

Zeitschrift: Bulletin für angewandte Geologie
Herausgeber: Schweizerische Vereinigung der Petroleum-Geologen und –Ingenieure;
Schweizerische Fachgruppe für Ingenieur-Geologie
Band: 6 (2001)
Heft: 2

Artikel: Géologie et conditions de stabilité en cours d'excavation des tunnels
autoroutiers de la Perche et du Banné à Porrentruy, Jura
Autor: Grobet, D. / Christe, R. / Boem, J.-M.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-222973>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 26.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Géologie et conditions de stabilité en cours d'excavation des tunnels autoroutiers de la Perche et du Banné à Porrentruy, Jura

avec 8 figures et 3 tableaux

D. GROBET*, R. CHRISTE* & J.-M. BOEM**

Résumé

Le suivi géologique des travaux de percement des tunnels de la Perche et du Banné (A16, Canton du Jura) devait répondre à deux objectifs, à savoir la comparaison entre les conditions rencontrées et les prévisions effectuées, ainsi que l'analyse du comportement du massif rocheux à l'excavation. Concernant le premier point, nous avons constaté une bonne adéquation entre le modèle géologique et hydrogéologique élaboré avant travaux et la réalité. Quant au second point, nos observations directes ont permis de comprendre divers phénomènes d'instabilité et de distinguer quatre catégories de hors-profils. Au décompte final, il apparaît que le 80 % des cas de hors-profils découle du décollement de plaques en calotte et du pré-découpage du massif rocheux.

Zusammenfassung

Die geologischen Aufnahmen während des Vortriebs der beiden Tunneln «de la Perche» und «du Banné» der A16-Umfahrung von Porrentruy (Kanton Jura), hatten zwei Ziele: erstens der Vergleich zwischen den vorgefundenen Bedingungen und den Voraussagen und zweitens die Analyse des Verhaltens des Baugrundes während des Tunnelausbruchs. Im ersten Punkt entsprach das geologische und hydrogeologische Modell ziemlich genau der Realität. Im zweiten Punkt haben unsere Beobachtungen erlaubt, verschiedene Phänomene der Instabilität zu verstehen und vier Kategorien von Überprofilen zu unterscheiden. Es stellte sich heraus, dass 80 % der Fälle von Überprofilen durch das Ablösen von Platten im Firstbereich und durch die Kluftgeometrie verursacht wurden.

Abstract

The geological survey during the drilling of the two A16 motorway «Perche» and «Banné» tunnels in the Jura Tableland in NW Switzerland was carried out firstly in order to compare the difference between geological forecasts and observed conditions, and secondly to analyse the behaviour of underground limestone rock masses during excavation. In the first case a good correspondence was observed between actual conditions found during excavation and the geological and hydrogeological forecast models used. In the second case our direct observations enabled us to understand instability phenomena in the rock masses and to distinguish four related «out-of-bounds» categories. In the end it appears that 80 % of those «out-of-bounds» cases were caused by the breaking away of crown plates and by existing fractures in the rock mass.

* MFR Géologie-Géotechnique SA, Rue de Chaux 9, 2800 Delémont

** MFR Géologie-Géotechnique SA, Rue Franche 24, 2500 Bienne 3

1. Introduction

Dans le cadre de la construction de l'autoroute A16 (Transjurane), 2 tunnels ont été exécutés pour le contournement de la ville de Porrentruy, dans le canton du Jura. Il s'agit du tunnel de la Perche, d'une longueur d'environ 900 m, et du tunnel du Banné, atteignant environ 870 m (Fig. 1).

L'épaisseur de la couverture au-dessus de la calotte atteint une trentaine de mètres pour la Perche et environ 40 mètres pour le Banné. Ces deux tunnels (4 tubes) ont été excavés par minage en pleine section, avec un profil en fer à cheval d'environ 80 m² (Fig. 2).

2. Situation géologique

Les deux tunnels recoupent longitudinalement le flanc Nord de l'anticlinal du Banné, orienté NE-SW (Jura tabulaire, Fig. 3). Les formations géologiques traversées sont d'âge secondaire (Kimméridgien et Oxfordien), de nature essentiellement calcaire dans le tunnel de la Perche et calcaire à marno-calcaire dans le tunnel du Banné (Fig. 4).

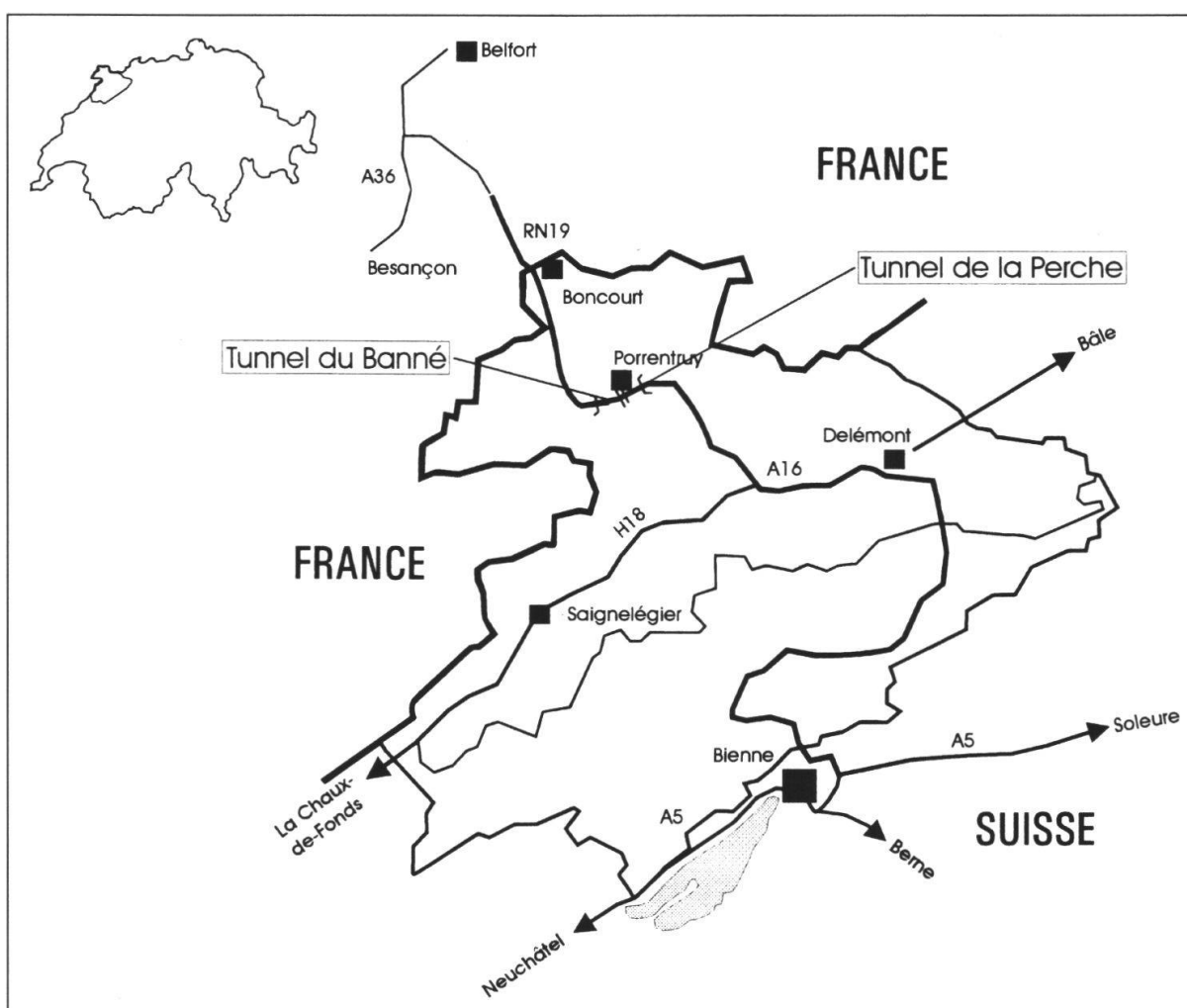


Fig. 1: Plan de situation.

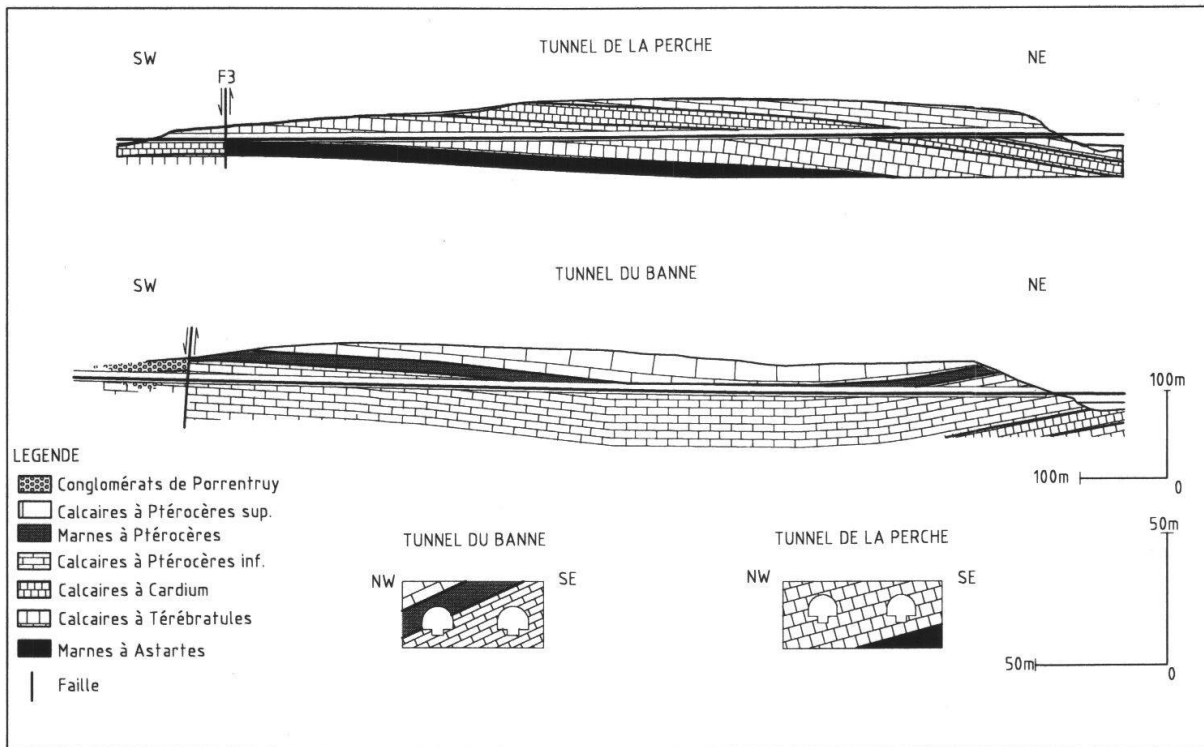


Fig. 2: Profils en long géologiques.

Cet anticlinal est sectionné transversalement par des accidents tectoniques subméridiens d'importance régionale qui sont liés à la formation du fossé rhénan (d'âge Oligocène). L'une de ces failles (F3), rencontrée dans le tunnel de la Perche, présente un rejet vertical d'environ 50 m et une zone d'influence latérale (tectonisation de la roche) atteignant plus de 50 m au total. Cette zone bréchique s'est révélée beaucoup plus large que prévu: habituellement, pour de tels accidents majeurs, on peut s'attendre à une tectonisation de la roche, de part et d'autre de la faille, de quelques mètres, voire une dizaine de mètres.

Les formations géologiques recoupées se sont résumées dans le tableau 1 (de haut en bas).

Etage	Formation géologique	Nature de la roche
Kimméridgien	Calcaires à Ptérocères supérieurs	Bancs de calcaire massif
	Marnes à Ptérocères	Alternance de bancs de calcaire, de calcaire marneux et de marne
	Calcaires à Ptérocères inférieurs	Bancs de calcaire +/- massif et bancs de calcaire plaqueté, interlits argileux
	Calcaires à Cardium	Calcaire massif, partiellement crayeux
Oxfordien supérieur	Calcaires à Térébratules	Bancs de calcaire +/- massif et bancs de calcaire plaqueté, interlits (ou petits bancs) argileux

Tab. 1: Formations géologiques rencontrées en tunnels.

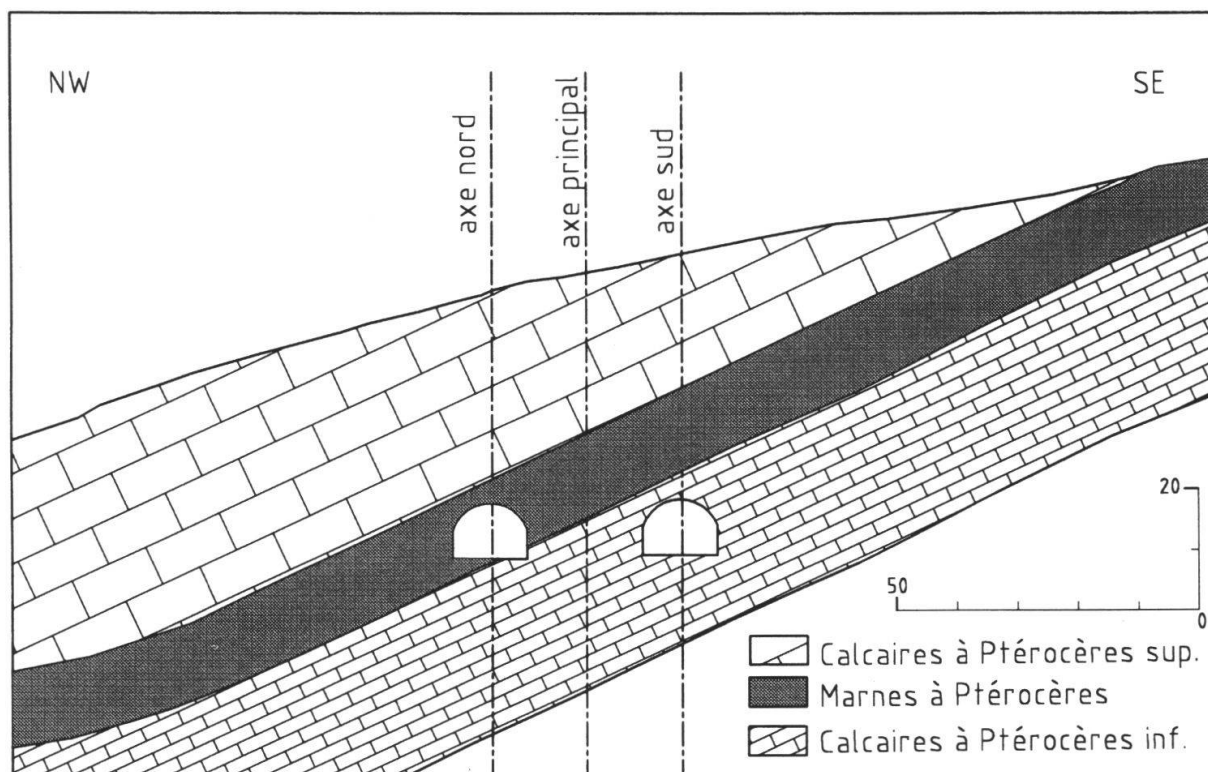


Fig. 3: Profil géologique transversal schématique.

Tunnel du Banné		Tunnel de la Perche								
Hydro	Ep.(m)	Lithologie	Terminologie française	Membre	Formation	Etage	Epoque			
Aquitaine local	9		Calcaires à Ptérocères supérieurs	Banné	Reuchenette	Kimméridgien	MALM (Jurassique supérieur)			
	14		Marnes à Ptérocères							
	4		Calcaires à Ptérocères inférieurs	Porrentruy						
	32									
	15	Calcaires à Cardium	Courgenay	Courgenay	Oxfordien supérieur					
40	Calcaires à Térébratules									
Aquitaine local	8		"Banc à Momies"			Bure		Vellerat	Oxfordien supérieur	
	5					Hmb				
	28		Marnes à Astartes	Röschenz						

Fig. 4: Position des tunnels dans la coupe lithostratigraphique.

D'une manière générale la stratification de ces formations est bien marquée, à l'exception des Calcaires à Cardium où les joints stratigraphiques disparaissent au profit d'une roche plus massive. En revanche, le diaclasage de cette dernière formation (discontinuités subverticales) peut être localement intense.

Le pendage des couches est orienté vers le NNW (localement N) avec un plongement de 10° à 20° pour le tunnel de la Perche et 15° à 30° pour le tunnel du Banné. Il est donc transversal par rapport aux ouvrages. Les projections stéréographiques de la figure 5 montrent une faible dispersion des pendages mesurés en tunnel.

Un relevé systématique de la fracturation a été effectué à l'avancement dans les 2 tunnels. Il a permis la récolte de nombreuses données traitées statistiquement par projections stéréographiques (Fig. 5). Cette analyse confirme l'existence de deux familles de fracturation préférentielle:

- la famille principale (A) est orientée grossièrement N-S et s'apparente aux failles dites «rhénanes». Le pendage de ces discontinuités est principalement subvertical à 70° E;
- la famille secondaire (B), complémentaire, est orientée E-W et correspond à des fractures de tension subparallèles à l'axe de l'anticlinal. Leur pendage est également subvertical à 70° Sud.

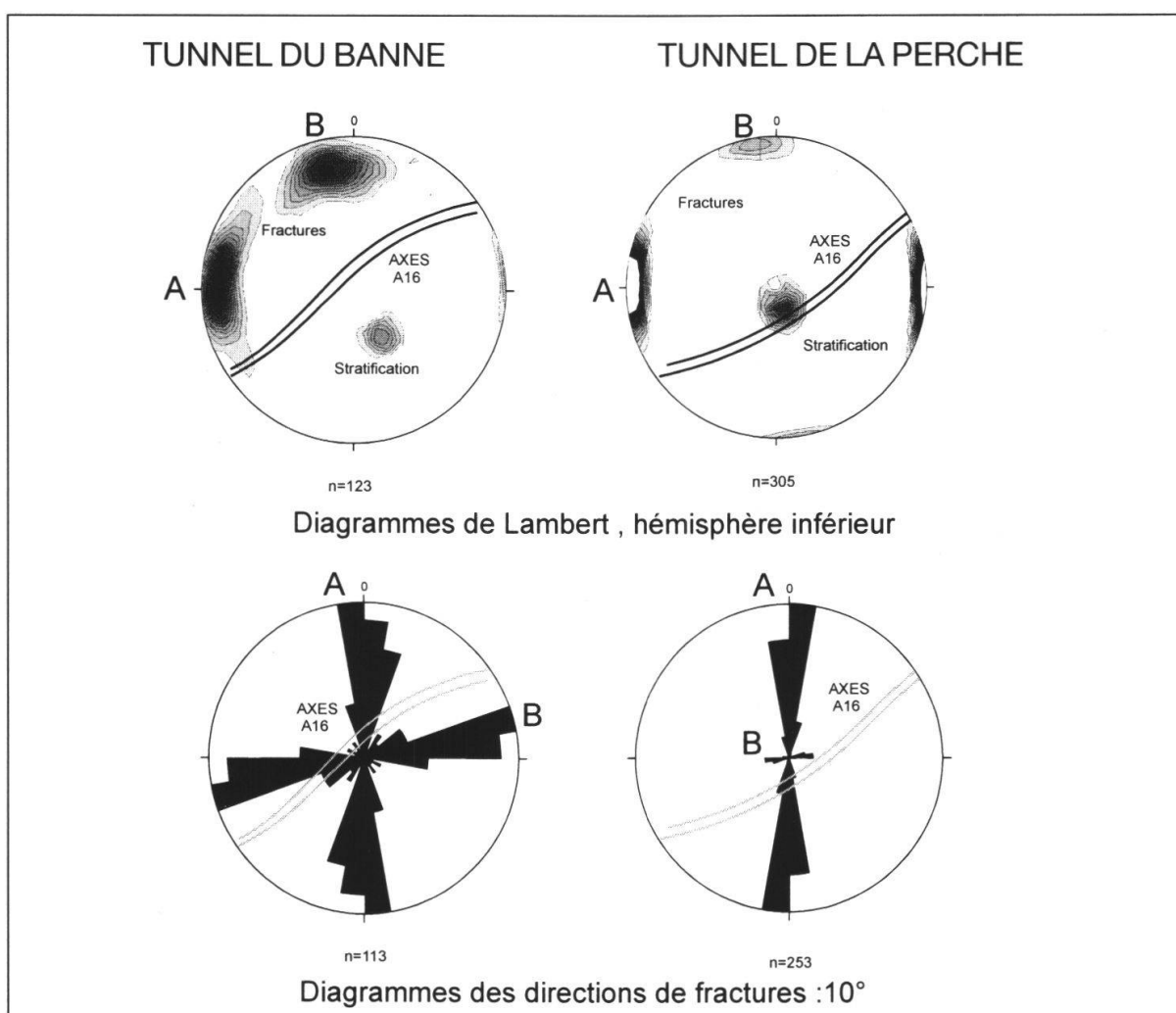


Fig. 5: Représentation stéréographique des discontinuités.

3. Karstification

Divers phénomènes de karstification du massif rocheux ont été rencontrés tout au long du percement des deux tunnels, du simple remplissage argileux des fractures au conduit karstique ouvert typique, en passant par des niveaux karstifiés ou des cavités colmatées. Précisons que la majorité de ces phénomènes se développe sur des plans de fracturation ou sur des bancs de calcaire plaqueté à interlits argileux. Il semble d'ailleurs que la présence de niveaux argileux peut être un facteur facilitant l'amorce de phénomènes karstiques. La formation des Marnes à Ptérocères dans le tunnel du Banné a d'ailleurs subi localement une forte altération (avec karstification des niveaux calcaires) au contact avec les calcaires à Ptérocères supérieurs sus-jacents et karstifiés.

Les chenaux karstiques recoupés sont généralement d'extension modeste (de l'ordre du mètre à quelques mètres). Ils sont le plus souvent remplis d'argile et de blocs calcaires et se sont partiellement vidés lors des travaux d'excavation. Un seul karst de taille plus importante a été intercepté au tunnel de la Perche dans la partie sommitale des Calcaires à Térébratules. Il se développe en calotte sous forme de cheminée verticale dans la formation sus-jacente des Calcaires à Cardium (Fig. 6). Initialement colmaté par des argiles brunes et des blocs calcaires, ce karst s'est progressivement vidé par lui-même en plusieurs jours pour laisser un vide en calotte de section rectangulaire (environ 6.5 x 3 m) et de plus de 10 m de profondeur. Ce karst s'est développé à l'intersection de plusieurs fractures subverticales appartenant aux deux familles N-S et E-W décrites plus haut. Par conséquent, il n'est pas impossible qu'il traverse toute la formation des Calcaires à Cardium, de nature crayeuse donc plus soluble. Par contre, ce karst ne semble pas se poursuivre vers le bas, dans les Calcaires à Térébratules, ni horizontalement. Un cas similaire de développement karstique dans les Calcaires à Cardium a été recensé ailleurs en Ajoie (galerie de reconnaissance du tunnel de Bure, Jura tabulaire).

Signalons enfin qu'aucun des conduits karstiques recoupés ne s'est révélé véritablement «actif» sur le plan des venues d'eau.

4. Hydrogéologie

4.1. Cadre général

La situation hydrogéologique des deux tunnels est identique quant à *l'aquifère* lui-même, représenté dans les deux cas par les formations calcaires perméables du Kimméridgien et de l'Oxfordien supérieur. Les écoulements potentiels d'eau souterraine sont donc de type karstique au travers d'un réseau de discontinuités (fissures ou plans de couches d'ouverture variable) et de chenaux karstiques.

L'aquiclude est formé, dans les deux cas, par la formation marneuse sous-jacente des Marnes à Astartes de l'Oxfordien supérieur, considérée comme imperméable au niveau régional. Il est situé à une centaine de mètres sous le tunnel du Banné, mais remonte jusqu'à quelques mètres sous le radier du tunnel de la Perche (tube Sud), par le truchement de la faille régionale F3 décrite ci-dessus (cf. chap. 2).

SE

NW

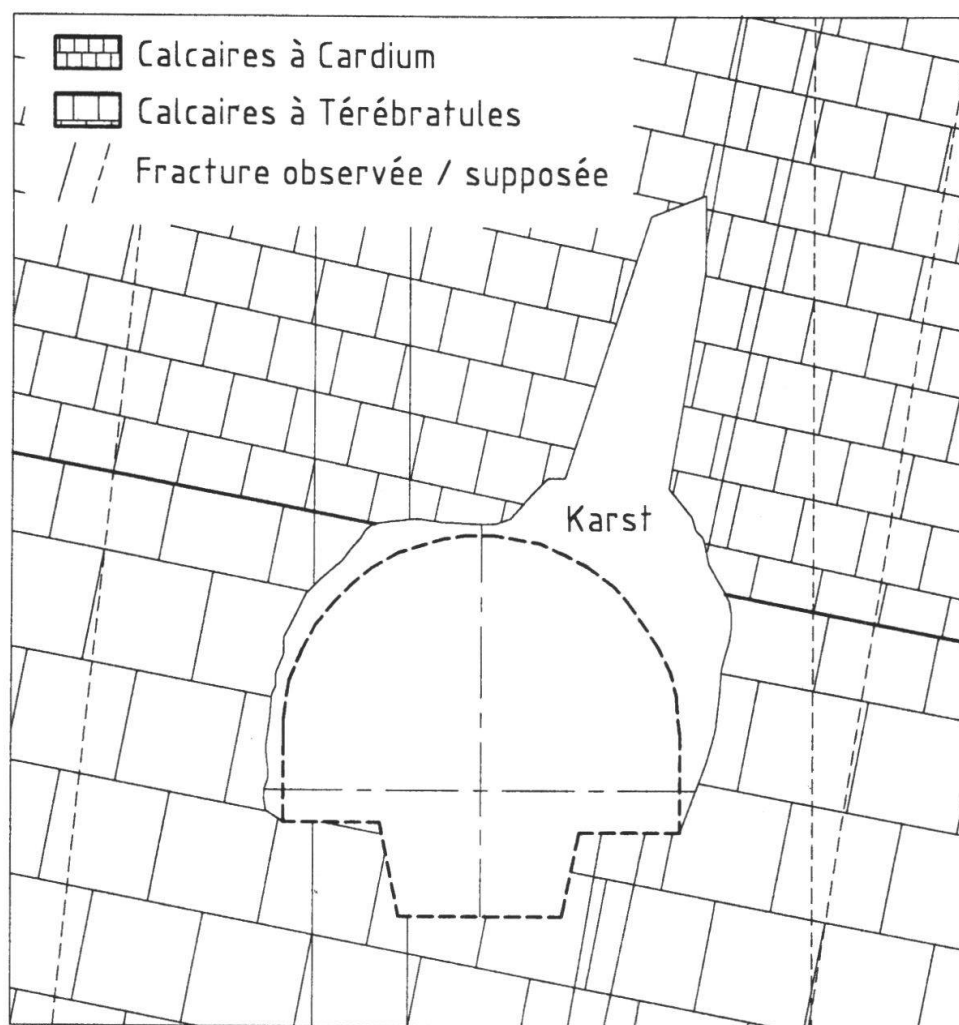


Fig. 6: Développement d'un karst dans les Calcaires à Cardium du tunnel de la Perche

La piézométrie, reconnue par forage avant percement, diffère d'un tunnel à l'autre:

- au tunnel de la Perche, le niveau piézométrique moyen se situe en dessus du radier sur plusieurs centaines de mètres de longueur. Un niveau maximum a été enregistré dans un piézomètre à environ 10 m en dessus de la calotte. En profil en long, on constate que les niveaux piézométriques suivent approximativement la pente du toit de l'aquiclude;
- au tunnel du Banné, le niveau piézométrique moyen n'atteint pratiquement pas le radier du tunnel. Toutefois, lors de crues importantes, le niveau d'eau peut monter localement jusqu'au niveau-projet, ou même dépasser la calotte de quelques mètres, à proximité du portail Ouest.

Avant le percement des tunnels, il ressortait donc de cette situation hydrogéologique que des venues d'eau plus ou moins importantes pouvaient survenir durant le percement du tunnel de la Perche (débit moyen pronostiqué: 180–240 l/min), alors qu'au tunnel du Banné les infiltrations d'eau n'étaient attendues qu'en période de hautes eaux ou simplement lors de précipitations.

4.2. Venues d'eau en tunnels

Dans les 2 tunnels, les venues d'eau survenues à l'avancement ont été répertoriées systématiquement et jaugées quand leur débit le permettait. Les observations suivantes ont été faites:

Tunnel de la Perche

- aucune irruption violente d'eau ne s'est produite au cours des travaux d'excavation;
- les venues d'eau sont survenues surtout dans le tube Sud et plus particulièrement en calotte et parement Sud, ce qui tend à démontrer que les écoulements d'eau dans ce massif se font en grande partie par les surfaces de couches (plongement vers le Nord). Ces infiltrations d'eau sont apparues surtout sur un tronçon de 150 m correspondant aux niveaux piézométriques les plus élevés mesurés avant les travaux. D'autre part, le caractère pérenne de ces venues d'eau permet de supposer qu'il s'agit bien là d'un drainage de la zone saturée de l'aquifère karstique et non seulement de percolations d'eau pluviale à travers le massif;
- les débits des venues d'eau mesurés individuellement demeurent modestes: max. ~ 15 l/min;
- après percement, en période pluviométrique basse à moyenne, le débit des eaux naturelles du tunnel (2 tubes) s'écoulant au portail W s'élevait à env. 150 l/min. Pour obtenir le débit moyen global pour l'ensemble de l'ouvrage, il faut ajouter à cette valeur une faible quantité d'eau (~ 10 l/min) qui correspond aux infiltrations s'écoulant en direction du portail E du tunnel. Le débit total reste donc légèrement inférieur aux prévisions. Ceci peut s'expliquer par le faible taux de précipitations enregistré durant la période d'excavation du tunnel (mai à octobre 2000) et par d'éventuelles pertes d'eau lors de l'écoulement dans le tunnel (réinfiltration dans le massif rocheux);
- de nombreux suintements ont été observés dans la zone tectonisée de la faille F3, mais sans aucune venue d'eau importante. Cette faille semble d'ailleurs, par la nature argileuse de ses matériaux, jouer un rôle de barrage pour les écoulements souterrains. En effet, les niveaux piézométriques mesurés à l'Ouest de cet accident restent beaucoup plus bas.

Tunnel du Banné

- aucune irruption violente d'eau ne s'est produite au cours des travaux d'excavation;
- le caractère temporaire des venues d'eaux constatées montre qu'il s'agit principalement d'eaux de percolation depuis la surface du massif rocheux en période pluvieuse. Localement, les Marnes à Ptérocères peuvent toutefois favoriser la formation d'une nappe perchée lors de périodes pluvieuses;
- les suintements et venues d'eau ont été plus fréquents dans le tube Nord et sont apparus plutôt en calotte et parement Sud au droit de fractures ou de conduits karstiques. Les venues d'eau les plus importantes sont apparues dans la partie inférieure des Marnes à Ptérocères. En période de hautes eaux, des débits de quelques l/min ont été mesurés, l'une d'entre elles atteignant cependant 60 l/min. Il s'agit d'une venue d'eau sortant d'un conduit karstique affectant les Marnes à Ptérocères. Selon l'entreprise chargée des travaux, son débit aurait même été 10 fois plus important en pointe de crue.

5. Géotechnique

5.1 Caractéristiques géomécaniques des roches

Le tableau 2 résume les principales caractéristiques géomécaniques des roches concernées par les 2 tunnels de la Perche et du Banné.

Formations géologiques		Poids vol. app. hum.	Compression simple		Cisaillement			Gonflement Huder-Amberg	
Type de roche		γ	σ_c	E	$\phi_{rés}$	C_{pic}	$C_{rés}$	ε_g	$\sigma_g \text{ max}$
		(kN/m ³)	(MN/m ²)	(MN/m ²)	(°)	(kN/m ²)	(kN/m ²)	(%)	(kN/m ²)
Calcaires à Ptérocères sup.									
Calcaire	nbre	15	15	15					
	moy	25.71	98	33385					
	écart-type	1.03	39	8288					
Marnes à Ptérocères									
Marne	nbre	13	13	13	2		2	4	4
	moy	23.92	8	1296	31		36	0.4	38
	écart-type	1.24	6	1616	1		9	0.2	55
Calcaires à Ptérocères inf.									
Calcaire + joints argileux	nbre	33	28	28	6	4	6		
	moy	25.61	66	24475	24	121	5		
	écart-type	0.99	26	11678	4	59	6		
Calcaires à Cardium									
Calcaire	nbre	19	19	19					
	moy	23.77	48	20380					
	écart-type	1.31	21	8805					
Calcaires à Térébratules									
Calcaire	nbre	22	22	22					
	moy	26.23	93	30695					
	écart-type	0.64	41	11690					
Marnes à Astartes									
Marne	nbre	27	10	10	4	4	4	17	17
	moy	23.66	6	915	37	745	22	5.1	738
	écart-type	1.09	7	1588	10	562	25	6.1	674
Calcaire	nbre	5	5	5					
	moy	25.84	95	25859					
	écart-type	0.50	21	8471					

Tab. 2: Résultats des essais géomécaniques en laboratoire, moyennes régionales.

5.1.1 Dureté

Dans le cadre des études géologiques effectuées pour la Transjurane, de nombreux essais de résistance à la compression simple ont été effectués en laboratoire sur des échantillons de roche en provenance des différentes formations géologiques qui nous intéressent. Les résultats ont été reportés par formation sur un diagramme de classification des roches de Deere (Fig. 7). On remarque que les calcaires des différentes formations sont en général *moyennement durs à durs* et *moyennement à peu déformables*. Seuls les Calcaires à Térébratules peuvent être *très durs* et les bancs calcaires crayeux des Calcaires à Cardium *tendres*. Les Marnes à Ptérocères (faciès marno-calcaires) sont formées de roches *tendres à très tendres* et *déformables*.

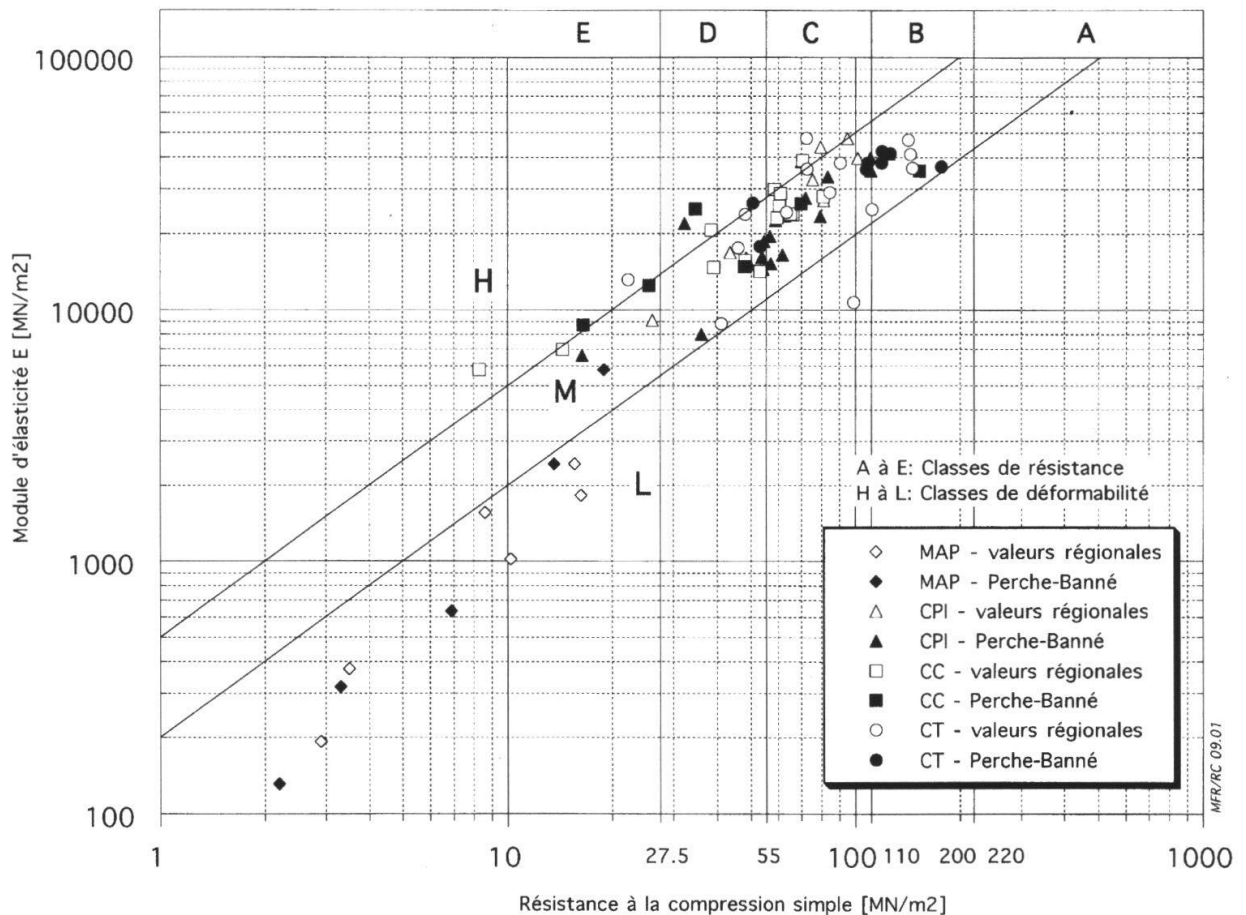


Fig. 7: Diagramme de classification des roches selon Deere.

5.1.2 Cisaillement

Plusieurs essais de cisaillement direct ont été effectués en phase de reconnaissance à la boîte de Casagrande modifiée, sur des joints de stratification plus ou moins argileux.

Marnes à Ptérocères

Les 2 seules valeurs d'angle de frottement résiduel obtenues sont de 30° et 32° pour une cohésion résiduelle (imbrication) élevée, respectivement 42 et 29 kPa.

Calcaires à Ptérocères inférieurs

Les angles de frottement résiduels, correspondant aux interlits argileux (niveaux les plus vulnérables), oscillent entre 21° et 29° , pour une cohésion résiduelle de 0 à 10 kPa.

Au vu de ces résultats et des pendages stratigraphiques prévus, le risque de glissement de dièdres sur un interlit argileux était pratiquement nul dans le tunnel de la Perche, alors que pour le tunnel du Banné ce risque existait en parement Sud (plongement des couches en direction du tunnel), faiblement dans les Marnes à Ptérocères, mais plus réel dans les calcaires à Ptérocères inférieurs.

Or, au cours des travaux d'excavation des 2 tunnels, seuls quelques rares cas d'instabilité ont pu être attribués à un glissement sur un plan de couches. Ceci tendrait à démontrer qu'à l'échelle du massif, l'effet de confinement et la cohésion d'imbrication jouent un rôle important.

5.1.3 Gonflement

Plusieurs essais de gonflement ont été réalisés, d'une part dans les niveaux marneux des Marnes à Ptérocères recoupés par le tube Nord du tunnel du Banné, d'autre part sur les Marnes à Astartes remontant sous le radier du tube Sud du tunnel de la Perche.

Marnes à Ptérocères

Les 4 essais de gonflement réalisés sur des échantillons en provenance de cette formation n'ont révélé qu'un faible taux de gonflement ($\sim 0.5\%$) pour des pressions de gonflement maximales (après déformation élastique) relativement faibles 0 à 20 kN/m², avec une seule valeur atteignant 120 kN/m². Cette formation recoupant le radier du tunnel sur environ 300 m, il a été décidé, malgré le faible potentiel de gonflement de ces marnes, de franchir ce tronçon avec un radier contre-voûté.

Marnes à Astartes

Cinq essais de gonflement ont été effectués sur les niveaux marneux de cette formation au massif de la Perche. Ils ont montré un taux de gonflement oscillant entre 1 et 7 % et des pressions de gonflement maximales après excavation variant de 300 à 850 kN/m². Toutefois, sur le plan régional, d'autres essais de gonflement sur les marnes de cette même formation ont révélé des valeurs plus élevées, à savoir un taux de gonflement atteignant 19 % avec une pression de gonflement maximale de 2100 kN/m². Durant les travaux d'excavation, 2 sondages de reconnaissance ont été réalisés verticalement en radier, afin de localiser la position de ces marnes par rapport au projet. Les niveaux gonflants ayant été repérés à plus de 5 m sous la GAT (galerie technique) et les taux de gonflement restant assez faible (max 6.9 %), il a été décidé de ne pas avoir recours à un radier contre-voûté pour franchir cette zone.

5.2 Comportement du massif rocheux à l'avancement

Au cours du suivi géologique, nous avons systématiquement tenté d'estimer la tenue de la roche après minage et de relever les hors-profils dans les zones instables.

Ces observations se sont avérées difficiles en raison des travaux de marinage et de purge, qui suivaient directement les tirs de minage, et de la pose rapide d'une couche de protection de béton projeté en calotte et partiellement en parements.

5.2.1 Tenue de la roche

L'évaluation de la tenue de la roche s'est faite séparément pour la calotte, les parements et le front de taille. Nos appréciations se sont basées sur l'échelle suivante:

Excellente tenue	aucune instabilité
Bonne tenue	décollement de plaques
Moyenne tenue	instabilités locales, légers hors-profils
Mauvaise tenue	instabilités importantes, hors-profils marqués
Très mauvaise tenue	instabilité générale, hors-profils importants

D'une manière générale, la tenue de la roche dépend de la qualité et du découpage du massif rocheux (Fig. 8). Il s'agit principalement des critères suivants:

- stratification des bancs (minces, épais),
- qualité des joints (argile, rugosité),
- pendage des couches,
- discontinuités tectoniques (orientation, pendage, fréquence, ouverture, rugosité, remplissage, familles conjuguées),
- tectonisation de la roche,
- karstification.

Calotte

Compte tenu du faible pendage des couches (maximum 30°), transversal par rap-

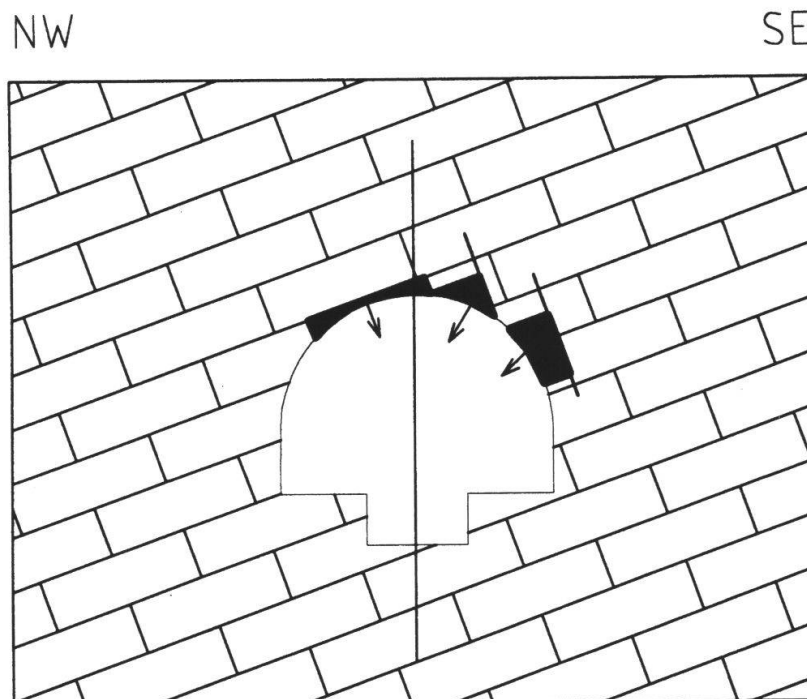


Fig. 8: Schéma d'instabilité potentielle.

port aux 2 tunnels, le décollement des strates s'est montré très fréquent en calotte, presque systématique à l'avancement, un peu moins cependant dans les Calcaires à Cardium plus massifs. Ainsi, la tenue de la roche en calotte s'est avérée globalement bonne à moyenne, plus rarement mauvaise à très mauvaise dans des zones intensément fracturées ou karstifiées.

En traversant la zone de la faille F3 dans le tunnel de la Perche, la tenue de la roche s'est montrée mauvaise voire très mauvaise sur environ 50 m de longueur, en raison de l'importante tectonisation du massif. Les mesures prises ont été les suivantes:

- réduction de la longueur des tirs de minage;
- pose immédiate, après marinage, d'une couche de protection de béton projeté, avec une surépaisseur de plusieurs centimètres (soutènement) jusqu'en pied de parement;
- mise en place de boulons supplémentaires.

Contrairement à ce que l'on pouvait attendre, la tenue des marnes (Marnes à Ptérocères) en calotte du tunnel du Banné est restée bonne à moyenne, excepté sur un tronçon fortement karstifié où la tenue est devenue très mauvaise sur une vingtaine de mètres. Les venues d'eau associées à ce karst n'ont fait qu'accentuer les phénomènes d'instabilité de la calotte et des parements.

Parements

La tenue de la roche en parement s'est avérée globalement bonne, avec toutefois quelques instabilités constatées et une tenue moyenne à mauvaise dans les cas suivants:

- tronçons intensément fracturés selon les 2 systèmes de fractures principaux, instabilité surtout en parement Nord;
- zone de la faille F3 (50 m) dans le tunnel de la Perche, instabilité des 2 parements;
- karsts importants à remplissage argileux se développant sur des bancs calcaires ou marneux, ou le long d'accidents structuraux.

Front de taille

Les fronts de taille ont généralement présenté une bonne tenue, avec quelques cas ponctuels de mauvaise tenue dus également à une fracturation ou surtout à une karstification intense de la roche. Au franchissement de la zone tectonisée de la faille F3, une couche de béton projeté de protection a été appliquée localement sur certains fronts.

5.2.2 Hors-profils géologiques

La conséquence directe des phénomènes d'instabilité décrits dans le paragraphe précédent est l'apparition de hors-profils, dont une part pourra être considérée comme hors-profil géologique, dans le cas où l'éboulement considéré résulte de conditions géologiques défavorables.

Les profils d'excavation ont été mesurés au moyen d'appareils laser qui permettent d'obtenir une forme d'excavation en continu. Les hors-profils totaux sont ensuite calculés en comparant l'excavation réelle avec les profils théoriques d'excavation. Finalement, les hors-profils géologiques sont calculés selon la norme SIA 198 (art.

5 13 5, 1993) avec une distance D fixée à 40 cm.

Par rapport aux hors-profils totaux, les parts de hors-profils géologiques sont relativement importantes pour les 2 tunnels:

- tunnel de la Perche: env. 45 %
- tunnel du Banné: env. 50 %

La localisation, la géométrie et la profondeur des hors-profils ont été mises en parallèle avec nos levés géologiques, afin d'en déterminer les causes. Nous avons ainsi pu définir 4 catégories de hors-profils:

- ① *Décollement* assez systématique en calotte de plaques calcaires décimétriques, généré par les joints stratigraphiques argileux lors du minage. Ces décollements sont facilités par le faible pendage des couches tout au long des tunnels:
 - tunnel de la Perche: 10° à 20° NW. Les tronçons recoupant en calotte les Calcaires à Cardium plus massifs présentent une meilleure stabilité;
 - tunnel du Banné: 17° à 30° NW. Les tronçons recoupant en calotte les Marnes à Ptérocères ne présentent pas, à priori, des conditions de stabilité plus défavorables que les tronçons calcaires.
- ② *Découpage* orthogonal du massif rocheux en dièdres ou prismes décimétriques à métriques, par la conjugaison de 3 familles de discontinuités (cf. chap. 2):
 - a) plan stratigraphique subhorizontal à faiblement incliné;
 - b) et c) plans de fractures subverticales et orthogonales (2 directions préférentielles).

Dans le tunnel de la Perche, on constate que ce type de hors-profil s'est développé principalement en calotte côté Sud ainsi qu'en naissance de voûte et parement côté Nord. Leur profondeur peut atteindre un maximum de 2 m en calotte et 1 à 2 m en parement. Dans les formations de calcaire en bancs bien stratifiés, les décollements de plaques peuvent se faire en calotte sur plusieurs dizaines de mètres de longueur.

- ③ Dans le tunnel de la Perche, mauvaise stabilité du massif rocheux en calotte et/ou en parement, due à une *tectonisation* intense de la roche (nombreux plans de fractures, brèche tectonique, remplissage argileux) dans le tronçon perturbé de la faille F3 (tube Nord: longueur 55 m, tube Sud: longueur 49 m). Ici, les hors-profils maximum ont été estimés à environ 2.50 m de profondeur, en calotte et en naissance de voûte. Sinon, de nombreux hors-profils profonds de 0.50 à 1.00 m caractérisent cette zone.
- ④ *Karstification* du massif rocheux selon des plans de fractures ou des bancs de calcaires préférentiels (calcaires plaquetés à interlits argileux), avec développement de vides ou remplissages argileux secondaires. Le minage a été à l'origine de plusieurs déboussages de ces argiles. Les vides constatés (naturels ou après déboussage) ont atteint en calotte 3–4 m de profondeur (diamètre 1 à 2 m) et en parement jusqu'à 5 m de profondeur. D'autre part, une cheminée d'environ 11 m de hauteur a été interceptée en calotte de la Perche avec une ouverture à la base (hors-profil) d'environ 6 m de largeur (Fig. 6).

La totalité des hors-profils relevés dans les 2 tunnels a été répartie dans les différentes catégories qui viennent d'être décrites et les pourcentages obtenus figurent

dans le tableau 3 ci-dessous. Les deux premières catégories, décollement et découpage, ont été considérées conjointement car ces deux phénomènes sont pratique-

Catégories de hors-profil	Tunnel de la Perche		Tunnel du Banné	
	Nord	Sud	Nord	Sud
1: décollement 2: découpage	70–80	80–90	75–85	80–90
3: tectonisation intense	10–20	5–15	5–10	5–10
4: karstification	5	5	10–15	5

Tab. 3: Répartition estimée des hors-profils par catégorie (%).

ment toujours liés.

Cette répartition montre que le décollement de plaques en calotte, avec découpage, est le principal responsable des hors-profils observés dans les deux tunnels: environ 80 % des cas. La tectonisation de la roche dans la zone de faille ne concerne que 5 à 15 % des cas et les hors-profils causés par les phénomènes karstiques n'atteignent que 5 à 10 %. La limitation des charges de minage imposée pour réduire les ébranlements en zones construites et habitées n'ont pas permis de compenser les conditions structurales défavorables, propices aux développements de hors-profils, à savoir stratification subhorizontale à peu inclinée et fracturation préalable multiple du massif rocheux.

6. Conclusions

Les travaux de suivi géologique effectués à l'avancement, durant toute la durée du chantier des 2 tunnels de la Perche et du Banné, nous ont permis de récolter un nombre important de données qui ont trouvé les utilités suivantes:

6.1 Comparaison entre les conditions géologiques et hydrogéologiques rencontrées et les prévisions effectuées

Le modèle géologique élaboré avant travaux s'est révélé assez proche de la réalité: des différences de l'ordre du mètre ont été constatées au niveau des limites de formations géologiques et les pendages de couches ont été assez bien respectés. Toutefois, l'accident tectonique majeur (F3), recoupé dans le tunnel de la Perche, a montré une zone tectonisée beaucoup plus importante que prévu: de l'ordre d'une cinquantaine de mètres, alors qu'elle avait été pronostiquée sur quelques mètres seulement, voire une dizaine de mètres au maximum. Cette faille avait été positionnée non loin de la limite W de la brèche tectonique effectivement rencontrée en sondage. En ce qui concerne la fracturation de la roche, les 2 familles principales de fractures (A et B, orthogonales), signalées dans nos rapports prévisionnels, ont été retrouvées en tunnels. Ces 2 familles sont identiques dans les 2 tunnels.

La karstification du massif rocheux étant un phénomène a priori aléatoire, aucune prévision précise n'avait été formulée dans nos rapports prévisionnels, si ce n'est la probabilité de rencontrer des karsts de dimensions métriques, vides ou remplis d'argiles et blocs calcaires. Des karsts, surtout colmatés, ont effectivement été traversés dans les 2 tunnels. Ils sont liés à des discontinuités tectoniques (fractures surtout N-S) et se développent fréquemment le long de bancs de calcaires stratifiés à interlits argileux. Trois constatations importantes peuvent être faites:

- les calcaires de nature crayeuse (Calcaires à Cardium) sont propices au développement de karsts de dimensions importantes (cheminée karstique), plus particulièrement à l'intersection des différents systèmes de fractures;
- la karstification des calcaires peut avoir pour conséquence une forte altération des formations marneuses adjacentes;
- aucun conduit karstique recoupé n'a donné naissance à d'importantes venues d'eau, la plupart des conduits étant colmatés.

Les venues d'eau constatées en tunnel nous conduisent à faire les remarques suivantes:

- en périodes pluvieuses, de nombreux suintements et quelques venues d'eau (15–60 l/min) sont apparus en calotte des 2 tunnels;
- les venues d'eau de caractère pérenne n'ont été constatées que dans le tunnel de la Perche, où des niveaux piézométriques dépassant le niveau du projet avaient en effet été mis en évidence durant la phase de reconnaissance. Les niveaux d'eau relevés dans le massif du Banné, eux, n'atteignaient pas, ou à peine, le radier du tunnel;
- en période pluviométrique basse à moyenne, le débit total des eaux naturelles de l'ensemble du tunnel de la Perche (2 tubes), après percement, atteint approximativement 150 à 160 l/min. Ce débit mesuré est légèrement inférieur, mais du même ordre de grandeur que l'évaluation faite avant travaux, à savoir 180 à 240 l/min pour l'ensemble de l'ouvrage. Cette différence peut s'expliquer par la période relativement sèche durant laquelle les travaux d'excavation se sont déroulés.

6.2 Analyse et explications sur le comportement du massif rocheux à l'excavation

Les nombreuses observations et mesures in situ, ainsi que le levé géologique détaillé à l'avancement, nous ont permis d'analyser et de comprendre les différents phénomènes d'instabilité rencontrés au cours des travaux d'excavation des tunnels (avancement par minage en pleine section).

Le décollement de plaques en calotte ou le détachement de dièdres rocheux plus ou moins importants lors des tirs de minage peut conduire à l'apparition de hors-profils, dont une partie sera considérée comme hors-profils géologiques dans le cas où l'éboulement est survenu dans des conditions géologiques défavorables (cf. norme SIA 198, art. 5 13 5).

L'analyse des causes des instabilités observées nous ont amenés à distinguer 4 catégories de hors-profils:

- *Décollement* de plaques en calotte (faible pendage des couches);

- *Découpage* du massif rocheux par des plans de discontinuités subverticaux (2 familles principales de fractures) et subhorizontaux à faiblement inclinés (joints stratigraphiques). Il en résulte la formation de dièdres potentiellement instables;
- *Tectonisation* intense de la roche due à la faille majeure F3 dans le tunnel de la Perche (nombreuses fractures, brèche tectonique, remplissage argileux);
- *Karstification* du massif rocheux le long de plans de fractures ou de bancs de calcaires préférentiels.

Il ressort de nos observations que les 2 premières catégories sont pratiquement toujours liées et qu'elles représentent le 80 % des cas de hors-profils relevés.

6.3 Contribution à l'attribution des classes d'excavation

L'attribution des classes d'excavation d'abattage à l'explosif a été basée sur la norme SIA 198, art. 5.2. Pour les 2 tunnels, les classes suivantes ont été attribuées:

- Classe II: en zones non perturbées, stables;
- Classe III: en zones instables;
- Classe IV: sur les 5 premiers mètres de chaque tube au front d'attaque où des cintres métalliques ont été mis en place à l'avancement.

La répartition des zones classées nous a été soumise pour appréciation. Il s'agissait alors de préciser si l'attribution des tronçons en classe III était justifiée ou non. Ainsi, les levés détaillés de la géologie structurale et le repérage systématique des hors-profils à l'avancement nous ont permis de mener à bien cette analyse.

Globalement, on constate que la longueur totale des zones instables correspond approximativement à l'ensemble des tronçons attribués à la classe III. Il est intéressant de remarquer qu'il y a eu la même proportion de classe III dans les tronçons excavés en roche calcaire ou en marne (15 à 16 %).

Enfin, la comparaison entre les prévisions et la répartition définitive des classes est difficile, car des tronçons classés I et IV avaient été prévus dans la soumission. Toutefois, si l'on attribue à la classe III la longueur excessive prévue initialement en classe IV, on réalise que la proportion de classe III effective est d'environ 40 % inférieure aux prévisions. Cette différence peut s'expliquer par la meilleure tenue des marnes à l'excavation et par une vision peut-être un peu pessimiste des perturbations engendrées par les phénomènes karstiques, connus pour être importants et fréquents dans cette région. Enfin, le comportement des calcaires crayeux à l'excavation s'est révélé meilleur que prévu.

Remerciements

Les auteurs remercient vivement le Maître d'ouvrage, le Département de l'Environnement et de l'Équipement du Canton du Jura, représenté par le Service des Ponts et Chaussées, M. J.-Ph. Chollet, In-

génieur cantonal, ainsi que ses collaborateurs.

Bibliographie

SIA 1993: Norme 198. Travaux souterrains. Soc. Suisse Ing. Archi., SN 561 198, 3/1993, Zürich, 63 p.

MFR GÉOLOGIE-GÉOTECHNIQUE SA 1995: N16 sec. 3 Projet définitif. Tunnel de la Perche. Etude géologique et hydrogéologique. Service des Ponts et Chaussées, Delémont, 30.11.1995, 24 p. (inédit).

MFR GÉOLOGIE-GÉOTECHNIQUE SA 1996: N16 sec. 3 Projet définitif. Tunnel du Banné. Etude géologique et hydrogéologique. Service des Ponts et Chaussées, Delémont, 29.04.1996, 35 p. (inédit).

MFR GÉOLOGIE-GÉOTECHNIQUE SA 1997: N16 sec. 3 Soumission. Tunnel de la Perche. Etude géologique et géotechnique complémentaire. Rapport. Service des Ponts et Chaussées, Delémont, 03.06.1997, 4 p. (inédit).

MFR GÉOLOGIE-GÉOTECHNIQUE SA 1997: N16 sec.3. Soumission. Tunnel du Banné. Etude géologique et géotechnique complémentaire. Service des Ponts et Chaussées, Delémont, 10.07.1997, 4 p. (inédit).

IJA 2001: A16 Section 3 - Tunnels de la Perche et du Banné. Détermination des hors-profils d'excavation. Section complète - calotte + stross. Rapport technique de synthèse. Service des Ponts et Chaussées, 8072 RN 502a, 29 août 2001, 5 p. (inédit).

IJA 2001: A16 Section 3 - Tunnels de la Perche et du Banné. Détermination des classes d'excavation. Section complète - calotte + stross. Rapport technique de synthèse. Service des Ponts et Chaussées, 8072 RN 503, 29 août 2001, 2 p. (inédit).