

SOCIÉTÉ NATIONALE DES CHEMINS DE FER FRANÇAIS
RÉGION DU SUD-EST - SERVICE DE LA VOIE ET DES BATIMENTS

Section Equipement - Gare de Pontarlier
25300 PONTARLIER - Tél. (81) 39.14.88

TUNNEL DU BOUQUET (Doubs)
ETUDE GEOLOGIQUE
ETUDE DES VENUES D'EAU D'ORIGINE KARSTIQUE

par

T. POINTET



BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

B.P. 6009 — 45018 ORLÉANS CEDEX — Tél. (38) 66.06.60

Service géologique régional JURA - ALPES

B. P. 6083 . 69604 VILLEURBANNE / Croix-Luizet — Tél. (78) 52.26.67

R E S U M E

=====

Des venues d'eau dans le tunnel du BOUQUET sur la ligne de FRASNE à VALLORBE (Doubs) causent en période de froid des amas de glace pouvant gêner la circulation des trains.

Une étude géologique a été menée et a précisé l'origine karstique des circulations.

Des levés thermométriques et des observations par sondage ont mis en évidence le comportement des maçonneries au froid et le bon état du massif rocheux.

Les éléments descriptifs étant en nombre suffisants, un éventail de solutions est proposé pour tenir compte du caractère épisodique et changeant des venues d'eau.

Ingénieur chargé de l'opération

Th. POINTET

Ingénieur chargé de l'organisation

des travaux de reconnaissance

R. ROIGNOT

Avec la collaboration de :

J.P. ASTE

J.J. COLLIN

D. ROUSSELOT

G. KUNTZ

Dessinateur :

J.F. RIEUX

Secrétariat : F. ZIMMERMANN

TABLE DES FIGURES

=====

1	Plan de situation.	1
2	Carte géologique.	6
211	Coupe type.	4
22	Coupe géologique selon l'axe du tunnel.	8
23	Carte des manifestations karstiques et structurales favorables aux infiltrations.	7
61	Détérioration des maçonnerie en béton, du type "cratère".	17
613	Cheminement possible de l'eau dans les maçonnerie détériorées.	17
623	Illustration de la cinquième proposition.	23
	Tableau récapitulatif des solutions proposées.	24

DOCUMENTS CONSULTES

- Documentation S.N.C.F.
- Carte géologique de la France au 1/50 000 feuille de Pontarlier

TABLE DES MATIERES

=====

1 - INTRODUCTION	1
=====	
2 - ETUDE GEOLOGIQUE	3
=====	
21 - GEOLOGIE DES SURFACES	3
211-- <u>Levés préliminaires</u>	3
212 - <u>Niveaux singuliers</u>	3
213 - <u>Structures</u>	9
22 - COUPE DU TUNNEL	9
23 - POINTS FAVORABLES A L'INFILTRATION DE L'EAU	10
3 - THERMOMETRIE	11
=====	
4 - HYDROLOGIE	12
=====	
41 - HYDROLOGIE EN SURFACE	12
42 - HUMIDITE DANS LE TUNNEL	12
421 - <u>Mode de représentation</u>	12
422 - <u>Corrélation avec la géologie</u>	13
5 - FRACTURATION DU MASSIF	14
=====	
51 - ESTIMATION D'UN PARAMETRE REPRESENTATIF	14
52 - REPRESENTATION GRAPHIQUE	14
6 - ETAT DU SOUTERRAIN ET AMELIORATION	16
=====	
61 - ETAT DE LA MAÇONNERIE	16

611 - <u>Désagrégation du béton et migration du ciment</u>	16
612 - <u>Agressivité de l'eau</u>	16
613 - <u>Comportement des maçonneries détériorées</u>	18
62 - RECHERCHE D'UNE SOLUTION	18
621 - <u>Eloigner les circulations d'eau</u>	19
622 - <u>Concentrer l'eau et la recueillir</u>	20
623 - <u>Empêcher l'action du gel</u>	20
7 - CONCLUSION =====	25

1 - INTRODUCTION

=====

Suite à la commande S.N.C.F. n° 5371-3-21044 du 15/2/1973, la B.R.G.M. a entrepris au tunnel du BOUQUET (Fig. 1) une série de travaux organisés à partir du schéma de principe qui a été défini dans le programme du 20.12.1972.

L'évolution de nos connaissances ayant justifié quelques modifications à ce programme, l'accent a été porté essentiellement sur l'étude géologique.

Nous rappelons les termes dans lesquels la question s'est posée.

La venue d'eau à travers les terrains de recouvrement - calcaires essentiellement - causent des dérangements de deux ordres : en premier lieu, la détérioration de la maçonnerie et la désagrégation du béton de blocage à quoi contribue l'action du froid en hiver, en second lieu, des écoulements d'eau libre, qui à faible débit sont sensibles au gel en périodes froides, provoquant des amas de glace au toit et au sol.

A la suite de deux campagnes de sondage dans le souterrain, de nombreux renseignements de divers ordres ont été acquis concernant la géologie du massif, puis fut entreprise une campagne de terrain afin de procéder à une reconnaissance détaillée de la géologie de surface.

Par ailleurs la S.N.C.F. a fait effectuer des mesures de paramètres thermiques et les renseignements sont exploités.

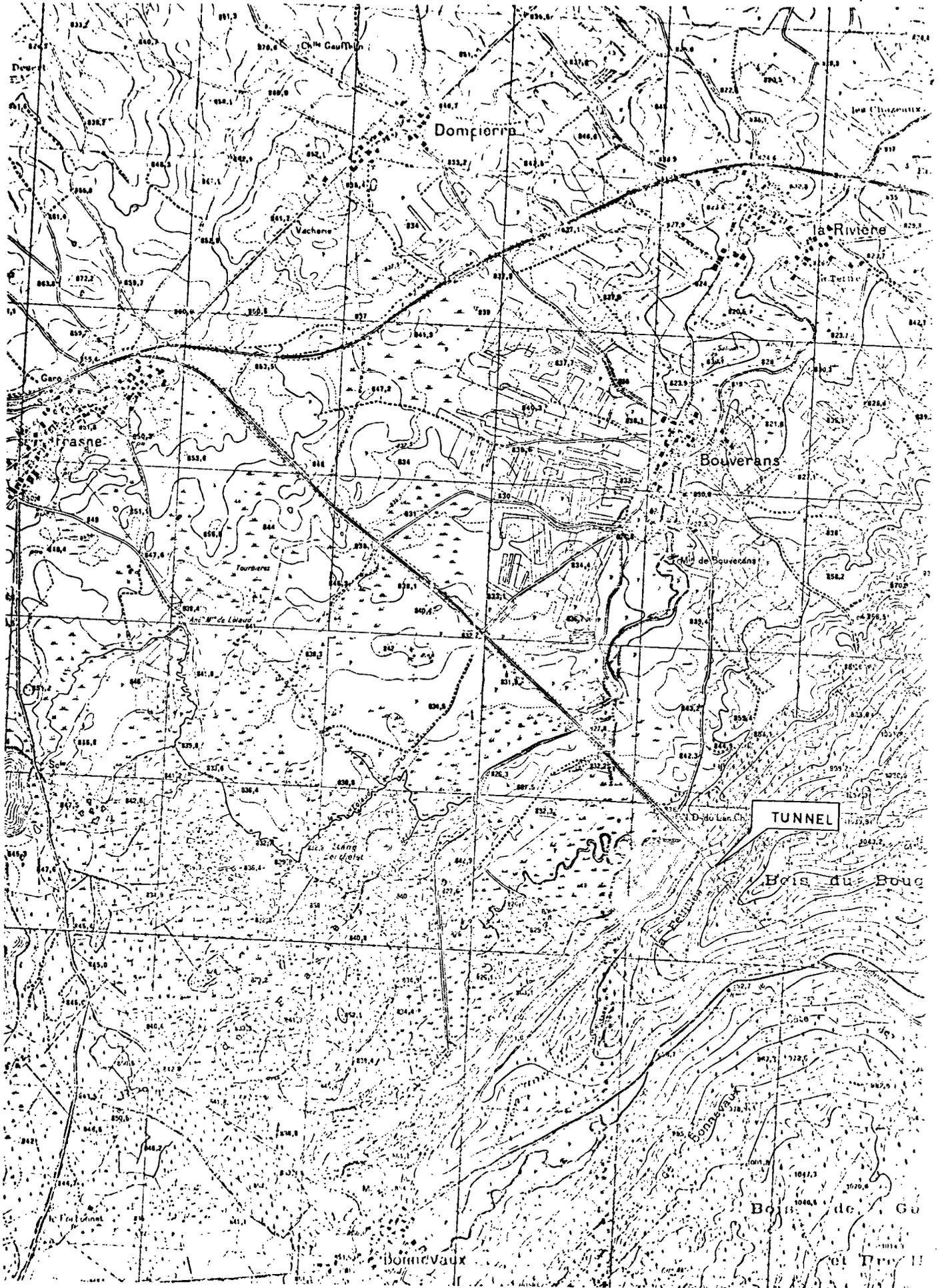
Les corrélations entre les différents résultats ont été effectués et font l'objet du présent rapport.

Un examen critique des diverses solutions déjà évoquées, ou nouvellement envisagées est fait au terme duquel deux méthodes sont retenues et suggérées, conduisant à la construction d'un revêtement léger et isolant thermique à faible distance de la paroi actuelle, en intrados.

SNCF. REGION SUD-EST
TUNNEL DU BOUQUET

PLAN DE SITUATION

ECH. 1 carré = 1 km²



2 - ETUDE GEOLOGIQUE

=====

21 - GEOLOGIE DE SURFACE

211 - Levés préliminaires

Des levés aux alentours du tunnel dans un rayon de trois kilomètres ont permis de préciser la définition de la série du jurassique supérieur donnée par la carte géologique au 1/50 000, dans le sens de l'estimation des puissances et de la description des faciès.

Ces levés ont abouti à l'établissement d'une coupe type (Fig. 2 11) cette coupe servant à interpréter les données qui furent recueillies en un deuxième temps, dans le souterrain et à la surface du massif.

Le domaine étudié étant constitué des formations de l'Argovien au Portlandien, cette coupe est incomplète en ce qui concerne les étages supérieurs extrêmes (base du Sequanien - Rauracien - Argovien, et sommet du Portlandien) par manque d'affleurements types. Pour ces étages, nous nous en tiendrons aux descriptions de la notice de la carte géologique (voir également la légende de la Fig. 2)

212 - Niveaux singuliers

Parmi ces formations essentiellement calcaires, certains niveaux doivent être retenus, soit pour leur rôle de niveau repère soit pour leur caractéristiques géotechniques.

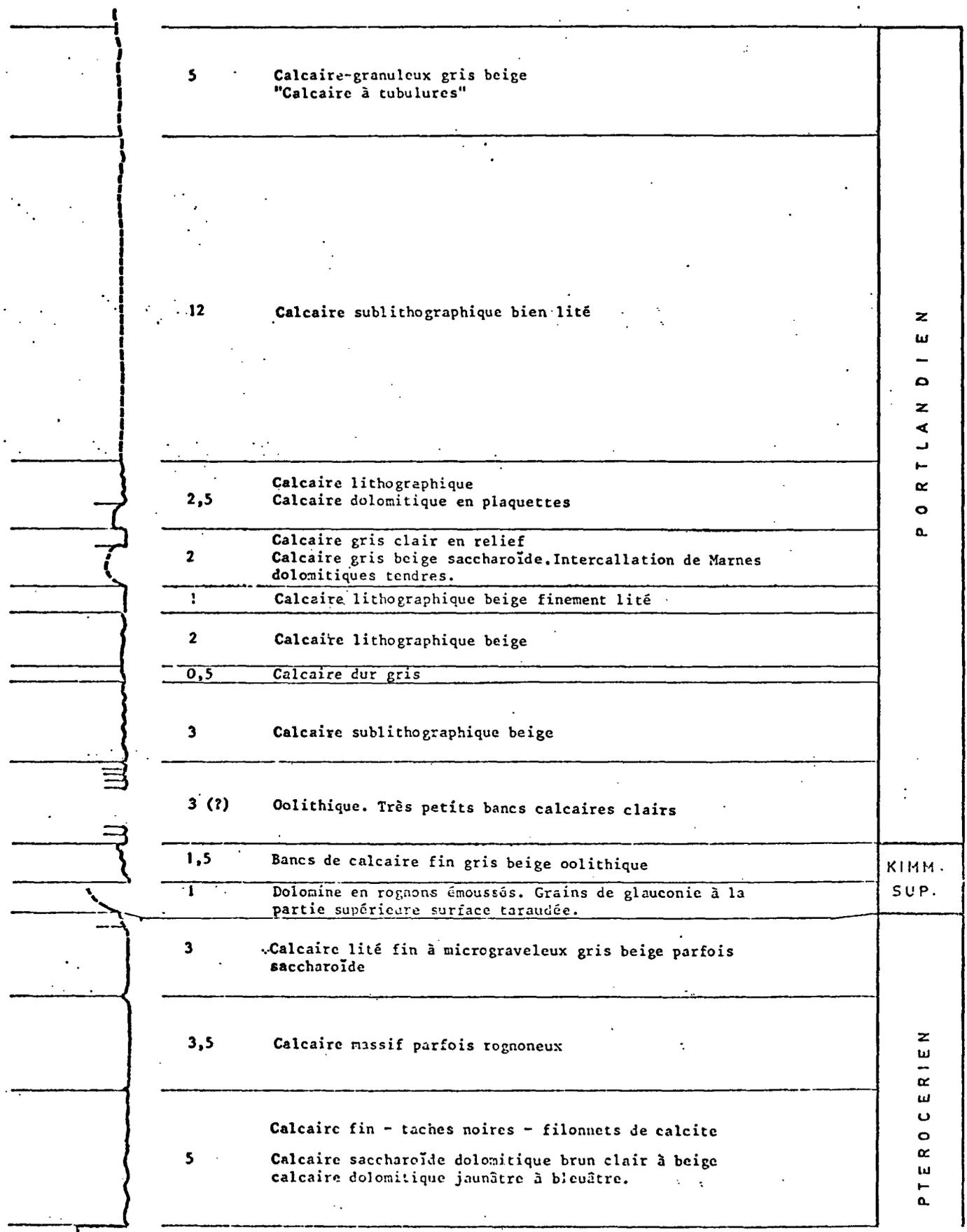
En descendant la série nous citerons

- Les calcaires pisolithiques présents parfois au sommet du Rauracien, et existant à la base du Sequanien

- Les marnes à "Astarte" qui représentent le minimum observable du Séquanien marneux (appartenant à la moitié inférieure de l'étage)

STRATIGRAPHIE DU MASSIF DU BOUQUET

Coupe type D'APRES G. KUNTZ



3,5	Calcaire dolomitique gris jaunâtre parfois induré, parfois friable - géodes de calcite.
2	Calcaire fin un peu argileux. Calcaire sublithographique gris
16	Calcaire gris microgranuleux Calcaire rognoneux gris
5	Calcaire fin gris à beige parfois finement cristallisé en bancs.
12	Calcaire rognoneux - pistes d'animaux frisseurs (?) Calcaire rognoneux - fin - polypiers cristallisés
3	Calcaire fin passant à sublithographique gris à gris beige. Partie inférieure feuilletée.
2,5	Argile calcaire
3	Calcaire fin plus ou moins argileux. <i>Trichites</i>
4	Barre calcaire - bancs de 20 à 60 cm. gris - <i>Trichites</i>
1,5	Calcaire argileux feuilleté gris
2,5	Calcaire argileux gris à beige à Radioles
3,5	Calcaire très argileux en petits bancs - granulations.
2	Calcaire argileux gris en rognons ou feuilleté.
	Gros bancs de calcaire fin gris à gris bleuté à granulations.

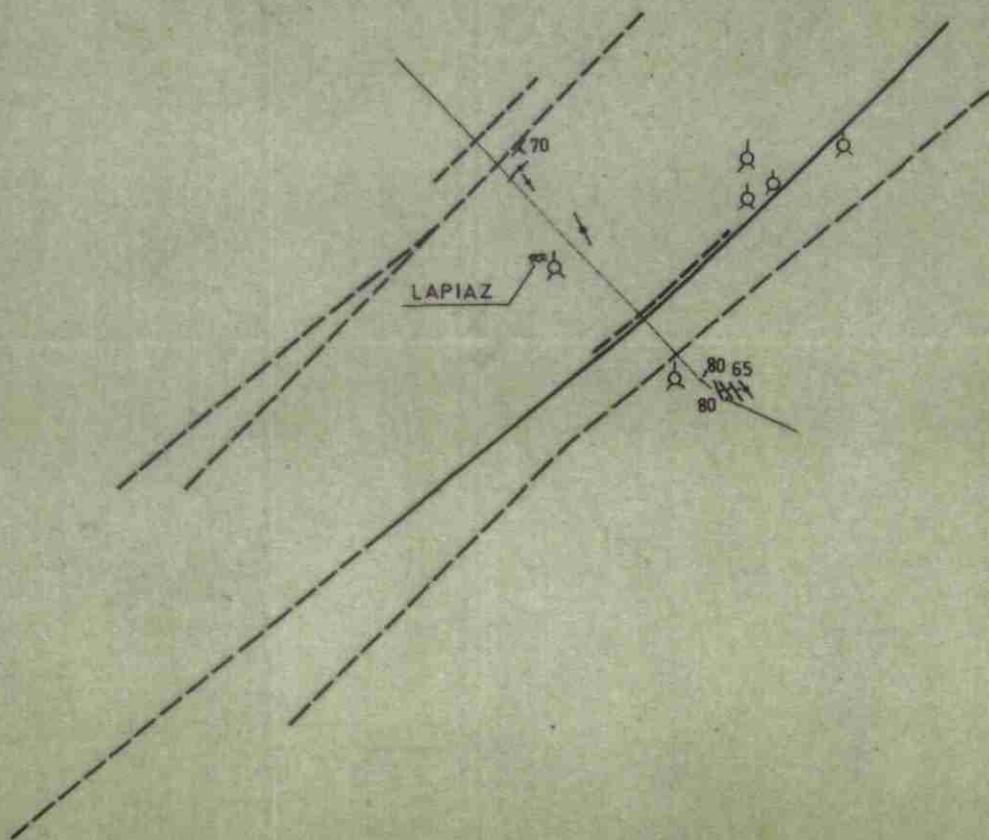
P T E R O C E R I E N 52 m environ

EQUA-
IEN

**Voir calque
dans document
papier**

FIG. 23

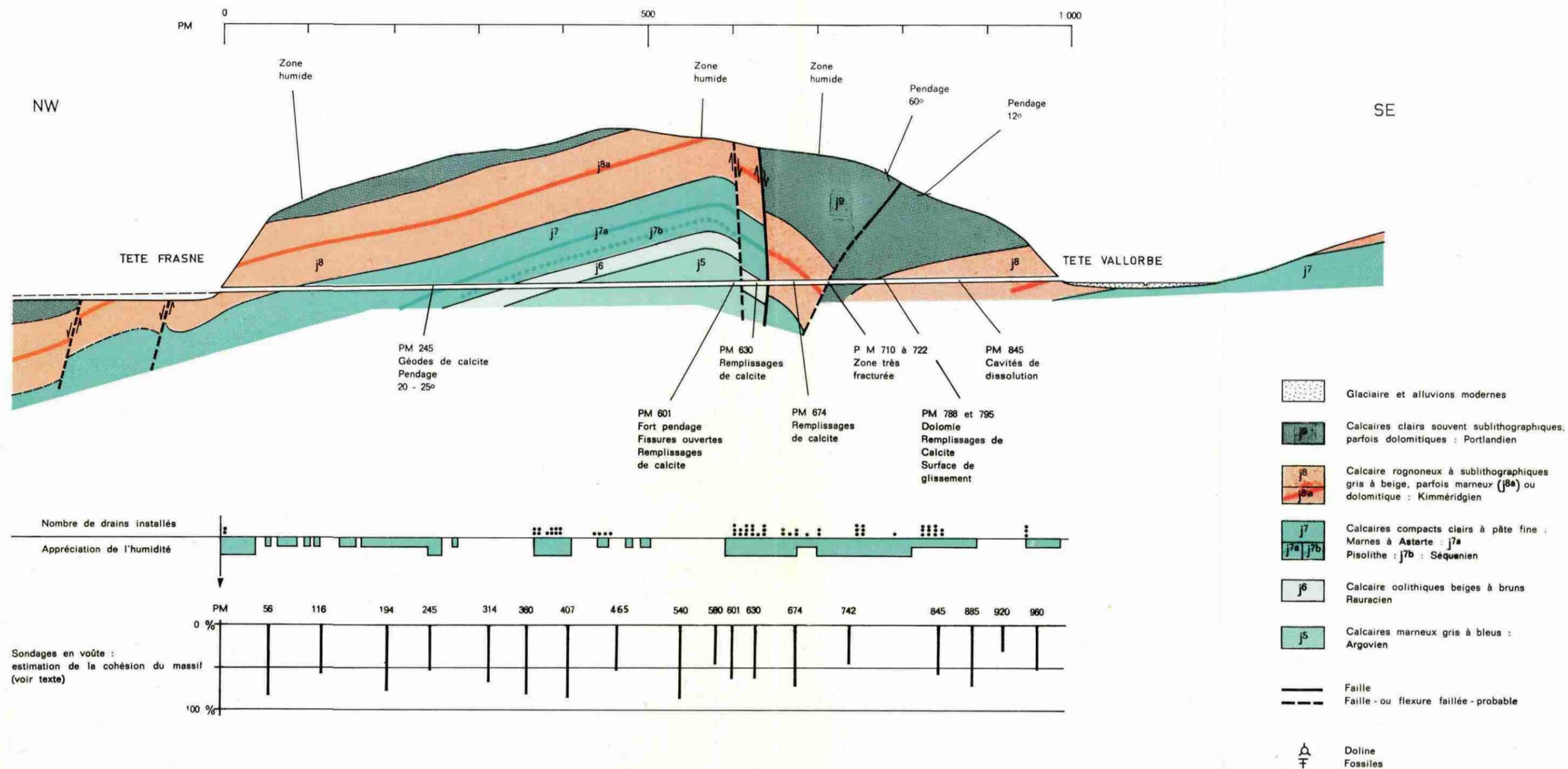
CARTE DES MANIFESTATIONS KARSTIQUES ET STRUCTURALES FAVORABLES AUX INFILTRATIONS



CARTE DES MANIFESTATIONS KARSTIQUES ET STRUCTURALES
 TUNNEL DU BOUQUET - CARTE GEOLOGIQUE
 FAVORABLES AUX INFILTRATIONS



TUNNEL DU BOUQUET - COUPE GEOLOGIQUE
Echelle 1/5 000



- Deux niveaux dolomitiques dans le tiers supérieur du Kimméridgien

- Des passages peu puissants (quelques mètres au maximum) de moindre résistance mécanique, à divers niveaux du Ptérocerien (se rapporter à la coupe)

- Mentionnons enfin des marnes à gypse à la base du Purbeckien, dont nous signalerons l'intérêt en temps utile.

Les puissances des étages, reconnues ou admises sont les suivantes :

Portlandien	130 à 170 m d'après la carte	
Kimmeridgien	Virgulien	1,50 m
	Pterocérien	52 m
Séquanien	50 à 60 m	
Rauracien	30 m	
Argovien	150 à 200 m	

213 - Structures

Les indications de structure portées sur la carte géologique montrent que les axes ont des directions perpendiculaires à celle du tunnel, une coupe suivant le tunnel (Fig. 2 2) en fournira donc une bonne représentation, et nous désignerons les unités géologiques par la valeur du point métrique auquel le tunnel les rencontre.

Une mise en garde s'impose toutefois, les passages d'un faciès au suivant sont souvent progressifs, d'une part, et d'autre part les données obtenues à l'intérieur du tunnel sont discontinues. Nous retiendrons donc que les distances données par points critiques incluent une incertitude de + 10 m dans les meilleurs cas (sauf reconnaissance ponctuelle certaine)

22 - COUPE DU TUNNEL

On rencontre donc de la tête Frasne vers la tête Vallorbe, dans les 200 mètres qui précèdent le tunnel (observations faites le long de la route D.47) une structure légèrement plissée, à

pendage N E dominant, affectée par deux failles mal identifiables. La position des failles et leurs rejets sont estimés. A partir de l'entrée vient un domaine qui sur 550 mètres montre un pendage régulier de 10° à 20° W ou NW. Cette situation permet au tunnel de rencontrer les niveaux de Kimmeridgien à l'Argovien.

De 550 à 800 mètres vient un domaine plissé et faillé. On reconnaît principalement une faille au P.M. 640, avec répétition très probable au P.M. 615. Les pendages de ces accidents sont subverticaux.

Aux environs du P.M 720 la charnière d'un synclinal pincé et faillé (la trace en surface apparaissant au P.M. 800) constitue le second accident important, avec un pendage d'environ 65° vers le Nord Ouest.

Enfin à partir du P.M. 850 et jusqu'à quelques centaines de mètres au delà du souterrain vers le SE, on repasse à un domaine de pendage faible et régulier (6 à 12° WNW).

23 - POINTS FAVORABLES A L'INFILTRATION DE L'EAU (Fig. 2 3)

A partir de la surface, seront favorable aux circulations les accidents faillés, les manifestations karstiques, et des dispositions particulières des terrains dont le comportement est plus difficile à prévoir.

La carte citée ci-dessus, indique les accidents tectoniques signalés au paragraphe précédent accompagnés des indications de diaclases. On constate que les diaclases font apparaître la direction conjuguée de la direction principale des cassures. Enfin les phénomènes karstiques relevés dans la proximité du tunnel sont une série de dolines et de lapiaz.

3 - THERMOMETRIE

=====

Les relevés de 1973 ont mis en évidence une importante action du froid pendant l'hiver.

En premier lieu la température extérieure est basse sur ce plateau du Haut Jura. Un minimum de $- 22^{\circ}$ a été enregistré.

En deuxième lieu les dissemblances de la région de part et d'autre du tunnel font qu'un vent continu parcourt l'ouvrage de la tête Vallorbe (vallée encaissée et froide du Drugeon) vers la tête de la Frasne, avec, en hiver, un pouvoir réfrigérant certain.

Ce vent accélère l'évaporation de l'eau qui suinte dans le tunnel dans une mesure qui dépend de sa température.

La chaleur latente de vaporisation nécessaire est prise en partie à la pierre, en partie à l'eau, et contribue à refroidir un peu plus cette eau ce qui est la troisième contribution à la formation de glace.

De ceci résultent les températures très basses que peuvent atteindre les parements.

Des sondes placées à une profondeur de 30 cm dans les parois ont indiqué pour Février 1973 des minimums de -1 à -2° , et à 50 cm des minimums de -1° .

Du fait de leur porosité, fréquemment accrue par dissolution et migration du ciment, les parois peuvent subir l'action du gel sur une certaine épaisseur ce qui explique en partie les détériorations subies par le tunnel.

Toutefois retenons que les formations de glace importantes sont purgées plusieurs fois par jour en hiver, ce qui indique que l'eau atteint la surface de l'ouvrage et ne gèle qu'au contact de l'air.

4 - HYDROLOGIE

=====

41 - HYDROLOGIE EN SURFACE

En surface il n'existe pas au-dessus du tunnel de réseau hydrographique permanent ou temporaire. Seules des zones plus humides ont été signalées (S. BOYRIE : note du 16.2.1973) et on constate qu'elles coïncident avec la présence de niveaux marneux ou de calcaires marneux présentant un faible pendage.

De part et d'autre du massif les données piézométriques sont la cote du Drugeon, inférieure (-2 m) à la cote de la voie ferrée et la cote du lac dit "l'Entonnoir" très inférieure (plusieurs dizaines de mètres) à celle de la voie ferrée. La cote du Karst noyé est donc basse et ne concerne pas le domaine étudié.

Cet état est confirmé par l'absence de venues d'eau par la plateforme dans l'ouvrage, qui ne comporte pas de radier, à quelque moment que ce soit.

42 - HUMIDITE DANS LE TUNNEL

421 - Mode de représentation

Dans le tunnel il en va fort différemment. On constate que les venues d'eau apparaissent autant en voûte qu'en piedroit.

Le débit total extérieur est très variable selon le moment. A titre indicatif il a été estimé à 30 l/s le 4.12.1972 et à 7 l/s le 30 janvier 1974. Concernant la répartition des venues d'eau le long de l'ouvrage, on peut, d'après la description qui a été faite le 7.12.1972 apprécier grossièrement l'humidité et de proche en proche établir un diagramme groupant les zones en :

- zones sèches
- zones peu à moyennement humides
- zones très humides.

à l'appui de cette représentation a été joint le décompte des drains installés antérieurement en estimant que leur nombre est en rapport avec l'humidité des tronçons qu'ils assainissent (Fig. 2-2).

422 - Corrélation avec la géologie

En suivant le tunnel du NW vers le SE, les 40 premiers mètres montrent une humidité qu'on peut attribuer à l'altération superficielle des terrains et les circulations qui y sont liées se rencontrent dans l'ouvrage.

De 40 à 240 m, suit une zone d'humidité moyenne (qui n'a pas nécessité la pose de drains).

Cette humidité est liée à une karstification peu importante vraisemblablement, du massif traversé qui comporte des calcaires beige de la moitié supérieure du Séquanien et du Ptérocérien.

Aux environs du P.M 260 nous situons le passage des marnes à Astarte, bien que non reconnu.

Cette formation pourrait retenir par son caractère imperméable les circulations dans les calcaires susjaccents accentuant la karstification, ce qui coïncide avec les venues d'eau rencontrées autour du P.M. 250. Ceci expliquerait également le bon comportement des terrains rencontrés à la suite, c'est à dire de 260 à 360 m environ, le niveau marneux faisant écran.

Du P.M. 365 au P.M. 410 apparait une zone très humide qui se situe, avec une bonne coïncidence, en regard de la traversée du Rauracien. Nous considérons donc que le faciès consitue un niveau particulièrement karstifié.

Du P.M. 590 au P.M. 710 le tunnel entre dans le domaine faillé. Autour des passages des failles ainsi qu'au recouplement avec le Rauracien l'humidité est très importante.

Enfin, du P.M. 710 à la sortie SE du tunnel on peut situer la présence des zones humides aux variations de faciès du Kimmerdgien (calcaires dolomitiques et marneux) ainsi qu'aux circulations dans la tranche superficielle du terrain, ainsi qu'il en a été près à la tête Frasne.

5 - FRACTURATION DU MASSIF

=====

51 - ESTIMATION D'UN PARAMETRE REPRESENTATIF

Lors des descriptions des carottes des 60 sondages de la campagne de 1973, ont été relevées les dimensions des fragments afin d'estimer de manière certes grossière l'importance de la fracturation du massif dans la proximité immédiate du souterrain.

La méthode estime un paramètre, connu sous le nom de Rock Quality Designation, qui est la proportion comptée sur la longueur de la carotte des fragments longs de 10 cm et plus.

Selon la valeur de cette proportion, exprimée en pourcentage une appréciation de la cohésion du massif est donnée. Dans le cas présent l'ensemble des sondages donnant un coefficient compris entre 70 et 90, ce qui correspond à une roche de bonne qualité, il a paru intéressant d'élever la limite de taille à 15 cm afin d'accentuer les différences.

52 - REPRESENTATION GRAPHIQUE

En figurant ce coefficient par un segment dont la longueur est proportionnelle à sa valeur, on a obtenu un diagramme qui, adjoint aux précédents en regard de la coupe géologique complète les résultats énoncés ci-dessus. (Fig. 2-2).

On remarque que les zones supposées karstifiées présentent les plus faibles coefficients de cohésion relevés (40% à 60%) P.M. 245, 465, 742 et 920) alors que les zones de bonne tenue présentent des coefficients de valeurs élevées.

Ainsi les zones fracturées, pour autant que ces valeurs puissent être représentatives des quelques mètres de part et d'autre du point de mesure, sont repérées aux P.M. 116, 245, 465, 580, vraisemblablement 650, 742 et 920 et pour la plupart coïncide également avec la densité des drains.

Il résulte donc de l'ensemble des diagrammes en regard de la coupe géologique qu'il n'y a pas de contradictions majeures et

qu'au contraire les renseignements se renforcent pour indiquer les zones poreuses, karstifiées, ou humides selon que les points sont situés en plein massif ou dans les zones fracturées, et nous nous fonderons sur cette connaissance pour rechercher une solution.

6 - ETAT DU SOUTERRAIN ET AMELIORATIONS

=====

61 - ETAT DE LA MAÇONNERIE

Le souterrain dans son état actuel est hétérogène de construction. Certains tronçons sont conservés dans leur état d'origine, d'autres ont fait l'objet de réfections plus ou moins importantes, plus ou moins nombreuses.

De plus la voûte diffère fréquemment des piedroits par son mode de construction.

Les deux types de revêtement sont les édifices en moellons et le béton de cailloux préparé à partir des éléments concassés provenant du dérochement au moment du percement.

611 - Désagrégation du béton - Migration du ciment

C'est ce deuxième revêtement qui subit les plus importantes dégradations. Celles-ci apparaissent sous la forme de "cratères" (Fig. 6 1) et s'étendent au point que des restaurations par murs de briques, par cintres en briques ou en ciment ont été nécessaires.

On ne peut écarter l'hypothèse d'une mauvaise prise du ciment au moment de la construction mais il est certain que sa corrosion actuelle est importante et provoque sa migration en laissant des vides entre les éléments calcaires.

612 - Agressivité de l'eau

On peut donc se demander si, étant donné l'absence de concrétions calcaires l'eau ne présente pas une certaine agressivité, et si, en ce qui concerne les alentours du P.M. 700 elle ne lessive pas en filtrant à travers le massif une lentille de Purbeckien coincée au coeur du synclinal, sachant que la base de cet étage montre des formations marneuses et gypseuses, et

FIG. 61

DETERIORATION DES MAÇONNERIES EN BETON DU TYPE "CRATERE" D'APRES J. PIRAUD

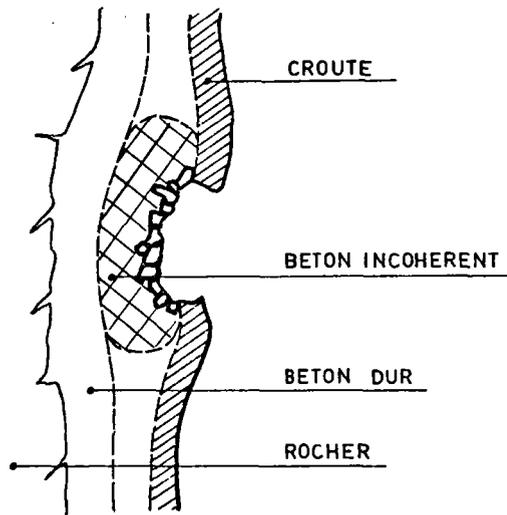
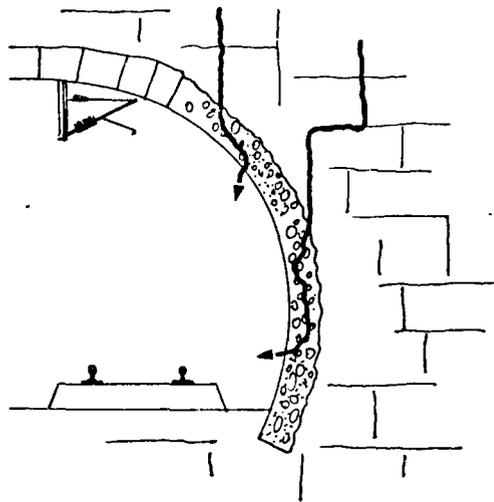


FIG. 613

CHEMINEMENT POSSIBLE DE L'EAU DANS LES MAÇONNERIES EN BETON DETERIOREES



sachant qu'en ce point le Portlandien apparaît sous une épaisseur proche de l'apport totale de l'étage soit 130 à 170 m. Pourtant il a été signalé que le ciment utilisé à la construction provenait des environs de la Mure et était réputé pour sa résistance aux eaux agressives.

Afin d'obtenir une estimation de l'agressivité des analyses des eaux échantillonnées entre les points métriques 600 et 750, comparées à une analyse de l'eau échantillonnée à la faveur des venues du P.M. 245 par exemple seront nécessaires, en période pluvieuse, le moment auquel les prélèvements ont été ordonnés n'ayant pas fourni un débit suffisant. (Hiver 1974).

613 - Comportement des maçonneries

La conséquence de ces filtrations et une porosité importante de l'ancien béton, et vraisemblablement l'accumulation du ciment devenu pâteux plus bas dans le massif de blocage, ce qui bouche vraisemblablement ce dernier.

L'eau chemine donc dans ce massif, et se disperse. En outre elle atteint rapidement la paroi et suinte sans que l'on puisse situer les venues, quant aux parements, il est très possible que les suintements soient les émergences de l'eau qui les imbibe sur une certaine hauteur et qui rencontre un passage obstrué par du ciment (Fig. 613) ceci doit donc nous guider dans la recherche d'une solution.

De plus le contact de deux revêtements de natures différentes (joints de matage, par exemple) est une ligne de faiblesse et avec le temps il est normal que le gel provoque ou accentue la fissuration et le suintement de l'eau succède à ce processus.

62 - RECHERCHE D'UNE SOLUTION

La question se pose désormais en termes plus précis et les solutions relèveront des trois démarches suivantes :

- 1 - soit éloigner les circulations d'eau
- 2 - soit concentrer l'eau et la recueillir de sorte que l'importance des venues la soustrait à l'action du gel
- 3 - soit empêcher l'action du gel.

L'étude géologique nous a appris que les venues de faible importance sont dûes à l'activité des karsts qui affectent les différentes formations calcaires, et l'irrégularité de ce genre de circulation est bien connue. Ceci est confirmé par l'observation puisqu'il est signalé que de nombreuses venues d'eau apparaissent puis se tarissent définitivement d'année en année.

Les circulations les plus importantes sont à attribuer à quatre structures beaucoup plus localisées :

- les faciès dolomitiques du Kimmeridgien autour du P.M. 700
- la faille au voisinage du P.M. 640 et son redoublement vers le P.M. 610
- la traversée du Rauracien du P.M. 610 au P.M. 640 et du P.M. 360 au P.M. 400
- la traversée du karst susjacent aux marnes à Astarte autour du P.M. 250.

A l'exception de certaines venues bien constantes dans ces zones, il ne pourra être envisagé de traiter isolément les suintements.

621 - Eloigner les circulations d'eau

Deux solutions déjà évoquées s'apparentent à ce processus, mais elles ne sont pas sans inconvénients.

La première fait appel à des injections multiples et il est connu d'expérience qu'un réseau de fissures dans un calcaire ne peut être saturé de cette façon, le coulis ne diffusant pas suffisamment. Par ailleurs une pression d'injection trop élevée risque de fracturer le massif.

La deuxième consiste en une ouverture plus ou moins épaisse de béton projeté sur la surface existante, après élimination des parties friables. Un inconvénient apparaît en ce qui concerne les zones très humides, où le béton risque d'avoir mauvaise adhérence et mauvaise prise par suite de l'apport excédentaire d'eau les surfaces n'étant pas seulement mouillées mais lavées.

Enfin ces solutions comportent un risque important car les circulations étant forcées dans un cheminement inhabituel qui peut être sous-dimensionné, il est à craindre une mise en pression de l'eau derrière les parements et les conséquences sont évidentes.

622 - Concentrer l'eau et la recueillir

Une solution de ce type consisterait à développer (par exemple à l'acide) à une certaine distance de part et d'autre de l'ouvrage le réseau existant de fissures, après que les circulations aient été repérées (coloration, traçage).

Ces réseaux servant de collecteurs recueilleraient l'eau que des drains inclinés en base de piedroits conduiraient vers le canal d'exhaure.

Ce processus d'emploi intéressant dans les domaines où la voûte est saine demanderait un contrôle rigoureux, le risque étant de diminuer la cohésion du massif à quelques mètres des maçonneries.

623 - Empêcher l'action du gel

Une première solution consisterait en l'installation après purge des parties friables, d'un voile de forme régulière servant d'isolant thermique. Un revêtement en bois recouvert d'une feuille de plastique d'étanchéité ou imprégné de même matière et monté sur cintre, aurait le triple avantage si l'on écarte le prix de revient, d'assurer une protection contre le gel, de constituer par sa résistance mécanique un écran contre les chutes d'éléments de maçonneries détériorées, et par le jeu des vides entre la surface irrégulière des parements et la surface régulière du revêtement nouveau de permettre l'écoulement libre de l'eau jusqu'à la base des piedroits pour être recueillie et conduite au canal d'exhaure.

Cet écoulement pourrait être facilité à travers la maçonnerie actuelle par le percement systématique de lignes de barbacanes à différentes hauteurs au dessus de la plateforme afin

de soulager l'ancien matériau.

Enfin, s'apparentant par le processus, une dernière solution a été envisagée et s'inspire de propositions anciennes.

Après purge des parties friable par jet d'eau adapté des lignes de barbacanes seraient percées à des hauteurs de 0,5, 1 et 1,50 m au dessus de la plateforme, afin de drainer la base de la maçonnerie, dont la possibilité de colmatage par ciment pâteux a été mentionné

Des saignées seraient entaillées à intervalles réguliers qui seraient à déterminer (Fig. 623) Ces saignées garnies d'un ferailage, seraient remplies d'un béton (coffré ou projeté) de manière à constituer des cintres en léger relief à l'intérieur du souterrain (Fig. 623) Si la nécessité se présentait de consolider entre les cintres, des poutres suivant les génératrices du tunnel pourraient être réalisées selon le même processus.

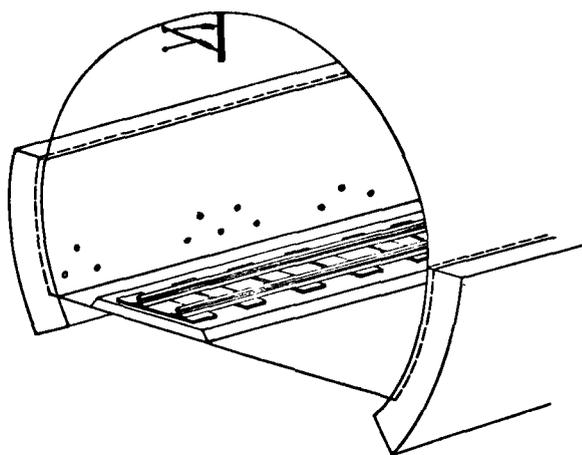
Ces cintres serviraient de points d'ancrage à un voile constitué de une ou plusieurs couches de béton projeté sur un treillis métallique fait de une ou trois grilles, ce voile pouvant être rendu isotherme par l'interposition d'une feuille de plastique continu ou discontinue, selon l'adhérence à assurer entre couches de béton.

Les avantages consisteraient dans une telle solution en un écran aux chutes d'éléments décollés, une protection de l'eau donc des maçonneries anciennes contre l'action du gel, et par l'espace annulaire entre maçonnerie et voile en un drainage sans mise en charge des venues, qu'elles soient localisées ou non.

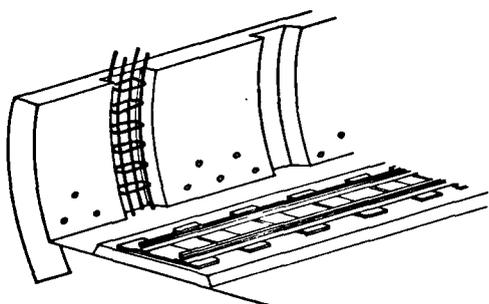
Cette solution est certes onéreuse mais pourrait s'adapter tronçon par tronçon aux besoins. En particulier dans des zones où la voûte est étanche, les cintres seraient discontinus et dépasseraient de peu les joints de matage.

La récupération de l'eau pourrait se faire sans contact avec l'air mais sachant que la température serait suffisante pour ne pas nécessiter à ce niveau de protection particulière.

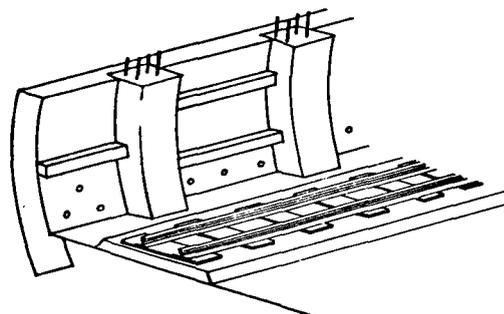
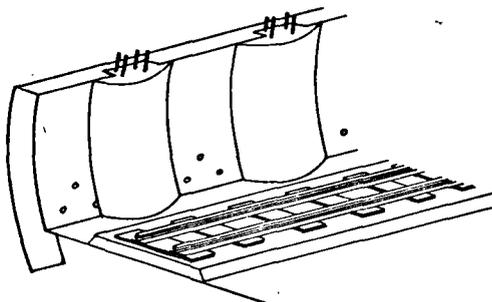
ILLUSTRATION DE LA CINQUIEME PROPOSITION



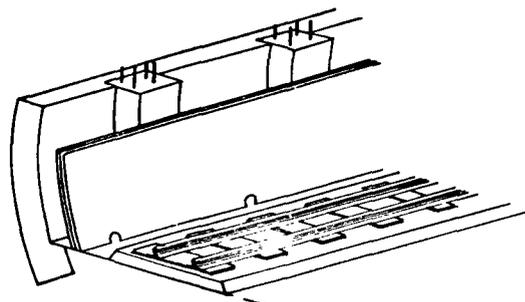
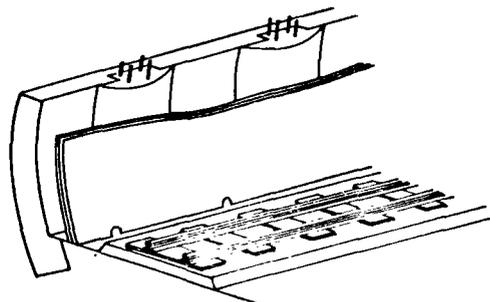
Purge des parties friables et percement de barbacanes



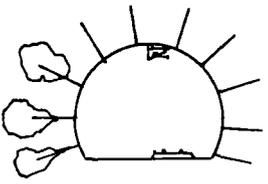
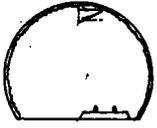
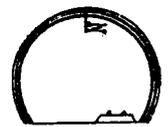
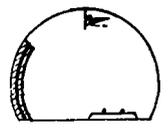
Creusement de saignées et mise en place d'une armure métallique



Construction de cintres en béton entretoisés ou non



Mise en place d'une paroi isotherme multicouche.

Principe de l'intervention	Mode d'exécution		Avantages	Inconvénients
Eloigner les circulations d'eau	Injection multiples		<ul style="list-style-type: none"> - Exécution facile sans gêne important au trafic - Consolidation du massif 	<ul style="list-style-type: none"> - Etanchéité médiocre vis à vis de l'eau - Aucune protection contre le gel
	Couverture de béton projeté		<ul style="list-style-type: none"> - Bonne protection contre les venues d'eau - consolidation de la maçonnerie 	<ul style="list-style-type: none"> - risques de mise en charge de l'eau - risques d'une mauvaise adhérence dans les passages très humides - En cas de fissuration pas de protection isotherme
Concentrer l'eau et la recueillir.	Développer le réseau des fissures		<ul style="list-style-type: none"> - Concentration de l'eau ce qui la soustrait à l'action du gel - Contrôle des circulations qui ne sont jamais sous charge 	<ul style="list-style-type: none"> - Méthode d'application délicate - Risque d'affaiblir le massif
Empêcher l'action du gel	Voile en bois sur cintres		<ul style="list-style-type: none"> - Protection isotherme - Aucune mise en charge - Contrôle des venues d'eau - Protection contre la chute d'éléments de maçonnerie. 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût élevé - Gêne au trafic à l'installation - Longévité fonction du matériau
	Voile en béton avec feuille de matière plastique intercalée, retenue par des cintres en béton		<ul style="list-style-type: none"> - Protection isotherme - Aucune mise en charge - Contrôle des venues d'eau - Protection contre la chute d'éléments de maçonnerie. - Consolidation de la maçonnerie. 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût élevé - Gêne au trafic à l'installation

7 - CONCLUSION

=====

Au terme de cette étude, il apparait que les données sont suffisantes pour la connaissance géologique et hydrogéologique de la question. Concernant le comportement de l'ouvrage, il sera nécessaire d'effectuer un ou plusieurs carottages courts afin d'estimer le colmatage éventuel des zones basses par le ciment mobilisé, pour tester l'utilité du percement des barbacanes.

Enfin, quelle que soit la solution adoptée, un essai sur un tronçon de longueur à déterminer (50 m par exemple) permettrait d'adapter au mieux la méthode aux cas particuliers et, en ce qui concerne la gêne causée au trafic.

Nous conseillerons de choisir une zone particulièrement atteinte, afin d'évaluer l'importance du travail initial de purge dans un cas difficile, et au long de laquelle les venues d'eau ont été reconnues changeantes au cours des années, afin de tester l'efficacité de la méthode choisie, appliquée à la totalité du souterrain ou aux piedroits uniquement.