

Tunnels de Concise et de la Lance

Creusés dans des terrains meubles aquifères et des roches calcaires, les tunnels de Concise et de la Lance ont eu recours à un vaste éventail de méthodes de construction. En terrain meuble, l'excavation des tunnels s'est faite à l'abri d'une voûte en jet-grouting alors qu'une méthode classique à l'explosif était appliquée en rocher. Une galerie de reconnaissance a été réalisée avec un petit tunnelier. Ce chantier a en outre mis en œuvre diverses techniques telles que le rabattement de nappe, les parois berlinoises et clouées ou les colonnes en jet-grouting.

Peu avant la frontière cantonale VD-NE, les tunnels de Concise et de la Lance - deux tubes de deux voies chacun - permettent de franchir un contrefort du Mt-Aubert après Concise en direction de Vaumarcus. Les deux tunnels sont séparés par un tronçon à ciel ouvert empruntant les ponts sur la Dia (fig. 1).

En plan, le tracé dessine un grand S avec des rayons de 800 à 1480m raccordés entre eux par des clothoides et un court alignement. En élévation, l'autoroute achève une légère rampe au droit des portails du côté Yverdon et la chaussée descend ensuite avec une pente de 1,8% à 2,2%. L'épaisseur maximale de la couverture rocheuse est d'environ 68 m pour les tunnels de Concise et de 14 m pour ceux de la Lance (fig. 2).

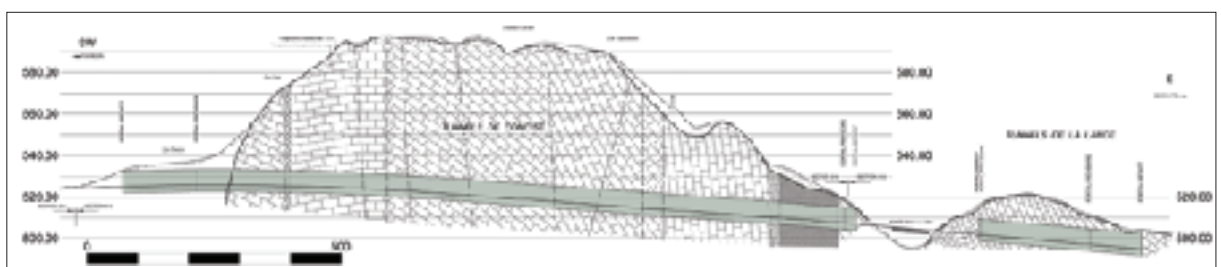
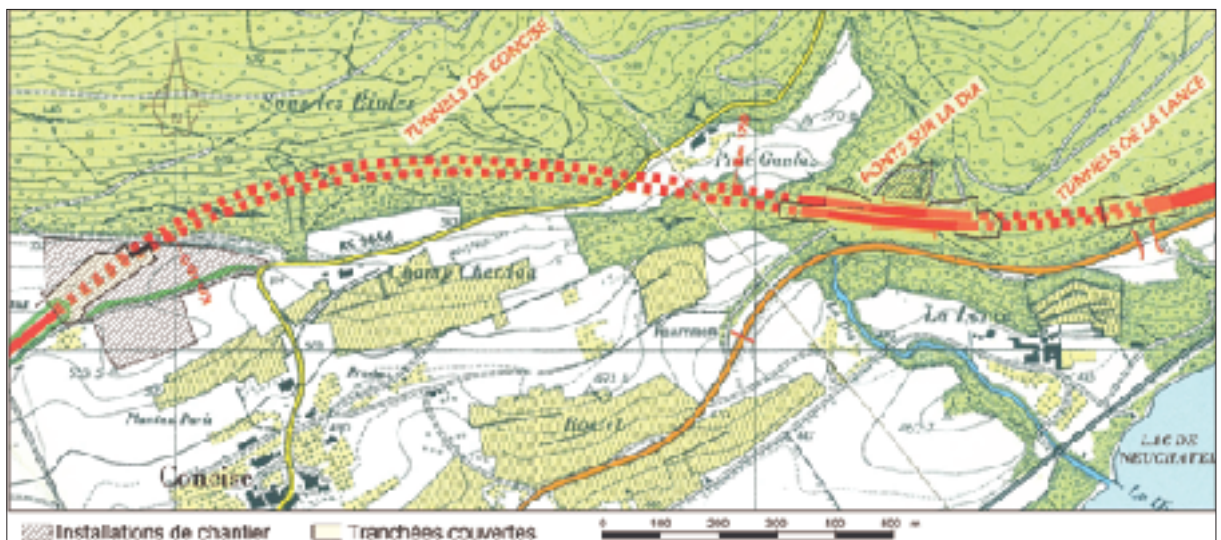


Fig. 1 : Situation générale (plan établi sur la base des données cadastrales, autorisation du Service de l'Information sur le Territoire-Vaud N° 05/2005)

Fig. 2 : Profil géologique à l'axe des tunnels Jura

Fig. 3 : Profil type en tunnels

Tab. A : Longueurs des ouvrages et volumes principaux

Tab. B : Concepts d'étanchéité des tunnels et des tranchées couvertes

Tab. C : Déroulement des travaux

Les longueurs et les volumes excavés des quatre tunnels sont donnés dans le [tableau A](#). La totalité des matériaux d'excavation ont été valorisés, soit sous forme de remblais, de grave de fondation ou de granulats pour enrobés¹.

La [figure 2](#) présente le profil type définissant les éléments principaux et leurs dimensions, à savoir :

- rayon intérieur : 5,10 m en voûte et 5,50 m en radier,
- soutènement provisoire, variable selon les classes d'excavation de la norme SIA 198 :
 - classe II : clous en calotte, 8 cm de béton projeté fibré
 - classes III + IVa : clous en calotte et en piédroits, 8 cm de béton projeté fibré,
 - en classe IVb : cintres HEB 160 espacés de 1 m, 23 cm de béton projeté fibré,
- épaisseur de la voûte du revêtement définitif : 30 cm pour les tunnels de la Lance ; cette épaisseur a été augmentée à 35 cm pour les tunnels de Concise, suite à des difficultés pour le remplissage de la clé de voûte lors du bétonnage des tunnels de la Lance (réalisés en premier),
- chaussée comportant deux voies de 3,875 m pour un gabarit d'espace libre de 7,75 m x 4,60 m avec des trottoirs de 1,00 m au minimum,
- dévers variable selon la sinuosité,
- galerie technique de 2,60 m x 2,00 m, coulée en place.

Pour la sécurité, les tunnels de Concise sont reliés par quatre galeries transversales (une carrossable et trois piétonnes), alors que les tunnels de la Lance n'en ont pas besoin du fait de leur faible longueur. Il y a en outre vingt-deux niches SOS - deux fois neuf dans les tunnels de Concise et deux fois deux dans ceux de la Lance.

Programme des travaux

Les principaux travaux de génie civil ont commencé en avril 2000 et se sont achevés en juillet 2004 par la pose de l'enrobé MR11 dans le tube Concise-lac. Le programme contractuel initial prévoyait la réalisation des travaux en quatre ans et un mois. Cependant, les difficultés mises en évidence par

la galerie de reconnaissance - importantes zones karstiques à traverser² - risquaient d'entraîner un retard de près de deux ans et ce n'est que grâce aux mesures prises (nouveaux fronts d'attaque et second coffrage de voûte) que le programme a pratiquement été tenu et que les ouvrages ont pu être mis à disposition dans les délais pour les installations électromécaniques. Les dates clés du programme des travaux sont synthétisées dans le [tableau C](#).

Géologie et hydrogéologie

Le profil géologique ([fig. 2](#)) montre que les tunnels traversent essentiellement des formations géologiques constituées de calcaires jurassiques fortement fracturés et karstifiés.

Les premières centaines de mètres des ouvrages de Concise depuis le côté Yverdon - tranchée couverte et début des tunnels - traversent des terrains meubles, avec d'importantes circulations d'eaux souterraines. Ces terrains sont constitués d'une moraine surmontée d'alluvions fluvioglaciales, puis d'éboulis de pente au pied de la falaise calcaire visible en surface. Les tunnels pénètrent ensuite dans les calcaires massifs du Portlandien qui comportent un important réseau karstique qui se met en charge durant la période des hautes eaux. Les tunnels traversent ensuite des marnes d'Hauterivien inférieur de résistance médiocre et très altérables, jusqu'à la tranchée couverte du côté Neuchâtel.

Réalisés sous une faible couverture, les tunnels de la Lance se situent dans les calcaires du Barrémien et de l'Urgonien, des roches très fracturées, mais quasi sans eaux souterraines.

Etanchéité

Compte tenu des conditions hydrogéologiques, l'étanchéité des tunnels et des tranchées couverte a été réalisée selon les concepts du [tableau B](#). Tant en tunnel que sous le radier des tranchées couvertes, l'étanchéité FPO est systématiquement cloisonnée et injectable, ce qui permet un contrôle par *vacuum* et des injections d'étanchement en cas de défaut. En tunnel, des joints de sectionnement ont en outre été mis en

¹ voir à ce sujet *TRACÉS* 03/2003, « Réutilisation de matériaux d'excavation de tunnel dans la superstructure de la A5 vaudoise », pp. 27-33

² voir à ce sujet *TRACÉS* 19/2004, « Le Karst : un milieu trop méconnu des ingénieurs ? », pp. 19-21



4

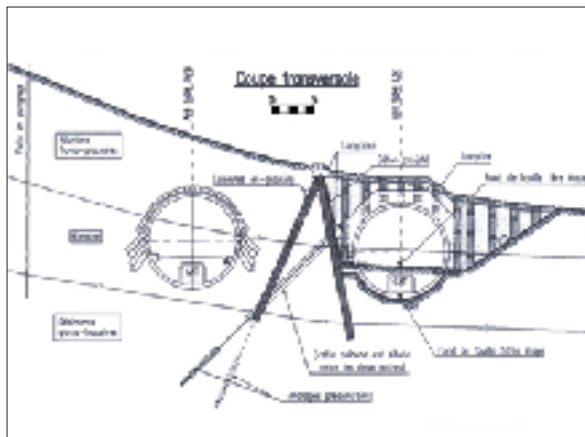
place entre l'étanchéité et le soutènement provisoire (côté rocher) pour empêcher des circulations longitudinales et un effet drainant des tunnels. Sur la voûte des tranchées couvertes, on a retenu une solution plus classique d'étanchéité LBP collée en plein.

Zone en terrain meuble (côté Yverdon)

L'excavation en terrain meuble de la tranchée couverte du côté Yverdon des tunnels de Concise a rendu nécessaire la réalisation de trois types de soutènement différents (fig. 4).

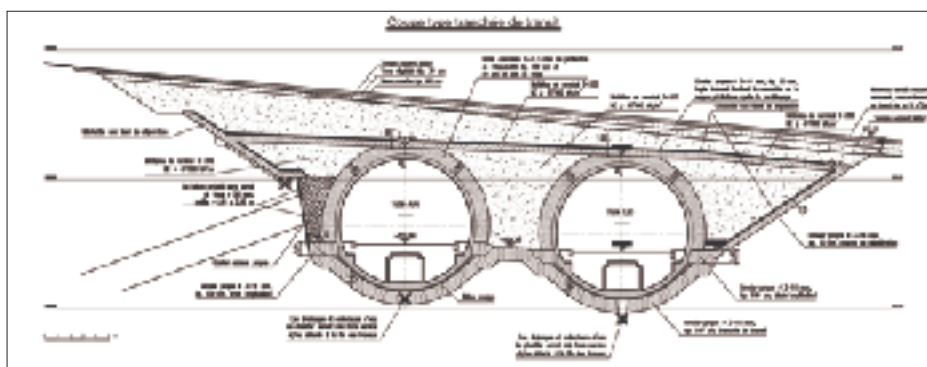
Dans la zone des portails provisoires, il s'agit principalement d'une paroi berlinoise de 14 m de hauteur pour 90 m de longueur totale, composée de 37 pieux de 80 cm de diamètre. Le terrain entre les pieux - espacés de 2,5 m - est soutenu par des voûtelettes en béton projeté de 12 cm d'épaisseur et armées d'un treillis. Cette paroi est ancrée par quatre niveaux de tirants précontraints.

Le pied du talus amont a été stabilisé par une paroi clouée en béton projeté armé d'un treillis qui est tenue par des ancrages passifs. Cette petite paroi - 120 m de long et 5 m de hauteur maximale - avait pour but de limiter l'emprise et le volume des excavations.



5

Pour avoir une couverture suffisante malgré la pente transversale du terrain naturel, les portails provisoires d'attaque des tubes Jura et lac ont dû être décalés d'environ 30 m. Ce décalage a imposé un troisième système de soutènement pour la fouille entre le tube lac - réalisé à ciel ouvert - et le tube Jura - exécuté en souterrain. La présence toute proche du futur tube amont a rendu nécessaire un soutènement rigide tout en interdisant une pose classique d'ancrages. Ce problème a été résolu en réalisant un massif poids, rigidifié par des colonnes en jet-grouting et stabilisé par des ancrages très inclinés (fig. 5). Les ancrages étaient placés entre les colonnes, parallèlement à leur axe, pour y introduire une force de précontrainte.



6



7

Fig. 4 : Première étape d'excavation et soutènement de la tranchée couverte Yverdon-Concise

Fig. 5 : Coupe en travers du soutènement entre la fouille lac et le tube Jura

Fig. 6 : Coupe en travers de la tranchée couverte Yverdon-Concise, remblayage permettant le transit de l'eau souterraine

Fig. 7 et 8 : Tranchée couverte Neuchâtel-Concise-Jura avant et après remblayage

Fig. 9 : Tranchée Neuchâtel-Concise-lac et mur de soutènement en blocs

Depuis les portails provisoires, les tunnels traversent environ 100m de terrains meubles avant de pénétrer dans le rocher. L'excavation de ces tronçons s'est faite à l'abri de voûtes en jet-grouting de 16m de longueur, y compris 3m de recouvrement entre les huit étapes. Chacune des voûtes, d'une épaisseur d'environ 30 à 60 cm, a été injectée par 45 forages espacés de 55 cm. Le terrain meuble, comportant des blocs de rocher et du coulis de ciment, a été excavé avec une pelle rétro spécialement équipée pour les tunnels, soit avec un godet à dents, un marteau hydraulique et une fraise.

Avant l'excavation de la tranchée, la nappe phréatique a été rabattue par deux rangées de puits de pompage placés en quinconce, dans le terrain meuble situé en amont de la tranchée et du tunnel. A l'exception de quelques périodes de forts débits, l'eau pompée a été réintroduite dans la nappe - qui alimente des sources - par huit forages placés à l'aval de la tranchée.

A la fin des travaux, la tranchée a été remblayée selon un concept permettant aux circulations d'eau de se rétablir (fig. 6):

- les soutènements ont été percés pour éviter tout effet de barrage et rétablir l'écoulement naturel des eaux souterraines ;
- le matériau de remblai à l'amont du tube Jura est perméable (gravier sableux propre) ;
- cinq larges bandes remplies de gravier ont été réalisées sous le radier des tubes pour permettre le transit de l'eau souterraine de l'amont vers l'aval ;
- un tapis de gravier recouvre complètement le talus aval de la fouille pour permettre à l'eau souterraine de retrouver ses écoulements d'avant travaux ;
- un peu en retrait des portails définitifs, un « noyau » en limon argileux force l'eau souterraine à transiter en direction du lac et l'empêche de sortir en direction de la tranchée ouverte de l'autoroute.

Zone de la Dia (entre les tunnels)

L'excavation de la tranchée Neuchâtel-Concise-Jura atteignait 25m de hauteur avant le remblayage (fig. 7 et 8). La bonne qualité du calcaire du Valanginien a permis de tailler des talus relativement raides: 5/1 (V/H) pour la partie à remblayer et 3/1 pour la partie apparente. Cette dernière a été sécurisée par un treillis torsadé cloué.

Côté lac, la tranchée Neuchâtel-Concise traverse des calcaires marneux tectonisés de l'Hauterivien, qui ont été recouvert de béton projeté pour éviter leur altération durant les travaux. L'importante pente transversale du terrain naturel et la hauteur du remblai de la tranchée couverte Jura, ont rendu nécessaire la construction d'un mur de soutènement définitif. Pour l'intégrer harmonieusement dans le cadre du vallon de la Dia, ce mur a été réalisé avec des blocs calcaires exploités à proximité (fig. 9).

Les deux tranchées Yverdon-Lance ont dans un premier temps été excavées avec des talus à 3/1, mais la fracturation importante des calcaires et le pendage défavorable des couches ont nécessité la reprise de ces talus à 1/1. Ils ont également été sécurisés avec un treillis.

Travaux souterrains en rocher

Afin de reconnaître le rocher et de détecter la présence éventuelle de karst, une galerie pilote a été exécutée avec un petit tunnelier sur le tracé du tube Concise-Jura. Ce tunnelier, de 3,8m de diamètre, est parti depuis le portail provisoire côté Neuchâtel, pour remonter jusqu'à 185m du contact entre le terrain meuble et le rocher, côté Yverdon.

La galerie a effectivement rencontré deux importantes cavités karstiques sèches et remplies de limons. La longueur de franchissement du premier karst était de 25m alors que le second, dans lequel le tunnelier est resté planté, atteignait 50m. Il a fallu environ trois mois pour parvenir à le dégager.



Fig. 10: Tunnel de la Lance côté lac, calotte-stross excavé en classe IVb
(Sauf mention, tous les documents illustrant cet article ont été fournis par GIT-N5)

Pour franchir ces karsts en grande section, il a été nécessaire de consolider le terrain au-dessous et au-dessus du futur tunnel. Pour le faire, une contre-voûte parapluie (sous le radier), ainsi qu'un sous-radier de 50 cm d'épaisseur sous le futur radier de la section normale du tunnel ont d'abord été exécutés. On a ensuite réalisé une voûte parapluie en calotte et en piédroits, cette voûte étant complétée par des cintres HEB 160 ($e = 1$ m), un treillis type Bernold et un remplissage en béton fibré de 58 cm. Le front d'attaque a en outre été stabilisé avec des ancrages en fibre de verre. Ces travaux de consolidation ont duré près de huit mois pour le passage de la zone karstique la plus importante.

Les retards dus à ces surprises géologiques ont dû être compensés par l'ouverture de deux fronts d'attaque supplémentaires. Le principal a été ouvert dans le tube lac - attaque

montante depuis la Dia - jusqu'à la galerie carrossable, ce qui a permis la création d'une piste de chantier en forme de S (transitant du tube lac au tube Jura par la galerie transversale). L'autre front supplémentaire a consisté à poursuivre l'excavation du tube Jura en attaque descendante en rocher au-delà de la fin du tronçon en terrain meuble, à la rencontre du tunnelier. De plus, un second coffrage de voûte a été mis en service pour accélérer la cadence de bétonnage.

Le reste des tunnels en rocher a été excavé en attaque montante et à l'explosif, d'abord en calotte-stross, puis en radier (fig. 10).

Claude Gindroz, ing. civil EPFL/SIA
CSD Ingénieurs Conseils SA, pilote du GIT-N5
Ch. de Montelly 78, CH - 1000 Lausanne 20



10

GROUPEMENT GIT-N5

GIT-N5 est un groupement d'ingénieurs des tunnels de la N5 comprenant les bureaux suivants :

- CSD Ingénieurs Conseils SA, Lausanne, pilote
- Piguët + Associés Ingénieurs Conseils SA, Lausanne
- Norbert Géologues Conseils SA, Lausanne
- IM Bureau d'ingénieurs Maggia SA, Locarno (électromécanique)

PUB