SNCF

Région de Marseille

Division de l'Equipement

TUNNEL DU BRAUS

(Alpes Maritimes)

ETUDE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

B. DELLERY _ G. DUROZOY

avec la collaboration de

A. GOUNON _ H. PIRREDU _ P. CHABALIER

BUREAU DE RECHERCHES GEOLOGIQUES ET MINIERES

SERVICE GEOLOGIQUE NATIONAL

Service géologique régional PROVENCE-CORSE

Domaine de Luminy _ Route Léon Lachamp

13009 _ Marseille

75 SGN 005 PRC

Janvier 1975

R E S U M E

A la demande de la S.N.C.F., région de Marseille, division de l'Equipement, le Service géologique régional Provence - Corse du B.R.G.M. a effectué une étude géologique et hydrogéologique de l'environnement du tunnel du Braus (06) et plus spécialement une étude hydrogéotechnique sur le dernier kilomètre, côté Sospel où des désordres dans le revêtement et le radier se manifestent depuis la création de l'ouvrage.

Les désordres sont dus à la présence de gypse et d'anhydrite qui constituent le rocher encaissant et qui sous l'action des eaux et des phénomènes atmosphériques provoquent soit des cavités, soit des gonflements.

L'étude géologique et hydrogéologique du tunnel s'est faite sur le terrain. Un jaugeage de chaque venue d'eau (source, exhaure) répertoriée a été réalisé en période d'étiage.

Dans la zone où des désordres sont constatés, une campagne de 11 sondages carottés et 20 sondages (perforateur) a été effectuée en radier. Les sondages ont fait l'objet d'essais de débits quantitatifs et de prélèvements en vue d'analyse chimique.

Ce rapport fait le point des investigations et rend compte des phénomènes. Il tente de les analyser, propose des palliatifs à réaliser rapidement (travaux de première urgence), mais n'étudie pas le problème de la réfection du soutènement du tunnel qui ne doit être envisagée que dans un deuxième stade lorsque les travaux de première urgence auront montré un résultat.

Aucun travail de grande envergure ne peut être envisagé avant un assainissement complet de cette partie du tunnel.

S O M M A I R E

- Résumé page 2

1 - Introduction - problème posé 5

2 - Rappel des caractéristiques du tunnel 6

3 - Rappel des travaux exécutés 6

4 - Géologie régionale 6

5 - Terrains recoupés par le tunnel 7

6 - Hydrogéologie régionale 8

6.1. - Tertiaire 8
6.2. - Secondaire 8
6.3. - Jurassique 9
6.4. - Trias 10

7 - Hydrogéologie du tunnel 10

7.1. - Importance des venues d'eau rencontrées dans ce tunnel 12

8 - Zone de l'anhydrite 14

8.1. - Nature des terrains 14

9 - Nature de la roche 14

10 - Présence de vides 15

11 - Circulation des eaux 16

12 - Assainissement actuel 16

13 - Mouvements du radier et désordres du revêtement 17

14 - Problèmes existants 18

15 - Propositions 19

16 - Conclusions 21

Documents consultés 22

LISTE DES ANNEXES

1 - Environnement géologique et hydrogéologique

2 - Géologie de surface de la zone étudiée

3 - Coupe géologique du tunnel

4 - Schéma d'assainissement du tunnel

5 - Position du niveau aquifère et nature des terrains dans la zone étudiée

6 - Coupes des sondages

7 - Diagramme d'analyse d'eau

Ingénieurs responsables de l'opération et rédaction du rapport : B. DELLERY, G. DUROZOY

avec la collaboration de : A. GOUNON, H. PIREDDU, P. CHABALIER

Dessinateur : D. FERLAY

Secrétariat : E. BRUNET

Ce rapport contient 22 pages et 7 annexes

1 - INTRODUCTION - PROBLEME POSE

Le tunnel du Col de Braus,a été creusé de juin 1912, côté Nice et mars 1913, côté Breil, à 1922. La géologie, étudiée à l'origine par KILIAN, est connue par les nombreux travaux qui ont été exécutés depuis sa foration, a toujours posé des problèmes de tenue sur 1,100 km, côté Sospel, lors de la traversée du Trias constitué essentiellement par du gypse et de l'anhydrite.

L'examen particulier de ces problèmes de tenue sera fait dans le contexte géologique et hydrogéologique dans lequel se développe le tunnel. La sortie nord-est nécessite une attention spéciale, en effet des désordres ont été constatés sur 1 100 mètres peu après l'achèvement du creusement.

L'objectif de cette étude est donc une analyse détaillée qui doit permettre de prendre en toute connaissance de cause, les décisions de réfection ou de confortement:

- définition du rôle de l'eau dans les phénomènes de dissolution et de gonflement dans le gypse et l'anhydrite

- définition du rôle du système actuel de drainage du tunnel

- recueil du plus grand nombre d'informations en vue de la programmation des travaux de réfection de première urgence.

2 - RAPPEL DES CARACTERISTIQUES DU TUNNEL

Le tunnel est situé sur la ligne Nice-Coni entre les PK 25,336 et 31,273 soit une longueur de 5 937 mètres. Il est orienté SSW-NNE et est rectiligne, son profil passe par un point haut avec une pente de 0,002/p.M. côté Touet et une pente de 0,009/p.M. côté Sospel.

Il se présente sous la forme d'un ouvrage dimensionné pour recevoir deux voies bien que la ligne soit actuellement à voie unique. La hauteur, de la voûte au rail, est de 6,10 m et la largeur de 8 mètres à la base des piédroits, et de 8,60 mètres à la naissance de la voûte.

La hauteur maximale de couverture est de 700 mètres environ.

3 - RAPPEL DES TRAVAUX EXECUTES

- une étude hydrogéologique de l'environnement du tunnel avec jaugeages des sources en surface et jaugeages des débits d'exhaure du tunnel.

- une étude du système de drainage

- une campagne de 11 sondages de 5 mètres environ, associée à 20 sondages au fleuret répartis sur les 1 100 mètres côté Sospel afin de déceler les vides éventuels sous le radier car des cavités importantes auraient constitué des dangers pour la tenue du rail. L'ensemble des ouvrages a été équipé de tubes piézométriques.

4 - GEOLOGIE REGIONALE (annexe 1)

Le secteur traversé par le tunnel du Col de Braus correspond à une grande structure synclinale d'axe NW - SE. C'est la direction générale des plis affectant la couverture secondaire du massif cristallin de l'Argentera - Mercantour, décollée pendant le Miocène au niveau du Trias argilo-gypseux et ayant glissé vers le SW.

Cette structure synclinale est, en plus, écaillée au SW et chevauchante dans cette direction; cet écaillage s'effectue au niveau des assises calcaires jurassiques. Au NE cette structure est interrompue par l'accident Menton - Sospel - Brigue, d'âge plus récent, faisant affleurer le Keuper argilo-gypseux, largement extravasé. Le Crétacé et le Jurassique du synclinal de Braus sont très mylonitisés le long du contact anormal et témoignent de l'importance des mouvements tectoniques. A l'Est de l'affleurement triasique la couverture secondaire constituant le massif de l'Albarée est elle-même chevauchante vers l'Ouest.

Au sein du Trias,le massif du Mont Barlonnet apparaît comme une écaille (série renversée).

5 - TERRAINS RECOUPES PAR LE TUNNEL (Annexes 2 et 3)

Le tunnel s'inscrit dans la succession lithologique suivante de Touet à Sospel; elle confirme la position synclinale des terrains encaissants:

- calcaire gris marneux du Crétacé supérieur	de 0	à 820,00
- faille		
- calcaire compact du Jurassique	de 820,00	à 1544,00
- marne calcaire du Crétacé inférieur	de 1544,00	à 1740,00
- marne calcaire du Crétacé supérieur	de 1740,00	à 3650,00
- marne calcaire du Crétacé inférieur	de 3650,00	à 4000,00
- calcaire compact gris du Jurassique	de 4000,00	à 4820,00
- faille	de 4820,00	à 4850,00
- anhydrite, gypse, schiste noir	de 4850,00	à 5750,00
- éboulis de pente	de 5750,00	à 5937,00

Les terrains tertiaires (figurés sur la carte géologique) qui affleurent dans l'axe du synclinal au sommet du Col n'ont, bien entendu, pas été recoupés en profondeur par le tunnel.

6 - HYDROGEOLOGIE REGIONALE (cf. annexe 1)

Les différentes formations aquifères sont étudiées ainsi que les sources qui constituent leurs exutoires afin de définir en fonction de la pluviométrie, la part de l'eau qui peut d'infiltrer vers le tunnel.

6.1. - Tertiaire

Les marnes priaboniennes sont pratiquement imperméables. Les calcaires et marno-calcaires du Lutétien et du Priabonien inférieur affleurant dans l'axe du synclinal de Braus, sont drainés au point bas de ces affleurements à la source du Pissaour (cote 850 - 4 l/sec en décembre 1974).

A Touet de l'Escarène, la source du village (cote 350 - 0,5 l/sec décembre 1974 - T° 14°) sourd à la base de l'Eocène.

6.2. - Secondaire

Les calcaires et marno-calcaires du Crétacé supérieur sont aquifères; ils alimentent les sources suivantes:

DESIGNATION	DATE	COTE	DEBIT	TEMPERATURE
- en dehors du synclinal de Braus				
source de la Baronne au contact du Keuper au NE de Sospel		470	1,2 l/s	12°
- dans l'unité du synclinal de Braus				
sources de Paradis (ou Paraïs) haut 3 émergences	12.74	700 à 900	total 1,8 l/s	9°
source du Col St Jean	12.74	710	0,4 l/s	9°
source de Millon	12.74	650	0,1 l/s	

DESIGNATION	DATE	CÔTE	DEBIT	TEMPERATURE
- sur le versant nord oriental les sources de Pierafeu, de Merdaric (3 émergences)	12.74	680 580 505 386	0,4 l/s 0,04 l/s 0,5 l/s 0,6 l/s	14° 14° 14° 13°
- enfin, le tunnel du Col de Braus a rencontré des venues d'eaux importantes à la traversée de la partie orientale du synclinal. Elles seront examinées plus loin.		414	27 l/s	12°5 (1)

Le Crétacé inférieur (grès verts glauconieux, marnes gréseuses) alimente quelques petites sources au Nord et à l'Est de l'Escarène, la source de La Barma (cote 550 - débit 0,05 l/s - T° 15°) et celle d'Arnuf (cote 480 - débit 0,9 l/s - T° 13°); pour cette dernière, le rôle des éboulis dans l'alimentation paraît important.

6.3. - Jurassique

Dans le massif du Mont Meras, au Sud de Sospel, les calcaires et dolomies du Jurassique sont très aquifères; ils alimentent les sources de Sambola (cote 610 - débit 2 l/s - T° 10°) et du Génie (cote 687 - débit 0,4 l/s).

Dans l'unité du Col de Braus, sur la bordure nord orientale, existent les sources de Paradis basses (ou Paraïs - 4 émergences entre les cotes 400 et 500 - 0,1 l/s)(2) au contact du Keuper et sur la bordure

(1) *12°5 le 6 décembre 1971 (13° au puits de l'hydro-éjecteur) 10°5 le 17 janvier 1974.*

(2) *Cette source tarit en été. Avant le percement du tunnel du Col de Braus le débit était de 20 à 30 l/s; la source a été tarie lors de la rencontre des principales venues d'eau dans le tunnel. Le Jurassique draine donc le Crétacé supérieur.*

occidentale, celle de Tordo (cote 550 - débit 1 l/sec). Le tunnel du Col de Braus a rencontré des venues d'eau à la traversée de l'écaille jurassique de la bordure occidentale (cote 450 - débit 3 l/sec), mais pas à la traversée des calcaires à la bordure orientale (drainage probable par le Keuper).

6.4. - Trias

Dans le Keuper de Sospel se situe la source "Le Teinturier" (cote 400 - débit 0,10 l/sec - T° 12°). Le Keuper est en effet perméable (dolomies, fissures et conduits de dissolution dans le gypse) et doit drainer les formations de bordure (dont l'écaille de calcaires et dolomies du Mont Barlonnet à Sospel); il est lui-même drainé par la Bevera.

7 - HYDROGEOLOGIE DU TUNNEL

Lors du percement du tunnel des venues d'eau ont été rencontrées (le débit a atteint 220 l/sec). Les plus importantes se trouvent à peu près à mi-parcours dans la traversée de la partie la plus calcaire de la série des marno-calcaires, calcaires et marnes du Crétacé supérieur (au PK 28,680) et dans le Jurassique immédiatement à l'amont du contact avec l'anhydrite du Keuper où un débit de 8 l/sec a été constaté.

Un captage important a été réalisé au point kilométrique 28,680 à la cote 414,3 [1]. Il recueille les eaux rencontrées dans une grande cavité naturelle découverte derrière le parement NW et un peu au-dessus du niveau de la clef de voûte. A la même hauteur, dans le tunnel, des venues d'eau ont également été rencontrées dans la paroi SE; elles sont collectées à la base du parement et doivent être évacuées par une canalisation vers Sospel: les mises en charge derrière le parement seront ainsi évitées.

---

(1) *Ce captage sert à l'alimentation humaine et à l'alimentation d'un bélier hydraulique servant à refouler les eaux d'un puits de colaiure exécuté vers l'extrêmité NW du tunnel. Le débit nécessaire au fonctionnement est de 30 l/sec (lorsque ce débit n'est pas fourni il est prévu la mise en route d'une pompe électrique).*

Le débit total de ce captage varie suivant les saisons entre 20 et 80 l/sec, l'annexe 4 montre le schéma de l'exhaure de ces eaux et leur direction.

Un récent jaugeage de la chambre de captage et du radier (effectué en décembre 1974) a fourni un débit supérieur à 27 l/sec:

- 6 l/sec servant à l'alimentation de l'Escarène
- 9,4 l/sec servant à l'alimentation de Sospel
- 1,6 l/sec partant pour le caniveau central côté Escarène
- 10 l/sec partant pour le caniveau central côté Sospel
- x partant pour l'hydro-éjecteur (non mesurable)

La petite galerie parallèle au tunnel, creusée au niveau de la clef de voûte à une vingtaine de mètres derrière le parement, accessible par un escalier et jouant le rôle de galerie de captage, montre que les terrains traversés correspondent ici à des calcaires marneux (Crétacé supérieur constituant le flanc est du synclinal) en petits bancs inclinés à 45° au SW et recoupés par des fissures ouvertes ou des filonnets de calcite de pendage 6° NE; les calcaires sont ici affectés par un système de failles et fractures.

Sur la section du tunnel correspondant à la traversée des calcaires dans le secteur aquifère, des venues d'eau où des dépôts carbonatés sont visibles sur toute la surface de la voûte et des parements; ces eaux (bicarbonatées calciques) sont évidemment très incrustantes (cf. diagramme logarithmique annexe 7).

Il faut signaler que les venues d'eau se trouvent à l'aplomb de la limite orientale des affleurements de calcaires éocènes en surface mais surtout qu'elles sont localisées dans une zone très faillée et située au NE d'un secteur où des changements fréquents de la direction du pendage ont été notés lors de l'exécution de l'ouvrage. Il est vraisemblable que dans ce secteur les terrains en profondeur sont encore plus bouleversés ainsi que le remarque B. GEZE (caractères structuraux

de l'arc de Nice - Livre à la mémoire de P. FALLOT - 1960 -) "beaucoup de plis, qui paraissent peu intenses au niveau du Crétacé ou du Tertiaire, doivent recouvrir des couches infiniment plus ac cidentées" et l'allure tranquille du Crétacé supérieur du Mont Panard, au SW du tunnel, mais recouvrant une écaille couchée de Jurassique, est justement un exemple de ce fait.

Les venues d'eau constatées au contact Jurassique - Keuper ont été collectées par un puits avec une galerie creusée au PK 30,123. Celui-ci est profond de 12,30 mètres par rapport à la plateforme et se situe à 24 mètres en amont de la faille. De ce puits part, à 9,37 mètres de profondeur, une galerie longitudinale et oblique qui se termine au PK 30,170. Ces ouvrages ont pour but de recueillir les eaux infiltrées dans la faille et dans les calcaires et d'éviter leur circulation vers l'anhydrite. Elles sont évacuées par le système de l'hydro-éjecteur que nous étudierons plus loin.

Dans l'anhydrite des circulations d'eau existent également (conduits et poches de dissolution), assez diffuses à la hauteur du tunnel et qui n'ont pu être mises en évidence par la campagne de sondages.

7.1. - Importance des venues d'eau rencontrées dans ce tunnel (Crétacé supérieur et Jurassique de la partie orientale)

Les terrains constituant l'impluvium admissible ont au maximum une surface d'une centaine de km^2 (Crétacé supérieur limité au Nord à la latitude de la cîme du Gros de Braus et au Sud aux Monts Farguet et Panard; le Crétacé inférieur peu perméable est exclu et le Jurassique de Touet de l'Escarène égelement puisqu'il est drainé aux sources du tunnel et du Tordo).

Les précipitations annuelles sont de l'ordre de 1 200 mm. Le volume annuel des précipitations $100. 10^6 m^2 \times 1,2 m = 120. 10^6 m^3$ ou 3,780 l/sec.

Le coefficient d'infiltration brute, compte-tenu de la nature des terrains - marno-calcaires dominant - et le très fort relief favorisant le ruissellement doit être au maximum de 15% et plus probablement compris entre 5 et 10%; le volume annuel correspondant serait donc compris entre 190 et 380 l/sec environ.

Le débit total des résurgences connues se répartit ainsi pour décembre 1974:

- Col Saint Jean	0,4 l/sec
- Paradis (ou Paraïs) hautes	1,8 l/sec
- Paradis (ou Paraïs) basse	0,1 l/sec
- Millon	0,1 l/sec
- Diverses petites émergences (dans le Keuper drainant)	5 l/sec
	7,4 l/sec
- captages du tunnel	16 l/sec
- drainage sud du tunnel	18 l/sec
Total général entre	41 l/sec

Mais, ce jaugeage ponctuel ne peut être comparé avec le volume annuel correspondant. De plus, il a été effectué en période d'étiage.

Il est certain que la moyenne annuelle est nettement plus forte. Des jaugeages périodiques sont nécessaires si on veut approcher cette moyenne. Cependant, le volume total des venues d'eaux dans le tunnel n'avant pas dépassé 220 l/sec pendant les travaux, la surface admise de l'impluvium étant importante, on doit admettre un drainage général à une cote inférieure à celle du tunnel qui doit s'opérer vers la vallée de la Bévera par l'intermédiaire du Keuper. Ce calcul rapide qui ne prétend pas être un bilan puisque l'on ne connaît pas sur une année les débits des exutoires, montre que toutes les eaux tombées sur le massif ne sont pas entièrement drainées par le tunnel.

8 - ZONE DE L'ANHYDRITE

La reconnaissance géologique et hydrogéologique de cette zone où les désordres sont constatés depuis le creusement du tunnel, a été effectuée à l'aide de sondages et de perforateurs afin de reconnaître:
- la nature des terrains sous-jacents
- la présence de vides
- les circulations d'eau.

8.1. - Nature des terrains

Les onze sondages ont été exécutés tous les 100 mètres à partir de la tête Sospel et dans les intervalles ont été placés des perforateurs; les résultats acquis sont fournis en annexes 5 et 6.

Cette campagne a montré que:

- les différents sondages exécutés ont rencontré sous les remblais une zone d'anhydrite altérée sur plusieurs mètres, entre les PK 30,170 et 30,370 et entre le PK 30,770 et la sortie du tunnel. Entre ces deux zones altérées se situe l'anhydrite compacte.

9 - NATURE DE LA ROCHE

La roche encaissante représentant le Trias est un mélange d'anhydrite en rognons enrobés de schistes noirs du PK 30.200 au PK 30,470 puis par de l'anhydrite très cristallisée jusqu'au PK 30,770 et ensuite à nouveau par de l'anhydrite avec mélange de gypse, l'ensemble est rubanné, les analyses de cette roche effectuées en 1933 ont montré que l'on se trouvait devant une composition hétérogène:

	1er CAS	2° CAS	3° CAS
- Gypse ($SO_4Ca + 2H_2O$)	5,02 %	5,25 %	84,75 %
- Anhydrite (SO_4Ca)	58,36 %	81,09 %	2,69 %
- Argile + carbonate et silicate de chaux et de magnésie	36,35 %	13,42 %	12,48 %
- non dosé	0,27 %	0,24 %	0,08 %

ce qui tend à expliquer que les phénomènes de gonflement ou de dissolution sont inégalement répartis dans le tunnel.

Les essais mécaniques qui ont été faits sur quelques carottes de sondages (matériau compact) ont donné des résistances à la compression variant pour une anhydrite compacte de 165 bar à 480 bar et l'indice de traction compris entre 6 et 38 bar, ce qui est la caractéristique d'une roche saine; il faut donc voir uniquement dans les désordres, un phénomène d'altération.

10 - PRESENCE DE VIDES

Les sondages et les perforateurs n'ont pas montré la présence de vides généralisés en radier; seul le S 10 a constaté un vide de 0,60 m au PK 31,170. Cependant, un calcul simple permet de se rendre compte que les circulations d'eaux peuvent engendrer les vides dans ces formations.

Quatre prélèvements effectués dans les sondages ont montré des teneurs en sulfates importantes de l'ordre de 1,3 gr/l.

Si on admet que le débit issu de la zone du Trias est $\lesssim$ 8 l/s dans le tunnel, on a 8 l/s . 1,3 = 10,4 g/l/s qui sont lessivés ce qui représente 328 tonnes environ de matériau évacuées en un an, soit un volume de $\frac{328 \text{ tonnes}}{2,3} = 142,6 \text{ m}^3$ de vide en une seule année. Mais ce vide peut être en réalité très diffus et n'est pas nécessairement à l'origine de grosses cavités.

11 - CIRCULATION DES EAUX (cf. annexe 5)

Le relevé piézométrique effectué dans les sondages et les trous réalisés au perforateur a montré la présence d'un niveau d'eau dans presque tous les ouvrages se situant à 2 mètres environ sous le radier. Le débit est faible. Les pompages quantitatifs effectués sur les cinq ouvrages retenus ont montré que l'on arrivait très vite à l'assèchement des ouvrages pour des volumes extraits peu importants (voisins de 0,5 l/s). Seul le S 10 a fourni un débit de 1,42 l/sec pendant 3 heures avec un rabattement non stabilisé et une influence de 1 cm à 33 mètres de distance. Ceci est probablement dû à la présence du vide, constaté en radier, rempli d'eau. Les essais effectués avec des traceurs (fluoresceine) sont restés négatifs.

L'ensemble des observations permet de dire qu'il y a présence d'eau, mais en faible quantité et circulant peu; si on admet qu'une partie des eaux du Crétacé s'écoule par l'intermédiaire du Trias, ce qui semble vraisemblable, cette eau a pour niveau de base la Bevera qui coule sensiblement à la cote 362. La sortie du tunnel se situe à 392. Une charge de 30 mètres compte-tenu de la distance paraît peu vraisemblable. Les circulations d'eaux doivent s'effectuer donc plus bas et aucune venue d'eau, par remontée du plan d'eau de base n'est à attendre. La présence d'eau ne peut s'expliquer que par deux facteurs:

- les remblais, ou la zone altérée, jouent un rôle de drain, ou de magasin, pour les circulations d'eaux d'une part,
- ou bien, les ouvrages d'assainissement jouent mal leu rôle d'autre part.

12 - ASSAINISSEMENT ACTUEL

L'assainissement de cette zone a été exécuté pour empêcher toutes infiltrations des eaux en provenance de l'amont. Une galerie et un puits exécutés au PK 30,147 ont pour but, à l'aide de l'hydro-éjecteur, de maintenir un plan d'eau à une cote suffisamment basse

pour éviter toute infiltration dans le radier et collecter les eaux avant leur entrée dans le Trias.

Pour plus de sécurité un barrage existerait sur un banc indécomposable d'anhydrite vers le PK 30,764. Toutes les eaux de l'amont seraient rassemblées dans un puisard puis évacuées par siphonnage, à l'aide d'une conduite de 100 mm de diamètre, jusqu'à une galerie profonde placée à 140 mètres environ de la tête du souterrain côté Sospel soit au PK 31,134.

La deuxième sécurité a été placée en fait pour recueillir également les eaux du terrain encaissant or, la présence d'eau amène à conclure que les ouvrages fonctionnent mal car les deux visites effectuées à deux périodes différentes pour examiner la galerie de PK 30,147 ont montré que la tête de la galerie était noyée.

Une troisième sécurité, constituée par une pompe électrique, dite de secours, n'est plus en place.

L'exhaure jaugé sous le pont du chemin de fer, dans un canal, a fourni un débit de 18,6 l/sec, le drain central 10 l/sec, donc la différence de 8,6 l/sec peut provenir soit du débit prélevé par l'hydro-éjecteur au réservoir de répartition, soit de la galerie par aspiration (PK 30,147) soit du puisard par siphonnage (PK 30,764).

Ce volume d'eau provient plus sûrement du débit nécessaire à la marche de l'hydro-éjecteur, cependant ce débit reste trop faible pour que le fonctionnement s'effectue convenablement. On ne peut que constater la carence de ces ouvrages d'assainissement qui ne remplissent pas bien leurs offices, ce qui amène à penser que les désordres du radier sont imputables en grande partie à l'inefficacité de ces ouvrages.

13 - MOUVEMENTS DU RADIER ET DESORDRES DU REVETEMENT

Les mouvements et les désordres du revêtement constatés sur 1,100 km sont de deux sortes:

- la plateforme, et par là même le ballast, subissant des déformations en vagues, de longueur inégale et d'amplitude plus ou poins importantes (50 cm).

- Le revêtement du tunnel a subi des poussées qui se manifestent par des éclatements de moellons, des fissures verticales, horizontales, des poussées sur les murs de pierres sèches dans les niches d'élégissement, par endroits un vide existe entre la maçonnerie épaisse de 70 cm et le terrain.

Ces déformations, qui se sont manifestées depuis l'origine n'ont jamais pu être arrêtées. Malheureusement il est difficile de déterminer dans certains cas le sens des poussées. Si des auscultations ont été faites il y a un certain nombre d'années, elle ne se sont pas poursuivies. Il est regrettable que les mouvements ne soient pas suivis en différents points ce qui aurait permis d'étudier d'une manière plus approfondie la cause exacte.

Il n'en demeure pas moins que la nature physico-chimique de ce terrain, sous l'action de l'eau et de l'air humide, doit être d'une manière générale mise en cause. En effet, la roche anhydrite n'a pas une composition homogène: si dans le deuxième cas (cf. page elle est peu sensible à l'eau, dans le premier et le troisième cas elle peut subir une action de l'eau et de l'air importante qui amène alors une altération soit par gonflement, c'est à dire une hydratation modérée du gypse soit au contraire par dissolution des particules gypseuses et argileuses quand l'eau est en quantité excessive.

Il est donc nécessaire de s'affranchir de cette eau le plus possible et d'éviter également l'action de l'air humide.

14 - PROBLEMES EXISTANTS

La zone du Trias a posé, pose et risque de poser des problèmes. Des solutions seront proposées, elles doivent être envisagées graduellement en fonction des buts visés:

- 1°) deux zones particulières nécessitent un assainissement le plus complet possible (PK 30,147 - PK 30,764) indépendamment d'un assainissement généralisé.

- 2°) l'hydro-éjecteur fonctionne mal; est-ce le fait que les prélèvements d'eau pour les collectivités sont trop importants et que le débit minimum nécessaire à son fonctionnement n'est pas maintenu? Est-ce au contraire que l'appareil est détérioré?

- 3°) la pompe de secours doit être remise en service pour pallier une défection de l'hydro-éjecteur.

- 4°) le système de siphonnage au PK 30,764 ne remplit probablement pas son office; le barrage ou le puisard sont-ils fissurés? La canalisation de 100 mm est-elle déboitée dans le sol par endroits, par suite des mouvements du radier ? Les barbacanes dans la galerie et la galerie elle-même sont-elles envasées?

Voilà un certain nombre de questions que l'on peut se poser et qui restent provisoirement sans réponse.

15 - PROPOSITIONS

Devant l'ampleur des travaux envisagés, on doit se borner, dans un premier stade, à vérifier l'état des systèmes existants par des jaugeages périodiques. Ceci permettant en outre d'étudier le régime interannuel des eaux et par la même d'effectuer un bilan plus sûr.

On peut également se poser une question: faut-il conserver l'utilisation de l'hydro-éjecteur du fait que les collectivités locales demandent une dotation en eau de qualité de plus en plus grande et ne faut-il pas s'en affranchir vu son mauvais fonctionnement?

Une pompe électrique avec déclenchement automatique à flotteur ne peut-elle pas suffire à évacuer les eaux de la galerie après

que le captage de toutes les eaux calcaires ait été réalisé?

Il faut également découvrir le puisard, le barrage et la canalisation de 100 mm afin de vérifier l'état de ces installations. Il est vraisemblable que la galerie nécessitera aussi des travaux de nettoyage.

Ces travaux devraient permettre d'assainir le radier et de diminuer par la suite les désordres, les ouvrages de reconnaissance pouvant servir à vérifier la présence d'eau.

Le vide, qui n'est probablement pas le seul, devrait être traité par injection provisoire de consolidation et repris ultérieurement lors d'une campagne plus importante.

Dans un deuxième stade, pour les désordres en piédroits, une étude plus approfondie sur quelques anneaux devraient être réalisée avant d'envisager les travaux qui pourraient consister en:

- purge de quelques voûtes d'élégissement sur une centaine de mètres
- bourrage de béton derrière la maçonnerie en calotte et au piédroit
- revêtement rapide des zones purgées à l'aide d'un béton projeté en ciment sursilicé muni d'un grillage, épinglage de la zone, afin de soutenir et mettre la roche à l'abri de l'air humide à la suite de des travaux.
  Un contrôle mensuel des déformations à la règle de convergence est nécessaire afin de se rendre compte des mouvements éventuels. Si ceux-ci étaient stoppés une réfection généralisée pourrait être entreprise.

16 - CONCLUSIONS

L'étude géologique et hydrogéologique du dernier kilomètre du tunnel du Braus nous a amené à le replacer dans son environnement.

L'absence de jaugeages périodiques des exutoires ne permet pas d'approcher un bilan d'une façon sûre. Il serait nécessaire d'envisager , au moins pendant une année, l'étude du régime des eaux.

Ces eaux sont une des causes primordiales des désordres constatés en radier. Elles agissent soit par gonflement du terrain encaissant, soit au contraire par dissolution.

Dans un premier stade, un effort de remise en état de l'assainissement doit être envisagé et doit porter sur le fonctionnement de l'hydro-éjecteur. L'état du barrage en radier, le système de siphonnage, l'état du tuyau enterré de 100 mm et de la galerie de décurage.

Lorsque l'assainissement aura été rendu efficace et que l'on pourra s'affranchir de l'eau, une étude plus approfondie pourra être envisagée pour étudier les désordres des piédroits et y trouver des remèdes.

DOCUMENTS CONSULTES

Carte géologique de la France au 1/50 000 feuilles Nice - Menton et Saint Martin de Vésubie

M. LANTEAUME - Contribution à l'étude géologique des Alpes Maritimes franco-italienne - Mém. carte géologique de France 1968

B. GEZE - Caractères structuraux de l'arc de Nice - livre à la mémoire de P. FALLOT - 1960

A. RIVIERE - Recherches sur la tectonique des régions de la Roya et de la Bevera - B.S.C.G.F. n° 169 - T XXXI 1928

L. BERTRAND - Etude géologique du Nord des Alpes Maritimes B.S.C.G.F. n° 56 T IX 1897

Bassins côtiers à l'Est de Nice - bassins de la Bevera et de la Roya. Etude des ressources hydrogéologiques et hydrogéologiques du Sud Est de la France - fascicule 16 - Ministère de l'agriculture S R A E - B.R.G.M. 70 SGN 195 PRC - 1970

Archives S.N.C.F.

SNCF

Région de Marseille
Division de l'Equipement

Tunnel du Braus

(Alpes Maritimes)

Etude géologique et hydrogéologique

ENVIRONNEMENT GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

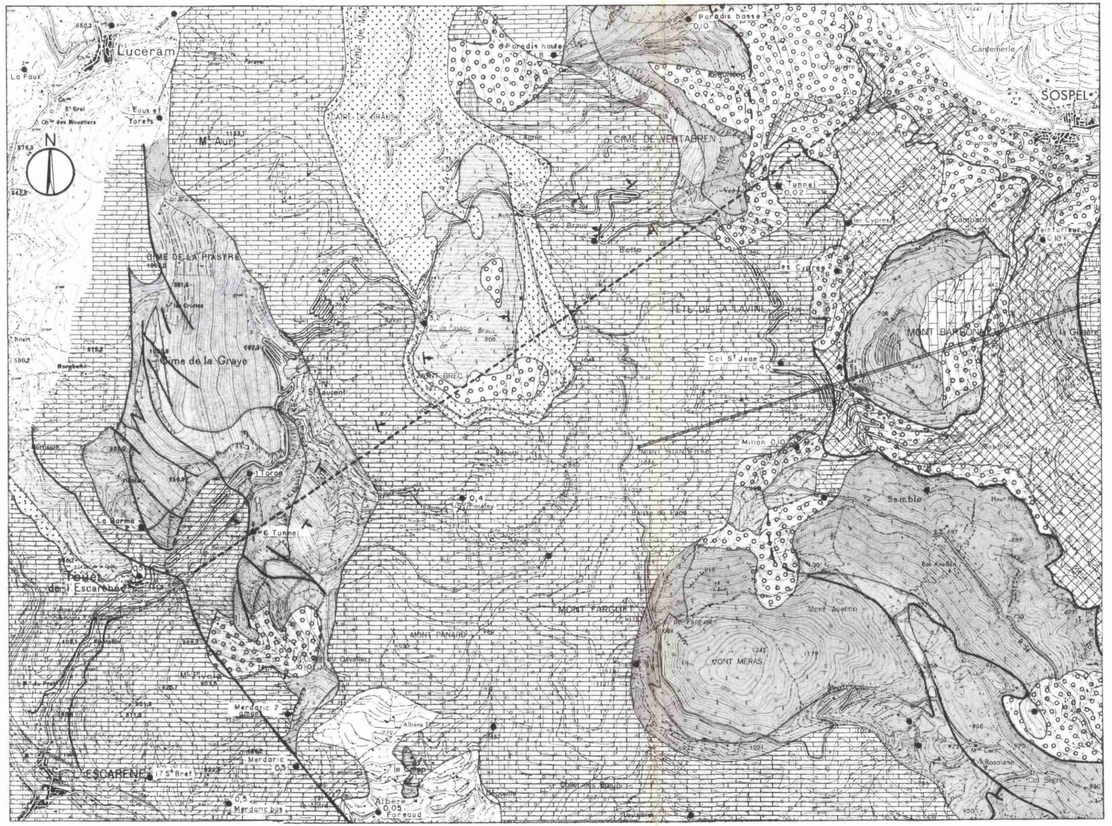
BRGM
SERVICE GEOLOGIQUE REGIONAL PROVENCE-CORSE

Annexe n° 1	MODIFICATIONS
Dessiné le : Janvier 1975	
75 SGN 005 PRC	

Légende

- Eboulis et alluvions
- g — Oligocène flysch argilo-gréseux
- e6.7 — Priabonien Marnes (marno-calcaire à la base)
- e5 — Lutécien Calcaire à Nummulite
- c3 e3.7 — Crétacé supérieur (c³ Turonien)
- n6 c2 — Néocomien à Cénomanien (grès vert glauconieux, marnes marno-calcaires)
- j1-9 — Jurassique calcaires et dolomies
- L — Lias Calcaires
- t3 — Trias supérieur gypse, dolomie, argile
- Faille ou contact anormal
- Mylonitisation (Jurassique et Crétacé supérieur)
- Cirque d'arrachement (glissement de terrain)
- Crétacé sup. mylonitisé affecté par des glissements de terrain ou avec risque de glissement
- Source et débit en l/sec.
- Venue d'eau en tunnel
- Courbe de niveau du terrain à la cote de sortie du tunnel du Braus
- Pendage
- Trace de coupe

Echelle : 1/25 000



SNCF

Région de Marseille
Division de l'Equipement

Tunnel du Braus

(Alpes Maritimes)

Etude géologique et hydrogéologique

GEOLOGIE DE SURFACE DE LA ZONE ETUDIEE

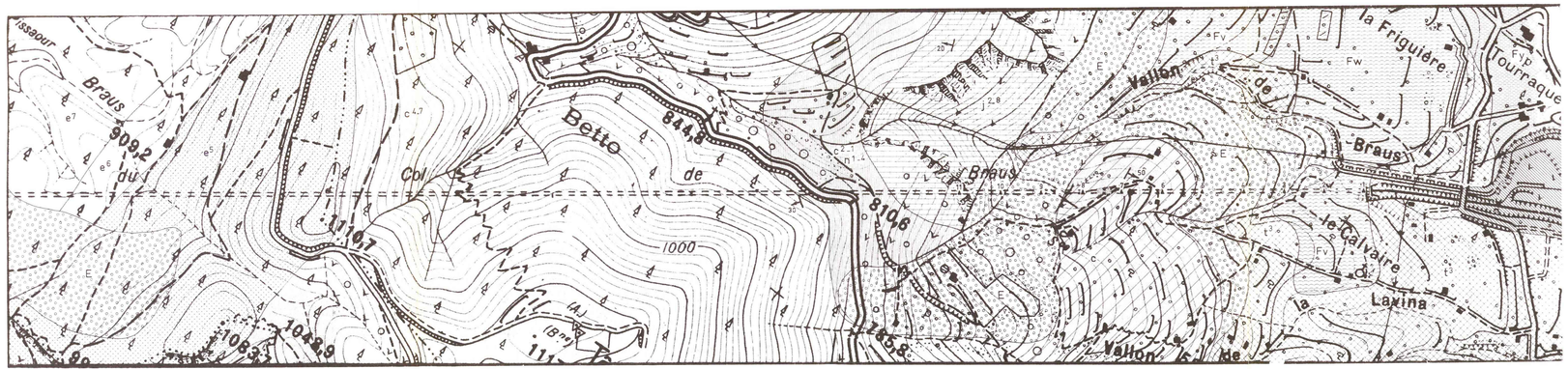
BRGM
SERVICE GEOLOGIQUE REGIONAL PROVENCE-CORSE

Annexe n° 2	MODIFICATIONS
Dessiné le : Janvier 1975	
75 SGN 005 PRC	

Légende

- Remblais
- E — Eboulis
- Fv — Alluvions récentes
- Fw – Fv — Alluvions anciennes (hautes terrasses, très hautes terrasses)
- e⁷ — Priabonien sup. Marnes bleues ou grises
- e⁶ — Priabonien inf. Marno-calcaires blanchâtres à grisâtres
- e⁵ — Lutétien Calcaire à nummulites
- C⁴⁻⁷ / c — Sénonien Calcaires marneux et marno-calcaires _ c mylonitisé
- c2-3 / n1-4 — Crétacé Calcaires _ marno-calcaires et grès glauconieux
- j2-8 — Jurassique Calcaires et dolomies
- t3 — Trias sup. Gypses, argiles,
- Faille
- Pendage
- Sondages COFRIZO (à l'intérieur du tunnel)

Echelle 1/5000



SNCF

Région de Marseille
Division de l'Equipement

Tunnel du Braus

(Alpes Maritimes)

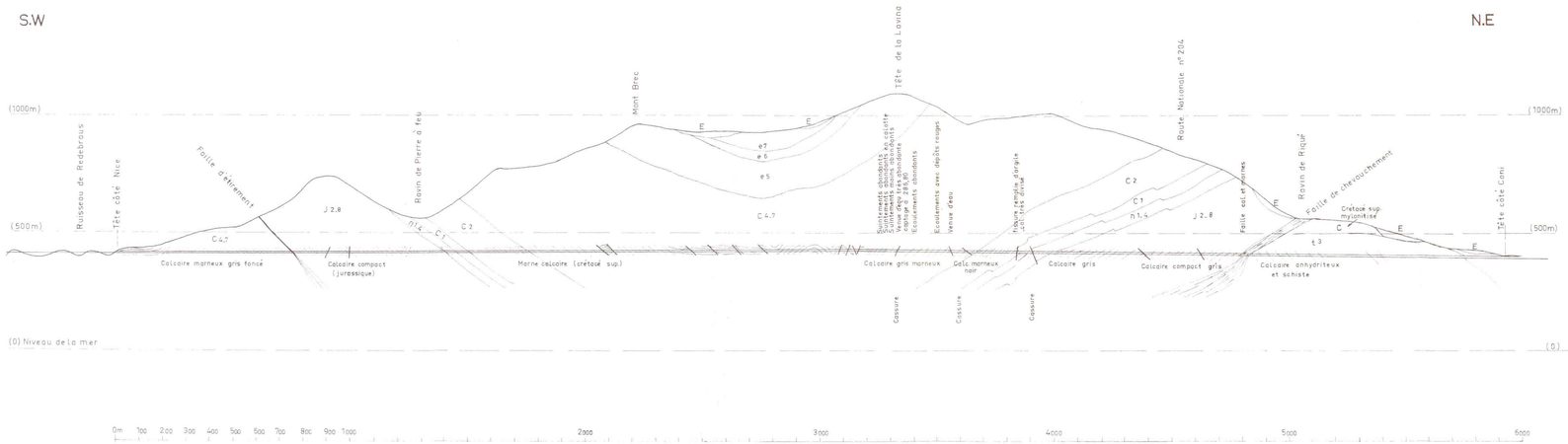
Etude géologique et hydrogéologique

COUPE GEOLOGIQUE DU TUNNEL

BRGM
SERVICE GEOLOGIQUE REGIONAL
PROVENCE-CORSE

Annexe n° 3	MODIFICATIONS
Dessiné le : Janvier 1975	
75 SGN 005 PRC	

Coupe dressée à partir d'observations faites en cours d'exécution
par M^le professeur Killian



E		Eboulis
e 7	Eocène	Ludien : Marne à serpula
e 6		Priabonien : Marno-calcaires à petites nummulites
e 5		Lutetien : Conglomérat et grès à grandes nummulites
c 4.7		Sénonien : Mames noires à bancs calcaires et marno-calcaires
C 2	Crétacé sup.	Cénomanien : Calcaires
C 1		Albien : Grès verts glauconieux
n 1.4	Crétacé inf.	Néocomien indifférencié calcaires marneux et marnes schisteuses
J 2.8		Jurassique sup. et moy. Calcaires fissurés
t 3	Trias	Gypse Anhydrite plus ou moins pure et schistes noirs

Echelles : L 1/10000
H 1/1000

SNCF

Région de Marseille
Division de l'Equipement

Tunnel du Braus

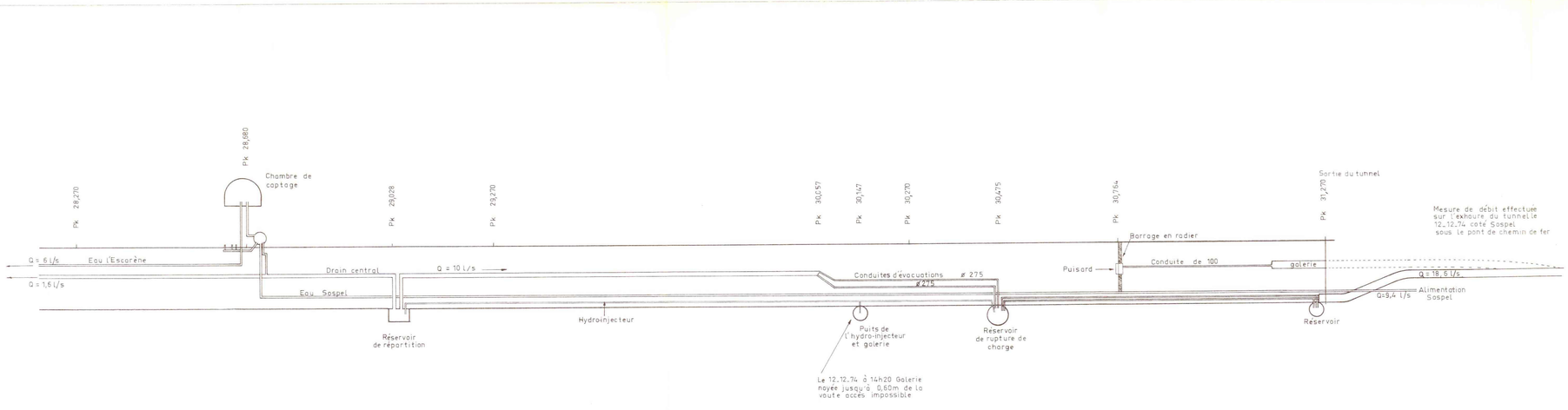
(Alpes Maritimes)

Etude géologique et hydrogéologique

SCHEMA D'ASSAINISSEMENT DU TUNNEL

BRGM
SERVICE GÉOLOGIQUE REGIONAL
PROVENCE-CORSE

Annexe n° 4	MODIFICATIONS
Dessiné le : Janvier 1975	
75 SGN 005 PRC	



SNCF

Région de Marseille
Division de l'Equipement

Tunnel du Braus

(Alpes Maritimes)

Etude géologique et hydrogéologique

POSITION DU NIVEAU AQUIFERE ET NATURE DES TERRAINS DANS LA ZONE ETUDIEE

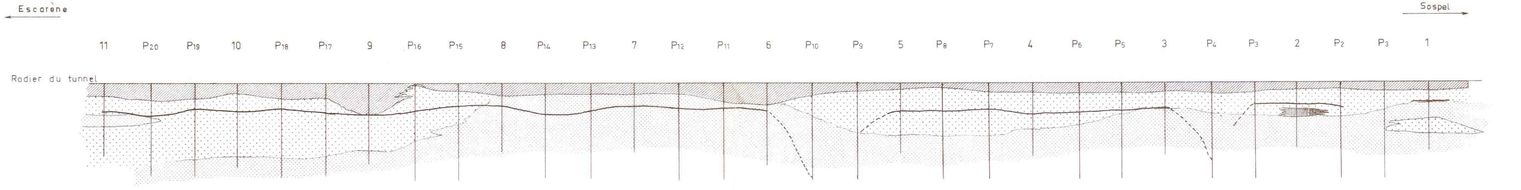
BRGM
SERVICE GEOLOGIQUE REGIONAL
PROVENCE-CORSE

Annexe n° 5	MODIFICATIONS
Dessiné le : Janvier 1975	
75 SGN 005 PRC	

Légende

- Remblais
- Anhydrite ou gypse altéré
- Anhydrite ou gypse sain
- Vide
- 11 — Sondages carottés
- P20 — Perforateur
- Niveau piézométrique
  les relevés piézométriques datent du 10-9-74

Echelles : L 1/2000
H 1/200



SNCF

Région de Marseille
Division de l'Equipement

Tunnel du Braus

(Alpes Maritimes)

Etude géologique et hydrogéologique

COUPES DES SONDAGES

BRGM
SERVICE GEOLOGIQUE REGIONAL
PROVENCE-CORSE

Annexe n° 6	MODIFICATIONS
Dessiné le : Janvier 1975	
75 SGN 005 PRC	

B.R.G.M.
Service géologique regional
Provence Corse

COUPE DE SONDAGE

Sondage S 1
Département 06

Désignation du sondage : PK 5910 TUNNEL DU BRAUS
Maître d'œuvre : S N C F
Entreprise : COFRISO
Commune : SOSPEL

x :
y :
z :
Echelle : 1/50e

Début :
Fin :
Indice de classement

Date	Coupe technique	Echant.	Profondeur	Log	Description lithologique	Nappe et plan d'eau	Etages
			0,60		Ballast		
			1,00		Anhydrite zone plus ou moins broyée		
			1,80			N S 10/9	
			2,00		Anhydrite compacte		
					It 4[b]		
					Rc = 165		
			2,80				
			3,00		Zone broyée d'anhydrite		
			3,10				
			3,40		Anhydrite compacte		
					Anhydrite altérée		
			3,80		Petite zone broyée	It 7[b]	
			4,00				
					Anhydrite compacte		
					It 5[b]		
			5,00				
			5,10				

TRIAS

B.R.G.M.
Service géologique regional
Provence Corse

COUPE DE SONDAGE

Sondage 2

Département 06

Désignation du sondage : PK 5810 TUNNEL DU BRAUS
Maitre d'œuvre : SNCF
Entreprise : COFPISO
Commune : SOSPEL

x :
y :
z :
Echelle : 1/50e

Début :
Fin :

Indice de classement

Date	Coupe technique	Echant	Profondeur	Log	Description lithologique	Nappe et plan d'eau	Etages
			0,40		Tricone		
			1,00		Anhydrite altérée zone broyée rognon de calcaire gris noir dolomitique		
			1,60		Vide	Eau 10/9	
			2,00		Anhydrite gris blanc compacte It = 4 b		
			3,00				
			3,30		Anhydrite gris noir compacte It = 7 b		
			4,00				
			5,00		It = 6 b		

TPIAS

B.R.G.M.
Service géologique regional
Provence Corse

COUPE DE SONDAGE

Sondage 3
Département 06

Désignation du sondage : PK 5710 TUNNEL DU BRAUS
Maître d'œuvre : SNCF
Entreprise : COFPISO
Commune : SOSPEL

x :
y :
z :
Echelle : 1/50e

Début :
Fin :
Indice de classement

Date	Coupe technique	Echant.	Profondeur	Log	Description lithologique	Nappe et plan d'eau	Etages
			0,50		Ballast bétonné		
			1,00		Anhydrite gris zone broyée cassures à remplissage de marne grise	NS 1,85/10/9/74	
			2,00		Anhydrite gris noir compacte zones chaotiques nombreuses écailles.		
			3,00				
			3,25				TRIAS
			4,00		Anhydrite gris noir compacte peu fracturée		
					It = 22b		
					Rc 480		
			5,00				
			5,50				

B.R.G.M.
Service géologique regional
Provence Corse

COUPE DE SONDAGE

Sondage 4

Département 06

Désignation du sondage : PK 5610 TUNNEL DU BRAUS
Maitre d'œuvre : SNCF
Entreprise : COFRISO
Commune : SOSPEL

x :
y :
z :
Echelle : 1/50e

Début :
Fin :
Indice de classement

Date	Coupe technique	Echant.	Profondeur	Log	Description lithologique	Nappe et plan d'eau	Etages
					Ballast		
			1,00		Anhydrite assez compacte		
					Anhydrite broyée		
			2,00				
			2,10		It = 5	NS le 10/9/74	
			2,75		Anhydrite fissurée		
			3,00		Anhydrite altérée		
			3,20		Anhydrite broyée		
			3,50		Anhydrite à cassures horizontales		TRIAS
			4,00		It = 6		
					Anhydrite compacte fracturée vers 4,50 m		
			5,00		It = 7		

B.R.G.M.
Service géologique regional
Provence Corse

COUPE DE SONDAGE

Sondage 5

Département 06

Désignation du sondage : PK 5510 TUNNEL DU BRAUS
Maître d'œuvre : S N C F
Entreprise : COFRIGO
Commune : SOSPEL

x :
y :
z :
Echelle : 1/50e

Début :
Fin :
Indice de classement

Date	Coupe technique	Echant.	Profondeur	Log	Description lithologique	Nappe et plan d'eau	Etages
			0,15		Ballast		
			1,00		Anhydrite broyée avec éléments calcaires		
			1,20				
			1,35		Anhydrite compacte		
			1,80		Anhydrite altérée friable	NS 10/9/74	
			2,00		Anhydrite altérée à meilleure cohésion		
			2,65		It = 3b		
			2,85		Anhydrite plus compacte		
			3,00		Anhydrite altérée gris beige		TRIAS
			4,00		Anhydrite compacte		
			4,80				
			5,00		Anhydrite altérée		
			5,20				
			5,30		Anhydrite compacte		
					It = 1,5b		

B.R.G.M.
Service géologique regional
Provence Corse

COUPE DE SONDAGE

Sondage 6

Département 06

Désignation du sondage : PK 5410 TUNNEL DU BRAUS
Maitre d'œuvre : SNCF
Entreprise : COFRISO
Commune : SOSPEL

x :
y :
z :
Echelle : 1/50e

Début :
Fin :

Indice de classement

Date	Coupe technique	Echant.	Profondeur	Log	Description lithologique	Nappe et plan d'eau	Etages
			1,00		Ballast		
			1,50				
			2,00		It = 23 b	NS 19.9.74	
			3,00		Anhydrite gris noir compacte fissurée à cassure de marne noire, petits bancs de dolomie		TRIAS
			4,00		It = 20b		
			5,00				
			6,00 6,10				

B.R.G.M.
Service géologique regional
Provence Corse

COUPE DE SONDAGE

Sondage 7

Département 06

Désignation du sondage : PK 5310 TUNNEL DU BRAUS
Maitre d'œuvre : SNCFÙ
Entreprise : COFRISO
Commune : SOSPEL

x :
y :
z :
Echelle : 1/50e

Début :
Fin :
Indice de classement

Date	Coupe technique	Echant.	Profondeur	Log	Description lithologique	Nappe et plan d'eau	Etages
			0,60		Ballast		
			0,70		Anhydrite grise broyée		
			1,00				
					It 9b		
					Rc 465	1,83 m	
			2,00		Anhydrite gris noir compacte cloisonnée par des petits bancs de gypse blanc	le 20.09.1974	
					It 21b		
			3,00				
			4,00				TRIAS
			5,00				
			5,20		It 10b		

B.R.G.M.
Service géologique regional
Provence Corse

COUPE DE SONDAGE

Sondage 8

Département 06

Désignation du sondage: PK - 5210 TUNNEL DU BRAUS
Maitre d'œuvre: SNCF
Entreprise: COFRISO
Commune: SOSPEL

x :
y :
z :
Echelle : 1/50e

Début :
Fin :
Indice de classement

Date	Coupe technique	Echant.	Profondeur	Log	Description lithologique	Nappe et plan d'eau	Etages
			0,70		Tricone -Ballast		
			1,00		Anhydrite gris saccharoïde It 19 très dure rubanée par endroit de gypse		
			1,70				
			2,00		Anhydrite à intercalation de gypse passant à quelques masses de dolomie grise à cassure blanche	1,75 M le 26.09.1974	
			2,40				
			3,00		Anhydrite noire très compacte nombreuses veines		TRIAS
			4,00				
			5,00				
			5,20		It = 28b		

B.R.G.M.
Service géologique regional
Provence Corse

COUPE DE SONDAGE

Sondage 9

Département 06

Désignation du sondage : PK 5110 TUNNEL DU BRAUS
Maitre d'œuvre : SNCF
Entreprise : COFRISO
Commune : SOSPEL

x :
y :
z :
Echelle : 1/50e

Début :
Fin :
Indice de classement

Date	Coupe technique	Echant.	Profondeur	Log	Description lithologique	Nappe et plan d'eau	Etages
			1,00		Calcaire bréchique		
			2,00				
			2,20			2,40 m	
			3,00		Marne gris noire compacte à inclusion de gypse	le 26.09.1974	
			3,70		Anhydrite marneuse noire compacte avec petits bancs dolomitiques		TRIAS
			4,00		Marnes gris noir compacte légèrement schisteuse		
			4,60		Calc. marneux noir compact dolomitique		
			4,80				
			5,00		Anhydrite marneuse noire compacte rubanée de gypse à lits schisteux très compacts		
			6,00				

B.R.G.M.
Service géologique regional
Provence Corse

COUPE DE SONDAGE

Sondage 10

Département 06

Désignation du sondage : PK 5010 TUNNEL DU BRAUS
Maitre d'œuvre : SNCF
Entreprise : COFRISO
Commune : SOSPEL

x :
y :
z :
Echelle : 1/50e

Début :
Fin :
Indice de classement

Date	Coupe technique	Echant.	Profondeur	Log	Description lithologique	Nappe et plan d'eau	Etages
					Ballast		
			0,80				
			1,00		Calcaire broyé		
			2,00		It 15	2,32 m	
					Anhydrite gris noir très vacuolaires, cassure à tendance marneuse	le 26.08.1974	
			3,00				
					Anhydrite plus franche en fin de sondage		TRIAS
			4,00		It 38		
			5,00				
			6,00		It 17		
			6,30				

B.R.G.M.
Service géologique regional
Provence Corse

COUPE DE SONDAGE

Sondage 11
Département 06

Désignation du sondage : PK 491 TUNNEL DU BRAUSS
Maître d'œuvre : SNCF
Entreprise : COFRISO
Commune : SOSPEL

x :
y :
z :
Echelle : 1/50e

Début :
Fin :
Indice de classement

Date	Coupe technique	Echant.	Profondeur	Log	Description lithologique	Nappe et plan d'eau	Etages
			1,00		Ballast		
			1,70		Anhydrite fracturée remplie de marne gris noir petits rognons de marne beige It 11 b Calc. gris à veines de gypse	2,05 m	
			2,00		Anhydrite compacte		
			2,50			le 25.09.1974	
			3,00		Calc. gris compact rubané d'anhydrite		
			3,30		It : 23b		
			4,00		Anhydrite zone fracturée		
			4,30		Rc 344		
			5,00		Anhydrite à lits schisteux discontinus		
			5,50		It 19b		
							TRIAS

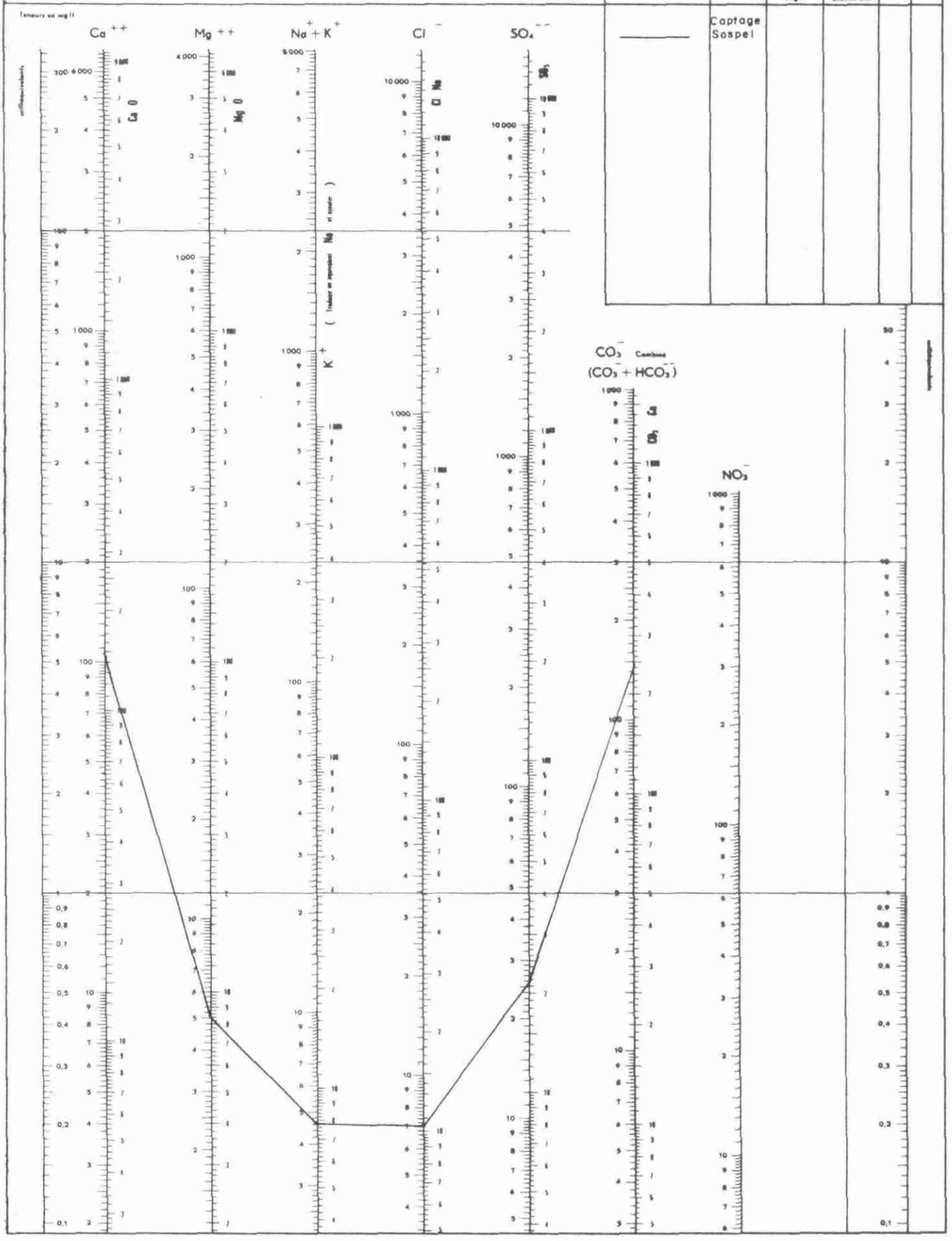
B.R.G.M.
HYDROGEOLOGIE

DIAGRAMME D'ANALYSE D'EAU

d'après H. SCHOELLER et N. BERKALOFF

Teneurs en mg/l

LEGENDE					
Figuré	n°	Rés. sec mg/l	ρ ohms/cm	dh	pH
———	Captage Sospel				



75 SGN 005 PRC

Annexe : 7