



H189 – Route d'évitement Bulle – La Tour de Trême Aspects géologiques et géotechniques Laurent Idoux¹

Mots-clés: tunnel, tranchée couverte, excavation, géotechnique, hydrogéologie

Résumé

La route H189 qui évite Bulle et La Tour-de-Trême est implantée selon un axe Nord-Sud sur quelques 5 km. Elle comprend plusieurs ouvrages souterrains creusés en grande partie dans les dépôts meubles du bassin de Bulle et constitués de quatre tranchées couvertes et deux tunnels. Exécutés selon des méthodes variant en fonction des conditions géologiques, géotechniques et hydrogéologiques rencontrées, leur construction a dû faire face à des difficultés découlant essentiellement de l'hydrogéologie, du passage d'obstacles naturels tel celui de la rivière de la Trême ou de la présence de zones urbaines. Après une présentation du projet, des conditions géologiques générales ainsi que des phases d'études géotechniques, chaque ouvrage souterrain fait l'objet d'une description de celles qui ont prévalu à sa construction, en mettant en particulier l'accent sur le tunnel de la Trême, et de la technique appliquée pour sa réalisation. Les moyens mis en œuvre pour reconstituer au mieux les conditions hydrogéologiques d'avant travaux et répondre ainsi aux exigences légales relatives à la protection des eaux sont mis en évidence. Enfin, la gestion des matériaux fait l'objet d'un commentaire décrivant notamment le problème posé par l'important volume de matériaux excédentaires généré par les travaux de terrassement.

Zusammenfassung

Die etwa 5 km lange, längs einer Nord-Süd Achse realisierte Umfahrungsstrasse von Bulle und La Tour-de-Trême hat die Realisierung verschiedener unterirdischer Bauwerke zur Folge gehabt. Für die Ausführung der vier Tagbautunnels und der beiden bergmännischen Tunnels wurden die Baumethoden in Funktion der vorliegenden geologischen, geotechnischen und hydrogeologischen Verhältnisse (Lockergesteinsablagerungen) sowie der teilweise städtischen Besiedlungsdichte bestimmt. Die bautechnischen Schwierigkeiten standen vor allem im Zusammenhang mit den hydrogeologischen Bedingungen sowie den Unterquerungen natürlicher Hindernisse, wie zum Beispiel des Flusslaufes der «Trême». Der Artikel präsentiert das Projekt, die allgemeinen geologischen Bedingungen sowie die für jedes Bauwerk angetroffenen geotechnischen Verhältnisse. Eine eingehendere Betrachtung ist dem «Trême-Tunnel» gewidmet sowie den für seine Realisierung ausgewählten Baumethoden. Es werden auch die eingesetzten Mittel beschrieben, die für die Wiederherstellung der vor dem Bau herrschenden hydrogeologischen Bedingungen benötigt wurden. Den rechtlich vorgeschriebenen Gewässerschutzbedingungen konnte so Folge geleistet werden. Der Artikel endet mit einem Kommentar über die Bewirtschaftung des Aushubmaterials, sowie über die Verwendung der grossen Volumen überschüssiger Aushubmaterialien.

¹ CSD Ingénieurs Conseils, Chantemerle 37, Granges-Paccot, CP384, CH-1701 Fribourg





1. Présentation

L'agglomération de Bulle occupe une position stratégique d'articulation du réseau routier de Suisse Occidentale. Elle se situe au confluent géographique des vallées de la Sarine, de la Jogne et de la Sionge. C'est aussi un nœud de circulation qui permet de se rendre :

- au sud vers le Pays-d'Enhaut (région de Château d'Oex), le Saanenland (région de Gstaad) et la vallée de la Jogne (Charmey-Col du Jaun-Boltigen),
- au nord vers Fribourg, Berne et la Suisse alémanique,
- à l'ouest vers le bassin versant lémanique.

La route d'évitement de Bulle-La Tour de Trême conduira le trafic de l'autoroute Berne-Vevey vers la route principale alpestre suisse H189 qui mène à Boltigen via le Jaunpass et vers les routes cantonales qui mènent à Château d'Oex via la vallée de l'Intyamou. Elle aura le statut de semi-autoroute.

2. Description du projet

Au nord, la jonction avec l'autoroute N12 se fait au niveau de l'échangeur autoroutier actuel. Le tracé contourne Bulle par l'ouest (butte de Montcalia et La Pâla), puis passe en tunnel sous la piscine communale et sous la Trême. Désormais sur le territoire de La Tour-de-Trême (commune qui a fusionné avec Bulle en 2006), le tracé traverse la plaine des Granges, pour passer au nord-est du bois de Sautau. Enfin, l'accrochage s'opère avec la route cantonale au sud (à hauteur du Pré de Chêne).

Longue de 5'260 mètres, la route comprend des tronçons à niveau, en déblai, des passages supérieurs, des tranchées couvertes et deux tunnels. L'enchaînement des ouvrages et des interfaces suivant peut être visualisé sur le plan d'ensemble (figure 1):

- accrochage sur la bretelle d'accès à la A12 au lieu-dit «La Sionge»,

- franchissement en dénivelé de la route de la Léchère sans interface,
- franchissement en dénivelé du chemin des Crêts avec une interface en Planchy,
- franchissement souterrain de la zone industrielle en Planchy et de la colline de Montcalia,
- implantation en dénivelé de l'interface de La Pâla au droit du futur giratoire route de La Pâla-rue des Usiniers,
- franchissement en tranchée couverte du secteur des Usiniers,
- franchissement en tunnel de la route de Vevey, de la Trême et du quartier résidentiel des Granges,
- franchissement en tranchée couverte de la partie nord de la plaine des Granges,
- tracé à ciel ouvert traversant la plaine des Granges,
- franchissement en dénivelé de la route du Pâquier avec implantation d'une interface sur cette route,
- et enfin, accrochage sur la route de l'Intyamou au lieu-dit «Pré-du-Chêne».

3. Organisation et programme des travaux

Mandant: Etat de Fribourg avec contribution de la Confédération Suisse. Direction de l'aménagement, de l'environnement et des constructions (DAEC), représentée par le Service des ponts et chaussées (SPC). Mandataire: Association Sud Ingénieurs (ASI).

Un mandat de prestations d'étude globale a été confié en 1997 à l'association Sud Ingénieurs (ASI) regroupant 16 bureaux d'ingénieurs et subdivisée en 7 groupes de compétences. La direction des travaux a été confiée à l'ASI en 2003 et les travaux ont démarré en 2004. Le programme contractuel prévoit la durée des travaux sur 6 ans. A l'heure où cet article est écrit, il n'y a pas de retards significatifs et le programme devrait être tenu avec l'ouverture de la route en décembre 2009.



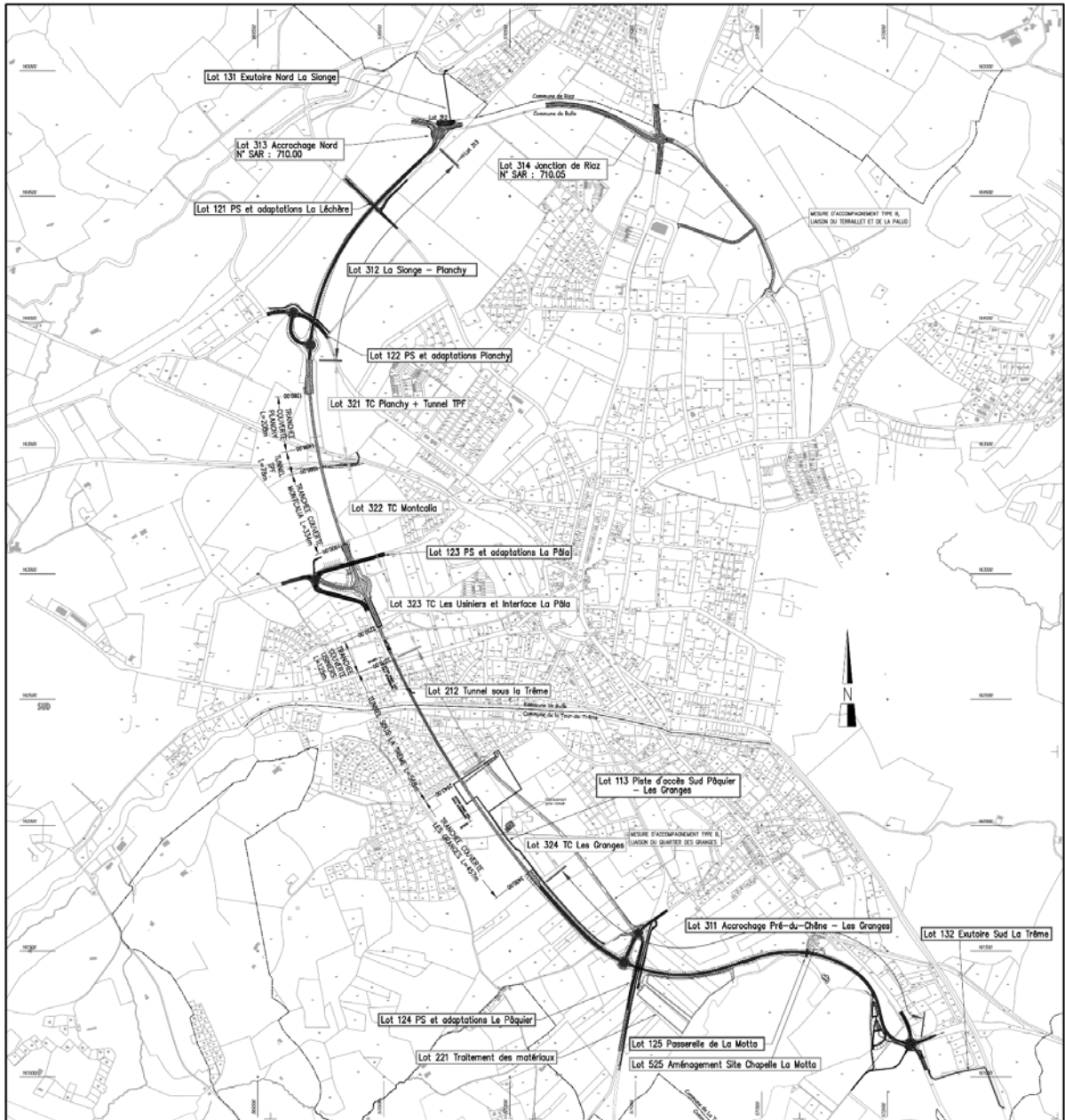


Fig. 1: Situation du tracé et des ouvrages (chaque chantier a un numéro de lot).

4. Cadre géologique et hydrogéologique

Le bassin de Bulle, traversé par la route H189, est situé au front des Préalpes, dans la zone de contact entre le Flysch subalpin et les Préalpes externes. Le tracé de la route est presque entièrement sur le domaine des Préalpes externes.

Les dépôts meubles composant la couverture du bassin de Bulle sont, pour l'essentiel,

issus de la dernière glaciation du Würm. Ces sédiments résultent des différentes phases ayant accompagné le retrait des glaciers rhodanien et sarinien. Ils sont représentés par différentes unités regroupant des dépôts morainiques, fluvio-glaciaires, glacio-lacustres, lacustres (parfois marécageux), ainsi que postglaciaires. La figure 2 montre le tra-





cé de la route et les principales unités géologiques qu'il recoupe.

La route H189 rencontre le soubassement rocheux au nord, sous la butte de Montcalia (grès appartenant au Flysch préalpin).

La dernière glaciation, en particulier les épisodes ayant accompagné et suivi le retrait du glacier, puis la construction du cône de la rivière «la Trême» sont essentiellement à l'origine des grandes lignes de l'hydrogéologie souterraine locale. De petites unités hydrologiques juxtaposées, la plupart proches de la surface et de faible puissance, en ont

résulté. Des structures hydrologiques plus profondes peuvent se rencontrer à la traversée du cours des rivières.

5. Etudes géotechniques

Elles ont été réalisées par le groupe IV de l'ASI regroupant les bureaux Gicot Géotechnique et CSD Ingénieurs Conseils à Fribourg ainsi qu'Hydrap à Broc.

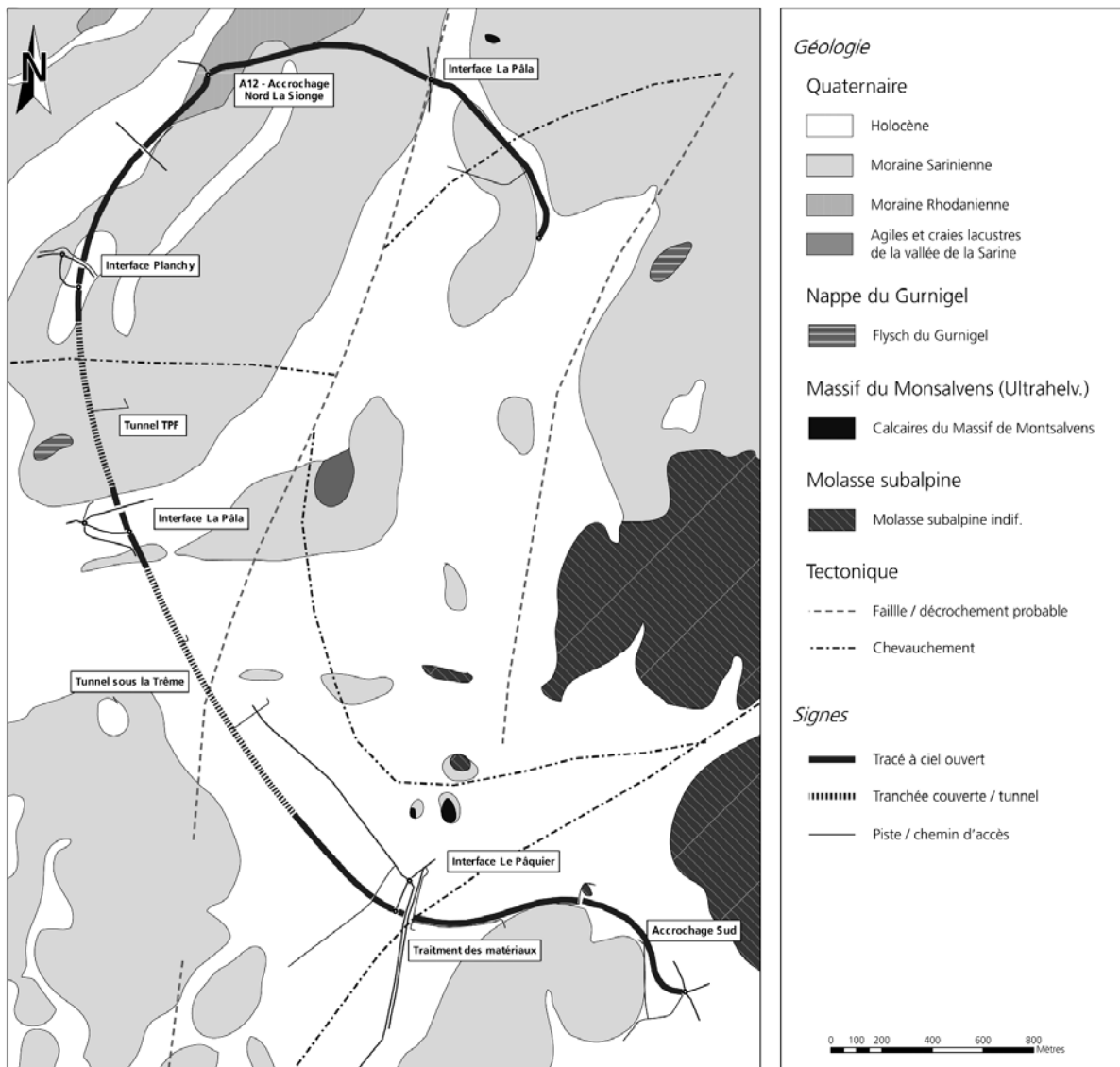


Fig. 2: Tracé et unités géologiques principales.





5.1 Reconnaissances du sous-sol

Les reconnaissances ont été menées en 3 étapes :

- la première et principale étape de reconnaissance a été effectuée en 1997 et a visé à reconnaître les conditions géologiques, géotechniques et hydrogéologiques sur l'ensemble du tracé.
- une campagne complémentaire a été réalisée en 1999 en raison de modifications diverses intervenues sur l'avant-projet.
- enfin, une seconde et courte campagne complémentaire a été effectuée en 2004.

Trois moyens de reconnaissances ont été mis en œuvre: des forages carottés, des forages destructifs et des sondages à la pelle hydraulique.

Au droit des ouvrages souterrains d'importance, les forages carottés ont souvent été implantés en vis-à-vis de part et d'autre de l'axe de la route. Cette implantation a permis d'une part de pouvoir ensuite interpoler la géologie sur la section des ouvrages (profils en travers) et d'autre part, de situer les piézomètres en dehors de l'emprise des travaux pour les conserver pendant toute la durée du chantier.

Le choix des essais dans les sondages (in situ) s'est porté sur des essais de résistance à la pénétration dans le terrain au Standard Penetration Test (SPT), des essais pressiométriques (chargement statique du sol en trou nu au moyen d'une sonde cylindrique dilatable radialement) et des essais d'eau (Lefranc dans les terrains meubles et Lugeon dans le rocher).

5.2 Essais en laboratoire

Les trois types principaux d'essais mis en œuvre pour caractériser les sols du point de vue géomécaniques dans ce projet ont été:

- des essais d'identification des sols destinés à décrire et à identifier les sols, à les classer et à apprécier leur état.
- des essais de compressibilité qui ont servi à mesurer les variations de volume d'un échantillon de sol placé dans un champ de contraintes uniforme avec possibilité de drainage. Dans le cas présent, il s'agissait d'essais œdométriques.
- des essais de résistance mécanique qui ont eu pour objet de déterminer la résistance des sols au cisaillement. Dans le cas présent, des essais de compression simple ont été réalisés sur le rocher et des essais de cisaillement direct ont été faits sur la moraine.

5.3 Bilan des reconnaissances géotechniques

Tous types de sondages confondus (tableau 1), un sondage a été réalisé pour 53 m de route. En décomptant les forages doublés de part et d'autre de l'axe, un sondage a été réalisé en moyenne tous les 62 m le long de l'axe du projet. Une comparaison entre la géologie projetée, établie sur la base de 4 forages carottés et la géologie effectivement en place, a été effectuée pour la tranchée couverte des Granges. Un nouveau profil géologique a été établi en utilisant les relevés géologiques de 26 puits filtrants. La conclusion de cet exercice montre que glo-

	Forages carottés	Forages destructifs	Sondages à la pelle hydraulique
Nombre de sondages	62	19	11
Longueur carottée (m')	1'092	-	-
Nombre équipé piézomètres	45	19	-

Tab 1: Récapitulatif par type des sondages réalisés au cours de la campagne de reconnaissance.



balement la géologie projetée est conforme à la géologie en place. Les nouveaux forages (puits filtrants) ont simplement permis de préciser la géométrie des couches et certaines conditions locales particulières comme par exemple la présence d'un énorme bloc de grès. Ils n'ont pas conduit à des modifications concernant le projet ni son exécution. De même, le tunnel sous la Trême a fait l'objet d'un suivi géologique régulier en cours de creuse qui n'a pas montré une géologie notablement différente de celle décrite dans le rapport géotechnique de base. Dès lors, on peut aussi estimer que la densité de sondages réalisés au stade des études était suffisante au regard du contexte géologique et hydrogéologique attendu.

6. Données géotechniques et hydrogéologiques

6.1 Description des faciès

Sans parler des dépôts récents rencontrés à faible profondeur sous le terrain naturel (remblais, colluvions, alluvions lacustres marécageux ou non), les sols ont été regroupés selon les unités géotechniques principales suivantes:

- les alluvions fluviales postglaciaires constituées essentiellement de gravier avec une proportion de fines variable. On y rencontre très localement de la tourbe ou des morceaux de bois. Les graviers comprennent surtout beaucoup de pierres, et des petits blocs. Les alluvions fluviales sont en général peu compressibles.
- la moraine, généralement cohérente, constituée le plus souvent de gravier emballé dans une pâte limono-argileuse, plus ou moins sableuse. Elle peut contenir des pierres, parfois nombreuses et des petits blocs. La moraine est très peu compressible. Dans certains secteurs, une moraine grise surconsolidée et désignée sous le terme «moraine béton» est présente. Elle

est dure et peut être considérée comme incompressible.

- les alluvions fluvio-glaciaires qui sont essentiellement du gravier sableux non cohérent avec une proportion de fines variable. Ces sols comprennent souvent beaucoup de pierres, moins fréquemment, des petits blocs et encore plus rarement des blocs de grande dimension. Les alluvions fluvio-glaciaires sont généralement très peu compressibles. Elles sont étroitement imbriquées dans la moraine.
- les alluvions glacio-lacustres, principalement constituées de limon sableux plus ou moins argileux, parfois varvé, généralement cohérentes. Les alluvions glacio-lacustres contiennent rarement des pierres. Elles sont peu à très peu compressibles. Il s'agit d'un faciès minoritaire par rapport aux autres qui se rencontre le plus souvent en lentilles ou en fines couches dans la moraine ou les alluvions fluvio-glaciaires. Localement, ce terrain apparaît surconsolidé, partiellement cimenté et dur.
- le rocher du secteur Nord de la Trême (butte de Montcalia) qui est un grès fin à moyen, dur à très dur, dans l'ensemble peu fracturé, de pendage 45° à 50°. Ses cassures peuvent être remplies de calcite, d'argilite, de limon argileux ou d'argile, ou vide. Très localement, le rocher se présente sous la forme d'un grès microconglomératique à caractère bréchié, très fracturé.

6.2 Perméabilité des terrains

Les alluvions fluviales postglaciaires ainsi que les alluvions fluvio-glaciaires sont les deux formations aquifères que rencontre le tracé de la nouvelle route.

La perméabilité des terrains varie fortement selon leur lithologie au niveau local. Par exemple, au sein des alluvions fluvio-glaciaires se trouvent aussi bien des graviers sableux propres à perméabilité élevée que des graviers limoneux et(ou) argileux peu perméables.

Dans le contexte hydrogéologique du chan-



tier, la classification des perméabilités suivantes a été retenue:

1. perméable à très perméable: $K > 10^{-4}$ m/s
2. moyennement perméable à perméable: 10^{-4} m/s $> K > 10^{-5}$ m/s
3. moyennement perméable à peu perméable: 10^{-5} m/s $> K > 10^{-6}$ m/s
4. peu perméable: 10^{-6} m/s $> K > 10^{-8}$ m/s
5. très peu perméable: $K < 10^{-8}$ m/s

Les différentes lithologies répondaient aux classes de perméabilité suivantes:

- alluvions récentes (y compris fluviales postglaciaire): classes 1 à 3 (en général 2);
- alluvions fluvio-glaciaires: classes 1 à 4 (en général 1 à 3);
- moraine graveleuse: classes 2 à 4 (en général 3);
- moraine béton: classes 4 à 5 (en général 5).

6.3 Conditions de fondation des ouvrages

Les formations qui servent de sols d'appui pour les fondations des tranchées couvertes et des tunnels sont majoritairement la moraine, les alluvions fluvio-glaciaires et dans une moindre mesure le rocher (secteur central de la TC de Montcalia). Ce sont des sols dans l'ensemble peu à très peu déformables dans le domaine des sollicitations auxquels ils sont soumis. Par conséquent, les tassements totaux ou différentiels sont faibles et se sont produits essentiellement pendant la construction des ouvrages.

7. Tunnels

Deux tunnels ont été réalisés le long du tracé. Le tunnel sous la voie ferrée TPF (Transports publics fribourgeois) et le tunnel sous la Trême. Leur section de 122 m² a été excavée en deux phases principales avec tout d'abord la calotte puis le stross (noyau, piédroits et radier).

Les principales contraintes associées au tunnel TPF étaient relatives aux voies (maintien de l'exploitation des voies pendant les tra-

voux et intégrité des installations ferroviaires) et d'un bâtiment industriel sensible situé aux abords directs du chantier. L'excavation du tunnel sous les voies a été faite à l'abri d'une voûte parapluie pendant que les éventuels soulèvements ou tassements des voies étaient surveillés au moyen d'un système optique et qu'un suivi des vibrations générées par le chantier était effectué sur le bâtiment. Aucun dommage significatif en relation avec les travaux de construction du tunnel n'a été constaté pendant et après les travaux.

8. Tunnel sous la Trême

8.1 Contraintes associées à la réalisation du tunnel sous la Trême

Cet ouvrage de 568 m de longueur, réalisé à une profondeur relativement faible par rapport à la surface, est creusé en site urbain dans des terrains meubles. Il passe ainsi sous la piscine municipale de Bulle, sous la rivière «la Trême» puis sous une zone résidentielle.

Son exécution comprenait donc des contraintes nombreuses, délicates à gérer et pouvant être lourdes de conséquences en terme de dommages potentiels.

8.2 Conditions géologiques et hydrogéologiques

Les principales formations géologiques qui ont été interceptées lors de la creuse du tunnel sont les suivantes:

- les alluvions fluviales postglaciaires composées essentiellement de gravier sableux meuble avec des intercalations de dépôts lacustres compressibles.
- la moraine, sablo-graveleuse et compacte ou gravelo-limoneuse, cohérente et dure (moraine «béton»). Il s'agit des terrains les plus souvent rencontrés sur la section du tunnel.
- les alluvions fluvio-glaciaires, constitués de gravier sableux souvent dense.



- les dépôts glacio-lacustres à dominante d'éléments fins (limons varvés, sables fins limoneux) et présents sous forme de lentilles de faible extension.

L'hydrogéologie au niveau du tunnel sous La Trême se caractérise par la présence de deux nappes d'eau souterraine:

- une nappe libre supérieure contenue dans les alluvions fluviales postglaciaires, présentant une puissance de l'ordre de 2 à 5 m. Cette nappe n'est pas directement recoupée par le projet et elle est «isolée» de la nappe sous-jacente par de la moraine peu perméable, épaisse de 6 à 11 m. L'écoulement de la nappe s'effectue vers le sud-est.
- une nappe captive inférieure contenue dans les alluvions fluvio-glaciaires. Cette nappe est largement traversée par le tunnel. Son épaisseur varie entre 2 et 16 m et son toit est recoupé à une profondeur de 10 à 21 m par rapport au terrain naturel. Les charges hydrauliques sont situées entre 3 et 12 m au-dessus du toit de l'aquifère, dans la moraine ou les alluvions postglaciaires. Deux secteurs avec des charges hydrauliques différentes ont été individualisés: l'un, sur le tiers nord du tunnel, possédant une charge hydraulique en hautes eaux plus élevée de 6 m par rapport à l'autre, correspondant aux deux tiers restants. Les valeurs de transmissivité reconnues par des essais de pompage de courte durée sont dispersées: elles s'échelonnent entre 10^{-5} m²/s et 10^{-3} m²/s.

Ces deux nappes sont séparées par des niveaux morainiques avec de faibles transmissivités.

8.3 Choix du rabattement et mise en œuvre

Le rabattement de la nappe inférieure a été effectué au moyen de drains rayonnants, disposés tous les 5 m, depuis une galerie de drainage (GAD) située à 3 m sous le tunnel et servant de collecteur.

Les objectifs de la GAD étaient de permettre

l'excavation du tunnel hors eaux en rabattant par avance la nappe en charge dans les alluvions fluvio-glaciaires. La GAD est située pour l'essentiel sous l'aquifère inférieur mais intercepte localement la nappe en raison de la géométrie complexe des dépôts. Pour obtenir le rabattement de la nappe, des forages drainants rayonnants d'une longueur variable de 25 à 35 m ont été exécutés régulièrement depuis la GAD de part et d'autre de la section du tunnel (figure 3). Pour permettre l'excavation de la GAD dans les meilleures conditions possibles en présence de venues d'eau, deux forages horizontaux de 25 mètres étaient réalisés à l'avancement dans le but de rabattre la nappe derrière le front. Pour réaliser la GAD, un puits d'accès vertical a dû être exécuté, puis la creuse de la galerie a démarré en mai 2005 selon la méthode d'excavation traditionnelle (figure 4): le front était excavé au moyen d'une petite pelle hydraulique équipée d'un marteau et les matériaux étaient évacués par une chargeuse vers le puits d'accès pour être finalement évacués au moyen d'une benne remontée en surface par une grue.

Le dispositif de rabattement a produit, sur le comportement hydraulique de la nappe inférieure, les effets suivants:

- au début du rabattement, la nappe était en charge: le régime d'écoulement était captif.
- lorsque la charge hydraulique a été abaissée au niveau de la cote du toit de l'aquifère fluvio-glaciaire, la nappe est devenue en partie libre et le rabattement à proximité des drains s'est poursuivi en régime d'écoulement gravitaire.

Les débits dans la GAD ont atteint 1'000 litres/minute pour se stabiliser aux environs de 500 litres/minutes. Ces eaux ont été pompées en surface, traitées puis rejetées à la Trême.

En décembre 2008, l'anneau du tunnel était construit et la GAD a été mise hors service par remplissage. La solution initiale était de remplir la galerie par du béton. Toutefois, une solution alternative, proposée par le



de cintres métalliques posés tous les mètres et de béton projeté sur treillis (figure 5).

Au passage sous la Trême, où la couverture sur la voûte se réduisait à 3.5 m (figure 3), les colonnes ont été renforcées par des tubes métalliques. Le suivi hydrogéologique de cette phase critique d'excavation a montré un impact temporaire faible sur la Trême avec une infiltration localisée et réduite à moins de 10 l/min. Aucune mesure particulière n'a du être prise car, après les travaux, la zone est à nouveau noyée dans la nappe captive contenue dans les alluvions fluvio-glaciaires.

9. Les tranchées couvertes du nord au sud de la H189

En fonction des conditions géologiques et hydrogéologiques attendues, les tranchées couvertes (TC) ont été construites selon deux types (tableau 2):

- une section fermée en béton armé avec une étanchéité extérieure complète dans les zones où l'ouvrage est situé dans la nappe des alluvions fluvio-glaciaires.
- une section ouverte en fer à cheval en béton armé avec une étanchéité extérieure parapluie qui recouvre les piédroits et la voûte dans les zones sans nappe ou dans les zones avec un ouvrage situé dans la moraine peu perméable.



Fig. 4:

Vue du front d'excavation de la GAD avec cintre et armatures avant pose du béton projeté. Géologie au front: moraine dure en pied, puis couche d'alluvions glacio-lacustres pincée entre alluvions fluvio-glaciaires.





La section de l'ouvrage pour les tranchées couvertes est de 102.5 m². Les profondeurs maximales des chaussées s'échelonnent entre 13 et 20 m alors que la profondeur minimale est de 8.50 m. Les tranchées couvertes, et en particulier celle de Montcalia, ont des sections de terrassement très importantes rapportées à des sections d'ouvrage relativement faibles. Cette situation a généré des mouvements de terres très conséquents.

Les types de soutènements provisoires mis en œuvre sont les suivants:

- parois berlinoises ancrées pour la TC Les Usiniers;
- parois gunitées clouées pour tous les talus d'une hauteur supérieure à 3 m.

Les critères de choix des soutènements provisoires ont été principalement la place disponible en surface et la profondeur de la chaussée sous le terrain naturel. La TC de Montcalia a bénéficié de la présence de rocher permettant de réduire l'emprise du terrassement.

Toutes les excavations ont été réalisées en pleine masse.

Dans le cadre de leur réutilisation directe, les matériaux morainiques ont été améliorés à la chaux dans le cadre des remblayages des piédroits des TC (nécessité d'obtenir

des modules d'élasticité élevés pour l'appui des voûtes). Cette solution a permis de remplacer les volumes de graves nécessaires et qui ne pouvaient pas être fournis par la valorisation des matériaux du site.

Les différents types de sols excavés et non réutilisés directement ont été acheminés vers les filières appropriées (centrale à béton et de traitement ou décharges).

Les matériaux rocheux (Montcalia) ont été partiellement concassés sur place pour confectionner des graves.

9.1 Tranchée couverte Planchy

Les matériaux rencontrés étaient des alluvions récentes, des alluvions fluviales postglaciaires, de la moraine et des alluvions fluvio-glaciaires. Localement, des lentilles d'alluvions glacio-lacustres (sables et limons varvés) ont été mises à jour. Le volume des matériaux d'excavation en place est approximativement de 134'600 m³.

Le rabattement temporaire de la nappe phréatique nécessaire à la réalisation de l'ouvrage a été obtenu grâce à 5 puits filtrants d'une profondeur avoisinant 20 m. Les puits ont été mis en service par étape en fonction de l'avancement des travaux et des résultats des essais de pompage.



Fig. 5: Excavation dans la moraine grise dite «moraine béton».



Le soutènement de fouille a été réalisé au moyen de parois gunitées et clouées. Elles ont été exécutées par étape de hauteur maximum 1.70 m, de haut en bas et au fur et à mesure de l'excavation. A chaque étape, des ancrages passifs ont été mis en place avec une inclinaison de 10° et un entraxe horizontal de 2.50 m; au total, ce sont 7'800 m de clous en acier de longueurs comprises entre 6.0 et 8.0 m qui ont été posés. Le parement a été réalisé en béton projeté avec un fruit de 7 sur 1 (vertical/horizontal), armé avec 2 couches de treillis et renforcé au droit des ancrages. Le parement, d'une surface de 4'300 m², a été ferrillé à l'aide de 41'400 kg de treillis et de 6'500 kg d'armatures.

En raison des conditions hydrogéologiques régnant dans les alluvions fluvio-glaciaires, une section fermée, étanche, avec radier a dû être adoptée sur un tronçon de la TC y compris le tunnel sous les voies TPF.

Les remblayages ont été exécutés à partir des stocks de matériaux excavés et environ 69'500 m³ de matériaux ont été nécessaires. Afin d'arriver aux exigences de compacité requises, une amélioration du sol à la chaux était indispensable et 310'000 kg de chaux ont été utilisés.

9.2 Tranchée couverte Montcalia

Les terrassements ont rencontré des alluvions récentes, peu compactes et de faible épaisseur, de la moraine très compacte, qui formait l'entité la plus importante, et du côté

Sud de la tranchée, des alluvions fluviales postglaciaires, assez denses. Dans les secteurs Nord et Sud de la colline de Montcalia, les alluvions fluvio-glaciaires avaient une emprise limitée. Dans son secteur central, la tranchée pénètre dans un massif rocheux important formé de grès, localement micro-conglomératique et brèchique mais dans l'ensemble peu fracturé. Le volume total des matériaux d'excavation en place est approximativement de 168'500 m³ dont 1/3 de rocher. Un rabattement temporaire de la nappe phréatique nécessaire à la réalisation de l'ouvrage a été obtenu grâce à 8 puits filtrants d'une longueur totale de 145 m.

Dans les secteurs en terrain meuble au nord et au sud de la tranchée, le soutènement de fouille a été réalisé au moyen de parois gunitées et clouées, par étape de haut en bas au fur et à mesure de l'excavation (H max. = 1.7 m). A chaque étape, des ancrages passifs ont été posés avec une inclinaison de 10° et un entraxe de 2.50 m; au total, 7'650 m de clous en acier ont été utilisés avec des longueurs de 6.0, 8.0, 10.0 et 12.0 m. Le parement a été réalisé en béton projeté avec un fruit de 7 sur 1 et armé avec 2 couches de treillis, renforcés au droit des ancrages. Le parement a une surface de 5'400 m²; 54'200 kg de treillis et 8'900 kg d'armatures ont été employés pour son ferrillage. Dans la zone centrale, le rocher a été renforcé en fonction de son état à l'aide des moyens suivants:

- 365 m² de parements rocheux ont été recouverts de béton projeté, ce qui repré-

Principaux ouvrages (du nord au sud du tracé)	Longueur (m)	Section (m)		Volumes totaux excavés en place (m ³)		Réutilisation directe des matériaux en remblai (m ³)
		ouverte	fermée	Terrain meuble	Rocher	
TC de Planchy	208	150	58	134'600	-	69'500
Tunnel TPF	88	-	88	11'000	-	-
TC Montcalia	324	262	62	168'500	56'700	88'300
TC des Usiniers	125	-	125	133'200	-	22'200
Tunnel sous la Trême	568	-	568	73'300	-	-
TC Les Granges	457	-	457	199'300	-	109'800

Tab 2: Caractéristiques principales des ouvrages souterrains.

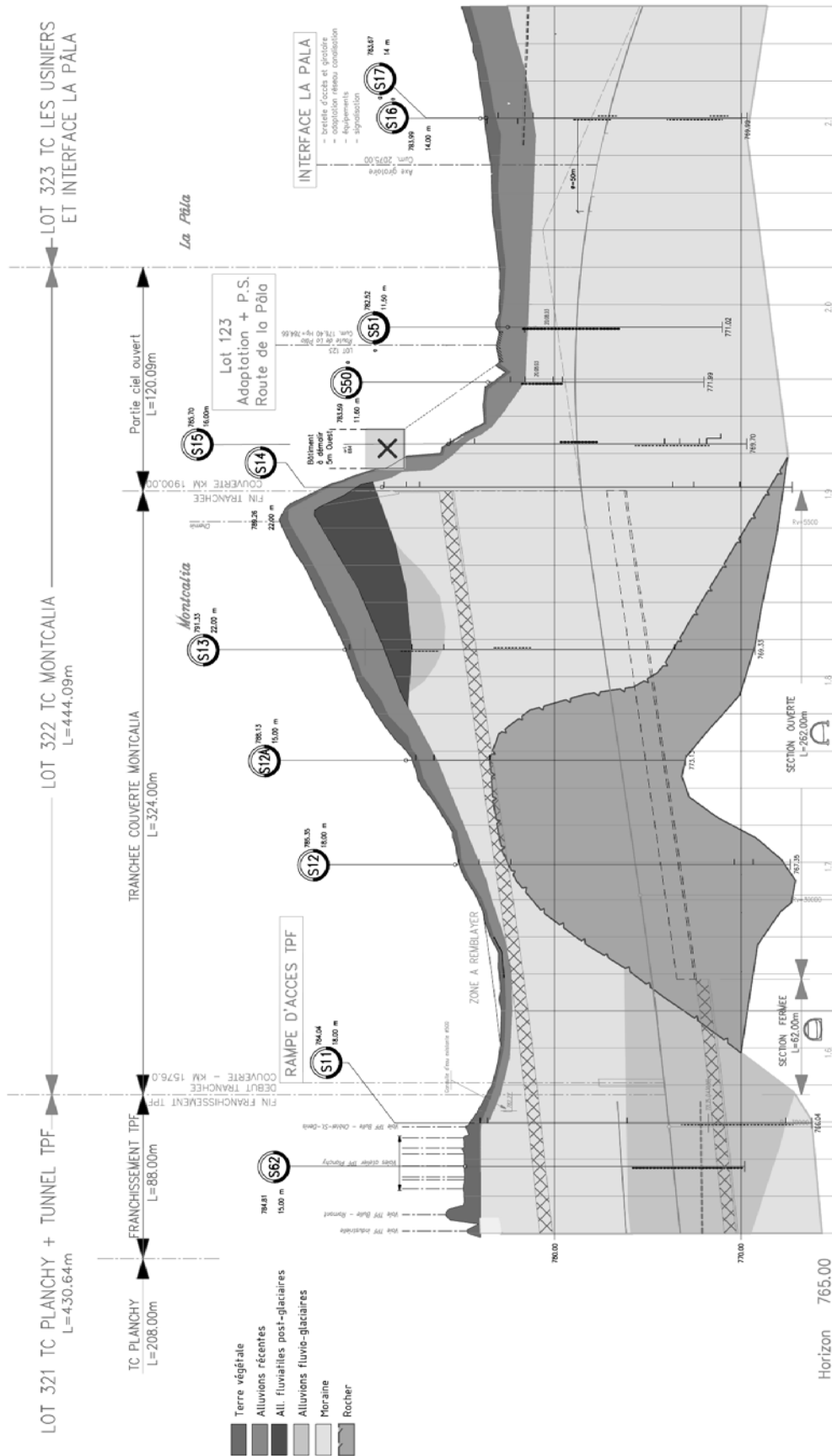


Fig. 6: Profil en long de la tranchée couverte de Montcalia. Section ouverte dans le rocher et fermée dans les alluvions fluvo-glaciaires, aquifères (échelle déformée avec un rapport horizontal/vertical = 10).

sente environ $\frac{1}{3}$ de la surface totale de rocher (env. 1160 m²),

- 2'500 m d'ancrages passifs équivalents à un volume de rocher renforcé estimé à environ 60'000 m³.

En raison des conditions hydrogéologiques, une section fermée, étanche, avec radier a du être adoptée sur la partie de la TC fondée dans les alluvions fluvio-glaciaires. Une section ouverte avec des semelles continues a été réalisée dans le rocher et dans la moraine. Les remblayages ont été exécutés à l'aide des matériaux excavés et stockés aux abords de la tranchée; un volume d'environ 88'300 m³ en place de matériaux ont été utilisés. Une amélioration du sol à la chaux a été effectuée en employant 520'000 kg de chaux.

9.3 Tranchée couverte des Usiniers

Les matériaux qui ont été excavés sont des alluvions récentes, des alluvions fluviales postglaciaires, de la moraine, des alluvions fluvio-glaciaires et des alluvions glacio-lacustres. Le volume excavé en place est approximativement de 133'200 m³.

Les eaux souterraines, sous forme de petits niveaux plus ou moins bien reliés entre eux, étaient attendues à la fois dans le fluviale postglaciaire de surface et dans les petits niveaux graveleux pouvant s'individualiser dans la moraine. De sorte d'éviter les surpressions derrière les parois de l'excavation et de drainer progressivement la nappe, des barbacanes ont été réalisées. Pour pouvoir récolter les eaux souterraines et météoriques provenant des enceintes de fouille, des rigoles ont été aménagées en pied de paroi, à l'avancement lors de l'excavation.

Afin de limiter au maximum la section de l'excavation dans ce secteur urbanisé, des parois berlinoises ont été choisies comme soutènement de fouille. Elles ont été réalisées au moyen de 95 pieux en béton coulés, de diamètre 80 cm, d'entraxe moyen entre élément de 2.80 m. Puis, par étape, de haut en bas, au fur et à mesure de l'excavation, du béton fibré a été projeté entre les pieux sur

une surface de 3'050 m². A partir d'un niveau défini, des ancrages actifs ont été exécutés pour garantir la stabilité de la paroi; 360 tirants actifs ont été nécessaires pour une longueur total de 5'400 m.

Les remblayages ont été faits avec 22'200 m³ de matériaux excavés réutilisables et stockés sur site, environs. 350'000 kg de chaux ont été utilisés pour améliorer les terrains.

En raison des conditions hydrogéologiques, une section fermée, étanche, avec radier a du être adoptée sur cette TC.

Il faut également relever que l'existence d'une pollution aux solvants chlorés dans les eaux souterraines au droit de l'ouvrage, liée aux activités passées d'une usine chimique, a nécessité la prise d'importantes mesures au niveau des terrassements (mesures de protection, gestion des matériaux excavés pollués, récolte et traitement eaux polluées).

9.4 Tranchée couverte des Granges

Les matériaux excavés sont des alluvions récentes, des alluvions fluviales postglaciaires, de la moraine, des alluvions fluvio-glaciaires et des alluvions glacio-lacustres. Le volume des matériaux d'excavation en place est approximativement de 199'300 m³. Le rabattement temporaire de la nappe phréatique nécessaire à la réalisation de l'ouvrage a été réalisé par pompage dans 26 puits filtrants (longueur totale de 470 m) disposés de part de d'autre de la tranchée. Les puits ont été mis en service par étape en fonction de l'avancement des travaux et des résultats des essais de pompage. Leur emplacement ainsi que la position des longueurs crépinées ont été déterminés d'après la géologie effective donnée par les premiers forages.

Le soutènement de fouille a été réalisé au moyen de parois gunitées et clouées. Ancrages passif avec une inclinaison de 10° et un entraxe de 2.50 m, 32'000 m de clous en acier, inclinés à 10° avec un entraxe de 2.50 m ont été nécessaires pour ce projet avec des lon-



guteurs de 5.0, 6.5, 8.0 et 12.0 m. Le parement a été réalisé en béton projeté avec un fruit de 7 sur 1 (vert./horiz.), armé avec 2 couches de treillis et renforcé au droit des ancrages. Le ferrailage du parement, d'une surface de 12'300 m², a nécessité l'emploi de 142'000 kg de treillis et de 20'100 kg d'armature.

En fonction des conditions hydrogéologiques (alluvions fluviales et fluvio-glaciaires), une section fermée à l'aide d'un radier a été nécessaire sur toute la longueur de la tranchée.

Les remblayages ont été exécutés avec les terrains excavés et 109'800 m³ de matériaux en place ont été nécessaires. Au total, plus de 1'000 tonnes de chaux ont dû être utilisées pour obtenir les exigences de compacité requises.

10. Restitution des conditions hydrogéologiques après travaux

Le préavis de l'OFEFP (actuellement l'OFEV) daté du 3 novembre 2000 mentionne que le projet doit être conforme à l'article 43 de la Loi sur la protection des eaux (LEaux du 24 janvier 1991, état le 6 avril 2004) qui dispose que pour le maintien des ressources en eaux souterraines, les constructions ne doivent pas avoir pour effet de réduire de façon notable et permanente la capacité du réservoir, ni l'écoulement des nappes souterraines exploitables. Or, les projets actuels qui ont plutôt tendance à privilégier de plus en plus d'ouvrages enterrés peuvent traduire une certaine contradiction avec la préservation des nappes.

Dans le cas de la route H189 et pour répondre aux exigences légales en vigueur, des

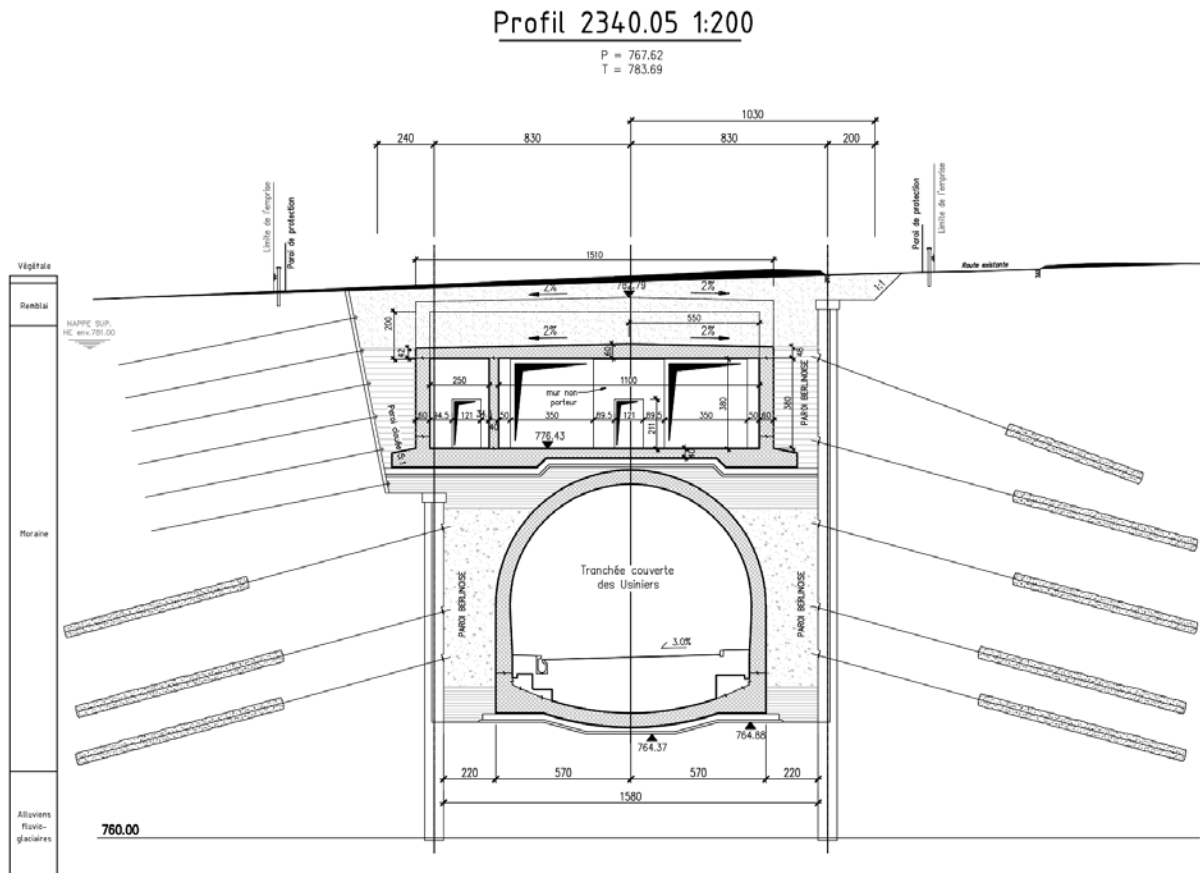


Fig. 7: Profil type de la tranchée couverte des Usiniers en section fermée. En raison du manque d'espace disponible en surface, le soutènement est réalisé verticalement par une paroi berlinoise avec des pieux en béton.





mesures constructives importantes ont dû être mises en œuvre lors des remblayages pour garantir que l'écoulement restitué des nappes après travaux serait proche de l'état naturel.

Sur une grande partie du tracé de la route d'évitement, la direction d'écoulement de la nappe libre contenue dans les alluvions récentes est parallèle à l'axe du projet et ne requiert donc pas de mesures particulières. Mais certains secteurs présentent une direction d'écoulement de la nappe qui recoupe l'axe de la route. Ainsi, pour éviter les effets de barrage des ouvrages souterrains et une remontée de la nappe derrière eux, il a été nécessaire d'augmenter la perméabilité de la couche de remblayage. La solution retenue a consisté à réaliser des tranchées filtrantes le long des parois de chaque côté des ouvrages reliées entre elles par un réseau de bypass perméables. Elle a été appliquée sur un tronçon de la tranchée couverte «Les Granges» et de la tranchée couverte «Les Usiniers».

11. Gestion des matériaux

La longueur totale de la route, de l'accrochage nord dit «de la Sionge» à l'accrochage sud dit «Pré-du-Chêne», est de 5'260 mètres.

Aujourd'hui, les exigences en matière de protection des riverains conduisent à enterrer de plus en plus de tronçons routiers. Cette tendance entraîne une augmentation du linéaire des ouvrages souterrains et son lot de volumes de matériaux excédentaires.

Dans le cas de la route d'évitement de Bulle, le volume total terrassé a dépassé les 1'200'000 m³ alors que le volume à remblayer sur les tranchées couvertes et contre les murs de soutènement était d'un peu plus de 500'000 m³. La gestion d'un solde de matériaux excédentaires d'environ 700'000 m³ a dû être prévue. La place disponible sur le site a permis de stocker d'importants volumes à proximité du lieu de leur réutilisation. D'une manière générale, il a été fait une distinction entre les ouvrages Nord et les

ouvrages Sud, quant à la destination des matériaux d'excavation (stocks ou décharges), de manière à limiter le trafic de chantier à travers la ville de Bulle, la traversée par le chantier n'étant pas possible par le tunnel sous la Trême, compte tenu de l'avancement des travaux.

Hormis la valorisation sur le chantier comme matériaux de remblayage, les filières de matériaux qui ont alors été privilégiées sont:

- la valorisation comme matériaux de construction (graves et graviers à béton). Les graviers provenant des couches d'alluvions récentes et fluvio-glaciaires ont été valorisés dans une centrale de traitement des matériaux installée spécialement pour le projet dans la partie sud du tracé (lot 221 sur figure 1). Des graves et des matériaux graveleux spéciaux (des fractions granulométriques pour drainage par exemple).
- la valorisation pour le comblement de sites d'extraction qui ont été définis par le Maître de l'Ouvrage (MO). Des conventions ont été signées avec les propriétaires/exploitants dans le cadre de leurs obligations de remise en état (comblement).

12. Conclusions

Pour chaque projet de construction important, il importe que les données de base et les hypothèses des études à partir desquelles il été conçu soient contrôlées tout au long de sa réalisation. Les variations des conditions géologiques et hydrogéologiques ne sont pas rares compte tenu du caractère ponctuel des reconnaissances. Dans le cadre de la route d'évitement de Bulle-La Tourde-Trême, l'accompagnement des travaux par un suivi géotechnique, exécuté en étroite et bonne collaboration avec le Service des ponts et chaussées, s'est avéré essentiel pour:

- garantir la sécurité du personnel lors de la creuse de la galerie de drainage. L'avancement de l'excavation était régulièrement





adapté aux risques d'instabilité observés par le géologue au front d'attaque.

- préciser les caractéristiques des dispositifs de rabattement des nappes, contrôler les étapes d'abaissement en cours de terrassements et la remontée des nappes au moment des remblayages.
- contribuer aux réglages des travaux de jet-grouting et à la maîtrise des risques de soulèvement (pression d'injection et caractéristiques du sol injecté).
- assister les ingénieurs dans les phases critiques rencontrées au gré des tunnels comme le passage de la Trême, des secteurs à faible couverture et construits, ou encore les anomalies locales.

A l'issue des travaux souterrains de la route d'évitement, le cahier des charges du suivi géotechnique a été rempli dans la mesure où les constructions s'achèvent sans dommage. Une phase de surveillance de la remontée des nappes s'engage qui devrait confirmer que l'écoulement restitué des nappes après travaux sera proche de l'état naturel.

Bibliographie

- Atlas géologique de la Suisse, feuille 1225 Gruyères, 2004
Association Sud-Ingénieurs 2002: Projet définitif (MN) – Dossier géotechnique de base.
Association Sud-Ingénieurs 1999: Mémoire technique des ouvrages souterrains.

