

A16

Tunnel de Bure

SOMMAIRE

Présentation	2
Géologie	3
Projet.....	4
Excavation au tunnelier	6
Ventilation.....	8
Portails et tranchées couvertes.....	9
Déroulement des travaux.....	10
Gestion des matériaux d'excavation.....	11
Suivi environnemental de réalisation	11
Le tunnel de Bure en bref.....	12
Maître d'ouvrage et partenaires	12



15 octobre 2008, portail nord, Bure. Le tunnel chargé d'excaver les 2'900 mètres de roches calcaires et marneuses entre Courtedoux et Bure a vaincu la montagne après neuf mois d'une excavation parfaitement maîtrisée et en avance sur le programme initial.

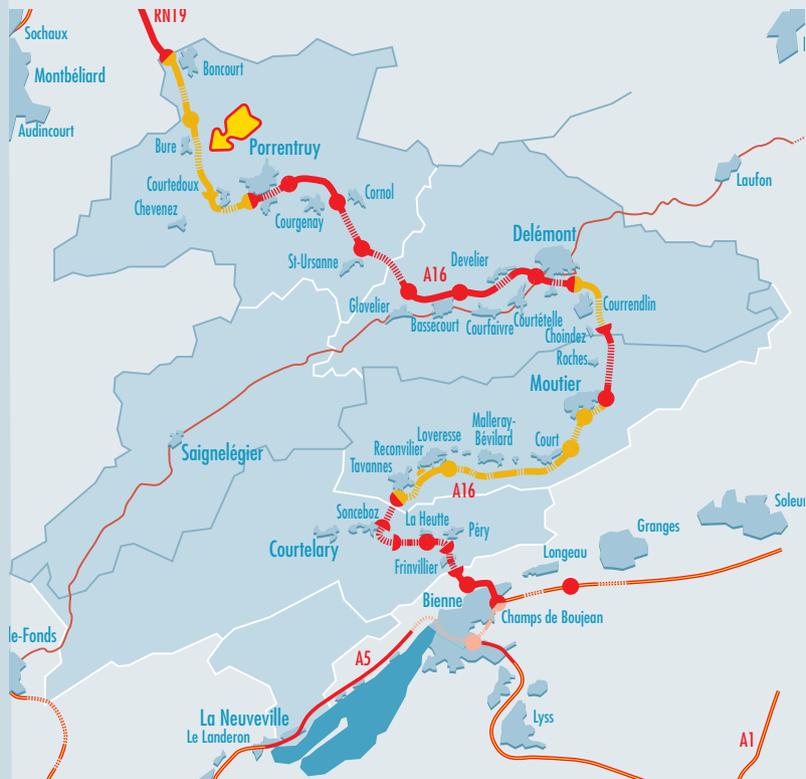
PRÉSENTATION

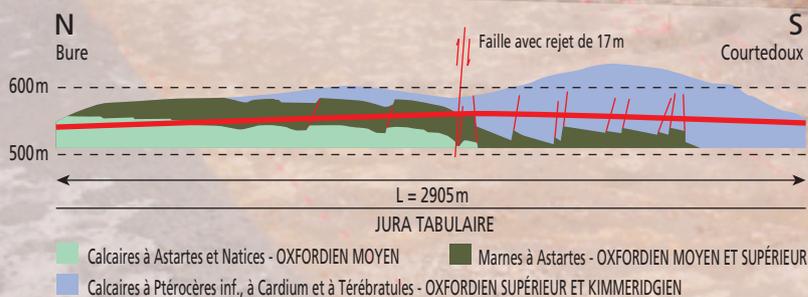
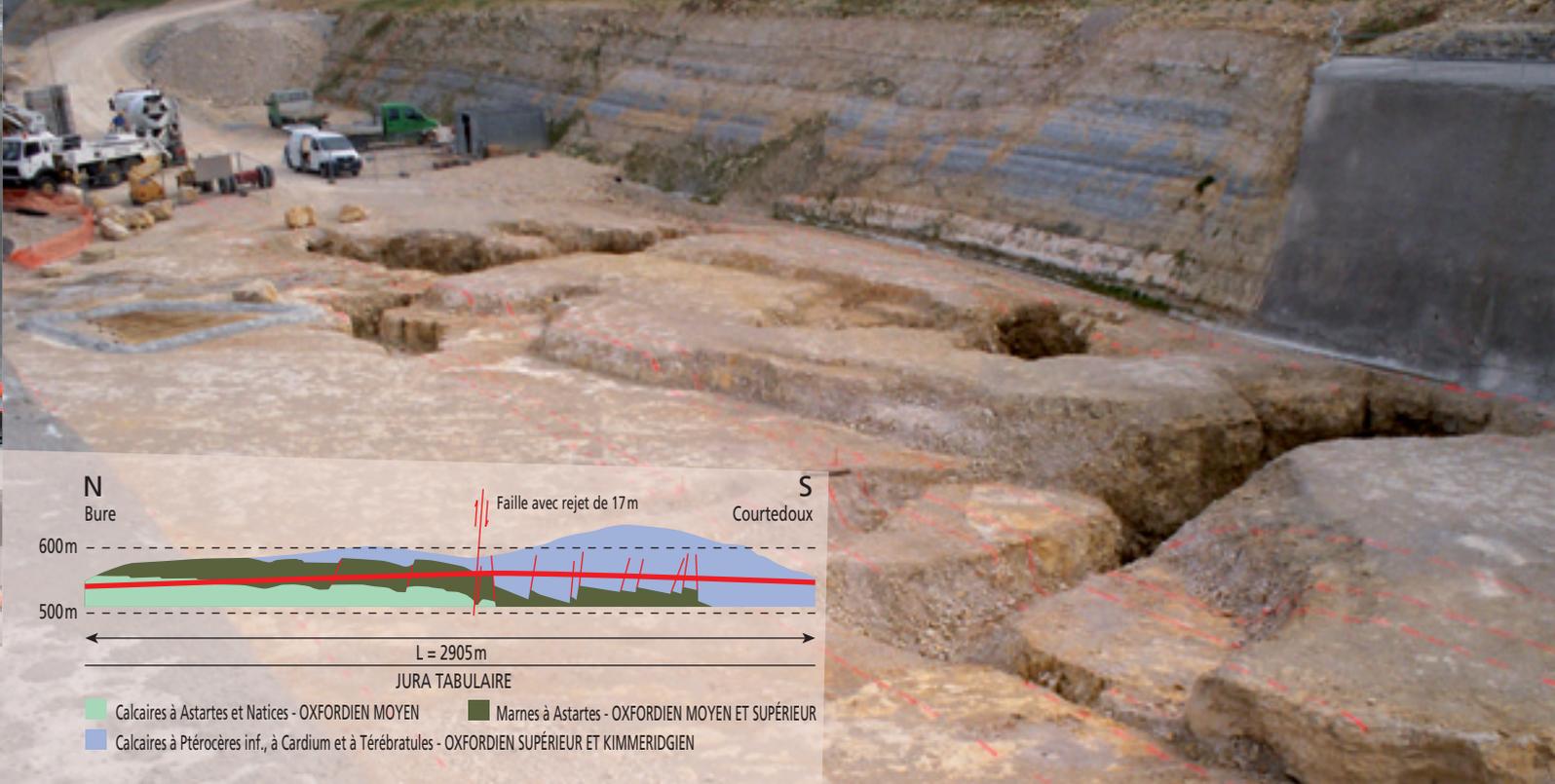
Le tunnel de Bure est l'un des ouvrages majeurs de l'A16 entre Boncourt et Porrentruy (Canton du Jura | Section 2 | 13,4 km). Il permet à la Transjurane de traverser en souterrain le plateau de Bure, entre les casernes de la Place d'armes fédérale, au Nord, et la Combe Va tche Tcha, sur la commune de Courtedoux, au Sud.

Constitué d'un tunnel à circulation bidirectionnelle et d'une galerie de sécurité réalisée de 1999 à 2000, le tunnel de Bure présente une longueur totale de 3'059 mètres dont 2'900 mètres construits en souterrain et 159 mètres en tranchées couvertes répartis aux portails.

Une centrale de ventilation, trois puits et une cheminée situés au point haut de l'ouvrage assurent l'évacuation de l'air vicié et des fumées en cas d'incendie.

La maîtrise d'ouvrage est assumée par le Département de l'environnement et de l'équipement de la République et Canton du Jura, respectivement par son Service des ponts et chaussées, sur délégation de l'Office fédéral des routes. La conception du projet et la direction des travaux ont été mandatées à l'association d'ingénieurs CTB (Consortium Tunnel de Bure). L'ensemble des mandats d'études (conception et direction du projet, géologie, gestion des matériaux et suivi environnemental) représente un montant de CHF 13,5 millions, auxquels il convient d'ajouter CHF 11,8 millions pour la réalisation de la galerie de reconnaissance. Les travaux de génie civil du tunnel ont été adjugés en novembre 2006 au consortium d'entreprises GTB (Groupement Tunnel de Bure) pour un montant de CHF 131 millions TTC. ■





Portail nord : les karsts prennent parfois une dimension spectaculaire.

GÉOLOGIE

Le tunnel de Bure traverse un massif essentiellement calcaire d'environ 300 mètres d'épaisseur, en position subhorizontale (Jura tabulaire). Le massif rocheux est découpé par deux systèmes de fractures d'orientation Nord-Sud et Ouest-Nord-Ouest – Est-Sud-Est, dont les rejets produisent une structure dite « en touches de piano » (horst et graben). Une faille transversale délimite le tunnel de Bure en deux secteurs bien distincts :

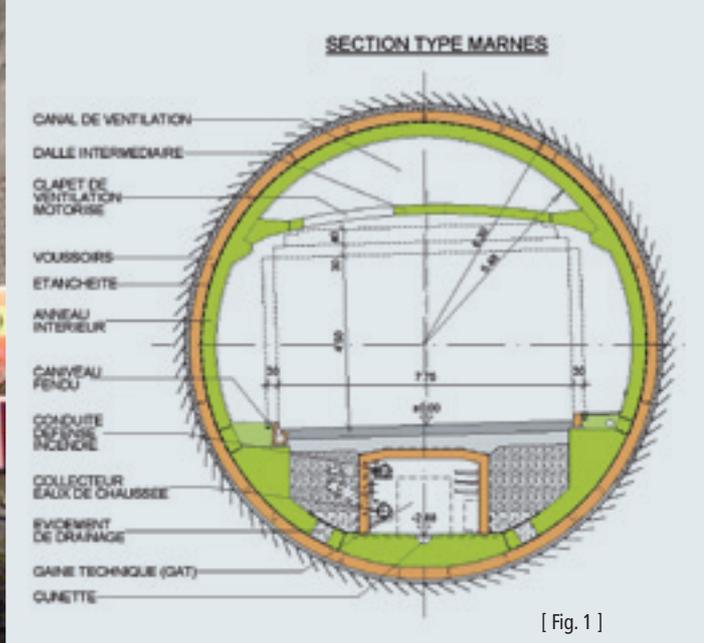
- au Sud, des terrains essentiellement calcaires (Oxfordien supérieur et Kimméridgien) ;
- au Nord, sur environ 1'400 mètres, des formations marneuses à marno-calcaires (Oxfordien moyen et supérieur).

Les investigations réalisées sur des échantillons marneux du secteur nord montrent un potentiel de gonflement important. Ces types de roches, qui présentent des caractéristiques comparables aux marnes de l'Aalénien et de l'Oxfordien, sont connus pour leur comportement gonflant.

Les venues d'eau souterraines les plus importantes sont concentrées au Sud de l'ouvrage, sur les 80 derniers mètres du tunnel. Ce secteur correspond à la zone de drainage principale de l'ouvrage. Le débit moyen de 100 litres par seconde peut être décuplé en période de crue. Les eaux du massif sont de type karstique, bicarbonatées calciques. Il s'agit d'eaux incrustantes qui présentent un risque important de colmatage des systèmes de drainage.

La nature calcaire de la roche, fracturée par les forces tectoniques et dissoute par les eaux météoriques, est source de phénomènes karstiques qui peuvent prendre des proportions parfois spectaculaires, comme c'est le cas dans la fouille du portail nord (image ci-dessus). Au total, une dizaine de cavités ont été répertoriées et documentées par les spéléologues.

Après assainissement à la pelle mécanique, le remplissage de ces vides a nécessité la mise en place de près de 800 mètres cubes de chaille calibrée. La présence de ces karsts a engendré une modification du projet (voir « Portails et tranchées couvertes », p.9). ■



[Fig. 1]

PROJET

La galerie de sécurité d'un diamètre de 3,6 mètres a été exécutée sur un axe parallèle à 40 mètres à l'Ouest du tunnel. Elle a permis de confirmer que l'ouvrage doit assumer les deux situations de risque principales suivantes :

- le potentiel de gonflement des marnes recoupées par la rampe nord du tunnel ;
- les venues d'eau importantes liées à la présence de calcaires karstifiés sur la pente sud de l'ouvrage.

La prise en compte du risque de gonflement des marnes a conduit les responsables du projet à adopter une section circulaire du tunnel pour la reprise des efforts consécutifs.

La pression de gonflement après excavation du massif s'élève à 1,8 mégapascal (Mpa), ce qui représente 18 kilos de pression sur une surface de 1 cm².

Le risque de venues d'eau importantes dans le tronçon sud (calcaires) nécessite un système de drainage conséquent mais une capacité portante de la structure réduite (massif autoportant), contrairement au tronçon nord (marnes) où les venues d'eau sont faibles et les pressions du massif plus importantes.

La section du tunnel définit trois espaces distincts (Fig. 1) :

- l'espace trafic, qui regroupe la chaussée à deux voies de circulation bidirectionnelle d'une largeur totale de 7,75 mètres et l'espace pour les équipements d'exploitation et de sécurité;
- le canal de ventilation, situé au-dessus de la dalle intermédiaire, qui permet l'évacuation de l'air vicié et des fumées en cas d'incendie;
- la gaine technique, sous la chaussée, qui accueille les équipements d'alimentation et d'acheminement des informations saisies par les différents instruments de mesures. Elle permet certaines interventions sur l'ouvrage sans interruption du trafic.

Le revêtement en béton est composé d'un anneau de voussoirs préfabriqués de 30 centimètres d'épaisseur, complété par un anneau intérieur de 30 centimètres (section « calcaires ») et de 37,5 centimètres (section « marnes » [Fig. 1]) coulé en place.

L'étanchéité du tunnel est constituée d'un lé périphérique PVC de 2 millimètres, placé à l'intrados des voussoirs. En fond de profil, le traitement diffère selon la formation géologique traversée :

- dans le tronçon « marnes », l'eau récoltée est évacuée par l'intermédiaire de réservations régulières dans l'anneau intérieur et via un réseau de rigoles transversales puis longitudinales;
- en section « calcaires » [Phase 4, page 10], l'eau percole sur la feuille d'étanchéité pour aboutir dans deux drains longitudinaux d'un diamètre de 31,5 centimètres.



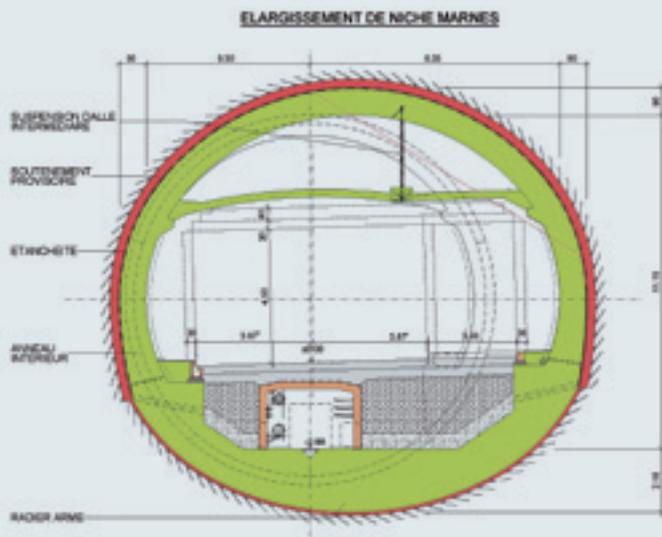
Le dispositif de sécurité du tunnel de Bure, conformément aux dernières exigences normatives, prévoit :

- une galerie de sécurité d'un diamètre de 3,6 mètres, située à 40 mètres à l'Ouest du tube principal, sur l'axe d'un éventuel second tube;
- trois niches de stationnement espacées de 900 mètres au maximum;
- tous les 150 mètres, des niches SOS équipées d'un téléphone de secours, d'un extincteur et d'une borne incendie;
- dix liaisons transversales raccordées tous les 300 mètres à la galerie de sécurité. Sept d'entre elles sont de type piétons, les trois autres de type carrossable. Ces dernières, localisées à chaque niche de stationnement élargie du côté de la galerie de sécurité, offrent également un accès à la gaine technique située sous la chaussée.

Dans les calcaires, deux niches de stationnement doubles sont réalisées de manière symétrique aux deux voies de circulation.

En raison des pressions de gonflement importantes, la niche située dans le tronçon « marnes » est décomposée en deux niches unilatérales qui se succèdent longitudinalement et qui ne desservent qu'une voie de manière alternative.

Au droit des niches de stationnement et des liaisons transversales, la section nécessite une déconstruction partielle (calcaires) et totale (marnes) des voussoirs préalablement érigés et un renforcement conséquent du revêtement du tunnel [Fig. 2]. L'épaisseur du béton en radier dépasse les 2,2 mètres. ■



[Fig. 2]



EXCAVATION AU TUNNELIER

Les travaux de génie civil ont été adjugés en novembre 2006 par le Gouvernement jurassien au consortium d'entreprises GTB (Groupement Tunnel de Bure). Les travaux d'installations du chantier et les terrassements de la tranchée d'accès au portail sud pour le montage du tunnelier ont démarré en janvier 2007.

Construit à Schwanau (Allemagne), le tunnelier a été transporté en pièces détachées par une soixantaine de convois exceptionnels, de septembre à décembre 2007. L'imposante machine, composée du tunnelier proprement dit (1'200 t) et des traîneaux (850 t) présente, une fois montée, une longueur totale de 90 mètres. La tête de forage a été mise en place le 11 janvier 2008. Dix jours plus tard, le 21 janvier, le tunnelier a commencé à forer la roche entre Courtedoux et Bure.

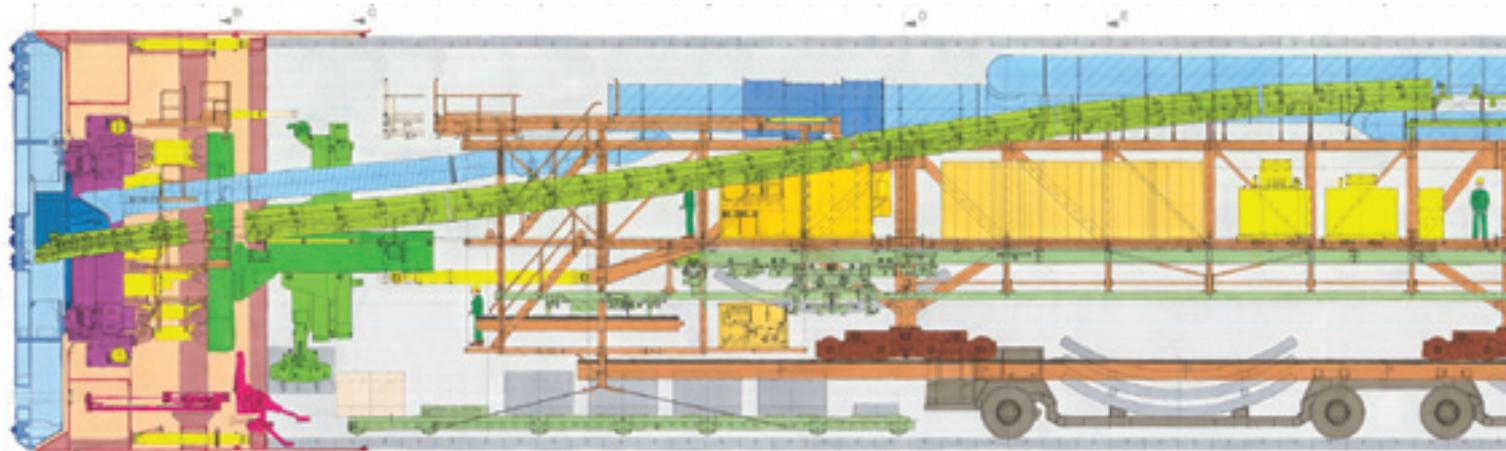
La progression du tunnelier dans le massif s'est déroulée en deux phases alternées : le forage et la pose du soutènement.

Forage : huit moteurs électriques d'une puissance totale de 2'800 kilowatts impriment à la tête de forage une vitesse de rotation jusqu'à 5 tours par minute contre le rocher (front). Les molettes de coupe (76 pcs) fixées sur la tête de forage fracturent le rocher sous l'effet de la

pression exercée par 25 vérins hydrauliques d'une course de 2,3 mètres qui s'appuient avec une force de 5'400 tonnes sur le dernier anneau d'éléments préfabriqués (ou voussoirs) mis en place.

Pose du soutènement : un érecteur (engin de pose) avec système de préhension par vacuum met en place successivement cinq voussoirs et l'élément de clé de voûte qui constituent un anneau. Ce dernier est érigé en s'appuyant sur le précédent, à l'intérieur du bouclier, dans l'espace de deux mètres libéré par la poussée des vérins longitudinaux. Une fois le nouvel anneau de voussoirs mis en place, la tête de forage peut reprendre l'opération d'abattage du rocher.

L'avancement du tunnelier dans les roches calcaires et marneuses a atteint après quelques semaines une vitesse moyenne quotidienne de 18,3 mètres dans les calcaires et de 22,5 mètres dans les marnes. Certaines pointes de rendement (record : 36 mètres en un seul jour) ont permis au consortium d'entreprises, grâce à une bonne utilisation du potentiel du tunnelier, de terminer l'excavation des 2'900 mètres de tronçon souterrain le 15 octobre 2008, en avance sur le programme initial.





CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES DU TUNNELIER

TYPE: TUNNELIER AVEC BOUCLIER ET APPUI SUR ANNEAUX DE VOUSOIRS

Puissance installée: 4'000 kW

Longueur totale: 90 m

Poids total: 2'050 t

TÊTE DE FORAGE ET OUTILS DE COUPE

Diamètre de forage: 12,595 m

Poids de la tête de forage: 250 t

Molettes de coupe: 76 pces

ENTRAÎNEMENT

Type: électrique

Moteurs: 8 pces à 350 kW

Puissance: 2'800 kW

Vitesse max. de rotation de la tête: 5 tours/min

BOUCLIER

Diamètre (avant | arrière): 12,535 m | 12,515 m

Diamètre de la jupe: 12,5 m

Longueur totale: 9,815 m

AVANCEMENT

Vérins: 25 pces

Course: 2,3 m

Pression d'avancement: 300 bar (53'878 kN)

Vitesse d'avancement: 10 cm/min

Avancement moyen effectif:

- 18,4 m/jour dans les calcaires

- 22,5 m/jour dans les marnes

Record d'avancement journalier: 36 m (02.09.08)

ÉRECTEUR

Moteur: électrique

Poids: 45 t

Système de prise: vacuum

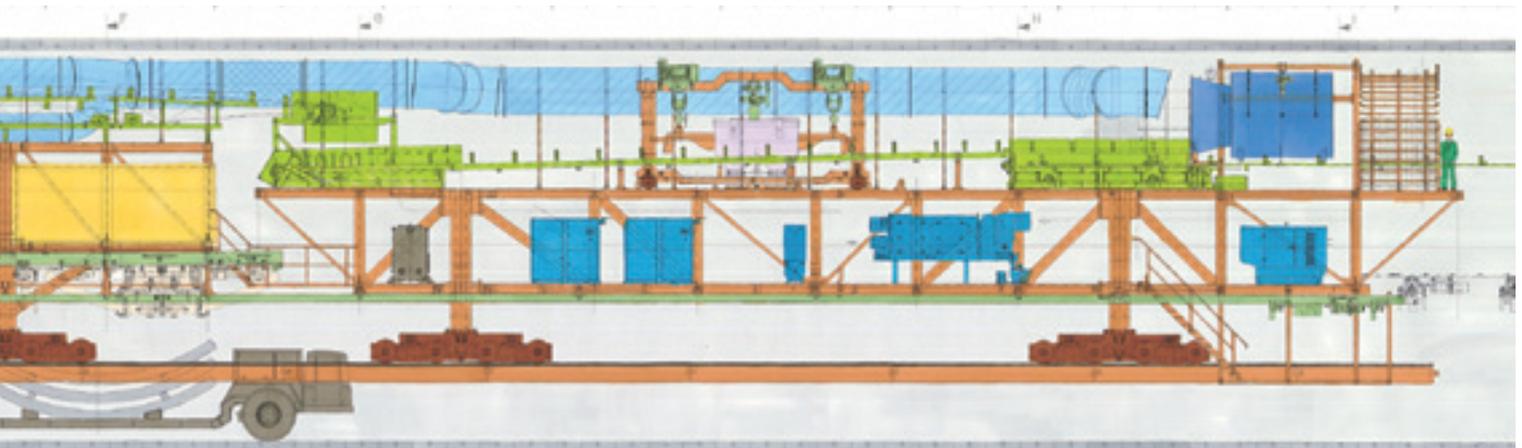
Vitesse de rotation: 1 tour/min

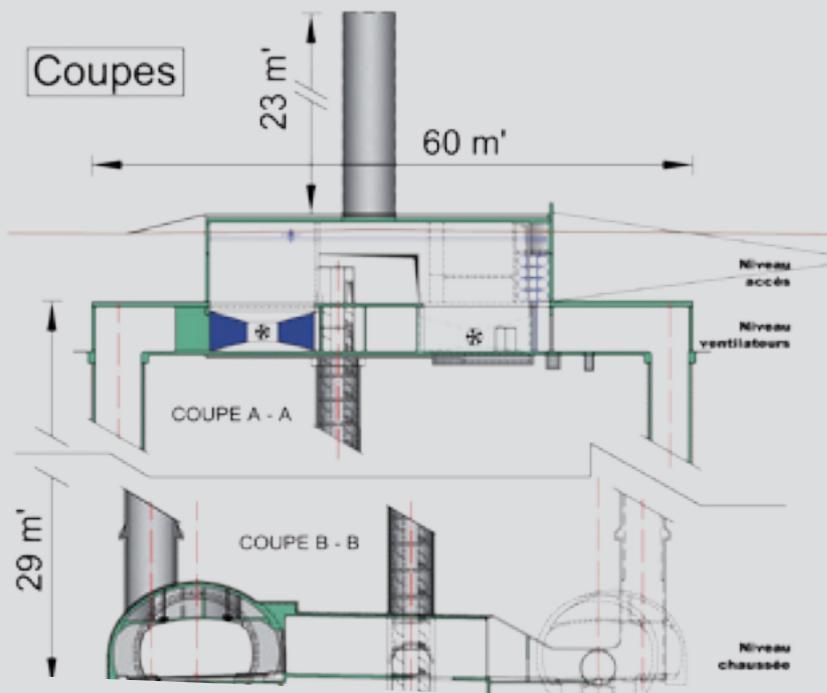
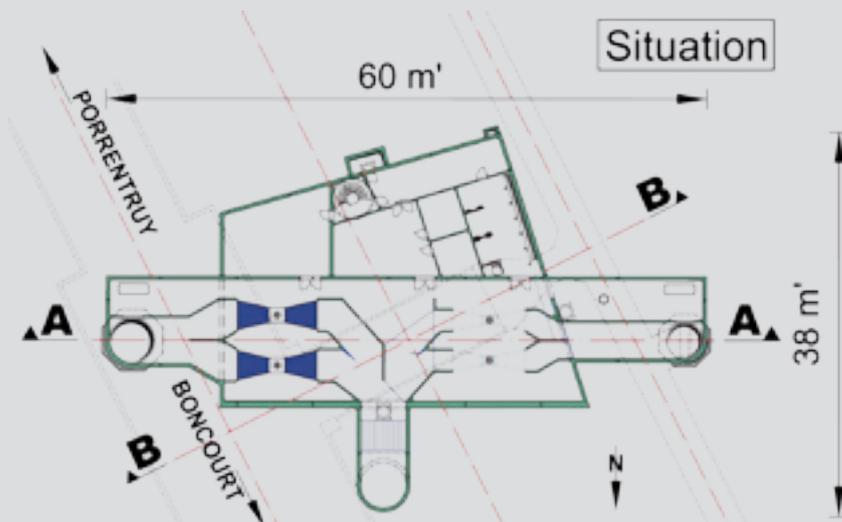
CONVOYEUR DE BANDE

Longueur sur le tunnelier: env. 58 m

Largeur: 1,0 m

Puissance des moteurs: 55 kW



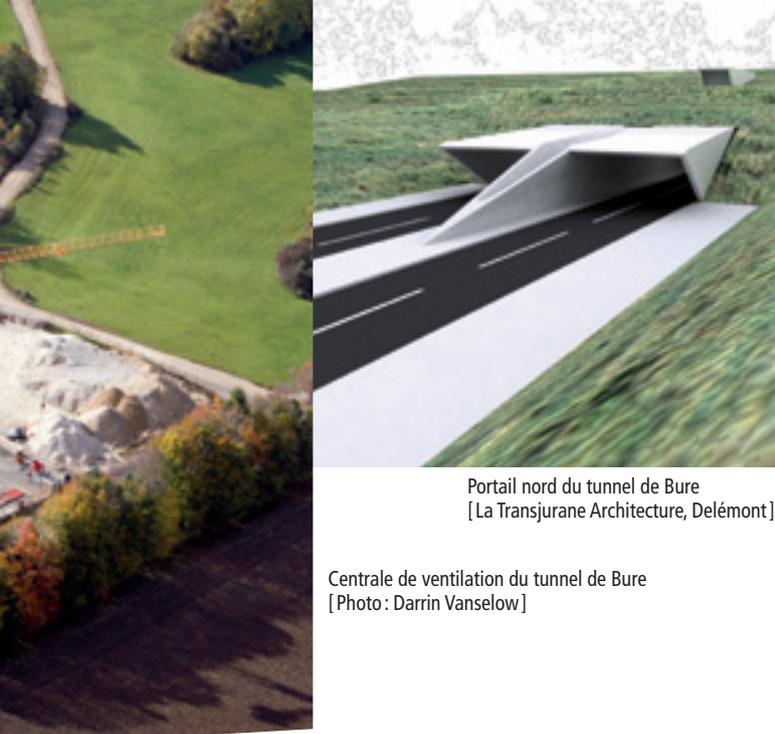


CONCEPT DE VENTILATION

Le concept de ventilation retenu est de type « longitudinal en aspiration avec dalle intermédiaire ». Il prévoit la réalisation d'une centrale unique de ventilation offrant une puissance d'aspiration de 160 kiloWatts et placée à mi-distance environ des deux extrémités de l'ouvrage.

Ce concept couvre notamment les besoins liés d'une part à l'extraction de l'air vicié et d'autre part à l'évacuation des fumées en cas d'incendie :

- en situation d'exploitation normale, l'air vicié est extrait de l'espace trafic par l'intermédiaire de deux ventilateurs situés dans la centrale de ventilation;
- en cas d'incendie, l'aspiration des fumées se fait par l'intermédiaire du canal de ventilation situé au-dessus de la dalle intermédiaire. Cette dernière contient des ouvertures placées tous les 100 mètres dotées de clapets motorisés. Ainsi, l'aspiration des fumées se concentre au droit de l'incendie. Dans les 300 premiers mètres de chaque extrémité du tunnel, le flux de l'aspiration est contrôlé par trois paires de ventilateurs de jet, dispositif qui ne nécessite pas de canal de ventilation.



Portail nord du tunnel de Bure
[La Transjurane Architecture, Delémont]

Centrale de ventilation du tunnel de Bure
[Photo: Darrin Vanselow]

CENTRALE DE VENTILATION

La centrale de ventilation est implantée au droit du point culminant du profil en long du tunnel, à 1'790 mètres du portail nord. Elle est construite à partir de la surface.

Sa position excentrée sur la longueur du tunnel est dictée par les conditions géologiques nécessaires à l'excavation de la niche de stationnement sous-jacente. Sa partie souterraine est localisée à la limite nord des formations calcaires. L'ouvrage se compose de deux parties principales : une partie inférieure souterraine et une partie supérieure constituée du bâtiment de la centrale.

PARTIE INFÉRIEURE SOUTERRAINE

La centrale est reliée aux canaux d'air du tunnel principal et de la galerie de sécurité par l'intermédiaire de deux puits verticaux de 25 mètres de hauteur environ servant à l'extraction de l'air vicié et des fumées. Ces puits sont positionnés de façon asymétrique par rapport aux niches de stationnement. Une plus grande distance entre l'axe de chaque puits offre un meilleur rendement de la ventilation.

Un troisième puits, servant d'accès à la partie souterraine de la centrale, est équipé d'un escalier en colimaçon et d'un monte-charge. Sa position, légèrement excentrée par rapport à la galerie de liaison, nécessite une petite galerie d'accès d'une longueur de 10 mètres.

PARTIE SUPÉRIEURE

Le bâtiment de la centrale, presque totalement enterré, est composé de trois éléments distincts :

- un bâtiment sur deux niveaux d'une surface utile totale d'environ 750 mètres carrés qui accueille deux ventilateurs de 160 kiloWatts assurant un débit d'air de 160 mètres cubes par seconde ;
- une cheminée d'environ 34 mètres de hauteur, dont 23 mètres à l'air libre ;
- une rampe permettant un accès à l'entrée enterrée du bâtiment.

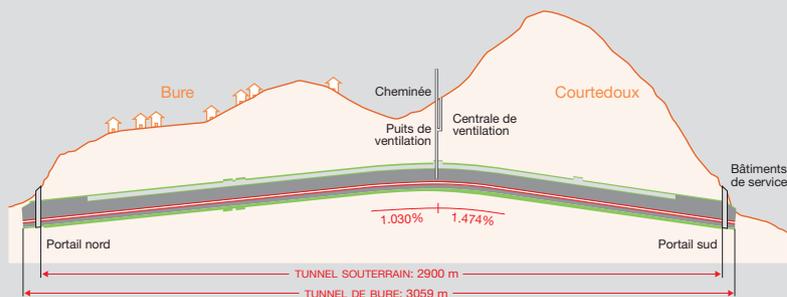
PORTAILS ET TRANCHÉES COUVERTES

A chaque extrémité, le tunnel est réalisé à ciel ouvert à l'intérieur d'une tranchée préalablement excavée, sur une longueur de 94 mètres au portail nord et de 65 mètres au portail sud. Ces éléments d'ouvrage, identiques aux deux portails, sont composés des trois parties suivantes :

- une partie « portail » qui détermine un secteur de transition de 50 mètres entre le tracé à ciel ouvert et la partie souterraine ;
- une partie « tranchée couverte » qui reproduit la forme intérieure du tunnel ;
- une partie « bâtiment », constituée des locaux de service sur plusieurs niveaux.

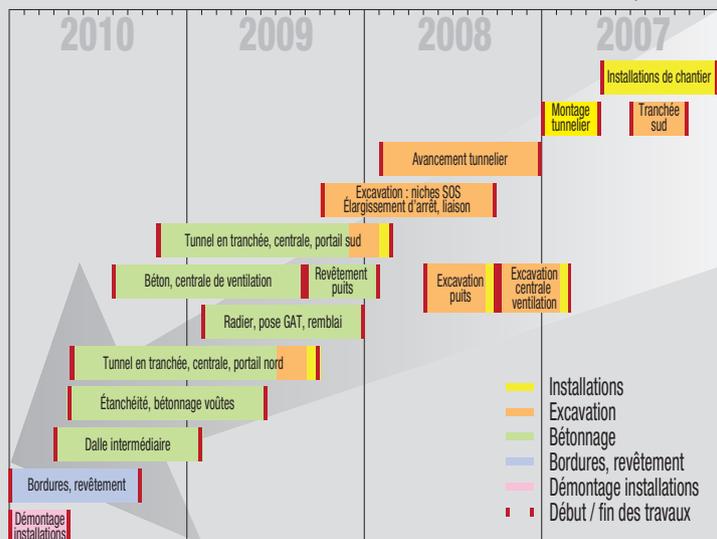
Lors du terrassement de la tranchée nord, un réseau de karsts a été mis au jour [voir image page 3]. Ce dernier a nécessité une modification du projet initial en raison de la tendance des karsts à « aspirer » les matériaux subjacents. L'utilisation de béton étant prohibée (protection des eaux), il a été décidé de fermer le profil des tranchées couvertes et de ponter ainsi ces vides.

L'ensemble des ouvrages de l'A16 fait l'objet d'un suivi architectural minutieux. L'illustration ci-dessus présente la maquette du résultat final au portail nord. ■



Fin des travaux : décembre 2010

Début des travaux : janvier 2007

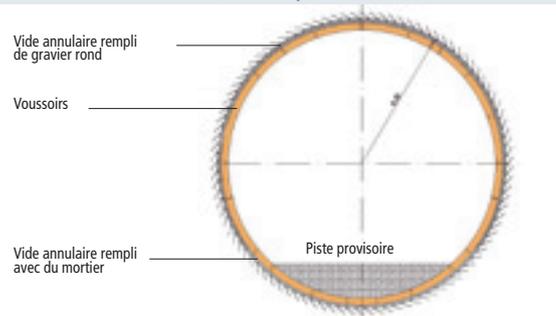


DÉROULEMENT DES TRAVAUX

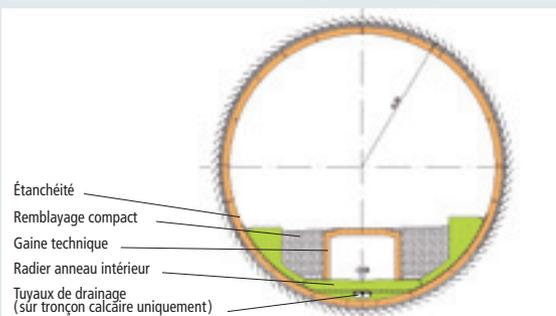
La construction du tunnel de Bure a démarré en janvier 2007 par les installations de chantiers et l'excavation des tranchées d'accès. A partir de l'automne 2007, le tunnelier a été transporté puis assemblé au portail sud. L'excavation, qui a débuté concrètement le 21 janvier 2008, a été réalisée par une seule équipe d'avancement de neuf personnes sur le tunnelier, une équipe de logistique de cinq personnes au portail et une équipe d'entretien nocturne de quatre personnes. Le percement est intervenu le 15 octobre 2008, selon une cadence moyenne journalière attendue de 18,4 mètres dans les calcaires et de 22,5 mètres dans les marnes.

Les illustrations ci-contre présentent les quatre phases principales de la réalisation des travaux de génie civil du tunnel de Bure. ■

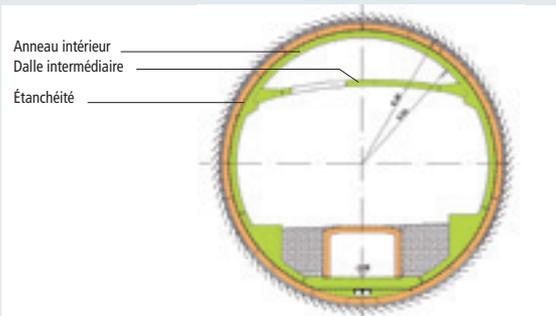
PHASE 1 : EXCAVATION TUNNELIER, POSE VOUSOIRS



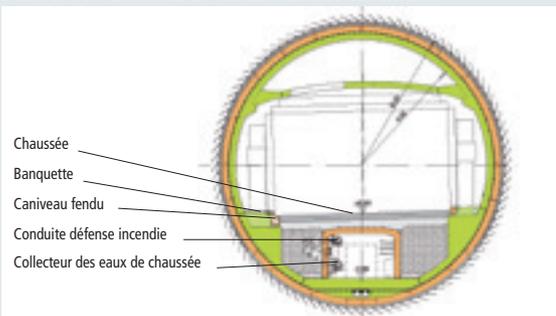
PHASE 2 : POSE DRAINAGE, ÉTANCHÉITÉ PARTIELLE, BÉTONNAGE RADIER ET POSE GAINE TECHNIQUE (GAT)



PHASE 3 : POSE ÉTANCHÉITÉ (SOLDE), BÉTONNAGE ANNEAU INTÉRIEUR ET DALLE INTERMÉDIAIRE



PHASE 4 : CHAUSSEE ET AMÉNAGEMENT INTÉRIEUR





GESTION DES MATÉRIAUX D'EXCAVATION

L'excavation du tunnel de Bure a généré un volume de matériaux de 860'000 tonnes à la sortie du ruban transporteur. A mesure de l'avancement du tunnelier, ces matériaux ont été rechargés, transportés et stockés sur deux zones spécialement aménagées de 20'000 et 35'000 mètres carrés.

Une fois l'excavation du tunnel terminée, ces matériaux sont rechargés puis évacués vers d'autres chantiers pour y être réutilisés ou vers les sites prévus pour une mise en décharge définitive.

Les matériaux excavés ont été triés sur place : 450'000 tonnes de roche calcaire et 410'000 tonnes de roche marneuse. Estimés à 6'000 tonnes par jour avant le début des travaux, les volumes extraits via le ruban et transportés sur les sites de stockage ont atteint des cadences dépassant les 12'000 tonnes par jour lorsque le tunnelier se trouvait dans les marnes. Cela représentait l'équivalent d'un camion-dumper (22 m³) toutes les 90 secondes ! ■

SUIVI ENVIRONNEMENTAL DE RÉALISATION

Chaque chantier de l'A16 présente un certain nombre de risques en matière d'impact sur l'environnement. La LPE (Loi fédérale sur la protection de l'environnement) oblige le Maître d'ouvrage à contrôler et faire respecter le droit environnemental en vigueur pour le secteur principal de la construction.

C'est le rôle du responsable du SER (Suivi environnemental de réalisation) dont la mission est de contrôler les interventions sur l'environnement naturel (sols, eaux souterraines et de surface, déchets, substances dangereuses, air, flore, faune, chasse, pêche et paysage) et construit (bruit, ébranlements, archéologie, monuments et sites).

Par exemple, dans le cadre de l'excavation du tunnel de Bure, un contrôle permanent a été effectué notamment sur l'environnement construit par l'auscultation des immeubles situés sur le tracé du tunnelier. Sur la base des données récoltées, il a été possible de contrôler les ébranlements provoqués par le tunnelier. ■





LE TUNNEL DE BURE EN BREF

Longueur totale : 3'059 m

Longueur d'excavation : 2'900 m

Longueur des tranchées couvertes : 159 m

- portail nord : 94 m
- portail sud : 65 m

Chaussée bidirectionnelle, largeur : 7,75 m

Profil en long en toit : déclivité nord de 1,030%; déclivité sud de 1,474% | Dévers : 3 à 4,5%

Géologie : 1'683 m dans les calcaires | 1'217 m dans les marnes

Couverture maximale : 70 m

Section d'excavation : 125 m²

Excavation totale : 362'500 m³ (210'375 m³ de calcaires | 152'125 m³ de marnes)

Tunnelier avec bouclier et avec pression sur anneaux de voussoirs :

- longueur totale : 90 m
- poids total : 2'050 t
- poids tête de forage : 250 t
- diamètre tête de forage : 12,595 m
- puissance installée : 4'000 kW

Béton : 125'000 m³

- béton pompé : 5'000 m³
- béton coulé s/pl : 82'000 m³
- béton préfabriqué (voussoirs + GAT) : 38'000 m³

Puits de ventilation :

- sur galerie de sécurité : hauteur 25 m | diamètre 3,60 m
- sur tunnel principal : hauteur 16 m | diamètre 4,50 m
- puits d'accès : hauteur : 25 m | diamètre : 3,80 m

Galerie de sécurité, section : 10,2 m² (7 liaisons transversales et 3 carrossables) | diamètre 3,60 m

Passages transversaux : 10

Elargissement de niche : 4 (2 doubles calcaire, 2 simples marne)

Montant de l'offre (travaux de génie civil) : CHF 131 millions TTC

GROUPEMENT D'ENTREPRISES



GROUPEMENT TUNNEL DE BURE

MARTI TUNNELBAU AG, BERN

PARIETTI & GINDRAT SA, PORRENTRU Y

MARTI TRAVAUX SPÉCIAUX SA, PORRENTRU Y

GROUPEMENT D'INGÉNIEURS

CTB CONSORTIUM TUNNEL DE BURE

Etude et Direction des Travaux

Tél. 032 423 19 11



GGT SA
Porrentruy



GÄHLER PARTNER
Ennetbaden

MANDATAIRE DU SUIVI GÉOLOGIQUE EN SOUTERRAIN



MFR GÉOLOGIE - GÉOTECHNIQUE SA

DELEMONT
032 422 61 14

BIENNE
032 341 48 08

LA CHAUX-DE-FONDS
032 968 95 40

ÉPALINGES
021 784 06 00

www.mfr.ch

MANDATAIRE DE LA GESTION DES MATÉRIAUX

C'S'D' Ingénieurs et Géologues SA

Ingénieurs, Géologues, Spécialistes de l'environnement
Rue de la Chaumont 13, CP 134, 2900 Porrentruy 2, Téléphone : +41 32 465 50 30
Fax : +41 32 465 50 31, E-mail : porrentruy@csd.ch, Internet : www.csd.ch

MANDATAIRE DU SUIVI ENVIRONNEMENTAL

METRIX S.A.

Contrôle et surveillance de l'environnement naturel et construit, par observations, mesures, essais, analyses

Ch. du Fâtre 7 2952 Cornol 032 462 10 70

MANDATAIRE DU SUIVI GÉOLOGIQUE À CIEL OUVERT



RUE DES PRÉS 9 - CH-2800 DELÉMONT

TÉL. 032 422 03 11 FAX 032 422 03 22 INFO@GEO-ENVIRONNEMENT.CH