LA SITUATION GÉOLOGIQUE A L'EMPLACEMENT DU PONT GRANDE-DUCHESSE CHARLOTTE

PAR

JACQUES BINTZ

Introduction

En 1957, le Gouvernement luxembourgeois annonça un concours pour la construction d'un pont enjambant la vallée de l'Alzette.

En tout 37 firmes et communautés d'entreprises avaient présenté 68 projets différents comprenant tous les types de construction, à savoir:

18 ponts à poutres en béton armé
20 ponts voûtés en béton armé
2 ponts à béquilles
15 ponts à poutres métalliques
7 ponts voûtés métalliques et
6 ponts suspendus.

Le jury international, institué par arrêté ministériel, proposa au Gouvernement luxembourgeois la réalisation d'un pont à béquilles en acier, projet de la Communauté d'Entreprises Rheinstahl Union Brückenbau A.G. Dortmund, Socol, Bruxelles et Jean Think, Differdange. Ce projet a définitivement été choisi et réalisé. Toutefois, il a subi quelques modifications, notamment en ce qui concerne la longueur totale, les portées des différentes travées ainsi que le rivetage des joints de montage qui a été remplacé par un boulonnage.

L'ouvrage qui a été réalisé a trois ouvertures de respectivement 93,00 m, 157,20 m et 104,80 m. La longueur totale est de 355 m et la distance entre axe des appuis 234,10 m (voir fig. 1).

Situation géologique

La situation géologique, telle qu'elle résulte de la carte géologique 1 : 25 000 de M. LUCIUS, est la suivante:

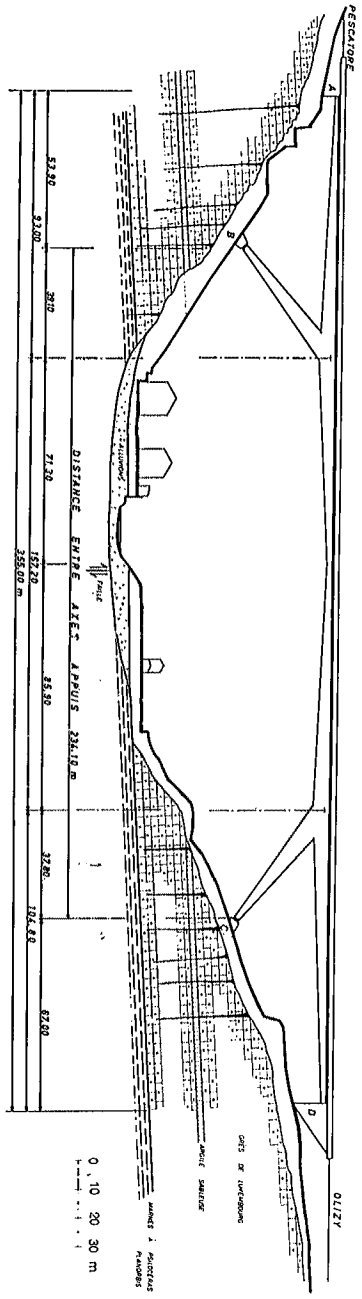

PESSAC/DORE
AZITO
A
B
C
D
53.90
9.20
28.10
71.20
152.20
355.00 m
DISTANCE ENTRE AXES APPUIS 234.10 m
85.90
32.80
104.80
82.00
ALLUVIONS
PHASE
ARGILES SABLEUSES
GRES DE LANTORDUNE
MARNES A PSAMMITES PLANORBES
0 10 20 30 m

Fig. 1

Les deux plateaux, de part et d'autre de la vallée, sont constitués par le « Grès de Luxembourg » (Hettangien supérieur - Zone à Schlotheimia angulata).

Le Grès de Luxembourg, dont la puissance dépasse 80 m dans la région de la ville, est un grès calcareux, c.-à-d. un grès composé de grains de quartz liés par un ciment calcareux. L'analyse donne, en moyenne, 70% SiO_2 et 30% de $CaCO_3$; mais ces rapports sont soumis à des changements locaux considérables. La roche est bien litée, les lits étant cependant de puissance et de résistance variables, cela en relation avec les variations dans le rapport SiO_2-$CaCO_3$. La résistance à l'écrasement varie, d'après les recherches faites dans le Poste d'essai de matériaux auprès de la Direction des Ponts et Chaussées, sur 12 échantillons de provenance différente (Dillingen, Ernzen) entre 420 et 630 kg/cm^2.

Le grès est traversé par un système de diaclases, se présentant ordinairement suivant deux directions principales. Dans la région de Luxembourg-Ville, ces deux systèmes ont une direction de 10° respectivement 140°. Le réseau des diaclases peut être très serré, mais ordinairement les diaclases sont assez distantes l'une de l'autre de sorte que la roche se débite en de larges dalles ou en gros blocs.

A l'intérieur d'une masse de grès, les diaclases n'existent en général qu'à l'état latent, c.-à-d. les fissures ne sont guère visibles, mais au bord des profondes vallées (vallée de l'Alzette, de la Pétrusse, dans la région de la capitale) les diaclases, à cause de la poussée dans le vide vers la vallée, s'élargissent et forment des crevasses béantes.

Un phénomène analogue peut être observé à l'intérieur des plateaux, mais ici l'élargissement est dû à la dissolution du ciment calcareux par suite de l'infiltration de l'eau de pluie, chargée de CO_2.

A l'endroit qui nous préoccupe, la direction de la vallée est parallèle à la direction du système rhénan de diaclases (10°). Les diaclases de direction hercynienne (140°) s'élargissent dans la région des versants des vallées, par l'action érosive des eaux de ruissellement, en ravins à pente rapide.

Comme la base du grès est formée par des marnes peu résistantes, le grès s'écroule le long des crevasses longitudi-

nales, formant des parois abruptes. Ces parois, entrecoupées par les ravins, déterminent des piliers massifs, qui sont séparés par des échancrures remplies de terre meuble, comme on peut le voir dans toutes les vallées encaissées autour de la ville.

La zone des crevasses béantes a, en général, une largeur de 150 m vers l'intérieur du plateau. Dans cette zone, la valeur de la roche comme sol de fondation a subi un affaiblissement qui n'est pas du tout négligeable.

Les parois verticales, bordant le fond des vallées, sont enrobées en partie par un manteau d'éboulis comprenant des fragments de roche et du sable sans cohérence. La résistance de cet éboulis est extrêmement faible; comme il est tassé sous un angle très élevé, jusqu'à 40 degrés, il ne peut porter que son propre poids.

Le fond de la vallée se situe dans des marnes feuilletées de couleur foncée, alternant avec de minces bancs de calcaire gréseux de la même couleur (Hettangien inférieur, zone à Psiloceras planorbis).

Le lit de la rivière est creusé dans ces marnes; mais, comme les lits de toutes nos rivières, celui de l'Alzette a été creusé jadis de 7 à 8 m plus profond et puis remblayé, de sorte que dans le lit même on rencontre 7 à 8 m d'alluvions avant d'entrer dans les couches marneuses et argileuses en place.

Reconnaissance géologique par forages

En 1956, on fit exécuter une première campagne de reconnaissance par forages. Ces forages étaient surtout situés près des bords des plateaux, c.-à-d. sur le plateau Pescatore et sur le plateau Olizy.

Il y avait en tout 6 forages inclinés avec une longueur totale le 134 m et trois forages verticaux avec une longueur totale de 50,40 m.

Les forages inclinés, réalisés surtout en vue de l'examen de la répartition des diaclases et des crevasses béantes, avaient le résultat suivant: Sur le total de 134 m de longueur de forage, on constatait en moyenne 14% de vides avec des crevasses béantes d'une largeur de l'ordre de 0,50 m.

Vu que les renseignements géologiques à fournir aux concurrents ne pouvaient se borner à un seul type de pont, mais

devaient tenir compte de toute une série de types possibles, l'Administration des Ponts et Chaussées fit exécuter en 1957 une deuxième série de forages qui avaient pour but la reconnaissance géologique des versants et du fond de la vallée.

Ainsi il y eut, au fond de la vallée, deux forages verticaux, l'un situé dans la rue Menager et l'autre dans la rue St. Mathieu. Le premier avait une profondeur de 38,70 m et perça le grès Rhétien de 34,00 à 34,70 m. Le deuxième avait une profondeur totale de 37,85 m et traversa 20 cm de grès Rhétien, à savoir de 31,70 à 31,90 m.

Dans les versants il y eut pour chaque côté un forage vertical et un forage horizontal avec une longueur totale de 195 m. Le pourcentage de vides dû aux crevasses béantes atteignait pour les forages horizontaux 16%, resp. 36%.

Lorsqu'en 1962 le marché pour la construction du pont à béquilles de la Communauté d'Entreprises Rheinstahl Union Brückenbau A. G., Dortmund, Socol, Bruxelles et Jean Think, Differdange, fut conclu, une troisième campagne de reconnaissance géologique détaillée s'imposait. Celle-ci avait pour but l'analyse géologique des points névralgiques du projet à réaliser. Trois forages sous chaque point d'appui de béquille, à savoir un forage vertical, un forage horizontal ainsi qu'un forage dans la direction de la béquille, de même qu'une série de forages verticaux sur les bords des plateaux furent réalisés. La longueur totale de ces forages était de 574 m.

Les résultats de tous les forages de reconnaissance réalisés sont représentés dans la coupe géologique (fig. 1), qui se présente comme suit:

a) Sur les deux versants une couche plus ou moins puissante d'éboulis de pentes et de remblai. Du côté Pescatore (côté ville) cette couche est beaucoup plus puissante que du côté Olizy (côté Kirchberg). Du bord extérieur de la rue « Côte d'Eich » (côté Pescatore) la profondeur verticale jusqu'à la roche en place est de l'ordre de 10 m. Ici il s'agit surtout de remblai y déposé lors de la destruction de la forteresse, tandis que du côté Olizy nous avons affaire à des éboulis de pente.

b) L'inclinaison des couches est dirigée vers le SW et accuse une valeur de l'ordre de 5°. Cette inclinaison a pu être dé-

terminée d'une façon précise en se basant sur une couche de limon argileux, rencontré par les forages exécutés aux endroits des points d'appui des béquilles. La puissance de cette couche de limon dans le complexe sableux du « Grès de Luxembourg » était de 1,50 m. L'analyse granulométrique d'un échantillon retiré de cette couche, analyse exécutée au laboratoire de mécanique des sols de la T. H. Munich, a donné les résultats suivants: 30% d'argile, c.-à-d. de grains plus petits que 0,002 mm, 60% de limon et 10% de sable. Une deuxième entrecouche argileuse, non analysée, a été rencontrée à 11,40 m au-dessous de la première, elle avait une puissance de 0,40 m.

c) La présence de cette entrecouche de limon nous a encore révélé un fait nouveau, inconnu jusqu'à présent. En effet, la couche de limon du versant Olizy ne se situe pas dans la prolongation de la couche du versant Pescatore, mais elle accuse un décalage vertical de l'ordre de 9 m par rapport à la dernière. Au-dessous de la couche limono-argileuse, nous avons trouvé des deux côtés de la vallée un banc fossilifère et il faut en conclure qu'il s'agit de la même couche sur les deux versants. Vu le décalage vertical entre la même couche sur les deux versants, on doit admettre une faille se situant entre les plateaux. La direction de cette faille est plus ou moins parallèle à la direction de la vallée et la partie gauche a été soulevée par rapport à la partie droite. Cette faille a favorisé le creusement de la vallée.

Les problèmes de fondations

a) Du côté Pescatore (ville), le boulevard Paul-Eyschen ainsi que la rue Côte d'Eich, à l'endroit du pont sont construits sur du remblai qui y a été déposé lors de la destruction de la forteresse. La puissance de cette couche de remblai est assez considérable. Des forages de reconnaissance se situant sur le bord extérieur de la côte d'Eich et qui avaient été réalisés en vue d'un élargissement de la chaussée, ont rencontré la roche en place à une profondeur verticale de 10 m. En plus, la pente du talus qui descend de la Côte d'Eich vers la vallée est assez raide, à savoir 40° à 45°.

Il en résulte qu'on ne pouvait pas déblayer la roche meuble à l'endroit où les béquilles B et B' venaient s'appuyer sur la

roche en place, sans entraîner un glissement de terrain qui aurait eu comme conséquence l'effondrement de la rue Côte d'Eich et du boulevard Paul-Eyschen. Pour cette raison on a dû chercher une autre solution et on a adopté une fondation sur puits qui se présente comme suit:

Aux points d'appuis des deux béquilles du côté Pescatore on creusait 4 puits dont 1 vertical, 2 dans la direction de la béquille et 1 subhorizontal. Ces puits avaient un diamètre de 2,20 mètres mais les bases qui descendaient assez profondément dans la roche en place étaient élargies jusqu'à 3,5 m resp. 5,5 m de diamètre. Ces puits étaient armés et remplis de béton. Les béquilles B et B' prenaient assise sur les têtes des puits réunis par une dalle en béton.

Vu la pente beaucoup plus modérée du versant Olizy, et la faible épaisseur de la couche de roche meuble (éboulis de pente, dont l'épaisseur était de l'ordre de 4 m) qui recouvre ici la roche en place, ce problème ne se posait pas sur ce versant. Ici on pouvait déblayer jusqu'à la roche en place sans avoir recours à des puits.

b) Un autre problème de fondation qui se posait était dû à la présence du grand nombre de crevasses et de diaclases dont la position est verticale et dont la direction est plus ou moins parallèle à la direction de la vallée.

En effet, les forces transmises à partir des points d'appuis des béquilles sur les fondations sont assez élevées. A savoir:

du côté Pescatore pour chaque béquille:

dans la direction de la béquille	3744 t
verticalement	2231 t
horizontalement	3007 t

du côté Olizy pour chaque béquille:

dans la direction de la béquille	3858 t
verticalement	2406 t
horizontalement	3013 t

Il est évident que sous l'effet de ces forces horizontales orientées perpendiculairement aux plans des crevasses, celles-ci risquent de se fermer ce qui entraîne un déplacement des différents blocs de rochers vers l'intérieur des plateaux suivi d'un déplacement des points d'appuis des béquilles ainsi que de l'écroulement du pont.

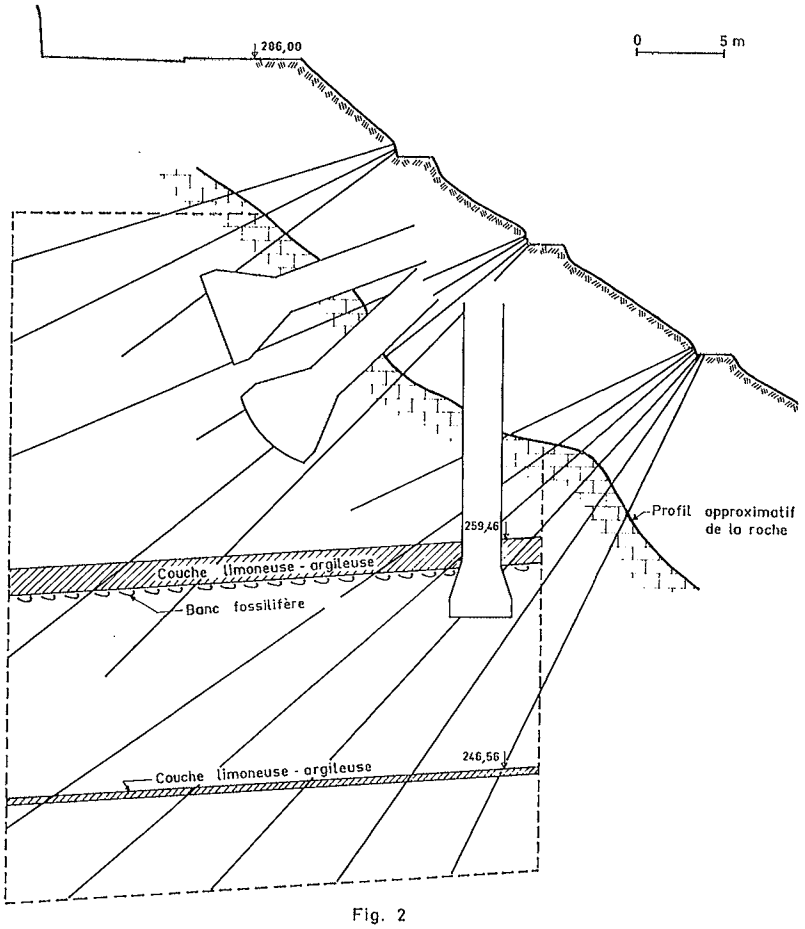


Fig. 2

Afin d'éviter un tel déplacement, il fallait remplir les crevasses de mortier pour créer ainsi pour chaque versant un mono-bloc dont le poids résiste aux poussées horizontales des béquilles.

Ces injections ont été exécutées de la manière suivante:

D'abord il fallait réaliser à l'extérieur des points d'appuis qui sont équidistants de 16,00 m, des voiles latéraux, équidistants de 26,00 m pour éviter l'écoulement de la matière injectée et pour délimiter latéralement le bloc à traiter. Après la confection de ces voiles, on réalisa les injections situées entre les voiles latéraux.

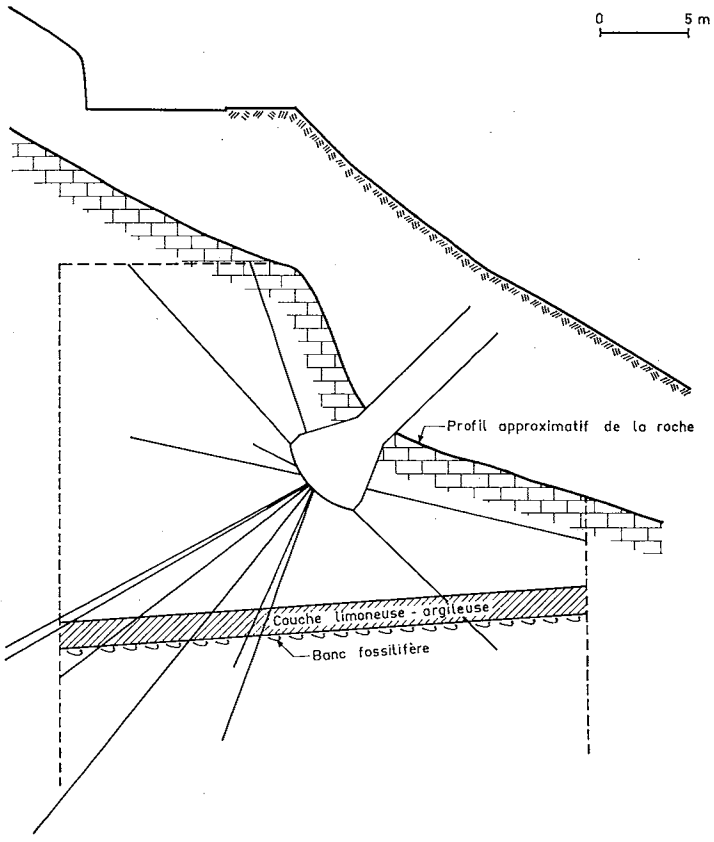


Fig. 3

Pour le côté Pescatore, les injections situées entre les voiles se faisaient à partir des puits de fondation, avant le bétonnage de ces derniers.

La fig. 2 montre la disposition des puits de fondation et des forages pour la réalisation du voile Nord de la fondation de la béquille B. Sont également indiqués le profil de la roche en place, la position des divers bancs limono-argileux ainsi que la limite théorique du bloc à traiter.

La fig. 3 montre la disposition des forages d'injection à partir d'un puits incliné.

Etant donné que du côté Olizy on avait des crevasses du même ordre de grandeur, le problème de fondation était en

COTE SUD

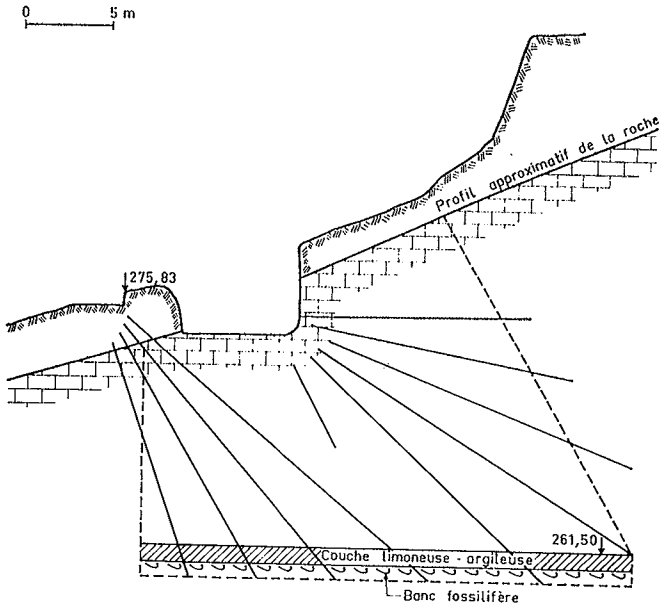


Fig. 4

principe le même, mais vu la faible puissance de la couche de terre meuble, les injections ont pu être réalisées à partir de la surface rocheuse dénudée des éboulis de pente.

Fig. 4 montre la disposition des forages d'injection pour le voile latéral sud côté Olizy ainsi que la position de la couche limono-argileuse et les limites théoriques du bloc à traiter.

Puisque du côté Olizy les béquilles ne sont pas fondées sur des puits, les injections situées entre les deux voiles latéraux se faisaient de la même manière que pour ces derniers, c.-à-d. entre les deux voiles on réalisa encore trois profils d'injections intermédiaires.

Après l'achèvement des injections on exécuta des forages de contrôle afin de vérifier l'efficacité des injections. Les forages de contrôle furent à leur tour injectés avec un mélange ciment/eau pour réaliser un blocage des fines fissures.

Du côté Pescatore, on a injecté 3103,530 tonnes de ciment et 1674,640 t de sable. La longueur totale des forages d'injections, y compris les forages de contrôle, était de 2674 mètres. La quantité de mortier injectée par mètre courant de forage était 1,787 tonne (1,161 t de ciment et 0,626 t de sable).

Sur le versant Olizy la quantité de ciment injecté était de 1441,35 tonnes et la quantité de sable atteignait 2551,10 t. La longueur totale des forages d'injection, y compris les forages de contrôle, était de 1132 m. La quantité de mortier injecté par mètre courant de forage s'élevait donc sur le versant Olizy à 3,527 t, à savoir 1,273 t de ciment et 2,254 t de sable.

A titre de comparaison, il est intéressant de mentionner la quantité de ciment injectée pour la réalisation des voiles d'étanchéité des barrages situés dans les schistes dévoniens (Esch-s.-Sûre et Vianden), quantité qui était de l'ordre de 60 kg/mètre courant de forage.

Les injections furent commencées avec une pression zéro, c.-à-d. d'abord le coulis s'écoulait librement dans les crevasses, puis cette pression fut augmentée de plus en plus et la pression terminale, maximale, était de 3 kg/cm², resp. 10 kg/cm² selon la profondeur de la zone traitée.

Une troisième difficulté d'ordre géologique constituait la couche limono-argileuse. En effet, par suite de la diminution du frottement le long du plan de contact grès/limon, cette couche qui avait une épaisseur de l'ordre de 2 m aurait favorisé un déplacement des quartiers de roche sous l'effet de la composante horizontale que les béquilles exercent sur la roche.

Des échantillons non remaniés, prélevés dans cette couche, furent analysés au laboratoire de mécanique des sols de la T. H. Munich par le Professeur JELINEK et à Bruxelles par le Professeur VERDEYEN.

Dans le calcul des fondations on tenait compte des résultats de ces essais.

Pour les injections on employait du ciment H.F.H.R. de la cimenterie d'Esch-sur-Alzette.

Les injections furent réalisées par l'entreprise BACHY de Nancy.