique de surface et apporté des précisions sur la nature et l'épaisseur des terrains de recouvrement.

Les résultats figurent sur le profil en long géotechnique (fig. 5)

b) Etude géotechnique des matériaux rencontrés

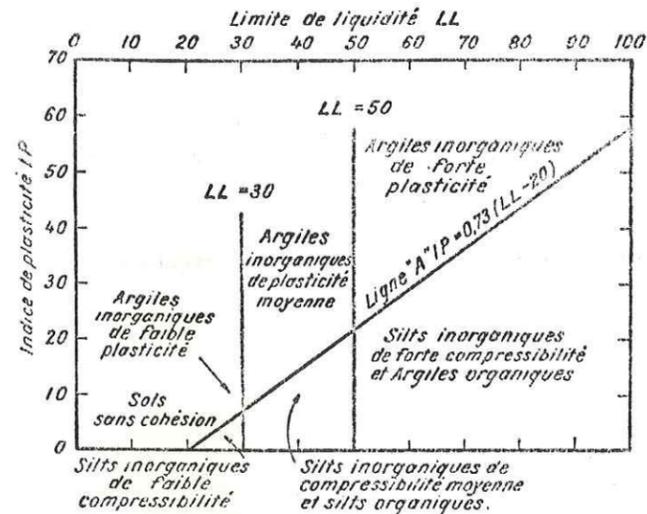
Les sondages ont permis d'effectuer une classification des terrains qui seront rencontrés au cours du terrassement de l'ouvrage. Cette classification a pour but de ranger les sols par catégories présentant des caractéristiques géotechniques identiques ou voisines. Il s'agit de fournir une base pour l'appréciation de la valeur du matériau en tant que couche de fondation, sa sensibilité au gel, ses caractéristiques drainantes, ses possibilités de tassement et de gonflement, la fourchette moyenne des densités sèches et humides, son aptitude à être compacté, etc...

Il est utile de préciser que des formations géologiques identiques peuvent donner des sols très divers du point de vue géotechnique et inversement, des formations géologiques diverses peuvent donner des sols analogues du point de vue géotechnique. La nature géologique de la formation est par contre très intéressante, car le type de dépôt (éolien, lacustre ...) influence les caractéristiques du sol.

Les essais de laboratoire portent sur l'identification des sols et la détermination de leurs caractéristiques géotechniques. Rappelons brièvement les définitions des paramètres utilisés :

- Les limites d'Atterberg sont mesurées sur la fraction des sédiments qui passe au tamis de 0,40 mm; elles représentent les teneurs en eau correspondant aux limites de liquidité (LL) et aux limites de plasticité (LP) déterminées par des essais normalisés. L'indice de plasticité (IP) est la différence des deux limites précédentes; il définit l'étendue du domaine plastique (0-5 : non plastique - 5-15 : moyennement plastique - 15-40 : plastique - 40 : très plastique).

L'abaque de plasticité de Casagrande (IP fonction de LL) permet de classer les sols en différents groupes :



— Abaque de plasticité. (D'après A. CASAGRANDE).

- La compacité relative d'un sol que l'on exprime en fonction de l'indice des vides peut s'estimer à partir de la densité sèche du matériau. On considère que les densités sont élevées si elles sont supérieures à 1,80.
- La résistance au cisaillement "s", définie comme "la contrainte de cisaillement sur le plan de rupture au moment de la rupture", est liée à la contrainte normale "p" par la relation : $s = c + p \cdot \text{tg} \varphi$ pour les terrains cohérents. C (cohésion) et φ (angle de frottement interne) constituent les caractéristiques de cisaillement du matériau considéré.
- Les caractéristiques déduites des essais de compressibilité (oedomètre) s'obtiennent à partir des courbes de diminution de l'indice des vides en fonction de l'augmentation de pression.

L'indice de compression est déduit de la courbe de compressibilité :

$$e - \log \sigma'$$

(e = indice des vides de l'échantillon - σ' = pression effective après consolidation).

Cette courbe présente le plus souvent une partie rectiligne horizontale suivie d'une partie courbe, puis, à nouveau, d'une partie droite et inclinée. Par définition, l'indice de compression C_c est la pente de cette droite inclinée. La pression de consolidation correspond à l'ordonnée du point où la partie droite inclinée de la courbe recoupe l'horizontale passant par la valeur de l'indice des vides initial.

L'indice de gonflement se détermine également graphiquement sur la courbe de décompression.

- La consolidation est la diminution progressive de la teneur en eau sous charge constante. La courbe tassement-temps s'obtient en reportant les lectures du comparateur en fonction de la racine carrée ou du logarithme du temps. Le coefficient de consolidation C_v est un facteur qui apparaît dans la théorie de la consolidation et qui permet de relier les temps de tassement à l'épaisseur de la couche de sol intéressée. C_v croît avec LL.
- Les caractéristiques mécaniques du sol s'améliorent en général quand la densité s'accroît. La réalisation d'une densité maximum s'opère par compactage. La teneur en eau optimum pour une énergie de compactage donnée est fournie par l'essai Proctor-C. B. R.
- Signalons enfin pour les calculs pratiques que le coefficient de sécurité, vis-à-vis du glissement dans les couches naturelles d'argile, est tel que la résistance au cisaillement le long des surfaces de glissement est à peu près égale à la moitié de la résistance à la compression simple. Cette dernière est la charge par unité de surface qui détermine la rupture d'une éprouvette cylindrique.

Nous distinguerons successivement les formations suivantes :

- les éluvions ou limons marrons graveleux,
- les formations alluvionnaires,
- les formations marneuses.

A - Eluvions ou limons marrons graveleux

- Identification

Treize échantillons ont été prélevés dans ce type de matériau que l'on retrouve dans la presque totalité des sondages, généralement en surface, immédiatement sous la terre végétale.

Un échantillon intact a été prélevé sur le sondage S. 12, entre 1,00 et 1,40 m. La teneur en eau mesurée est de 16 % et la densité sèche de 1,80. Tous les autres prélèvements ont été effectués sur des échantillons remaniés pour essais d'identification. Le fuseau des courbes granulométriques est plus ou moins étendu ($D_{maxi} = 100$) suivant l'importance des éléments graveleux. Mais dans chaque échantillon on retrouve un important pourcentage d'argile (éléments inférieurs à 2 microns) qui varie entre 12 et 30 %. L'importance de l'argile dans ce matériau ressort à l'examen des limites de liquidité (LL) et des indices de plasticité (IP) qui sont relativement élevés : $30 < LL < 43$ et $13 < IP < 22$.

- Résistance au cisaillement

Un essai triaxial non consolidé rapide sur échantillon intact a fourni les résultats suivants :

- angle de frottement interne = 14°
- cohésion C = 1,750 kgf/cm²

Ces valeurs correspondent à des éprouvettes non saturées (93 %). Si le matériau vient à être saturé, l'angle de frottement interne devient pratiquement nul. Dans ces conditions, la résistance au cisaillement rapide est indépendante de la pression normale qui s'exerce sur l'argile et égale à la moyenne des valeurs mesurées : $C = 2,500$ kgf/cm².

- Compressibilité

Un essai de compressibilité sur échantillon intact a été fait entre 0 et 8 kg de surcharge, L'échantillon employé représentait le matériau écrêté à 5 mm. Le graphique de l'essai montre que ce matériau ne tasse pratiquement pas entre 0 et 1 kg de surcharge et qu'il n'a pas tendance à gonfler. La surcharge déterminant la consolidation est de l'ordre de 2,35 bars pour un coefficient de compressibilité de 0,078.

B - Formations alluvionnaires

Il convient de distinguer dans ces formations trois types de matériaux :

- les alluvions
- les limons bruns vacuolaires
- les limons silteux bruns.

1°) Les alluvions

- Identification

Ce type de matériau se trouve uniquement dans la première partie du tracé et sa caractéristique essentielle est d'être saturé. Les courbes granulométriques sont très étendues et irrégulières. Les densités sèches mesurées sur échantillons intacts varient de 1,60 à 1,88 pour des teneurs en eau élevées entre 16 et 20 %. Quoique peu argileuses, ces alluvions restent assez plastiques.

Les limites d'Atterberg fournissent les résultats suivants :

29 < LL < 34 IP # 14

- Compressibilité

L'essai de compressibilité a été effectué sur un échantillon saturé. Il montre le caractère peu compressible de ce matériau.

Le coefficient de compressibilité est de 0,074 pour une pression de 1,6 bar, tandis que la perméabilité, très faible, est de l'ordre de 10^{-8} cm/s.

2°) Les limons bruns vacuolaires

Ils se divisent en limons bruns vacuolaires et limons sablo-graveleux bruns vacuolaires. La différence essentielle réside dans leurs pourcentages respectifs en sable et gravier. Les fuseaux granulométriques sont étendus et les pourcentages d'argile sont réguliers dans l'un et l'autre cas : entre 17 et 22 % pour le premier et entre 10 et 17 % pour le second.

Cette différence se retrouve quelque peu dans les limites de liquidité et apparaît surtout à la lecture des indices de plasticité qui sont supérieurs à 12 pour le premier et inférieurs à 6 pour le second.

La présence de vacuoles se traduit par une faible densité en place (1,67 sur échantillon intact) et une grande capacité de rétention (cet échantillon intact, bien que situé au-dessus du niveau de la nappe, possède une teneur en eau proche de celle de la saturation).

- Compressibilité

Un seul essai de compressibilité sur l'échantillon le plus graveleux laisse apparaître un important tassement, même sous de faibles charges, tandis que le tassement résiduel est élevé. La pression de consolidation est de l'ordre de 1,4 bar pour un coefficient de consolidation de 0,118.

3°) Les limons silteux bruns

- Identification

Le fuseau des courbes granulométriques de huit échantillons est très étroit et possède les caractères d'un matériau sableux fin. La limite de liquidité est régulièrement égale à 28 pour un indice de plasticité variant de 5 à 10. Sur deux échantillons intacts, les densités sèches varient de 1,60 à 1,87. Cette différence réside dans le caractère saturé du second.

- Résistance

Deux essais de résistance à la compression simple ont été faits sur des échantillons intacts non saturés. Cette résistance varie de 0,720 à 0,885 kgf/cm² et correspond à un matériau de consistance molle.

Un essai triaxial non consolidé rapide sur un échantillon saturé a fourni une valeur de cohésion de 0,510 kgf/cm² et un angle de frottement interne nul.

- Compressibilité

L'essai a été effectué sur un matériau écrêté à 2 mm et saturé. Chargé de 0 à 8 kg, cet échantillon tasse rapidement dès les premières surcharges. La pression de consolidation est de 2,1 bars pour un coefficient de compressibilité de 0,146. Le tassement résiduel important concorde avec le caractère non gonflant du matériau.

C - Formations marneuses diverses

1°) Marnes sableuses rouges

- Identification

Le fuseau granulométrique établi sur dix échantillons est étroit. Le matériau est fin (D maxi. inférieur à 2 mm). Les densités mesurées sur des échantillons intacts laissent apparaître que ces marnes sont très denses et peu humides. Les densités sont supérieures à 2 pour un taux d'humidité de 10 %. Les limites de liquidité varient, suivant que l'on est en présence d'un matériau plus ou moins sableux, de 24 à 42.

- Résistance à la compression simple

Les essais effectués sur des échantillons intacts ont fourni des valeurs comprises entre 0,750 et 13,8 kgf/cm².

- Compressibilité

Un essai de compressibilité à l'oedomètre a montré le caractère peu compressible de ce matériau. Par contre, les marnes ont une légère tendance à gonfler. La valeur trouvée est de 0,032 pour le coefficient de compressibilité correspondant à une valeur de surcharge de 2,250 bars.

2°) Grès tendre rouge à ciment marneux

- Identification

Deux sondages (S. 10 et S. 11) ont recoupé des formations sableuses plus ou moins cimentées par une matrice marneuse. Les essais d'identification ont été faits uniquement dans les zones les moins cimentées où on a obtenu un sable après délitage. Dans les zones gréseuses, seules des compressions simples ont été faites.

Les courbes granulométriques montrent qu'il s'agit d'un matériau fin (D maxi. inférieur à 1 mm), de granulométrie très uniforme avec un pourcentage d'argile négligeable. Ce matériau n'étant pas plastique, l'indice de plasticité est voisin de zéro. La densité naturelle varie de 2,14 à 2,20 pour une teneur en eau voisine de 8 %.

- Compression simple

Les valeurs des mesures faites sur des échantillons intacts, prélevés dans des zones non cimentées, sont de 16 à 13 kgf/cm² pour des teneurs en eau de 8 %. Dans les zones franchement gréseuses, on a mesuré 19,5 - 32 - 36 kgf/cm² pour des teneurs en eau respectives de 2,8 % - 6,9 % - 4,4 %.

- Compressibilité

Entre 0 et 8 kg de surcharge, l'indice de compressibilité est compris entre 0,016 et 0,021. Ces essais portant sur deux échantillons intacts, prélevés dans le sondage S. 11 à des cotes différentes, font apparaître une très bonne tenue de ces terrains pour les fondations d'ouvrages.

3°) Brèches à ciment marneux

Ce matériau présente, au point de vue géotechnique, toutes les caractéristiques d'une roche dure. Tout comme les calcaires thanétiens inférieurs, il présente une bonne ripabilité du fait même du caractère peu cohérent de ces formations.

c) Hydrologie

L'hydrologie du bassin de Rians est commandée par deux facteurs principaux :

- une alimentation complexe et difficilement chiffrable à partir des massifs calcaires bordiers (Vautubière, Sambuc) ; une alimentation continue et importante à partir des pertes de l'actuel canal du Verdon, non revêtu et vétuste,
- un drainage assuré par le ruisseau du Béarn, coulant de l'Est vers la vallée de la Durance et relayé dans cette direction par le ruisseau de Saint-Bachi.

Les sondages géotechniques ont fait ressortir l'importance des formations d'épanchement (type alluvial) bordant le ruisseau du Béarn et qui correspondent à des régimes de crue. Ce sont généralement des limons et des alluvions argileuses de perméabilité voisine de 10⁻⁶. Il y a cependant peu de différence entre ces perméabilités et celles enregistrées dans les formations conglomératiques et marno-sableuses du Thanétien ; le comportement de toutes ces formations en tant que réservoir est sensiblement le même. A titre d'exemple, voici quelques résultats obtenus lors des essais de perméabilité en place :

N° du sondage	Lithologie	MODE DE MESURE			Perméabilité m/s
		Descente	Injection	Remontée	
1	Marne sableuse	x			4. 10 ⁻⁸
2	Alluvions limoneuses	x			4. 10 ⁻⁶
	" "			x	2, 5. 10 ⁻⁵
3	Limons et alluvions	x			4. 10 ⁻⁶
	" "			x	1, 6. 10 ⁻⁵
4	Alluvions marneuses		x		5. 10 ⁻⁵
5	Conglomérat	x			2. 10 ⁻⁵
	" "			x	5. 10 ⁻⁶
6	Conglomérat à ciment marneux	x			3. 10 ⁻⁵
	" "			x	9. 10 ⁻⁶
7	Conglomérat marneux et calcaire	x			2, 5. 10 ⁻⁷
8	Calcaires fissurés	x			5. 10 ⁻⁶
	" "		x		5. 10 ⁻⁶
	" "	x			6. 10 ⁻⁶
9	Conglomérat à ciment marneux	x			1. 10 ⁻⁵
10	Sables consolidés	x			7. 10 ⁻⁷
	" "			x	2, 5. 10 ⁻⁵
12	Limons et alluvions	x			2. 10 ⁻⁶
	Limons et marnes			x	5. 10 ⁻⁷

Ces terrains présentent tous une faible perméabilité : il est donc à prévoir une consolidation lente.

Les pertes du canal du Verdon sont la cause principale de l'existence d'une nappe dans la vallée du Béarn. Les dix piézomètres installés sur le parcours du futur canal accusent tous une baisse de l'ordre du mètre pendant la courte période de chômage du canal. Ce canal devant être mis hors service à l'exécution des travaux, il est à prévoir un abaissement du toit de la nappe, bien que la faible transmissivité des terrains en cause laisse craindre un niveau piézométrique encore assez élevé.

L'ouvrage de franchissement du Béarn tiendra compte d'un écoulement naturel permanent et nous verrons quelles dispositions constructives cela impose.

4° - ETUDES DU TRACE ET DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

a) Ouvrage principal

Le tracé du canal de Rians peut être divisé en deux parties :

- Première partie

C'est la traversée de la plaine de Rians (du PK. 0, 000 au PK. 0, 600) proprement dite. Après le franchissement du ravin du Béarn, le projet se confond avec l'actuel tracé du canal du Verdon. D'une allure monotone, le canal recoupe un ancien vallon à important remplissage alluvionnaire.

- Deuxième partie

(Du PK. 0, 600 au PK. 1, 427). Le tracé se rapproche de la colline et les alluvions disparaissent. On recoupe alors les formations marneuses du Thanétien avant de pénétrer dans les brèches. Le tracé se confond avec le canal du Verdon avant d'obliquer vers le Sud pour rejoindre la galerie de Sainte-Victoire.

Les dispositions constructives sont les suivantes :

- Première partie (du PK. 0, 000 au PK. 0, 600)

Dès l'origine du projet, le canal franchit le "ravin" du Béarn par un remblai de faible hauteur (le radier de l'ouvrage est sensiblement à la cote du terrain naturel au point le plus bas). Le sondage S. 1 a recoupé une épaisse couche d'alluvions dont l'extension est confirmée par les travaux actuels du bassin de dissipation du brisecarge de Rians. Par ailleurs, la nappe est dans ce secteur presque affleurante.

La faible densité en place de ces matériaux, leur très faible capacité portante, laissent prévoir qu'il faudra procéder à l'enlèvement complet des alluvions saturées jusqu'à la rencontre des formations marneuses sous-jacentes qui constituent un très bon support de fondation. Il est néanmoins permis de penser que la mise hors service du canal du Verdon améliorera la qualité des terrains en diminuant leur teneur en eau.

Deux solutions sont envisagées pour traiter le problème du franchissement :

1°) Curage général

Au fond de la fouille sera mis en place un tapis drainant de 0, 50 m, remontant de chaque côté pour rétablir les circulations de la nappe. Le remblai pourra être réalisé avec le tout-venant des déblais de la galerie de Sainte-Victoire, associés aux matériaux de curage (limons, graviers).

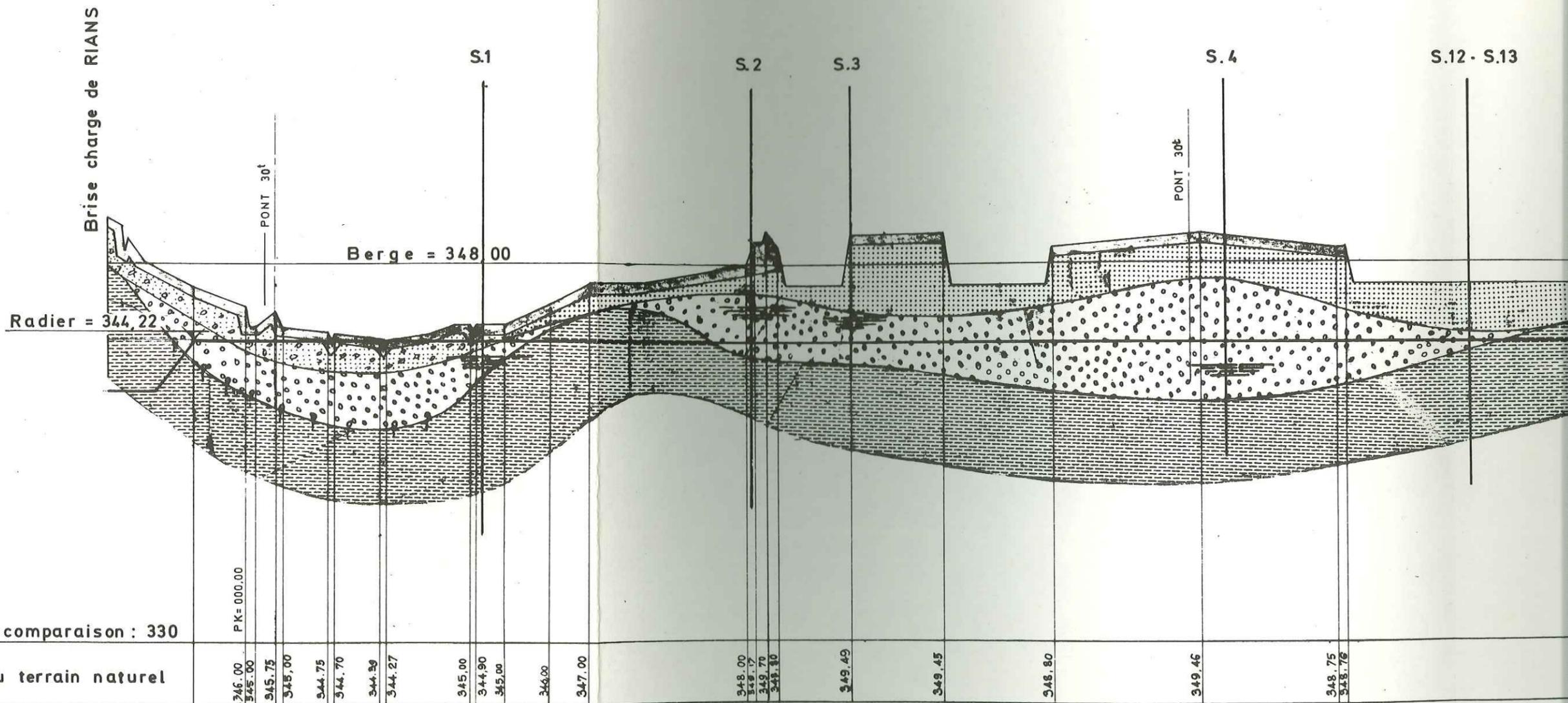
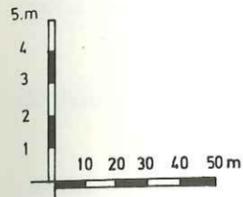
2°) Pas de curage

Le remblai est normalement mis en place sur le terrain naturel après le décapage de la terre végétale (0, 30 m). Les modifications apportées à l'écoulement des filets liquides par la construction du canal (léger tassement de la fondation, donc diminution de la perméabilité) pourraient conduire à une remontée de la nappe à l'amont du ruisseau.

Il faudra donc mettre en communication les deux zones situées de part et d'autre de l'ouvrage par des drains sous remblais.

CANAL

PROFIL EN



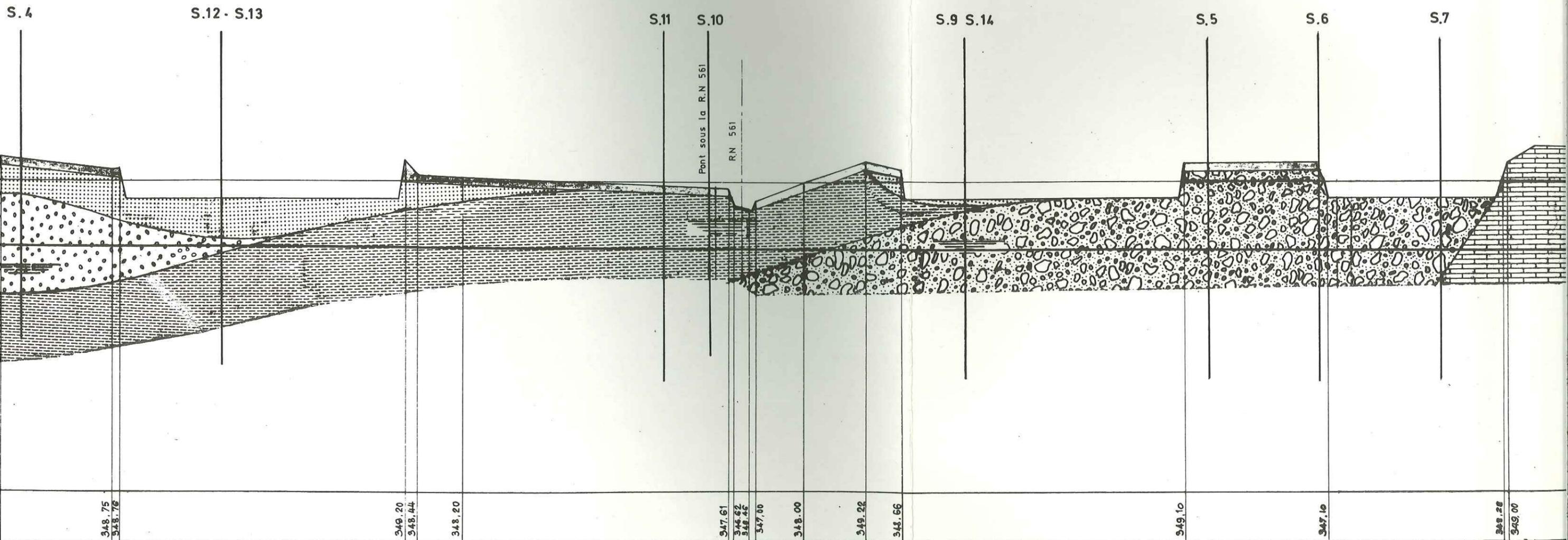
Univ. J. Fourier - O.S.U.G.
 MAISON DES GÉOSCIENCES
 DOCUMENTATION
 B.P. 53
 F. 38041 GRENOBLE CEDEX
 Tél. 04 76 63 54 27 - Fax 04 76 51 46 58
 Mail : plateau@univ-grenoble.fr

Terre végétale
 Limons
 Alluvions
 Formations

CANAL DE RIAN S

PROFIL EN LONG GEOTECHNIQUE

FIG. 5

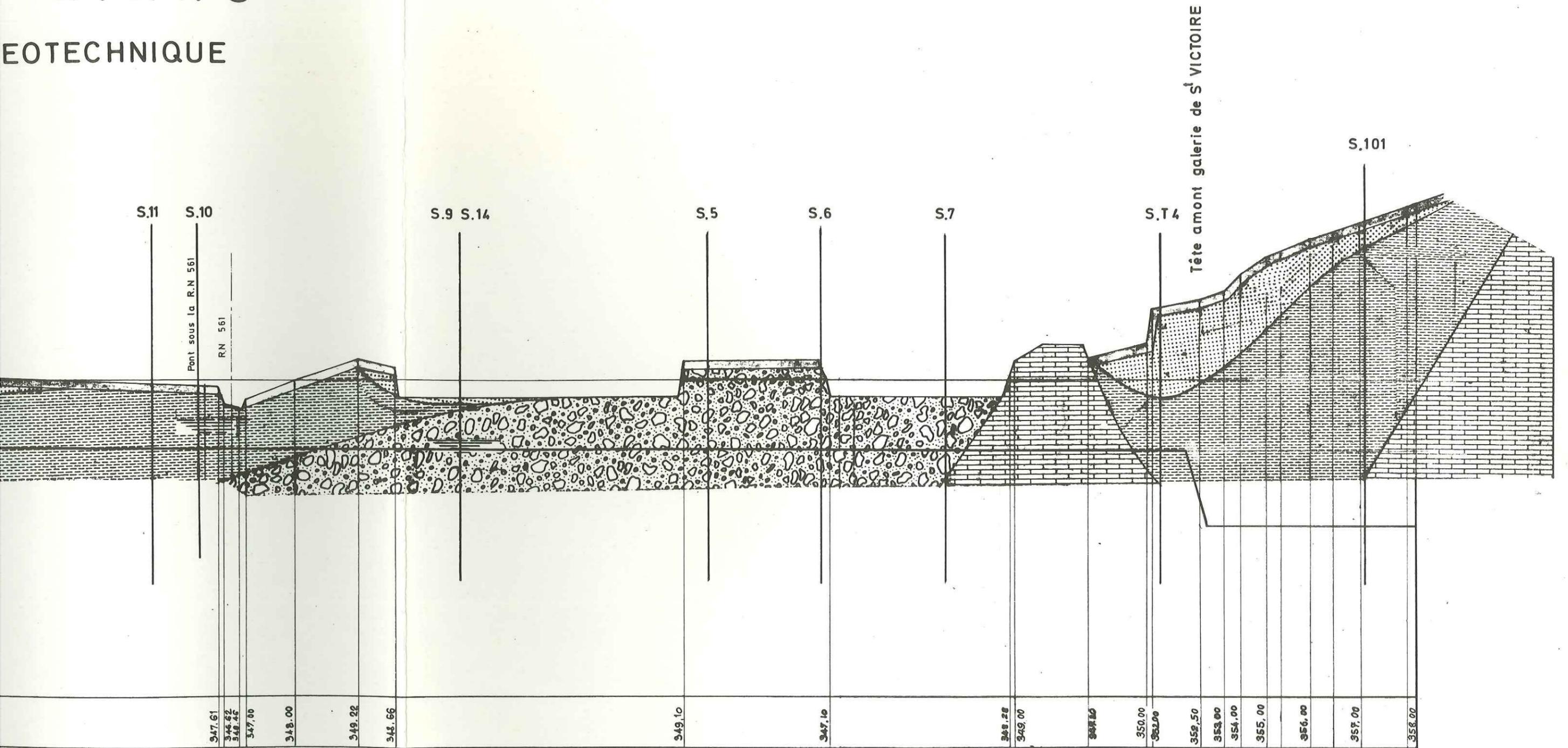


LEGENDE

- Alluvions
- Formations marneuses
- Conglomérat
- Calcaire
- Niveau de la nappe
- S = Sondage

RIANS

GEOTECHNIQUE



Conglomérat
 Calcaire
 Niveau de la nappe
 S = Sondage

Au PK. 0, 200, les marnes se rapprochent de la surface et les alluvions disparaissent. Elles se retrouvent au PK. 0, 250 (sondage S. 2), entre 1, 40 et 4, 60 m, et leur extension se prolonge jusqu'au PK. 0, 600. Elles remplissent là un ancien thalweg. Dans ce secteur, les pertes du canal du Verdon saturent les terrains à 90 % et même 100 %.

Les faibles perméabilités laissent craindre des difficultés au moment des travaux et il sera nécessaire d'enlever complètement les alluvions saturées jusqu'à la marne ; les limons et éboulis seront utilisés au remblayage.

Par ailleurs, le tracé du canal étant ici confondu avec le tracé du canal du Verdon, un décapage plus important est à prévoir pour se libérer des dépôts qui encombreront ce tracé.

- Deuxième partie (du PK. 0, 600 au PK. 1, 427)

Au-delà du PK. 0, 600 et jusqu'au PK. 1, 000, les alluvions saturées disparaissent et les terrassements ne rencontreront plus que les formations marno-gréseuses du Thanétien. Le tracé pénètre ensuite franchement dans le flanc Nord de la colline des Plantiers. Le terrain est alors constitué de brèches dures à granulométrie plus ou moins grossière. Tous les déblais rocheux pourront être réutilisés en remblai et notamment pour le comblement du déficit de l'amont. Enfin, le projet se termine à l'aval d'une combe où l'on retrouve un important remplissage d'éluvions et de limons. Dans toute cette zone, les terrassements pourront être augmentés de façon à exploiter la combe en zone d'emprunt. La nappe, décelée à ce niveau dans les limons, nécessitera une protection des talus au-dessus des berges par captage des eaux éventuelles.

b) Problèmes particuliers

1°) Passerelles de 30 tonnes

Deux passerelles de 30 tonnes sont prévues le long du tracé. Les terrains de fondation sont alluvionnaires. Si ces terrains sont enlevés et remplacés par un remblai, les semelles des piles pourront être calées de façon optimum (à la cote du radier par exemple). Si les alluvions sont laissées en place, la fondation nécessitera la recherche d'un support de bonnes caractéristiques mécaniques. Les marnes gréseuses pourront assurer ces qualités, car la force portante des alluvions est insuffisante pour assurer la fondation de passerelle.

2°) Pont sur la route nationale n° 561

Les deux sondages implantés à l'emplacement des piles ont rencontré des grès à ciment marneux qui constituent un très bon matériau pour la fondation de cet ouvrage.

3°) Recharges drainantes

Les recharges drainantes du canal ne posent pas de problème de granulométrie en dehors de la partie de l'ouvrage taillée dans les marnes sableuses rouges. Ce matériau étant assez fin, les recharges drainantes qui seront à son contact devront être de granulométrie très étudiée : la recharge convenable comportera des alluvions de Durancé écrêtées à 40 mm et enrichies en sable.

Dans les zones rocheuses (brèches et calcaires), les recharges en alluvions pourront être remplacées par un béton poreux drainant.

II - LA GALERIE DE SAINTE-VICTOIRE

1° - INTRODUCTION

a) Situation géographique de l'ouvrage et conditions topographiques

La galerie de Sainte-Victoire fait suite au canal de Rians par l'intermédiaire d'un ouvrage de raccordement établi sur le flanc Nord de la colline de Bourguède, à l'Ouest/Sud-Ouest de Rians. Après avoir traversé les derniers reliefs méridionaux du bassin de Rians sur 1.165 m (tronçon de la Bourguède), elle est rejointe par une fenêtre d'attaque de 200 m sise dans le vallon Sud de Bourguède (fenêtre des Vacons). Le tracé s'engage ensuite sur 9.100 m au sein d'un grand massif calcaire constitué par les terminaisons orientales du massif du Sambuc et de la Sainte-Victoire. Du Nord au Sud, il s'agit du Deffends de Rians, du massif de la Gardiole et du Bois de Pourrières que vient interrompre, en surface, le petit bassin de Puits de Rians.

Ce massif calcaire présente une topographie homogène de type collinaire, marquée essentiellement par un réseau hydrographique sec et peu encaissé.

Deux puits d'aérage sont prévus le long du tracé :

- le premier est à 2.200 m du point triple de la fenêtre et a une profondeur de 60 m,
- le deuxième, à 2.700 m à l'amont du brise-charge de Pourrières, a une profondeur de 140 m.

Le projet se termine à l'aval par le brise-charge de Pourrières implanté sur la bordure Nord du bassin de l'Arc.

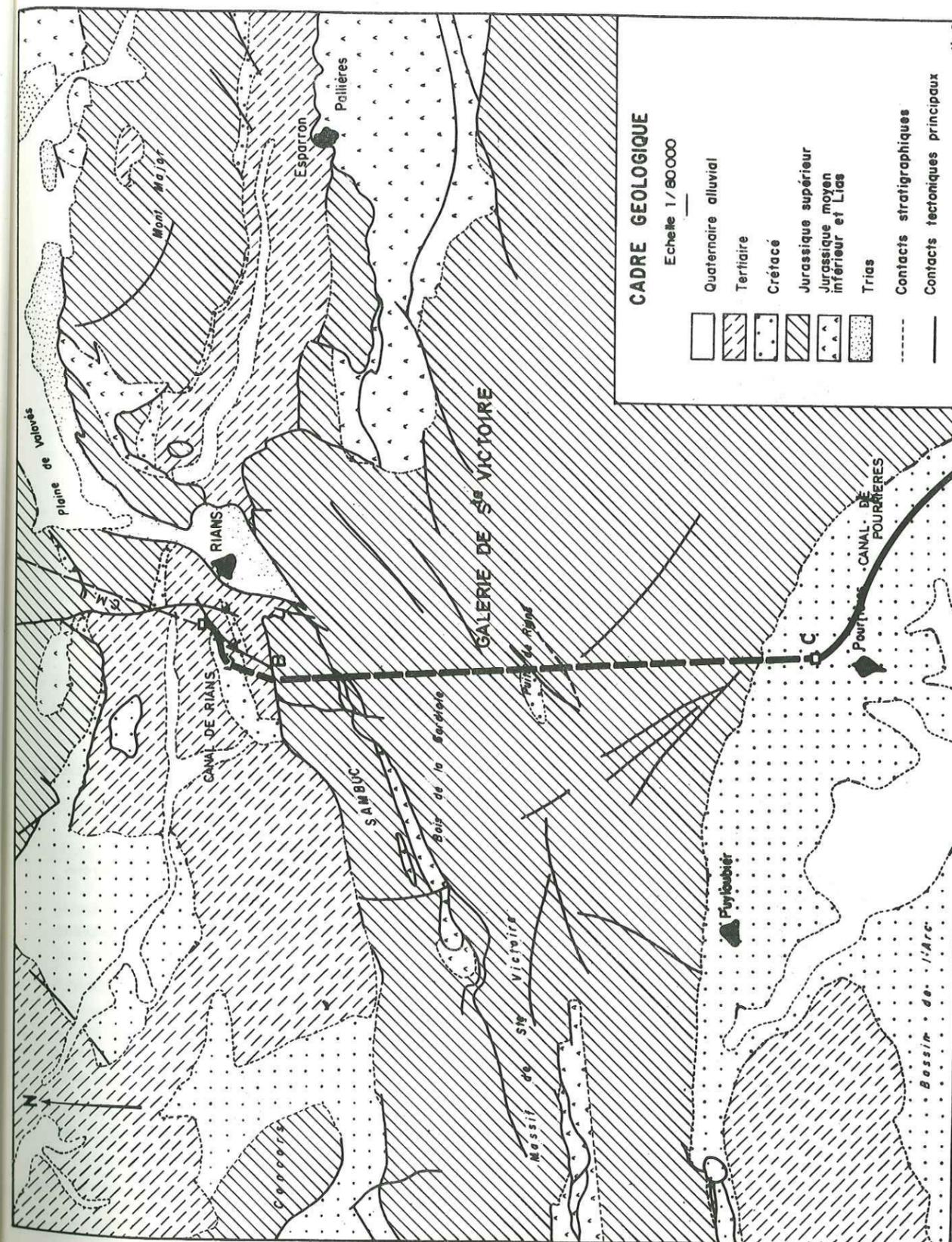
b) Esquisse sommaire de la géologie régionale

Deux grands bassins synclinaux crétacés et tertiaires, d'orientation générale Est-Ouest, limitent au Nord et au Sud un massif complexe essentiellement jurassique que traverse la galerie.

Le bassin septentrional de Rians, interrompu au niveau de cette localité par une bande triasique Nord 30°, qui sort en position anticlinale normale, est chevauché sur son bord Sud par l'extrémité orientale du pli du Grand Sambuc. Ce pli, déversé vers le Nord, apparaît très érodé le long de la vallée des Vacons, entre les fermes Haut Vacon et Bas Vacon. Le cœur, très écaillé et replissé, est constitué de dolomies infra-liasiques et de marnes du Jurassique moyen que recouvre localement une brèche, témoin d'une érosion d'âge danien. Au niveau du Bas Vacon et en se dirigeant vers l'Est, le pli du Grand Sambuc vient buter contre une série de replis et d'accidents d'orientation presque méridienne, qui viennent considérablement compliquer la structure. Corrélativement, les replis se multiplient dans la zone du Deffends de Rians. L'anticlinal du Sambuc se poursuit, très pincé, jusqu'aux abords de Rians où il laisse apparaître le Trias. Ce Trias ne tarde pas à devenir extrusif au niveau du village. Au Sud de la zone du Sambuc (vallon de Jouvénian, massif de la Gardiole), affleure de façon très chaotique le Jurassique supérieur calcaire et dolomitique. On peut y déceler quelques structures à valeur anticlinale ou synclinale, d'orientation sensiblement Nord-Est.

Cette disposition se poursuit jusqu'au Puits de Rians, vestige d'un synclinal rempli de Crétacé supérieur continental.

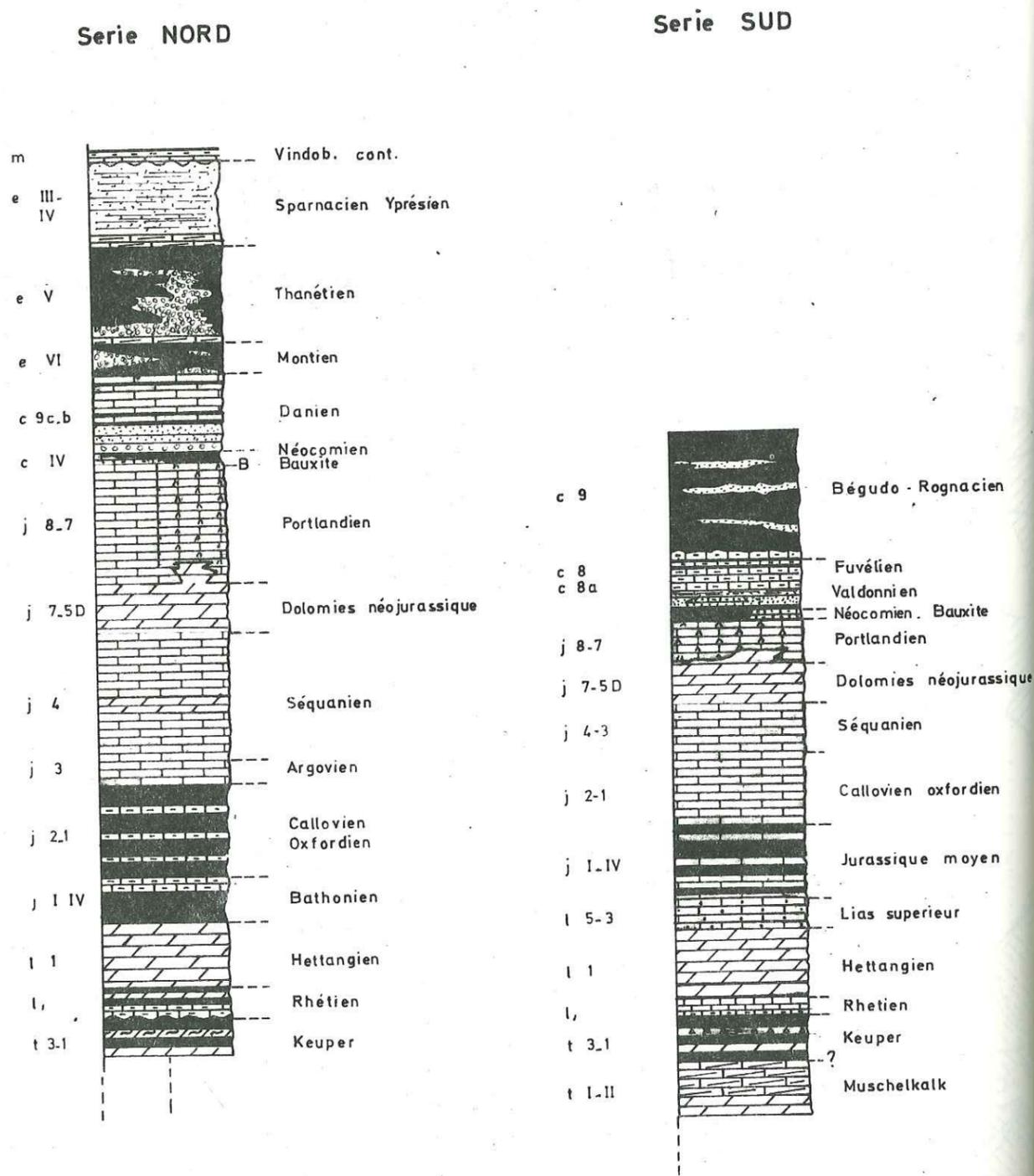
Au Sud de ce synclinal, le Jurassique supérieur s'infléchit de façon à peu près monoclinale jusqu'au village de Pourrières où une légère flexure marque le bord Nord du synclinal de l'Arc. Les sédiments continentaux d'âge crétacé supérieur du bassin de l'Arc recouvrent cette retombée et amorcent le vaste synclinal qui limite au Sud la zone étudiée.



SERIES STRATIGRAPHIQUES SIMPLIFIEES

Ech = 1/10.000

fig. 7



2° - ETUDE GEOLOGIQUE REGIONALE

a) Stratigraphie

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 imposée par une longue histoire tectonique,
- les variations de faciès,
- la dolomitisation qui envahit irrégulièrement les assises du Jurassique supérieur,
- l'absence de niveaux repères précis, surtout au sein des séries jurassiques,
- la très grande rareté des fossiles.

Il est malgré tout possible d'attribuer une position stratigraphique approximative aux ensembles observés et, dans tous les cas, de situer relativement les grands ensembles lithologiques. Les terrains qui intéressent l'ouvrage vont du Trias au Miocène inclus et comprennent des séries marines lacunaires du Trias au Jurassique supérieur (Crétacé inférieur localement), des séries continentales détritiques du Crétacé moyen au Miocène.

- Les affleurements les plus anciens sont attribués au Keuper.

Ils sont représentés par des zones chaotiques à dolomies rougeâtres et gris cendré, cargneules ruiniformes, argiles bariolées grises, rouges, quelquefois verdâtres. Le Keuper s'observe sous ces aspects à Rians. Les caractéristiques lithologiques et mécaniques de cet étage engagent à éviter les zones où on est susceptible de le recouper. Cet impératif a orienté le tracé général de la galerie à l'Ouest des zones où il est structuralement possible de rencontrer le Trias près de Rians.

- Rhétien

Souvent englobé dans l'Infralias, cet étage se présente sous son faciès souabe. Il comprend des calcaires gris cendré, finement lités, qui prennent par altération une teinte roussâtre ou jaunâtre. Certains niveaux inférieurs renferment des lits de lumachelles à *Avicula contorta* et des traces d'ossements de poissons. On retrouve, au sein de l'étage, des cargneules assez semblables à celles du Keuper. Le sommet (?) comprend des marnes brunâtres ou violettes.

- Hettangien

Cet étage se retrouve de façon constante sous un faciès de calcaires dolomitiques et surtout de dolomies grisâtres, blanchâtres ou jaunâtres, à débit parallélipédique, parfaitement azoïques. On n'y observe aucune intercalation marneuse. Les affleurements de l'anticlinal du Sambuc (fermes des Vacons), toujours écaillés et bouleversés, ne permettent pas d'en évaluer la puissance. On peut l'estimer à 60 m.

CORROY et VINCENT (37) signalent l'existence d'une lacune englobant le Lias et le Bajocien dans le secteur du Sambuc. Cette observation rejoint les travaux de COLLOT (20) qui avait constaté une réduction des séries du Lias à l'Est de Vauvenargues, aux environs de Claps, et envisagé une lacune stratigraphique. Par ailleurs, LANQUINE (50) constate la lacune du Lias moyen à l'Est de Rians, tandis qu'il observe la présence possible d'un Lias supérieur extrêmement réduit.

En outre, dans le Bathonien, certains bancs présentent des perforations de lithophages qui indiqueraient une série littorale faisant suite à une émergence.

- Bathonien

Les affleurements de cet ensemble à prédominance marneuse s'observent dans la vallée des Vacons. Quelques mètres de calcaire marneux gris compact forment l'extrême base de cet étage qui se poursuit par une série marneuse épaisse (60 m environ) renfermant *Cancellophycus*, *Lytoceras tripartitum* et des *Phyllocératidès*. Le sommet comprend quelques 20 m de calcaire compact, localement oolithique. On y observe en outre quelques passées dolomitiques.

- Le Callovo-Oxfordien lui fait suite dans le même secteur où il forme des pentes arides, fréquemment glissées. Il s'agit de marnes grises en masse et jaunes à l'altération, alternant avec quelques bancs de calcaires marneux de 50 cm d'épaisseur, facilement délitables. L'ensemble représente 120 m de puissance environ.

La faune comprend de nombreuses espèces : *Sowerbyceras subtortisulcatum* Pomp., *Belemnopsis latesulcatus* d'Orb., *Belemnopsis hastatus* Blain. On rencontre également quelques gastéropodes pleurotomaires (Ht. Vacon).

- Argovien

Avec cet étage, épais de 30 m environ, débute la puissante série calcaire du Jurassique supérieur. Il affleure tout au long de la vallée des Vacons, au sommet de la série inverse du flanc Sud de l'anticlinal du Sambuc. La base de l'étage se distingue des assises du Callovo-Oxfordien par l'apparition de bancs calcaires bien lités, grumeleux, légèrement roussâtres. Quelques interlits marneux s'observent encore à ce niveau. Progressivement, la série, toujours très litée, devient entièrement calcaire à patine gris roux et à cassure marron clair. Elle passe sans distinction au Séquanien.

La faune comprend : *Sowerbyceras protortisulcatum* Pomp., *Perisphinctes* Quenstedt., *Peltoceras transversarium*.

- Séquanien

On groupe sous ce terme stratigraphique - il comprend en fait Rauracien, Séquanien, Kimmeridgien inférieur d'après G. CORROY et H. VINCENT (37) - un ensemble de calcaires bien lités, à pâte fine, gris en surface, bruns ou rosés à la cassure et qui ont une importance morphologique majeure dans le flanc Nord du pli du Sambuc et dans les environs de Rians. On peut observer quelques bancs dolomitiques au sein de cette série qui peut atteindre 200 m de puissance.

- Dolomies néo-jurassiques

On rassemble sous cette dénomination un ensemble de dolomies d'âges certainement très divers, d'extensions verticales et latérales difficiles à préciser. Il semble en effet que ces dolomies représentent, d'une part la partie supérieure du Kimmeridgien, d'autre part des lentilles importantes au sein des calcaires récifaux qui forment la base du Portlandien. On peut simplement souligner que ces dolomies se situent toujours entre les calcaires "séquanien" et le faciès "calcaires blancs de Provence" du Portlandien supérieur.

Péetrographiquement, elles sont blanches ou grises, très cristallisées. Elles sont poudreuses lorsque l'altération météorique a exercé son action sur le ciment calcaire.

On peut attribuer à cet étage une puissance de 100 m maximum, celle-ci étant essentiellement variable.

Les fossiles y sont inexistant.

- Portlandien

Surmontant les dolomies ou y passant latéralement, le faciès "calcaires blancs de Provence" est regroupé dans le Portlandien. La partie inférieure est représentée par des calcaires d'origine récifale, très fins, localement magnésiens où on trouve de nombreux polypiers.

Le sommet de l'étage comporte une épaisse série de calcaires bien lités, porcelanés, très blancs. La base de cet ensemble est représentée par des calcaires très massifs (Pain de Munition, Dispute) où on observe des lits grumeleux. L'ensemble de cette formation du Portlandien a une épaisseur de 250 m environ.

Dans la partie Nord du massif (flanc Nord du Sambuc), voisine des secteurs plus septentrionaux à faciès tithonique, on observe un calcaire beige foncé, de type voisin des calcaires "séquanien". G. CORROY et H. VINCENT (37), après L. LANQUINE (52), les considèrent comme un faciès de transition entre le Portlandien récifal et le faciès tithonique, analogue aux calcaires de la Clue de Chasteuil. Nous n'avons pu distinguer, dans le secteur Nord, cet ensemble du Séquanien qu'il semble poursuivre en continuité lithologique, les dolomies néo-jurassiques étant très réduites.

- Valanginien

Au-dessus des calcaires portlandiens, G. CORROY (27) a pu individualiser le Berriasien et le Valanginien dans le massif de Sainte-Victoire. Nous n'avons pu retrouver dans notre secteur, situé notablement à l'Est de la zone d'observation de ces étages, pareille succession.

Tout au plus, au Nord immédiat de Pourrières, la retombée Sud du Portlandien est surmontée par des bancs calcaires fins, bien lités, légèrement rosés. Ces formations n'étant pas vraiment différentes lithologiquement du Portlandien, nous ne les avons pas distinguées. Il est possible que ces séries néocomiennes, que l'on retrouve sporadiquement sur la bande d'Ollières, aient été généralisées sur le massif de Sainte-Victoire avant l'action des érosions postérieures.

- Bauxite

L'épisode durancien marque pour cette région l'émersion définitive. On lui attribue un âge aptien. Les témoins de cette période s'observent sur les bordures du petit synclinal de Puits de Rians où, sur un mur de calcaires dolomitiques portlandiens, reposent des sédiments bauxitiques à nombreuses concentrations kaoliniques et surtout ferriques.

- Crétacé supérieur

Les formations du Crétacé supérieur sont variables sur l'ensemble du tracé et n'intéressent vraiment que les têtes amont et aval de la galerie. Elles peuvent être classées en trois catégories :

- l'ensemble Nord qui s'intègre au synclinal de Rians. On peut se reporter à l'étude qui en a été faite à propos du canal de Rians,
- l'ensemble Sud fait partie du bassin de l'Arc. Les séries de ce bassin sont décrites au chapitre intéressant le canal de Pourrières-Pourcieux qui les recoupe largement,
- l'ensemble médian du Puits de Rians n'a qu'une extension réduite : il n'intéresse pas la galerie qui se trouve à une cote notablement inférieure à celle du fond du synclinal (confirmé par le sondage S. 6). COLLOT L. (20) signalait l'existence de témoins lacustres "pris dans des plis ou des failles et ainsi protégés de l'érosion" au milieu des masses secondaires ; il en concluait qu'une immense nappe d'eau avait recouvert toute la région entre Arc et Rians. Ces affleurements sont attribués au Valdo-Fuvélien et comprennent des calcaires lacustres gris (semblables aux calcaires fuvéliens de Pourrières) et des marnes jaunâtres peu épais. L'ensemble est surmonté par un affleurement pelliculaire de microconglomérats quartzeux très grossiers renfermant de nombreux pisolithes centimétriques. Une lame mince réalisée dans ce sédiment n'a fourni aucun élément de datation. Il pourrait s'agir de dépôts d'âge bégudien, par analogie avec les formations contemporaines de Pourrières.

- Formations attribuables au Miocène

A. F. de LAPPARENT (58) et plus tard C. CORNET (24) décrivent de nombreux affleurements de composition très diverse sur tout le pays s'étendant de la Sainte-Baume jusqu'au Verdon et qu'ils considèrent comme des dépôts continentaux vindoboniens. Notre secteur en comporte un certain nombre :

- au Sud-Ouest de Rians, à 300 m au Sud/Sud-Ouest du point coté 467, 0, un placage de terrain pris dans un repli tectonique comprend : marnes jaunâtres, bancs irréguliers de microconglomérats à quartz peu roulés. On y rencontre localement d'énormes pisolithes (50 cm de diamètre). Associés à cet ensemble, des calcaires lacustres en fines plaquettes jaunes (2 à 3 cm) se sont révélés azoïques. Dans les portions gréseuses, nous avons trouvé Chara (Eocène actuel). Des lambeaux de composition analogue, décrits par A. F. de LAPPARENT aux environs de Rians, ont été attribués au Vindobonien,
- dans le vallon adjacent au vallon des Vacons, on trouve des grès fins en affleurements dispersés,
- au Nord de Pourrières, aux environs du sommet "La Dispute", C. CORNET (24) rattache au Miocène des petits galets de quartz qui se trouvent à une altitude moyenne de 460 m.

L'étude de C. CORNET (24), qui se rapporte à l'évolution de la Provence au Tertiaire, permet d'englober ce secteur dans un vaste complexe fluvio-marécageux miocène, drainé vers le Nord/Nord-Ouest, c'est-à-dire vers la mer vindobonienne dont les rivages se situaient entre Saint-Paul-lez-Durance et Valensole.

- Plio-Quaternaire

Peu développé dans la zone d'emprise de l'ouvrage, le Plio-Quaternaire comprend essentiellement des remplissages de fonds de vallons dus au lessivage des étendues calcaires. Les éboulis de pente sont inexistant.

Au niveau des travaux, l'étude stratigraphique montre en gros l'existence de deux catégories de terrains :

- le "substratum" comprenant des terrains allant du Trias au Portlandien inclus et correspondant à la phase marine de l'histoire de la région,
- les terrains continentaux supra-jurassiques, très variés, qui témoignent par leur composition (brèches, microconglomérats, calcaires lacustres) d'une évolution tectonique "à sec" complexe.

b) Tectonique

Les ensembles structuraux

Afin de faciliter l'étude analytique du secteur d'emprise de la galerie, nous diviserons celui-ci en cinq parties ; du Nord au Sud :

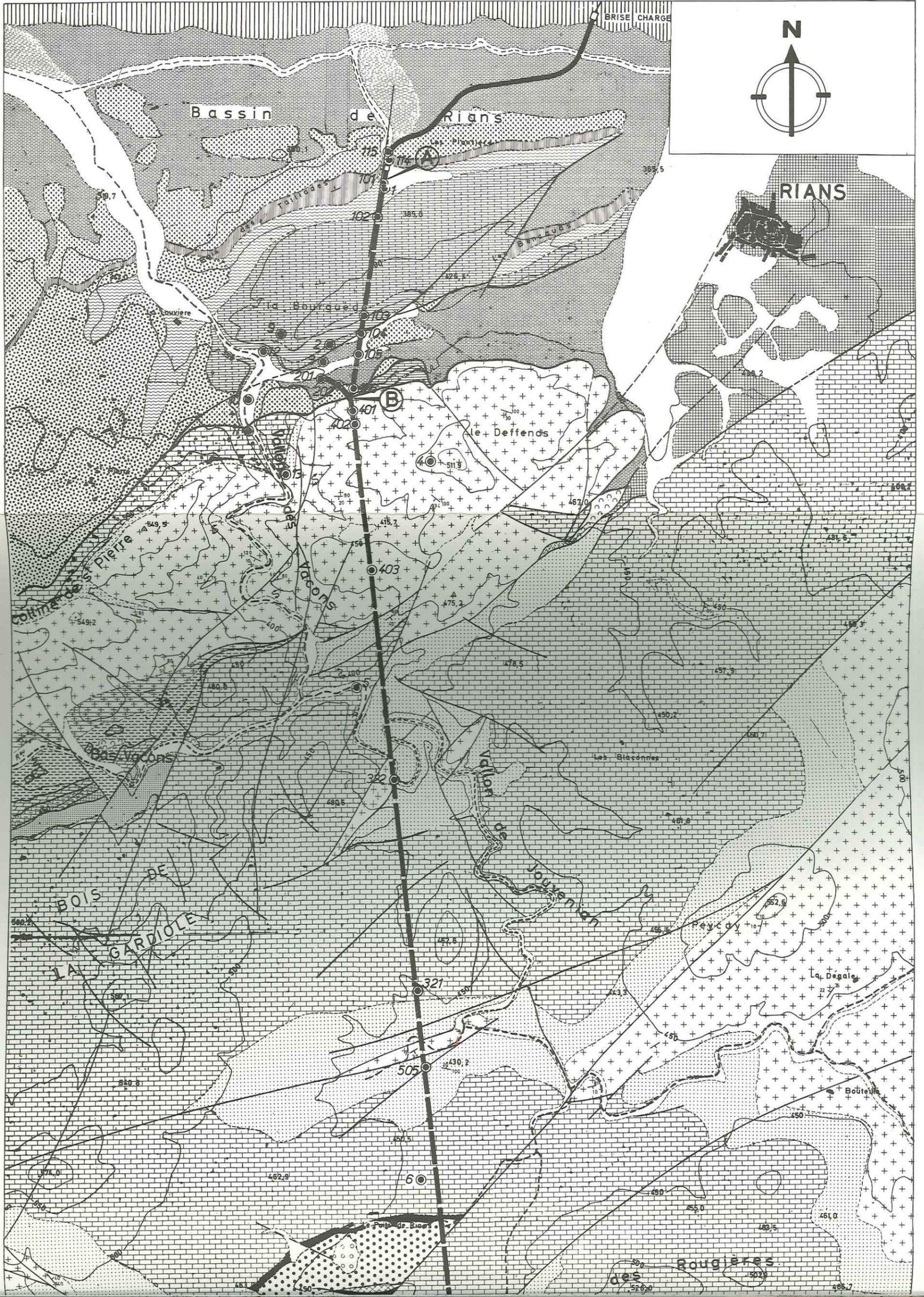
- le dôme de la Louvière, le contact tectonique entre Sambuc et bassin de Rians
- l'anticlinal du Sambuc-Vacons et ses terminaisons orientales
- le massif de la Gardiole
- le puits de Rians
- la terminaison orientale du massif de Sainte-Victoire au Nord de Pourrières.

GALERIE DE Ste VICTOIRE

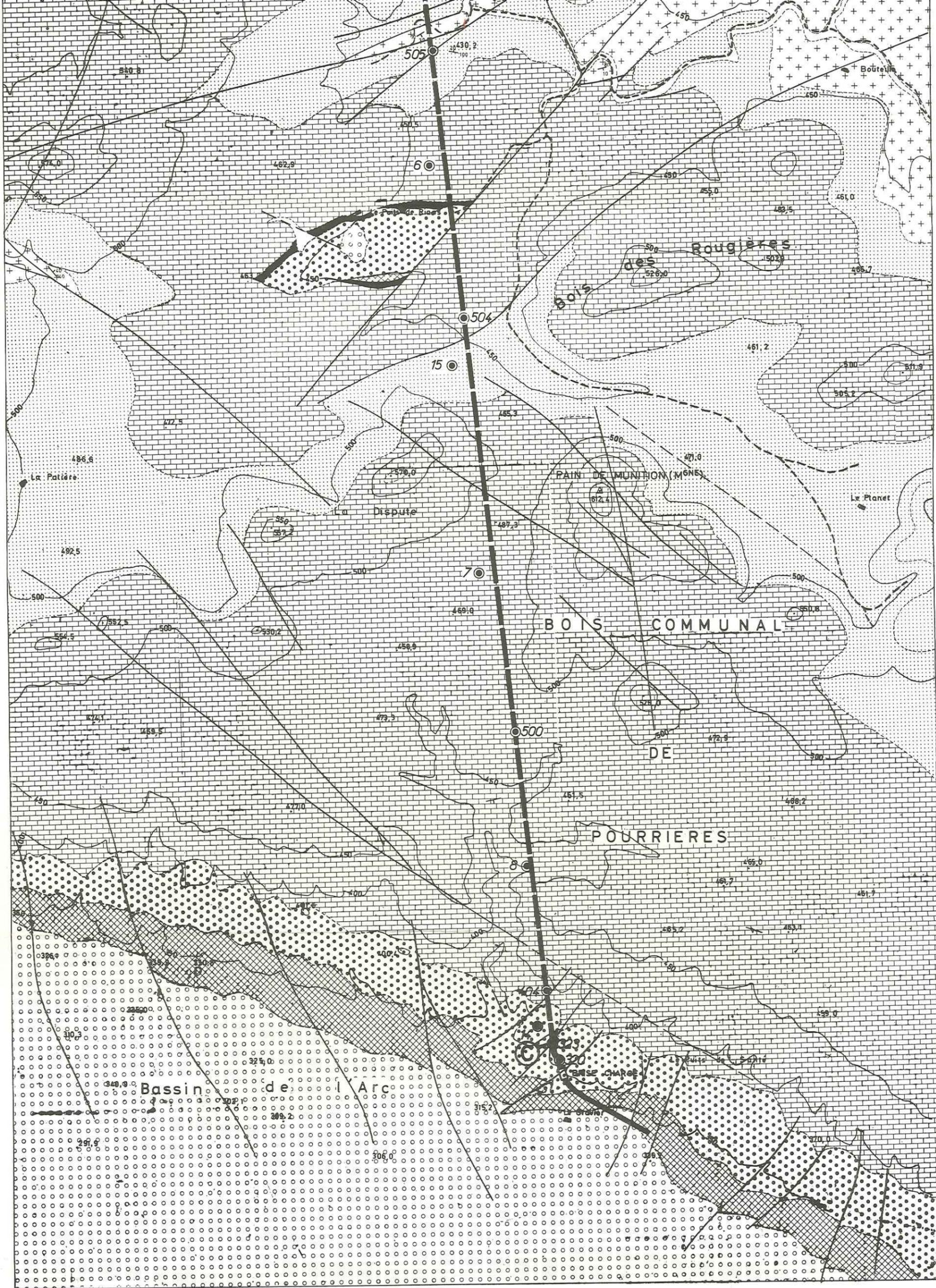
CARTE GEOLOGIQUE

ECHELLE : 0 100 500 1000 m.

FIG. 8



composition
 comme des de-
 de terrain
 congloméré-
 (diamètre).
 se sont ré-
 Des lam-
 ans, ont été
 dispersés,
 he au Mio-
 globes ce
 t-à-dire
 les remplis-
 arts,
 ories de
 onduant à
 sition (brè-
 plexe.
 lui-ci en



LEGENDE

SERIES CONTINENTALES			SERIES MARINES		
QUATERNAIRE	Calcaires THANETIEN e V	Brèche de bas Vacons	PORTLANDIEN J 8.7	CALLOVIEN OXFORDIEN J2-1	
MIOCENE m3	Marnes	BEGUDIEN C9a	DOLOMIES NEOJURASSIQUES	DOLOMIES INFRALIASIQUES 11	
SPARNACIEN YPRESIEN em IV	Brèches	FUVELIEN C8b	SEQUANIEN J5-4	RHETIEN 1,	
Argiles	DANIEN supérieur C9c	VALDONNIEN C8a	ARGOVIEN J 3	TRIAS (Keuper) † 3-1	
Brèches THANETIEN e V	DANIEN inférieur C9b	BAUXITE			
Contact tectonique	Contact stratigraphique	Sondage	Galerie	Canal	Pendage
					Repis

1°) Le dôme de la Louvière, le contact tectonique entre Sambuc et bassin de Rians

La description de la géologie du bassin de Rians a montré que la régularité de ce synclinal était interrompue, entre Rians et la ferme de la Louvière, par un dôme anticlinal calcaire d'âge danien, isolant, au front du massif jurassique du Sambuc, un petit synclinal éocène pincé et écaillé. La terminaison périclinale Ouest de ce dôme s'observe au Sud/Sud-Est de la ferme de la Louvière : l'anticlinal vient se refermer là sous le chevauchement de la masse jurassique du pli de la Chapelle Saint-Pierre. A l'Est, ce dôme s'abaisse graduellement par une série de décrochements de direction sensiblement Nord-Est et de rejet vertical.

Aux abords de Rians, l'anticlinal disparaît totalement pour laisser place à une plaine bordée à l'Est par le Trias et constituée par le Thanétien argilo-gréseux. Cette disparition est expliquée par l'existence d'une grande faille sensiblement Nord-Sud qui précipite l'envoyage à l'Est. Nous croyons plutôt à la terminaison très pincée du synclinal de Rians, telle qu'elle peut s'observer plus au Sud aux environs de 467, 0. Le coïncement de cette structure pourrait s'expliquer par une brusque flexuration d'axe sensiblement Nord-Sud qui pourrait justifier la superposition anormale du Trias sur l'Eocène au niveau de Rians (55). Ce type de compression méridienne s'observera également dans le vallon des Vacons et de Jouvénian.

Dissymétrique selon l'axe Est-Ouest, l'anticlinal de la Louvière l'est aussi selon la direction Nord-Sud. Si son flanc Nord pend régulièrement (15° environ) vers le centre du bassin, son flanc Sud est brusquement flexuré et laisse apparaître, le long de la colline de Bourguède, les assises plus tendres du Danien inférieur. Cette flexuration amorce le synclinal éocène qui fait suite à l'anticlinal danien au Sud ; un repli de détail fait apparaître un noyau de brèches au centre du vallon. Ce synclinal ne tarde pas à venir se coincer sous les assises jurassiques (Séquanien) du pli du Sambuc, chevauchant le synclinal de Rians.

Ce chevauchement, que rien ne rend évident sur le terrain, a été précisé par trois sondages. Un premier sondage, implanté dans une écaïlle de terrains d'âge danien rebroussés, a montré l'existence d'une série renversée : les calcaires daniens surmontés par les grès de base sont situés au-dessus des brèches et argiles éocènes. Il s'agit là simplement d'un lambeau du flanc Sud de l'anticlinal raboté par le chevauchement. Deux autres sondages, implantés dans les calcaires du Séquanien, ont recoupé en profondeur des brèches et argiles éocènes, permettant d'attribuer au plan de chevauchement une pente dirigée vers le Sud de 40° environ.

Le versant occidental du vallon des Vacons correspond à la retombée vers le Nord du pli déversé de la Chapelle Saint-Pierre. Le flanc inverse montre là les assises du Portlandien-Kimmeridgien sous les bancs d'âge séquanien qui forment la crête de Saint-Pierre. Le Portlandien vient lui-même en position anormale chevaucher le Dano-Eocène qui constitue la fermeture périclinale Ouest du petit synclinal pincé.

2°) L'anticlinal du Sambuc-Vacons et ses terminaisons orientales

Cet ensemble tectonique a fait antérieurement l'objet de descriptions de la part de L. COLLOT (20), A. F. de LAPPARENT (55), G. CORROY et H. VINCENT (37).

L'anticlinal lui-même n'est que la prolongation lointaine vers l'Est de la zone anticlinale limitant au Nord la montagne Sainte-Victoire (vallée de Vauvenargues). L'anticlinal Nord de Sainte-Victoire est en fait double au niveau de Vauvenargues, ainsi qu'il ressort de la dernière édition de la feuille d'Aix. Cette dualité se poursuit en direction de l'Est, l'anticlinal Nord étant celui du Sambuc, l'anticlinal Sud se poursuivant très irrégulier à partir de Claps en direction d'Artigues à l'Est de Rians. Le vaste ensemble de la Gardiole peut être considéré comme un secteur à valeur de synclinorium entre ces deux anticlinaux.

L'anticlinal du Sambuc n'atteint son plein développement vers l'Est qu'à partir de la ferme de Lambruisse. Nous l'étudierons légèrement à l'Est de ce secteur lorsqu'il est occupé par le ruisseau des Vacons. La structure générale est celle d'un anticlinal d'orientation Est-Ouest déjeté sur le synclinal de Rians. Le coeur de l'anticlinal, érodé jusqu'au Callovo-Oxfordien, a été fortement replissé lors des phases paroxysmales ultérieures. Ceci a eu pour conséquence l'apparition d'extrusions de Lias inférieur au sein de séries marno-calcaires du Jurassique moyen (37). Le flanc Sud de l'anticlinal, constitué de calcaires du Jurassique supérieur, chevauche régulièrement le coeur de l'anticlinal. Le flanc Nord comprend une série inversée régulière allant de l'Argovien au Portlandien qui entre en contact chevauchant avec le synclinal de Rians.

- L'anticlinal entre Haut Vacon et Bas Vacon

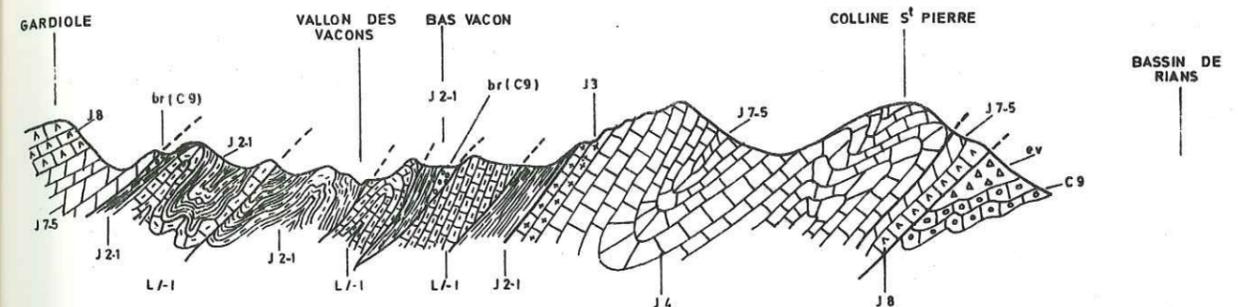
La disposition régulière ci-dessus se manifeste à ce niveau : du Sud au Nord. Les calcaires et dolomies du Jurassique supérieur chevauchent un anticlinal à deux bordures de Callovo-Oxfordien et Hettangien et à coeur de Rhétien. Le Séquanien est totalement absent de ce flanc Sud et il ne subsiste même pas à l'état de lambeaux étirés. Quelques noyaux d'Infralias dolomitique ressortent au front Nord du coeur anticlinal le long du ruisseau des Vacons, au sein de la série du Callovo-Oxfordien très replissée (replis observables à la source des Vacons).

Le flanc Nord est constitué régulièrement par une série inverse allant de l'Argovien au Portlandien.

- L'anticlinal au niveau de Bas Vacon

A partir de la source située à 500 m à l'Ouest de la ferme de Bas Vacon, la structure se complique. L'anticlinal conserve un flanc Nord régulier jusqu'aux environs de la cote 549,2, tandis que la portion médiane et le flanc Sud subissent un serrage vers le Nord qui amène le Portlandien du flanc Sud à recouvrir (butte 480,0) le noyau anticlinal. Ce dernier n'est plus alors réduit qu'à un mince liseré de Callovo-Oxfordien qui ne tarde pas à disparaître vers l'Est. On observe sous ce chevauchement du Portlandien quelques lambeaux de dolomies infraliasiques emballés dans les marnes du Callovo-Oxfordien.

Au niveau de la ferme elle-même, une brèche sédimentaire d'âge danien (?), reposant sur le Callovo-Oxfordien, est le témoin de l'érosion importante des coeurs anticlinaux avant le déroulement de la phase paroxysmale de la fin de l'Eocène. La présence de cette brèche a amené A. F. de LAPPARENT (58) à fournir une coupe Sud-Nord au niveau de la ferme de Bas Vacon, qu'a contestée par la suite H. VINCENT (76) en reprenant les idées primitives de L. COLLOT (20). Nous avons pu vérifier l'exactitude des interprétations de ces deux derniers auteurs et la coupe ci-après reprend en grande partie leurs idées, sauf pour la bordure Sud de l'anticlinal dont nous avons pu préciser la structure.



- La terminaison orientale de l'anticlinal

- Entre la ferme de Bas Vacon et le vallon des Vacons

A l'Est de la ferme de Bas Vacon, nous avons vu l'anticlinal principal se resserrer sous l'effet d'une poussée chevauchante des calcaires portlandiens du flanc Sud.

Le flanc Nord de l'anticlinal, jusque là fort régulier, est alors affecté d'un grand nombre de replis. C'est ainsi que l'on observe, au-delà de la crête séquanienne 594,2, un synclinal très pincé de dolomies néo-jurassiques que relayent au Nord des séries de plis très serrés qui affectent le Séquanien de la colline Saint-Pierre. La crête de Saint-Pierre elle-même est constituée par un très bel anticlinal, déversé sur le bassin de Rians par l'intermédiaire d'un liseré de Portlandien.

- Entre le vallon des Vacons et Rians

Toutes les structures témoignent ici d'une forte poussée vers le Nord : le contact avec le bassin de Rians se fait directement par la superposition du Séquanien sur le Dano-Eocène ; les structures sont fréquemment tronquées par des diaclases de poussée et les calcaires du Séquanien y prennent quelquefois un aspect schisteux (sondage S. 403) ; les plis bien individualisés à l'Ouest sont complètement écrasés et l'on n'observe plus qu'une succession d'ensembles calcaires (souvent non identifiables) "mylonitisés" et dolomitisés.

Les structures subissent en outre une nette virgation vers le Nord que nous avons pu démontrer dans quelques cas particuliers.

On distingue les unités suivantes :

Au Nord

Formant le chevauchement Nord sur le synclinal de Rians et de nombreux replis sensiblement isoclinaux, on observe un vaste ensemble de calcaires séquaniens qui constitue la colline du Deffends de Rians. L'anticlinal de la colline de Saint-Pierre se retrouve très écrasé à l'Est du vallon des Vacons. Ces replis ne sont pas cylindriques et on y discerne des ensellements synclinaux et des bombements anticlinaux transverses. L'axe

construit de ces plis a une direction de Nord 25° et un pendage de 25° Sud. La terminaison Est de cet ensemble séquanien est peu nette : l'ennoyage est brusque au Sud-Ouest de Rians, sous les assises tertiaires et plio-quaternaires qui forment un vallon. La brusque apparition du Trias sur le bord Est du vallon laisse penser que sous les terrains récents la terminaison de l'ensemble séquanien s'apparente à une faille complexe ou à un pli écrasé et faillé d'axe Nord 20-30°

Au Sud

Le vaste ensemble portlandien de la Gardiole, qui formait le flanc Sud de l'anticlinal du Sambuc, se prolonge vers l'Est. Au niveau de la partie Nord du vallon de Jouvénian, on y discerne des replis très aigus où le Séquanien forme le coeur d'anticlinaux axés Nord 25°. Le méandre ancien qui entoure la butte 404, 4 est un de ces anticlinaux.

Aux abords de la route de Rians, l'épaisse série du Portlandien est recoupée par la péninsule miocène. Les rares affleurements significatifs montrent les calcaires du Portlandien très broyés, formant de vastes étendues (bordure de la route Pourrières-Rians) où toute tentative de mesure de pendage perd son sens. Au Nord de 415, 64, le Portlandien est recoupé à l'emporte pièce par le Trias qui ne tarde pas à affleurer largement à Rians.

Entre l'ensemble Nord à dominante séquanienne et l'ensemble Sud à dominante portlandienne s'étend une bande de terrains broyés, essentiellement d'âge jurassique supérieur, qui prolonge à l'Est le coeur de l'anticlinal du Sambuc.

A l'Est de la butte 480, 0, le vallon des Vacons, orienté Est-Ouest entre les fermes du Haut Vacon et du Bas Vacon, se dirige subitement vers le Nord à sa confluence avec le vallon de Jouvénian. Il y a là une grande discontinuité orientée Nord qui vient interrompre le développement de l'anticlinal du Sambuc, écrasé au Nord par le Portlandien de la butte 480, 0. L'anticlinal vient en effet se bloquer entre le Portlandien au Sud et le Séquanien au Nord, en bordure du chemin des Vacons, au Nord-Est de 439, 5. On observe également la disparition, par une brusque virgation vers le Nord, du synclinal pincé de dolomies qui faisait suite au Séquanien du flanc Nord de l'anticlinal du Sambuc (Nord de 480, 0). A ce niveau, des replis très serrés de Séquanien, d'axe Nord 85-80°, passent à l'Est à un repli synclinal d'axe Nord 20° qui pend de 50° vers le Sud. Dans ce secteur, on observe également de nombreux plans de poussée qui tronquent les plis et amènent le Séquanien à se chevaucher lui-même.

A l'Est de la confluence entre les deux vallons (Jouvénian et Vacons), s'étend une cicatrice jalonnée par une bande large de dolomies néo-jurassiques qui remonte en direction de Rians (point 467, 0). Cette cicatrice met en contact le Portlandien au Sud et le Séquanien au Nord. L'affrontement se fait par l'intermédiaire d'une zone très broyée et écaillée où toute trace de pendage mesurable a disparu. Au niveau du point 467, 0 au Sud-Ouest de Rians, le Trias (Keuper) surgit le Portlandien au Sud et le Séquanien au Nord. Ce Trias est par ailleurs associé à des dépôts bréchiques et calcaires dano-éocènes et de dépôts variés attribuables au Vindobonien. Cette apparition du Trias entre Portlandien et Séquanien, le fait que l'on retrouve une brèche identique à celle de Bas Vacon, laissent supposer qu'il s'agit de l'anticlinal du Sambuc qui ressort écrasé au niveau de Rians. Absent à l'Ouest au coeur du pli du Sambuc, il ressort à l'Est en raison de l'accentuation des structures.

Ainsi, au Nord de 480, 0, l'anticlinal aurait simplement été déplacé vers le Nord, mais il se poursuivrait au Sud de 439, 5 jusqu'aux abords de Rians, plus ou moins pincé et refermé entre ses deux flancs de Jurassique supérieur.

3°) Le massif de la Gardiole

Il s'étend du Nord au Sud, depuis le flanc Sud de la zone anticlinale du Sambuc jusqu'au Puits de Rians. Nous considérerons une bande Nord-Sud comprise entre le bois de la Gardiole et les reliefs de Peycay qui intéresse directement l'ouvrage.

Le bois de la Gardiole représente une vaste étendue de Jurassique supérieur récifal qui a subi de nombreuses vicissitudes tectoniques. Les séries non stratifiées, broyées au point de ne former souvent qu'une imbrication de blocs, sont difficilement interprétables. Seule l'analyse statistique des mesures de plans a pu nous fournir quelques éclaircissements. De nombreux rejeux affectent toute cette zone : l'absence de repère stratigraphique entre le Kimmeridgien et le Portlandien empêche de les localiser. En outre, tout ce secteur a subi une pénéplanation qui a oblitéré toute contribution de la morphologie à l'explication des structures.

Le secteur bordant le vallon de Jouvénian laisse apparaître des rides anticlinales Nord-Sud où affleure, au milieu des assises récifales et dolomitiques du Portlandien, le Séquanien en gros bancs. Cette apparition du Séquanien se situe sur le méridien qui marque le début d'une virgation importante vers le Nord de structures axées jusque là Nord 80-90°. Les axes anticlinaux prennent alors des directions allant de Nord 20° à Nord 50°. La chronologie des mouvements semble ressortir de l'étude structurale sommaire que nous avons résumée plus loin.

Le secteur de la Gardiole est bordé au Sud par la prolongation lointaine du deuxième anticlinal (anticlinal méridional) de Sainte-Victoire que l'on suit depuis Vauvenargues, Claps et le Puits d'Auzon. Le coeur de cet anticlinal est constitué de Séquanien ; on peut l'observer aux environs des points cotés 430, 20 et 425, 15, avec une direction axiale Nord 70°. Il s'infléchit ensuite vers le Nord pour former le relief séquanien de Peycay, après avoir convergé aux environs de 443, 3 avec un accident important de direction Nord 40°, responsable plus au Sud de l'effondrement du petit bassin de Puits de Rians. Le coeur de cet anticlinal est fortement poinçonné et écaillé ; les sondages ont confirmé que les replis y étaient nombreux. La jonction entre cette zone et le petit synclinal de Puits de Rians s'effectue par l'intermédiaire d'une aire sub-horizontale de calcaires portlandiens et de dolomies très broyés où toute structure est indéchiffrable.

En résumé, tout ce secteur se trouve à la convergence de deux systèmes de plissement d'axes différents. Cette convergence a pour conséquence une virgation vers le Nord des structures sensiblement Est-Ouest de la Sainte-Victoire. L'effet maximum de cette convergence est l'apparition vers le Nord de la bande triasique de Rians.

4°) Le puits de Rians

Ce petit témoin de sédiments d'âge crétacé supérieur a la forme d'une amande allongée Est - Nord-Est/Ouest - Sud-Ouest. Il repose par l'intermédiaire d'une assise à bauxite sur du Jurassique supérieur (calcaire dolomitique). Cette zone correspond à un effondrement complexe, probablement au début un simple mouvement synclinal qui s'est trouvé accusé et effondré postérieurement.

Le bord méridional du synclinal est affecté par un accident vertical important que l'on suit jusqu'à Peycay et orienté Nord 40° environ. Le broyage du substratum jurassique est dans ce secteur très accusé. Le bord Nord traduit également le passage d'un accident vertical.

5°) Les plateaux de Pourrières

Au Sud du synclinal de Puits de Rians, un dernier repli anticlinal cassé ramène les dolomies néo-jurassiques le long du flanc Nord des alignements collinaires de la Dispute et du Pain de Munition. Ces alignements que l'on suit depuis les sommets orientaux de Sainte-Victoire jusqu'au massif des Selves (sommets de Séouve) ont été interprétés (70-36) comme un ressaut morphologique correspondant aux calcaires massifs de la base de Portlandien. Si cette explication demeure valable, il n'en demeure pas moins que chacun de ces sommets correspond à un anticlinal d'axe méridien. Les ensembles qui les séparent correspondent à des replis synclinaux. La retombée vers le Sud des calcaires se poursuit ensuite régulièrement : la route Pourrières-Rians recoupe l'épaisse série du Portlandien qui pend vers le synclinal de l'Arc et se termine par une légère flexure, avant d'être recouverte par les sédiments fluvio-lacustres crétacés supérieurs. Un certain nombre de failles, d'orientation Nord-Ouest et Nord-Est affectent cette retombée. Leur présence ne se manifeste que par des rejeux peu importants au sein des séries du Portlandien.

Apport de l'étude microtectonique

Les affleurements se prêtant peu à des mesures valables, car les points d'observation sont trop dispersés, il ne nous a guère été possible de mettre en évidence l'évolution des structures par les méthodes de l'analyse structurale. Nous signalerons cependant que les reports synthétiques ont montré l'existence d'un système de plans Nord 80-90° récent, recoupant deux systèmes Nord 15-20° et Nord 140° anciens. En outre, ce dernier système introduit systématiquement l'altération.

Nous retrouvons donc bien ici l'existence de diaclases sub-méridiennes orientant des structures Est-Ouest. On observe en effet fréquemment le blocage des plans Est-Ouest dans des plans Nord 20-30°. La résultante de ce gauchissement correspond aux directions Nord 50-60° très nombreuses.

c) Evolution tectogénétique

L'histoire du massif s'intègre classiquement dans l'évolution générale de la Provence au Trias et au Lias inférieur (cf. introduction géologique). Les faciès correspondent à des séries marines proches de l'émersion. Ce dernier phénomène est bien confirmé par la lacune du Lias supérieur et du Bajocien. Le Bathonien traduit encore l'instabilité du fond marin par ses faciès néritiques.

Le Callovo-Oxfordien présente plus d'analogies avec les faciès marneux dauphinois ou connus par endroits en Provence (flanc Nord de Sainte-Victoire). Cette uniformisation des faciès se poursuit au Séquanien. Le Portlandien marque un début d'individualisation de cette région. Si les récurrences tithoniques se font encore sentir vers Rians, il n'en est plus de même plus au Sud où un haut fond récifal, associé à une zone de sédimentation biodétritique de faible profondeur (70), se généralise (bois de Pourrières).

Le Néocomien connu sur le flanc Nord du Sambuc (bois de Concors), avec un faciès à affinités volcaniennes et sur le flanc Sud de Sainte-Victoire (faciès provençal), semble faire défaut au sein même du massif par suite d'avatars morpho-tectoniques. On note par ailleurs (Pourrières) que le Néocomien fait suite au Portlandien avec le même faciès récifal.

L'épisode bauxitique (Puits de Rians) marque l'exondation définitive de ce secteur. Les mouvements épirogéniques qui en sont la cause sont complètement oblitérés par les péripéties tectoniques ultérieures qui vont se succéder jusqu'à la période actuelle.

La première de ces grandes phases intéresse toute la Provence. Elle est datée du Maestrichtien. Elle se traduit ici par l'individualisation des bassins de Rians et de l'Arc et par la formation d'anticlinaux (Sambuc) d'axe Est-Ouest, rapidement érodés dans leur partie axiale. Les produits de démantèlement s'accumulent sous forme de brèches dans les grands synclinaux voisins durant le Danien et l'Eocène inférieur.

La deuxième phase importante est datée du Ludien dans le bassin d'Aix (phase "anté-sannoisienne"). Elle se traduit par des mouvements tangentiels classiques, causés du chevauchement des flancs Sud des anticlinaux érodés sur les flancs Nord (cf. fig. 3). Le chevauchement du bassin de Rians par le Sambuc serait de cet âge, bien que l'observation stratigraphique ne puisse que le dater post-tanétien. L'érosion axiale du pli du Sambuc jusqu'à l'Oxfordien marneux et, compte tenu des lacunes, non loin du Trias, a facilité ces mouvements. Dans la partie étudiée, nous avons pu préciser un élément évoqué en Provence par J. AUBOIN et G. MENNESSIER (3) : des plis et accidents antérieurs dirigés Nord-Ouest/Sud-Est et Nord-Est/Sud-Ouest ont orienté ces chevauchements, entraînant des virgations et coincements de structure complexes. Ce processus s'observe dans les virgations décrites au Sud-Ouest de Rians.

Sans que l'on puisse actuellement en avoir de preuve formelle, les discontinuités axiales des plis provençaux ne peuvent s'expliquer que par l'existence antérieure de plissements sub-méridiens (plissements transversaux) qui ont empêché le développement cylindrique des mouvements tangentiels anté-sannoisiens. J. GOGUEL (43) évoque ce problème et pense à une démonstration possible de cette influence au Nord de la montagne Sainte-Victoire. Nos observations s'accommoderaient bien de l'existence de ces structures antérieures aux phases paroxysmales. Il faut cependant noter l'existence de plissements oligocènes orientés Nord 30° environ, responsables de la surrection des voûtes triasiques. Celle de Rians pourrait appartenir à cette phase, bien que la meilleure datation locale la place post-yprésienne.

Nous rattacherons à cette même période les formations des reliefs du Pain de Munition, Dispute et Peycay, qui se développent parallèlement à une évolution morphologique poussée. Le Miocène correspond également à une évolution continentale. Les affleurements pelliculaires que nous avons attribués au Vindobonien continental (environs de Rians, cote 467, 0) participent en effet à des écaillages superficiels dont il est bien présomptueux de vouloir définir le style.

En résumé, on peut inscrire l'histoire de ce secteur dans le cadre général d'évolution de la Provence. Si les repères stratigraphiques permettent une précision convenable jusqu'à la phase anté-sannoisienne, les étapes suivantes sont trop imbriquées et ne sont guère datables avec les faibles témoins continentaux qui subsistent isolément.

3° - RESULTATS DES RECONNAISSANCES, EXPLOITATION

A - Sondages

a) Description

Deux campagnes principales ont été exécutées :

- La première campagne (1961-1962) comprenait 15 sondages ; elle était destinée à reconnaître un tracé de galerie, notablement modifié depuis lors, surtout dans sa partie amont. Des impératifs d'exécution technique et d'économie du projet plus que d'ordre géologique sont à l'origine de ce changement ; les structures à traverser sont en effet sensiblement les mêmes sur toute la bordure Sud du bassin de Rians quelle que soit l'attaque envisagée.

- Une première série de sondages, comprenant S. 1, S. 2, S. 3, S. 9, S. 12, S. 10, a permis une reconnaissance de la bordure Sud du bassin de Rians aux abords du Sambuc, dans une zone où devait s'effectuer l'attaque amont. S. 1 et S. 9 fournissent des coupes dans les calcaires du Danien ; les autres sondages ont apporté des précisions sur le remplissage dano-éocène du synclinal situé au Sud de la Bourguède.

- L'autre série intéresse plus spécifiquement le massif jurassique : S. 11 et S. 13 ont recoupé le Portlandien et le Kimmeridgien très broyés du flanc inverse du pli du Sambuc.

S. 4, après avoir traversé le Séquanien sur 120 m, a recoupé le Kimmeridgien dolomitique en flanc inverse (Nord du pli du Sambuc) complètement laminé.

S. 5 reste dans des calcaires dolomités du Jurassique supérieur très broyés.

S. 6 traverse les assises continentales d'âge crétacé au Puits de Rians (Valdo-Fuvélien, puis Bauxite) et pénètre dans un substratum formé de calcaires du Portlandien très broyés et altérés.

S. 15 débute dans les dolomies néo-jurassiques, puis pénètre à 38 m dans les calcaires du "Séquanien".

S. 7 recoupe successivement 70 m de calcaires portlandiens, 30 m de dolomies néo-jurassiques et 52 m de calcaires du "Séquanien".

S. 8 fournit une coupe de 60 m dans le sommet des calcaires d'âge portlandien ; il traverse de fréquentes poches de marnes gréseuses et d'argiles dont le faciès rappelle les formations bauxitiques et valdo-fuvéliennes.

S. 14, après avoir traversé les calcaires lacustres et les formations marno-gréseuses de base du Valdo-Fuvélien sur 32 m, a pénétré dans les calcaires porcelanés du Valanginien-Portlandien. Il est à remarquer qu'aucune assise bauxitique ne s'interpose là entre Crétacé supérieur et Valanginien.

- La deuxième campagne a débuté en janvier 1968 et comporte trois groupes principaux de sondages :

- un premier groupe (S. 101 à S. 106) est destiné à la reconnaissance de la portion amont de la galerie (A à B). Il intéresse les formations continentales du bassin de Rians,

- un deuxième groupe (S. 320 à S. 323) se situe sur l'axe principal de la galerie (B à C),

- un troisième groupe est destiné à préciser un certain nombre d'anomalies géophysiques et de particularités du profil en long de la galerie. Il comprend 7 sondages : S. 401, 402, 403, 404, 500, 504, 505.

- Premier groupe (101 à 106, 201 et 202) : tronçon de la Bourguède

101, destiné à reconnaître la tête amont de la galerie (point A), a démontré que celle-ci se situerait dans les couches supérieures, légèrement crayeuses du Danien calcaire, à la limite de celui-ci avec le Montien argilo-marneux.

102 a complété la coupe de ce Danien supérieur et reconnu l'existence d'un niveau lithologiquement plus marneux à 12 m sous la couche calcaire sommitale.

Le sondage 103 débute à la base de la barre massive du Danien supérieur. Après l'avoir recoupé sur 10 m, il s'engage sur 50 m dans une série extrêmement variée comprenant des marnes grumeleuses, des lignites, des brèches et des calcaires lacustres très tendres.

104, situé en contrebas de 103, est au point de flexuration maximum des couches du Danien. Il a rencontré tout comme le 103, les couches de base du Danien, très variées et à prédominance marneuse. Aucune corrélation de niveau n'a pu être faite entre 103 et 104 en raison des désordres tectoniques.

Le sondage 105, implanté au creux du vallon Sud de la Bourguède, se trouve au coeur du synclinal éocène. Il rencontre à 17 m les brèches thanétiennes que surmontent les argiles micacées et gréseuses de cet étage.

Le sondage 106, à l'aplomb du point triple B, a recoupé un ensemble écaillé très bouleversé, sorte de copeau tectonique au front du chevauchement du Sambuc. L'écaillage comprend de haut en bas : 37 m environ de Danien inférieur gréseux puis marno-calcaire, 43 m de sédiments bréchiqes et argileux de l'Eocène.

201 et 202, destinés à reconnaître le tracé de la fenêtre des Vacons, sont restés dans des argiles gréseuses et des grès de l'Eocène inférieur, souvent remaniés par le serrage du chevauchement.

- Deuxième groupe

Les informations fournies par ces sondages concernent :

- d'une part la tête aval de la galerie (point C)

- d'autre part la partie Est du massif de la Gardiole où les informations fragmentaires de surface nécessitent des précisions.

320, implanté à la verticale du brise-charge de Pourrières, a montré que les assises de l'ouvrage étaient constituées par les calcaires massifs du Valdo-Fuvélien (cote 335, 13), le contact avec les marnes inférieures étant situé 10 m plus bas que la cote inférieure de l'ouvrage.

Le sondage 323, implanté au fond du vallon Nord-Sud, situé immédiatement à l'amont du même brise-charge, a permis de se rendre compte du rejet vertical d'une faille, cause de la remontée des séries marneuses du Valdomnien.

Le sondage 321 est resté dans les séries du Jurassique supérieur (Portlandien et Kimmeridgien supérieur). Le contact entre Portlandien et dolomies néo-jurassiques se situe à 90 m. L'examen des carottes a montré en outre l'importance des circulations à ce niveau.

Le sondage 322, implanté dans une zone très bouleversée, a recoupé les dolomies néo-jurassiques très broyées et altérées (cargneulisation, dépôts d'argile).

- Troisième groupe

Les sondages 401 et 402 sont destinés à fournir des informations sur la pente et l'allure du plan de chevauchement entre Séquanien du Sambuc et bassin de Rians, à l'aval immédiat du point triple B. Après avoir traversé les calcaires séquaniens broyés et recimentés (sur 63 m pour 401 et sur 61 m pour 402), ces sondages ont rencontré les brèches et argiles éocènes.

Le sondage 403 a recoupé sur toute sa longueur (170 m) les calcaires séquaniens très laminés et recristallisés ; sur les derniers 30 m, le calcaire a une texture schisteuse.

Le sondage 404, dont le but était de reconnaître le contact entre massif jurassique (bois de Pourrières) et bassin de l'Arc, est malencontreusement resté dans une brèche de faille verticale. Les carottes, très difficilement réalisables, ont montré sur toute leur longueur des éléments broyés de calcaires fuvéliens et portlandiens emballés dans une matrice argileuse.

Le sondage 500, implanté dans le bois de Pourrières, au milieu des calcaires du Portlandien, a traversé 150 m de ces terrains et prouvé leur excellente qualité.

Le sondage 505 devait préciser les replis de l'axe anticlinal du bois de la Gardiole au Nord de Puits de Rians. Il a effectivement rencontré des successions très broyées de dolomies et de calcaires séquaniens.

Le sondage 504, situé au Sud de Puits de Rians et destiné à vérifier une anomalie à faible résistivité révélée par l'étude géophysique, a exactement confirmé cette mesure en traversant une zone de brèches argileuses.

b) Apport des sondages à l'étude géologique du projet

L'intérêt de ces campagnes de sondages porte sur quatre domaines :

- vérification de structures extrapolées à partir du lever de surface
- connaissance des paramètres hydrogéologiques (nappe, karsts, etc...)
- estimation de la fracturation et de l'altération des assises
- étalonnage de la géophysique.

Nous n'envisagerons que le premier de ces aspects ; les trois autres feront la substance de chapitres ultérieurs spécialisés dans ces divers domaines.

L'intérêt des sondages s'est manifesté dans les cas suivants :

- la délimitation de contacts stratigraphiques et, par là même, l'évaluation d'épaisseurs d'ensembles lithologiques,
- la localisation et la définition des caractéristiques géométriques d'accidents.

Sur le tronçon de la Bourguède, les sondages S. 9, S. 103, S. 104 ont démontré l'existence d'assises très variées à prédominance marneuse sous la barre calcaire sommitale. L'épaisseur de cette barre calcaire a ainsi pu être évaluée à 60 m. Les sondages S. 11, S. 13 et S. 4 ont précisé le déversement de l'anticlinal du Sambuc sur le bassin de Rians en recoupant les dolomies néo-jurassiques en flanc inverse sous les calcaires séquaniens. Il en est de même pour les sondages 401 et 402 qui ont rencontré l'Eocène sous le Séquanien et permis d'attribuer une pente de 40° au plan de chevauchement dans cette zone. Le sondage 106 corroborait ces résultats en traversant une écaille où les terrains dano-éocènes étaient en position inverse. Les sondages S. 15 et S. 7 ont permis de se rendre compte de la proximité des calcaires du Séquanien dans la zone Nord du bois de Pourrières (environs immédiats de Pain de Munition), ce que l'absence de rejeu stratigraphique visible empêchait d'évaluer à partir de la surface. Le sondage 505 a prouvé que la zone de l'anticlinal Sud (au Nord de Puits de Rians) correspondait bien à des replis très pincés et écaillés où intervenaient les calcaires séquaniens et les dolomies néo-jurassiques. Les sondages 320 et S. 14 ont fourni les épaisseurs de calcaires valdo-fuvéliens et des marnes sous-jacentes au toit des calcaires jurassiques de la flexure du bassin de l'Arc, précisant les épaisseurs de terrains traversés par la tête aval de la galerie.

Les sondages de reconnaissance n'ont donc fait que préciser des extrapolations émises d'après le lever de surface.

B - Etude géophysique

a) Causes de l'intervention géophysique

Le lever géologique de surface, limité dans sa précision par la nature des affleurements, s'est révélé insuffisant au stade de l'avant-projet ou de l'appel d'offres. Dans de nombreux secteurs, les extrapolations au niveau de la galerie furent trop hasardeuses lorsqu'on eut affaire à des séries broyées et dolomitisées sur de grandes superficies (massif de la Gardiole par exemple). En outre, l'altération des calcaires et des dolomies, facteur très important dans la détermination des types de profil en galerie, est inestimable à partir de la surface et les sondages ne fournissent en pareil cas que des informations trop ponctuelles. Seule la prospection géophysique pouvait fournir des profils continus du terrain et un bon contrôle d'ensemble de l'aire considérée.

Parallèlement, le nombre des sondages étant important, il est apparu possible d'y effectuer des étalonnages pour des mesures géophysiques. Tous les facteurs favorables à la réussite d'une telle expérience (lever de surface précis, nombreux sondages mécaniques) semblant réunis, la Compagnie Générale de Géophysique fut chargée de cette étude qu'elle considérait comme expérimentale.

b) Problème posé. Choix de la méthode

- La méthode devait être capable :

- de déterminer et de délimiter des grands ensembles de nature ou de qualité différentes (zones saines, zones fracturées, argileuses, ...),
- d'apporter des précisions sur les profondeurs d'altération dans la mesure où celles-ci posséderaient une épaisseur suffisante pour être décelées,
- de détecter éventuellement la présence de fissures ou de grands accidents tectoniques.

- La méthode sismique ne semblait pas pouvoir fournir de contrastes de vitesse nets entre des formations à peu près identiques sous l'angle de la nature lithologique. En outre, les innombrables discontinuités tectoniques à toutes les échelles auraient entraîné une dispersion importante de l'énergie sismique nuisible à de bons enregistrements. Par contre, une journée d'essai de la méthode électrique, sur les sondages S. 4 et S. 7, permit de se rendre compte de l'existence de contrastes de résistivité entre des zones saines et broyées, entre des ensembles lithologiques distincts.

Cette dernière méthode fut adoptée.

c) Technique de mise en oeuvre

1°) Principe du sondage électrique

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 l'on mesure avec un potentiomètre (ou un enregistreur) la différence de potentiel ΔV 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 tranches du sol chaque fois plus épaisses. 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 :

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

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

Le diagramme du sondage électrique s'obtient en reportant en abscisse les demi-longueurs AB en mètres et en ordonnée les résistivités apparentes correspondantes en ohm-mètres (ohm. m).

L'analyse de ces diagrammes, leur confrontation et leur comparaison avec des abaques théoriques calculés permettent de déterminer dans la majeure partie des cas (quand il y a contraste suffisant de résistivité) la succession verticale des couches et ainsi de distinguer la nature des différents terrains rencontrés.

2°) Principe du traîné à 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 position 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 :

- en chaque station, deux valeurs de la résistivité apparente,
- 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 terrains 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, variation de faciès, failles, zones broyées, ...). Mais il est nécessaire que la cause ait des dimensions suffisantes par rapport à sa profondeur pour être décelée.

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

Le choix de la longueur de ligne AB le mieux adapté au problème posé est fait à partir des diagrammes de sondages électriques.

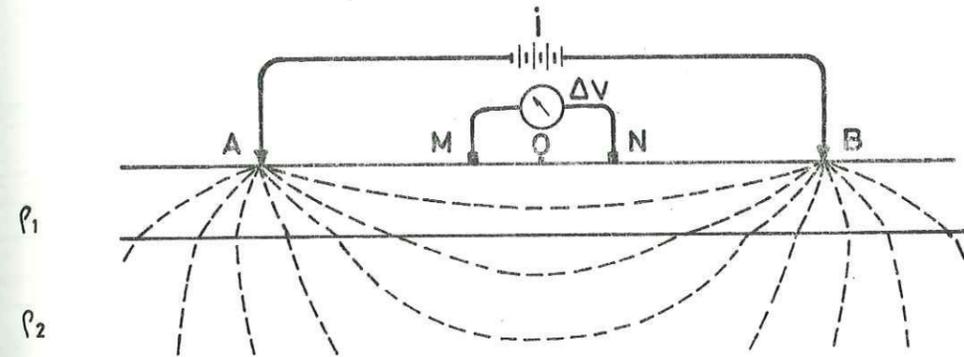
d) Résultats obtenus

1°) Sondages électriques

Les sondages électriques (S.E.) obtenus sont généralement du type de celui réalisé à l'aplomb du sondage S.7 (reporté sur la figure 10). Ils montrent une suite d'horizons résistants et conducteurs correspondant aux bosses et aux creux des diagrammes.

Le S.E. de la figure se décompose, depuis la surface, en cinq horizons distincts :

SCHEMA DU SONDAGE ELECTRIQUE



$\rho_1 < \rho_2$

SCHEMA DU TRAINE A REPETITION

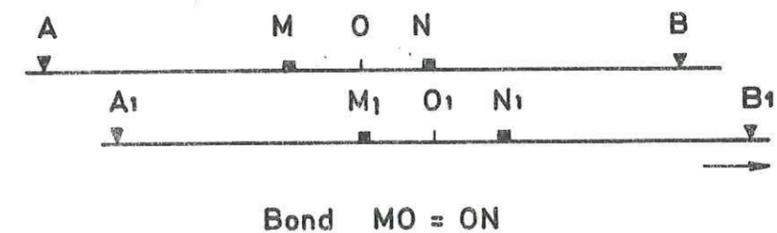


fig. 9

S. E

à l'aplomb du forage S7

fig. 10

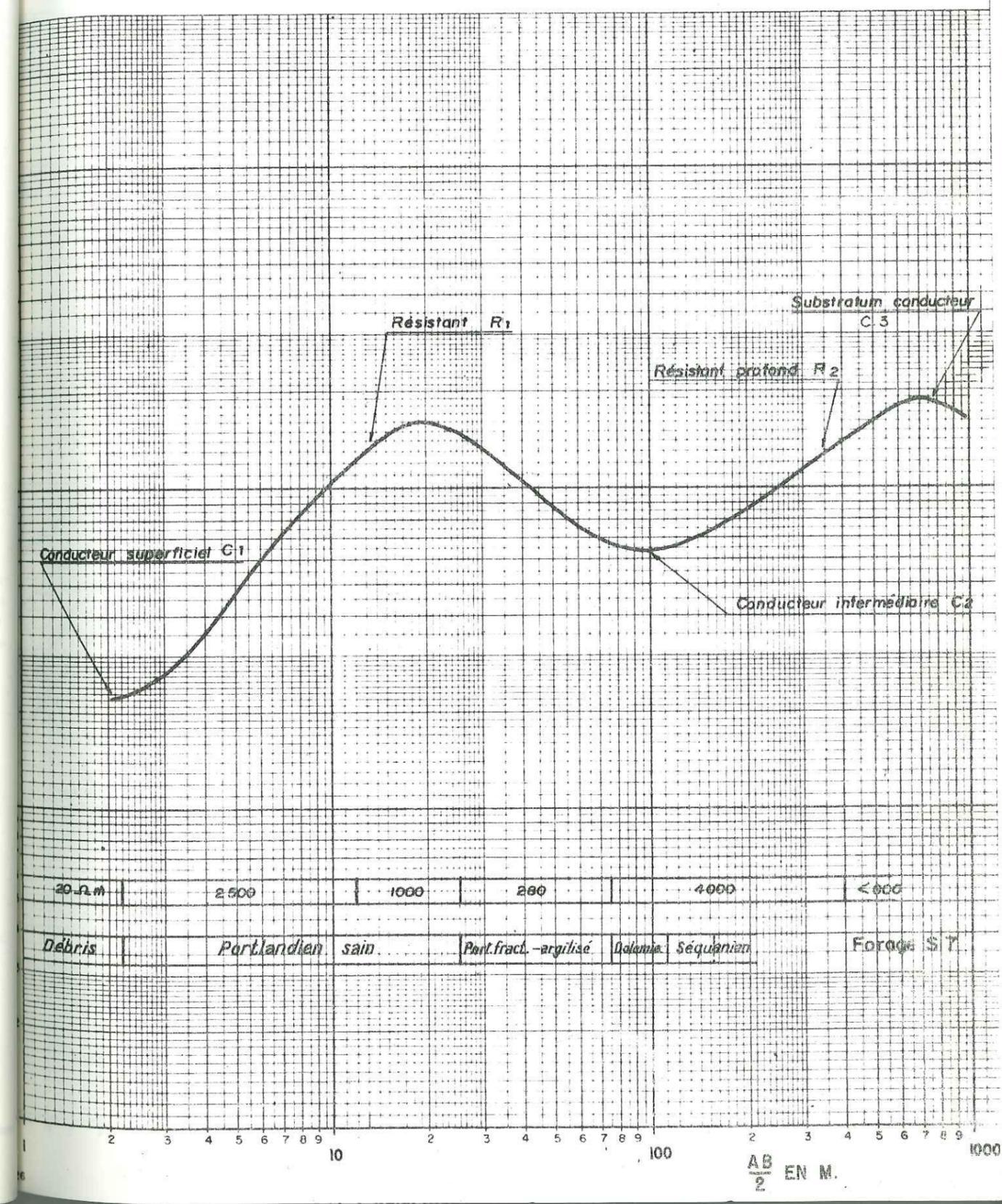
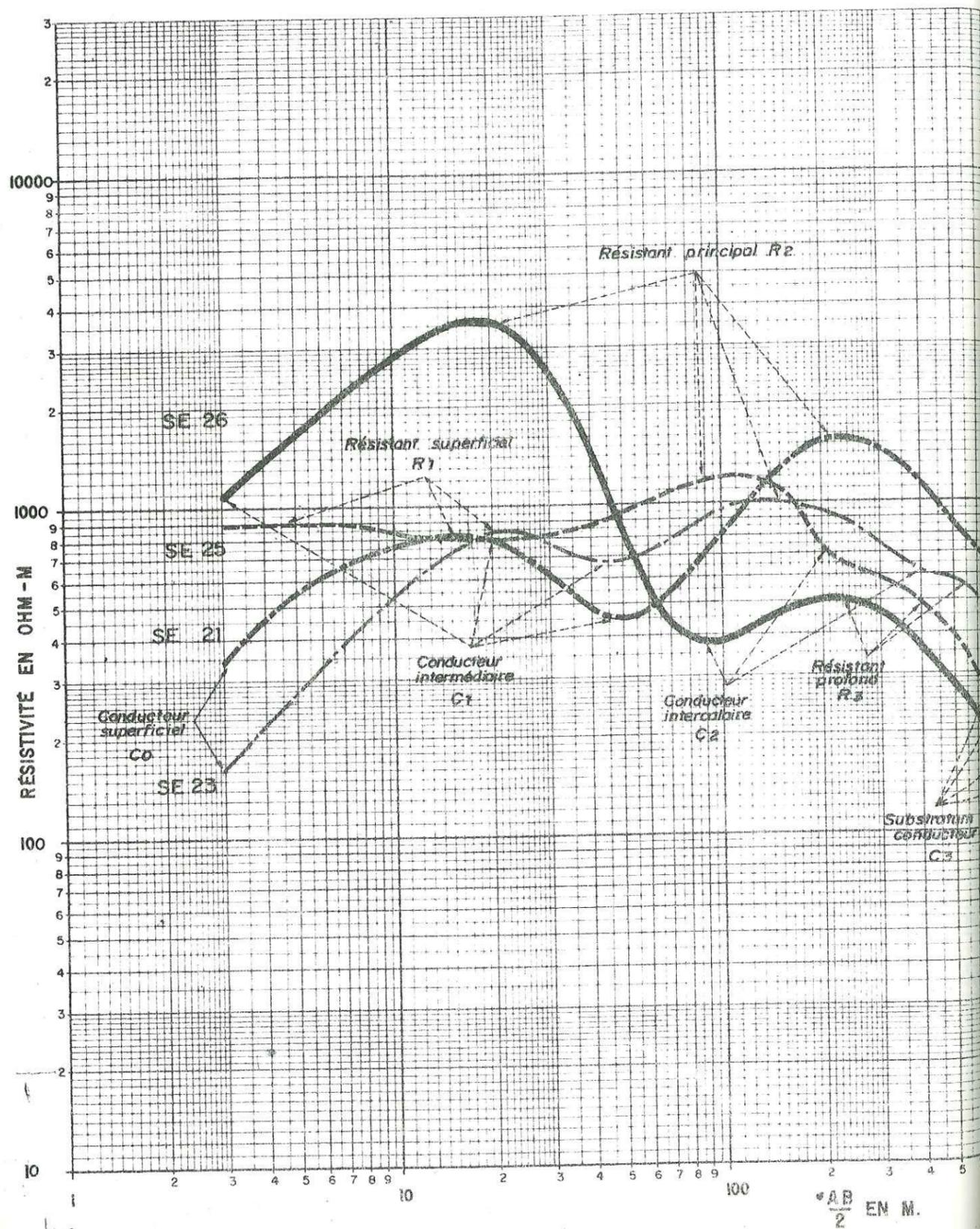


fig. 11



ER 226

- un horizon superficiel conducteur C 1 peu épais (épaisseur inférieure à 3 m),
- un horizon résistant R 1, responsable de la remontée du diagramme et épais ici de 20 m,
- un horizon intermédiaire C 2, d'épaisseur avoisinant 50 m, infléchissant vers le bas la courbe du sondage électrique,
- un horizon résistant R 2, puissant de quelques centaines de mètres qui, à partir de la longueur de ligne $AB/2 = 800$ m, s'infléchit à nouveau, reflétant la présence de l'ultime horizon,
- un horizon conducteur C 3 ou substratum conducteur.

Par comparaison avec la coupe du sondage, on peut faire les rapprochements suivants :

- C 1 correspond à la première couche de terrain formée de débris de calcaire et d'argile,
- R 1 s'identifie au Portlandien sain,
- C 2 est le reflet de ce même Portlandien altéré et fracturé, pouvant comprendre également une faible partie des dolomies néo-jurassiques,
- R 2 rassemble dolomies résistantes et Séquanien calcaire.

Le forage n'ayant pas dépassé 152 m, on ne peut que formuler une hypothèse sur la nature de l'horizon terminal C 3, assimilable peut-être à l'Argovien marno-calcaire ou à l'Oxfordien marneux (?).

Le sondage électrique paraît donc mettre en évidence les différents changements de faciès ou de texture du rocher.

La comparaison des sondages électriques avec les coupes des sondages mécaniques existants a permis, dans quelques cas assez particuliers, d'étalonner nos mesures.

Mais, la grande disparité des terrains, la présence de nombreuses fractures locales, d'accidents importants et de contacts anormaux, ont parfois perturbé les mesures et surtout n'ont pas permis d'établir une échelle rigoureuse des résistivités vraies. Ces dernières peuvent varier dans un éventail allant, pour les terrains conducteurs de 50 à 500 ohm, m, et d'environ 800 à 8.000 ohm. m pour les terrains résistants. Or, on sait que par abaques précalculés on détermine pour chaque horizon un produit (résistance transversale = résistivité vraie x épaisseur) pour les compartiments résistants et un rapport (conductance = épaisseur/résistivité vraie) pour ceux conducteurs. Une erreur portant sur l'évaluation de la résistivité vraie se répercute sur la détermination de l'épaisseur de chaque terrain. Aussi, les résultats obtenus seront de nature plus qualitatifs que quantitatifs.

La comparaison des sondages électriques entre eux permet de réajuster les calculs, de limiter les risques d'erreurs et de corréliser les différents horizons dénombrés sur chacun d'eux.

L'observation brute sans interprétation quantitative permet de distinguer et de suivre l'évolution des différents niveaux d'un sondage électrique à l'autre. Ceci est illustré par la figure où sont reportés les quatre S.E. 21, 23, 25, 26 alignés dans l'ordre sur le terrain. On assiste schématiquement à l'apparition de certains terrains alors que d'autres s'amenuisent et disparaissent peu à peu.

Sur le diagramme du S.E. 21, on distingue cinq horizons principaux, grossièrement assimilables à ceux répertoriés sur la figure 10.

Au S.E. 23 s'observe l'apparition de deux horizons supplémentaires : l'un conducteur C 2, l'autre résistant R 3. Ce phénomène va de pair avec un approfondissement du substratum C 3.

Avec le S.E. 25, l'importance (la puissance relative) de C 2 et de R 3 croît au détriment des terrains sus-jacents et C 0, conducteur superficiel, n'existe plus.

Enfin, avec le S.E. 26, on note une disparition complète du résistant superficiel R 1, le conducteur C 1 d'intermédiaire est devenu superficiel, le résistant R 2 a crû au point de vue résistivité, mais se réduit

quant à son épaisseur et l'horizon R 3 a subi la transformation inverse (rapprochement de la surface et épaisseur pratiquement doublée).

2°) Coupe des résistivités apparentes

Au droit de chaque S.E., on a reporté verticalement, à l'échelle logarithmique, les valeurs de résistivité apparente mesurées pour des différentes longueurs de ligne. C'est une représentation, sous une autre forme, des diagrammes de sondage électrique. Ceci permet de mieux représenter les variations verticales au droit d'un S.E. et aussi les variations latérales d'un point à un autre. Cette coupe, dont le caractère est essentiellement qualitatif, met nettement en évidence l'hétérogénéité des formations. Les changements de faciès paraissent se faire d'une façon assez brutale, tant verticalement que latéralement.

Les traits essentiels de cette coupe sont les suivants, du Sud vers le Nord :

- développement de formations conductrices relativement épaisses (plusieurs dizaines de mètres) aux S.E. 0 et 1 dans la partie supérieure des formations traversées. En profondeur, les résistivités augmentent en liaison avec un changement de faciès (diminution en éléments argileux, terrain plus compact) ;
- vers le Nord, S.E. 2 et 3 ; ces formations conductrices diminuent sensiblement de puissance et la résistivité élevée rencontrée à partir d'une faible profondeur fait penser à la présence d'un terrain probablement compact. Au S.E. 4, on retrouve des conditions comparables au S.E. 1, sauf en surface où un terrain résistant apparaît ;
- aux S.E. 28 et 5, on observe une zone conductrice assez développée qui paraît se poursuivre en profondeur et qui pourrait correspondre à une zone broyée et argilisée. Celle-ci pourrait s'étendre jusqu'à proximité du S.E. 6 ;
- du S.E. 7 au S.E. 11, les résistivités varient d'une façon plus progressive et les valeurs élevées des S.E. 7, 9, 10 et 11 se poursuivent jusqu'à des profondeurs assez importantes. Cependant, aux S.E. 9, 10, 11, elles diminuent en profondeur et au S.E. 8 la résistivité moyenne est inférieure à celle des S.E. qui l'encadrent ;
- aux S.E. 31 et 12, on note une zone plus conductrice dans son ensemble avec une passée plus conductrice intercalée au droit du S.E. 31. Un enrichissement en éléments argileux est à craindre dans cette zone ;
- du S.E. 13 au S.E. 18, les résistivités sont généralement assez élevées, sauf au S.E. 16 où elles diminuent en profondeur ;
- aux S.E. 19, 29, 20, les conditions semblent changer assez nettement : les résistivités sont plus faibles et on doit être en présence d'une zone où les formations plus argileuses et broyées sont plus développées que par ailleurs ;
- au S.E. 22, les formations résistantes sont bien développées sur une forte épaisseur. Elles se poursuivent vers le Nord jusqu'au S.E. 25, bien qu'un changement de faciès semble se produire en profondeur (S.E. 24 et 25 en particulier) ;
- au S.E. 26, on voit que les formations conductrices se rapprochent de la surface et prennent un assez fort développement.

En résumé, on peut dire qu'au milieu d'un ensemble de résistivité élevé apparaissent des discontinuités importantes dues à des terrains plus conducteurs (broyés ou argileux) dont les principales se situent :

- aux S.E. 28 et 5
- aux S.E. 31 et 12
- aux S.E. 29 et 20

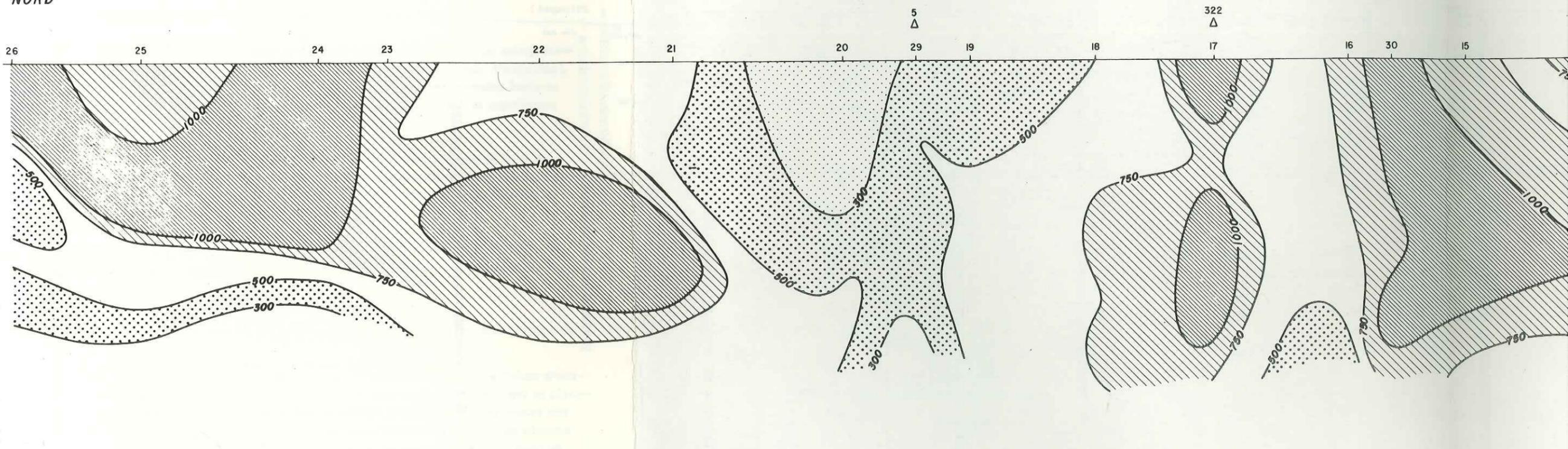
COUPES

RESI

FIG. 12

Longueur de ligne AB $\frac{AB}{4}$

NORD



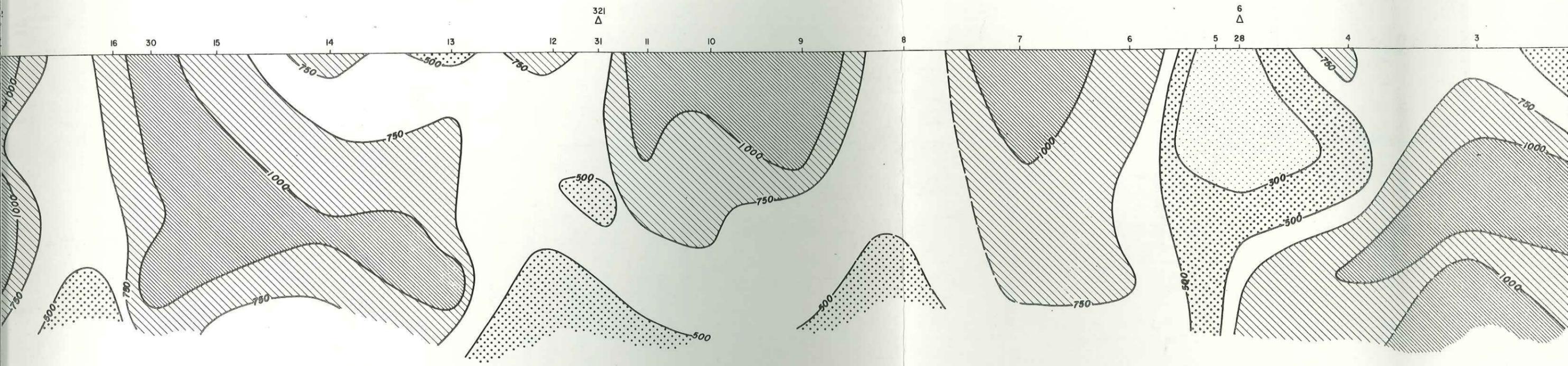
Echelle horizontale

Sondage électrique et son numéro $\frac{2}{1}$ Courbe

FAULTE DE MONTAIGNEY
LABORATOIRE
de GÉOLOGIE
de GRENOBLE

COUPES ELECTRIQUES

RESISTIVITES APPARENTES

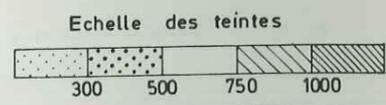


LEGENDE

Echelle horizontale = 0 100 500 m.

ge électrique et son numéro 2

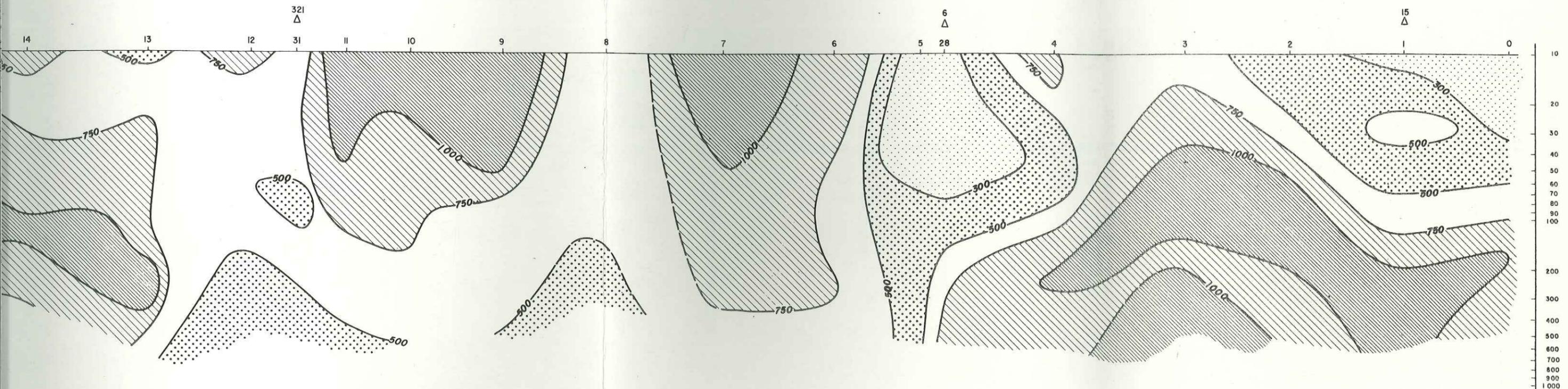
Courbe d'isoresistivité apparente



ELECTRIQUES

RESISTIVITES APPARENTES

SUD

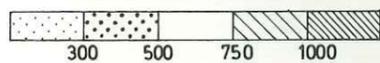


LEGENDE

0 100 500 m.

Resistivité apparente

Echelle des teintes



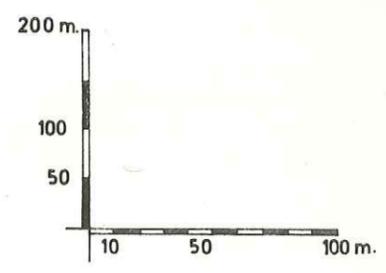
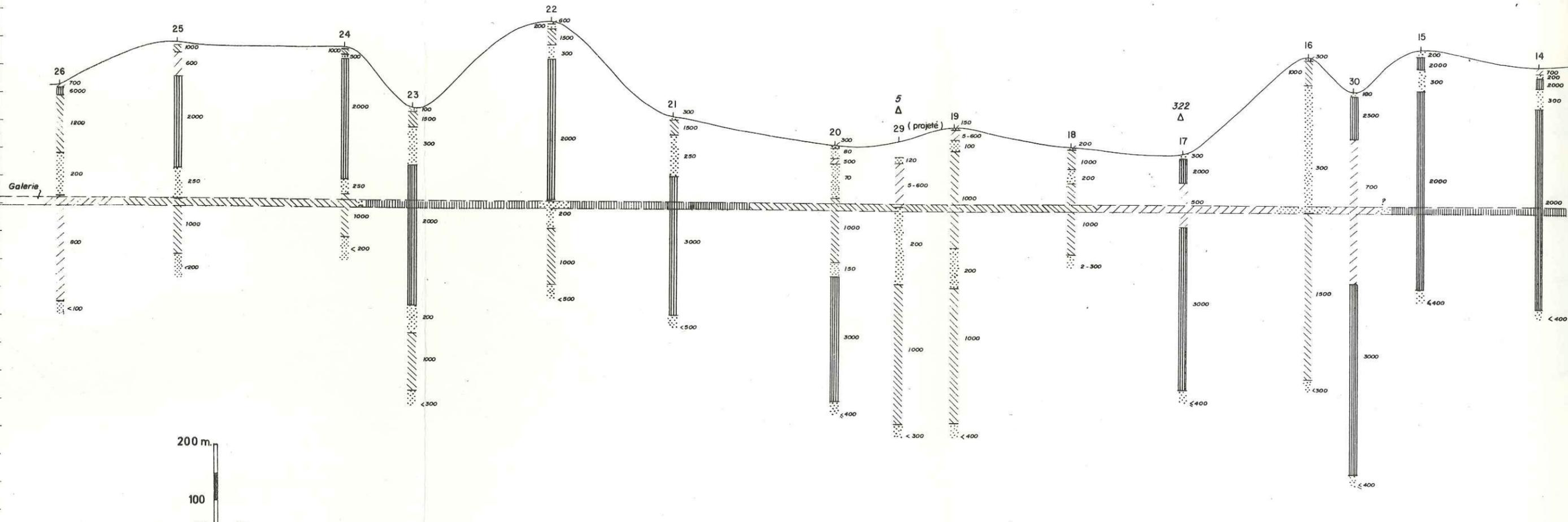
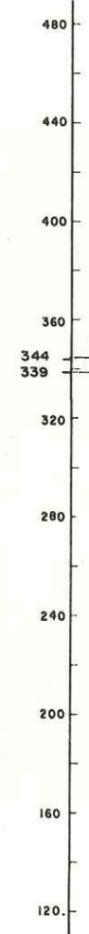
COUPES

PROFIL

FIG. 13

Nord

mètres



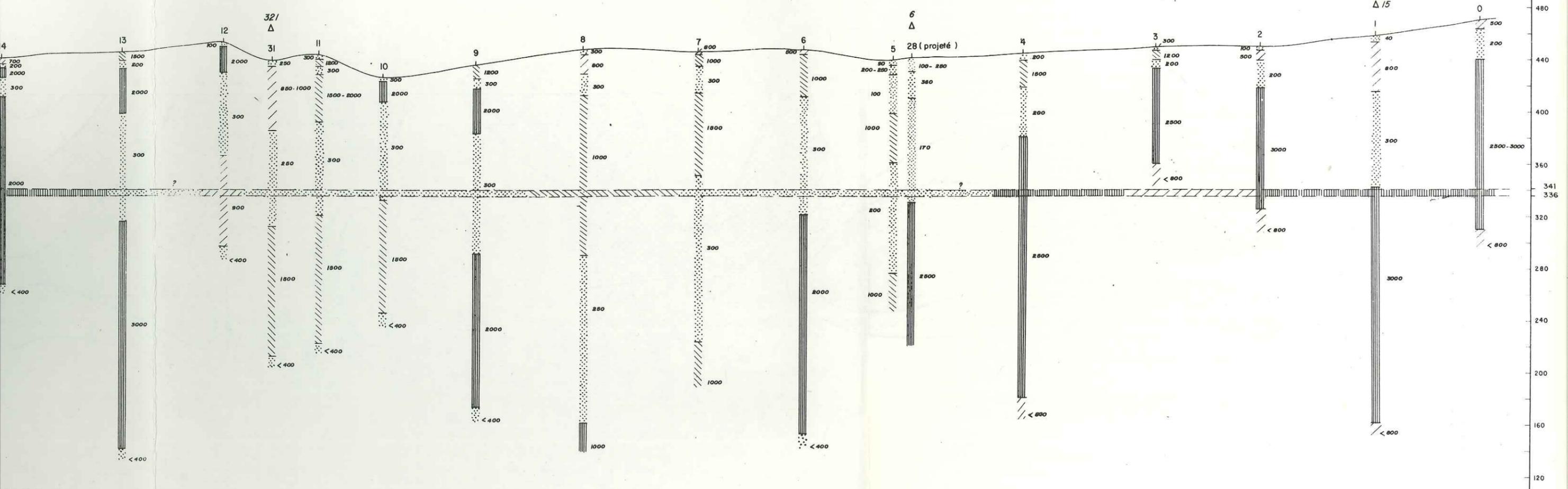
Sondage électrique et son numéro 2,5 Résistivité et sa val

LE

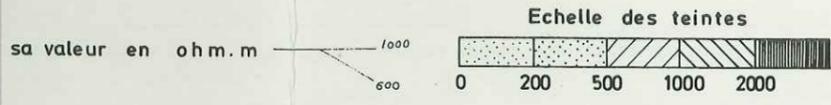
ELECTRIQUES

FIL EN LONG

Sud



LEGENDE



- au S.E. 26

et à un degré moindre au S.E. 8.

Il est certain que si cette coupe donne une idée générale des variations de faciès, tant verticales que latérales, elle ne prétend pas fournir un schéma précis de toutes les variations de faciès. En effet, des niveaux conducteurs peu développés, se trouvant à l'intérieur de formations de résistivité élevée, n'apparaîtront pas sur cette coupe. De même, des passées résistantes peu épaisses au sein de dépôts plus conducteurs peuvent ne pas figurer sur cette coupe. Il est donc nécessaire de lui conserver son caractère qualitatif schématique et général. Son but est d'attirer l'attention sur les zones anomaliques les plus importantes.

3°) Profil en long. Coupe électrique

Afin de pouvoir chiffrer les résultats qualitatifs précédents, nous avons réalisé une interprétation quantitative des différents sondages électriques. Par ailleurs, nous parlerons de pli, de synclinal, d'anticlinal, étant bien entendu que nous nous placerons du point de vue structural et non stratigraphique, car certains horizons possédant des résistivités identiques peuvent ne pas correspondre au point de vue étage géologique, la corrélation se faisant à partir des caractéristiques électriques des différents niveaux.

La coupe 13, reliant les sondages électriques entre eux, comporte non seulement les S.E. effectués suivant le tracé exact de la galerie, mais également les deux S.E. situés en dehors de l'axe, sur les forages S. 6 (S.E. 28) et S. 5 (S.E. 29). Leurs cotes de surface étant différentes de celles du profil en long où nous les avons projetés, ils ne s'intègrent pas dans l'altimétrie générale.

Enfin, les différents horizons électriques déterminés à l'aplomb de chaque S.E. ont été reliés par extrapolation, tout en tenant compte pour la jonction des niveaux équivalents de la forme des diagrammes successifs.

On remarque tout d'abord la fragmentation du profil en quatre compartiments distincts séparés par des discontinuités.

Compartiment Sud : le S.E. 0 est à l'amorce du mouvement synclinal dont le maximum d'amplitude se situe à l'aplomb du S.E. 1. Puis le pli se redresse et prend une allure d'anticlinal dont le sommet se placerait aux abords du S.E. 3, au-delà duquel on assiste à un plongement des "couches" qui viennent buter contre une discontinuité qui se situerait vers le S.E. 28. Entre les S.E. 4 et 28, on a une bonne concordance entre les niveaux résistants évalués à 2.500 ohm.m. Mais, si les horizons sus-jacents semblent électriquement équivalents (avec un fort abaissement de résistivité au S.E. 28), donc de qualité voisine, ils sont géologiquement différents. Cet exemple précis illustre les restrictions formulées ci-dessus. Cette discontinuité a été délimitée grâce au traîné à répétition. Nous pensons qu'elle sépare, non seulement les S.E. 4 et 5, mais également les S.E. 4 et 28. Entre ce dernier et le S.E. 5 passe vraisemblablement un autre accident, car il n'existe pas de similitude entre les différents horizons déterminés à l'aplomb de chacun d'eux.

Au Nord de cette discontinuité, l'ensemble des niveaux affecte la forme d'un pli successivement anticlinal (sommet aux S.E. 6 et 10) et synclinal (charnière aux S.E. 5, 8 et 31). On remarque le fort relèvement des "couches" au S.E. 12 et la diminution de résistivité (900 ohm.m) de l'horizon résistant profond, dûs vraisemblablement à un broyage ou à une altération de ce niveau aux approches d'un accident. Ce dernier pourrait se situer entre les S.E. 31 et 13. Sa présence n'a pu être détectée que par l'orientation différente des niveaux à l'aplomb des S.E. 12 et 13. Sa délimitation exacte ne pourrait être faite que par des mesures supplémentaires (traîné) entre les deux S.E.

Plus au Nord, au niveau du S.E. 30, semble exister une nouvelle discontinuité. Du S.E. 13 au S.E. 15, on note un amincissement progressif de la couche 300 ohm. m allant de pair avec un relèvement du substratum conducteur.

Enfin, la partie Nord du profil (S.E. 16 à 26) se découpe elle-même en trois zones distinctes :

1 - Une zone Sud apparemment calme, d'allure anticlinale, comprenant les S.E. 16 et 17.

2 - Une zone médiane se corrélant mal avec la précédente. Elle se distingue par :

- . le S.E. 18 très perturbé et difficilement interprétable,
- . l'apparition, entre deux résistants, d'un niveau conducteur intercalaire que l'on ne retrouve pas ou qui est noyé dans la masse résistante profonde des S.E. 17 et 21, encadrant cette région, et du S.E. 29 situé en dehors et à l'Ouest du profil. Cette discontinuité a été remarquée lors de l'étude de la coupe des résistivités apparentes,
- . l'abaissement très sensible des résistivités de tous les horizons électriques.

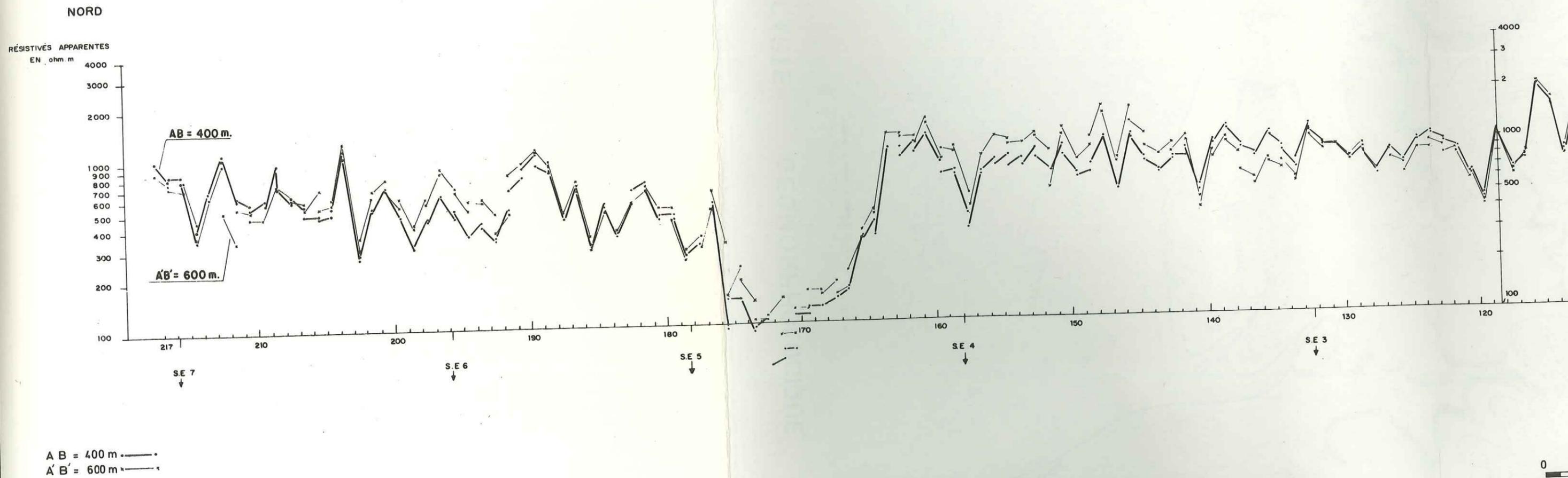
3 - Une zone Nord où seul le S.E. 21 peut être décomposé d'une façon normale. En effet, et comme nous l'avons décrit lors de l'étude de la figure 11, on note en profondeur, à l'aplomb des S.E. 22, 23, 24, 25 et 26, la présence d'un horizon résistant de résistivité inférieure ($\rho \leq 1.000$ ohm. m) à celle du résistant profond ($2.000 \leq \rho < 8.000$) dont il est séparé par un niveau conducteur.

Enfin, au S.E. 26, on note une diminution des résistivités et un relèvement apparent des niveaux conducteurs, comme déjà l'indiquait la coupe des résistivités apparentes.

En comparant les résultats géophysiques aux coupes des forages, un essai grossier de corrélation entre les résistivités vraies et la lithologie peut être tenté.

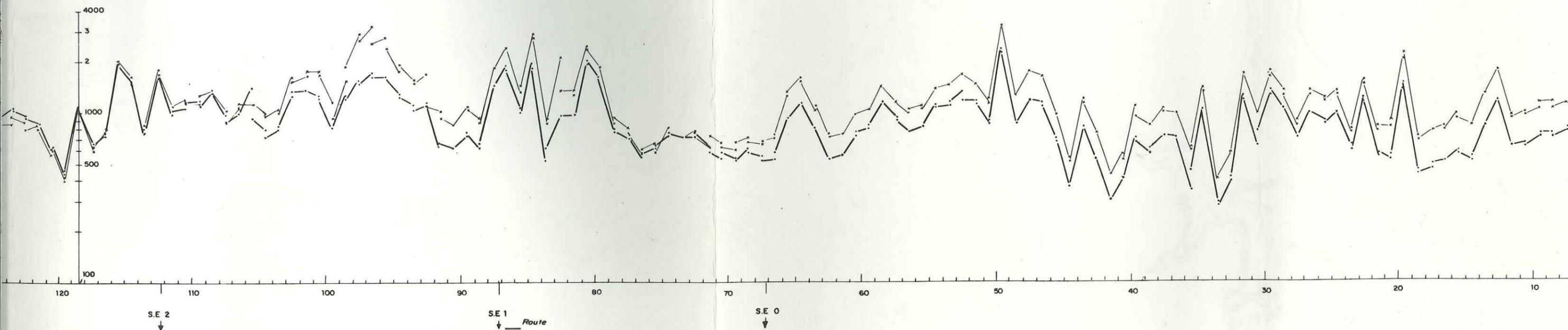
	Horizons électriques en ohm. m	Nature possible des terrains correspondants
Classe 3	250 - 300	Dolomies, calcaires dolomitiques ou calcaires altérés très broyés ou très argileux ou les deux à la fois
Classe 2	500 - 800	Mêmes terrains que précédemment, mais contenant un pourcentage moindre en argile
Classe 1	1.000	Ensemble vraisemblablement fracturé et pouvant (aucun forage n'a rencontré cet horizon) comporter des zones plus argileuses, mais où les micro ou macro-fissures seraient recristallisées
Classe 0	2.000 - 3.000	Séquanien sain en gros bancs calcaires

FIG. 14



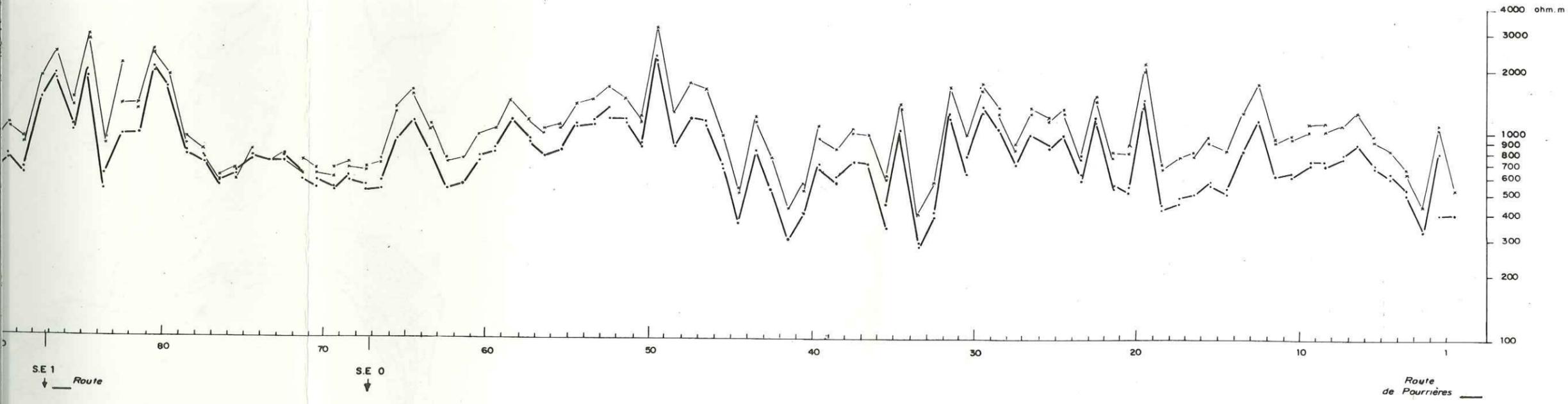
ILS DE RESISTIVITE

TRAINÉ A REPETITION



0 50 100 m

SUD

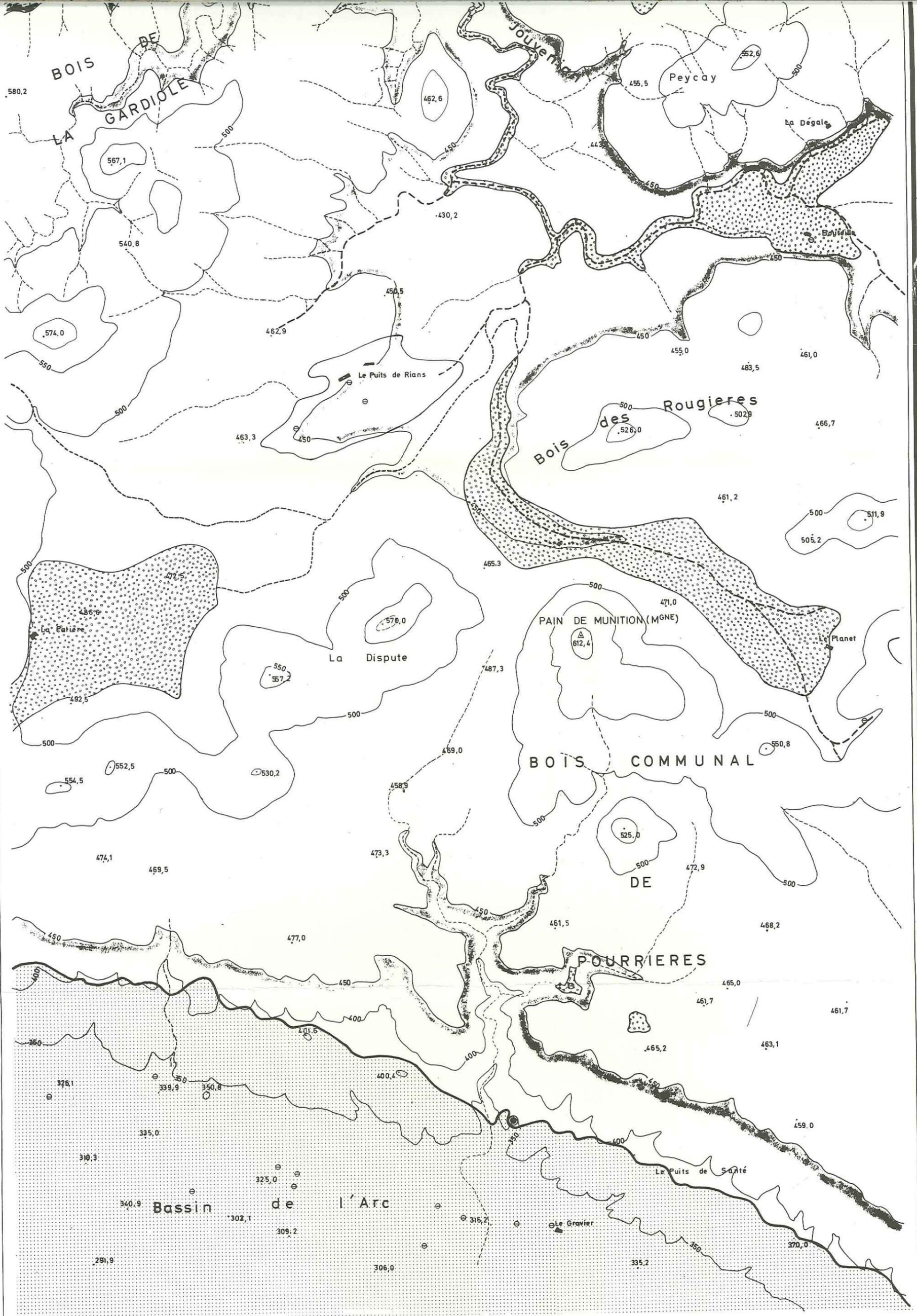


CARTE GEOMORPHOLOGIQUE

0 100 500 1000 m.

FIG. 15





LEGENDE

- | | | | | |
|--|--|--|--|---|
|  Zone éluviale |  Zone mal drainée |  Bassin crétacé-tertiaire |  Alluvions récentes |  Cote 450. surface d'érosion miocene |
|  Puits . Source . Pertes ou Karst |  Cours d'eau permanents . temporaires |  Cône de déjection | | |

rains suivants :

D'après les hypothèses faites dans le tableau précédent, la galerie pourrait traverser les ter-

- au S.E. 26 : classe 2,
- du S.E. 25 au S.E. 24 : classe 1 avec possibilité de rencontre de classe 2 au toit de la galerie,
- du S.E. 24 au S.E. 21 : classe 3 sur une vingtaine de mètres, puis 600 à 700 m de classe 0, interrompue au droit du S.E. 22 par quelques dizaines de mètres de classe 3,
- à partir d'une centaine de mètres au Nord du S.E. 20 jusqu'à une zone comprise entre les S.E. 17 et 18 : classe 1. Cependant, étant donné la complexité structurale de cette région, les terrains doivent y être assez disparates et de mauvaise tenue. On pourrait même les considérer de qualité d'ensemble inférieure à ceux des classes 2 et 3 situés entre les S.E. 17 et 30. Au mur du S.E. 16, l'ouvrage rencontrera éventuellement du Séquanien relativement sain,
- dans la zone du S.E. 30, où peut se trouver un accident, on peut s'attendre à trouver des passées broyées et argileuses (classe 3),
- classe 0 du S.E. 15 aux abords Nord du S.E. 13 à partir duquel on passera dans la classe 3 (ou très localement 2) jusqu'au S.E. 9. Une passée de classe 1 peut être envisagée à l'aplomb du S.E. 8. Au-delà et jusqu'à la zone comprise entre les S.E. 28 et 4, on retrouve la classe 3,
- enfin, mis à part le secteur compris entre les S.E. 2 et 3 où la galerie traverserait un niveau de classe 2, a priori, la classe 0 serait prépondérante entre les S.E. 4 et 3 et les S.E. 2 et 0. Cependant, le toit de l'ouvrage pourra peut-être rencontrer la classe 3 à l'aplomb du S.E. 1.

4°) Profils de résistivité. Trafné à répétition

Afin d'augmenter la précision des résultats obtenus par sondages électriques, on a effectué entre les S.E. 7 au Nord et la route de Pourrières proche du forage S. 7 au Sud, un profil de résistivité par trafné à répétition en deux longueurs de ligne (AB = 400 m et A'B' = 600 m), donc avec deux profondeurs d'investigation. On obtient ainsi deux points du diagramme de sondage électrique centré en O, permettant de connaître si ce diagramme monte (résistant) ou descend (conducteur).

Sur la figure 14 les résultats sont inscrits à l'aplomb des milieux des électrodes MN et M'N'. Pour une même position de AB (ou de A'B'), les deux points représentatifs mesurés ont été réunis par un segment de droite. Il a donc été tracé deux profils : l'un correspondant aux mesures faites avec AB = 400 m, l'autre avec A'B' = 600 m.

Du Nord au Sud, on peut faire les remarques suivantes :

- entre le S.E. 7 et le S.E. 5, les deux profils s'enchevêtrent et la résistivité moyenne apparente, relativement conductrice, se maintient aux alentours de 500 ohm. m,

- à une vingtaine de mètres du Sud du S.E. 5, on note sur 120 m une chute brusque de résistivité (ρ a moyen ≤ 150 ohm. m) correspondant et permettant de mieux délimiter la discontinuité signalée près du S.E. 28,
- entre les mesures 163 et 142, le profil A'B' reste au-dessus des segments AB, confirmant le passage de la galerie dans un milieu résistant. La position inverse des deux courbes entre les mesures 142 et 115 prouve par contre la présence, au niveau de l'ouvrage, d'un terrain conducteur.

Après la mesure 115, la courbe relative à l'investigation la plus profonde possède les valeurs de résistivité les plus fortes. La galerie, en principe, devrait donc rester dans des niveaux résistants. On note cependant :

- 1 - Alors qu'au Nord de la station 100, les mesures successives sont de valeur voisine ($900 \leq \rho$ a moyen ≤ 1.200 ohm. m), au Sud de cette même station, on observe de petites mais brusques variations de résistivité. Ainsi, entre 100 et 0, l'agitation continue des profils donne à penser que cette discontinuité des mesures pourrait correspondre au passage de petits accidents locaux ou à une karstification profonde, mais, dans les deux cas, de faible portée.
- 2 - Entre les mesures 80 et 66, les faibles résistivités enregistrées pourraient être le reflet d'une zone très broyée, assez conductrice, ou d'un accident local de faible amplitude ou d'un karst profond de puissance relativement importante.

Dans l'ensemble, ces résultats confirment dans le détail ceux dégagés de l'étude des coupes de résistivités apparentes et de la coupe électrique (fig. 12 et 13) entre les S.E. 7 et 0.

e) Apport de la géophysique à l'étude géologique

Nous avons vu que la géophysique ne pouvait fournir que des indications qualitatives sur la composition, les propriétés techniques des terrains. Les essais de corrélation précise entre les grands ensembles lithologiques et les valeurs de résistivité (dans les sondages mécaniques par exemple) se sont révélés infructueux dans le cas général. Les origines de ces différences sont dues principalement au fait que la valeur de la résistivité est directement fonction du pourcentage d'argile contenu dans le sédiment (donc fonction de la fracturation et de l'altération). En outre, la théorie du S.E. fait intervenir une simplification des données pratiques, notamment en ce qui concerne l'influence de la surface topographique : les corrélations sont bonnes en terrain plat et mauvaises en terrain vallonné.

L'apport des coupes est intéressant dans la localisation des grandes discontinuités tectoniques qui provoquent des perturbations électriques nettes. Il est beaucoup plus sujet à critique pour la vérification des allures structurales des couches et n'est intéressant que pour la vérification des grands mouvements d'ensemble (anticlinaux et synclinaux).

Délimitation des grandes zones de discontinuité

Quatre grandes zones de discontinuité ont été vérifiées à l'aide de la géophysique ; du Nord au Sud :

- le chevauchement du Sambuc,
- le secteur compris entre les sondages 5 et 322,
- la zone entourant l'anticlinal Sud (entre les sondages 321 et 505 ou entre les sondages 12 et 9),
- le Puits de Rians entre les sondages 6 et 4.

1 - Le chevauchement du Sambuc

Le S.E. 26 recoupe une zone de 200 ohms située à moins de 50 m, qui correspond sensiblement au passage du chevauchement du Sambuc. Le pendage de la limite supérieure de cette zone ne correspond pas au pendage du chevauchement tel qu'il ressort de l'interprétation des sondages mécaniques. La topographie accidentée est sans doute cause de cet indétermination. On voit néanmoins nettement l'enracinement du chevauchement (zone à 200 ohm. m) à l'aplomb du S.E. 23.

La coupe électrique (fig. 12) fournit une image plus nette du plan de chevauchement matérialisé par la bande inférieure entre 300 et 500 ohms, à l'aplomb des S.E. 26, 25, 24. Cette zone s'enracine également au niveau du S.E. 23.

Signalons qu'entre les S.E. 22 et 21, la coupe de résistivité apparente met en évidence une discontinuité oblique (entre les courbes 750 et 500) correspondant à la surface d'écaillage qui affecte la terminaison E de l'anticlinal des Vacons.

2 - Le secteur compris entre les sondages 5 et 322

Ce vaste ensemble est affecté d'une chute générale des résistivités qui témoigne de la fracturation et de l'altération poussées du matériau. Les valeurs qui s'échelonnent entre 1.000 et 70 ohm. m sont faibles pour ces terrains constitués de calcaires du Portlandien (S. 5). Les successions d'ensembles de résistivités analogues n'apportent aucune lumière sur l'allure des accidents. Il est cependant possible d'isoler certaines discontinuités entre les S.E. 21 et 20 : une de celles-ci serait à mettre en relation avec une surface d'écaillage (cf. coupe géologique 24) ; entre les S.E. 19 et 18, la remontée de l'assise conductrice inférieure ($\rho < 400$) correspondrait à l'anticlinal de dolomies néo-jurassiques (zone à 200 ohm. m) de la coupe géologique, surmonté tectoniquement par le Portlandien très broyé (zone à 1.000 ohm. m).

Le sondage 322 est en désaccord avec le S.E. 17 (?). Néanmoins, la zone inférieure à 3.000 ohm. m correspond au Séquanien de l'anticlinal méridien recoupé en biseau par la galerie. La coupe électrique montre plus clairement ce recoupement.

Le S.E. 16 est aberrant et correspond à la zone de broyage qui amène le Portlandien (S.E. 30, 15, 14) à chevaucher le Séquanien (S.E. 17).

3 - La zone entourant l'anticlinal Sud (entre les sondages 321 et 505)

Dans cette zone, les chutes de résistivité traduisent encore des broyages. Le Séquanien passe de 2.000 à 1.500 ohm. m dans l'aire anticlinale. Le mouvement général du pli est suggéré par la remontée du substratum conducteur ($\rho < 400$ ohm. m).

Entre les sondages 12 et 31, un décrochement dans les terrains de résistivité analogue confirme le passage de l'accident qui limite le pli séquanien vers le Nord.

4 - Le Puits de Rians entre les sondages 6 et 4

Les sondages électriques et la coupe de résistivité dénotent plus un secteur très "faillé" qu'une véritable aire synclinale. Le passage de l'accident majeur semble se situer au S.E. 28, ce que confirment le sondage 6 et le lever de surface.

Pour l'ensemble de ces zones de discontinuité, on constate que la géophysique confirme :

- les écaillages et les déplacements horizontaux de la partie Nord du massif (entre les S.E. 26 et 18),
- l'enracinement profond des autres accidents de la partie Sud (entre les S.E. 17 et 4).

Allure structurale des couches

En dehors des zones de discontinuités énumérées précédemment, les profils géophysiques (plus spécialement les coupes électriques) corroborent dans l'ensemble l'allure des couches extrapolée à partir du lever de surface.

Nous confronterons les deux méthodes en juxtaposant les résultats obtenus par les sondages électriques et par le lever de surface. Nous préciserons les structures que l'une ou l'autre méthode n'a pu permettre de mettre en évidence.

Coupes électriques (fig. 12, 13)	Lever de surface (profil géologique 24)
Mouvement synclinal : S.E. 24, 23, 22	Synclinal pincé de dolomies néo-jurassiques
Mouvement anticlinal : S.E. 23, 22, 21	Anticlinal pincé de calcaires séquanais
Mouvement synclinal : S.E. 16, 30, 15	Non observé
Mouvement anticlinal : S.E. 30, 15, 14, 13	Non observé
Mouvement synclinal : S.E. 14, 13, 12	Synclinorium portlandien
Mouvement synclinal : S.E. 9, 8, 7 S.E. 6	Synclinorium portlandien (nombreuses discontinuités) Compartiment surélevé
Mouvement anticlinal : S.E. 4, 3, 2	Anticlinal de dolomies néo-jurassiques
Mouvement synclinal : S.E. 1, 2, 0	Amorce de la retombée Sud du Portlandien

Il y a donc accord entre les grandes unités distinguées en surface et les grandes aires de résistivité analogues déterminées par la géophysique.

S'il est impossible d'établir une correspondance parfaite entre les deux pour des raisons largement évoquées plus haut, le mérite essentiel de l'étude géophysique est d'avoir fourni une sorte de mètre de la galerie, en distinguant les longueurs à faible ou forte résistivité qui sont de bons critères de valeur des terrains traversés.

4° - ETUDE HYDROMORPHOLOGIQUE

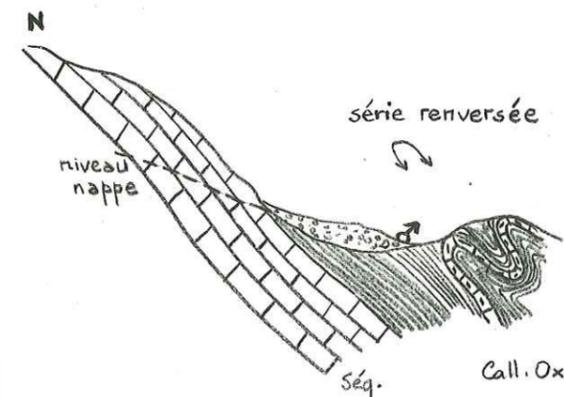
a) Carte géomorphologique. Hydrogéologie du massif

Cette carte a pour but de faire ressortir les grands réseaux de drainage actifs et fossiles, les exutoires connus, les zones d'absorption diffuses et les grandes unités morphologiques (plateaux, reliefs divers). Il ressort immédiatement de ce document (fig. 15) une différence entre deux grands ensembles :

- Un ensemble Nord où l'écoulement superficiel a été actif porte la trace de nombreux petits vallons secs dont l'aspect méandrique ne laisse aucun doute sur leur origine fluviale. L'existence de cet écoulement, même fossile, laisse prévoir un substratum imperméable en moyenne assez élevé, ce que l'étude de la structure corrobore.

L'anticlinal des Vacons, où affleurent les niveaux marno-argileux du Jurassique moyen et du Callovo-Oxfordien, est fréquemment jalonné par des sources ou des zones à humidité diffuse qui apparaissent au contact calcaires-marnes.

Le ruisseau des Vacons est le seul drain actif de ce secteur Nord. Il est essentiellement alimenté à l'étiage par une source située à Bas Vacon, dont l'origine s'explique par le schéma ci-contre.



Lors des périodes orageuses, ce ruisseau a un régime de type oued très accusé, avec une crue et une décrue rapides. Ce régime correspond à un "temps de réponse" du massif extrêmement faible aux précipitations. Ainsi, l'emmagasinement d'eau dans le massif est pratiquement sans effet sur ce cours d'eau. Signalons en outre que le ruisseau des Vacons a une perte importante au niveau de la ferme du Bas Vacon. Environ 50 % du débit s'engouffre le long d'une zone diffuse qui est une cicatrice tectonique (faille chevauchante). On ne connaît pas d'exutoire correspondant à cette perte. Il est probable que le cheminement de l'eau est assez profond et que celle-ci gagne le bassin de Rians en diffusant à travers les calcaires.

- L'ensemble Sud débute au niveau de Puits de Rians et s'étend jusqu'à Pourrières. Le petit synclinal crétacé de Puits de Rians contient une nappe vraisemblablement locale. Le secteur situé entre Puits de Rians et Pourrières réalise le type même du massif karstique : aucun écoulement superficiel actif ou fossile (si l'on excepte les quelques petits ravins secs qui rejoignent le bassin de l'Arc), un impluvium lapiazé et sec, une résurgence de type vaclusien ("Trou de la Gaule" à Pourrières) au contact entre les séries du bassin de l'Arc et le massif calcaire du bois de Pourrières.

Le niveau dynamique est actuellement très bas dans cette résurgence (30 m environ sous le terrain naturel) à la suite d'une longue période de sécheresse et de l'exhaure des mines de lignite de Gardanne.

Dans un secteur de 100 km² au Nord de Pourrières, une reconnaissance systématique a révélé l'existence de plus de cent avens. Une autre zone sise au Nord de Puyloubier a révélé plusieurs avens et pourrait servir d'alimentation au réseau profond dont le "Trou de la Gaule" ne serait qu'un trop-plein.

En dehors des limites de cette carte, nous devons signaler un des seuls exutoires importants connus pour le massif situé à l'Est de Sainte-Victoire. Il s'agit des sources de l'Argens, près de la localité de Seillons. Néanmoins, ce seul exutoire ne suffit pas à expliquer comment s'effectue le drainage de cette vaste zone. Une part importante des débits est drainée vers le bassin de l'Arc à une cote sans aucun doute très basse. Les circulations se feraient au niveau des assises calcaires du Fuvélien, obturées au toit par les assises imperméables du Bégudien. Les fortes venues d'eau enregistrées dans les exploitations minières de Fuveau-Gardanne sont en relation avec ce type d'alimentation latérale des séries crétacées lacustres par les bordures jurassiques du bassin de l'Arc.

L'examen de la carte morphologique appelle en outre un certain nombre de remarques.

D'après A. BILLEREY (12), le secteur Est de la Sainte-Victoire porte la trace de plusieurs surfaces d'érosion. La surface bauxitique est visible au Puits de Rians à 450 m et remonte, très gauchie, en direction de la montagne Sainte-Victoire. Cette surface bauxitique extrêmement plissée est recoupée par deux surfaces de pénéplanation elles-mêmes déformées. Au Sud de Puits de Rians, à la Palière, une surface gauchie située entre 450 et 500 m recoupe la surface à bauxite et se relève en direction de la montagne Sainte-Victoire. Au Sud de l'alignement des sommets aboutissant à la Dispute et au Pain de Munition, un glacis identique s'étale à 450-490 m dans le bois de Pourrières, au-dessus du bassin de l'Arc. Nous pouvons ajouter que ce même glacis se poursuit au Nord-Ouest et à l'Est de Puits de Rians (bordure du bois de la Gardiole, les Buissonades, Le Planet, Bouteille, Longagne) à la même altitude.

C'est sur cette surface que C. CORNET (24) signale la présence de quelques vestiges de sédiments estimés d'âge tortonien. A. BILLEREY (12) rejoint cette idée et attribue également un âge tortonien à cette surface.

Une autre surface correspond aux sommets alignés dans le prolongement de la chaîne de Sainte-Victoire ; leur altitude oscille autour de 550 m. Ils correspondent à une surface plus gauchie que la surface tortonienne. Comme elle ne peut être d'âge bauxitique, puisqu'elle recoupe la surface à bauxite, elle est oligocène (A. BILLEREY). Les reliefs pré-tortonien ne sont pas entièrement arasés et les deux surfaces morphologiques oligocène et tortonienne s'emboîtent. Conséquence de l'âge de ces surfaces, le périclinal Est de la Sainte-Victoire est de formation plio-quadernaire ; ce fait est confirmé par l'existence de nombreux vallons secs sur le versant méridional n'ayant pu fonctionner que sous climat péri-glaciaire (cf. étude "canal de Pourrières-Pourcieux"). Cette théorie vient appuyer une étude précédente de A. BILLEREY (11) qui démontrait un important jeu quaternaire de la montagne Sainte-Victoire. Nous souscrivons entièrement à cette opinion. Les manifestations des mouvements récents se sont fait sentir lors du séisme de 1909. De nombreuses maisons du secteur Est de Sainte-Victoire (Bas Vacon, Bouteille) ont subi des cisaillements qui ne peuvent s'expliquer que par des mouvements tectoniques récents. Il n'est pas sans intérêt d'en être prévenu au moment d'entreprendre une galerie à travers ce massif.

Quelles sont les incidences de cette morphologie sur l'estimation de l'hydrogéologie profonde ?

L'ensemble du secteur intéressé par la galerie représente un impluvium de 200 km² environ, constitué essentiellement par des calcaires karstifiés. Ces calcaires sont d'autant plus cariés qu'ils contiennent moins d'impuretés susceptibles de colmater les fissures, ce processus tendant à ralentir l'approfondissement du karst. C'est ainsi que les calcaires portlandiens à 97 % de CO₃Ca, donc très purs, peuvent donner lieu à de grosses cavités.

Dans le cas présent, ce schéma simple a été compliqué par la superposition d'autres paramètres : des argiles allogènes sont venues colmater artificiellement ces fissures au cours des périodes continentales du Crétacé et du Tertiaire (on retrouve dans les sondages des poches de dissolution remplies par des argiles et des grès crétacés supérieurs). Cependant, les efforts tectoniques postérieurs à l'établissement des karsts ont eu pour conséquence de refermer ceux-ci, tandis que la fissuration introduisait un nouveau facteur favorable aux circulations souterraines et à l'enfouissement du karst.

Etant donné que rien ne peut nous renseigner sur la durée et le mode de cette évolution complexe, il est bien difficile de fournir des données précises sur l'état d'altération de ce massif ; l'étude géophysique entreprise a eu pour but de tenter de lever cette incertitude.

L'enfouissement du karst s'arrête habituellement, soit sur un niveau de base constitué par des calcaires non fissurés ou non karstifiés (ou sur un karst colmaté), soit sur un niveau de base constitué par un niveau imperméable. Ce niveau de base est généralement constitué en Provence par le Trias. A notre avis, le karst se poursuit jusqu'au niveau des assises marneuses du Callovo-Oxfordien qui constitue le niveau de base dans les séries de la Sainte-Victoire. La galerie de Signes aval conçue en vue de drainer le massif d'Agnis (Sainte-Baume) n'a rencontré de venues importantes qu'au sein des assises calcaires et marneuses du Jurassique moyen qui a fonctionné, à la fois comme frein à la migration de l'eau en profondeur et comme réservoir. Par ailleurs, on peut avoir des niveaux de base artificiels lorsque les séries jurassiques calcaires chevauchent les assises argileuses du Crétacé supérieur et du Tertiaire, comme c'est le cas le long du chevauchement du Sambuc sur le bassin synclinal de Rians.

Sur la galerie principale, des piézomètres équipent un certain nombre de sondages. Le sondage S, 7, situé au pied du Pain de Munition, n'a jamais fourni le moindre niveau d'eau mesurable, non plus que le sondage S, 4, implanté au Deffends de Rians dans les calcaires séquanien. Les sondages 401 et 402, qui traversent le chevauchement du Sambuc, ont révélé l'existence d'une nappe. Ce contact superpose en effet les calcaires du Séquanien, très perméables, aux brèches à ciment argileux éocènes moins transmissives. Ce schéma suffit à créer un niveau dynamique mesurable. Le petit bassin du Puits de Rians pose un problème particulier : un puits épidermique, implanté dans les séries du Crétacé supérieur, conserve un niveau constant à 1,20 m sous la surface. Les essais de pompage y ont révélé une importante réserve. Un forage d'exploitation, implanté à proximité du puits, a rencontré un niveau d'eau à moins 70 m. Cela implique dans ce secteur l'existence de deux nappes superposées : l'une située dans les assises fluvio-lacustres superficielles, l'autre correspondant à des circulations dans le Portlandien, au niveau des accidents multiples qui affectent cette zone et jouent le rôle de drains.

Le tronçon amont (tronçon de la Bourguède) de la galerie recoupe des assises aquifères dans les niveaux fluvio-lacustres du Danien et de l'Eocène. Le forage 101, implanté sur le flanc Nord de l'anticlinal de la Bourguède, fournit un niveau piézométrique stable pour la tête amont de la galerie à moins de 16 m. Le synclinal pincé, situé entre le chevauchement du Sambuc et l'anticlinal de la Bourguède, possède des ressources en eau plus importantes : les brèches et les fractions gréseuses de sédiments éocènes sont localement très aquifères. Ces lentilles sont quelquefois captives et l'eau s'y trouve en charge. Néanmoins, les débits possibles y sont négligeables en raison de la très faible perméabilité et de la très faible transmissivité de ces terrains. L'eau contenue dans les sédiments argilo-gréseux de ce synclinal est essentiellement une eau de rétention, l'eau libre étant pratiquement inexistante.

b) Hydrologie à l'échelle du sondage. Le problème de la karstification

Nous n'envisagerons ici que les essais de perméabilité effectués sur les sondages (essais Lugeon) ou les résultats obtenus dans ce domaine à l'exécution des sondages.

L'essai normalisé Lugeon a fourni pour divers sondages les résultats suivants :

N° du sondage	Lithologie	Lugeon UL = 1/m/mn sous 1bar
S. 4	Dolomies néo-jurassiques en flanc inverse	9,5
S. 5	Calcaires portlandiens fracturés	7,2
S. 7	Calcaires séquaniens sains	0,07
S. 8	Calcaires portlandiens sains	3,2
S. 1	Calcaire danien supérieur	24,0
S. 2	Calcaire danien inférieur plus marneux	17,0

Si l'on excepte la mesure 7, tous les essais révèlent des pertes importantes. Les terrains de la partie Nord du massif absorbent beaucoup plus que ceux de la partie Sud en raison de leur fort pourcentage de fracturation. Les calcaires daniens de la Bourguède ont des pertes importantes dues à leur grande hétérogénéité. Par ailleurs, tous les sondages exécutés dans le massif jurassique se sont révélés en perte totale, ceci en relation avec une perméabilité en grand acquise par la fracturation et l'altération. Les forages du tronçon de la Bourguède sont en perte totale dans les calcaires, mais étanches dans les assises argilo-gréseuses.

Au stade des travaux, l'incidence de ces résultats est la suivante :

- il y a impossibilité de rétention d'une nappe de grand développement au sein du massif calcaire,
- les essais Lugeon révèlent des pertes importantes dont il faudra tenir compte au moment des injections autour du revêtement,
- il existe une quantité d'eau absorbée importante dans les argiles sableuses éocènes.

En aucun cas, les forages ou l'observation superficielle n'ont permis de conclure à l'existence d'une charge au-dessus de l'ouvrage susceptible de modifier ses conditions d'exécution.

5° - PROPRIETES TECHNIQUES DES DIFFERENTS TERRAINS

a) Valeur lithologique

1°) Données qualitatives

Le tronçon de la Bourguède (AB) traversera les assises continentales du Danien et de l'Eocène, tandis que la galerie de Sainte-Victoire proprement dite rencontrera les terrains calcaires et dolomitiques du Jurassique dans sa quasi totalité.

- Tronçon de la Bourguède

Les séries continentales du Danien et de l'Eocène se présentent de façon hétérogène : si l'on excepte la fraction calcaire sommitale du Danien, les autres formations sont constituées soit de brèches, soit d'argiles plus ou moins sableuses, soit de marnes et calcaires marneux grumeleux et friables.

Les calcaires du Danien, traversés en galerie lors de l'exécution d'un ouvrage de la branche de Bimont, ont eu une excellente tenue. Il n'en sera sans doute pas de même lors de la traversée des calcaires daniens de la Bourguède : ils sont en effet bien moins épais (60 m contre 100 m), les intercalations marneuses et les fractions crayeuses y sont beaucoup plus importantes. La base de la formation du Danien, constituée par une série de marnes grumeleuses variées, lignites, brèches plus ou moins cimentées, s'est contamment éboulée pendant l'exécution des sondages de reconnaissance 103 et 104.

Les argiles et brèches du Thanétien ont également des qualités de tenue fort médiocre, surtout lorsque la teneur en eau de ce matériau est élevée : les essais effectués sur ces formations lors de l'étude du canal de Rians ont montré leur cohésion assez faible ; cependant, cette caractéristique a toujours tendance à s'améliorer en profondeur avec le poids des terrains sus-jacents.

L'écaille inversée au front du chevauchement (point B) du Sambuc rassemble tous les terrains précédents ayant supporté des efforts tectoniques qui corrompent encore leurs qualités mécaniques : le sondage 106, qui a traversé cette écaille, a nécessité une cimentation complète et un tubage partiel en raison des nombreux éboulements qui ont accompagné sa foration. Dans les sondages 401 et 402, les longueurs situées dans les marnes et brèches éocènes du flanc inverse écaillé se sont refermées sur elles-mêmes dès que le tubage en a été retiré.

L'eau joue dans tous les cas un rôle néfaste dans la tenue de ces terrains qui présentent presque toujours de bonnes caractéristiques mécaniques à sec : des déboussages brusques seront donc à craindre constamment sur le tronçon aval de la Bourguède dès que la galerie aura quitté les calcaires francs du Danien supérieur.

- Galerie de Sainte-Victoire proprement dite

Sauf en quelques secteurs très localisés, la galerie ne traversera que les assises calcaires et dolomitiques du Jurassique supérieur. Par leurs qualités intrinsèques, ces terrains se présentent de façon très favorable, tant au point de vue de la tenue que de la perforation. L'expérience acquise à la suite des autres percements de galerie dans ces terrains montre que les portions saines ou peu affectées par la tectonique se traversent sans soutienement d'aucune sorte.

Dans le cas présent, la fissuration souvent très développée et son corollaire l'altération introduisent un facteur défavorable aux bonnes qualités initiales de ces sédiments. La fissuration impose des plans de discontinuité très variés dans leur orientation et leur densité : les calcaires et les dolomies du Jurassique supérieur ont eu à subir une longue évolution tectonique conjointement à une altération continentale depuis 80 millions

d'années environ. De tels terrains provoquent toujours des écaillages divers et des purges en galerie ; les poches d'altération contiennent des sédiments d'altération argileux qui débourent et fluent au front de taille. En outre, les contraintes internes du massif correspondant aux diverses périodes orogéniques sont irrégulières et influencent fortement la forme des voûtes de décompression et, par là même, le soutènement à mettre en place : il sera possible par des mesures de compression à la paroi de mettre en évidence ces contraintes.

En conséquence, seul le comportement global du massif au point de vue de l'altération et de la fracturation interviendra dans la qualité des terrains rencontrés.

La tête aval de la galerie se situe dans les assises fluvio-lacustres du Valdo-Fuvélien le long de la bordure du bassin de l'Arc. La base de cette formation est très hétérogène et comporte des séries variées marneuses et sablo-gréseuses. Ces terrains sont d'une tenue médiocre en rapport avec un cohésion assez faible. Les calcaires qui leur font suite sont au contraire massifs et ont toutes les qualités des calcaires sains.

2°) Données quantitatives

Les essais mécaniques, physiques et chimiques suivants ont été effectués sur des tronçons de carottes sains provenant des reconnaissances dans les calcaires et dolomies du Jurassique supérieur.

- Essais mécaniques et physiques

. Résistance en compression simple sur éprouvettes d'éclatement 2 et mesure de la densité

Repère	Densité apparente par mesures dimensionnelles	Résistance à la compression en bars
S. 4 (calcaires séquanien)	2,54	764,4
	2,71	1.406,6
S. 5 (calcaires portlandiens)	2,69	-
S. 7 (dolomies Séquanien)	2,71	905,0
	2,75	964,0
	2,75	1.204,4
S. 8 (Portlandien supérieur)	2,71	803,4
	2,70	1.228,8
	2,69	796,0

. Essai d'usure (à la meule Dorry sur éprouvettes 6x4x2, chargées à 0,250 bar sur l'anneau d'usure)

Repère	Usure en mm pour 1.000m
S. 4	2,85 (dolomies)
	4,80 (calcaires séquanien)

S. 5	83 m	5,80 (Portlandien fracturé)
S. 7	100 m	3,23 (dolomie saine)
S. 8	61 m	3,45 moyen (Portlandien sain)

Les essais montrent une remarquable homogénéité dans les valeurs de densité. Les résistances à la compression sont dans les normes admises pour les calcaires.

L'essai d'abrasion est destiné à mesurer l'usure d'un tronçon de carotte selon un procédé normalisé. On constate que celle-ci augmente notablement lorsque le sédiment est altéré.

- Essais chimiques

. Dosage des éléments en %

	S. 4	S. 7	S. 8
- Insoluble dans les acides dont silice SiO ₂	0,25 0,05	0,60 0,50	1,25 0,10
- Alumine Al ₂ O ₃	0,25	0,13	0,14
- Oxyde Fe ₂ O ₃	0,10	0,16	0,08
- Chaux CaO	38,00	33,05	54,65
- Magnésie MgO	14,45	18,45	0,12
- Anhydride sulfurique SO ₃	0,08	0,07	0,03
- Anhydride carbonique CO ₂	45,75	46,25	43,05
- Eau et matières volatiles	0,90	1,00	0,50
- Pertes et non dosés	0,22	0,29	0,18

. Composition déduite des analyses en %

	S. 4	S. 7	S. 8
- Calcaire CaCO ₃	31,66	12,8	97,26
- Dolomie théorique CaCO ₃ - MgCO ₃	66,48	84,88	0,54
- Sulfate de calcium CaSO ₄	0,14	0,12	0,05
- Silice et silicates hydratés	1,72	2,18	2,15

Ces essais montrent la très grande pureté des trois formations concernées. Les calcaires portlandiens (S. 8), dénotent un pourcentage très élevé de carbonate de calcium qui explique l'importance de la karstification dans ce matériau.

3°) Conclusion pour l'ensemble de l'ouvrage

Ces différentes données nous indiquent donc :

- pour le tronçon de la Bourguède, les assises crétacées et éocènes sont de tenue médiocre (les calcaires daniens exceptés), cette caractéristique pouvant être aggravée par la présence d'eau,
- pour la galerie de Sainte-Victoire proprement dite, des terrains d'excellente tenue lorsqu'ils sont sains ou lorsqu'ils sont recimentés, mais de mauvaise qualité quand ils ont eu à subir des efforts tectoniques et des périodes d'altération.

b) Fracturation. Altération

La fissuration au sens large, c'est-à-dire tout ce qui correspond à un débit macroscopique de la roche, présente une grande importance sur l'ensemble de la galerie et conditionne la valeur géotechnique du matériau, surtout par l'altération qu'elle introduit. Dans le cas général, on ne peut avoir une idée précise de la maille de fracturation, ni de l'orientation de cette maille dans l'espace. En effet, les affleurements exploitables sont peu nombreux et seules les tranchées artificielles et les sondages permettent de s'affranchir des difficultés d'observation. Les deux études suivantes sont statistiques : elles portent, l'une sur l'orientation des fissures, l'autre sur la densité de celles-ci sur le parcours de la galerie.

1°) Orientation des plans de fissuration

- Principe

Cette étude a été effectuée dans une zone représentative de l'état de fracturation de l'ensemble du massif, le long du chemin forestier qui traverse le massif de la Gardiole. Les formations sont constituées par des calcaires récifaux portlandiens. Le report de 500 directions de plans de fracturation a été effectué sur un canevas polaire (rosette des joints).

- Résultats

La figure 16 fait ressortir une prédominance des directions Nord 80° et Nord 60°. Trois directions de moindre importance à Nord 50°, Nord 70° et Nord 90° complètent un éventail nettement groupé autour d'un système Est/Nord-Est. Les directions sub-méridiennes (Nord 10°, Nord 145°) présentent une moindre importance. Ce graphique ne permet pas de conclure honnêtement à la postériorité des directions Est/Nord-Est aux directions méridiennes. Néanmoins, nous pouvons affirmer à ce stade que ce système Est/Nord-Est se manifeste beaucoup plus nettement et, donc, paraît plus récent que le système Nord-Sud.

Au niveau du projet, on s'aperçoit que la galerie, qui est implantée suivant un gisement Nord, a une direction normale aux plans de cassure les plus nombreux : cette disposition détermine le cas d'attaque préconisé le plus favorable ; il présente en effet le maximum de garanties de stabilité suivant les génératrices du souterrain, la plus faible résistance du front d'attaque et la déformabilité radiale minimum.

2°) Répartition statistique de la fracturation

- Principe

Cette étude a pour but de définir de façon globale la fracturation des assises rencontrées en fonction de leur nature lithologique (calcaires récifaux, dolomies, calcaires sublithographiques) et en fonction de leur position structurale dans le massif.

ROSETTE DES JOINTS

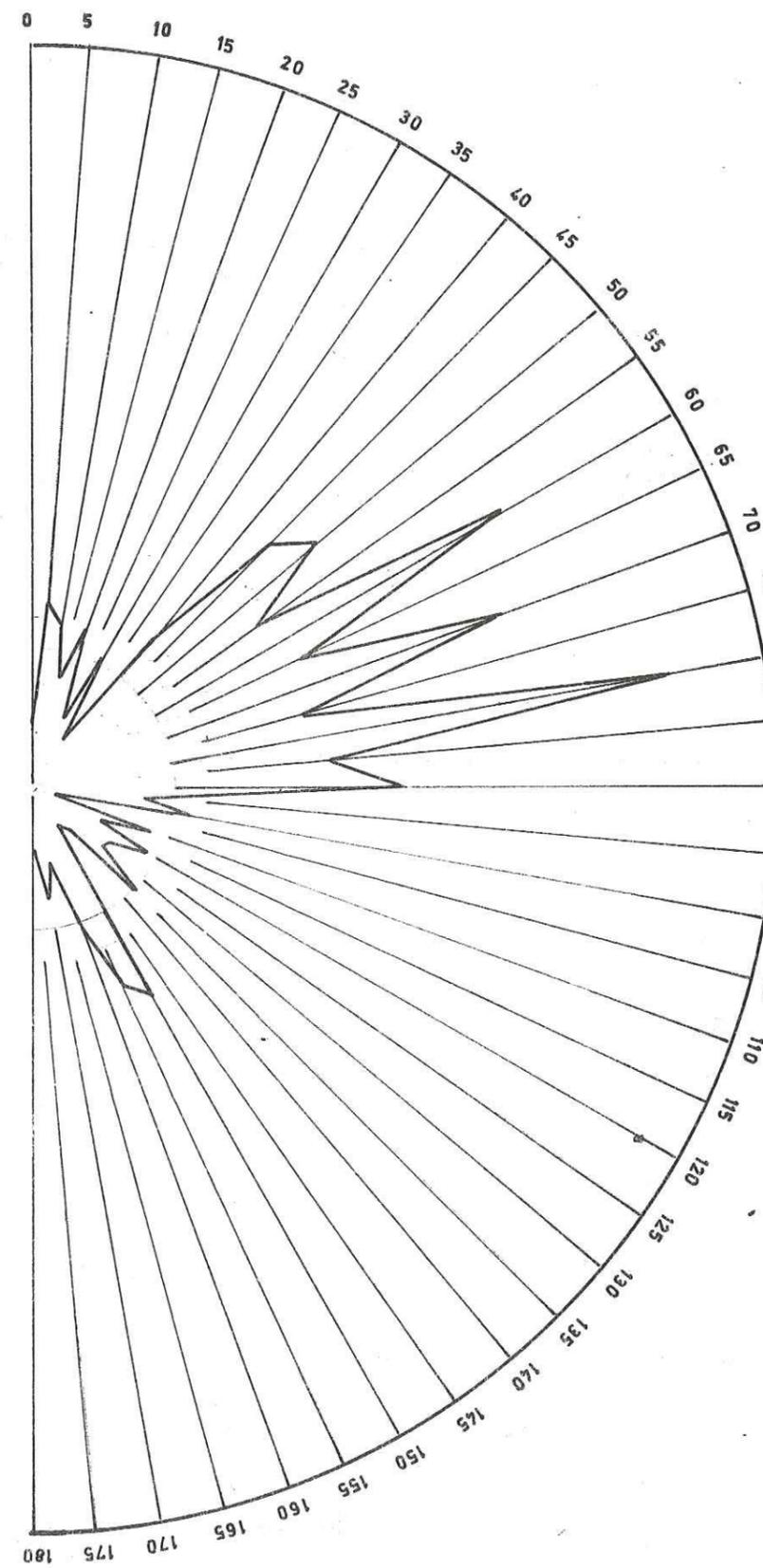
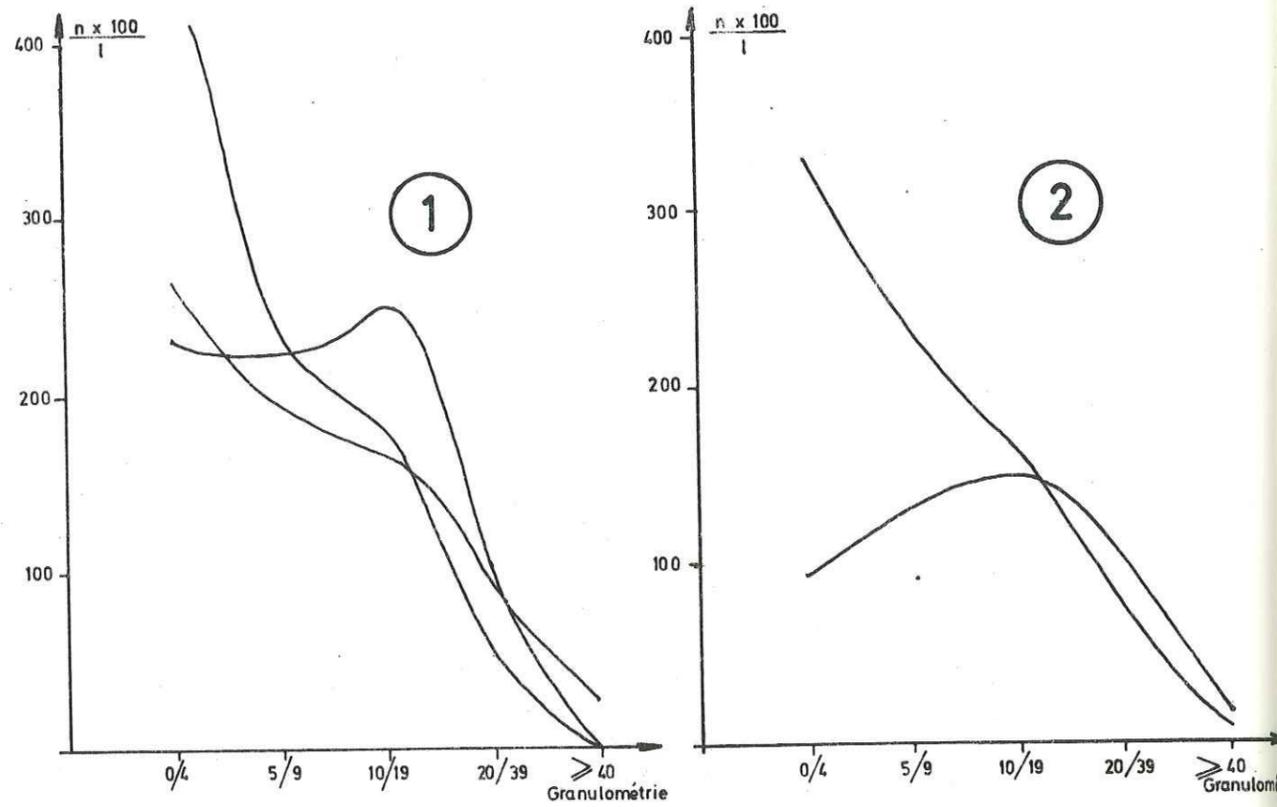


fig. 16

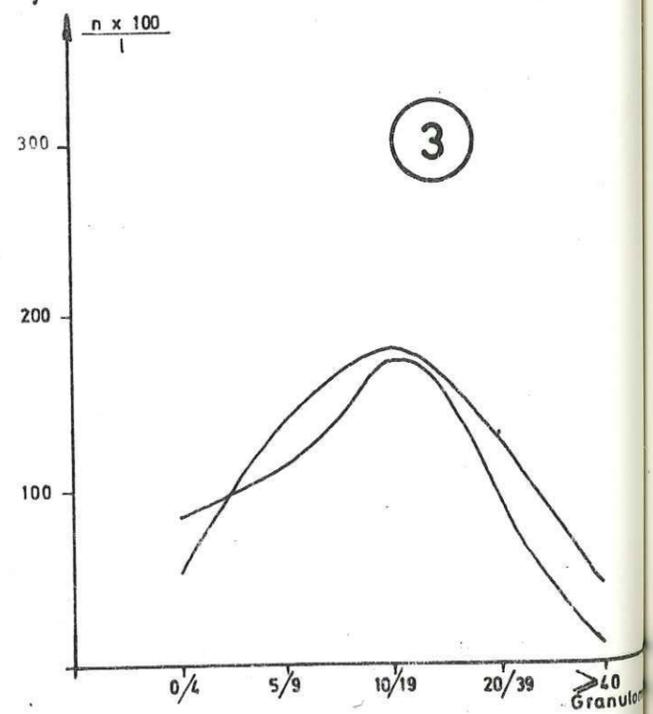
1/0
1 cm

PARTIE NORD DU MASSIF S^{te} VICTOIRE - SAMBUC

fig. 17

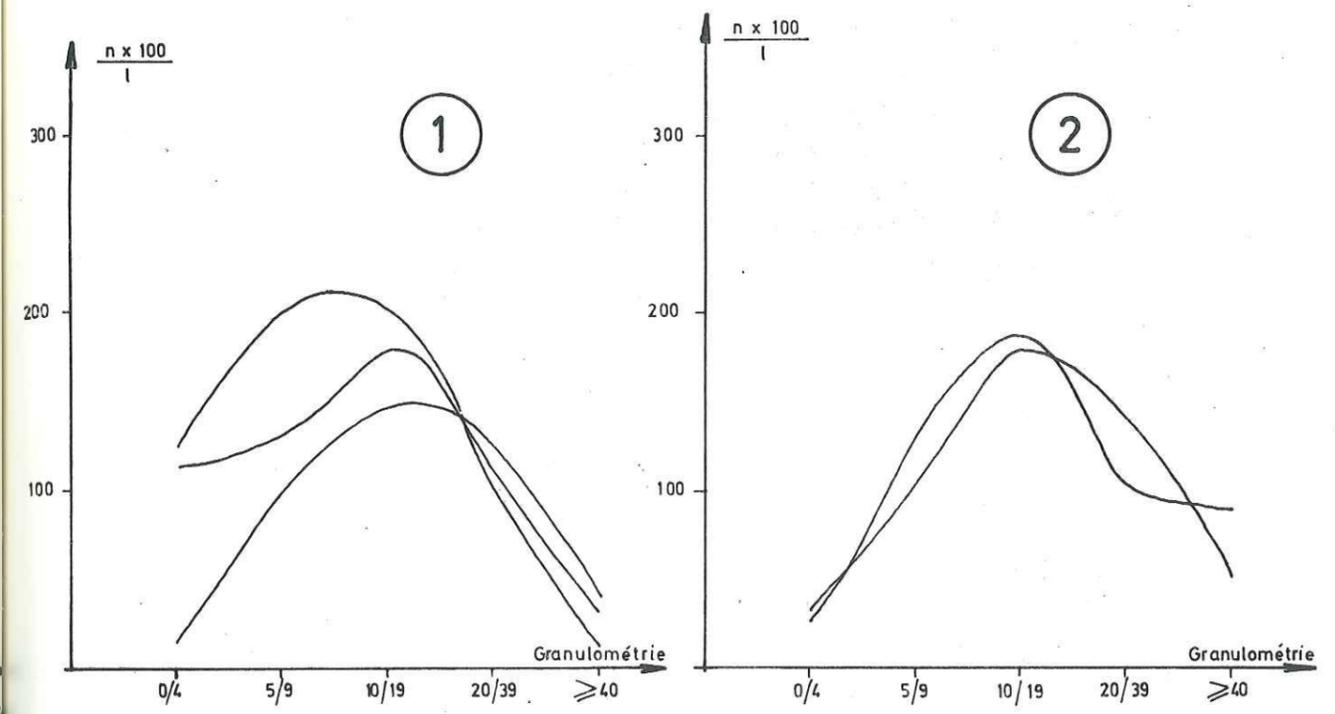


- ① CALCAIRE PORTLANDIEN
- ② DOLOMIE NEOJURASSIQUE
- ③ CALCAIRE SEQUANIEN

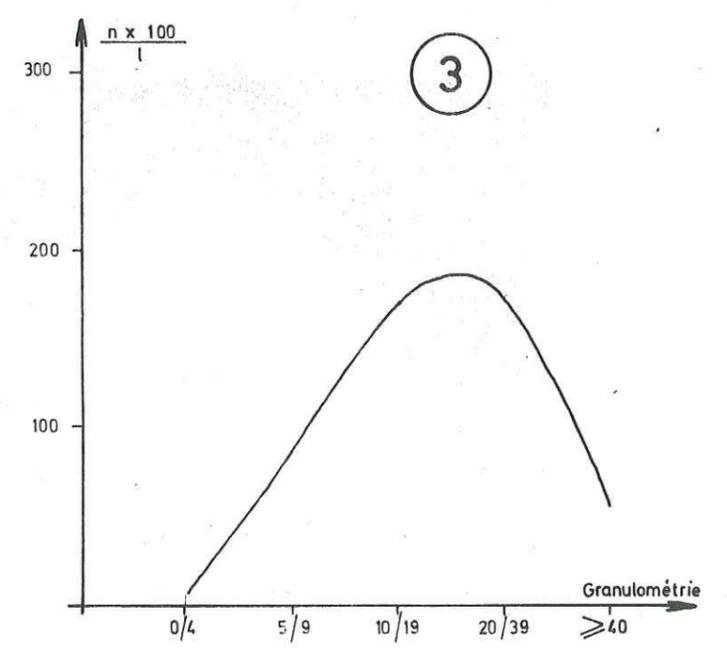


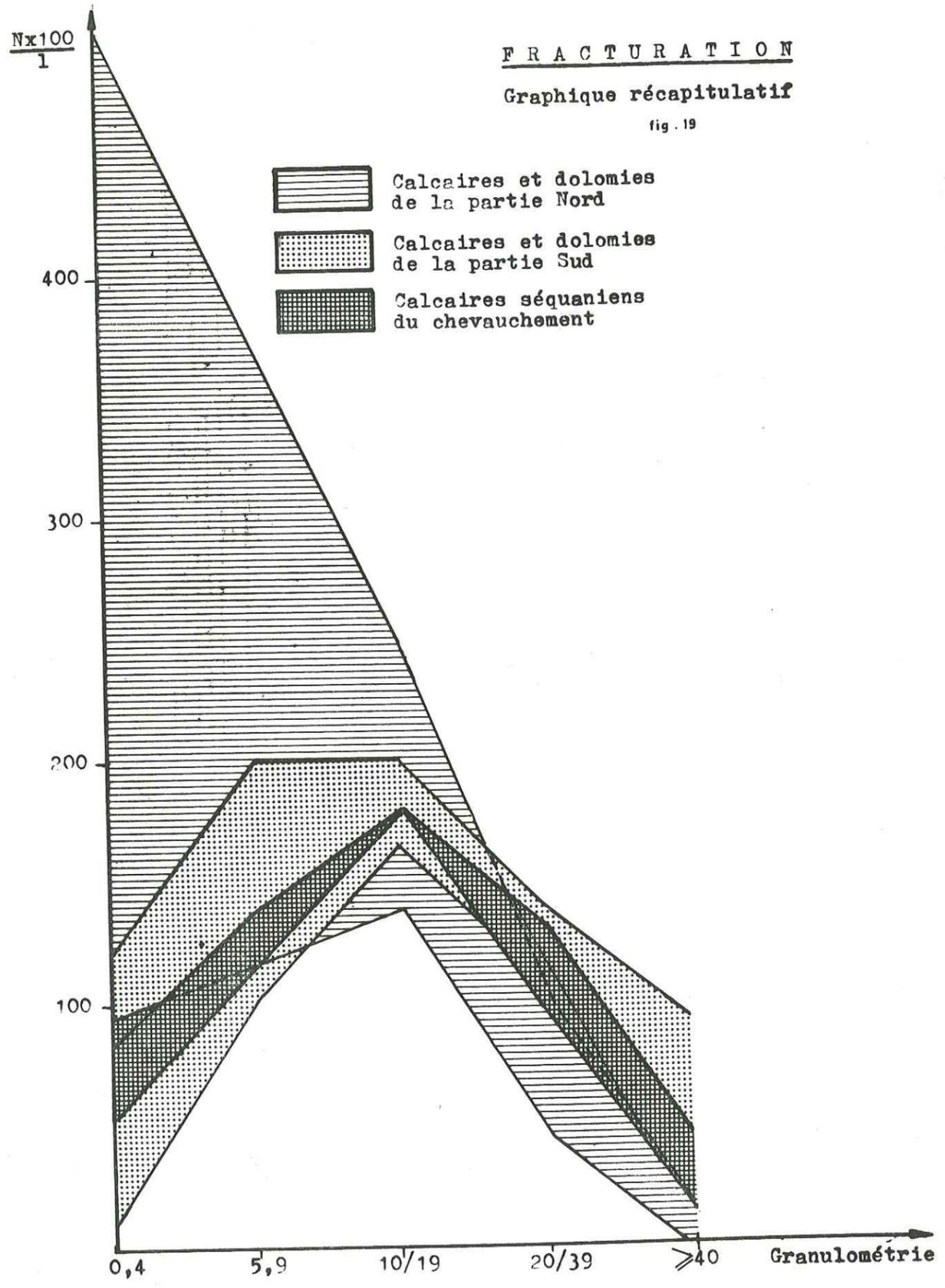
PARTIE SUD DU MASSIF DE S^{te} VICTOIRE & tronçon de la Bourguède

fig. 18



- ① CALCAIRE PORTLANDIEN
- ② DOLOMIE NEOJURASSIQUE
CALCAIRE SEQUANIEN
- ③ CALCAIRE DANIEN
(la Bourguède)





Le matériau d'étude est constitué par les carottes des sondages les plus représentatifs de leur secteur. Les échantillons de forage ont été répartis en cinq classes dimensionnelles :
0/4 cm - 5/9 cm - 10/19 cm - 20/39 cm - >40 m

Les diagrammes (fig. 17 à 19) représentent l'évolution du pourcentage de ces classes dimensionnelles pour des lithologies données et sur des sondages différents (Nord et Sud). Les trois grandes formations rencontrées figurent dans ces diagrammes :

- les calcaires récifaux
- les dolomies néo-jurassiques
- les calcaires séquaniens.

En outre, nous avons appliqué cette méthode aux calcaires du Danien afin de faire ressortir les différences de fracturation qu'ils présentent avec les formations jurassiques.

- Résultats

Cette étude montre que :

- les calcaires séquaniens de la partie Nord du massif du Sambuc (sondages 402 et 403) possèdent des courbes de fracturation semblables : ce sont des calcaires très tectonisés, mais bien recimentés par une recristallisation importante,
- les sondages 321, 322, 505, 5 et 6 révèlent des formations très fracturées, décomprimées, où le rôle de l'altération a été important,
- les sondages de la partie Sud du massif (15, 7, 8, 500) présentent des formations lithologiques fracturées de façon assez semblable, mais peu dense. Les maxima des calcaires portlandiens se situent cependant dans des fractions dimensionnelles inférieures.

Ces résultats confirment bien les observations tectoniques générales dans le massif, à savoir :

- a u Nord, une masse de calcaires séquaniens fracturés, mais comprimée et recimentée,
- entre cette masse et le Puits de Rians, une intense fracturation et altération,
- au Sud de Puits de Rians, une retombée peu plissée jusqu'au bassin de l'Arc.

3°) Conclusion. Relations fracturation-altération

La nature du sédiment et sa position structurale jouent des rôles importants dans la répartition des zones fracturées et altérées le long du tracé.

Les calcaires du Portlandien présentent généralement une maille de fracturation assez fine sur de faibles volumes séparés par des zones à faible densité de fracturation.

Les dolomies ont un seuil de plasticité qui leur permet de résister de façon plus souple aux efforts tectoniques, cette propriété étant probablement en relation avec leur structure granulaire. La fracturation et les recimentations se sont réparties sur l'ensemble de la roche.

Les calcaires du Séquanien ont réagi aux efforts tectoniques de façon beaucoup plus souple que les calcaires du Portlandien. L'ensemble de la masse se plisse mieux car la stratification nettement marquée permet des glissements bancs sur bancs, impossibles dans la masse des calcaires récifaux portlandiens.

Les cortèges de diaclases qui accompagnent chaque plissement ont imposé à la roche un débit très serré et au demeurant beaucoup plus dense dans le Nord du massif que dans le Sud.

Nous avons essayé de faire un lien sur quelques sondages entre les pourcentages de carotte altérée et les pourcentages de carotte fracturée.

	Altération %	Fracturation %
S. 8 (Sud)	40	41
S. 7 (Sud)	36	46
S. 15 (Puits de Rians)	49	62
S. 6 (Puits de Rians)	44	67
S. 321 (Nord)	75	85
S. 5 (Nord)	20	85

La relation entre fracturation et altération paraît bien établie à la lecture de ces chiffres. On note en outre pour la partie Nord du massif, beaucoup plus fracturée que la partie Sud (cf. ante), que les recristallisations nombreuses diminuent notablement les pourcentages d'altération.

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 foration.

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 de réalisation. Les critères géologiques principaux de la valeur des roches en souterrain sont :

- la nature intrinsèque des terrains rencontrés (altérabilité, état de consolidation)
- la fracturation
- les venues d'eau (fonction de la fissuration et de la granulométrie du matériau).

Ces caractéristiques déterminent les principales difficultés que les travaux rencontreront à la réalisation du souterrain, soit :

- difficultés de foration et de chargement
- difficultés de marinage dans certains cas (marnes, argiles)
- épuisements
- soutènements.

Ce dernier critère est le seul qui a été retenu pour le choix d'un profil et pour définir la classe du terrain traversé.

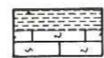
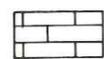
a) Tronçon de la Bourguède (du point A au point B)

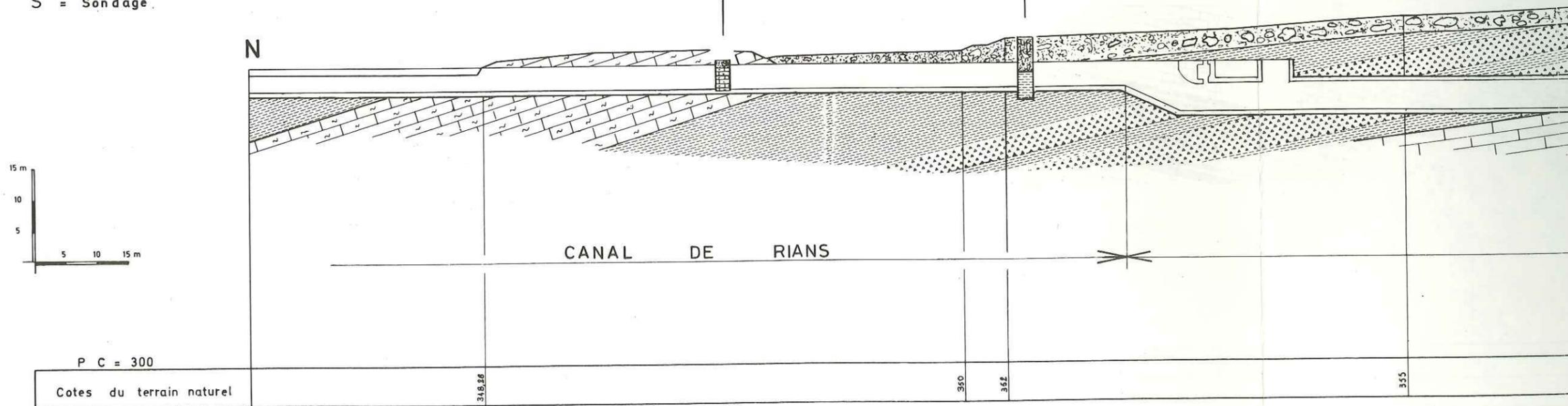
1°) Structures traversées (plans n° 20, 21, 22)

La tranchée d'accès amont est située dans les marnes et argiles rouges du Montien qui recouvrent normalement les calcaires du Danien à pendage Nord. La tête amont de la galerie (point A) ne sera fixée qu'à l'entrée franche dans les calcaires du Danien. Le tracé recoupera ceux-ci jusqu'au point métrique (PM) 480. On peut

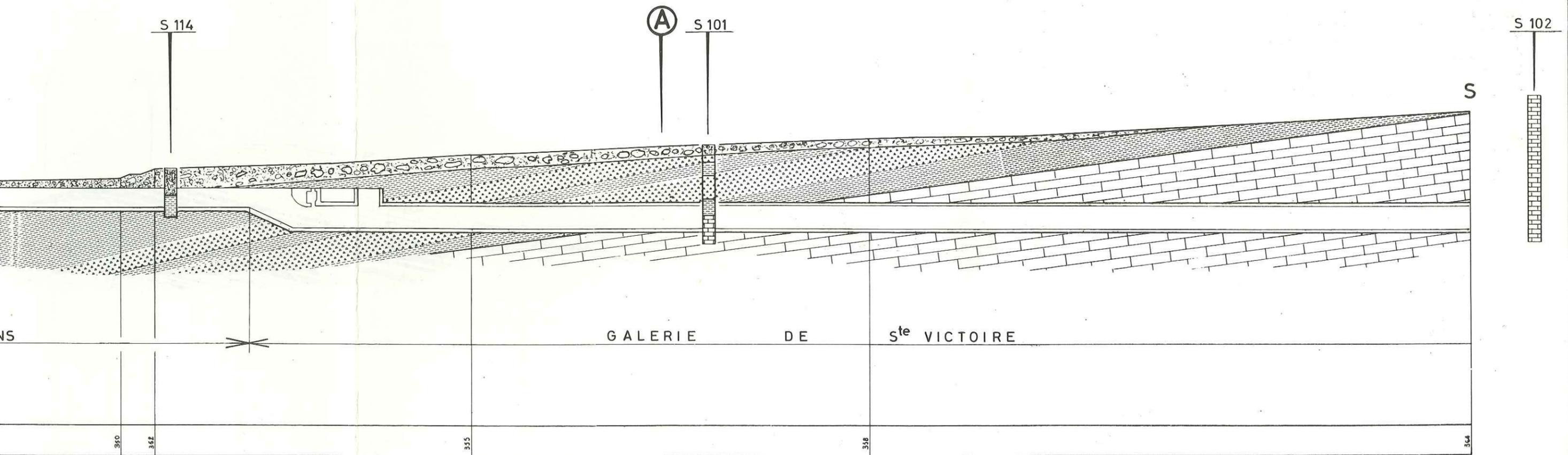
TÊTE AMONT

FIG. 20

-  ELUVIONS
-  e v THANETIEN marnes et calcaires lacustres
-  e v-vi MONTIEN alternances d'argiles et brèches
-  C9d DANIEN calcaires lacustres
- S = Sondage

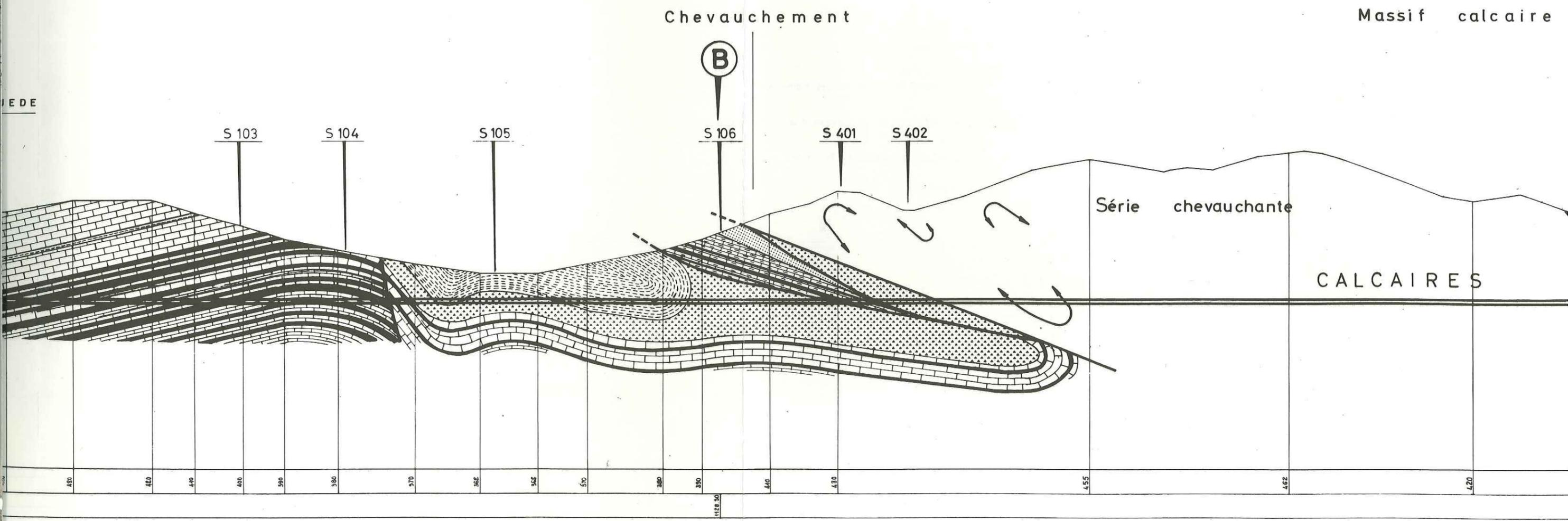


TÊTE A MONT



TRONÇON AMONT

FIG. 21



E DE

ONT

Chevauchement

Massif calcaire Sambuc - S^{te} Victoire

(B)

S 106

S 401

S 402

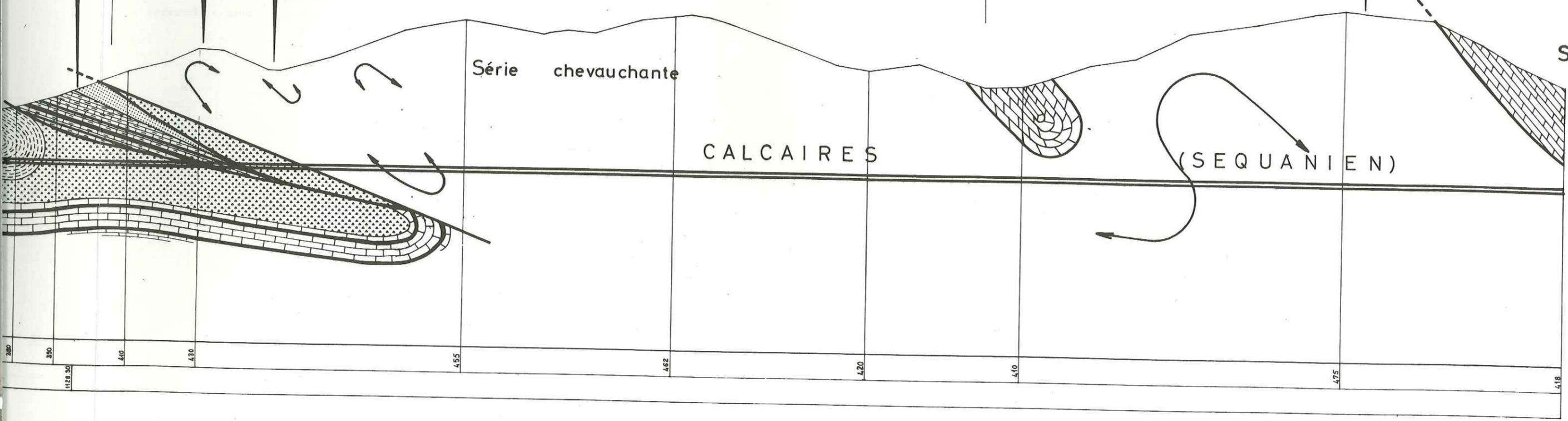
S 403

S

Série chevauchante

CALCAIRES

(SEQUANIEN)



en effet estimer à cette distance l'entrée dans les niveaux très irréguliers marno-calcaires et bréchoïdes du Danien inférieur. Un accident Est-Ouest vient accentuer la flexure qui affecte ces niveaux à l'amorce du synclinal tertiaire qui succède au Sud à l'anticlinal de la Bourguède. Cette traversée du Danien inférieur se prolonge jusqu'au PM. 855, qui marque le point de flexuration maximum. Du PM. 855 au point triple B (jonction de la fenêtre avec la galerie), la galerie traverse sur quelques dizaines de mètres le rebord Sud de la flexure (calcaires daniens), les argiles et brèches éocènes, puis l'écaille dano-éocène engagée sous le chevauchement du Sambuc. Le point triple B se trouve au milieu de cette dernière unité. Toutes les séries sont recoupées en travers bancs.

2°) Avancement. Difficultés probables

Nous résumerons l'avancement par tranches identiques du point de vue de la lithologie et des difficultés :

- Point A - PM. 480 Calcaires du Danien supérieur peu fissurés et peu fracturés. Les soutènements seront réduits à quelques épingleages de bancs décomprimés. Quelques interbancs marneux pourront donner des difficultés en radier.
- PM. 480 - PM. 860 Assises hétérogènes (marnes, calcaires, brèches) du Danien inférieur, passage des accidents de flexure. Portion entièrement soutenue sous faible couverture, n'imposant que des cintres légers.
- PM. 860 - PM. 1250 Franchissement du synclinal éocène sous faible couverture (20 m maximum). Les argiles et brèches ont une mauvaise tenue et nécessiteront des enfilages à l'avancement. Il est à prévoir en outre des difficultés à la foration et au chargement dues à l'altération du radier.
- PM. 1250 - Point B Ecaille dano-éocène laminée. Problèmes de tenue dus à l'hétérogénéité, la nature et la qualité de ces terrains. Nécessité d'enfilages sur cintres légers.

Les piézomètres installés sur le tronçon de la Bourguède (101, 105, 106) traduisent l'existence d'une faible charge au-dessus de la galerie. Les débits seront certainement très faibles (5 l/s en débit permanent), mais ces écoulements auront une incidence défavorable sur le matériau traversé, notamment lors du marinage et du roulage sur le radier altéré. La nappe des calcaires du Danien supérieur sera immédiatement rabattue à la foration, tandis que celle des assises marno-bréchiennes du Danien inférieur et de l'Eocène maintiendra une imbibition permanente, fonction d'une rétention superficielle importante de ces matériaux.

Les difficultés prévues pour la perforation du tronçon AB de la galerie ont conduit à envisager une attaque par fenêtre (fenêtre des Vacons). Cette fenêtre permettra, à partir du point B, l'avancement simultané vers l'amont (point A) et vers l'aval (point C) sans que ce dernier chantier ne soit retardé par le premier.

b) Galerie de Sainte-Victoire proprement dite (de B à C)

1°) Structures traversées

Les structures sont envisagées au fur et à mesure de l'avancement, chaque tronçon limité par des PM, le PM. 0 correspondant au point B.

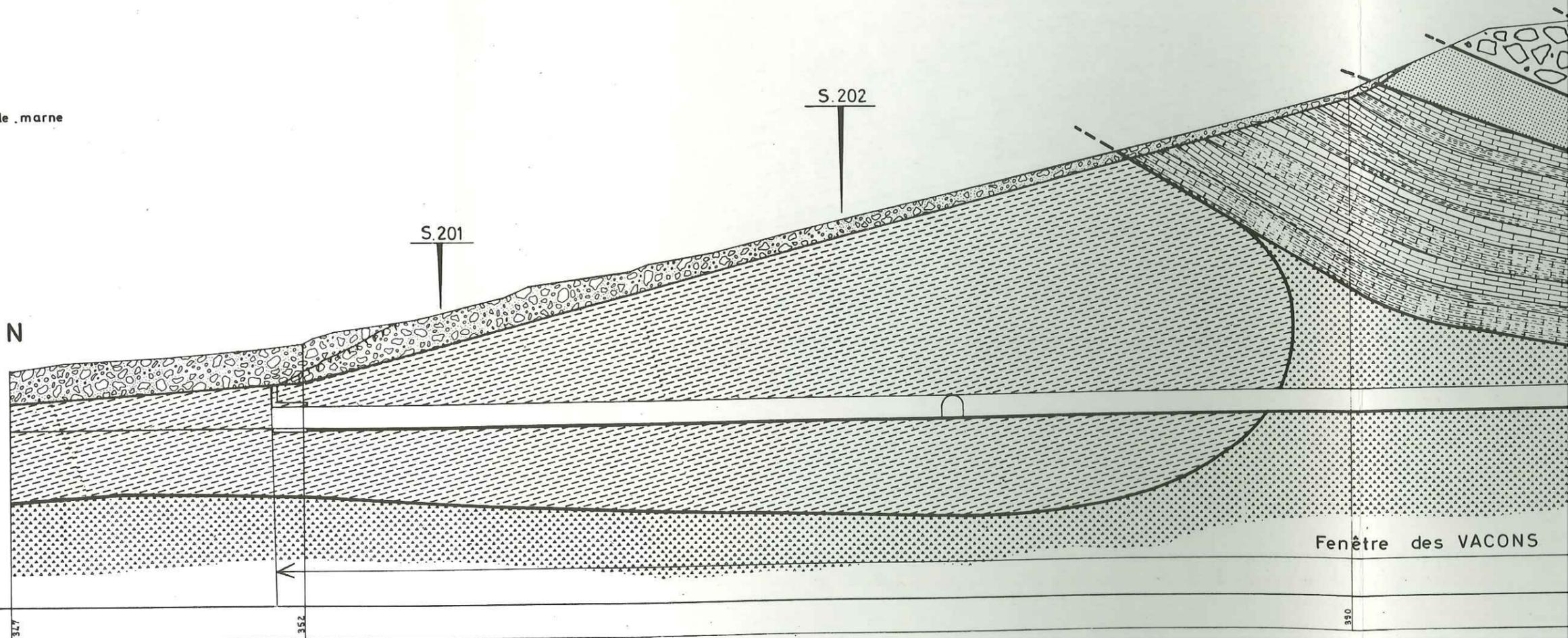
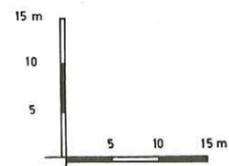
- PM. 0 - PM. 200 Ecailles de base du chevauchement du Sambuc, constituées de terrains laminés d'âge daniens et éocènes.
- PM. 200 - PM. 1100 Replis poussés et légèrement écaillés de calcaires d'âge séquanien ; laminages, mais bonne compacité due à la recristallisation.

- PM. 1100 - PM. 1500 Ecaillages et duplicatures de la terminaison orientale du pli des Vacons. Zone très broyée, intéressant les calcaires du Portlandien, les dolomies néo-jurassiques, les calcaires du Séquanien.
- PM. 1500 - PM. 2000 Duplicatures du flanc Sud de l'anticlinal des Vacons. Lambeaux de Portlandien poussés sur une aire anticlinale à dolomies néo-jurassiques.
- PM. 2000 - PM. 2500 Mosaïque des plis étirés et gauchis de la terminaison orientale du flanc Sud de l'anticlinal des Vacons. Zone très broyée. Le tracé recoupe tout d'abord les dolomies, puis le Séquanien d'un pli anticlinal méridien.
- PM. 2500 - PM. 3550 Pli faillé et écrasé d'axe sensiblement Est-Ouest, venant chevaucher le pli séquanien précédent. Les structures sont ensuite des plis de rayon très court, assimilables à des failles (fig. 24). Le plus important, au PM. 3200, remonte les dolomies néo-jurassiques que la galerie recoupe sur 350 m.
- PM. 3550 - PM. 3900 Axe anticlinal, de faible rayon de courbure, comprenant des assises écrasées du Séquanien et du Kimmeridgien dolomitique. Au PM. 3900, synclinal écrasé le long d'un accident qui amène en surface les calcaires du Portlandien.
- PM. 3900 - PM. 4450 Zone à valeur anticlinale de grand rayon de courbure. La galerie se situe dans les assises du Séquanien, flanquées à l'amont et à l'aval par des retombées dolomitiques du Kimmeridgien. Ensemble très fracturé.
- PM. 4450 - PM. 4800 Zone du Puits de Rians. Compartiment effondré affecté par de nombreux accidents recoupés normalement. Les calcaires du Portlandien et les dolomies constituent les séries traversées. Altération très importante.
- PM. 4800 - PM. 5600 Nouvelle zone à valeur anticlinale affectée par un repli aux environs du PM. 5100. Ce repli ramène vers le haut les séries du Séquanien et du Kimmeridgien dolomitique ; il est accompagné d'une zone très fracturée et altérée sur 200 m environ (sondage 504).
- PM. 5600 - PM. 8750 La structure correspond à la retombée régulière des séries du Jurassique supérieur vers le bassin de l'Arc. De 5600 à 7200 m, un premier compartiment, limité par deux décrochements verticaux d'un rejet de 80 m environ, impose un avancement dans les séries du Séquanien sur 1300 m, puis sur 300 m dans les dolomies néo-jurassiques.
De 7200 à 7900 m, nouveau compartiment à pendage Sud limité par des décrochements. L'ouvrage franchit successivement 150 m de Séquanien calcaire, 300 m de dolomies et 450 m de Portlandien calcaire.
De 7900 à 8750 m, les calcaires du Portlandien s'infléchissent vers le bassin de l'Arc.
La galerie recoupe toute cette série, depuis les calcaires massifs de base jusqu'aux calcaires en bancs réguliers valanginiens (?).
- PM. 8750 - PM. 9100 Série fluvio-lacustre du bassin de l'Arc à pendage Sud. La galerie traverse successivement la base du Valdonnien, puis les calcaires en gros bancs sus-jacents. Un décrochement important, axé parallèlement à la galerie, affecte cette bordure.

FENÊTRE DES VA (Détail du chevauchement)

FIG. 22

-  ELUVIONS
-  ECAILLES DE BASE
-  EOCENE argile
-  EOCENE brèches
-  DANIEN grés
-  DANIEN calcaire . argile . marne
-  FAILLE
-  S = Sondage



P C : 310.00

Cotes du T. N

347

352

350

FENÊTRE DES VACONS (Détail du chevauchement)

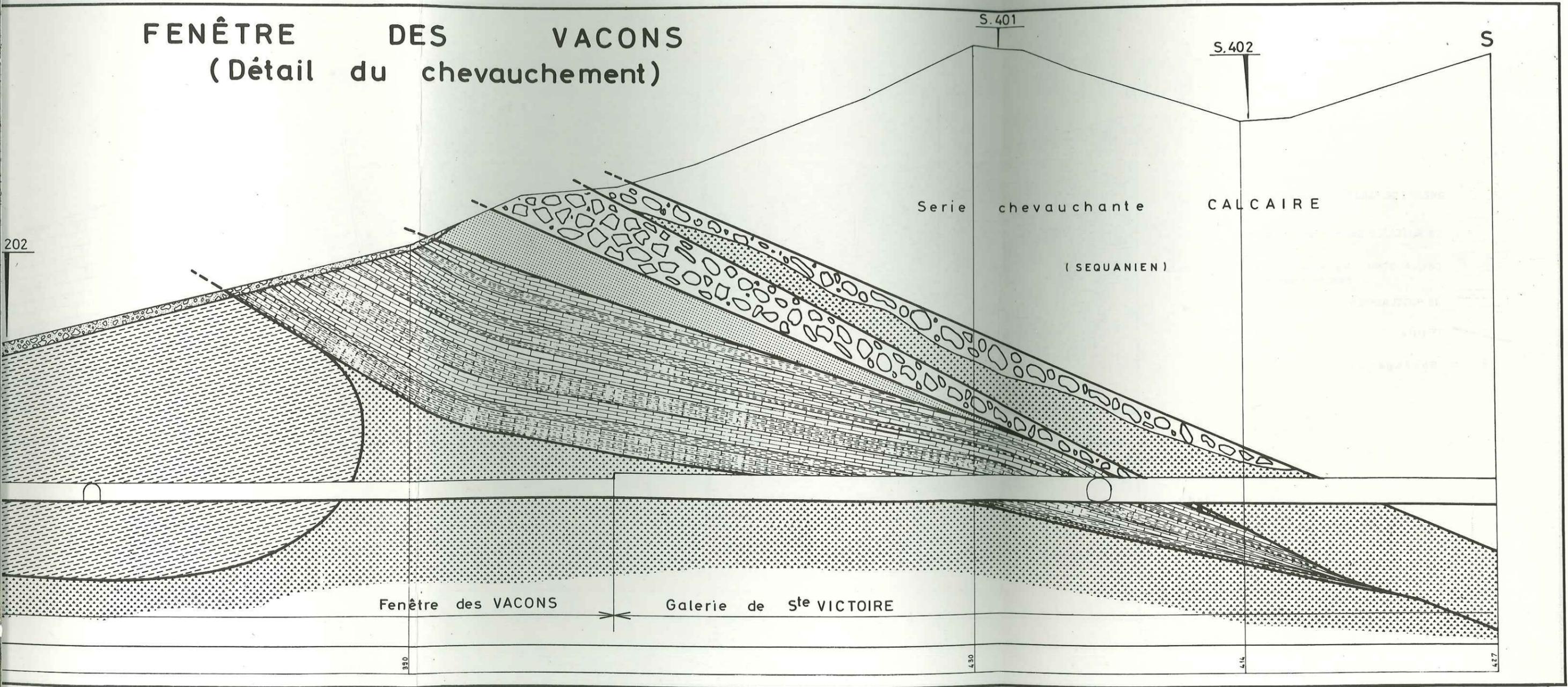
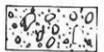
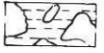
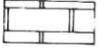
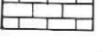
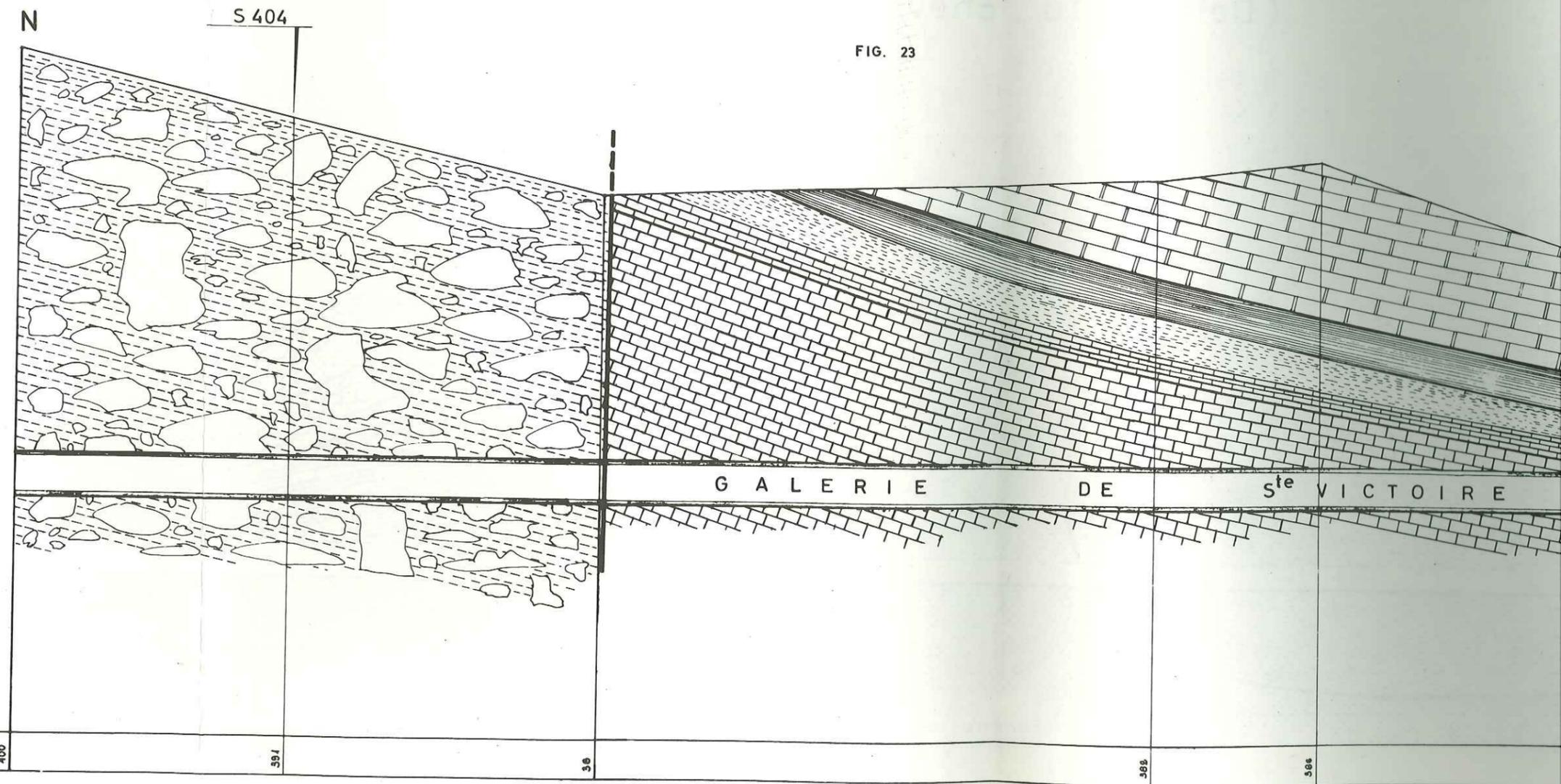


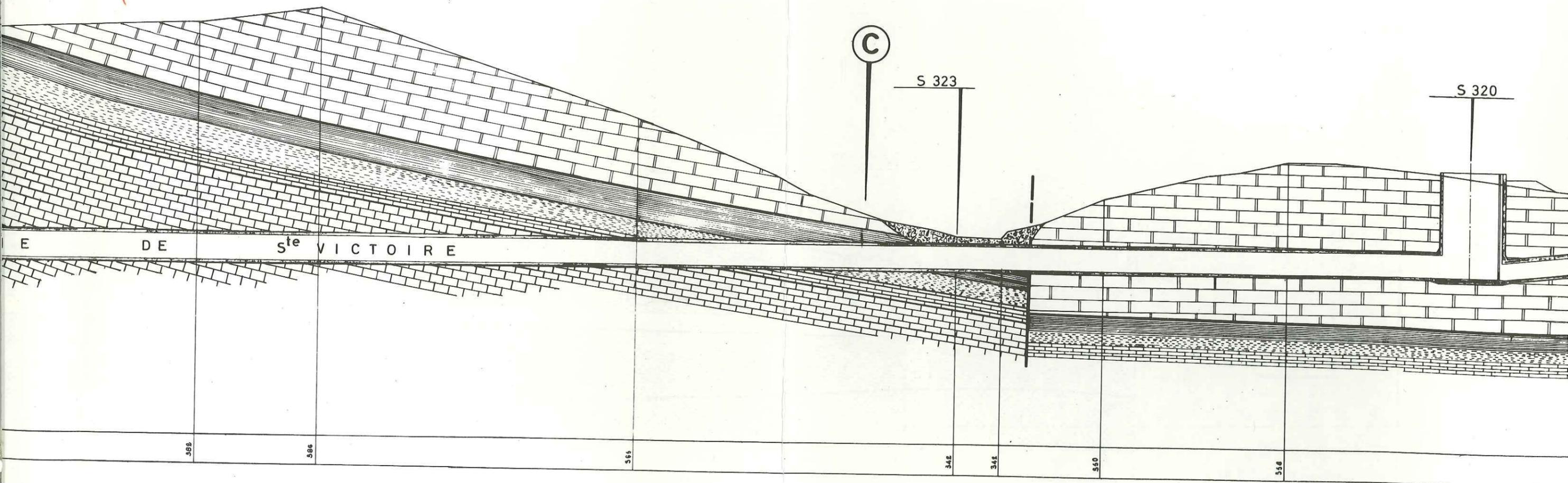
FIG. 23

-  ELUVIONS
-  BRECHE DE FAILLE A ELEMENTS FUVELIENS
-  C8 FUVELIEN Calcaire lacustre compact
-  C8a VALDONIEN Marnes versicolores grés non consolidés calcaire crayeux tendre
-  J8 PORTLANDIEN
-  Faille
-  S = Sondage



TÊTE AVAL

23



E DE Ste VICTOIRE

C

S 323

S 320

368

386

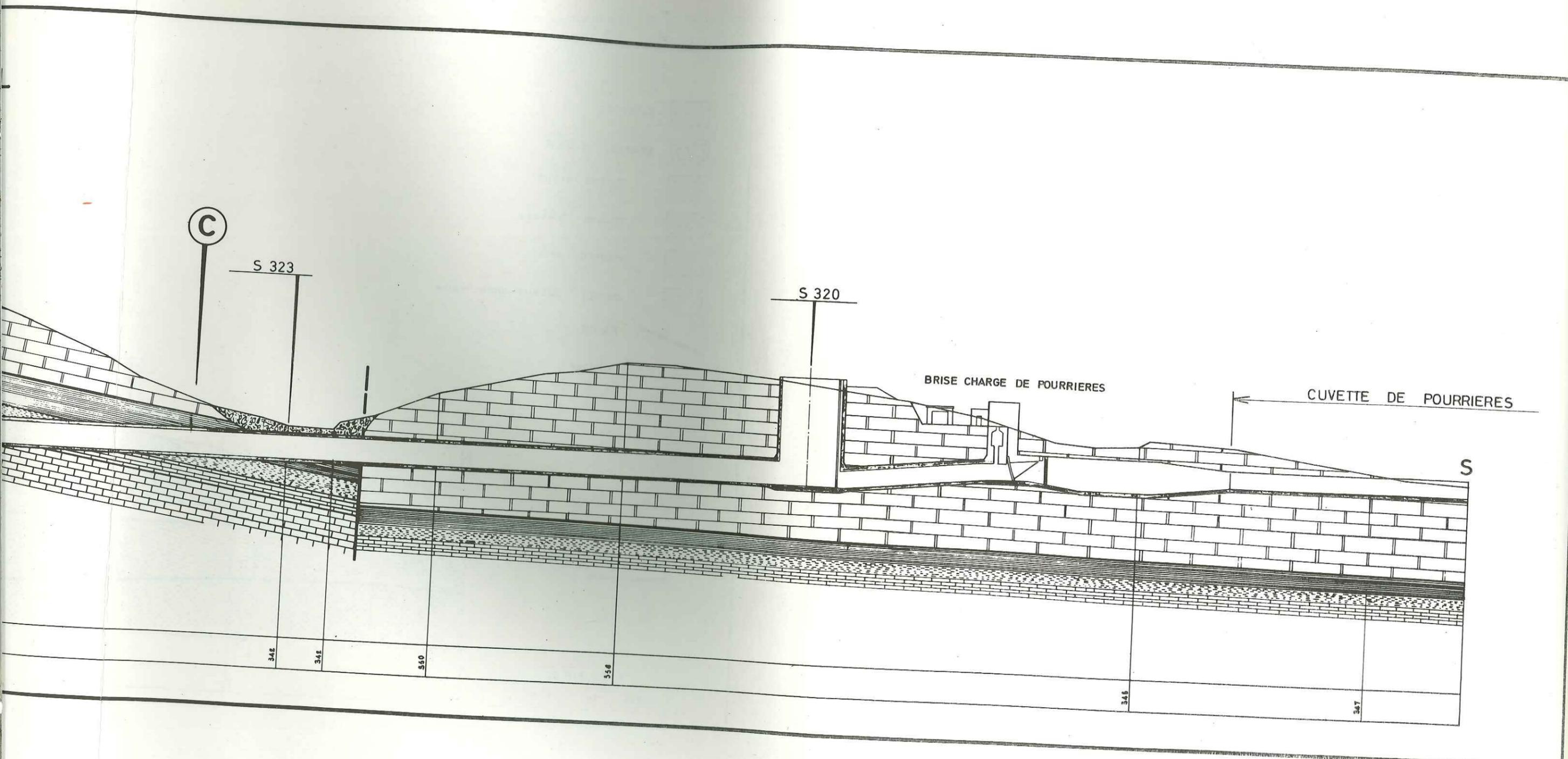
385

342

342

360

356



C

S 323

S 320

BRISE CHARGE DE POURRIERES

CUVETTE DE POURRIERES

S

342

343

340

344

345

347

2°) Avancement, Difficultés

- PM. 0 - PM. 200
Ce tronçon nécessite les mêmes précautions que celui de la traversée du synclinal éocène précédent : enfilage sur cintres à l'avancement. Les venues d'eau (charge mise en évidence par les piézomètres) amèneront en outre des difficultés au roulage et au marinage. La traversée du plan de chevauchement lui-même ne semble pas poser de problèmes particuliers, hormis la possibilité de rencontre de quelques poches marneuses ou sableuses dans les calcaires qui risqueront de provoquer des hors-profils et des débourrages.
- PM. 200 - PM. 1100
Les calcaires du Séquanien ne poseront pas de problème à l'avancement le long de cette portion. Le laminage est ici accompagné d'une recristallisation importante qu'attestent les résistivités élevées de ce matériau (2.000 ohm. m). Les soutènements pourront donc être réduits à des boulonnages de sécurité et plaques d'envol boulonnées, compte tenu de contraintes résiduelles possibles dans ces terrains qui entraîneront des écaillages.
- PM. 1100 - PM. 2500
Cet intervalle situé dans un secteur très tectonisé est composé de calcaires et dolomies laminés. Les résistivités décroissent légèrement (1.000 à 600 ohm. m) révélant un matériau plus argileux et hétérogène. Malgré l'absence d'eau, ces terrains nécessiteront certainement des soutènements sporadiques par cintres et plaques d'envol. Aux environs du PM. 2000 jusqu'au PM. 2500, l'aspect très broyé du sédiment, son altération sont révélés par le sondage 322 et les sondages électriques ($\rho = 500 \Omega. m$).
Pendant la perforation, on doit craindre des purges brusques dues à l'altération du matériau. Néanmoins, les fractions de tracé nécessitant un soutènement continu ne devraient pas excéder 50 % du mètre.
- PM. 2500 - PM. 3550
Zone à dominante calcaréo-dolomitique relativement tranquille. Les résistivités sont élevées et les zones saines y sont prépondérantes. Les soutènements seront peu importants et localisés aux environs du PM. 2500.
- PM. 3550 - PM. 3900
La traversée de la zone anticlinale, essentiellement constituée de calcaires et de dolomies très broyées et altérées, sera assujettie à des soutènements importants. Les sondages 321 et 505 nous révèlent un matériau fréquemment argileux et toujours finement fissuré.
Au PM. 3900 se termine le lot amont de la galerie.
L'étude complète nous permet de chiffrer à 1600 m la longueur de galerie nécessitant un soutènement.
- PM. 3900 - PM. 4450
Le lot aval débute dans les calcaires du Séquanien, altérés, mais peu fracturés. Cette zone se traversera avec les soutènements de sécurité habituels. Les résistivités sont assez faibles (1.000 à 3.000 ohm. m) et laissent présager un matériau à conforter dans les passages les plus argileux.
- PM. 4450 - PM. 4800
L'étude géophysique indique que ce secteur comprend 525 m de tracé où la résistivité est inférieure à 1.000 ohm. m et 250 m où la résistivité est supérieure à 1.000 ohm. m. Ce tronçon nécessitera des soutènements continus par cintres lourds. Il est à prévoir de nombreux débourrages de poches remplies d'argiles et sables divers (Crétacé supérieur injecté dans les fissures), mais toujours de faible cubage.

- PM. 4800 - PM. 5600

Cette tranche ne devrait pas poser de problèmes particuliers de soutènement ou de perforation. Seul l'intervalle de 200 m correspondant au passage du pli broyé nécessitera un soutènement important (sondage 504).

- PM. 5600 - PM. 8750

La retombée des séries du Jurassique supérieur vers le bassin de l'Arc s'effectuera sans problème. Les calcaires et les dolomies sont compacts, peu fracturés et les intercalations marneuses y sont inexistantes. Il n'y a donc pas à craindre de décollements de bancs. La karstification, telle que les sondages 500 et 8 permettent de l'estimer, est peu développée. Cependant, cette reconnaissance ponctuelle n'autorise pas à présumer l'importance de la karstification. L'étude de surface révélant une vaste superficie karstifiée, il est à prévoir au moins 5 % de tracé en zone altérée. Les longueurs en cavité karstique seront entièrement coffrées. L'entrée dans le synclinal de l'Arc, le long d'une zone faillée bourrée d'argile et de débris calcaires, posera des problèmes de tenue (le sondage 404 s'est constamment éboulé).

Les cent mètres de traversée dans le Valdonnien inférieur nécessiteront également des soutènements continus jusqu'à l'entrée dans les calcaires francs du Valdofuvélien où se terminera le lot aval.

Les venues d'eau dans la galerie de Sainte-Victoire seront très localisées et directement liées aux précipitations. Les piézomètres (S. 4, S. 7, S. 403) sont toujours secs. Les niveaux de nappe sont certainement très profonds et à une cote bien inférieure à celle du radier. Les deux zones où a été décelée une nappe d'eau en charge sont :

- le secteur du chevauchement du Sambuc où la transmissivité plus faible des marnes et brèches éocènes a créé un relèvement du niveau d'eau,
- le secteur du Puits de Rians qui correspond au passage d'un drain important du massif de Sainte-Victoire. Dans la partie Sud de la galerie, le Trou de la Gaule pouvant se mettre en charge, il y aura lieu de se prémunir contre les venues d'eau éventuelles des karsts rencontrés.

En général, les venues d'eau n'auront qu'un caractère accidentel et temporaire.

Pour le tracé global (de A à C), on peut donc prévoir des longueurs pour les trois types de profil adoptés en fonction du soutènement, à savoir :

- Profil I Protection contre les chutes isolées d'éléments de terrain de poids minime (pierres, purge naturelle) assurée par grillage ou gunitage.
- Profils II et III Protection contre les éboulements intéressant des masses importantes de terrain assurée par boulonnage de la voûte ou cintres métalliques légers. Les cintres métalliques lourds seront utilisés lorsque la pression exercée par le terrain excédera celle des cintres légers. Les enfilages de rails ou palplanches sur cintres font partie du profil III.

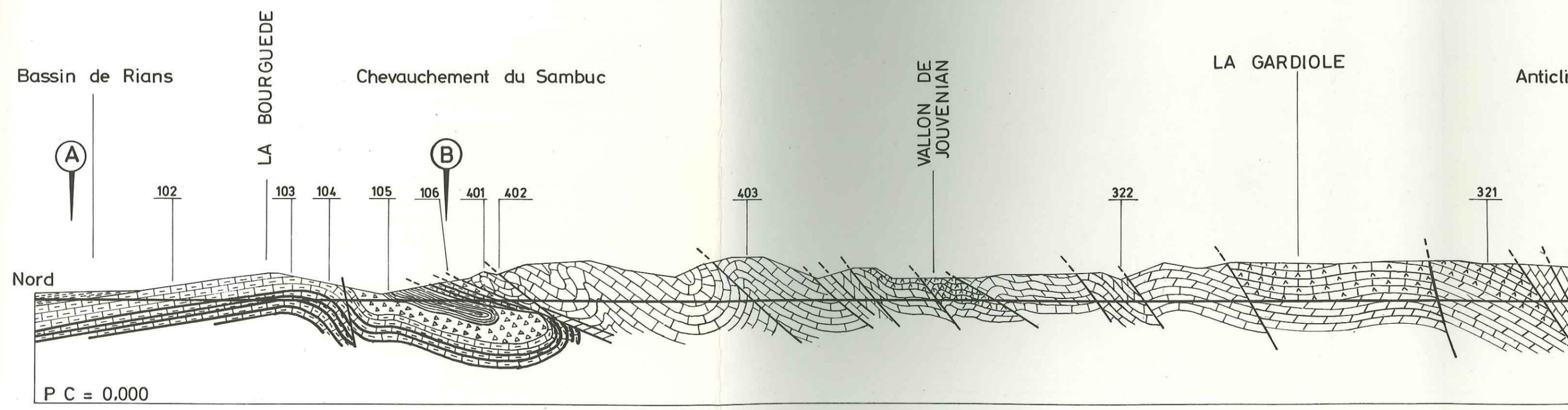
Les longueurs des différents profils sont :

	<u>Profil I</u>	<u>Profil II</u>	<u>Profil III</u>
- Tronçon de la Bourguède	480	225	460
- Galerie de Sainte-Victoire	4.620	4.033	340

GALERIE D

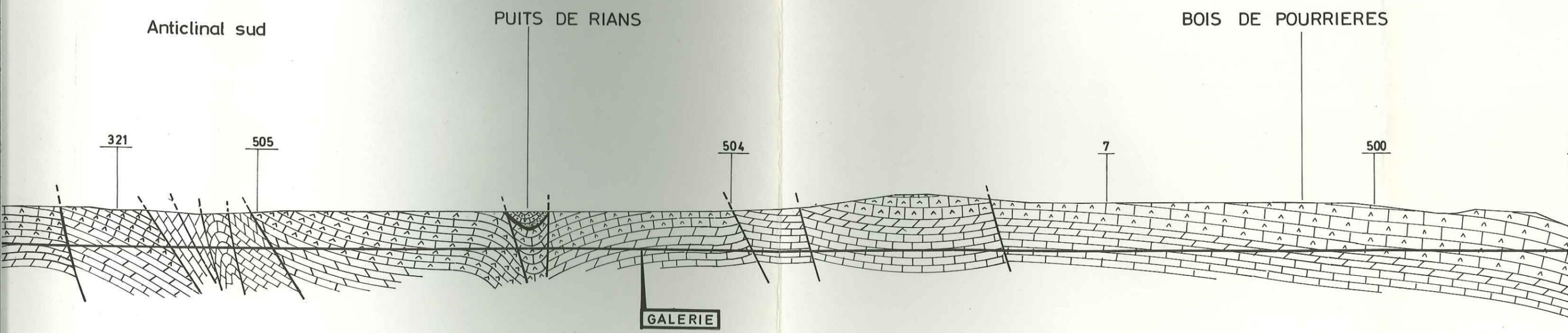
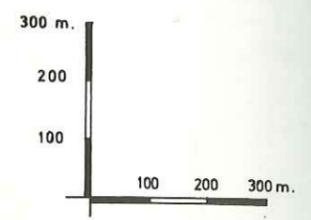
PROFIL

FIG. 24



R I E D E ^{ste} V I C T O I R E

PROFIL EN LONG GENERAL



LEGENDE

- en C8 abBauxite
- ^ ^
 ^ ^

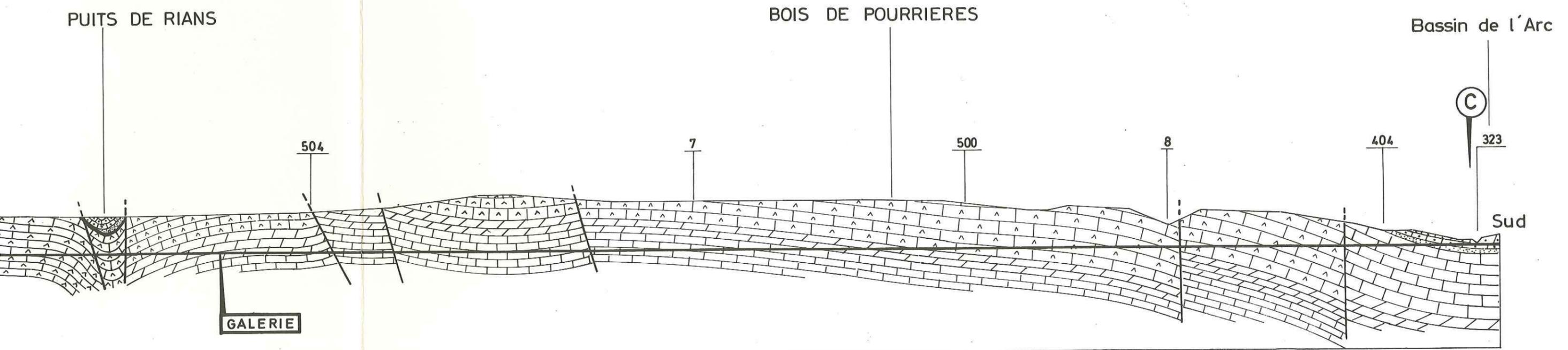
Portlandien J 8 7
- / /
 / /

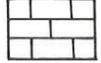
Dolomies néojurassiques J7.6d
- □
 □ □

Séquanien J 5 3
- Contact tectonique
- 504 : Sondage

VICTOIRE

GENERAL



J 8 7  Dolomies néojurassiques J7.6d  Séquanien J 5 3  Contact tectonique 504 : Sondage

c) Aménagements annexes

1°) Fenêtre des Vacons, Puits d'aérage

Le percement du tronçon de la Bourguède laisse prévoir de nombreuses difficultés ; afin de ne pas ralentir l'exécution de la galerie aval, moins préoccupante, il a été projeté de réaliser une attaque en fenêtre à partir du vallon situé au Sud de la colline de Bourguède. Cette fenêtre, longue de 210 m, forme un arc de cercle dirigé sensiblement Ouest-Est et rejoint le point B, départ de la galerie de Sainte-Victoire proprement dite.

Cette fenêtre est entièrement taillée dans les formations éocènes qui remplissent le vallon. Le départ de l'ouvrage, sous faible couverture, s'effectue dans les grès et argiles rouges du Thanétien. En l'absence d'eau, cette formation ne nécessite pas de soutènement à l'avancement ; il faudra néanmoins y prévoir un cintrage continu à chaque cycle car le matériau s'altère vite à l'humidité. L'entrée dans les brèches très tectonisées de l'unité chevauchée se fera aux environs du PM, 160. Ces formations nécessiteront un soutènement à l'avancement, car elles sont très décomposées et les circulations d'eau y sont certaines. Cette fenêtre, percée en section minimum de 3,50x3,00 m, sera donc constamment soutenue. La présence d'eau d'imbibition provoquera sans doute l'altération du radier et il est à prévoir de nombreuses difficultés de marirage.

Deux puits d'aérage : le premier à 2.200 m à l'aval du point B, le deuxième à 2.700 m à l'amont du point C, pourront éventuellement servir d'accès pendant ou après les travaux. Le premier puits correspond au sondage 322 ; il sera entièrement foré dans les dolomies très broyées et altérées du Jurassique supérieur et nécessitera un coffrage continu. Le deuxième, situé entre le Pain de Munition et la Dispute, en bordure de la route Pourrières-Rians, traversera les séries du Jurassique supérieur jusqu'au Séquanien, terrains d'excellente tenue.

2°) Brise-charge de Pourrières

Ce brise-charge, situé à la sortie de la galerie de Sainte-Victoire, est destiné à régler un plan d'eau constant au départ du canal de Pourrières-Pourcieux. La forte charge amont et le débit important (32 m³/s) ont imposé une régulation par vannes à vérins. L'ouvrage est prévu dans les calcaires en gros bancs du Valdonnien à pendage aval faible. Ces calcaires sont en moyenne peu épais et il était à craindre que la fondation ne descende jusqu'aux assises marno-gréseuses de la base du Valdonnien.

Un sondage, implanté au droit de la cheminée d'équilibre, a démontré que la base de celle-ci, qui représente le point le plus bas de l'ouvrage, était à 9 m au-dessus des marnes inférieures.

Le brise-charge sera donc entièrement taillé dans les calcaires du Valdonnien et il sera possible de réduire le volume de béton en utilisant le rocher pour y adosser les divers organes de régulation.

III - LE CANAL DE POURRIERES - POURCIEUX

1° - INTRODUCTION

a) Situation géographique. Caractéristiques et conditions d'implantation de l'ouvrage

Entre les galeries de Sainte-Victoire et de Saint-Maximin, le canal maître 2ème section comprend un canal de 6,930 m qui longe la bordure Nord et Nord-Est du bassin de l'Arc, entre les villages de Pourrières et de Pourcieux. Le tracé suit sensiblement la courbe de niveau 340 qui sépare les zones en déblais des zones en remblais. Il longe des terres agricoles sur la première moitié de son parcours, puis s'engage dans les assises plus dures bordant au Nord-Est le synclinal de l'Arc. Le canal recoupe de nombreux thalwegs affluant au bassin depuis les massifs jurassiques bordiers. Le plus important se situe au lieu dit "Vaunière". Ce vallon a une largeur de 160 m environ au niveau des berges du canal et une profondeur de 18 m. Compte tenu de zones d'emprunt voisines, la solution retenue pour ce franchissement est celle d'une digue en terre nécessitant 500,000 m³ de remblai compacté.

Au PK. 3,810, le canal est équipé d'un régulateur formé par deux vannes à niveau aval constant en parallèle, ainsi que d'une prise d'eau destinée à desservir la plaine de l'Arc.

A un kilomètre au Nord-Est de Pourcieux, le canal se termine par l'ouvrage partiteur avec la branche de Marseille Est (en projet) et par l'ouvrage de raccordement avec la galerie de Saint-Maximin (branche du Var 1ère section).

La pente piézométrique du canal de Pourrières-Pourcieux est de 0,23 m par kilomètre ; les caractéristiques en sont les suivantes :

- largeur du radier en m	3,0
- débit maximum en m ³ /s	31,0
- profondeur d'eau à débit maximum en m	2,80
- revanche en m	0,70.

Les ouvrages particuliers faisant partie de ce tracé sont, de l'amont vers l'aval :

- le brise-charge de Pourrières destiné à régler un plan d'eau constant au départ du canal,
- le régulateur de Vaunière commandé par l'aval et destiné à diminuer la hauteur d'eau dans le bief aval lorsque le débit est nul,
- les ovoïdes destinés à évacuer les débits de ruissellement des thalwegs recoupés et les ouvrages de franchissement parmi lesquels celui du vallon de Vaunière,
- à l'extrémité aval du canal, l'ouvrage destiné à répartir les eaux entre la branche du Var 1ère section (18 m³/s) et la branche de Marseille Est (13 m³/s).

b) Cadre géologique d'ensemble

Le bassin de l'Arc ou bassin d'Aix correspond à une vaste gouttière envahie tardivement par la transgression marine santonienne. Cette incursion marine ne peut être mise en évidence que sur le rebord méridional de cette gouttière. En effet, l'axe de sédimentation du synclinal a une tendance permanente à se déplacer vers le Nord, si bien que ce n'est qu'au Campanien (sous-étages Valdonnien et Fuvélien) que les formations

crétacées, déjà régressives, s'étendent au bord Nord du bassin. Ces faciès lagunaires et saumâtres sont surmontés par une épaisse série continentale allant du Maestrichtien à l'Eocène inclus.

L'ensemble de tous ces terrains dépasse 1.000 m d'épaisseur.

Les spasmes orogéniques du Bégudien et du Montien s'inscrivent dans la sédimentation sous forme de brèches (Cadenaux, Sainte-Victoire, Tholonet). L'Oligocène est discordant sur ces termes à Aix. Il s'agit encore d'une série lacustre (calcaires, argiles, gypses). Le Miocène marin discordant sur les termes précédents n'intéresse que la partie Sud-Ouest du bassin qui correspond au prolongement méridional du bras de mer périalpin. Les bordures du bassin de l'Arc sont constituées par des massifs complexes jurassiques et crétacés inférieurs. La bordure Sud-Ouest est chevauchée par le massif de la Nerthe et de l'Etoile. Au-delà, vers l'Est, le Regagnas, dôme anticlinal jurassique, précède une nouvelle structure chevauchante à base liasique, constituée par le massif de l'Olympe-Aurélien. Au niveau de cette dernière structure se ferme le bassin de l'Arc, lorsqu'aux environs de Pourcieux la bande jurassique d'Ollières rejoint le Défends de Saint-Maximin.

La bordure Nord, qui commence à apparaître sous le Miocène aux environs immédiats d'Aix, comprend essentiellement la montagne Sainte-Victoire et ses terminaisons orientales. Il s'agit grosso-modo d'une succession d'anticlinaux (Vauvenargues, Bimont) et de synclinaux (Croix de Provence, versant Sud) chevauchant les séries fluvio-lacustres crétacées supérieures et tertiaires du Cengle. Cet ensemble a subi postérieurement des effets de plissements hétéroaxiaux et de pénéplanation qui ont eu pour effet de compliquer sensiblement cette structure ("décrochements" Nord-Sud). L'ennoyage de la structure de Sainte-Victoire est progressif vers l'Est. Le bord du bassin n'est plus alors qu'une simple flexure peu accentuée aux environs de Pourrières, puis nettement marquée vers Pourcieux.

Seul ce secteur, situé à l'Est de Sainte-Victoire, nous intéresse car l'ouvrage le traverse.

2° - ETUDE GEOLOGIQUE REGIONALE

a) Stratigraphie

L'ouvrage traverse les séries crétacées supérieures du bassin de l'Arc, le long de la bordure septentrionale de celui-ci. Le tracé, orienté Est-Ouest, recoupe ces séries en direction.

On ne connaît pas d'affleurements équivalents au Santonien marin dans toute cette zone. Cet étage bien représenté (100 m de puissance) au Sud du bassin (région de Trets) s'amincit et disparaît en direction du Nord et de l'Est (39). Les premiers terrains qui surmontent les calcaires jurassiques et crétacés inférieurs (Pourrières) ou la bauxite (Pourcieux) sont datés du Campanien inférieur (sous-étage Valdonnien). Les successions de terrains de la bordure septentrionale du bassin de l'Arc sont bien connues depuis les études de L. COLLOT (19). Le Campanien (sous-étages locaux Valdonnien et Fuvélien) correspond à une série d'émersion (émersion soulignée par la disparition du Santonien marin). Surmontant une couche de bauxite siliceuse très sporadique, on relève les successions suivantes :

- Valdonnien

- formation de base comprenant des sables, microconglomérats à quartz roulés et teintés de rouge, bauxite remaniée formant quelquefois des conglomérats quartzeux durs (conglomérats de remaniement). Associées à cette formation, on trouve des marnes bariolées lie de vin, jaunes et blanches où les nodules plus calcaires et plus crayeux à contours flous prennent de l'importance vers le haut de la série. Les fossiles que l'on y rencontre sont : *Campylostylus galloprovincialis*, *Corbicula globosa* ;
- calcaires lacustres fins en bancs devenant plus épais, compacts, de couleur grise. Les intercalations marneuses sont rares et tout au plus centimétriques. Les bancs ont parfois un aspect bréchoïde et irrégulier. La pâte se charge également fréquemment de tâches noirâtres. On y trouve *Bulimus proboscideus*.

- Fuvélien

La série se charge en marne au-dessus des calcaires gris en gros bancs. On n'y trouve que très exceptionnellement des grès, à la différence du Bégudien. On relève de bas en haut :

- calcaires marneux très lités en plaquettes dures, quelquefois d'aspect gréseux (4 m),
- marnes grises avec bancs de calcaire roux peu épais (20 cm) et calcaires à débit en colonnettes (5 m),
- calcaires marneux gris blanchâtre en plaquettes (5 m),
- calcaires marneux blancs et marnes indurées à mélanopsis (5 m),
- marnes noires (2 m),
- calcaires légèrement gréseux (0,30 m),
- marnes beiges avec niveaux de calcaires blancs marneux (2 m),
- banc de grès calcaireux fin (0,30 m),
- marne beige (1,50 m),
- banc de calcaire jaune (0,50 m).

Ce niveau, bien repérable à sa couleur, est considéré comme la limite supérieure du Fuvélien. Il n'est cependant plus observable à l'Est de la ferme "Les Catalans". On retrouve sporadiquement des marnes peu indurées de la même couleur.

On trouve dans les bancs calcaires de base : *Corbicula concinna* et des débris de végétaux. (Nous y avons trouvé en outre quelques vertèbres de poissons disloquées).

- Succédant à ces séries d'émersion, une série détritique englobe le Maestrichtien (sous-étage Bégudien). Elle dénote par ses faciès une importante activité orogénique, surtout sensible au pied de la montagne Sainte-Victoire où se sont sédimentées de grandes épaisseurs de brèches. Cette activité est soulignée par la discordance de cet étage sur le précédent, surtout observable aux environs de Pourcieux (40).

Dans notre secteur, cet étage est entièrement marneux et gréseux. On y observe :

- marnes grises et rougeâtres (15 à 20 m) avec localement des passées de calcaires rognoneux,
- banc de grès à gros pisolithes (5 m),
- grès fins roses,
- marne rouge,
- alternance irrégulière de bancs de grès épais de 2 à 5 m et d'argiles gréseuses rouges.

- On passe insensiblement à l'épaisse série continentale danienne (sous-étage Rognacien).

Signalons que toutes ces séries sont affectées de variations latérales de faciès souvent très rapides. Dans les séries du Fuvélien, le pourcentage de marnes et d'argiles croît vers l'Est, tandis qu'on observe une augmentation du nombre des bancs gréseux au détriment des calcaires. Le Valdonnien et le Fuvélien disparaissent à l'Est de la "Bastide Blanche" sous la transgression bégudienne (40). Il ne s'interpose plus alors entre l'épaisse série argilo-gréseuse du Bégudien et la bauxite, reposant sur le Crétacé inférieur et le Portlandien calcaire, qu'une assise de remaniement de quelques mètres contenant des lentilles micro-conglomératiques, de la bauxite en fragments et des rognons de marno-calcaires rosés.

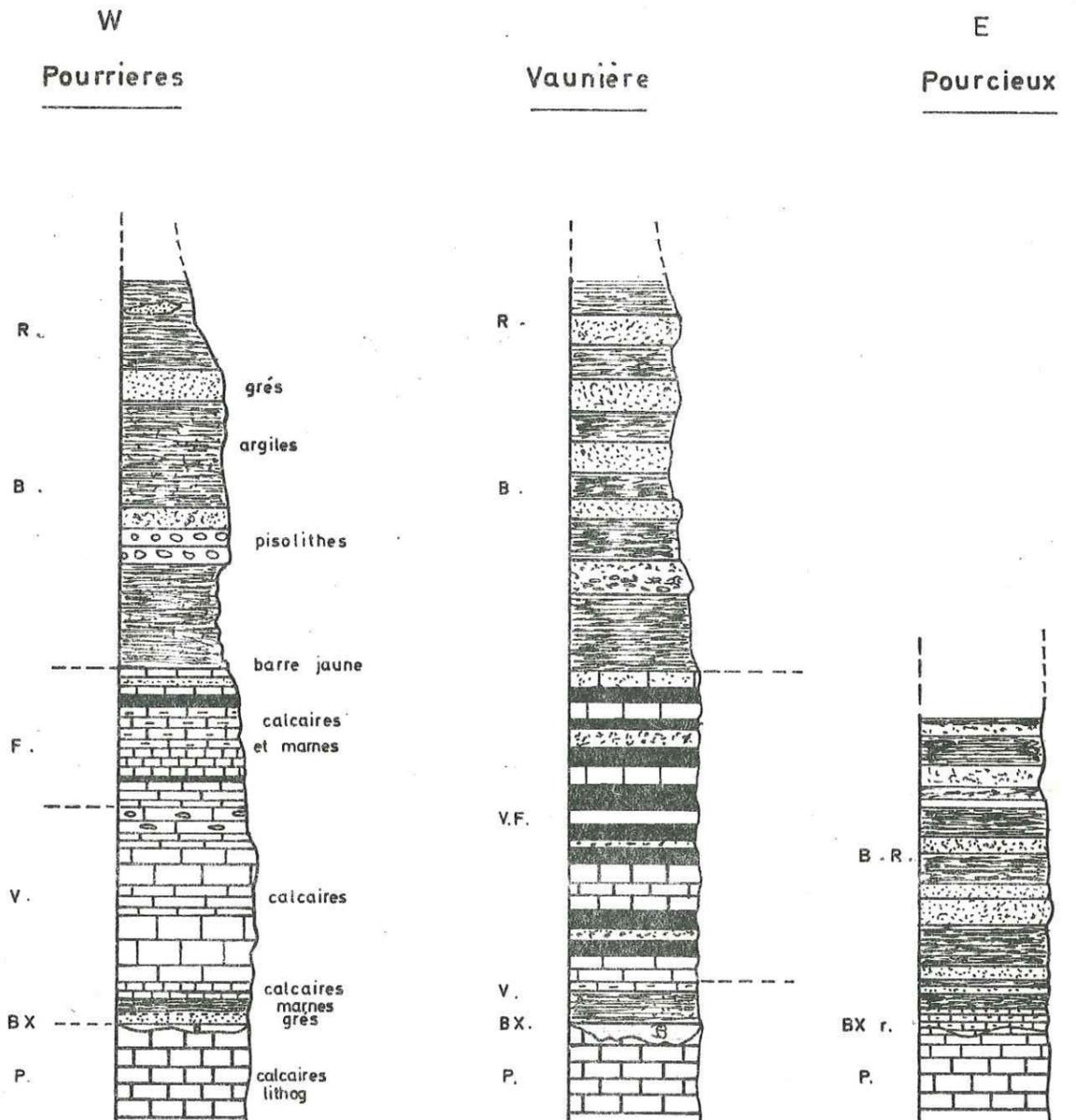
Les sondages miniers des sociétés Péchiney et Electro-Chimie-Ugine ont précisé cette discordance.

L'interprétation de ces sondages par MM. DURAND et MENNESSIER (40) a permis de démontrer qu'à l'Est du lieu dit "La Plaine" (au Nord de Pourcieux), le Bégudo-Rognacien était directement superposé au Portlandien par le simple intermédiaire d'une couche de remaniement.

STRATIGRAPHIE DE LA BORDURE NORD DU BASSIN DE L'ARC

fig. 25

Echelle = 1 / 2500 env.



R = Rognacien B = Bégudien F = Fuvélien V = Valdonnien BX = Bauxite
 BX r = Bauxite remaniée P = Portlandien

Il y a donc discordance stratigraphique entre le Bégudo-Rognacien et le Portlandien. La figure 25 schématise les principales variations de faciès des séries fluvio-lacustres de la bordure Nord du bassin de l'Arc.

b) Tectonique

Du point de vue tectonique, on peut distinguer deux secteurs dans la zone d'emprise de l'ouvrage :

- le premier secteur s'étend de Pourrières jusqu'à la ferme "Les Caunes" et correspond à une bordure de bassin régulière, affectée cependant d'une légère flexure. Quelques décrochements transversaux intéressent les séries fluvio-lacustres,
- le deuxième secteur débute à la ferme "Les Caunes" et se termine au Nord immédiat de Pourcieux. Au-delà d'un accident qui jalonne un vallon (200 m à l'Est des Caunes), les séries fluvio-lacustres se redressent brutalement pour former une flexure accentuée.

La bordure du bassin dans l'emprise de l'ouvrage et les zones au large ont fait l'objet d'un lever au 1/2.000e qui a fourni les résultats suivants :

- Première partie

Le tracé du canal débute au brise-charge de Pourrières, implanté dans les calcaires épais du Valdo-Fuvélien et se dirige vers l'Est en suivant la bordure du bassin, implanté dans ces mêmes terrains et dans les bancs de calcaires délitables alternés de marnes qui leur font suite. Les pendages des séries fluvio-lacustres et jurassiques sont tous dirigés vers le centre du bassin et ont une valeur de l'ordre de 15°. La flexuration de bordure n'est que peu accusée, les pendages passant de 10-15° dans le Jurassique et Valdonnien à 5° dans le Bégudien.

La discordance entre Bégudien et Fuvélien est également difficilement décelable à ce niveau par la seule observation des pendages. Néanmoins, l'activité orogénique maestrichtienne se manifeste au sein des séries par l'apparition de faciès très grossièrement détritiques (micro-conglomérats irréguliers) ; en outre, la base de la série bégudienne comporte des bancs à pisolithes qui sont l'indice d'une mobilité des zones de dépôts (A. LOMBARD "géologie sédimentaire").

Les nombreux vallons qui descendent de la bordure jurassique sont pour la plupart jalonnés par de petits décrochements verticaux sans grande amplitude ; du fait du pendage faible, ils n'entraînent pas de différences structurales importantes, mais de simples discontinuités dans l'allure des couches, encore accusées par l'érosion.

- Deuxième partie

A 200 m à l'Est de la ferme "Les Caunes", un vallon très échanuré, rempli par des éluvions, correspond à un pli synclinal très accusé, d'orientation axiale Nord 160, brusquement flexuré sur son bord Est (pendages subverticaux). Ce synclinal semble s'être marqué avant le dépôt du Bégudien.

En effet, les dépôts de cet étage sont beaucoup plus épais dans ce secteur : une sorte de cône de déjection a pris place à cet endroit dès le Bégudien. Par la suite, la flexuration a rejoué, disloquant les dépôts bégudiens, le vallon jouant toujours le rôle d'exutoire type déjection.

A l'Est de ce vallon, les séries présentent toujours des valeurs de pendages élevées (60°), dirigées vers le centre du bassin. Parallèlement, on observe des variations de faciès dans les assises de base du Fuvélien : quelques bancs de 50 cm à 1 m de calcaire marneux séparent des bancs de marnes plus épais. Ils ont remplacé les calcaires en bancs épais de Pourrières (Valdo-Fuvélien).

Tout le secteur situé entre le vallon Est des Caunes et le vallon dit de "Vaunière-Bastide Blanche" (400 m Est de Vaunière) est marqué par une flexure très accentuée (30° dans le Jurassique de la bordure Nord-Est).

70° dans la flexuration maximum des calcaires fuvéliens, 10° dans les assises les plus centrales du Bégudien). En outre, la discordance entre le Bégudien et le Valdo-Fuvélien devient observable à l'aval rive droite du vallon. Le vallon de Vaunière lui-même correspond à un effondrement vertical qui a fonctionné comme sillon paléogéographique (cf. étude par sondages) jusqu'à la période post-miocène (probablement Plio-Quaternaire). Au-delà du vallon de Vaunière vers l'Est, les assises du Valdo-Fuvélien perdent leur importance. Ils ne représentent plus qu'une quinzaine de mètres de bancs de calcaires intercalés de marnes qui s'insèrent entre une formation bauxitique puissante et les épaisses séries bégudo-rognaciennes. La flexuration accentuée affecte toutes les assises fluvio-lacustres, y compris le Bégudo-Rognacien.

A partir du PK. 1700, le tracé pénètre dans les assises crétacées inférieures plus litées (Valanginien, Hauterivien) où on rencontre de nombreuses exploitations anciennes de bauxite en poches. A partir de ce même PK, les assises valdo-fuvéliennes disparaissent sous la transgression du Bégudo-Rognacien. Il n'en subsiste plus qu'une formation de base grés-argileuse, d'aspect grumeleux, comportant des nodules bauxitiques et conglomératiques.

MM. DURAND et MENNESSIER situent dans cette zone la discordance maximum entre Bégudo-Rognacien et Valdo-Fuvélien, ce que nous avons pu confirmer.

c) Hydrogéologie

1°) Rôle hydrologique des différents terrains

Deux ensembles sédimentaires distincts forment la bordure du bassin :

- les terrains jurassiques et crétacés inférieurs formant le substratum
- les terrains crétacés et tertiaires sus-jacents qui constituent le bassin de l'Arc proprement dit.

- Les calcaires jurassiques et crétacés inférieurs du substratum forment un ensemble profondément altéré. Les circulations y sont du type karstique et le niveau de base y est très bas par rapport à la cote de bordure du bassin, au niveau où ils s'envoient sous les assises fluvio-lacustres. L'émissaire du Trou de la Gaule est une preuve de l'existence de ce réseau souterrain. S'il est à sec dans le cas général, il peut débiter épisodiquement (année 1935). Toutefois, même à la suite de violents orages ou pendant la saison pluvieuse, nous n'avons vu fonctionner cet émissaire.

- Les assises fluvio-lacustres du synclinal sont susceptibles d'être aquifères dans les horizons suivants :

- formation de base du Valdo-Fuvélien qui comprend des calcaires fissurés et des passées crayeuses,
- petits bancs calcaires décimétriques perforés du Fuvélien,
- bancs de grès du Dano-Bégudien.

Ces formations perméables sont séparées par des tranches marno-argileuses imperméables ou de transmissivité plus faible (argiles rouges légèrement sableuses du Bégudo-Rognacien).

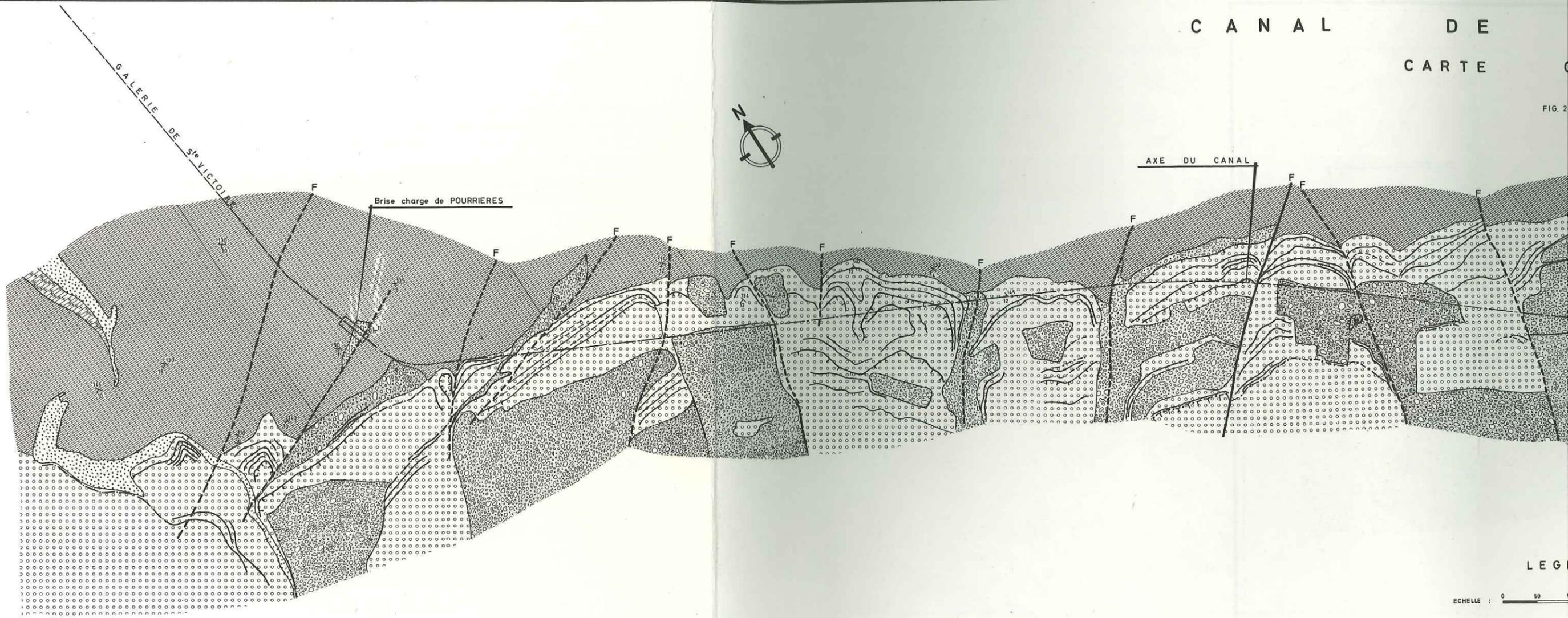
2°) Facteurs d'influence

Alimentation

L'alimentation du bassin de l'Arc se produit à partir des massifs calcaires bordiers qui constituent d'immenses réservoirs aquifères et directement par l'infiltration des précipitations dans les niveaux aquifères des assises fluvio-lacustres (lits calcaires et gréseux).

CANAL DE CARTE

FIG. 2



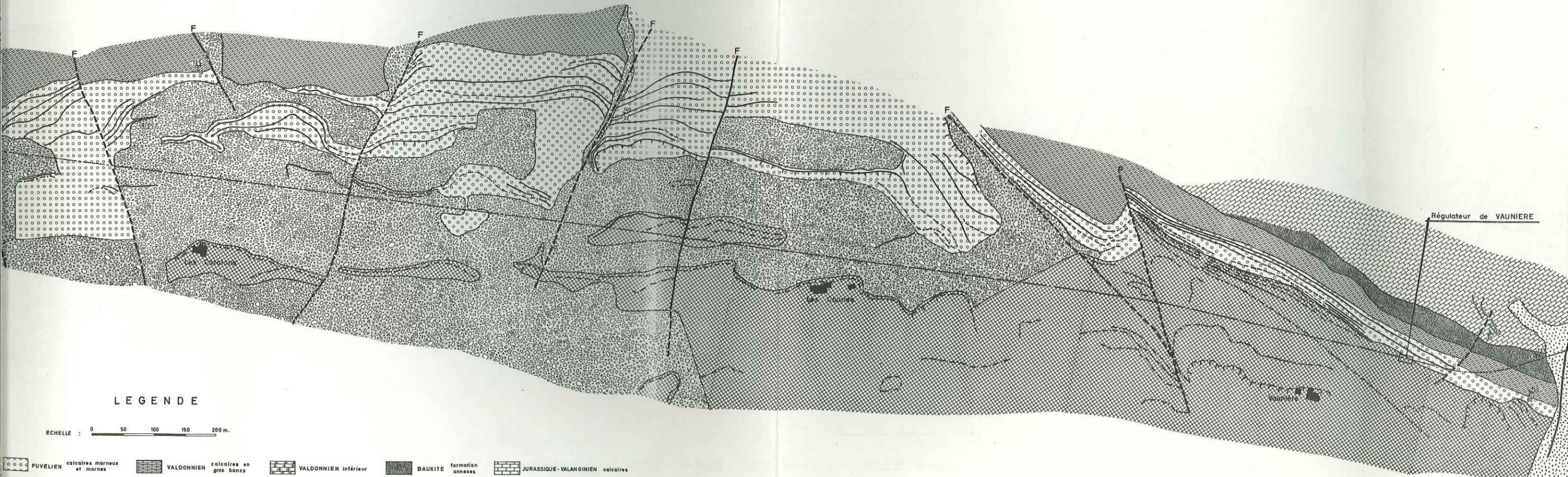
LEG

ECHELLE : 0 50

- ELUVIONS
- ALLUVIONS anciennes
- BEGUDIEN marnes et grès
- FUYELIEN calcaires marneux et marnes
- F : Faille
- Banc calcaire
- Banc de grès
- Pendage

DE POURRIERES
CARTE GEOLOGIQUE

FIG. 26

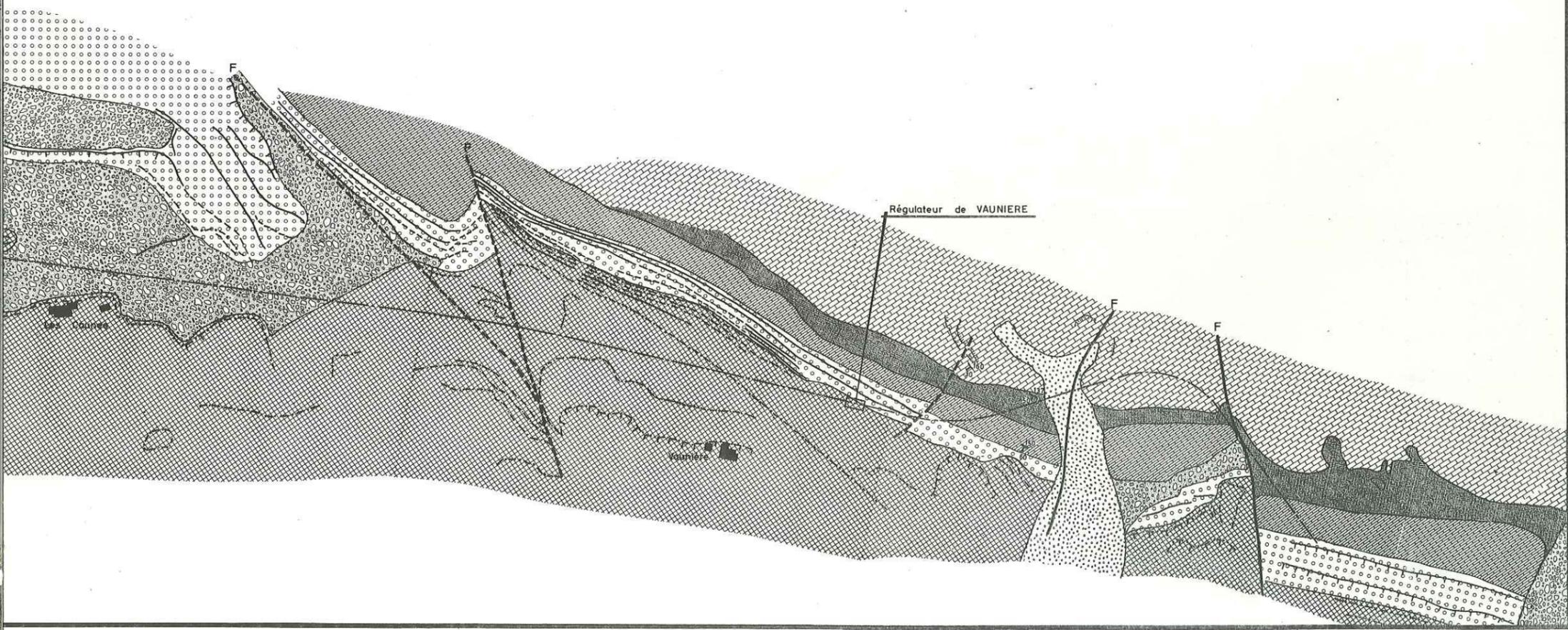


LEGENDE

ECHELLE : 0 50 100 150 200 m.

- FUYELIEN calcaires marneux et marnes
- VALDONNIEN calcaires en gros bancs
- VALDONNIEN inférieur
- BAUXITE formation annexes
- JURASSIQUE-VALANGINIEN calcaires

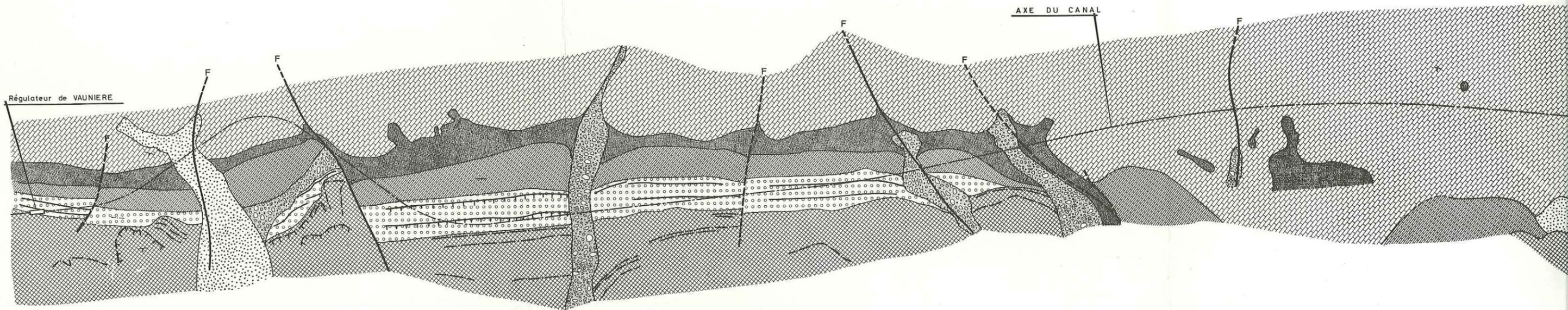
Pendage



C A N A L D E P O U R C I E U X

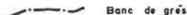
C A R T E G E O L O G I Q U E

FIG. 27



L E G E N D E

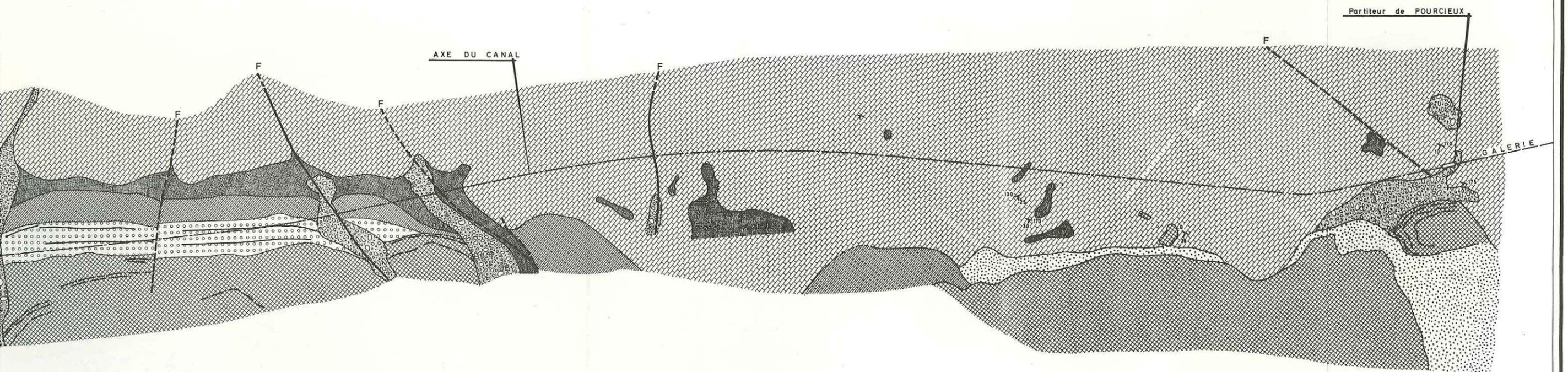
ECHELLE : 0 50 100 150 200 m

- | | | | | | | |
|--|---|--|---|---|--|---|
|  ELUVIONS |  ALLUVIONS anciennes |  BEGUDIEN
marnes et grès |  FUVELIEN
calcaires marneux et marnes |  VALDONNIEN
calcaires en gros bancs |  BAUXITE
formations anéennes |  JURASSIQUE-VALANGINIEN
calcaires |
| F : Faille |  : Banc calcaire |  : Banc de grès |  : Pendage | | | |

CANAL DE POURCIEUX

CARTE GEOLOGIQUE

FIG. 27



LEGENDE

ECHELLE : 0 50 100 150 200 m

- | | | | | | | | | | | | | | |
|---|----------|--|---------------------|--|-------------------------|--|--------------------------------------|--|------------------------------------|--|----------------------------|--|----------------------------------|
| | ELUVIONS | | ALLUVIONS anciennes | | BEGUDIEN marnes et grès | | FUYELIEN calcaires marneux et marnes | | VALDONNIEN calcaires en gros bancs | | BAUXITE formations arénées | | JURASSIQUE-VALANGINIEN calcaires |
| F | Faille | | Banc calcaire | | Banc de grès | | Pendage | | | | | | |

- A partir des massifs calcaires

Cette alimentation est très difficile à prouver et encore plus à estimer. Dans son rapport hydrogéologique sur "l'aliénation projetée des eaux du Puits de Rousset" (1956), M. L. TIVOLLE expliquait les débits importants enregistrés dans le puits de mine de l'Arc à Rousset (600 l/s environ) par la seule infiltration des précipitations dans les niveaux affleurants du Fuvélien et du Valdonnien, les assises argileuses du Bégudien interdisant la communication entre la nappe de surface (située dans les bancs de grès du Bégudo-Rognacien) et les séries aquifères du Valdo-Fuvélien.

Ce schéma, qui concerne la bordure Sud du bassin, est sans doute en partie valable pour la bordure Nord du bassin de l'Arc où la même disposition des couches s'observe, avec cependant des puissances très inférieures. Nous verrons cependant que la concordance des variations du niveau piézométrique dans la nappe de surface (Bégudien) et dans la nappe contenue dans les calcaires du Fuvélien implique un régime uniforme pour toute cette bordure, conséquence des nombreux accidents transversaux latéraux.

Les massifs calcaires alimenteraient donc latéralement, par l'intermédiaire de ces accidents, l'ensemble des séries aquifères du Crétacé supérieur. Le niveau dynamique de l'eau dans le massif jurassique de Pourrières se trouve actuellement au-dessous du mur du Valdonnien (Trou de la Gaule), mais, compte tenu de la flexure bordière, l'alimentation latérale est hautement probable.

- Infiltration directe des précipitations

La surface topographique de la bordure du bassin recoupe successivement tous les terrains fluvio-lacustres du Crétacé supérieur du Valdonnien au Bégudien qui présentent des pentes peu élevées (10° environ). La largeur d'affleurement de chaque assise, donc la surface d'impluvium, est par conséquent importante et il existe une alimentation à partir des infiltrations dans les bancs perméables gréseux et calcaires.

Ces deux modes d'alimentation n'entraînent cependant pas l'existence de grandes réserves d'eau sur cette bordure Nord. Un essai de pompage, effectué dans les calcaires du Fuvélien (ancien puits de mine inondé) au Nord de Pourrières, a démontré un débit de 12,41 cm³/s à la remontée, quantité négligeable en regard des débits enregistrés dans les mines de lignite de Gardanne situées à 600 m.

Les bancs de grès du Bégudien, souvent captifs dans les marnes, fournissent parfois de meilleurs résultats : un sondage minier implanté près de Pourcieux a débité 7 à 8 m³/h avec un artésianisme de 50 cm. Ces débits s'épuisent cependant rapidement.

Drainage

Le seul axe de drainage important en surface est constitué par la rivière de l'Arc dont le cours débute à l'Est de Pourcieux au pied du Mont Aurélien et se dirige vers l'Ouest en collectant les ruisseaux descendant de la bordure du bassin. Ces derniers sont des drains dont le fonctionnement a une périodicité centenaire. Le lit de l'Arc est toujours situé dans le Bégudien sub-horizontale dans son cours supérieur ; son lit est presque toujours limité par un plancher imperméable. L'Arc ne peut donc que constituer l'axe de drainage de la nappe superficielle, au centre du bassin.

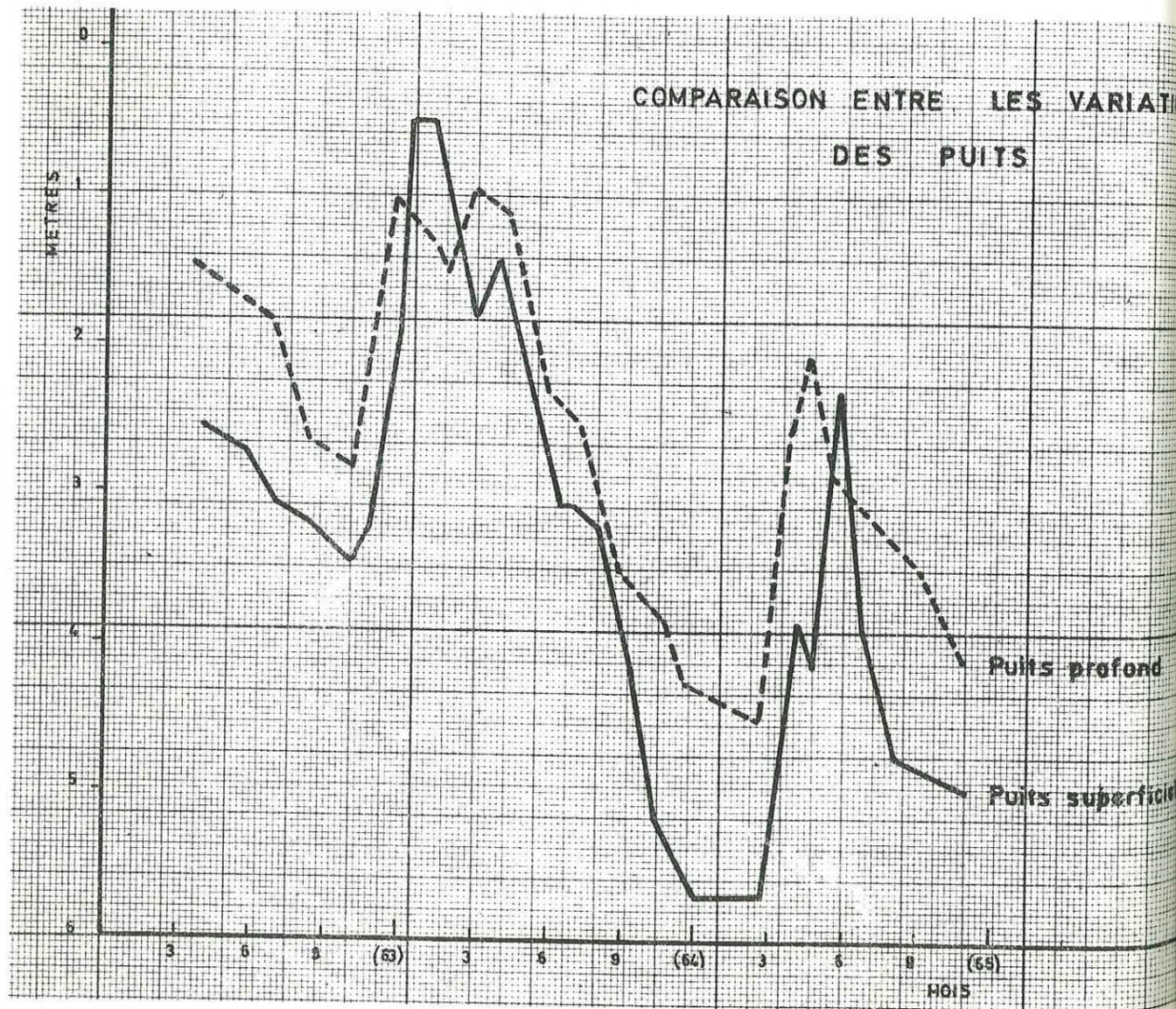
Les calcaires fuvéliens et valdonniens sont drainés par les exploitations minières de Gardanne-Trets (galerie à la mer) qui, bien que lointaines, doivent avoir une répercussion profonde sur l'allure de la nappe.

Univ. J. Fourier - O.S.U.G.
MAISON DES GEOSCIENCES
DOCUMENTATION
B.P. 53
F. 38041 GRENOBLE CEDEX
Tél. 04 76 63 54 27 - Fax 04 76 51 40 58
Mail : ptalour@ujf grenoble.fr

3°) Allure de la nappe

Un relevé systématique du niveau de l'eau dans 150 points de mesure en période d'étiage finissant (janvier 1968) nous a permis de démontrer l'existence d'une nappe très discontinue et de tracer l'allure du toit de cette nappe dans les zones les moins perturbées. Cette période a été choisie pour éviter l'influence de l'infiltration directe de l'eau dans les puits, toujours nuisible aux mesures dans ces terrains peu transmissifs. Compte tenu des accidents bordiers et de l'irrégularité de la sédimentation, il est peu probable qu'il existe une nappe régulière sur le bord Nord du bassin. Le report des diverses cotes de l'eau permet de constater que :

- les horizontales du toit se situent parallèlement au bord du bassin,
- les cotes du toit s'élèvent régulièrement lorsqu'on se rapproche des bords du bassin, ce qui correspond à un gonflement de la nappe au voisinage des zones d'alimentation (massif calcaire) et à un drainage vers l'Arc. Deux zones "d'ombre" correspondent à des puits secs. Ces zones sont en relation avec des accidents tectoniques qui perturbent le régime hydrogéologique du bord du bassin et assèchent les secteurs qui leur sont adjacents. Par ailleurs, une étude des variations de niveau de deux puits voisins, dont l'un est superficiel et traverse les séries du sommet du Fuvélien et l'autre traverse tout le Fuvélien, nous a permis de constater que la nappe superficielle et la nappe profonde étaient en relation.



4°) Calcul des ovoïdes transversaux

L'ouvrage recoupe normalement tous les vallons transversaux au bord du bassin. Ces vallons sont susceptibles de transiter des débits importants sous orages et le problème consiste à calculer les ovoïdes d'évacuation en fonction des bassins versants. Ce calcul utilise les abaques de M. CAQUOT adaptés au calcaire du massif et à la pluviométrie régionale. Ils tiennent compte de la surface du bassin versant en ha, de la pente moyenne du thalweg affectée d'un coefficient de forme et d'un coefficient de ruissellement. On obtient ainsi le débit en litres par seconde ou mètres cubes par seconde.

Les sections des ovoïdes, de type égoût, ont été dimensionnées comme suit :

- ovoïdes de 2,00x1,20 m pour le vallon de Vaunière (drain sous digue),
- ovoïdes de 1,30 m de hauteur pour les autres vallons.

3° - RECONNAISSANCE GENERALE

a) Etude géotechnique des matériaux rencontrés

Les reconnaissances géotechniques du canal de Pourrières-Pourcieux ont nécessité l'exécution de 35 sondages de reconnaissance rotatifs, en 86 mm de diamètre, 41 sondages à la tarière et 68 tranchées à la pelle.

Les divers terrains rencontrés ont été classés comme suit :

- 1 - Les calcaires en gros bancs (Valdonnien, Portlandien, Valanginien).
- 2 - La bauxite .
- 3 - Les marnes grises et les calcaires marneux friables en petits bancs (Fuvélien).
- 4 - Les marnes rouges et jaunes avec intercalations de bancs de grès (Bégudien).
- 5 - Les éluvions et alluvions, formations très diverses, le plus souvent parautochtones et peu épaisses.

- La formation 1 est entièrement rocheuse. Elle ne pose aucun problème de terrassement (explosif). Seules les éventuelles poches de dissolution remplies d'argiles diverses risqueront de provoquer des hors-profils au déroctage. Par contre, les déblais fournissent d'excellents enrochements pour la réalisation ou la protection des zones en remblais dans les fonds de thalweg (digue de Vaunière par exemple).

- La formation 2 constitue un matériau très compact assimilable à du rocher. Au seul examen des carottes, on peut estimer que la bauxite (très siliceuse et en partie remaniée) fournira de bons enrochements. Une très faible partie des terrassements intéresse malgré tout cette formation et les déblais y seront peu importants.

- Seules les formations 3, 4 et 5 présentent un intérêt en tant que "sols" pour les problèmes qu'elles posent dans les zones en déblais (les plus nombreuses) et dans les zones où leur utilisation en remblai s'impose.

- Formation 3 : marnes et calcaires marneux du Fuvélien

Le tableau de la figure 28 résume les résultats des essais effectués sur les échantillons prélevés dans cette formation.

Les limites de liquidité sont généralement élevées, ce qui concorde bien avec le caractère argileux de ce matériau. L'abaque de plasticité de Casagrande (IP : LL) permet de classer ces échantillons dans la zone de plasticité moyenne qui lui attribue une résistance à sec moyenne ou faible. Les densités élevées correspondent à

un matériau compact. Les teneurs en eau naturelles sont inférieures à la limite de retrait : il n'y a donc pas à craindre la formation de fissures. Les granulométries nous montrent toujours un matériau très fin : cette particularité condamne son utilisation en remblai car celle-ci nécessiterait la mise en place de filtres impossibles à réaliser pratiquement (filtres de granulométrie inférieure à 0,1 mm). Les résistances à la compression simple sont élevées et permettent de conclure à une consistance élevée du matériau. Les essais de compressibilité ont montré le caractère gonflant des marnes. Elles tassent cependant peu (0,050). Les valeurs de densité et de teneur en eau qui résultent des essais Proctor CBR, indiquent que ces formations sont naturellement très voisines des optimums définis par les essais. Enfin, la résistance au cisaillement est assez faible (R/2) et ce matériau aura tendance à glisser si l'on ne prend pas la précaution de lui donner des pentes de talus assez faibles.

1°) Valeur du matériau en déblais

Les portions de canal taillées dans ces formations seront aisément ripables avec les engins de terrassement classiques, compte tenu d'une résistance à la compression raisonnable. Les talus devront être protégés contre l'érosion par de la terre végétale ou par des enrochements en raison du caractère gonflant du matériau et des phénomènes de retrait toujours possibles si les talus sont exposés aux agents atmosphériques.

Le problème du glissement des bancs calcaires interstratifiés dans les marnes vers le fond de la fouille représente le seul écueil à craindre au terrassement. L'angle de talus (2/1) est en effet supérieur au pendage des bancs calcaires et ceux-ci, libres à leur aval, risquent de glisser entre les couches lubrifiantes de marnes. Ce glissement est difficile à évaluer car on connaît mal les forces de liaison naturelles entre les calcaires et les marnes. Ce risque peut a priori être sous-estimé étant donné que ces terrassements s'effectuent toujours au-dessus du niveau phréatique. En outre, un calcul simplifié de stabilité a montré qu'on pouvait compter sur un coefficient de sécurité important si les terrains sont secs.

2°) Valeur en remblais

Plusieurs caractéristiques de ces formations condamnent leur réutilisation en remblai :

- elles sont gonflantes et nécessitent donc une protection efficace par tapis végétal ou enrochement,
- elles ont une granulométrie très fine qui nécessite la mise en place de filtres complexes et difficilement réalisables,
- elles ont un indice de plasticité élevée qui entraîne une mise en place délicate.

3°) Valeur comme terrain de fondation

Ce matériau tassant très peu et possédant une bonne résistance à la compression simple est un terrain de fondation satisfaisant.

- Formation 4 : marnes rouges et jaunes avec intercalation de grès (Béguvien)

Le tableau de la figure 29 résume les résultats des essais.

Ces terrains présentent des limites de liquidité et des indices de plasticité moyennes, plus faibles que ceux de la formation 1. Cette différence est due à la plus grande proportion de sable dans ces sédiments, généralement très détritiques. L'abaque de plasticité de Casagrande nous permet de classer cette formation dans la zone de plasticité moyenne. La teneur en eau naturelle α est légèrement inférieure ou égale à la limite de retrait : il n'y a donc théoriquement pas à craindre de retrait dans ces terrains, ce qui peut n'être pas le cas pratiquement. Les densités élevées sont l'indice d'une bonne compacité. Les granulométries placent le terrain dans des fuseaux assez sableux. La latitude permise par la granulométrie (supérieure à 0,1 mm) montre qu'il est possible de trouver

Référence	Profondeur (m)	Nature	Matériau en place		Granulométrie	Limites d'Atterberg				Compression simple	Essai de compressibilité				Essai Proctor (moule) CBR		Essai triaxial		
			Dh	Ds		IP	LP	IP	LR		LR	LR	IP	LP	IP	LR	LR	LR	IP
S.13	1,10 à 1,60	Marne blanc vert altérée			Fin uniforme	4	22	22	22	18									
SI.1	1,50 à 1,80	Marnes grises et calcaires pulvérulents	57,8	23,6	0,1 mm	57,8	23,6	34,2	15,45										
SI.2	1,50 à 2,10	Calcaires marneux gris pulvérulents	31,8	18,7	Fin uniforme	31,8	18,7	13,7	21,4										
SI.12	1,20 à 2,50	Marne jaune	27,7	16,3	Continu	27,7	16,3	11,4	18,3	1,290									
TR.31	1,60	Marne grise compactée	42	19		42	19	24	20	11	0,261	0,024	1,6	1,81	16				
S.14	1,40 à 1,80	Marne jaune et blanche			Fin uniforme	50	29	21	16										
TR.37	2,00	Marne jaune et grise			Fin uniforme	42	22	20	13										
S.15	2,00	Marne grise compactée			Fin uniforme	42	22	20	13										
S.21		Marne verdâtre argileuse	2,11 2,13	1,96 1,95															

fig. 28

Référence	Profondeur (m)	Nature	Matériau en place			FORMATION N° 4				Essai de compressibilité			Essai Proctor (moule) CBR		Essai triaxial		
			Dh	Ds	α	LL	LP	IP	IR	$\frac{\Delta H}{H} \frac{R}{\%}$	eo	Cc	S _c bar	gonflement	Ds	α	σ
ST. 18	0,70 à 1,30	Marne jaune micacée				37,6	19,4	18,2	18,5					1,945	12,3		
ST. 20		Marne jaunâtre				39	18,9	20,1	17					1,94	13,5	0,400	24
TR. 46	2	Marne bigarrée plastique				33	18	15	15								
S. 16	1,25 à 1,65	Marne brune	2,13	1,83	16,7	44	16	28	11	10,7	2,9						
S. 16	2,45 à 2,95	Marne bigarrée sableuse	2,27	2,07	9,7	25	14	11	12	2,3	2,7						
TR. 47	1,40	Marne bariolée	2,2	1,95	13,8	38	19	19	14		0,210						
ST. 34	0,20 à 0,250	Marne jaune et rouge				35	13,9	21,1	18,85								

fig. 29

des filtres pour ce matériau. Les résistances à la compression simple sont élevées. Le gonflement (0,03) et le tassement (0,068) de ces terrains sont négligeables. Les teneurs en eau et les densités sont voisines de celles de l'optimum Proctor CBR.

1°) Valeur du matériau en déblais

Les caractéristiques de ce matériau laissent la possibilité à un terrassement normal (ripper) en dehors des zones franchement gréseuses qui nécessiteront l'explosif. Malgré la bonne résistance au cisaillement (cohésion), il est nécessaire de prévoir un talutage à 2 ou 3 pour 1. Les bancs de grès et le sable diffus dans les marnes assureront en outre un bon drainage naturel des talus. Parallèlement, il y aura peu de retrait et une protection réduite par terre végétale suffira à éviter l'érosion.

2°) Valeur du matériau en remblais

En général, cette formation pourra être utilisée en remblai ; on y constate en effet :

- une granulométrie moyenne (type sable) qui permet la mise en place de filtres,
- des risques de glissement tempérés si l'on se soumet à un talutage à 2 ou 3 pour 1. (Les talus des Ponts et Chaussées à 1 pou 1 ne tiennent pas dans ce matériau),
- un gonflement peu important qui permet de limiter les recharges de protection,
- une limite de liquidité satisfaisante pour la mise en place et des normes Proctor voisines de celles du matériau en place.

3°) Valeur comme terrain de fondation

Ces terrains ne tassent pratiquement pas et conviennent pour les fondations d'ouvrage.

- Formation 5 : terrains de couverture

Le tableau de la figure 30 résume les résultats des essais.

Ces terrains sont le terme soit de l'altération sur place des formations 3 et 4, soit du remplissage des vallons latéraux par les produits de lessivage des surfaces de 1 et 2, soit exceptionnellement du transport alluvial (bordure de l'Arc). Ils sont en général pelliculaires et n'excèdent pas deux mètres, sauf en de très rares portions du tracé (vallon de Vaunière). Ces matériaux possèdent toujours des courbes granulométriques étendues, preuves de leur hétérogénéité. Au demeurant, ils sont en moyenne assez fins. Les limites de plasticité ont des valeurs moyennes, tandis que les indices de plasticité sont faibles (inférieurs à 20). Les densités sont normalement faibles pour des terrains de couverture. L'essai de compressibilité a montré que dans l'ensemble ce matériau tassait et gonflait peu. Les teneurs en eau naturelles sont légèrement inférieures à celles définies par l'essai Proctor. Les quelques essais de compression simple montrent une consistance acceptable et une bonne cohésion.

1°) Valeur du matériau en remblais

Les caractéristiques de cette formation en font un bon matériau de remblai. Les zones d'emprunt prospectées par les sondages S. 19, S. 29, S. 53 ont fourni un matériau d'une bonne cohésion (1,800 kg/cm²). La mise en place nécessitera une humidification (Proctor) et les protections contre l'érosion pourront être limitées à un tapis végétal. En outre, le matériau tasse et gonfle peu.

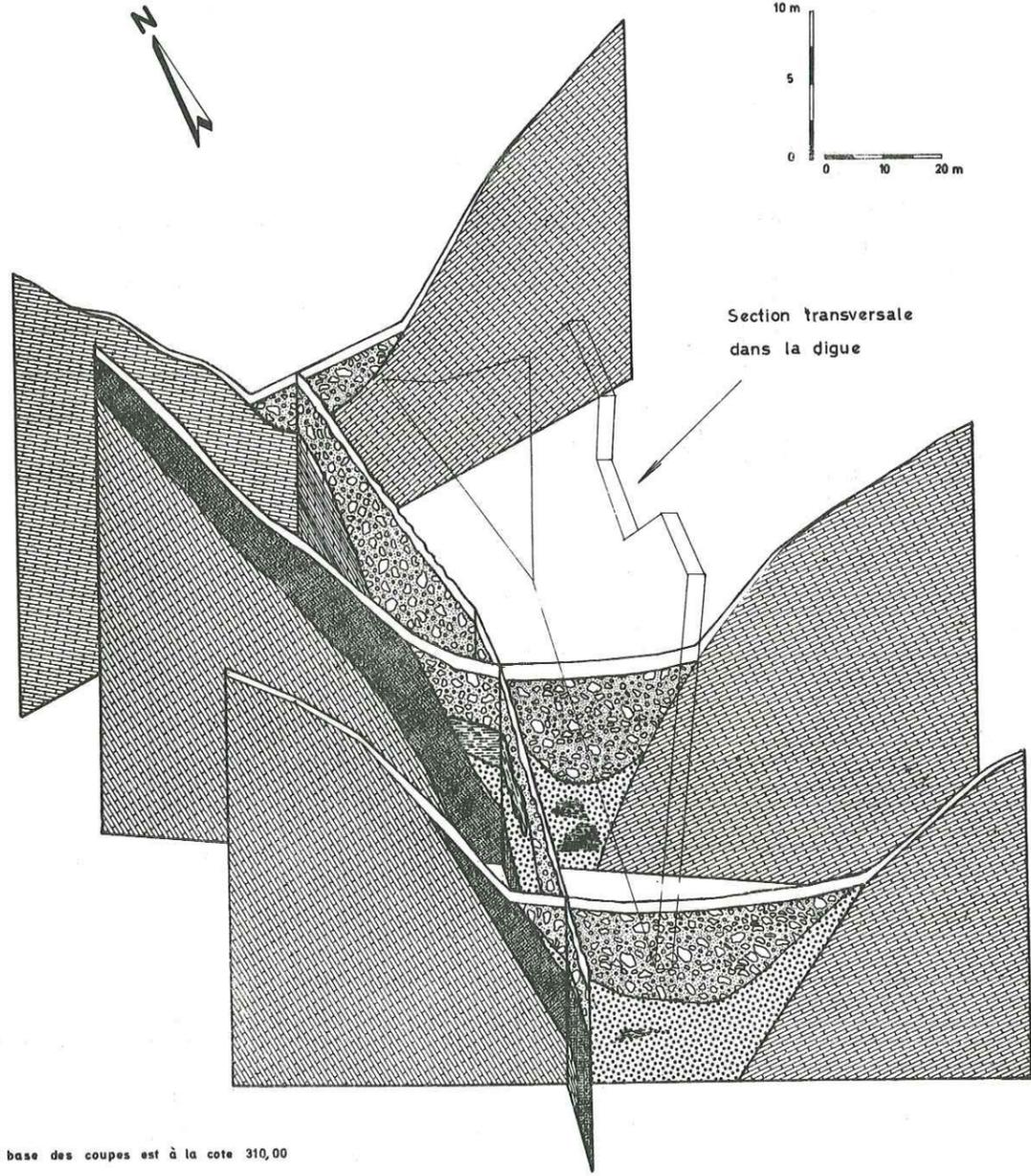
2°) Valeur du matériau comme terrain de fondation

Dans tous les cas, cette formation représente une assise convenable pour les ouvrages : le tassement est en effet peu important et la résistance à la compression simple élevée. Cependant, les tolérances de tassement étant très faibles, il sera nécessaire de compacter ce matériau.

VALLON DE VAUNIERE

PROFILS

fig. 31



La base des coupes est à la cote 310,00

- Altération de surface
- Lignite
- Alluvions récentes
- Alluvions anciennes
- Bauxite
- Portlandien

Référence	Profondeur (m)	Nomenclature	Matériau en place		Granulométrie	Limites d'Atterberg				Compression simple	Essai de compressibilité			Essai Proctor (moule)		Essai triaxial
			Dh	Ds		α%	LL	IP	IP		IR	IR	eo	Cc	Sc	
S.3	2,80 à 3,10	Limon marron	2,12	1,85	14,6	35	17	18	16		0,052	0,90	0,07			
S.3		Marne graveleuse				44	27	17	26							
S.5		Limon brun sableux				39	17	16	15							
S.1	0,70 à 1,90	Limon mateux rouge				33	17	16	15							
S.1	2,30 à 4,40	Limon marneux				35	20	15	16							

fig. 32

fig. 33

Référence	Profondeur (m)	Nature	Matériau en place			Granulo-métrie	Limites d'Atterberg				Compression simple	Essai de compressibilité			Essai Proctor (moule) CBH		Essai triaxial		
			Dh	Ds	α %		LL	LP	IP	LR		ΔH/H %	R _{leg}	eo	Cc	Sc _{bar}		Sc _{gorgement}	Ds
S.8	0,20 à 1,00	Limon graveleux				Zones	33	17	16	16									
S.8	1,00 à 1,70	Sable marneux					29	19	10	20									
S.8	2,60 à 3,00	Limon marneux					37	19	18	17									
S.8	3,00 à 3,37	Limon marno-graveleux					34	19	15	15									
S.8	5,00 à 5,50	Grès marneux micacé					23	15	8	14									
S.7	1,50 à 2,00	Eboulis limoneux					28	15	13	16									
S.7	8,70 à 10,00	Limon et éboulis					30	17	13	17									
S.9	0,50 à 2,10	Limon marneux					40	21	19	17									
S.9	2,40 à 4,00	Limon graveleux					38	21	17	19									
S.10		Limon graveleux					36	20	16	22									
S.19	1,70 à 2,10	Limon sableux	2,17	1,95	12		30	17	13	18	6								
S.29	2,00 à 2,04	Eboulis limoneux					26	15	11	13	9								
S.53	1,00 à 1,10	Limon sableux	2	1,8	14														

4° - ETUDE DU TRACE ET DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

a) Ouvrage principal : canal de Pourrières et de Pourcieux

Si l'on excepte les traversées de vallons et quelques rares longueurs de canal, le tracé est entièrement en déblais. En outre, il est presque constamment assis dans des terrains calcaires et marno-calcaires. Dans tous les cas, les terrains de couverture sont peu épais.

- Du PK. 0, 000 au PK. 0, 250

Les terrassements s'effectuent là dans les calcaires en gros bancs du Valdonnien. Ces calcaires sont sains, massifs, et tous les déblais, après décapage, pourront être réutilisés pour la réalisation des remblais immédiatement à l'aval. Les pendages mesurés sont de l'ordre de 12° et les talus au-dessus des berges pourront être taillés à 1/1, voire à 2/5, car il n'est pas à craindre de glissement des bancs vers la fouille en rive gauche.

- Du PK. 0, 250 au PK. 3, 300

Dans toute cette zone, sous les éluvions de surface, apparaîtront les formations marneuses et marno-calcaires en petits bancs du Fuvélien (formation 3). Le tracé recoupe toujours sensiblement ces couches en direction ; les variations dans les pendages et les directions sont introduites par des accidents qui jalonnent les vallons transversaux, mais ces changements sont toujours peu importants. Parmi les terrains excavés, seules seront retenues les formations meubles de surface, compte tenu des mauvaises qualités géotechniques de la formation 3. La question des glissements de bancs vers les fonds de fouille ne devra pas poser de problème majeur : il sera néanmoins nécessaire d'adoucir les talus jusqu'à 2 pour 1.

- Du PK. 3, 300 à l'ouvrage de régulation (PK. 3, 810)

A partir de la ferme "Les Caunes", le canal pénètre dans les formations 4, nettement grés-argileuses. Ces terrains sont engagés dans la brusque flexure qui prend naissance entre les fermes des Caunes et de Vaunière. Le tracé recoupe ainsi les terrains du Bégudien disloqués (sondage S. 16), puis affectés d'un fort pendage Sud. Cette configuration risque de présenter certains inconvénients au moment du terrassement à l'explosif, notamment des risques de hors-profils importants par décollements des bancs durs. Les pendages élevés augmentent par ailleurs le risque de glissement des bancs compétents pris entre les argiles et les marnes. Il faudra prévoir dans ce cas une purge des bancs instables ou leur épinglage.

- De l'ouvrage de régulation (PK. 3, 810) au ravin de Vaunière (versant Ouest)

Il s'agit du premier tronçon du canal de Pourcieux. L'ouvrage de régulation est implanté dans les assises très redressées qui font la transition entre Fuvélien et Bégudien. On prévoit une vidange dans un bassin situé en contrebas, qui trouverait ses assises dans les zones en déblais de la zone d'emprunt. Le tracé oblique vers l'Est et recoupe à nouveau la série Valdo-Fuvélienne réduite et à prédominance marneuse. Les bancs durs ont des pendages élevés (60°) et le tracé les recoupe en biais avant de pénétrer au sein de l'assise bauxitique extrêmement fissurée (blocs cubiques de 2 à 5 cm de côté). Les mêmes dispositions relatives à l'épinglage ou à la purge des bancs instables seront à prendre dans ce cas.

Les déblais durs provenant de cette zone pourront être réutilisés sous forme d'enrochement.

- Du ravin de Vaunière (versant Est) au PK. 0, 700

Le canal est assis dans les calcaires blancs compacts du Portlandien avant d'obliquer vers le Sud en longeant un affleurement de bauxite qui jalonne un important accident (Nord 30°). La bonne tenue des bancs calcaires et les pendages moins redressés (30 à 40°) réduisent les risques de glissement et les talus pourront être taillés à 1 pour 1 ou 2 pour 5. Les déblais obtenus seront réutilisés en enrochements. La bauxite très compacte sera un excellent terrain de fondation.

- Du PK. 0,700 au PK. 1,500

Le canal pénètre à nouveau dans les séries marno-calcaires du Fuvélien. Le changement de faciès est très sensible depuis Pourrières au sein de cet étage : des bancs calcaires épais de 50 cm à 1 m sont séparés par d'épaisses intercalations marno-argileuses. La puissance de l'ensemble est très réduite et on y observe déjà des bancs de grès annonçant le Bégudien. Le tracé suit les bancs sensiblement en direction et compte tenu de leur fort pendage (60 à 70°), il est à craindre de nombreuses difficultés au terrassement (hors-profil, glissements). La présence d'un pourcentage important de marnes, le caractère hétérogène de ce matériau condamneront sa réutilisation en remblai.

- Du PK. 1,500 au partiteur de Pourcieux

Le canal, principalement en profil mixte, est taillé dans les calcaires durs du Portlandien et Néocomien. Ces calcaires sont très karstiques et contiennent de nombreuses poches remplies de bauxite ou de produits d'altération divers. Il est donc à craindre de nombreux hors-profil au terrassement et des nettoyages soignés s'imposeront (un karst de 2,50 m a été traversé par le sondage S.28, à l'extrémité aval du canal).

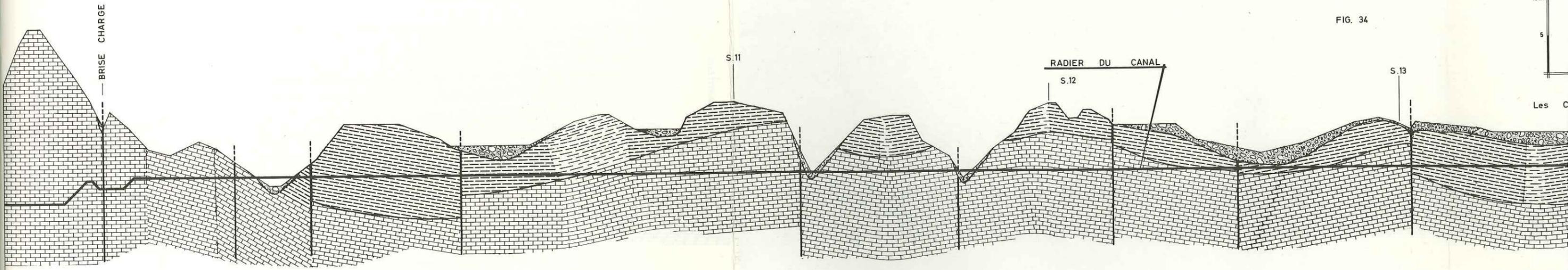
b) Digue de Vaunière

Nous avons vu dans l'étude géotechnique des sols de fondation et des zones d'emprunt les qualités que l'on pouvait attendre de ces matériaux.

L'ouvrage lui-même sera réalisé avec 500.000 m³ de remblai compacté. Etant donné que la digue formera barrage dans le vallon, il importe de protéger le talus amont contre l'action d'eaux de drainage éventuelles dans le vallon (crue centenaire). A cet effet, on prévoit la mise en place d'un pied de digue en enrochement sur ce talus amont. La pente générale des berges sera de 2,5 pour 1. Un ovoïde de 2,00x1,20 permettra d'assurer un écoulement normal dans le vallon au travers de la digue. En outre, sera mise en place une série de drains en pied pour éviter toute formation de glissement.

CANAL DE

FIG. 34



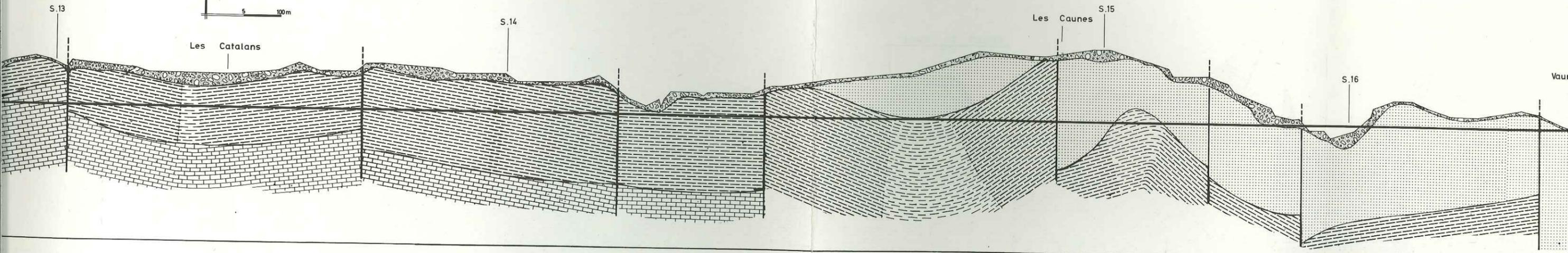
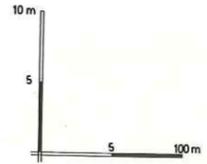
Plan. de comparaison 320 m

LEG

- ELUVIONS
- BEGUDIEN marnes et grès
- FUVELIEN calcaires marneux et marnes
- VAL...

DE POURRIERES

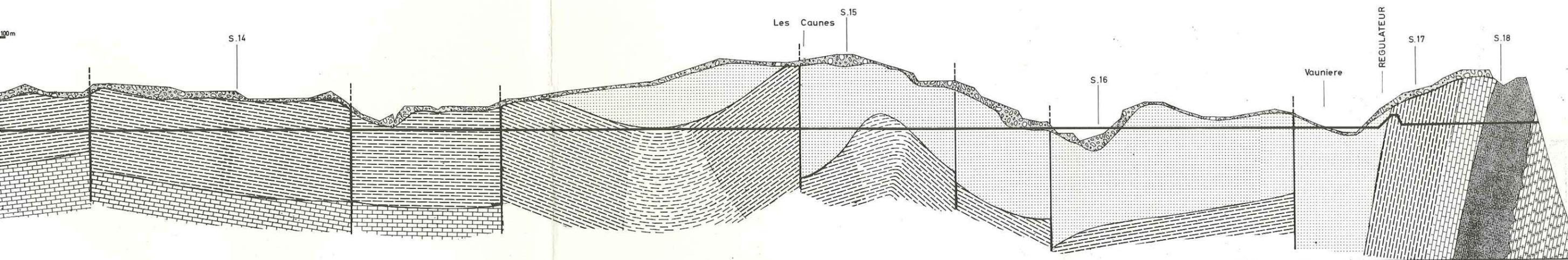
IG. 34



LEGENDE

- FUVÉLIEN calcaires marneux et marnes
- VALDONNIEN calcaire en gros bancs
- BAUXITE formation annexes
- JURASSIEN
- FAILLE

POURRIERES

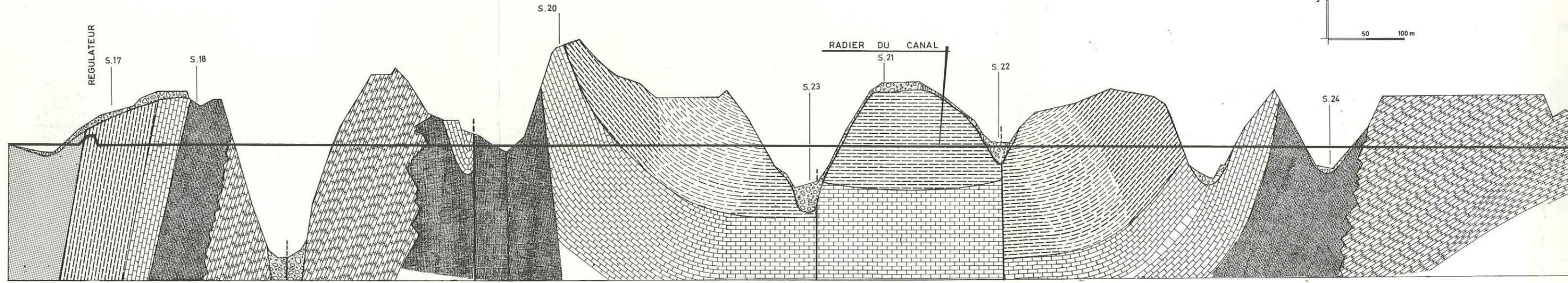
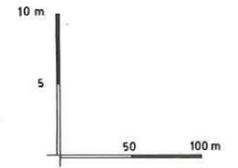


E

ire en bancs BAUXITE formation annexes JURASSIQUE FAILLE

CANAL DE POU

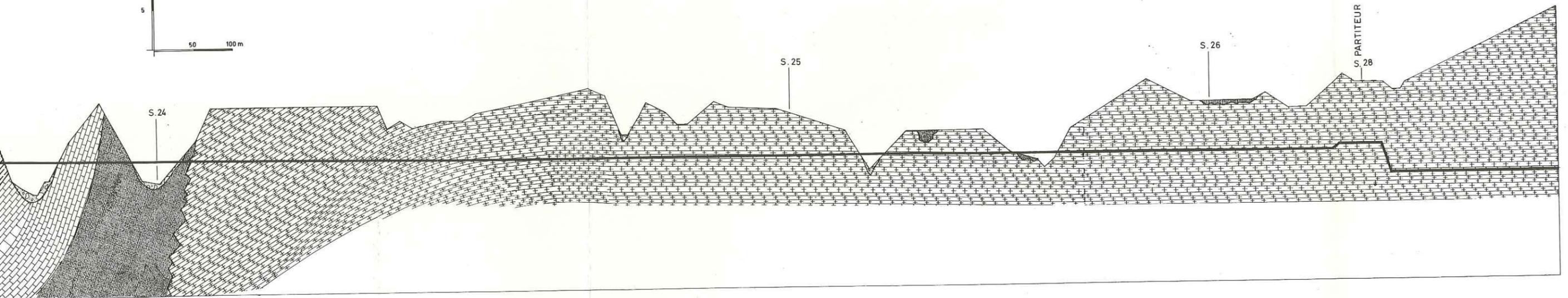
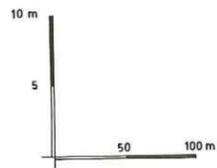
FIG. 35



LEGENDE

- ELUVIONS
- BEGUDIEN marnes et grès
- FUVELIEN calcaires marneux et marnes
- VALDONNIEN calcaire en gros bancs
- BAUXITE format annex

DE POURCIEUX



LEGENDE

- FUVÉLIEN calcaires marneux et marnes
- VALDONNIEN calcaire en gros bancs
- BAUXITE formation annexes
- JURASSIQUE
- FAILLE

IV - LA GALERIE DE SAINT - MAXIMIN

1° - INTRODUCTION

a) Situation géographique de l'ouvrage. Conditions d'implantation

La galerie de Saint-Maximin débute à l'aval de l'ouvrage de répartition des eaux de Pourcieux (partiteur entre la branche de Marseille Est et la branche du Var 1ère section). Elle traverse sur près de 2.500 m l'extrémité Sud-Est de la bande calcaire d'Ollières qui fait le lien entre le massif de Sainte-Victoire et le massif de l'Aurélien. Cette bande assure en outre la séparation entre le bassin de l'Arc qui coule en direction de l'Ouest et le bassin de l'Argens orienté vers l'Est qui occupe la partie septentrionale de la basse plaine de Saint-Maximin - Seillons-sur-Argens. Ce secteur, de topographie plate, est jalonné par la route nationale n° 7 et la voie ferrée Gardanne-Carnoules et sera traversé par l'autoroute A7.

Au PM, 2, 250, un premier point bas correspond au vallon de Verdagne, ruisseau intermittent issu du Défends de Saint-Maximin (618 m). La galerie pénètre ensuite sous ce dernier relief dont elle n'affecte que la partie Nord sur 2.700 m. Cette solution a été adoptée par suite de l'impossibilité de longer en canal le Nord des reliefs du Défends, occupé par une voie ferrée. A la terminaison Est du massif du Défends, la galerie oblique vers le Sud-Est après une courte attaque en fenêtre. Cette portion de tracé, implanté sous faible couverture dans une zone très bouleversée triasique, imposera en effet cette attaque. L'ouvrage se terminera à l'aval par le brisecarge de Saint-Maximin, ouvrage de dimensions réduites compte tenu de la faible charge amont (4, 15 m).

b) Esquisse sommaire de la géologie régionale

Le secteur au large de l'ouvrage englobe quatre grandes unités structurales :

- la terminaison orientale du massif de l'Olympe - Aurélien,
- la fermeture Sud-Est du bassin de l'Arc,
- le massif du Défends de Saint-Maximin,

Ces deux dernières unités sont poussées vers le Nord ou chevauchées par l'Aurélien.

- à l'Est, ces structures sont brusquement interrompues par la surrection du Trias qui occupe la vaste plaine de Rougiers - Saint-Maximin.

Ces unités s'inscrivent normalement dans la suite continue de structures qui jalonnent le bord méridional du bassin de l'Arc. D'Ouest en Est, on distingue en effet :

- la charne de la Nerthe-Etoile chevauchant de façon complexe le bassin de l'Arc ;
- le bombement anticlinal du Regaignas recouvert normalement au Nord par le Crétacé supérieur (Santonien marin puis fluvio-lacustre Campanien et Maestrichtien) ;
- au massif du Regaignas succède une déchirure tectonique qui conduit progressivement au chevauchement du bassin par les plis de l'Olympe, du Perdu et de l'Aurélien. Ce chevauchement s'accroît en allant vers l'Est pour atteindre un développement maximum à l'Aurélien où le flanc inverse n'existe plus qu'à l'état de lambeaux à la base du chevauchement. L'Aurélien entre en contact tectonique avec la bande jurassique d'Ollières au niveau de l'anticlinal du Défends de Saint-Maximin. Le synclinal de l'Arc vient se coincer entre ces deux unités au col du Défends. La cicatrice de contact se poursuit à l'Est accompagnée de nombreuses duplicatures qui résultent de l'affrontement de deux structures : l'Aurélien au Sud et le Défends de Saint-Maximin au Nord. On observe ainsi une juxtaposition de plis serrés et d'écaillés dans les séries de ces deux ensembles.

Toutes ces structures sont brusquement interrompues vers l'Est par un accident rectiligne (Nord 40° environ) au-delà duquel s'étend le Trias de la plaine de Rougiers - Saint-Maximin. La galerie se situe entièrement dans la bande d'Ollières, le Défends de Saint-Maximin et dans les duplicatures qui affectent celui-ci à l'Est. Elle ne pénètre dans le Trias que dans la dernière partie de son parcours, après avoir franchi normalement l'accident qui borde ce dernier à l'Ouest.

2° - ETUDE GEOLOGIQUE REGIONALE

a) Stratigraphie

A l'inverse du massif de Sainte-Victoire, les observations stratigraphiques sont ici facilitées par d'excellentes coupes naturelles. Le flanc Nord de l'Aurélien offre une série étirée mais complète allant du Lias inférieur au Séquanien qui forme la corniche sommitale. La série sus-jacente repose sur la face Sud de cette crête et permet de discerner les autres termes du Jurassique supérieur.

Les terrains du Crétacé supérieur sont analogues à ceux de la bordure Nord du bassin de l'Arc (cf. canal de Pourrières-Pourcieux). Ils se complètent à la base par la présence du Santonien marin réduit et littoral.

La succession lithologique et stratigraphique de ce massif est la suivante :

- Trias

On l'observe dans la plaine de Rougiers - Saint-Maximin où les affleurements sont très chaotiques et altérés. On distingue néanmoins dans cette masse incohérente des pointements qui correspondent aux calcaires gris vermiculés et aux dolomies du Muschelkalk. Les dépressions sont occupées par un mélange d'argiles bariolées, gypse et cargneules attribué au Keuper.

- Les séries du Jurassique sus-jacentes sont celles du Mont-Aurélien.

• Le Rhétien, présent à la base de la série infraliasique, n'est pas ici susceptible d'être individualisé dans la succession de calcaires dolomitiques et de dolomies de l'Hettangien. L'Infralias affleure en effet très bouleversé et replissé à la base de l'unité chevauchante de l'Aurélien. Les lits de marne vert pomme classiques de l'Hettangien sont présents à la base de la série ; ils isolent des bancs de 50 cm de calcaires dolomitiques cendrés en plaquettes (10 cm environ). Au-dessus, l'ensemble devient plus compact et les intercalations de marnes se font plus rares ; on y observe des calcaires clairs en plaquettes, des calcaires dolomitiques légèrement sableux en bancs de 2 à 5 m.

L'ensemble lithologique du Lias inférieur a une épaisseur de 150 m environ.

• Le Lias moyen et supérieur est représenté par une série de calcaires à patine rousse bien individualisés dans la morphologie, à la base du talus jurassique moyen et au-dessus de séries dolomitiques grisâtres. Cette formation est très détritique et comporte de nombreux niveaux du type "hard-ground". La base de cet ensemble comprend des calcaires sableux et noduleux très fossilifères (bancs d'huîtres). Le sommet est formé de calcaires bien lités roux en cassure, à surface irrégulière. Ils présentent un débit en plaquettes fréquent et les bancs sont toujours peu épais (50 cm maximum). La faune (Hildoceras bifrons, Rhynconella méridionalis) permet de rattacher en grande partie cet ensemble au Toarcien-Aalénien. L'épaisseur est de 50 m en moyenne.

• Jurassique moyen et supérieur

- Le Bajocien inférieur est représenté par quelques mètres de calcaires ferrugineux fossilifères qui font partie intégrante de l'ensemble liasique supérieur.

- Le Bathonien et le Bajocien supérieur constituent par contre une masse importante de près de 200 m qui forme un talus dans la morphologie de l'Aurélien. Les niveaux inférieurs sont représentés par une alternance régulière de minces bancs marneux et marno-calcaires à débit en "pavés". On y trouve : Cancellophycus, Parkinsonia, Lytoceras tripartitum. Au-dessus, un banc calcaire épais d'une dizaine de mètres existe sporadiquement.

- Viennent ensuite des calcaires bien lités séparés par de minces intercalations mameuses. Dans le paysage, ce niveau, bien que très calcaire, ne forme jamais corniche, mais seulement un très léger changement de pente. Dans la cartographie, ils sont bloqués dans la série marneuse bien que, au point de vue génie civil, leurs caractéristiques soient plus proches du Séquanien sus-jacent. En effet, le passage de calcaires marneux de la base aux calcaires esquilleux du sommet est très progressif et ne peut être fixé nettement. Cet ensemble représente une épaisseur de 70 m environ et la faune (Macrocephalites macrocephalus) le rattache au Callovien. Il y a lacune de l'Oxfordien, témoignée par des surfaces ferrugineuses.

- Le Séquanien correspond à une barre de calcaire sublithographique de couleur crème en bancs massifs. Il n'y a aucun délit marneux dans cet ensemble de faible puissance (50 m environ). Les affleurements de Séquanien constituent la falaise sommitale de l'Aurélien et la voûte de l'anticlinal du Défends de Saint-Maximin.

- On attribue au Kimmeridgien les dolomies sableuses qui surmontent le Séquanien et se situent sous les calcaires du Portlandien. La série jurassique se termine par une succession de bancs réguliers de calcaires sublithographiques fort semblables à ceux du Séquanien. Le seul critère d'attribution de cette formation au Portlandien est sa position par rapport aux dolomies. Dans la zone d'emprise de l'ouvrage (bande d'Ollières, Défends de Saint-Maximin), les affleurements du Portlandien se rattachent plutôt aux faciès de la Sainte-Victoire. Il s'agit de calcaires sublithographiques blancs en bancs épais, très souvent dolomités secondairement à la suite de fortes contraintes dont témoigne la bréchification de ces séries. Dans les carrières de Saint-Maximin, ce sédiment n'est plus formé que par une pâte dolomitique englobant des grains de calcite sub-sphéroïdaux.

Le Portlandien apparaît également à la base du chevauchement de l'Aurélien sous forme de lambeaux arrachés au flanc inverse laminé. Il s'agit là de lentilles de brèches tectoniques à éléments de calcaire blanc jaune ou rosé, localement dolomitique. Les fissures sont cimentées par de la calcite ou de l'argile rouge. Toutes ces lentilles ont été autrefois exploitées comme carrières de marbre.

• Le bauxite est connue sous forme d'affleurements dispersés dans tout le massif de l'Aurélien. Elle repose sur le Jurassique supérieur (Portlandien).

• Les séries du Crétacé supérieur débutent ici au Santonien qui apparaît sous forme de lambeaux au front du chevauchement de l'Aurélien ou dans les synclinaux orientaux de Berne et du Reçours. Il comprend un ensemble très réduit de calcaires détritiques, grès et argiles. La réduction d'épaisseur vers l'Est et la disparition rapide du Santonien à la verticale de Pourcieux (sondage) vers le Nord ont été mis en évidence par J. P. DURAND et G. MENNESSIER (40) et par J. P. DURAND et G. GUIEU (39).

- Le Campanien (étages locaux Valdonnien et Fuvélien) est identique à celui de la bordure Nord du bassin de l'Arc. Mais les affleurements observables sont toujours impliqués dans des discontinuités tectoniques difficiles à décrire. On retrouve néanmoins :

- Valdonnien : argiles et grès, calcaires marneux blanchâtres et noduleux
- Fuvélien : calcaires noduleux avec niveaux marneux.

L'ensemble Valdo-Fuvélien représente moins de 150 m d'épaisseur à la verticale de Pourcieux (sondage minier : J. P. DURAND et G. MENNESSIER), ce qui traduit une nette réduction vers l'Est du Campanien fluvio-lacustre.

- L'ensemble Bégudien-Rognacien (série compréhensive d'argiles rouges et de grès) est, par contre, très épais dans cette zone puisqu'il dépasse 300 m (39). La séparation entre Bégudien et Rognacien n'a pu être faite au niveau de Pourcieux en l'absence de critère stratigraphique valable. J. P. DURAND et G. GUIEU estiment cependant que le sommet de cette formation est rognacien (39).

- Les formations post-crétacées sont continentales et difficiles à mettre en évidence. C. CORNET a décrit de nombreux dépôts fluvio-deltaïques vindoboniens sur le Trias de Saint-Maximin - Rougiers. Nous les citerons pour mémoire comme preuve de la longue exposition continentale de cette bande triasique, car l'incidence de ces dépôts est nulle sous l'angle des travaux. Ces affleurements, rattachés au Vindobonien, sont éparpillés sur le Trias entre Rougiers et Saint-Maximin : ils comprennent essentiellement des galets de quartz de taille variable (quelques millimètres à quelques centimètres), des blocs de brèches à éléments triasiques et jurassiques, des sables et des nodules limoniteux.

Nous avons en outre observé au Sud immédiat de Saint-Maximin, dans le vallon qui longe la route de Marseille, des brèches à éléments calcaires jurassiques et à ciment argilo-sableux qui semblent correspondre à des exutoires torrentiels issus de l'Aurélien, d'âge plio-quadernaire. En outre, les forages de reconnaissance du canal de Saint-Maximin - Rougiers ont mis en évidence, dans les poches de dissolution du Trias, des remplissages silteux gris varvés, parfaitement horizontaux, qui correspondraient à la période d'évolution marécageuse plio-quadernaire de ce secteur. Signalons en outre que des dépôts analogues sont connus à Saint-Maximin même (24).

Le bassin d'Ollières comprend également une série d'âge crétacé supérieur décrite avec détail par L. COLLOT (19). Au-dessus d'une formation bauxitique à mur portlandien ou valanginien, on distingue :

Valdomnien-Fuvélien

- sable et gravier siliceux micacés et bariolés rouge-violet-jaune (20 m d'épaisseur)
- calcaire marneux jaune vif (0, 50 m)
- calcaire blanc et gris clair noduleux à surface blanchâtre (3 m)
- marne (5 m)
- calcaire marneux noir à Mélanopsis
- calcaire en abancs minces à nombreuses Corbicules
- série de bancs marneux et calcaires jaunes, quelques bancs de calcaires gris (équivalents de "la barre jaune" du bassin de l'Arc).

Bégudien

Il se singularise des séries de l'Arc par son faciès calcaire :

- calcaires gris et marnes à Mélanopsis (40 m)
- argile bariolée (3 m)
- marnes et calcaires marneux en petits lits (20 m).

Les variations de faciès sont nombreuses, notamment dans le Valdomnien où on trouve localement (au Nord-Ouest du bassin) d'épaisses séries de grès et sables divers mêlés à des calcaires en petits bancs.

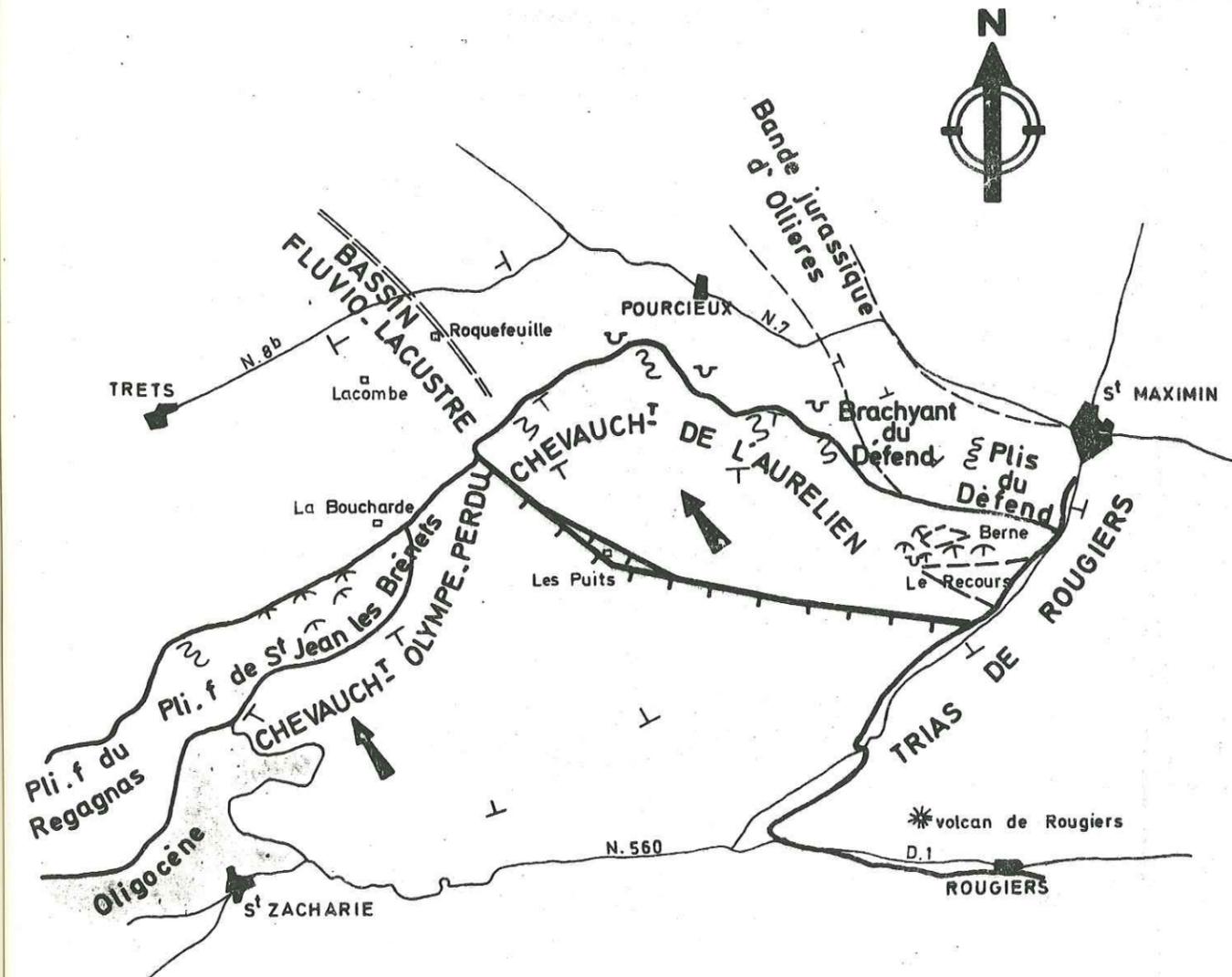
La galerie de Saint-Maximin traversera les séries stratigraphiques précédentes du Trias au Jurassique supérieur et son tracé est situé en dehors des zones où affleurent le Crétacé supérieur et les formations d'âge post-crétacé.

SCHEMA STRUCTURAL DU MASSIF DE L'AURELIEN_OLYMPE

(d'après J.P. Durand et G. Guieu)

ECH = 1/100,000

fig. 36

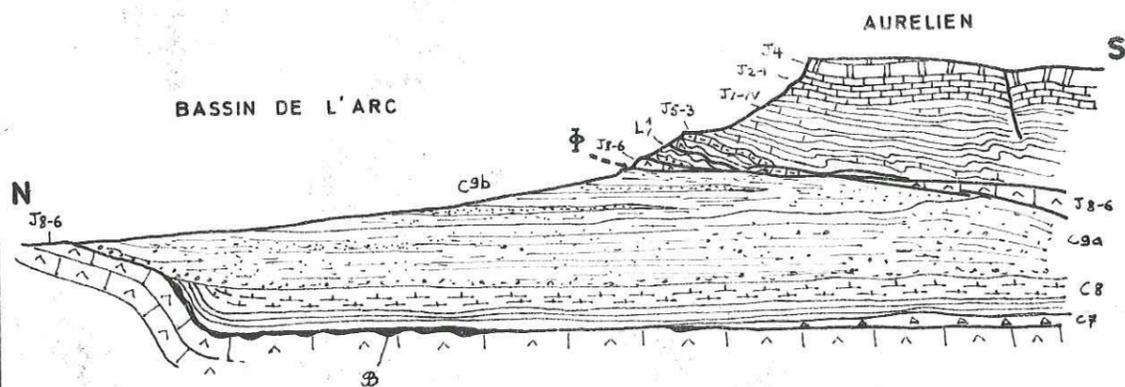


LE CHEVAUCHEMENT DE L'AURELIEN

d'après J.P. Durand et G. Guieu

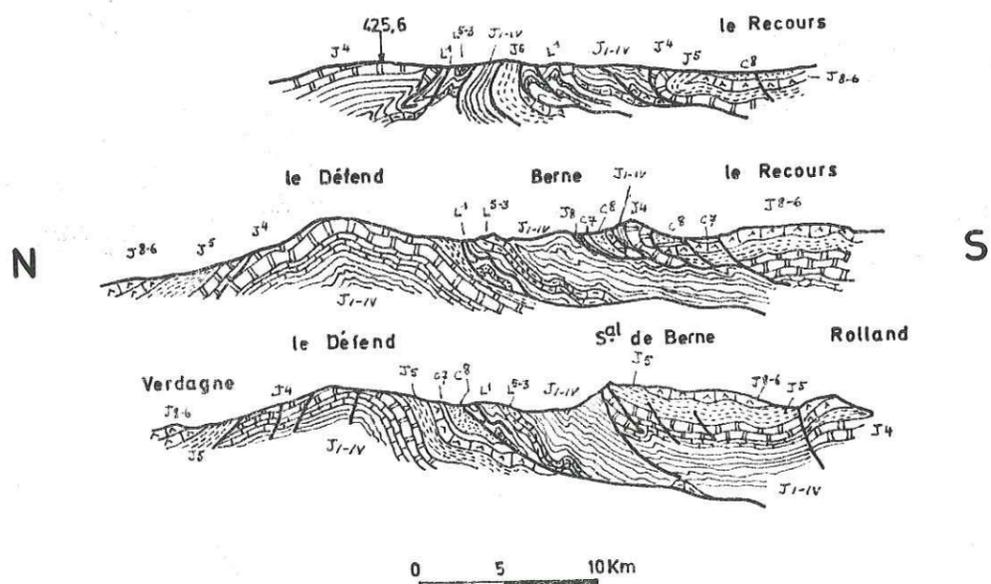


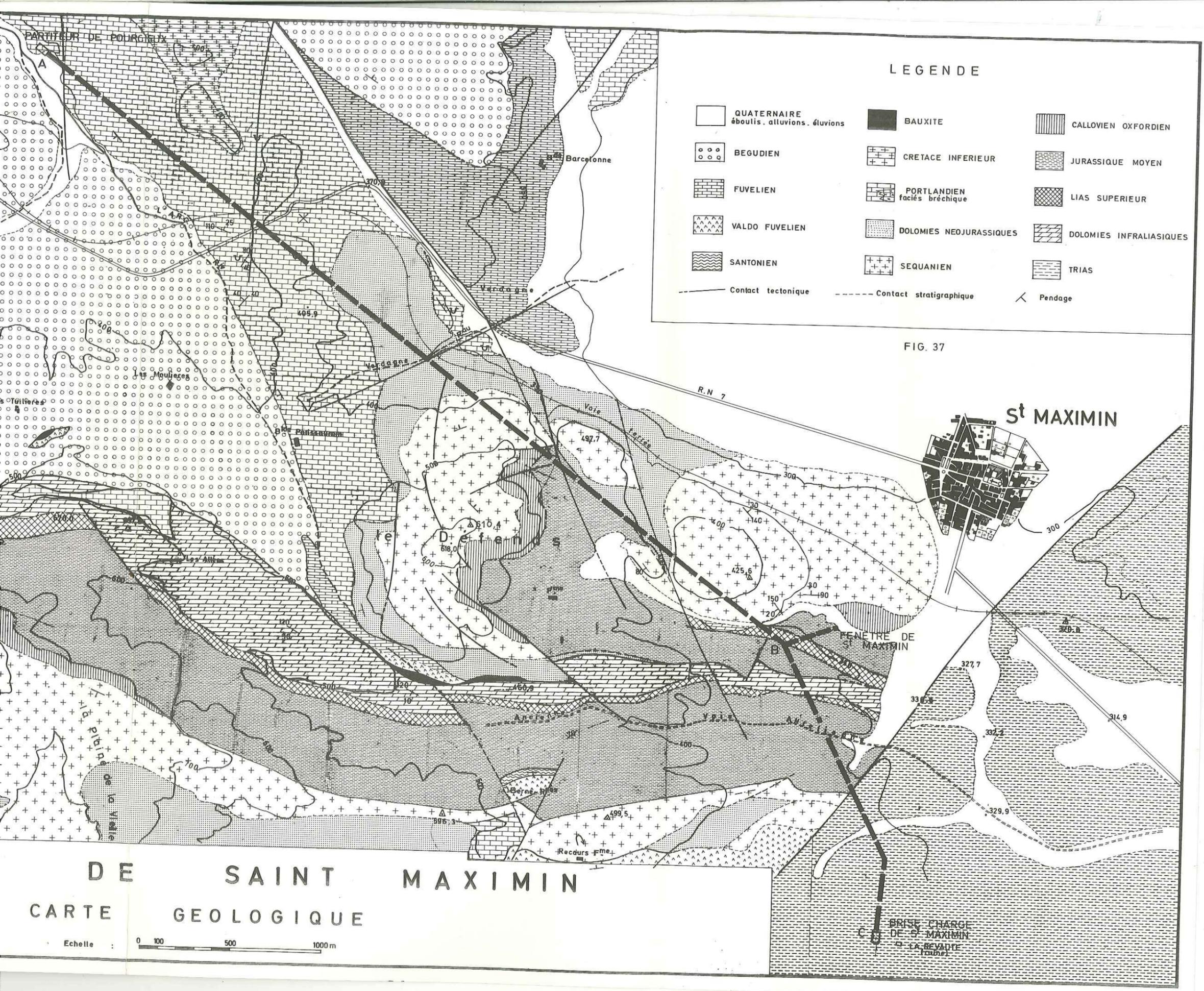
fig. 38



LES PLIS DU DEFEND DE S^t MAXIMIN

d'après J.P. Durand et G. Guieu





LEGENDE

- | | | |
|---|-------------------------------|------------------------|
| QUATERNAIRE
éboulis, alluvions, éluvions | BAUXITE | CALLOVIEN OXFORDIEN |
| BEGUDIEN | CRETACE INFERIEUR | JURASSIQUE MOYEN |
| FUVELIEN | PORTLANDIEN
faciès bréchiq | LIAS SUPERIEUR |
| VALDO FUVELIEN | DOLOMIES NEOJURASSIQUES | DOLOMIES INFRAIASIQUES |
| SANTONIEN | SEQUANIEN | TRIAS |
| Contact tectonique | Contact stratigraphique | Pédage |

FIG. 37

DE SAINT MAXIMIN
CARTE GEOLOGIQUE

Echelle : 0 100 500 1000 m

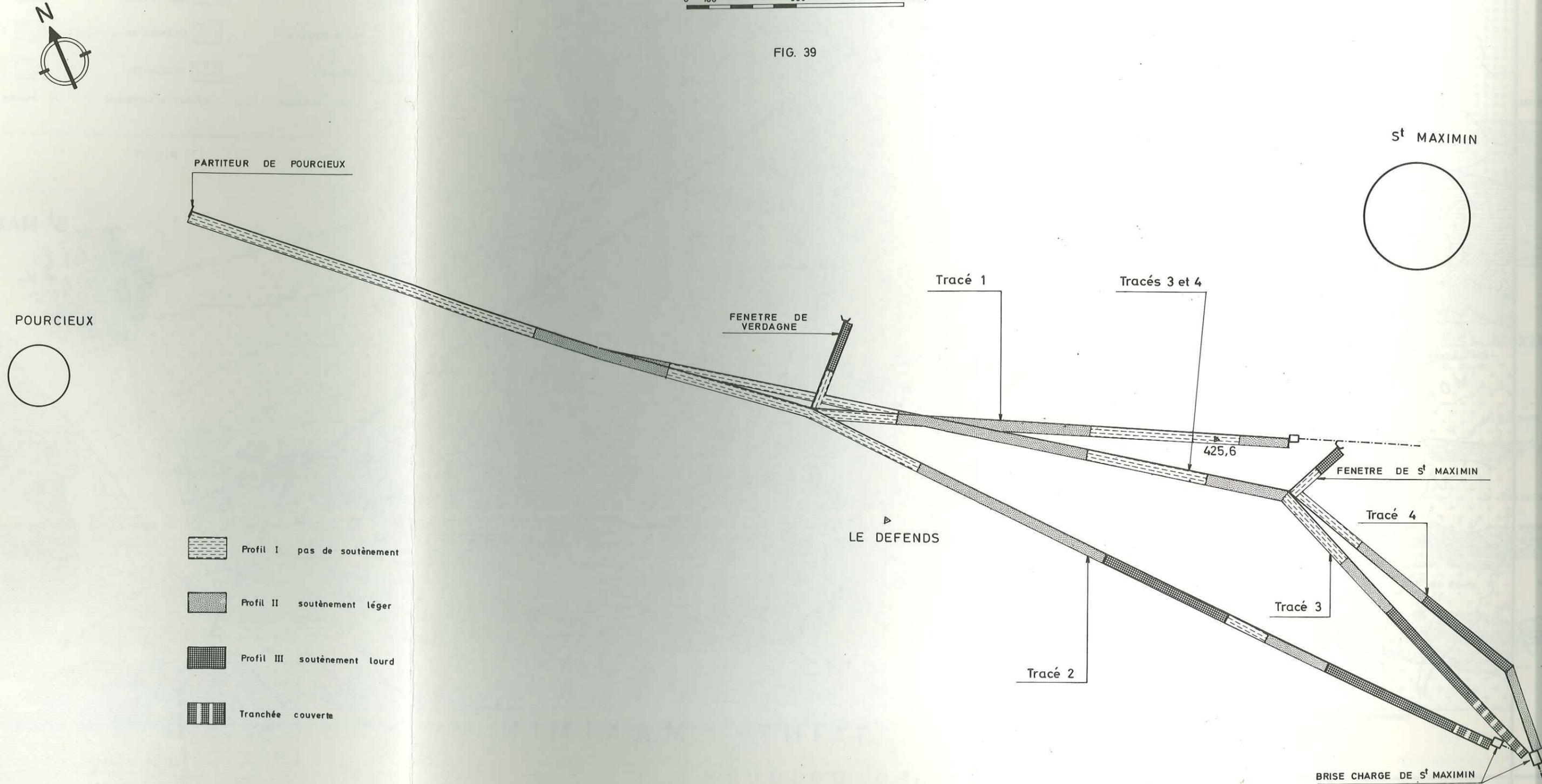
BRISE-CHARGE
DE S. MAXIMIN
LA BEVAITE
(trou)

GALERIE DE S^t MAXIMIN

COMPARAISON DES TRACES

0 100 500 1000 m.

FIG. 39



b) Tectonique

Les grands ensembles structuraux du secteur intéressé se répartissent comme suit :

- le chevauchement de l'Aurélien,
- la bande jurassique d'Ollières,
- le Défends de Saint-Maximin et ses relations tectoniques avec l'Aurélien,
- le contact entre la bande triasique de Rougiers - Saint-Maximin et le massif de l'Aurélien.

1°) Le chevauchement de l'Aurélien

L. COLLOT signalait en 1891 : "Dans les carrières des environs de Pourcieux, on voit le calcaire à Corbicules surmonté par l'Infralias. Entre les deux, on trouve un calcaire blanchâtre veiné de filets rouges. Ces filets sont des infiltrations dans les fissures dues à l'écrasement de la roche". Ces calcaires peuvent être du Jurassique supérieur ou des calcaires à Hippurites et appartiendraient à la branche renversée de l'anticlinal. "Plus à l'Est, le Danien lacustre se trouve pincé entre l'Infralias et le nouveau bombement jurassique du Défends de Saint-Maximin... Le synclinal du Lar (de l'Arc) vient se perdre dans la faille qui fait buter l'Infralias de l'Olympe contre le Bajocien du Défends."

Par ailleurs, G. GUIEU (44) en a réalisé une étude complète que nous avons eu l'occasion de vérifier.

Le pli anticlinal de l'Aurélien chevauche en direction du Nord les formations continentales du bassin de l'Arc au Sud immédiat de Pourcieux. Ce pli ne révèle qu'un flanc normal (face Nord) où les séries s'étagent de l'Infralias au Portlandien. Le flanc inverse ne présente que des lambeaux de Jurassique supérieur (Santonien plus rarement) bréchifiés ou replissés au front du chevauchement (carrières de marbre). La surface de contact est à peu près plane et même localement pend vers le Nord. L'enracinement profond de la structure se situe plus au Sud au niveau de la faille des Puits orientés Ouest-Est. La série chevauchante est très replissée à la base : les replis aigus de l'Infralias dolomitique s'observent sous la Croix de Pourcieux, à l'endroit où la flèche du chevauchement atteint son amplitude maximum. Les replis paraissent liés à la présence des lentilles de base des calcaires du Jurassique supérieur qui ont joué le rôle d'obstacle à la progression du chevauchement. Les séries du Bégudo-Rognacien chevauchées se présentent sous forme d'amas chaotiques au front du contact tectonique.

On note en outre de nombreux étirements au sein des séries plus plastiques du Jurassique moyen et des disharmonies dans l'ensemble chevauchant. La disposition précédente se poursuit régulièrement jusqu'au col du Défends où le bassin de l'Arc vient se coincer le long de la cicatrice du chevauchement, entre l'Aurélien et le Défends de Saint-Maximin.

On observe dans ce secteur la réapparition de lambeaux d'âge santonien, Valdo-Fuvélien, de bauxite, emballés dans les terrains bégudo-rognaciens. A l'Est du col du Défends, le chevauchement est encore identifiable : il met en contact les séries de l'Aurélien et du Défends de Saint-Maximin selon un système de plis serrés et d'écailles que nous envisagerons plus loin.

2°) La "bande" jurassique d'Ollières

Cette "bande" jurassique, orientée Nord-Ouest/Sud-Est, est le prolongement normal de la bordure du bassin de l'Arc, que l'on suit depuis la Sainte-Victoire. Elle sépare le bassin de l'Arc du bassin créta-cé d'Ollières allongé Nord-Ouest/Sud-Est.

La "bande" elle-même présente, au-dessus des calcaires blancs du Portlandien, une mince série (15 m maximum) de calcaires néritiques d'âge valanginien. Nous y avons trouvé *Natica Leviathan*. L'ensemble de ces terrains est subhorizontal.

- Bordure Sud-Ouest

Les sondages miniers ont montré l'existence d'une flexure bordière entre le Jurassique de la bande d'Ollières et le bassin de l'Arc. J. P. DURAND et G. MENNESSIER (40) ont apporté des précisions sur cette flexure en exploitant les résultats de sondages miniers. Le pendage des séries est de 60° Sud-Ouest au point de flexuration maximum et passe à 12° Sud-Ouest au fond du synclinal. Cette flexuration est accompagnée d'une transgression du Bégudo-Rognacien sur le Valdo-Fuvélien sous-jacent par l'intermédiaire d'une brèche de remaniement à ciment marno-gréseux et à éléments anguleux. En certains points, le Bégudo-Rognacien repose directement sur le Portlandien sans intercalation de bauxite, mettant ainsi directement en lumière la discordance. En direction du col du Défends, la flexure s'accroît pour ne plus être qu'une simple faille, mais disparaît sous la transgression à la Bastide Pastissaurom.

- Bordure Nord-Est

C'est également par l'intermédiaire d'une brusque flexure d'orientation Nord-Ouest/Sud-Est que s'opère le contact entre la bande d'Ollières et le synclinal crétacé supérieur du même nom. Cette flexure met en contact les bancs du Valanginien et du Jurassique supérieur sub-verticaux et les séries d'âge crétacé supérieur du bassin d'Ollières par l'intermédiaire d'une brèche à gros éléments (calcaires du Jurassique et du Valanginien), accompagnée de grès grossiers bariolés. L. COLLOT (19) a distingué le Valdomien, le Fuvélien et le Bégudien dans le bassin d'Ollières.

Ce synclinal repose normalement sur le Jurassique supérieur par l'intermédiaire d'un coussin de bauxite siliceuse. Les pendages sont tous dirigés vers le Sud-Ouest, c'est-à-dire vers la zone de flexuration maximum qui borde le bassin.

J. P. DURAND et G. MENNESSIER (40) concluent de l'allure de la bande d'Ollières que :

- l'amorce de la flexure Sud-Ouest est antérieure au dépôt du Bégudo-Rognacien. La formation de ce pli anticlinal est à rattacher à la phase anté-maestrichtienne génératrice de flexures et de failles dans le prolongement Est de la montagne Sainte-Victoire,
- Le Bégudo-Rognacien s'est avancé vers le Nord par-dessus cet anticlinal érodé et cette avancée correspond au déplacement général de l'onde de surrection vers le Nord connue en Provence.

Les sédiments bégudiens sont en outre calcaires et marneux (COLLOT 19), ce qui confirme l'indépendance au moment des dépôts bégudiens entre le bassin d'Ollières et le bassin de l'Arc où ces séries sont grés-argileuses. La discordance entre Bégudien et Fuvélien est impossible à mettre en évidence dans le bassin d'Ollières, ce qui indique bien le caractère ponctuel des mouvements de repliement.

La flexure Nord-Est semble au contraire post-bégudienne. Tout comme le rejeu de la flexure Sud-Ouest (Bastide Blanche), elle est à rattacher à des mouvements contemporains du chevauchement de l'Aurélien.

La bréchification constante des niveaux du Portlandien, entre les sources de l'Arc et les contreforts du Défends de Saint-Maximin, est probablement à mettre en relation avec ces périodes orogéniques sans que l'on sache exactement à quel type de structure elle peut correspondre. On observe une première bréchification, elle-même recoupée par une deuxième mylonitisation. Cette dualité est très nette et correspond bien à deux périodes de mouvements distinctes.

3°) Le Défends de Saint-Maximin et ses relations tectoniques avec l'Aurélien

- Structure de l'anticlinal du Défends

Nous ferons référence en grande partie à une récente étude de J. P. DURAND et G. GUIEU (39).

Le Défends de Saint-Maximin est un anticlinal surbaissé et dissymétrique d'axe Ouest - Nord-Ouest/Est - Sud-Est, dont le coeur de Dogger affleure à la ferme du Défends. De façon analytique on observe :

- Au Nord-Ouest

Le Portlandien calcaire et dolomitique de la bande d'Ollières se relève vers le Sud-Est le long du ruisseau de Verdagne. Il laisse apparaître le Kimmeridgien dolomitique, puis le Séquanien qui forme les sommets du Défends (618, 0 - 610, 4 - 516, 0). Le Jurassique moyen marno-calcaire apparaît ensuite en contrebas ; il forme les espaces cultivés qui entourent la ferme du Défends (439, 0). Sur son versant Nord-Ouest, le Défends de Saint-Maximin forme donc un dôme anticlinal enveloppé normalement par les séries du Jurassique supérieur. Cette enveloppe périclinale se retrouve sur le flanc Sud et le flanc Nord, mais dans les deux cas la tectonique complique le schéma simple précédent.

- Au Nord

Les affleurements du Kimmeridgien dolomitique et du Séquanien calcaire constituent la retombée Nord du Défends. Ils sont recoupés par un important accident tectonique Nord-Ouest/Sud-Est, accompagné d'un cortège de fractures observables le long de la voie ferrée. Cet accident prolonge au Sud-Est la flexure Nord-Est de la bande d'Ollières. Il provoque une intense altération et bréchification des niveaux jurassiques observables le long de la route nationale n° 7, dans les carrières de la montée, versant Saint-Maximin. Il a pour conséquence l'ennoyage rapide de l'anticlinal du Défends vers la plaine de Saint-Maximin. Les pendages sont fort redressés sur toute cette bordure.

En outre, le passage de cet accident entre les sommets 516, 0 et 437, 0, tous deux constitués de Séquanien, provoque l'apparition du Jurassique moyen marno-calcaire pincé et écrasé. La butte séquanienne 425, 6 au Sud-Ouest de Saint-Maximin correspond à la réapparition du dôme du Défends sur le flanc Nord-Est de cet accident. L'ennoyage de l'anticlinal se fait normalement vers le village de Saint-Maximin où le Séquanien disparaît sous les formations quaternaires avec un faible pendage.

- Au Sud

Au niveau de la Bastide Pastissaurom, nous avons vu que la flexure du bassin de l'Arc disparaissait sous la transgression du Bégudo-Rognacien. En se dirigeant vers le col du Défends, on observe le retrécissement progressif du synclinal de l'Arc, entre le Défends et le chevauchement de l'Aurélien : la flexure du bassin de l'Arc rejoint le chevauchement de l'Aurélien.

Au-delà de la disparition vers l'Est du synclinal de l'Arc (col du Défends), la cicatrice tectonique du chevauchement met en contact le Kimmeridgien dolomitique de l'enveloppe Sud de l'anticlinal du Défends avec l'Infralias dolomitique de l'Aurélien. La cicatrice est jalonnée par de la bauxite écrasée qui se trouvait en poches dans le Jurassique supérieur.

L'affrontement des deux ensembles a pour conséquence le redressement des séries à la verticale. On observe alors, au Sud immédiat de la ferme du Défends, la juxtaposition des dolomies infraliasiques et du Séquanien de l'enveloppe du Défends.

- Relations tectoniques avec l'Aurélien à l'Est du Défends

L'accident Nord-Ouest/Sud-Est décrit précédemment sur le flanc Nord du Défends (entre 516,0 et 437,7) sépare en deux parties le dôme du Défends à l'Est de la ferme. L'anticlinal, à coeur callovo-oxfordien, situé au Nord (425,6), qui s'enneoie périclinalement sous le village de Saint-Maximin, est brusquement interrompu sur son flanc Sud par cet accident. Ce dernier vient converger avec le prolongement Est du chevauchement de l'Aurélien, réduit comme nous l'avons vu à une cicatrice verticale mettant en contact le Jurassique du Défends avec le Lias de l'Aurélien. La structure générale de cette terminaison Est devient alors une succession de replis serrés et d'écaillages, axés Nord - Nord-Ouest/Sud - Sud-Est, affectant aussi bien les séries du Défends que celles de l'Aurélien.

A l'Est de la ferme, on observe ainsi du Nord au Sud, à partir de l'accident majeur du Défends, une brusque cassure qui replie le Séquanien, une bande verticale et écaillée de Lias supérieur et d'Infralias appartenant au coeur de l'anticlinal du Défends ; vient ensuite un liseré de Jurassique moyen prolongeant les affleurements de la ferme du Défends. Cette bande est en contact, par l'intermédiaire du "chevauchement" de l'Aurélien, avec la succession normale et verticale de la série de l'Aurélien affectée là d'accidents secondaires transversaux et d'écaillages. Cette série comprend successivement une bande d'Infralias, puis de Lias supérieur et, enfin, un large affleurement de Jurassique moyen, plusieurs fois plissé sur lui-même (charnières visibles). La voie aurélienne longe en direction ces affleurements sub-verticaux.

Les replis plus méridionaux de Berne et du Recours affectent uniquement la terminaison orientale de l'Aurélien. Bien qu'en dehors de l'emprise de l'ouvrage, nous évoquerons leur structure telle qu'elle a été décrite par J. P. DURAND et G. GUIEU (39). Le Jurassique supérieur (Séquanien) du flanc Sud de l'Aurélien dessine vers l'Est un synclinal de dolomies néo-jurassiques. Au niveau du méridien de Berne et du Recours, ce synclinal passe sans transition à une surrection des calcaires séquaniens qui isole une unité synclinale crétacée supérieure (synclinal du Recours) au Sud, d'une dépression où du Crétacé supérieur repose sur du Jurassique moyen (dépression de Berne).

- Le synclinal du Recours, axé parallèlement au pli de l'Aurélien, est une dépression occupée par des sédiments d'âge crétacé supérieur, interrompue à l'Est par le Trias de Rougiers - Saint-Maximin, vers lequel elle descend en pente douce. La bordure Sud du synclinal du Recours est formée de Jurassique supérieur calcaire et dolomitique qui constitue le soubassement de la dépression. Le plongement des séries du Santonien et du Valdo-Fuvélien, qui occupent le centre de cette unité, est dirigé vers le Nord. Le bord Nord est constitué par du Séquanien. Celui-ci forme une lame rebrousée sur elle-même au Sud et débordant ainsi sur les séries crétacées supérieures du synclinal. A l'Ouest, ce rebroussement s'accompagne d'une bréchification intense du Jurassique supérieur coïncé sous le Séquanien.

A l'Est de la ferme, apparaît sous le Séquanien le Kimmeridgien dolomitique, également en contact anormal sur le Crétacé supérieur. Selon J. P. DURAND et G. GUIEU : "l'ensemble de la plaine du Recours apparaît comme un synclinal dont seul le flanc Sud serait représenté et dont le flanc Nord serait masqué sous le Jurassique moyen et supérieur de la crête du Recours".

- La dépression de Berne, située dans le Jurassique moyen calcaire et marneux, est chevauchée sur son bord Sud par le Séquanien rebrousé de la crête du Recours. Sur son bord Nord, le Jurassique moyen surmonte normalement les séries liasiques et infraliasiques du flanc Nord de l'Aurélien. A l'Ouest, il vient buter le long d'une déchirure tectonique contre le Jurassique supérieur de la bordure sommitale de l'Aurélien. Sur le pourtour de la dépression, le Crétacé supérieur (Santonien, Valdo-Fuvélien) repose sur des lambeaux de Portlandien, eux-mêmes en position anormale sur le Jurassique moyen.

Selon J. P. DURAND et G. GUIEU (39), les dépressions de Berne et du Recours représentent les vestiges d'un synclinal unique dont l'axe est actuellement occupé par le Jurassique supérieur de la crête du Recours. La bordure jurassique Sud du synclinal du Recours chevauche légèrement le Crétacé supérieur. Dans la crête du Recours, le Séquanien et le Kimmeridgien se replient en sens inverse sur eux-mêmes et sur le Crétacé supérieur. Au Nord de la crête, le Jurassique supérieur se résout à quelques lambeaux écaillés, recouverts de Crétacé supérieur, isolés entre deux replis de Jurassique moyen (dépression de Berne).

En résumé, la crête séquanienne de l'Aurélien s'interrompt brusquement au méridien de Berne. Disloquée par de nombreux accidents Est-Ouest et Nord-Sud, elle forme des replis dans le Séquanien et passe à des mylonites dans le Portlandien plus massif.

4°) Le contact Aurélien-bande triasique de Rougiers

Tous les ensembles structuraux précédents sont brusquement interrompus à l'Est par la bande triasique de Rougiers - Saint-Maximin. A. LANQUINE (53) interprète ce Trias comme le substratum normal du Pli de l'Aurélien. Le Trias se présente comme une vaste zone chaotique où affleurent le Muschelkalk et le Keuper. Le contact entre les séries jurassiques et crétacées de l'Aurélien avec le Trias de Rougiers est parfaitement rectiligne et évoque une faille. Comme le cas est déjà observable à Rians, il s'agit plutôt de l'intersection de deux structures d'axes différents et dont la plus récente correspond à un anticlinal triasique axé Nord-Ouest.

Néanmoins, C. CORNET (24) a trouvé une brèche de faille où sont mêlés des éléments du Bégudien et du Muschelkalk et précise que le contact est affecté d'un pendage Nord-Ouest. Ce même auteur confirme l'ascension anticlinale normale de ce Trias. En effet, au voisinage du volcan basique de Rougiers, s'observent des sédiments d'âge permien qui ne correspondent pas à un ramonage par les laves des parois de l'appareil volcanique : le cristallin est donc proche et la bande triasique est bien une surélévation anticlinale du socle.

Conclusion

Le secteur étudié correspond donc à l'affrontement de deux structures : l'Aurélien au Sud et le Défends de Saint-Maximin au Nord, prolongement de la bande jurassique d'Ollières.

Entre ces deux structures, vient se coincer le bassin de l'Arc. L'anticlinal du Défends était ébauché avant le chevauchement de l'Aurélien et il a joué le rôle d'un butoir sur lequel est venu se bloquer le mouvement du massif méridional. Ainsi s'expliquent les nombreux écaillages et replis qui apparaissent à l'Est, bientôt recoupés par le Trias.

c) Evolution tectogénétique

Les mouvements dont nous venons d'analyser les effets se sont tous produits au cours de l'évolution continentale de la Provence. Leur rattachement à des phases tectoniques connues ailleurs s'opère donc souvent de façon subjective.

- La formation de la bande d'Ollières et de l'anticlinal du Défends, le début de la flexuration bordière du bassin de l'Arc sont anté-bégudiens. On peut donc les rattacher à la phase anté-maestrichtienne très inégalement connue par ailleurs.

- Le plissement de l'Aurélien peut être rapporté à la période Lutétien-Bartonien, phase de la fin de l'Eocène qui correspond aux mouvements tangentiels les plus importants. Les seuls indices stratigraphiques nous permettent seulement de la classer post-Rognacien.

- C. CORNET classe enfin la surrection de la bande triasique dans la période oligocène (post-Eocène, anté-Vindobonien).

Il n'est pas possible de mettre en évidence les effets des périodes orogéniques postérieures durant le Miocène et le Plio-Quaternaire.

3° - HYDROLOGIE DU SECTEUR TRAVERSE

Comme pour le massif de la Sainte-Victoire, les observations superficielles ne fournissent que peu d'indices sur l'état hydrologique du massif.

Les campagnes de reconnaissance par sondages n'ayant pas encore débuté, le seul point de mesure reste un sondage implanté en 1955 au col du Défends. Ce forage est resté en perte totale.

Toutes les assises calcaires et dolomitiques sont ici susceptibles d'être aquifères. Les séries du Jurassique moyen, plus marneuses, risquent d'être les seules à fournir des débits notables selon le schéma observé dans la galerie aval de Signes, sous la Sainte-Baume.

Ainsi qu'on le constate un peu partout en Provence et en particulier dans le secteur de la Sainte-Baume proche, le niveau de base est constitué par le Trias. Dans le cas présent, ce schéma se vérifie bien dans la bande de Saint-Maximin - Rougiers où tous les puits accusent des niveaux très élevés. La galerie traversant cette zone sous faible couverture, la charge sera peu élevée, mais les débits risquent d'être importants.

Tout le secteur situé à l'Est du Défends se draine vers la bande de Trias et la disposition structurale des couches (verticales et orientées Est-Ouest) est très favorable à ce dispositif de drainage. Le contact tectonique de la bande du Trias de Rougiers - Saint-Maximin joue le rôle de drain actif. Les circulations d'eau dans les bandes Est-Ouest viennent en effet buter sur le Trias plus ou moins imperméable et sont drainées vers le Nord, le long de l'accident. Des captages très fructueux sont ainsi installés au Sud de Saint-Maximin, le long de ce contact.

Le versant Nord et Nord-Est du Défends de Saint-Maximin est jalonné par quelques sources qui sont les exutoires naturels des circulations dans les séries du Kimmeridgien et le Séquanien, "obturées" au mur par le Jurassique moyen. Au toit, ces formations sont recouvertes par les alluvions de la plaine de Saint-Maximin et le gonflement de la nappe qu'ils contiennent conditionne l'émergence des sources.

De l'Aurélien descendant vers la bande d'Ollières un certain nombre de réseaux de drainage superficiels. Les seuls que nous ayons vu actifs collectent les eaux de ruissellement des séries fluvio-lacustres crétacées coincées entre le Défends et l'Aurélien. L'Arc prend précisément sa source au Nord-Ouest immédiat de la Bastide Pastissaurom, à la réunion de plusieurs de ces réseaux de drainage.

Un sondage des Ponts et Chaussées, équipé en piézomètre, a mesuré sur la bande d'Ollières un niveau statique à la cote 385 m, soit à moins 15 m.

En l'absence de mesures, nous pouvons dire qu'il y a présomption de venues d'eau à débit intermittent sur tout le tronçon traversant la bande d'Ollières et le versant Nord du Défends. Il y a par contre certitude de gros débits, longs à épuiser, dans toute la traversée du secteur Est du Défends et à partir de l'entrée dans le Trias.

4° - PROPRIETES TECHNIQUES DES DIFFERENTS TERRAINS

La galerie de Saint-Maximin traversera des terrains jurassiques et triasiques.

- Muschelkalk

Les calcaires dolomitiques et dolomies de cet étage sont compacts et de bonne tenue. Cependant, compte tenu des vicissitudes tectoniques qu'ils ont eu à subir et de leur altération profonde, ils contiennent de nombreuses poches de dissolution remplies de matériaux divers. De plus, ils sont souvent mêlés aux gypses et argilites du Keuper. Ces terrains se tirent bien, mais les hors-profils y seront nombreux et les soutènements nécessaires.

- Keuper

Généralement, la tectonique le mêle au précédent. Les marnes, les gypses et les cargneules qu'il contient en font un terrain classiquement difficile. La présence certaine d'eau, la bréchification de ce matériau rendront indispensables les soutènements à l'avancement. La présence de gypse impose à l'exécution des bétons les protections d'usage contre les eaux séléniteuses.

- Lias inférieur

L'épaisse série de dolomies et de calcaires dolomitiques de l'Hettangien n'apparaîtra dans le profil qu'à l'état d'écaillies laminées. Ces terrains sont rarement cargneulés et seuls les lits marneux de la base de la série pourront provoquer des décollements de blocs. Cette assise est cependant susceptible d'une bonne tenue car elle est généralement bien consolidée. Les circulations d'eau pourront y être importantes compte tenu d'une perméabilité en petit fréquente dans les dolomies et d'une perméabilité en grand fonction des nombreux joints tectoniques.

- Lias supérieur

Tout comme le Lias inférieur, la galerie ne le rencontrera qu'à l'état de lambeaux à l'Est du Défends. Ce matériau calcaire est bien stratifié, compact et de bonne tenue. Signalons cependant son importante teneur en silice qui lui confère une forte abrasivité. Etant donné que ces terrains n'intéresseront qu'une très faible longueur de la galerie, l'incidence matérielle en sera négligeable. Ces calcaires sont peu solubles, mais leur intense fracturation entraînera, le cas échéant, des circulations d'eau importantes.

- Jurassique moyen

La galerie le traversera sur de grandes longueurs dans l'anticlinal du Défends. La base de cet ensemble, alternance régulière de bancs calcaires en "pavés" et de marnes (à fort pourcentage de calcaire), constitue un terrain de bonne tenue. L'expérience acquise dans cette formation à la galerie de Signes a montré que des soutènements ne s'avéraient nécessaires qu'en cas de venues d'eau (écaillages, chutes de blocs) et de fracturation importante. Ces terrains se découpent bien à l'explosif. Les venues d'eau y sont liées à une perméabilité acquise secondairement par fracturation et peuvent être importantes (exemple de la galerie de Signes).

La partie supérieure de cette formation, où les marnes ont pratiquement disparu, a toutes les caractéristiques d'une roche dure et compacte. Ces terrains sont peu solubles et on n'y observe jamais de circulations karstiques.

- Séquanien

Est également constitué de calcaires très compacts et durs, sans intercalation marneuse. Il n'est jamais karstifié dans ce secteur.

- Les dolomies néo-jurassiques ("Kimmeridgien")

Elles sont ici très sableuses et rarement compactes. Ce terrain est généralement traversé par des zones broyées altérées sur le versant Nord du Défends. Les éboulements, les poches de dissolution remplies de sable, une perméabilité élevée sont les caractéristiques de ce matériau qui nécessitera des précautions à l'avancement. Des galeries d'essai ont cependant montré que l'altération importante de surface ne se poursuivait pas en profondeur et que l'avancement ne nécessitait pas de soutènement important. La teneur en silice ne sera pas gênante car sa concentration augmente lorsque le matériau est altéré, donc lorsqu'il ne pose pas de problème d'abrasivité.

- Le Portlandien, matériau calcaire d'excellente qualité mécanique lorsqu'il est sain, se présente ici (secteur amont) bréchifié (carrières) et profondément altéré. La surface morphologique, qui s'étend au pied Nord-Ouest du Défends aux environs de la route nationale n° 7, montre d'énormes poches de plusieurs mètres cubes, remplies d'argile rouge d'altération. Ces poches provoqueront de nombreux hors-profils et des incidents de marine. Les brèches sont par contre bien recimentées et devraient présenter des caractéristiques mécaniques à peine inférieures à celles des calcaires.

Si l'on excepte le Trias, les terrains que rencontrera la galerie de Saint-Maximin ont de bonnes caractéristiques techniques en souterrain, en dehors des grandes zones de broyage ou d'altération. Les reconnaissances ultérieures s'attacheront à déterminer l'importance et l'extension de ces paramètres. Compte tenu de l'expérience acquise sur le tracé de la galerie de Sainte-Victoire, une campagne de prospection électrique, étayée par un petit nombre de sondages mécaniques, devrait permettre cette délimitation.

5° - TRACE DE LA GALERIE

a) Etude comparative des différents tracés

Le choix du tracé actuel est le résultat d'un compromis entre diverses solutions variantes. La nature géologique des terrains traversés, donc les types de profil adoptés, ont joué un rôle important dans l'arrêt du projet maintenant admis.

Quatre solutions ont été proposées en tenant compte des critères hydrauliques (pente piézométrique, zones à desservir, etc...). Elles ont toutes une portion commune qui s'étend du partiteur de Pourcieux au PM. A ce niveau, une première bifurcation sépare les tracés III et IV des tracés I et II.

- Tracés I et II

Ces tracés sont confondus jusqu'à la fenêtre de Verdagne (PM,) qui permet une attaque médiane à la faveur d'un vallon Nord-Sud. Au-delà de la fenêtre de Verdagne, les deux tracés se séparent.

Tracé I

Il longe le flanc Nord du Défends de Saint-Maximin, parallèlement au rebord de celui-ci et rejoint directement la butte 425,6. Il en sort immédiatement à l'Est et s'en échappe par un canal, origine du canal de Saint-Maximin - Rougiers.

Tracé II

Ce tracé, comme les tracés III et IV, comporte une sortie de galerie dans un petit vallon Est-Ouest, au-delà de la route nationale n° 560 qui rejoint Marseille à Saint-Maximin. Il permet d'éviter la solution onéreuse d'un départ de canal au niveau de Saint-Maximin (majorations très nombreuses,

notamment en ouvrages de franchissement). Le tracé II se sépare du tracé I à la fenêtre de Verdagne. Il rejoint en ligne droite le point choisi pour l'établissement du brise-charge dans le vallon situé à l'Est de la route nationale n° 560, vers la ferme de la Revaute, traversant ainsi, selon une direction Ouest/Nord-Ouest, le Défends et toutes les duplicatures qui terminent celui-ci à l'Est et jalonnent son contact avec l'Aurélien oriental.

- Tracés III et IV

Ils rejoignent sans fenêtre intermédiaire le point triple de la fenêtre de Saint-Maximin, selon un tracé un peu plus au Sud de la butte anticlinale 425,6 que le tracé I. Le tracé III se sépare du tracé IV au niveau de cette fenêtre. Il rejoint directement le vallon choisi pour le brise-charge, près de la ferme la Revaute. Le tracé IV aboutit au même endroit après avoir effectué un coude vers le Nord.

Choix du tracé

La solution I fut rapidement écartée en raison des difficultés que poserait l'exécution du départ du canal de Saint-Maximin - Rougiers si la sortie de galerie se situait à 300 m à l'Est de la butte 425,6. Entre autres, le franchissement d'un vallon profond nécessitait l'ouverture d'une zone d'emprunt importante entre les maisons de la bordure du village.

En bref, l'économie réalisée sur le raccourcissement de la galerie ne compensait pas les dépenses à engager pour la portion de canal supplémentaire.

Les solutions II, III et IV ne furent comparées que sur les différences des longueurs de profil de soutènement, c'est-à-dire en fonction de la nature géotechnique des terrains traversés.

La solution II, séduisante parce que directe, engageait à traverser pratiquement en direction tous les accidents et écaillages de l'Est du Défends sur 2.000 m environ. Les unités étant essentiellement constituées de Jurassique moyen calcaire et marneux et de Lias inférieur et supérieur, l'avancement y est très onéreux, surtout accompagné des venues d'eau permanentes que l'on peut attendre dans ce secteur.

Les solutions III et IV constituent donc les tracés intermédiaires entre les solutions I et II. La fenêtre de Verdagne est remplacée par la fenêtre de Saint-Maximin dont l'avantage est de permettre une attaque aval directe dans des terrains difficiles, disposition qui ne ralentira pas l'avancement général amont, théoriquement plus aisé.

Jusqu'à la fenêtre de Saint-Maximin, les tracés III et IV confondus rappellent le tracé I. Au-delà vers l'aval, le tracé III recoupe en biseau sur 800 m les écaillages Est du Défends, puis traverse l'accident triasique et le Keuper jusqu'au brise-charge implanté parallèlement au flanc de la colline de la Revaute.

Le tracé IV, finalement retenu, est semblable au tracé III jusqu'à l'entrée dans le Trias. Il a été alors dévié vers le Nord pour rester dans un affleurement de Muschelkalk calcaire qui se poursuit jusqu'au brise-charge de la Revaute.

Les différences précédentes, chiffrées en types de profil (cf. galerie de Sainte-Victoire), ressortent des tableaux suivants :

Profils	S. I	S. II	S. III	S. IV
P. I	3.610	3.080	3.920	3.920
P. II	970	1.340	1.490	1.910
P. III	600	1.800	1.110	1.100
T. C.	-	190	150	-
	5.180	6.410	6.070	6.930

Fenêtre de Verdagne P. I : 200
P. II : 200

Fenêtre de Saint-Maximin P. I : 150
P. II : 150

Si l'on excepte le tracé I abandonné, on note que le tracé IV présente 160 m P. III de moins que le tracé III et 890 m P. III de moins que le tracé II, condition suffisante à son adoption.

b) Tracé de la galerie

1°) Description structurale

- Entre l'origine A (PM. 0) et le PM. 1750, la galerie reste dans les calcaires du Jurassique supérieur (Portlandien), compacts et bien stratifiés. La couverture est à cet endroit de 60 m environ et on peut espérer que l'altération, peu importante en surface, aura une extension réduite à la cote de l'ouvrage.

C'est vers le PM. 1750 que se produit l'entrée dans les brèches du Portlandien. Il faut craindre dans cette zone une altération très poussée, des cavités karstiques remplies d'argiles rouges dont les carrières de marbre montrent l'énorme volume.

- A partir du PM. 2100, le tracé recoupe le flanc Nord de l'anticlinal du Défends et descend progressivement dans la série jurassique vers des termes de plus en plus anciens. Il traverse successivement en travers bancs :

- le Séquanien du PM. 2870 au PM. 3020
- le Callovo-Oxfordien du PM. 3020 au PM. 3250
- le Jurassique moyen du PM. 3250 au PM. 4250

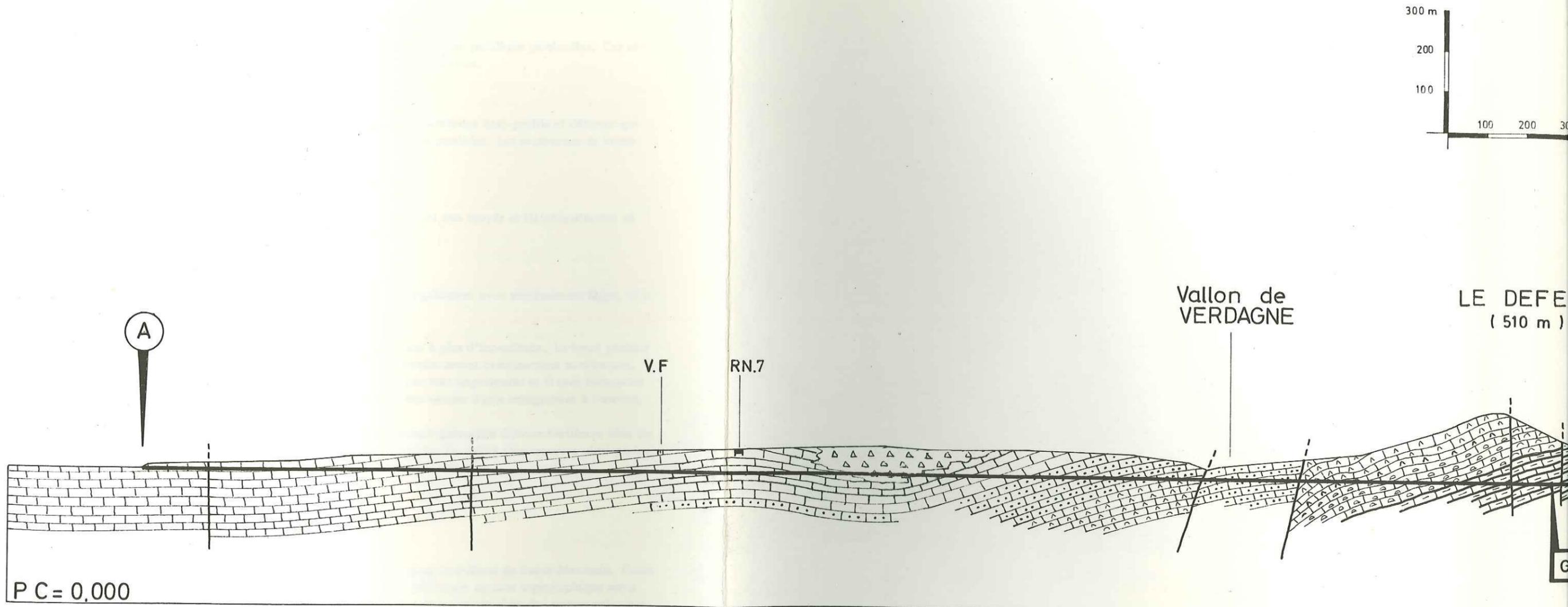
- Au PM. 4250, la galerie pénètre dans la zone de passage des accidents qui ont provoqué l'éclatement de l'anticlinal du Défends. Au niveau de l'ouvrage, on trouve en contact les calcaires marneux et marnes du Jurassique moyen à l'amont avec les dolomies néo-jurassiques ou calcaires séquaniens. Ce contact se situe aux environs du PM. 4300.

- Au-delà du PM. 4350 jusqu'au point B (point triple de la fenêtre de Saint-Maximin), le tracé suit la bordure Nord de l'anticlinal 425, 6, coupole dissymétrique de calcaire séquanien à coeur de Callovo-Oxfordien. Cette bordure Nord, affectée d'un brusque ennoyage, est fortement cassée et laisse apparaître des bandes Est-Ouest de terrains liasiques. La galerie restera dans les séries du Callovo-Oxfordien et du Séquanien, à proximité de la zone broyée méridionale.

GALERIE DE

PROFIL EN L

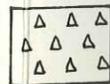
FIG. 40



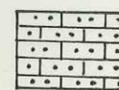
LEGENDE



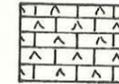
Portlandien J 87



Brèches marmoréennes



Dolomies néojurassiques J 7.5



Séquanien J 4-3

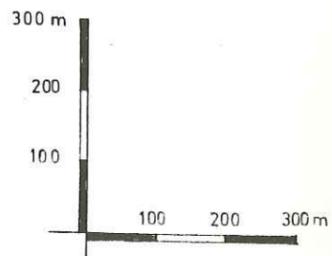


Calcaire

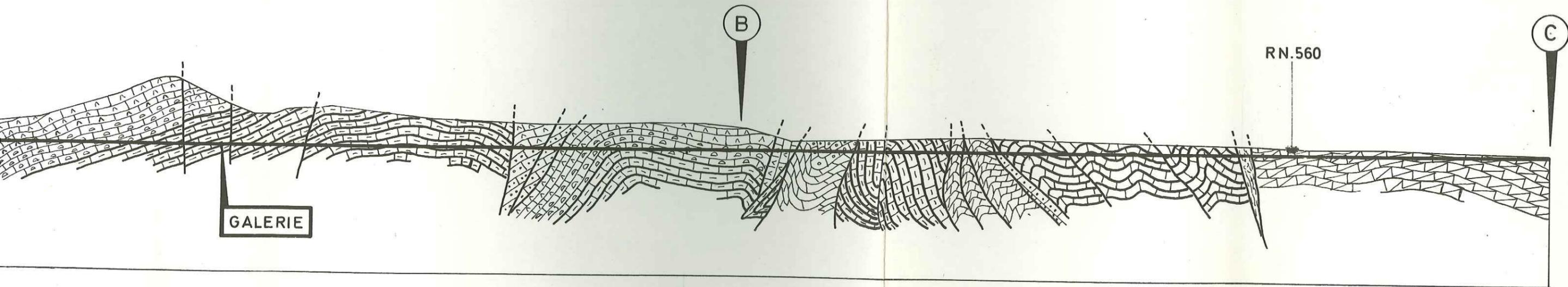
--- Contact tectonique

DE St MAXIMIN

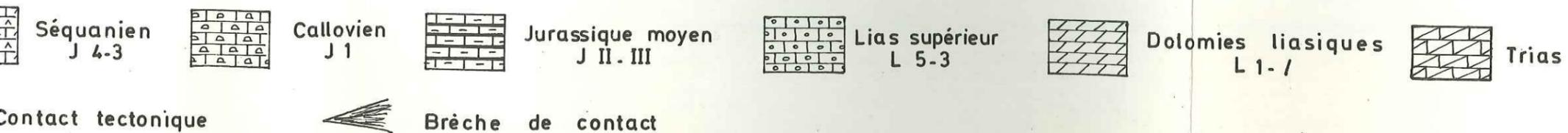
PROFIL EN LONG



LE DEFENDS
(510 m)



LEGENDE



- A partir du point B jusqu'à la tête aval (point C), le tracé va recouper en biseau la totalité des bandes Est-Ouest de Jurassique moyen, de Lias et d'Infralias qui constituent la terminaison orientale de l'Aurélien et du Défends. Les longueurs prévues sont dans ce cas très approchées.
- On peut estimer le contact avec le Trias au PM. 6150. Après le passage d'une épaisse brèche jalonnant ce contact, le tracé reste dans le Muschelkalk jusqu'au brise-charge (point C).

2°) Difficultés probables

- Du PM. 0 au PM. 1750, la traversée des calcaires portlandiens ne posera aucun problème particulier. Ces séries pourront se franchir sans soutènement et les venues d'eau y seront négligeables.

- Du PM. 1750 au PM. 1920

Brèches de calcaires portlandiens, poches d'argiles. Il faut y craindre de nombreux hors-profilés et déboussages de karsts remplis d'argile. Des venues d'eau locales peu importantes y sont possibles. Les soutènements lourds seront donc la règle sur cette longueur.

- Du PM. 1920 au PM. 3250

Les dolomies néo-jurassiques, le Séquanien et le Callovo-Oxfordien sont ici très broyés et ils nécessiteront un soutènement continu léger. On y enregistrera également des venues d'eau.

- Du PM. 3250 au PM. 4450

Le Jurassique moyen, puis la zone de l'accident médian, se franchiront également avec soutènement léger. Il y a risque d'écaillages nombreux dans les marnes et calcaires marneux.

- Les prévisions des profils à soutenir jusqu'au point C laissent ensuite place à plus d'incertitude. Le tracé pénètre en effet dans des séries très broyées et aquifères où les difficultés de foration seront certainement nombreuses. La traversée de l'accident triasique devrait donner lieu à des venues d'eau très importantes et il sera nécessaire d'entreprendre des reconnaissances à l'avancement selon l'importance des venues d'eau enregistrées à l'amont.

Le programme de reconnaissance envisagé actuellement permettra d'avoir meilleure idée de la fracturation et du comportement possible de toutes ces assises en souterrain. Le métré s'en trouvera ainsi perfectionné.

3°) Aménagements annexes

- Fenêtre de Saint-Maximin

Une attaque en fenêtre est prévue à 1,100 m environ au Sud-Ouest de Saint-Maximin. Cette fenêtre se présente dans une zone à topographie relativement plane, la différence de cote topographique entre l'origine et la fin de l'ouvrage étant de 20 m. L'attaque sera légèrement descendante dans des assises calcaires appartenant au Callovo-Oxfordien. Ces calcaires apparaissent en boutonnière à l'Est de l'anticlinal 425,6 dont ils constituent le coeur. Ils sont très fracturés, ayant subi le contre-coup des écaillages qui les bordent au Sud immédiat. L'observation de surface est rendue difficile par les multiples tumulus de pierre qui encombrant toute cette zone.

Un sondage sera implanté au point triple fenêtre-galerie afin de reconnaître l'état de la roche.

- Brise-charge de Saint-Maximin

Cet ouvrage sera implanté au Sud d'une colline triasique (Muschelkalk), non loin de la ferme "La Revaute". L'axe de l'ouvrage est perpendiculaire aux horizontales de la butte, ce qui simplifie la fouille. Celle-ci sera entièrement effectuée dans des calcaires du Muschelkalk de bonne qualité.

°
° °

V - CONCLUSION

Les études précédentes montrent, si besoin est, l'importance du rôle de la géologie dans l'élaboration des projets de galeries et de canaux.

On a pu se rendre compte, par contre, des limites de l'observation de surface et des extrapolations entachées d'erreur que celle-ci autorise le plus souvent, même lorsque les sondages mécaniques sont nombreux.

Le matériel, constitué de séries irrégulières assez semblables (calcaires, calcaires dolomitiques, dolomies), abondamment fracturées et altérées, est la cause de ces imprécisions. La technique géophysique a permis dans une certaine mesure de pallier cet inconvénient ; cependant, faute d'un étalonnage précis, celle-ci n'a pu que se borner à situer les zones particulièrement mauvaises. La solution du problème nécessiterait dans ce cas la détermination de paramètres directement liés à la fracturation et à l'altération des terrains en cause. L'élargissement des études expérimentales, actuellement en cours sur les modules dynamiques des massifs rocheux par essais sismiques, devrait permettre d'avoir une idée de l'homogénéité, des zones saines et des zones de faiblesse du volume intéressé par un ouvrage souterrain.

Dans le cas des études de canaux, implantés dans des séries continentales bien connues, l'étude géologique débouche directement sur la classification géotechnique des terrains rencontrés et plus spécialement sur leur ripabilité, leur stabilité, leur valeur comme recharge ou comme terrain de fondation ; les terrassements n'excédant généralement pas 20 m, les levés de surface permettent toujours d'excellentes approximations.

Dans le cas des galeries comme dans le cas des canaux, l'étude géologique doit être le support permanent du projet jusqu'à son ultime phase d'exécution, en termes directement utilisables pour les travaux.

C'est ce que nous avons essayé de démontrer ici pour le stade primordial du projet.

ooOoo

BIBLIOGRAPHIE

Les ouvrages cités constituent l'essentiel des travaux qui intéressent la zone étudiée. Des listes plus complètes figurent dans les op. cit. n° 3 et 24.

- 1 - AUBOIN J. 1953 - Un exemple de tectogénèse en Provence
C.R. somm. SGF pp. 230-232
- 2 - " 1961 - Propos sur l'orogénèse : I - Propos statique
II - Propos dynamique
Bull. Serv. Inf. Géol. Bur. Rech. Géol. et min. - n° 52 - pp. 1 - 21
n° 53 - pp. 1 - 24
(suppl. Chronique Mines et Recherches min. n° 300 et 302)
- 3 - " et MENNESSIER G. 1960-1962 - Essai sur la structure de la Provence - Extrait du livre à la mémoire du Professeur Paul FALLOT consacré à l'évolution paléogéographique des domaines méditerranéens et alpins d'Europe - Tome II
Mémoire hors série de la société Géologique de France.
- 4 - BARBIER R. 1960 - Le rôle des paléokarsts dans la formation des réseaux karstiques actuels et leurs répercussions sur l'hydrologie de ces régions.
C.R. somm. SGF - 1960, fasc. 3 - pp. 59-60
- 5 - BELLAIR P. 1938 - Sur le style tectonique des accidents provençaux
C.R. Ac. Sc. t. 206 - pp. 924-925
- 6 - BENEVENT E. 1937 - Sur l'agencement et l'évolution du relief de la Basse Provence calcaire
Ann. géogr. t. 46 - pp. 494-508
- 7 - BERTRAND L. 1943 - Sur le rôle des glissements par gravité et des décollements dans la tectonique provençale.
C.R. Somm. SGF - pp. 24-25
- 8 - BERTRAND M. 1894 - Sur les bandes triasiques de Barjols et Rians
B. Serv. Carte Géol. Fr. - t. VI - n° 38 - pp. 105-106
- 9 - " 1895 - Sur les plis des environs de Rians
C.R. Somm. SGF (3) XXIII - p. 92
- 10 - BILLEREY A. 1958 - La signification morphologique des découvertes d'oeufs de Dinosauriens dans le bassin d'Aix-en-Provence
Ann. Fac. Lettres Aix - t. XXXII - p. 227
- 11 - " 1960 - Un rejeu quaternaire de la montagne Sainte-Victoire
"Méditerranée" n° 2-3 - p. 3
- 12 - " 1962 - Etude morphologique de la montagne Sainte-Victoire
Géographia Helvetica XVII - Heft 4
- 13 - " et DUGHI R., SIRUGUE F. Les oeufs de Dinosaures et la datation des brèches de Sainte-Victoire
C.R. séances de l'Académie des Sciences, t. 248 - pp. 272-274

- 14 - CHARLES R.P. 1948 - Le Lias de la Basse Provence occidentale. Etude paléontologique et paléobiologique (Thèse univ. de Marseille)
- 15 - " 1949 - Le Trias de Provence et la nouvelle nomenclature stratigraphique du Trias germanique
C.R. Somm. SGF - pp. 67-72
- 16 - " et MERISSE M.H. 1949 - Les faciès du Dogger dans le département des Bouches-du-Rhône et contrées limitrophes
Contrib. à l'étude des terrains Jur. en B.P. occidentale
Bull. Mus. hist. nat. de Marseille - t. IX - n° 4 - pp. 191-211
- 17 - CHEYLAN G. 1947 - Etudes stratigraphiques et tectoniques de l'Olympe. D.E.S. Marseille
- 18 - COLLOT L. 1877 - Sur une carte géologique des environs d'Aix-en-Provence
B.S.G.F. (3) - t. V - pp. 448-465 et Rev. Soc. Sav. (6) - t. V - p. 37
- 19 - " 1890-1891 - Description des terrains crétacés dans une partie de la Basse Provence
B.S.G.F. (3) t. XVIII - pp. 49-102
t. XIX - pp. 32-92
- 20 - " 1891 - Les plis couchés de la feuille d'Aix
B.S.G.F. (3) - t. XIX - p. 39
- 21 - COMBALUZIER C. 1932 - Le Miocène de la Basse Provence
Bull. Serv. Carte Géol. Fr. - t. XXXV - n° 182 - pp. 445-623
- 22 - " 1932 - Thèse Paris
- 23 - COQUAND M. 1869 - Constatation des étages kimmeridgiens et portlandiens fossilifères de la Provence
B.S.G.F. (2) - t. XXVI - p. 854
- 24 - CORNET C. 1965 - Evolution tectonique et morphologique de la Provence depuis l'Oligocène
Mém. de la SGF (n° 103), nouvelle série, t. XLIV - Fasc. 2
- 25 - CORROY C. 1942 - Les plis couchés de Provence en face de la théorie de l'écoulement par gravité
C.R. Somm. SGF - pp. 206-208
- 26 - " 1945 - Structure générale du massif de la Sainte-Victoire
C.R. Trav. Fac. Sc. Marseille, t. VIII - p. 113
- 27 - " 1945 - Présence du Valanginien dans le massif de la Sainte-Victoire
C.R. Somm. SGF - p. 173
- 28 - " 1946 - Les brèches de Sainte-Victoire
C.R. Somm. SGF - pp. 206-208
- 29 - " 1957 - La montagne Sainte-Victoire
Bull. Serv. Carte Géol. Fr. - t. LV - n° 251 - pp. 1-47
- 30 - " 1957 - La limite entre le Crétacé et le Tertiaire en Provence occidentale
C.R. Somm. SGF - pp. 286-287
- 31 - " 1962 - L'évolution paléogéographique post-hercynienne de la Provence
In "Livre à la mémoire du Professeur Paul FALLOT"
T. II - pp. 19-43 - Mem. hors série Soc. géol. France

- 32 - CORROY G. et BERNARD 1948 - Les eaux profondes de Haute Vallée de l'Arc
Ann. Fac. sc. Marseille, série 2 - t. XIX - Fasc. 3
- 33 - " et CHEYLAN G. 1949 - Le pli de l'Olympe au Sud-Est du bassin d'Aix
C.R. Somm. SGF - pp. 172-173
- 34 - " et DENIZOT 1935 - Guide géologique de la Provence occidentale
Ann. Fac. Sc. Marseille - t. VII - Fasc. 1
- 35 - " et DURAND J.P., TEMPIER Cl. 1964 - Evolution tectonique de la montagne de la Sainte-Victoire en Provence
B.S.G.F. (7) - t. VI - pp. 91-106
- 36 - " et STRETTA E. 1947 - Précisions tectoniques concernant le Mont Aurélien et ses abords à l'Ouest de Saint-Maximin (Var)
C.R. Somm. SGF - p. 94
- 37 - " et VINCENT H. 1959 - Etude géologique du pli du Grand Sambuc et de la Plaine de Rians
Ann. Fac. Sc. Marseille - t. 29 - p. 281-316
- 38 - DUGHI R., REY R. et SIRUGUE F. 1959 - La limite supérieure du Crétacé continental dans le bassin d'Aix-en-Provence
C.R. Ac. Sc. - t. 249 - pp. 2370-2372
- 39 - DURAND J.P. et GUIEU G. 1966 - La région Sud-orientale du bassin de l'Arc et la bordure de l'Aurélien et du Défens de Saint-Maximin
Bull. Museum Hist. Nat. Marseille - t. XXVI
- 40 - " et MENNESSIER G. 1964 - Sur l'existence d'une discordance entre le Bégudo-Rognacien et le Fuvélien à l'extrémité orientale du synclinal de l'Arc en Basse Provence occidentale
C.R. Somm. SGF - pp. 253-254
- 41 - " et TEMPIER Cl. 1961 - Sur la présence du faciès purbeckien sur le versant méridional du chaînon de Sainte-Victoire près d'Aix-en-Provence
C.R. Somm. SGF - pp. 122-123
- 42 - GAUTIER M. 1930 - Contribution à l'étude pétrographique du calcaire portlandien
Ann. Fac. Sc. Marseille - 2ème série - t. IV - Fasc. III - pp. 253-276
- 43 - GOGUEL J. 1943 - Essai de synthèse tectonique de la Provence
B.S.G.F. (5) - t. XIII - pp. 367-382
- 44 - " 1952 - Traité de tectonique - Masson & Cie
- 45 - GUIEU G. 1965 - Structure du massif de Regaignas, Olympe, Aurélien (Bouches-du-Rhône et Var)
Ann. Fac. sc. Marseille - t. XXXVIII

- 46 - JODOT P. 1933 - Sur les divisions du Miocène supérieur continental dans l'Europe occidentale
C. R. 83ème congrès Soc. Sav. Paris et Départements Aix et Marseille.
Colloque du Miocène - pp. 201-205
- 47 - JUNG J. 1930 - Rapports des plis alpins et pyrénéens dans les chaînes subalpines méridionales.
Trav. Lab. Géol. Univ. Grenoble - t. XV - Fasc. 3 - pp. 61-82
- 48 - KILIAN W. 1904-1905 - Remarques sur la tectonique de la Basse Provence
Bull. Serv. Carte Géol. Fr. - t. XVI - n° 110 - pp. 171-173
- 49 - " 1906 - Remarques sur la tectonique de la Basse Provence
Ibid. - t. XVI - n° 110 - pp. 449-451
- 50 - LANQUINE A. 1929 - Le Lias et le Jurassique inférieur des chaînes provençales (Thèse Paris)
Bull. Serv. Carte Géol. Fr. - t. XXXII - n° 173 - p. 385
- 51 - " 1932 - Transformation profonde de calcaires dolomitiques, hettangiens, de faciès
provençal en roches cargneulisées
C. R. Somm. SGF - pp. 49-50
- 52 - " 1935 (a) - Le Jurassique moyen et supérieur des chaînes provençales
Bull. Serv. Carte Géol. Fr. - t. XXXVIII - n° 191 - pp. 183-317
- 53 - " 1935 (b) - Sur les relations du Trias de Saint-Maximin (Var) avec la terminaison
Sud-orientale de la chaîne de Sainte-Victoire et avec la terminaison
orientale de la chaîne de l'Olympe
C. R. AcSc. - t. 200 - pp. 2023-2025
- 54 - LAPPARENT A.F. de 1933 (a) - Sur l'existence des plissements d'âge crétacé en Provence
C. R. Somm. SGF - pp. 212-214
- 55 - " 1933 (b) - Sur le synclinal de Rians (Var)
C. R. Ac. sc. - t. 197 - pp. 1441-1443
- 56 - " 1935 - Sur l'âge tortonien des terrains lacustres situés au Nord de Saint-Maximin (Var)
C. R. Somm. SGF - pp. 88-90
- 57 - " 1935 - Sur la bande triasique de Barjols (Var)
C. R. Ac. Sc. - t. 201 - pp. 282-284
- 58 - " 1938 - Etudes géologiques dans les régions provençales et alpines entre Var et la
Durance (Thèse Paris)
Bull. Ser. Carte Géol. Fr. - t. XL - n° 198
- 59 - LEMOINE P. 1909 - Sur les relations tectoniques du tremblement de terre de Provence
C. R. Ac. Sc. - t. 148 - pp. 1696-1698
- 60 - LUTAUD L. 1935 - Sur la gène des chevauchements et écaillés de la Provence calcaire
C. R. Somm. SGF - pp. 261-264
- 61 - " 1957 - La tectogénèse et l'évolution structurale de la Provence
Rev. Géogr. Phys. et Géol. dyn. (2) - t. I - Fasc. 2 - pp. 103-112
- 62 - MENNESSIER G. 1959 - Etude tectonique des confins alpins-provençaux entre le Verdon et l'Argens
(Thèse Paris) - Mém. SoC. Géol. France - nouvelle série - t. XXXVIII -
n° 87

- 63 - MOLINIER et PRAT 1943 - Remarques sur l'évolution du climat en Provence
Bull. Mus. Hist. nat. Marseille - t. III - n° 4
- 64 - NICOD J. 1954 - Les Lapiès en Basse Provence
Rev. Géogr. alpine - t. XLII - pp. 301-319
- 65 - REPELIN J. 1909 - Rôle des dislocations les plus récentes (post-miocènes) lors du séisme du
11 juin 1909
C. R. Ac. Sc. - t. 149 - pp. 1023-1024
- 66 - ROUSSET Cl. 1963 - Les formations continentales tortoniennes dans le bassin de Jouques
(Bouches-du-Rhône)
Trav. Lab. Géol. Fac. Sc. Marseille - t. VII - pp. 147-157
- 67 - " 1964 - Les limites de la transgression miocène en Vautubière (Jouques, Bouches-
du-Rhône). Influences tectoniques
B. S. G. F. (7) - t. VI - pp. 117-120
- 68 - STRETTA E. 1946 - Etude stratigraphique et tectonique du Mont Aurélien et de ses abords
D. E. S. Marseille
- 69 - TEMPIER Cl. 1961 - Etude tectonique du double pli des Pallières à l'Est de Rians
D. E. S. Marseille
- 70 - " 1966 - Les faciès du Jurassique terminal en Provence
C. R. Ac. Sc. - t. 262 - n° 9 - p. 958
- 71 - TOURAINE F. 1963 - A propos du Purbeckien signalé dans la montagne Sainte-Victoire
C. R. Somm. SGF - p. 46
- 72 - " 1964 - Sur la datation des brèches de Sainte-Victoire près d'Aix-en-Provence
B. S. G. F. (7) - t. VI - pp. 127-133
- 73 - " 1964 - Les grands traits d'une structure nouvelle proposée pour le massif de
Sainte-Victoire
- 74 - " 1965 - Phases terminales et tectogénèse de la montagne Sainte-Victoire
B. S. G. F. (7) - t. VII - pp. 59-63
- 75 - VASSEUR G. 1897 - Note préliminaire sur la constitution géologique du bassin tertiaire d'Aix-
en-Provence
Ann. Fac. Sc. Marseille - t. VIII - n° 6 - pp. 163-172
- 76 - VINCENT H. 1958 - Etude géologique du pli du Grand Sambuc et de la plaine de Rians
D. E. S. Marseille

Principaux errata

- Page 20 - Dernière ligne : lire "La pression de gonflement détermine ..."
- Page 20 - Ligne 15 : lire "La pression de préconsolidation minimum correspond à l'abscisse du point où la partie ..."
- Page 45 - Ligne 32 : lire "Ceci est illustré par la figure 11"
- Page 51 - Avant-dernière ligne : lire "Entre les sondages électriques 12 et 31 ..."
- Page 52 - 1ère ligne : lire "Le puits de Rians entre les sondages électriques 6 et 4"
- Page 73 - 2ème paragraphe: lire "Les mines de lignite de Gardanne situées à moins 600 m"
- Figures 28-29-30 : α (teneur en eau) est exprimé en %
- Page 87 - 3ème ligne à partir du bas : lire "On observe alors ..."
- Page 92 - Paragraphe 5 a): "Etude comparative des différents tracés (fig. 39)"
- Paragraphe "Tracés I et II :
"... jusqu'à la fenêtre de Verdagne (PM.2700)"

Vu,
Grenoble, le
Le Président de la Thèse,

R. BARBIER

Vu,
Grenoble le,
Le Doyen de la Faculté des Sciences,

E. BONNIER

Vu, et permis d'imprimer
Le Recteur de l'Académie de Grenoble,

M. NIVEAU