Zeitschrift: Swiss bulletin für angewandte Geologie = Swiss bulletin pour la géologie appliquée = Swiss bulletin per la geologia applicata = Swiss bulletin for applied geology

Herausgeber: Schweizerische Vereinigung von Energie-Geowissenschaftern; Schweizerische Fachgruppe für Ingenieurgeologie

Band: 17 (2012)

Heft: 1

Artikel: Techniques de forages et d'excavations dans les argiles à Opalinus, laboratoire souterrain du Mont Terri

Autor: Bossart, Paul / Burrus, Fabrice / Nussbaum, Christophe

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-349231

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: 08.07.2025

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

Swiss Bull. angew. Geol. Vol. 17/1, 2012 S. 3-28

Techniques de forages et d'excavations dans les argiles à Opalinus, laboratoire souterrain du Mont Terri

Paul Bossart[1], Fabrice Burrus[2], Christophe Nussbaum[1]

Mots clés: Laboratoire souterrain du Mont Terri, argiles à Opalinus, contraintes, triples tubes, surcarottage, l'avancement à la tête fraiseuse, dépoussiéreur, soutènement, revêtement, convergences invar, distomètre, surveillance de l'ouvrage, dépôt géologique profond.

Résumé

Le projet international du Mont Terri a débuté en janvier 1996 dans le laboratoire souterrain du Mont Terri, excavé en annexe de la galerie de sécurité du tunnel du même nom, proche de St-Ursanne (Canton du Jura, Suisse). La caractérisation géologique, hydrogéologique, géochimique et géotechnique d'une formation argileuse, en particulier de l'argile à Opalinus, est l'objectif principal de ce projet. Quinze partenaires provenant d'Europe, du Japon, de Canada et des États-Unis se sont réunis autour de ce projet. Depuis 2006, swisstopo est responsable de l'exploitation du laboratoire souterrain ainsi que de la gestion du Projet Mont Terri, et en particulier de la mise en oeuvre du programme de recherche établi par les partenaires.

La plupart des expériences ont lieu dans des forages d'une longueur de 5 à 15 m. La technique de forage et le prélèvement de carottes doivent être adaptés à l'environnement argileux ou alors être perfectionnés. Les tubes de forage utilisés peuvent être simples, doubles ou triples avec des diamètres variant de 10 à 600 mm. Les tubes triples livrent les carottes de meilleure qualité sur lesquelles il est possible d'observer les réseaux de failles tectoniques ainsi que les fractures dans la zone endommagée par l'excavation. Une attention particulière est portée sur le perfectionnement de la technique de surcarottage dans les argiles à Opalinus. Actuellement, il est possible de surcarotter jusqu'à 20 m de profondeur avec des carottes pouvant atteindre jusqu'à 350 mm de diamètre. Les forages sont habituellement percés à l'air afin d'éviter les effets non désirés comme le gonflement des argiles ou l'instabilité des forages. Ils peuvent également être forés à l'azote ou à l'argon pour maintenir la contamination bactérienne à un niveau faible. La longueur totale des galeries excavées dans le laboratoire du Mont Terri est à peine de 700 m. La création des petites niches est réalisée au moyen d'un marteau piqueur. L'excavation des galeries est réalisée à l'explosif, au moyen de machines à attaque ponctuelle et de tête fraiseuses. En règle générale, une longueur d'environ 1 m est excavée chaque jour et est protégée par du béton projeté, des ancrages et par des treillis pour limiter les fissures dans le béton. La dernière étape du travail consiste en la mise en place du radier. Les constatations effectuées suite à l'excavation sont 1] aucune utilisation d'eau pendant l'excavation, 2] évacuation de la fine poussière d'argile au moyen d'une forte aspiration de cette dernière au front de le galerie et 3] réduction de la puissance de creusement par désaturation partielle de l'argile ainsi qu'une augmentation nette de la résistance à la compression uniaxiale.

Zusammenfassung

Im Rahmen des internationalen Mont Terri Projektes wird seit 1996 in einem erweiterten Teil des Sicherheitsstollens des Mont Terri Autobahntunnels bei St-Ursanne, Kanton Jura, geforscht. Das Hauptziel dieses Projektes ist die geologische, hydrogeologische, geochemische und geotechnische Charakterisierung von Tongesteinen, im speziellen des Opalinustons. Heute sind 15 Partner aus Europa, Japan, Kanada und den USA am Projekt beteiligt. Seit Januar 2006 betreibt swisstopo das Felslabors Mont Terri und ist verantwortlich für die Umsetzung der von den Partnern beschlossenen Forschungsprogramme.

Die meisten Experimente finden in kurzen Bohrungen zwischen 5 und 15 m Länge statt. Die Bohrtechnik und die Bohrkernentnahme mussten auf eine Tonsteinumgebung angepasst bzw. weiterentwickelt werden. Einfach-, Zweifach- und Dreifachkernrohre mit Durchmessern zwischen 10 und 600 mm kommen dabei zur Anwendung. Dreifachkernrohre liefern die qualitativ besten Bohrkerne, womit auch tektonische Brüche und Klüfte aus der Auflockerungszone präserviert bleiben. Spezielles Augenmerk wurde auf die Weiterentwicklung der

[1] Office fédéral de la topographie swisstopo, Seftigenstrasse 264, 3084 Wabern

[2] Groupe Grands Travaux (GGT), Route de Fontenais 77, 2900 Porrentruy

Überbohrtechnik im Opalinuston gelegt. Aktuell ist es möglich, Überbohrungen bis 20 m abzuteufen und Überkerne bis zu 350 mm Durchmesser zu gewinnen. Bohrungen werden gewöhnlich mit Luft aber auch Stickstoff und Argon gebohrt, um ungewünschtes Tonschwellen und instabile Bohrlöcher zu verhindern beziehungsweise bakterielle Kontamination gering zu halten.
Die Gesamtlänge der exkavierten Strecken im Felslabor Mont Terri beträgt knapp 700 m. Der Ausbruch kleiner Nischen erfolgte mit einem pneumatischen Hammer und die Exkavation der Galerien durch Sprengvortrieb und Teilschnittmaschinen. In der Regel erfolgte täglich ein Vollausbruch mit Abschlagslängen von ca. 1 m, anschliessender Spritzbetonsicherung, Setzen von Ankern und einer Lage Bewehrungsnetzen, letztere um Risse im Spritzbeton zu begrenzen. Der letzte Arbeitsschritt besteht im Einbringen der unbewehrten Betonsohle. Die Erfahrungen beim Ausbruch sind 1] keine Zuhilfenahme von Wasser während des Ausbruchs, 2] Evakuation des sehr feinen Tonstaubs mittels Absaugen an der Stollenfront und 3] Reduktion der Vortriebsleistung durch teilweise Entsättigung des Tonsteins und zugleich deutlicher Erhöhung der uniaxialen Druckfestigkeit.

1. Géologie du laboratoire souterrain du Mont Terri

Le laboratoire souterrain a été excavé entièrement dans la formation dite des «Argiles à Opalinus» ou appelée également marnes aléniennes. Cette dernière a une épaisseur apparente de 160 m au niveau de la galerie de sécurité et une épaisseur réelle de 90 m. Les Argiles à Opalinus peuvent être divisés en cinq sous-unités lithostratigraphiques (Blaesi et al 1991; Schaeren & Norbert 1989; Thury & Bossart 1999; Bossart & Thury 2008), qui sont regroupées en trois faciès principaux: [1] un faciès argileux apparaissant dans la partie inférieure de la formation (argilite à micas avec des intercalations de couches nodulaires de marnes bioturbés ou des bancs sableux de quelques millimètres), [2] un faciès sableux dans la partie moyenne et supérieure de la formation (argilite marneuse alternant avec des niveaux sableux et de calcaires bioturbés ou de lentilles de calcaires gréseux grises et d'horizons de quelques millimètres d'épaisseur de grès blancs contenant de la pyrite) et [3] un faciès sableux riche en carbonates au milieu de la formation (grès riches en carbonates intercalés avec des lits de calcaire bioturbés; ce dernier montrant une forte teneur en quartz détritique). Les trois faciès sont interprétés comme étant le résultat des variations temporelles du milieu de sédimentation dans un bassin peu profond en situation proximale proche du littoral. Le faciès riche en carbonate est davantage développé en Franche-Comté dans le Jura français et en Suisse romande. Par contre, il est presque absent dans les couches d'Argiles à Opalinus du nord-est de la Suisse. Une description plus détaillée des faciès et des milieux de dépôt des Argiles à Opalinus se trouve dans Blaesi (1987), Burkhalter (1996), Burkhalter et al. (1997) et Allia (1996).

Le laboratoire souterrain est situé dans le flanc sud de l'anticlinal du Mont Terri. Ce dernier est le résultat d'un plissement initié au-dessus d'une rampe aveugle appelé aussi «fault-bend fold» dans la littérature scientifique (Suppe 1983). Cette structure s'est superposée sur des failles plus anciennes d'orientations variables. Par conséquent, la géométrie actuelle se caractérise par une forte asymétrie le long de son axe de pli. La région du Mont Terri est affectée par un système de failles normales de direction N à NNO héritées de la zone de transfert reliant les fossés du Rhin et de la Bresse à l'Eo-Oligocène et d'un système de failles de direction ENE attribuées à la fin de l'âge hercynien. Lors de la phase du plissement du Jura à la fin du Miocène, ces failles ont servi de rampes obliques et frontales en fonction de leur orientation primaire par rapport à la direction du transport vers le NNO. La figure 1.1 montre la coupe géologique de l'anticlinal du Mont Terri. Ce profil suit exactement le tracé du tunnel autoroutier du Mont Terri qui est sub-parallèl au vecteur de déplacement vers le NNO lors de la phase de plissement. Le flanc NNO de l'anticlinal du Mont

Terri a été cisaillé et chevauché sur le Jura tabulaire indiquant un cisaillement important. Dans la région de St-Ursanne, il n'y a aucune indication de la présence de duplex dans les Argiles à Opalinus (Laubscher 1963; Suter 1981). Cela signifie que toute la pile sédimentaire a été décollé au niveau des évaporites du Trias en une seule unité et poussée passivement vers le NNO au-dessus du plan de chevauchement, sans décollements internes. Le raccourcissement total accommodé par l'anticlinal du Mont Terri a été estimé à environ 2.1 km sur la base de conservation de masse calculée grâce à une coupe équilibrée (Freivogel & Huggenberger 2003). Le niveau de décollement basal est situé dans les évaporites de la formation du Muschelkalk environ 420 m au-dessous de la limite inférieure de la formation Argiles à Opalinus.

Dans le laboratoire souterrain les failles tectoniques observées peuvent être classées selon trois systèmes de failles différents (Nussbaum et al. 2011): [1] plans de failles ayant un pendage vers le SSE, [2] plans de failles peu pentés ayant un plongement vers le SO et [3] failles de décrochement sénestre fortement inclinés de direction SSO-NNE. La carte structurale du laboratoire propose une compilation des failles les plus importantes cartographiées au niveau du radier des galeries (Fig. 1.2). Les fractures induites par l'excavation des galeries n'ont pas été reportées sur la carte par soucis de lisibilité. Les orientations des trois systèmes de failles et les stries associées sont représentées par des stéréogrammes. Les relevés en galerie montrent clairement que les fractures tectoniques dans le massif sont scellées par des fibres de calcite et d'argiles. Aucune venue d'eau n'est observée aux abords de ces zones de failles. Ceci s'applique également pour la «faille principale», une zone de chevauchement majeur, qui traverse le tunnel de l'autoroute, la galerie de sécurité, la Galerie 98 et Galerie 08 (Fig. 1.2).

La formation tectonique de la chaîne du Jura et de son activité néotectonique a déjà été décrite par de nombreux auteurs (par exemple Giamboni et al 2004; Ustaszewski & Schmid 2006). Durant le Miocène terminal, il y a environ 12 millions d'années le Jura a commencé à se développer (sédiments de la Molasse chevauchés et plissés: Kälin 1993; Bolliger et al. 1993). Le front de déformation atteignit les parties les plus frontales de cette chaîne d'avant-pays il y'a 10.5 millions d'année (Becker 2000). La question de savoir si la déformation de la chaîne est toujours en cours n'est pas évidente. Des études récentes (Ustaszewski & Schmid 2006, 2007; Madritsch et al 2008, 2010) indiquent que la déformation se poursuit à l'heure actuelle, comme en témoigne le plissement à

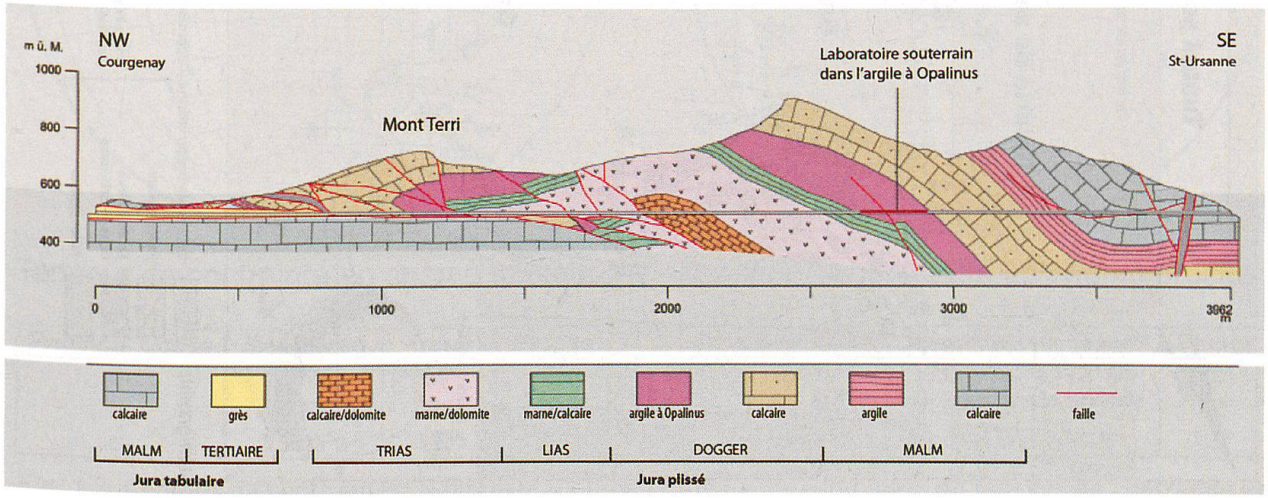


Fig. 1.1: Coupe verticale de l'anticlinal du Mont Terri.

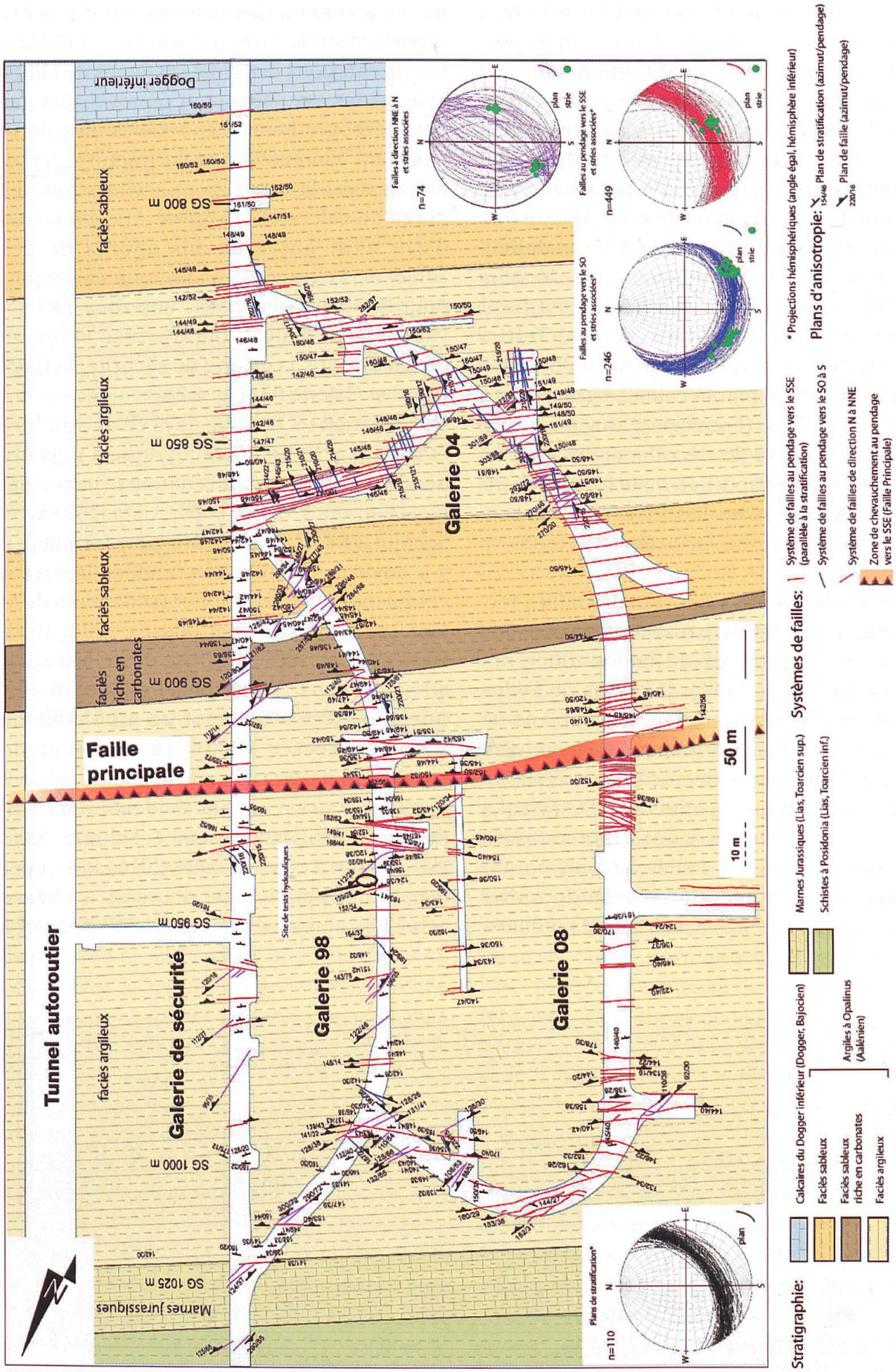
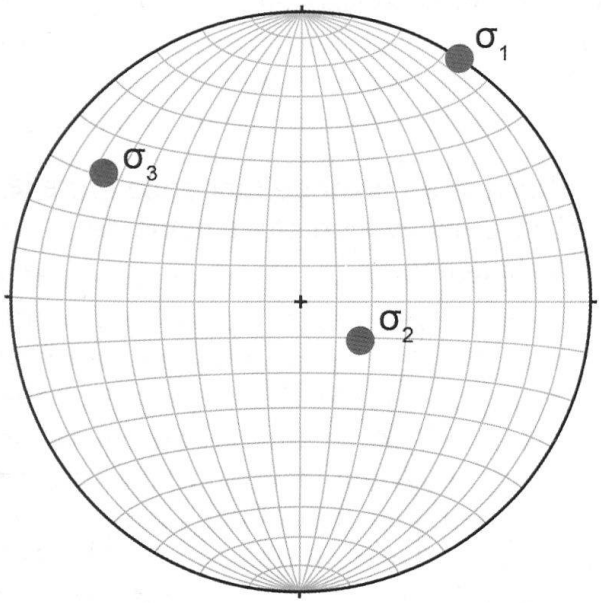


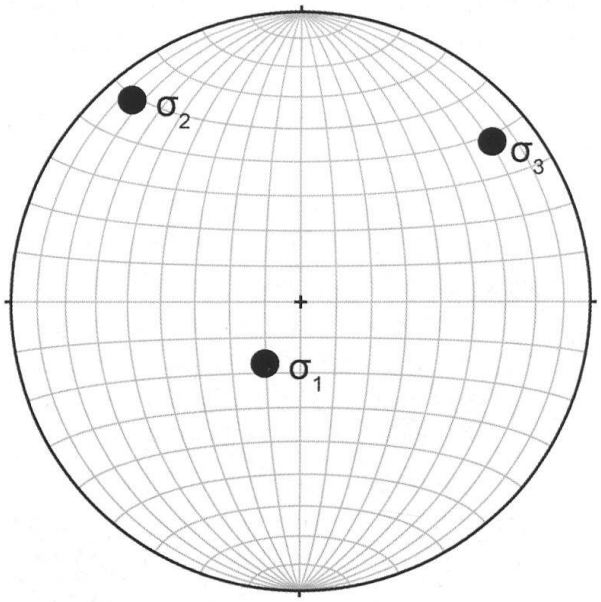
Fig. 1.2: Coupe horizontale (carte géologique) du laboratoire souterrain du Mont Terri.

la fin du Pliocène des anticlinaux en position frontale de Réchésy et de Florimont, proches de Besançon, à la jonction entre le sud du fossé du Rhin supérieur et le front du Jura adjacent. Selon les auteurs mentionnés ci-dessus, ces deux anticlinaux disposés en-échelon sont associés à la réactivation de failles de socle décrochantes d'orientation NNE-SSO et OSO-ENE. L'activité néotectonique est, dans une large mesure, confirmée par la récurrence de séismes profonds dans le socle cristallin. La majeure partie des mécanismes aux foyers des tremblements de terre récents indiquent un régime de décrochement avec une légère tendance à l'extension (Kastrup et al. 2004). Cependant récemment, le tremblement de terre de Rigney (23 Février 2004) a indiqué un mouvement en faille inverse (compression) dans le socle à une profondeur de 10 km et une magnitude de moment Mw = 4.5. Ce tremblement de terre a probablement eu lieu le long d'une ancienne faille orientée OSO-ENE en bordure d'un fossé permo-carbonifère. Ces données suggèrent que l'activité sismique n'a pas complètement cessé, et que la déformation continue à un rythme modéré. Récemment, l'orientation actuelle de la contrainte principale horizontale maximale (σH_{max}) a été mesurée dans deux forages profonds (à 5 km de profondeur) dédiés à la géothermie, pénétrant le socle granitique sous la ville de Bâle (Valley & Evans 2009). L'analyse des breakouts dans les forages suggère que l'orientation de σH_{max} au-dessus des évaporites est orientée en moyenne le long d'un axe N-S et diffère de l'orientation NO-SE mesurée dans le socle et confirmée par les mécanismes au foyer des tremblement de terre. Ces données sont en accord avec les travaux de Ustaszewski & Schmid (2007), qui observent aussi un découplage des contraintes au niveau des évaporites entre le socle cristallin et la pile sédimentaire.



Tenseur de contrainte en champ lointain

Principal Stress	Magnitude	Trend	Plunge
σ_1	8.6 MPa	33°	0°
σ_2	6.7 MPa	123°	70°
σ_3	3.9 MPa	303°	20°



Tenseur de contrainte en champ proche

Principal Stress	Magnitude	Trend	Plunge
σ_1	6.5 MPa	210°	70°
σ_2	4.0 MPa	320°	10°
σ_3	0.6 MPa	50°	15°

Fig. 1.3: Champs de contraintes. Représentation de la meilleure estimation du tenseur de contrainte en champ lointain [A] et en champ proche dans la zone d'influence des galeries [B].

Des campagnes de mesure (fracturation hydraulique, surcarottage, analyses des breakouts de forages) visant à mesurer l'état de contrainte in situ actuel dans les argiles à Opalinus et dans les formations plus compétentes de l'anticlinal du Mont Terri indiquent que la contrainte principale (σ_1) est horizontale et orientée vers le N à NNE. Il s'agit de l'effet des forces tectonique agissant à l'échelle de la plaque européenne se déplaçant vers le nord sous l'effet de la poussée de la plaque africaine. La contrainte intermédiaire σ_2 est subverticale et sa magnitude correspond au poids de la pile sédimentaire (Fig. 1.3[A]). Ces valeurs sont en accord avec les contraintes régionales du nord de la Suisse. Par contre la détermination des contraintes dans des forages courts (moins de 15 m) indiquent un tenseur différent, dominé par la charge gravitaire (σ_1 est subvertical) en raison de la réduction significative des contraintes tectoniques horizontales suite au creusement des galeries (Fig. 1.3[B]). Par conséquent, l'état de contrainte en champ proche est contrôlé par l'excavation et la zone d'influence des galeries doit être prise en compte pour le dimensionnement des ouvrages. Si les structures observées autour des galeries sont fortement contrôlées par la redistribution des contraintes, il ne faut pas négliger aussi l'influence de l'anisotropie, et en particulier le rôle des plans de stratification très bien développé. La figure 1.4 montre que les breakouts se localisent au point de tangence entre le profil d'excavation et les plans de stratification. Ces derniers, par effet de flambage, tendent à se rompre et glissent vers la galerie au point de tangence. Le résultat est le développement de hors profils asymétriques. La présence de failles à pendage SSE, parallèles aux plans de stratification renforce le degré d'anisotropie.

La résistance à la compression de l'argile à Opalinus dépend fortement de la teneur en eau dans la roche (Fig. 1.5). Lorsque la roche s'assèche, ce qui est le cas lors des travaux d'excavation en raison de la ventilation, la résistance des argiles augmente, diminuant les rendements d'excavation. La figure 1.5 montre la décroissance de la résistance en fonction de l'augmentation du taux de saturation dans les argiles. Les paramètres clés sont résumés dans la table 1.

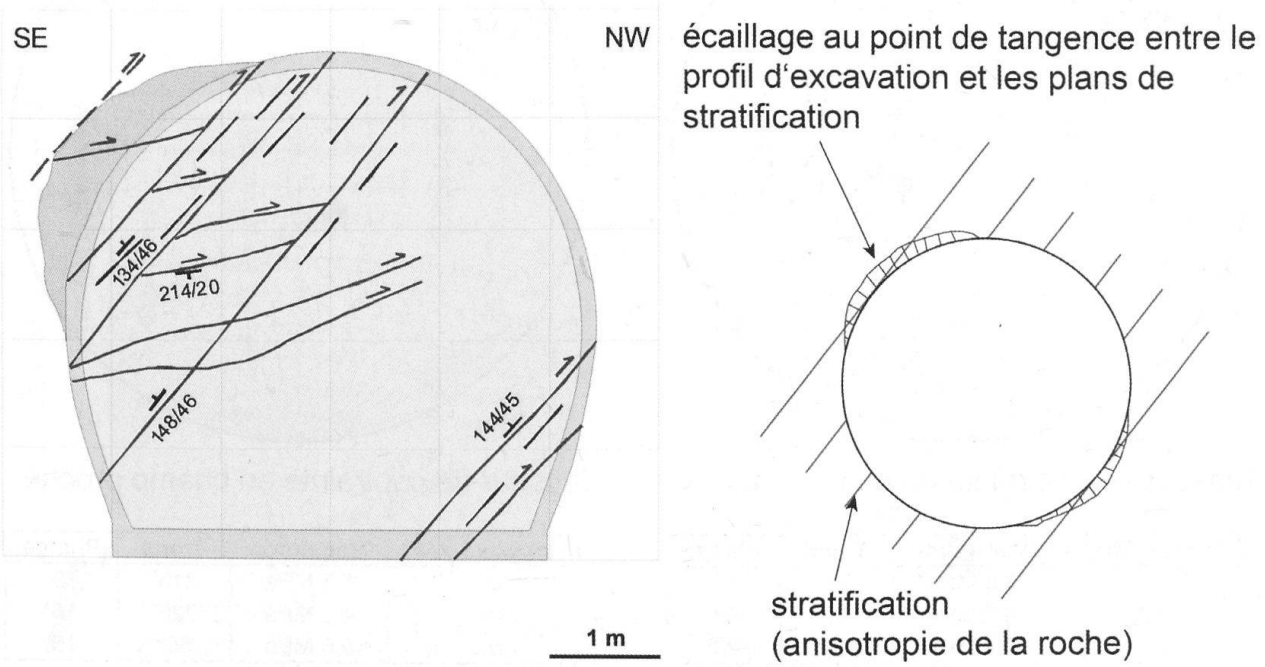


Fig. 1.4: Rôle de l'anisotropie, matérialisée par les plans de stratification, sur le développement de hors profils.

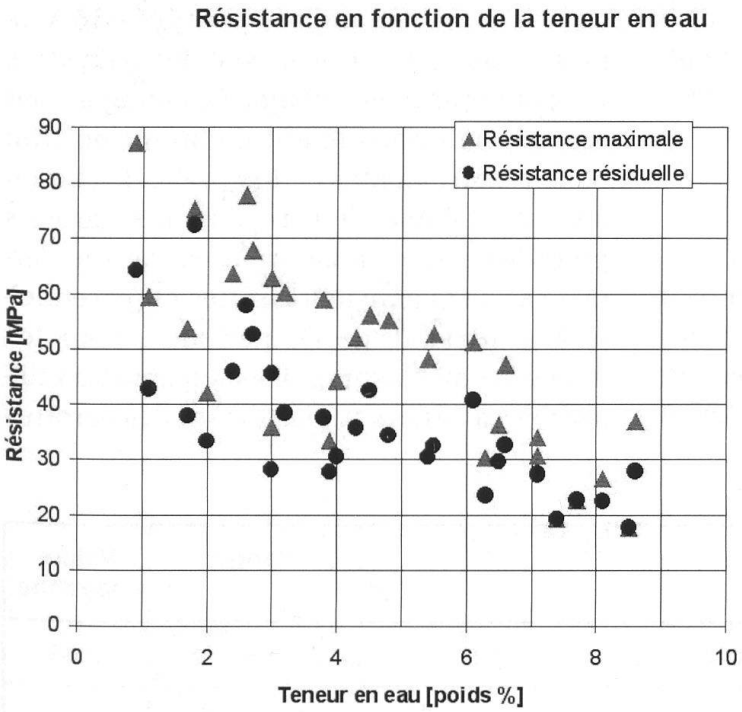


Fig. 1.5: Résistance maximale et résistance résiduelle en fonction de la teneur en eau. Les valeurs sont issues de tests triaxiaux avec une pression de confinement de 10 MPa et des taux de déformation de 1E-6 m/s. Au total 30 échantillons ont été testés avec différentes orientations par rapport à la stratification. La teneur moyenne en eau de l'argile à Opalinus est de 6.6% (masse).

2. Evolution du laboratoire souterrain 1996–2012

La figure 2.1 montre l'évolution du laboratoire souterrain du Mont Terri. La construction et l'extension du laboratoire se font faites en quatre phases principales. La première phase a été effectuée entre 1996 et 1998, avec la construction de huit petites niches dans la Galerie de Reconnaissance, puis l'excavation de la première galerie de recherche, la Galerie 98. Ceci était devenu nécessaire car le tunnel autoroutier a été ouvert à la circulation entre-temps, et la Galerie de Reconnaissance était désormais utilisée comme Galerie de Sécurité. La deuxième phase d'élargissement s'est faite en 2003 et en 2004, avec la construction de nouvelles grandes niches et une extension du laboratoire vers le sud, la Galerie 04. La troisième phase a été effectuée entre 2007 et 2008, aboutissant à la construction de la Galerie 08, qui relie les Galeries 98 et 04. Finalement, lors de la quatrième phase, la niche FE-A a été excavée en 2011 et la Galerie FE est percée en 2012.
Ces extensions furent nécessaires afin de créer assez d'espace dans le laboratoire souterrain du Mont Terri et de garantir ainsi à long terme les meilleures conditions possibles pour la recherche coopérative entre les partenaires du projet.

3. Techniques de forages

Le projet Mont Terri n'est pas seulement un projet de recherche scientifique sur l'étude des propriétés de l'argile, il sert également de plate-forme technologique pour le développement de nouvelles techniques de forage. En effet les propriétés de gonflement des argiles exigent de renoncer à l'utilisation de l'eau comme fluide de forage et requièrent une adaptation des techniques traditionnelles de forage. Au cours des 15 dernières années, les partenaires du projet ont placé leur confiance dans l'entreprise de forage française COREIS-COFOR qui a su développer son savoir-faire en matière de forage dans des roches argileuses (Fig. 3.1). Plus récemment, cette possibilité a été également offerte à l'entreprise allemande Schützeichel KG afin d'élargir l'offre. Certains partenaires du projet comme les

organisations allemandes BGR et GRS, ont eux aussi développé leurs propres équipements de forage pour les argiles et leur savoir-faire.

3.1 Méthodes de forage

La plupart des expériences ont lieu dans des forages d'une longueur de 5 à 15 m. La technique de forage et le prélèvement de carottes doivent être adaptés à l'environnement argileux et être perfectionnés en conséquence. Les carottiers utilisés peuvent être simples, doubles ou triples avec des diamètres variant entre 20 et 600 mm. Les forages sont réalisés soit dans le but d'obtenir un trou pour y instrumenter un intervalle de test ou alors dans l'objectif de récolter des carottes pour des essais en laboratoire. Dans le dernier cas, la qualité des carottes est essentielle à la réussite de l'expérience. Pour les essais géomécaniques, il est commun d'utiliser des carottiers triples livrant des carottes

Paramètres	Range	Valeur moyenne
Densité apparente en condition saturée [g/cm^3]	2.40 – 2.53	2.45
Teneur en eau [masse %]	5.0 – 8.9	6.6
Porosité sèche à 105°C [vol%]	12.6 – 21.1	16.2
Porosité physique totale [vol%]	14.0 – 24.7	18.3
Conductivité hydraulique [m/s]	2E-14 – 1E-12	2E-13
Conductivité thermique [W/mK] Conductivité thermique parallèle aux strates [W/mK] Conductivité thermique perpendiculaire aux strates [W/mK]	1.0 – 3.1 - -	1.7 2.1 1.2
Capacité thermique [J/KgK]	-	860
Teneur en solides dissous dans l'eau interstitielle [g/l]	5 – 20	-
Module élastique E de Young perpendiculaire aux strates [MPa] Module élastique E de Young parallèle aux strates [MPa]	2100 – 3500 6300 – 8100	2800 7200
Coefficient de poisson perpendiculaire aux strates [-] Coefficient de poisson parallèle aux strates [-]	0.28 – 0.38 0.16 – 0.32	0.33 0.24
Module de cisaillement G [MPa]	800 – 1600	1200
Résistance à la compression uniaxiale perpendiculaire aux strates [MPa] Résistance à la compression uniaxiale parallèle aux strates [MPa]	23.1 – 28.1 4.0 – 17.0	25.6 10.5
Résistance à la traction uniaxiale perpendiculaire aux strates [MPa] Résistance à la traction uniaxiale uniaxiale parallèle aux strates [MPa]	- -	1 2
Cohésion [MPa]	2.2 – 5	3.6
Angle de frottement interne [°]	23 – 25	24

Tab. 1: Paramètres importants des argiles à Opalinus.

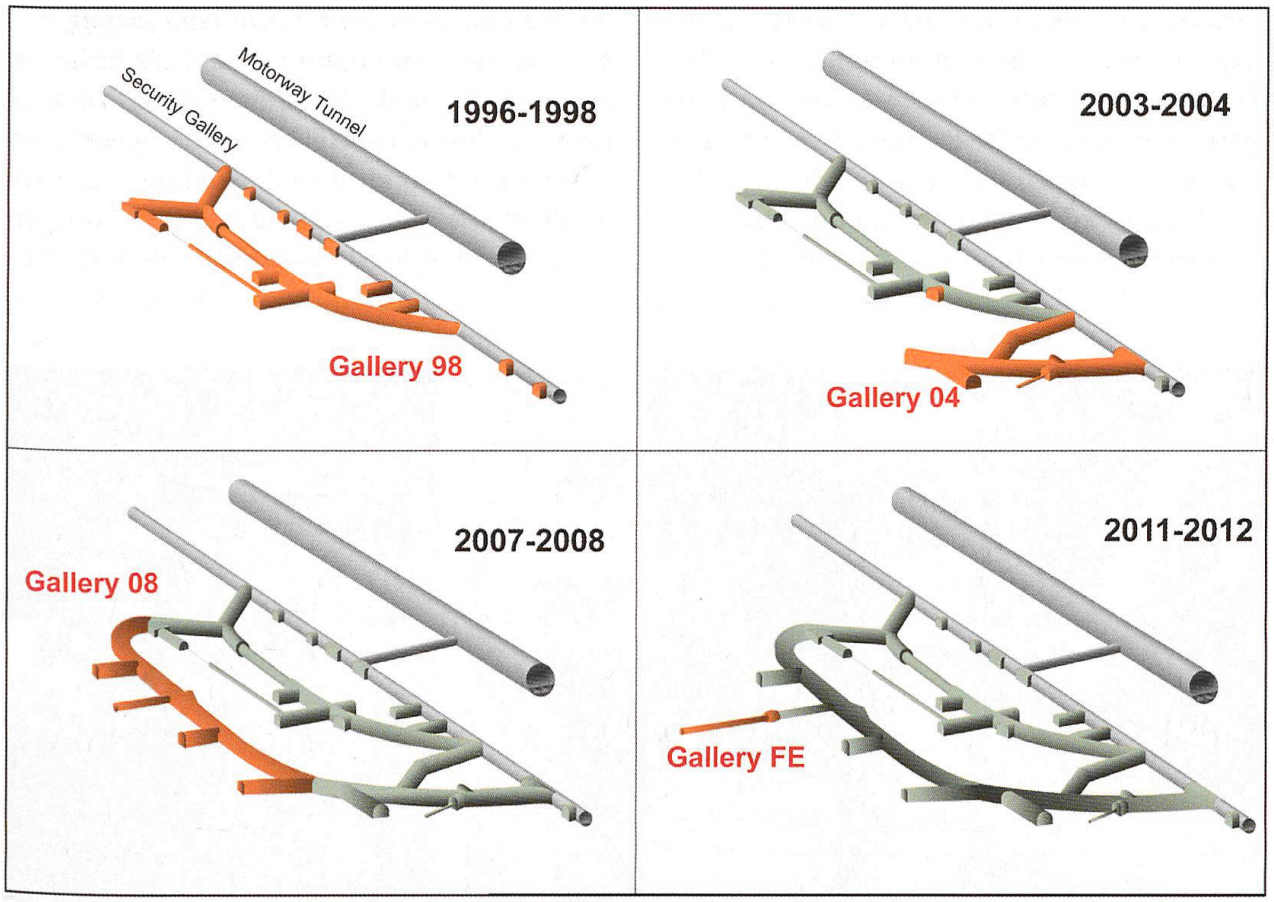


Fig. 2.1: Évolution du laboratoire souterrain du Mont Terri entre 1996 et 2012.

de grande qualité grâce à la mise sous gaine des carottes les préservant d'une désaturation qui fausserait les mesures en augmentant la résistance mécanique de la roche. Pour les expériences se déroulant dans un trou de forage, comme par exemple les expériences de géochimie ou de diffusion, la finalité réside dans l'échantillonnage du volume de roche autour ou au voisinage proche de l'intervalle de test afin de mesurer les effets de la diffusion dans la roche elle-même. Pour ce faire, un surcarottage est indispensable afin de prélever des carottes exploitées pour des analyses post-mortem en laboratoire, comme par exemple la mesure de concentration des radionucléides. Ainsi très logiquement une attention particulière a été portée sur le perfectionnement de la technique de surcarottage dans les argiles à Opalinus. La réalisation de plusieurs générations d'expériences de diffusion a conduit au développement d'une technique de surcarottage adaptée qui permet de retirer des carottes de grands diamètres présentant une excellente qualité de préservation. Actuellement, il est possible de surcarotter jusqu'à 20 m de profondeur et prélever des carottes pouvant atteindre jusqu'à 350 mm de diamètre. Les forages sont habituellement réalisés à l'air afin d'éviter les effets non désirés comme le gonflement des argiles ou l'instabilité des parois du forage. Ils peuvent également être forés à l'azote ou à l'argon pour limiter l'apport d'oxygène et maintenir la contamination bactérienne à un niveau faible. Cette technique de surcarottage a été développée et améliorée au cours des 15 dernières années grâce à une collaboration fructueuse entre les partenaires du projet Mont Terri, l'entreprise de forage COREIS-COFOR et la société suisse Solexperts en charge de l'instrumentation des forages. Dans un premier temps, des tubes carottiers simples à petit diamètre ont été

utilises (par exemple lors du forage et des expériences de diffusion préliminaires). Des équipements améliorés avec un diamètre plus large ont ensuite été mis en oeuvre avec succès. Il s'agit d'un carottier double avec un diamètre de forage de 350 mm permettant de prélever une carotte d'un diamètre de 292 mm. Le surcarottage peut être divisé en 8 séquences comme le montre la figure 3.2. L'intervalle de test se trouve en général à une profondeur de 6 à 8 m de la galerie, en fonction des conditions géologiques. La profondeur finale du surcarottage doit au minimum excéder de 80 cm la profondeur de l'in-

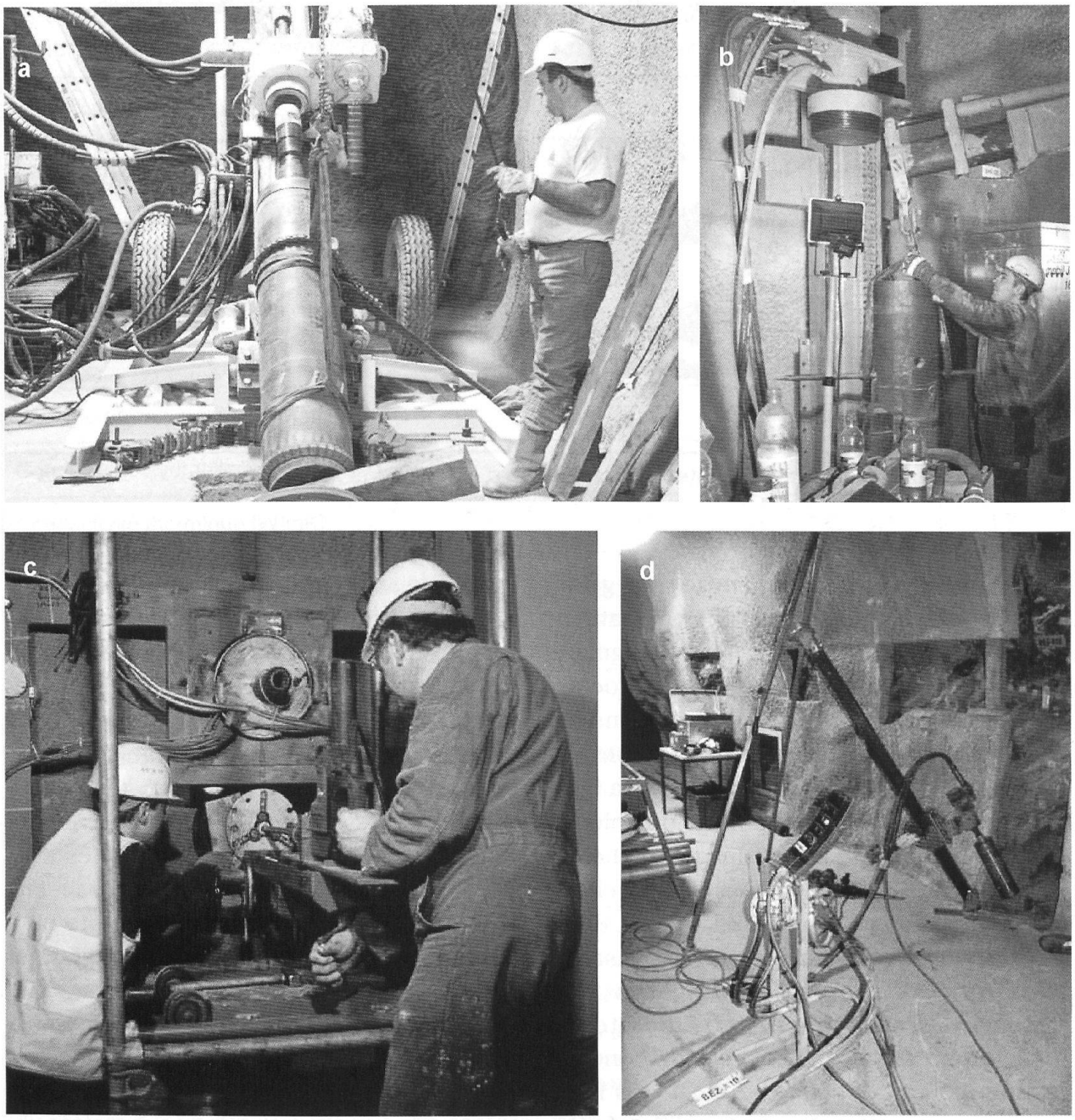


Fig. 3.1: Le projet Mont Terri permet aux partenaires de projet et à des entreprises de forage de développer leurs équipements de forage. a] l'entreprise de forage française COREIS-COFOR lors d'un surcarottage incliné à large diamètre; b] avec un carottier triple, l'entreprise de forage allemande Schützeichel a surcarotté l'intervalle de test d'une expérience géochimique; c] GRS a développé une machine de forage pour trous de petits diamètres (diamètre < 20 mm) dans lesquels/laquelle des mini-piézomètres sont installés pour mesurer la pression interstitielle et d] BGR a également développé ses propres équipements de forage pour obtenir des carottes de haute qualité pour des tests mécaniques en laboratoire.

tervalle de test afin de faciliter son extraction intacte. Le surcarottage proprement dit se fait en une seule étape. Pour des raisons d'exiguïté dans les galeries, il n'est pas possible de retirer la carotte en une seule opération. Le tube intérieur du carottier double est remonté au préalable, et ensuite la carotte est sciée par sections de deux mètres. Pour une expérience de géochimie visant à caractériser la composition des eaux porales contenues dans l'argile à Opalinus, le suracottage a été réalisé pour la première fois avec un carottier triple. En effet afin d'éviter tout contact avec l'air (milieu oxydant qui perturberait les mesures de l'expérience), la roche de l'intervalle de test a été protégée par un tube acrylique (3ème tube au centre du carottier) lui-même enveloppé dans le tube d'acier intérieur d'un traditionnel carottier double. Cette opération a été effectuée par Schützeichel en utilisant les équipements de forages de la Nagra, conçus pour les granits du laboratoire souterrain du Grimsel.

3.2 Fluides de forages

Les forages dans les roches argileuses sont habituellement réalisés à l'air. Le recours à l'eau est à éviter à cause de la capacité de gonflement des minéraux argileux. Cependant, les conditions spéciales de certaines expériences ont conduit à l'usage d'autres fluides tels que l'huile ou l'azote. De l'huile a été utilisée dans l'expérience RA (Rock Mechanics Analysis). Dans le cadre de cette expérience, des tests géomécaniques conduits sur des échantillons d'argiles à Opalinus ont été utilisés pour déterminer des lois constitutives pour la prédiction du comportement mécanique et hydromécanique de la roche. Les échantillons obtenus par des forages à l'air présentent une désaturation considérable. Des tests mécaniques sur de tels échantillons, surtout s'ils sont désaturés, peuvent être considérablement biaisés, ce qui conduirait à une fausse calibration des modèles. Afin de pouvoir quantifier le biais possible dans les données existantes, l'objectif était de comparer les données mécaniques de forages à l'air avec les données obtenues en utilisant un fluide de forage à base d'huile. Les expériences en rapport avec l'activité microbienne dans les argiles nécessitent l'absence de toute contamination causée par le forage, afin de s'assurer que les micro-organismes trouvés dans l'argile sont autochtones et n'ont pas été introduites par les activités de forage. Cependant il est avéré qu'il n'est pas possible de forer en conditions totalement stériles et un apport de bactéries d'origine anthropogénique est inévitable. L'usage d'azote requiert des précautions spéciales en matière de sûreté et la préparation d'un avant-projet décrivant les opérations prévues et les mesures de sûreté. Un système de ventilation doit être mis en place afin d'assurer une ventilation suffisante lors d'un carottage à l'azote. Des équipements de sécurité spécifiques sont nécessaires pour l'équipe de forage pendant les travaux et les équipements de forage doivent être stérilisés.

3.3 Diagraphies

La réalisation de diagraphies en forage permet d'obtenir des informations très précieuses sur les fractures qui recoupent les parois des forages. Cette méthode permet d'identifier les fractures induites par le creusement des galeries pour les premiers mètres du forage ou les fractures induites lors d'essais de fracturation hydraulique. Par ailleurs, les discontinuités naturelles de massif rocheux telles que les failles tectoniques peuvent être mise en évidence. Les diagraphies renseignent également sur les propriétés pétrophysiques de la roche qui dépendent directement de la composition minéralogique, géochimique, de l'état de cimentation, de la porosité et de la teneur en eau de la roche. Il est commun de combiner plusieurs programmes de diagraphies pour caractériser la roche car chaque diagraphie couvre un domaine différent de la caractérisation de l'argile. Le forage peut être ausculté par une combinaison de

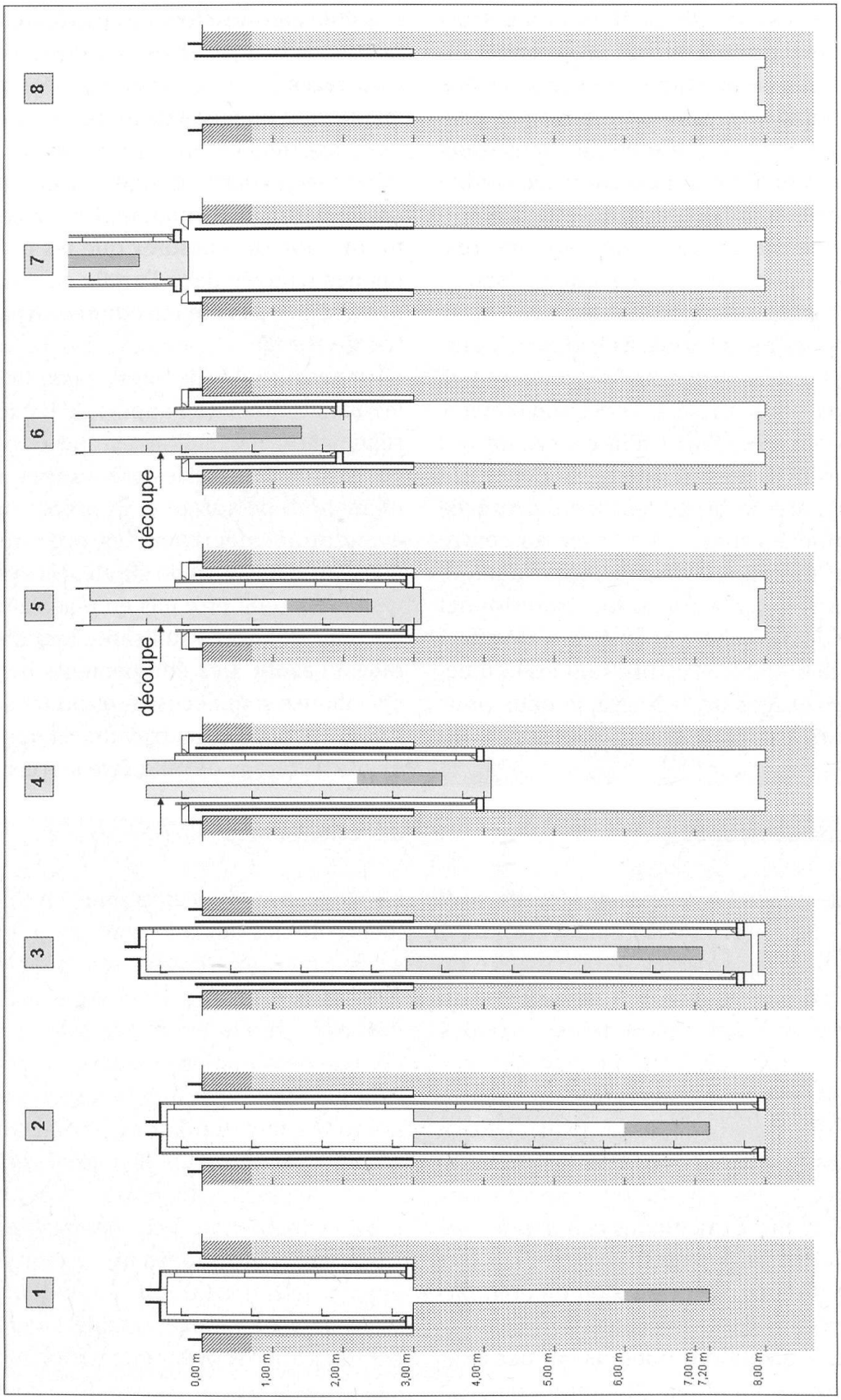


Fig. 3.2: Surcarottage décomposé en 8 séquences (dessin de COREIS-COFOR). Séquence 1] Réalisation d'un forage guide de 3 m et d'un forage d'injection de 4.20 m de long, intervalle de test en bleu foncé; 2] Surcarottage du forage d'injection; 3] Séparation du surcarottage à sa base; 4] Remontée du surcarottage contenant l'intervalle de test; 5] et 6] la longueur du surcarottage est réduite au moyen de deux coupes afin de faciliter l'extraction de la carotte dans la galerie; 7] Retrait du reste du surcarottage contenant l'intervalle de test; 8] Trou de surcarottage vide.

diagraphies mesurant la conductivité électrique et résistivité, les vitesses acoustiques et la radioactivité naturelle.

Les diagraphies basées sur le rayonnement gamma (γ) de la radioactivité naturelle (appelé «gamma ray log») présente dans la roche permettent par exemple d'identifier des alternances minéralogiques liées à des cycles sédimentaires lors du dépôt de l'argile ainsi que des contrastes sur le contenu en quartz ou en calcite. La diagraphie illustrée sur la figure 3.3 montre une corrélation systématique en la présence de lentilles sableuses (sandy layers) et la décroissance de la radioactivité naturelle. La radioactivité naturelle des argiles provient de la désintégration des isotopes d'uranium U-238 en plomb Pb-206, de thorium Th-232 en plomb Pb-208 et du potassium K-40 en calcium Ca-40. Une roche riche en minéraux argileux présentera une radioactivité naturelle plus importante en raison des produits instables de la désintégration de l'uranium, du thorium et du potassium. La radioactivité est mesurée sur les parois du forage à l'aide d'une sonde gamma-ray, L'intensité du rayonnement gamma permet de distinguer les sections plus riches en minéraux argileux des lentilles gréseuses ou carbonatées.

Les diagraphies acoustiques permettent de mettre en évidence les fractures recoupant les parois du forage. En effet la vitesse de propagation des ondes acoustiques est fonction des propriétés physiques du milieu traversé. La présence de fractures se marquera par une chute de la vitesse des ondes de compression P en raison de la présence d'air dans les zones fracturées. Le degré de cimentation des argiles ainsi que les tailles des particules influencent également les vitesses de propagation des ondes de compression P et de cisaillement S. Une argile mal cimentée et présentant de très fines particules sera caractérisée par des vitesses plus faibles qu'une roche bien cimentée et présentant des grains plus grossiers comme par exemple du quartz ou de la calcite. Les diagraphies acoustiques appelés aussi «sonic-logs» renseignent également sur la perméabilité, la porosité et les propriétés géomécaniques de la roche.

Le réseau de fractures peut également être imagé par des diagraphies utilisant un scanner optique appelé «televiewer-log» pivotant selon l'axe du forage selon un angle de 360° afin de couvrir l'intégralité des parois.

Finalement, la mesure de la résistivité électrique en Ωm permet de remonter à la teneur en eau de la roche. La conductivité élec-

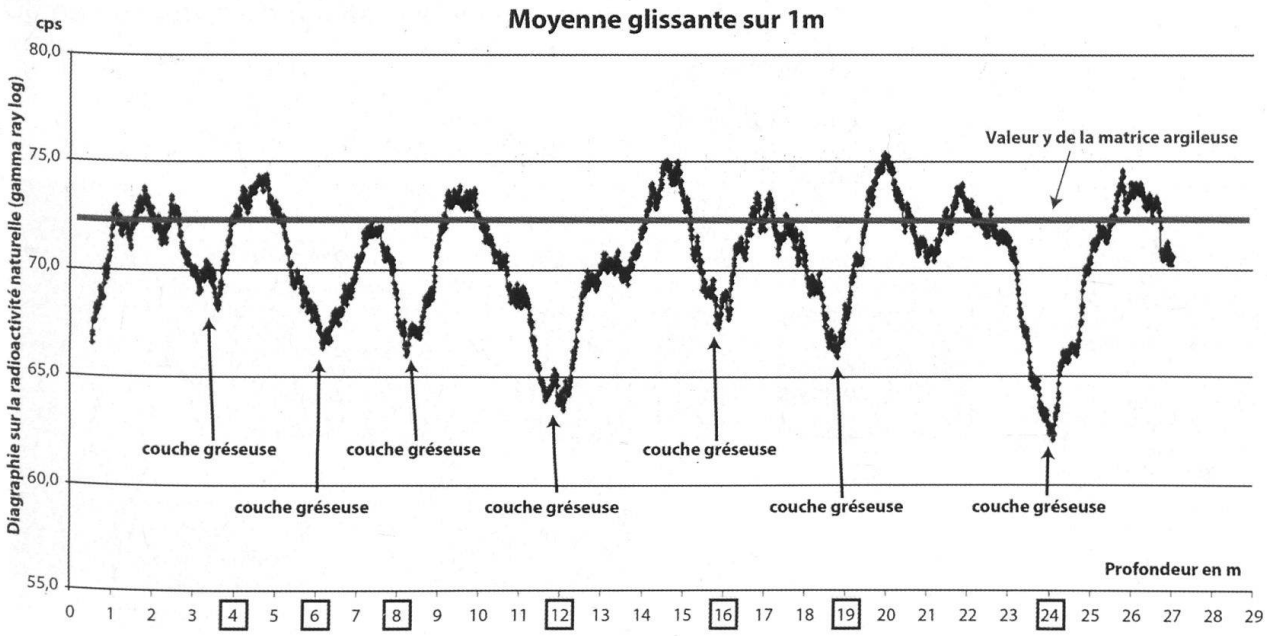


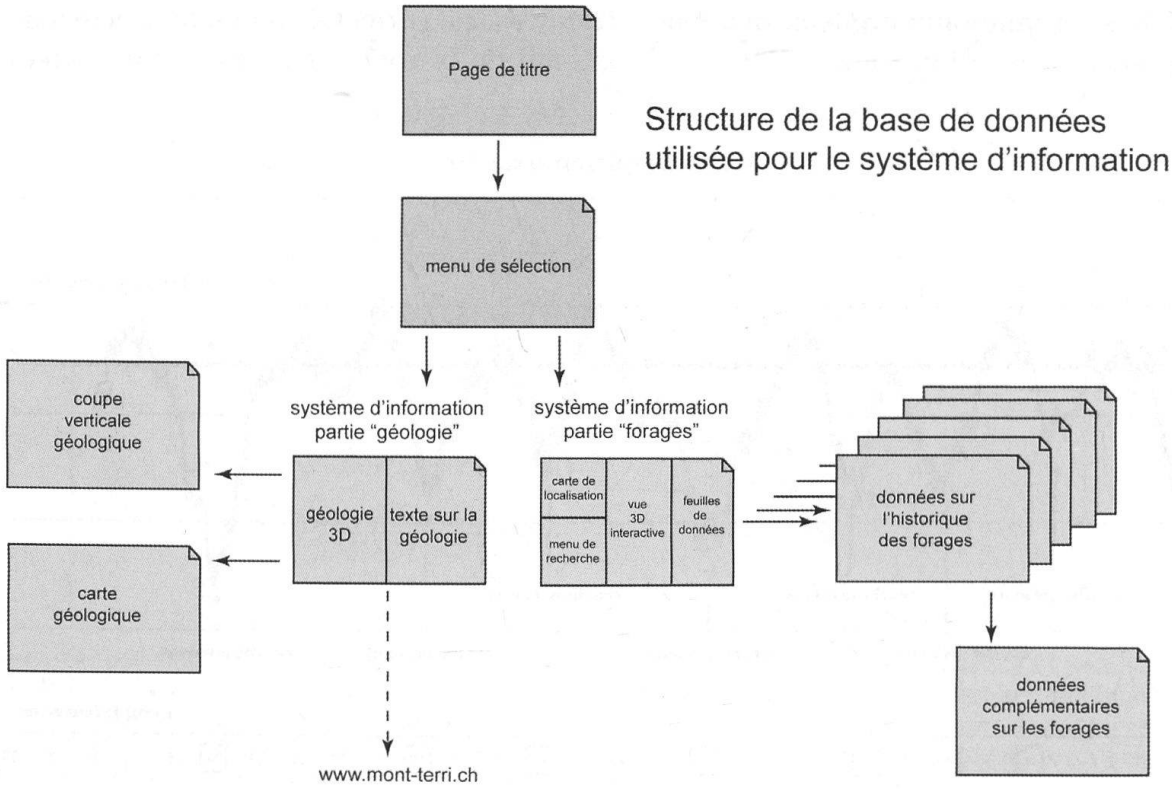
Fig. 3.3: Exemple de diagraphie gamma-ray.

trique renseigne quant à elle sur le degré de salinité des eaux porales.

3.4 Base de données

En 15 ans de recherche, ce ne sont pas moins de 800 forages qui ont été percés dans le laboratoire souterrain Mont Terri. La géométrie spatiale du système de galeries ainsi que les données et l'historique des forages ont été compilés dans différentes bases de données. Pour ces raisons, il était nécessaire d'homogénéiser ce large jeu de données et de relier toutes les informations disponibles sur les forages dans un système centralisé. Un système d'information en 3D facile à utiliser a été développé pour le compte du service géologique national en tant que contribution au projet Mont Terri. L'Institut Suisse de Spéléologie et Karstologie (ISSKA) a été mandaté pour concevoir ce système d'information. La figure 3.4 montre la structure de la base de données utilisée pour le système d'information en 3D. Ce système comprend la géométrie du laboratoire souterrain, les caractéristiques des forages existants et les principaux éléments géologiques, tels que les différentes formations, les faciès dans les argiles à Opalinus et les structures géologiques principales. Les résultats des travaux effectués à ce jour montrent que ce système constitue un outil utile tant pour la planification de nouveaux forages que pour la recherche de forages existants.

La reproduction des galeries est basée sur la numérisation de sections verticales espacées dans un premier temps d'un mètre, puis de 20 centimètres pour les derniers relevés. Tous les forages ont été intégrés au système. Le modèle en 3D a été construit avec le logiciel «Cinema 4D». Le système d'information Mont Terri est basé sur la technologie Internet et a été conçu pour être utilisé avec Internet Explorer. Cependant, la version standard d'Explorer n'étant pas capable de gérer des vues en 3D, il est nécessaire d'ajouter Blaxxun Contact 3D viewer, qui permet de visualiser des objets en 3D (langage VRML) directement dans Explorer. Différents aspects des galeries obtenus par ce logiciel sont repré-



Structure de la base de données utilisée pour le système d'information en 3D

Fig. 3.4: Structure de la base de données utilisée pour le système d'information en 3D.

sentés dans la figure 3.5. L'utilisateur peut choisir parmi différents modes de navigation en 3D. Un plan de situation permet de voir l'emplacement dans le laboratoire souterrain à tout moment. Avec un clic sur le forage désiré, toutes les informations sur ce forage telles que l'historique, les données de forage, le plan des carottes et la documentation photo sont rendues accessibles et peuvent être imprimées ou sauvegardées. Différentes fonctions de recherches permettent de retrouver rapidement un forage en sélectionnant les expériences (ordre alphabétique), la phase de projet ou l'emplacement (niches ou galeries).

4. Techniques d'excavations

L'évolution du laboratoire souterrain du Mont Terri s'est fait par étape et se poursuit encore aujourd'hui. Chaque nouveau secteur réalisé repose sur l'exécution d'une galerie principale d'accès desservant des niches latérales réservées aux expériences. Les galeries principales doivent permettre un accès facilité aux niches, à l'aide de véhicules et d'engins, mais également constituer des voies de fuite confortables et efficaces en cas d'événements ou d'accidents. La géométrie et les dimensions des niches sont adaptées aux expériences pour lesquelles elles sont conçues.

La réalisation d'un secteur débute en principe par l'exécution complète de la galerie principale, excavation et soutènement. C'est après cette phase qu'intervient la réalisation des niches latérales, lorsque l'accès est facilité et la sécurité assurée.

4.1 Etude et planifications

Chaque nouvelle extension du laboratoire fait tout d'abord l'objet d'un projet intégrant les différentes exigences en matière de sécurité et d'exploitation, mais également les

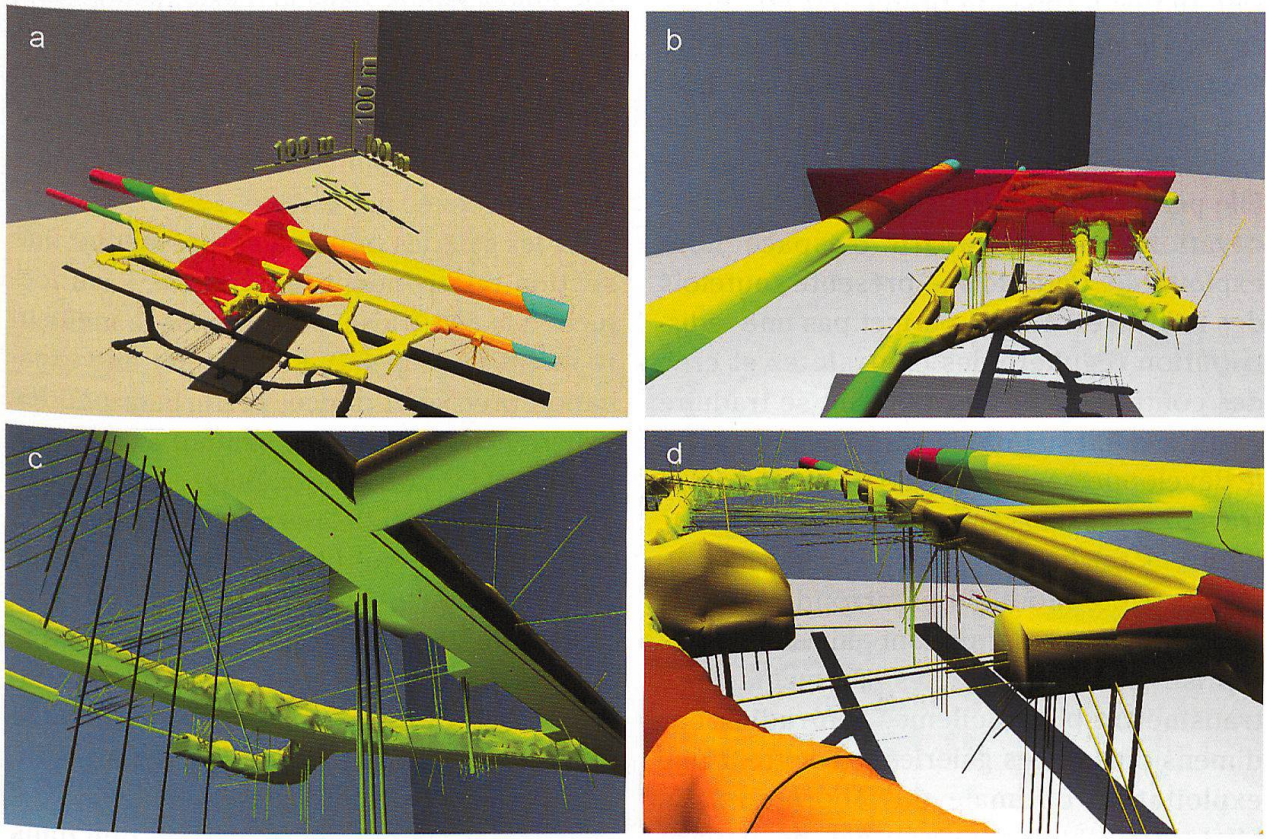


Fig. 3.5: Vue du laboratoire souterrain dans le système d'information en 3D. a] Vue d'ensemble; b] Vue en direction de la faille principale; c] Vue en dessous des galeries, les lignes droites représentent les forages et d] Les couleurs correspondent aux différentes formations ou faciès.

contraintes imposées par les expériences planifiées. Accompagné d'un devis et d'une planification des travaux, il est soumis aux instances compétentes pour approbation.

Dans un deuxième temps se déroule la phase d'appel d'offres. La plupart des extensions ont été adjugées à des entreprises spécialisées dans les travaux souterrains, sur la base d'une procédure sur invitation, soumise à la loi sur les marchés publics. Les offres des entreprises sont évaluées sur la base du prix et de critères techniques tels que l'expérience, les ressources engagées ou les méthodes proposées. La pondération des différents critères est définie préalablement et connue des soumissionnaires.
Les travaux débutent quelques semaines après l'adjudication. De manière générale, on peut compter une durée d'une année pour les phases de projet et d'appel d'offres.

4.2 Types de profiles

Différentes formes de profils ont été mises en œuvre dans la réalisation du laboratoire souterrain (Fig. 4.1). Pour les premières galeries, telle la Galerie 98, la forme en «fer à cheval» à parements verticaux a été privilégiée. Elle permettait d'optimaliser la section d'excavation avec le gabarit d'espace libre exploitable. Cette forme présente toutefois des faiblesses. Elle ne permet pas une redistribution régulière des contraintes et crée des contraintes locales pouvant se traduire par une déformation du soutènement, voire le développement de dégâts nécessitant des travaux d'assainissement réguliers.
Pour ces raisons, la forme des galeries suivantes a été modifiée en arrondissant les parements et en permettant ainsi aux forces reprises par la voûte et les parements de se transmettre plus facilement en radier. Les dimensions de ces galeries permettent une exploitation optimale du laboratoire. En effet, les sections présentent un gabarit minimal exploitable de 2.50 m de largeur pour 4.00 m de hauteur. Cette configuration permet le passage de véhicules utilitaires voire de petits camions, ainsi que la pose des équipements d'infrastructure (éclairage, chemins de câbles, etc.).
Le laboratoire souterrain présente également des galeries de forme circulaire, comme le tronçon central de la Galerie 98, la niche MB, ou les micro-tunnels. Cette forme est principalement due à la méthode d'avancement ou à l'expérience mise en œuvre. Elle est plus difficile à réaliser, mais est très favorable du point de vue de la stabilité.

4.3 Méthodes d'avancement

Plusieurs méthodes d'avancement ont été utilisées dans le cadre de la construction du laboratoire souterrain (Burrus et al. 2010). Le minage a été pratiqué lors de l'excavation des premières galeries. Il permet un avancement rapide, nécessitant peu de moyens. Toutefois la précision du profil peut varier en fonction de l'hétérogénéité du massif. Les imperfections de la forme du profil constituent alors des points faibles dans le développement du flux des contraintes et peuvent créer localement des poussées au vide. Pour cette raison et afin de ne pas perturber le déroulement des expériences en cours, cette méthode a été abandonnée par la suite.
Pour les galeries principales, présentant une section relativement importante, l'avancement à la tête fraiseuse constitue la meilleure méthode (Fig. 4.2). Elle permet une excavation précise et douce, perturbant peu les expériences en cours et limitant le développement de la zone endommagée par le creusement (EDZ). Elle permet également de réduire les hors-profils et ainsi de bénéficier d'une section plus propre, favorable à la réalisation des expériences. La vitesse d'avancement dépend de la géologie rencontrée et de des caractéristiques géomécaniques de la roche. Dans le faciès argileux des argiles à Opalinus, des vitesses de 1 à 2 m/jour ont été enregistrée, alors que dans les faciès sableux et calcaires, des vitesses de 0.5 à 1.5 m/jour ont été relevées (Fig. 4.3).

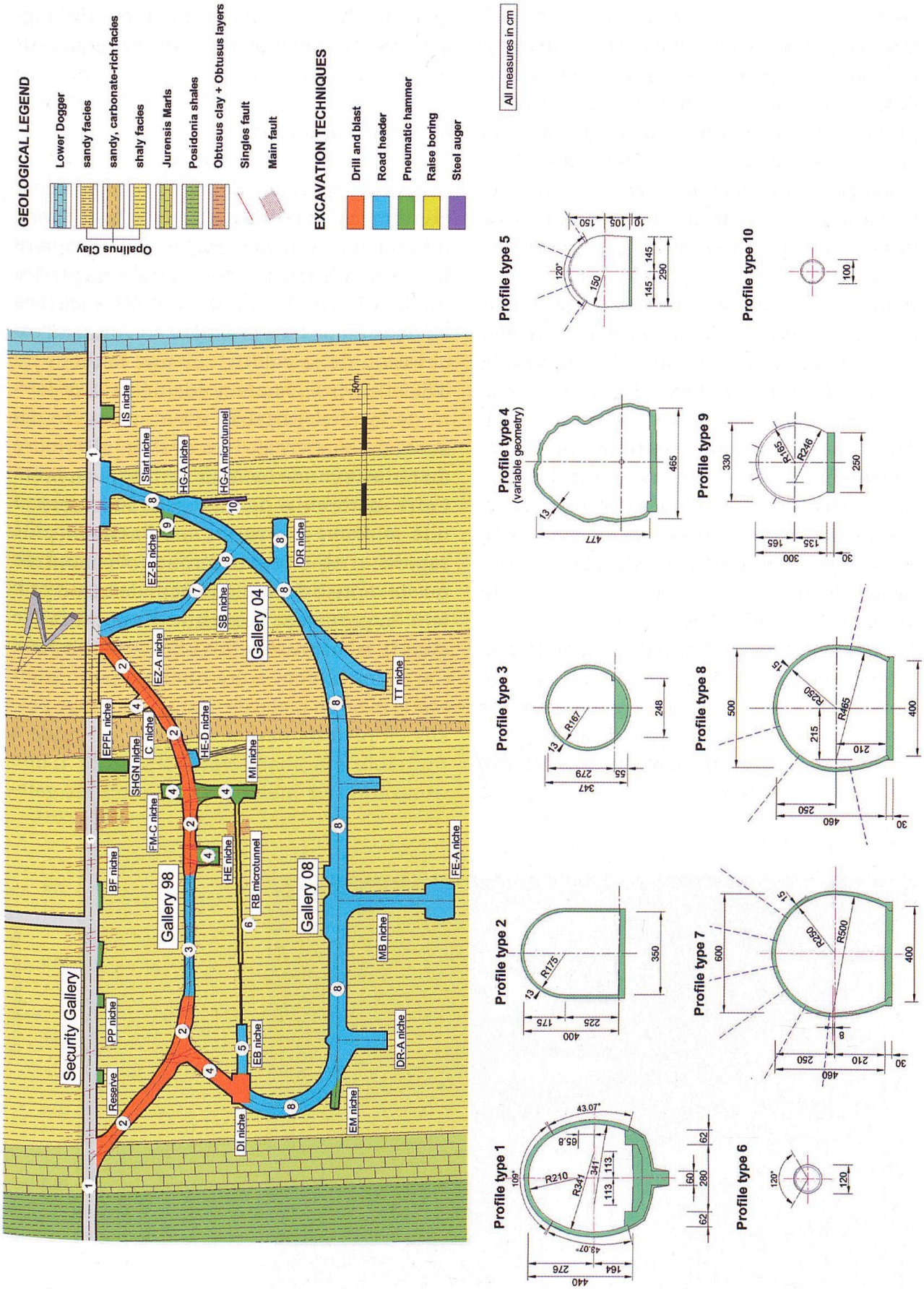


Fig. 4.1: Types de profils.

L'utilisation de ce type d'engin nécessite par contre l'installation d'une ventilation efficace et le dépoussiérage de l'air aspiré. Toutefois, on a pu constater que la résistance à la compression de la roche augmentait avec la dessiccation provoquée par la ventilation, provoquant une chute de la vitesse d'avancement. En raison de l'importance des installations de chantier à mettre en œuvre, le fraisage de la roche ne se justifie que pour des excavations d'une certaine importance.

Pour des excavations limitées, l'engagement d'un engin type «Brokk» ou d'un marteau hydraulique monté sur une pelle rétro est la solution la moins coûteuse. Les vitesses d'avancement sont par contre relativement faibles (env. 0.5 m/jour). Cette méthode d'avancement a principalement été utilisée pour l'excavation des niches latérales mise à disposition des expériences. Le puits HE-B a été excavé avec cette méthode, par l'engagement d'un petit marteau hydraulique monté sur un robot à chenilles.
Le micro-tunnel VE a été excavé par la méthode «raise boring». Un premier forage horizontal a permis le passage du train de tiges et la fixation d'une tête d'alésage d'un diamètre de 1.2 m. Le micro-tunnel a été foré par retour de la tête.

Le micro-tunnel HG-A a, quant à lui, été excavé à l'aide d'une tarière d'un diamètre de 1.0 m. La méthode d'excavation «spiral drilling» a permis l'excavation de ce micro-tunnel sur une longueur de 13.0 m.

4.4 Type d'excavation

Le type d'excavation dépend principalement des dimensions de la section, de la méthode d'avancement et des engins mis en œuvre pour excaver les galeries. Certaines galeries (niche EZ-A et Galerie 04) ont été excavées en deux étapes. La première constituait l'excavation de la calotte sur une hauteur de 3.50 m environ, hauteur adaptée à la capacité de la tête fraiseuse mise en œuvre. La seconde concernait l'excavation ultérieure du radier sur une hauteur de 1.50 m environ. Cette méthode a permis un avancement et une mise en œuvre du soutènement plus rapide. L'expérience a toutefois montrée que la reprise du soutènement de béton projeté en parement constitue un point faible dans la transmission des efforts de la voûte. Cet inconvénient a été quelque peu réduit par la mise en place de tirants d'ancrage passifs en pied de parement. Cette méthode a toutefois été abandonnée au profit d'une excavation en pleine section pour les gale-

Fig. 4.2: Tête fraiseuse.

ries suivantes qui, dans le cas d'une excavation à la tête fraiseuse, nécessite l'engagement d'un engin de taille optimale. Elle permet toutefois une mise en place quotidienne et complète du soutènement, immédiatement après la phase d'excavation.

4.5 Soutènement et revêtement (Fig. 4.4)

Durant la phase d'excavation des galeries, le soutènement permet d'assurer la sécurité du travail et la stabilité du massif. Il permet également de limiter les déformations dans la zone d'avancement. A plus long terme, il reprend les efforts du massif et, suivant le soutènement, protège les argiles à Opalinus des effets de l'humidité ambiante.

Dans le laboratoire souterrain, le soutènement est principalement constitué d'une coque de béton projeté d'une épaisseur de 15 cm mise en œuvre en deux couches. Afin de permettre à ce revêtement de reprendre d'éventuels efforts de traction, celui-ci est armé de treillis métalliques ou de fibres (métalliques ou synthétiques). Le treillis d'armature permet de reprendre des efforts de traction importants alors que les fibres favorisent un comportement plus souple du soutènement. Les fibres sont plutôt réservées aux niches latérales afin de ne pas perturber les expériences et de facilité la réalisation de forages.

En fonction de la stabilité du massif et de l'état de fracturation de celui-ci, des tirants d'ancrages passifs peuvent compléter le soutènement. Ils ont une longueur de 2.0 à 3.5 m. Les plaques de tête sont mises en œuvre de préférence après la pose du treillis afin de maintenir celui-ci. Les tirants sont scellés chimiquement à l'aide de cartouches de résine. Cette méthode permet d'éviter la diffusion de coulis de ciment dans les fissures de la roche et autorise une mise en tension rapide des tirants d'ancrage. Toutefois, dans la niche EZ-A, la mise en œuvre de tirants d'ancrage auto-foreurs, injectés au coulis de ciment, a permis de stabiliser les déformations du soutènement en assurant un ancrage profond (env. 6.0 m).

Certaines sections particulières, présentant

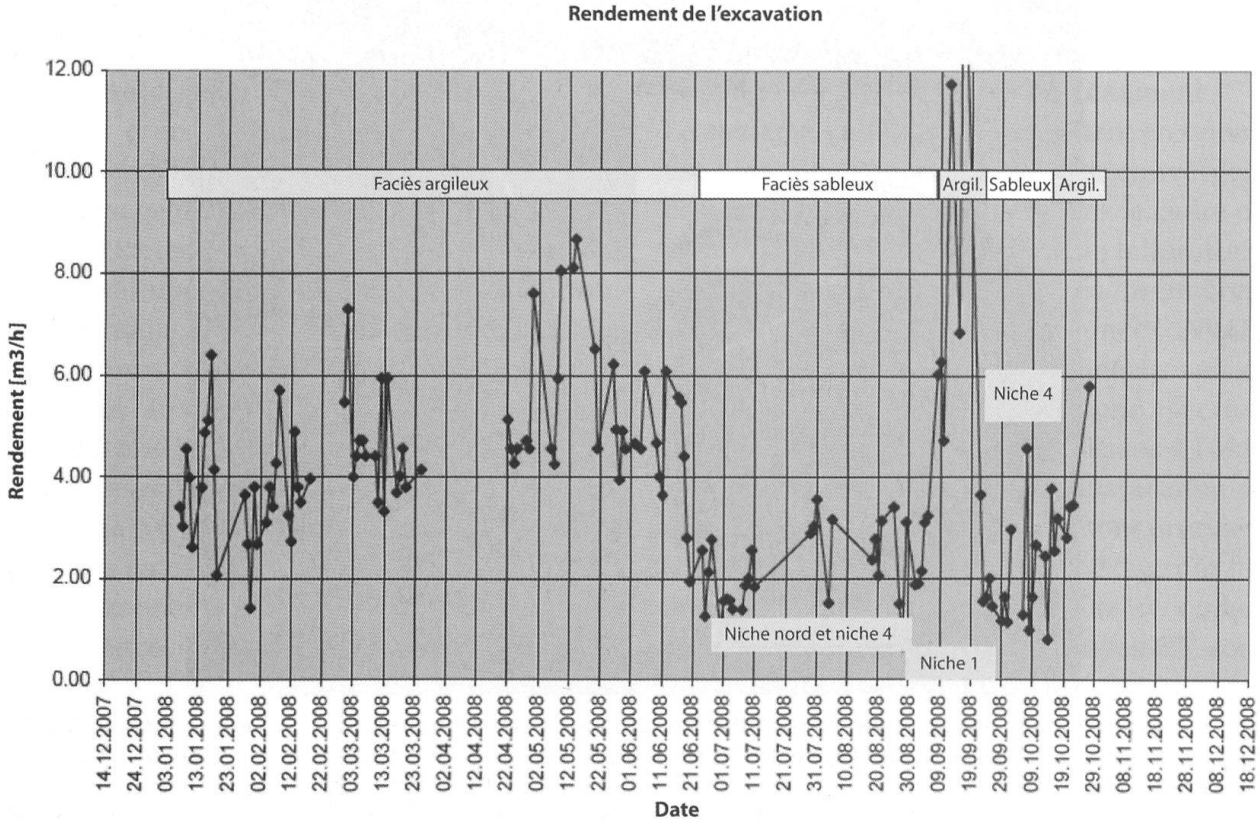


Fig. 4.3: Vitesses d'avancement.

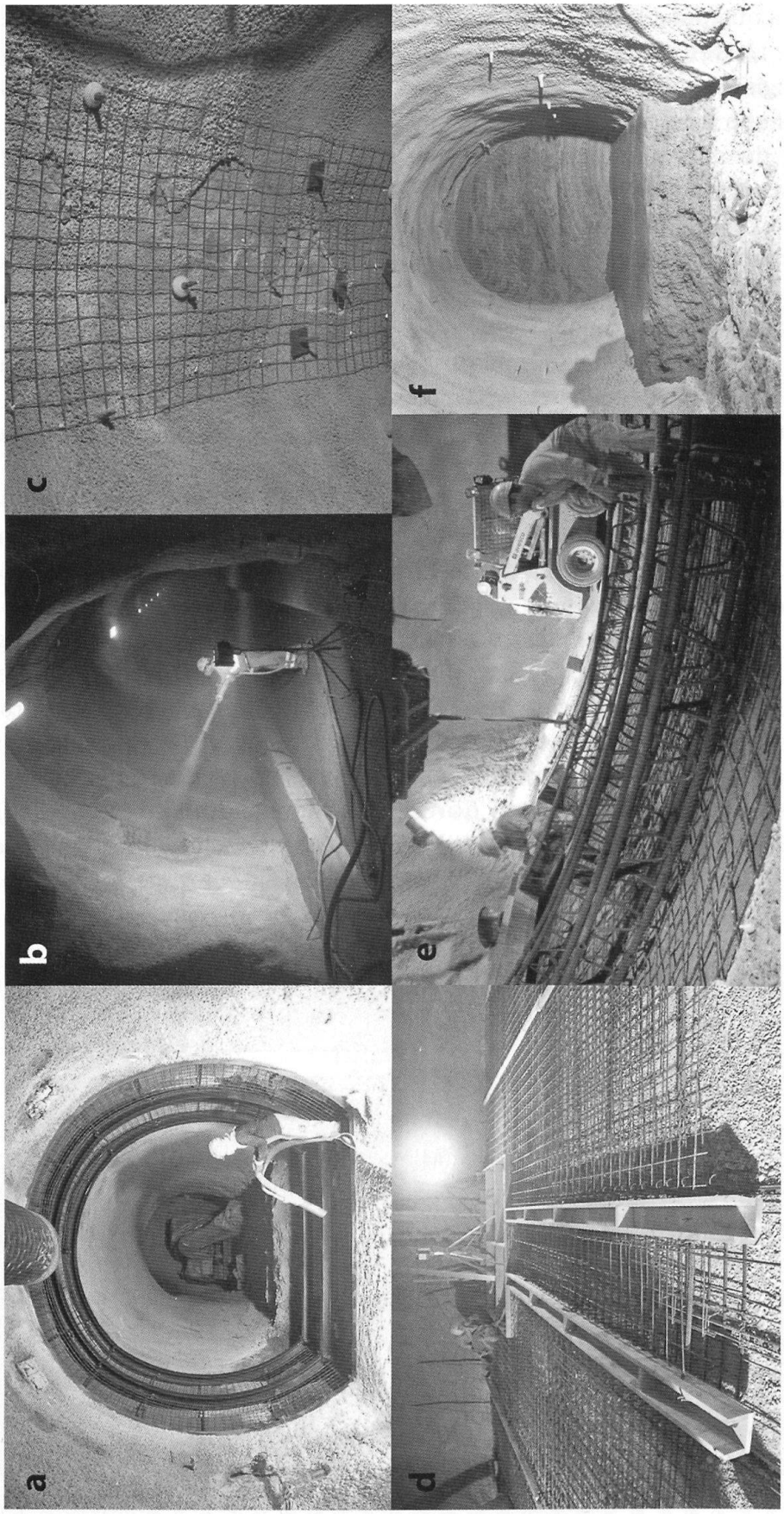


Fig. 4.4: Soutènement et revêtement. a] Treillis métallique et cintres lourds HEB 140 avant mise en œuvre du béton projeté; b] Mise en œuvre de béton projeté lors de l'assainissement d'une galerie; c] Treillis métallique fixé à l'aide de tirants d'ancrage passifs métalliques et en fibres de verre; d] Coffrage et mise en place de l'armature avant bétonnage du radier; e] Mise en œuvre des cintres réticulés constituant le soutènement d'un radier contre-voûté; f] Radier en béton coulé armé uniquement de fibres synthétiques.

une concentration d'efforts importante, ont nécessité la mise en œuvre de cintres métalliques (pleins ou réticulés) associés à des épaisseurs de béton projeté plus importantes ou la constitution de pilier de béton afin de permettre un transfert des charges en radier. En raison de ces dimensions importantes, la dernière niche réalisée (niche FE-A) a nécessité la mise en œuvre systématique de cintres lourds et la réalisation d'un radier contre-voûté.
De manière générale, le radier des galeries présente une surface plane à dévers horizontal, avec une pente principale en direction de la galerie de sécurité. Il est principalement composé d'une couche de béton coulé en place, d'une épaisseur de 30 cm. Afin d'assurer la qualité de l'état de surface, le radier est coulé, dans la mesure du possible, à la fin des travaux d'excavation. Dans les dernières galeries réalisées, une adjonction de fibres synthétiques au béton a permis de limiter quelque peu sa fissuration.

4.6 Traitement de l'air et gestion des poussières

L'excavation des argiles à Opalinus à l'aide d'une tête fraiseuse nécessite la mise en œuvre d'un équipement de gestion des poussières important (Fig. 4.5). En effet, lors du fraisage de la roche, une grande quantité de particules d'argiles très fines est produite et ce diffuse dans l'espace à disposition, constituant un risque respiratoire pour les personnes travaillant sur le site et une atteinte aux équipements techniques du laboratoire et du tunnel autoroutier.
Pour ces raisons, il est nécessaire d'aspirer et de traiter l'air vicié afin que celui-ci ne soit pas mis en contact avec les personnes ou les équipements sensible et qu'il puisse finalement être rejeté dans l'atmosphère en respectant les exigences de protection de l'environnement.
L'air est donc aspiré au front d'excavation, à proximité de la tête fraiseuse, par une gaine (DN 800 à 1'000 mm) reliée à un ventilateur, puis passe au travers d'un dépoussiéreur équipé de filtres dont la capacité de traitement est de 800 m^3/min. Les poussières sont récoltées et mise en sac pour être évacuées. L'efficacité du dépoussiéreur n'étant pas totale, l'air traité est ensuite évacué à l'air libre via une gaine de ventilation souple de près d'un kilomètre.
L'installation de brumisateurs ou de dépoussiéreur à fonctionnement humide permet parfois d'améliorer le traitement de l'air. Cependant, dans les formations rencontrées, l'emploi d'eau est strictement prohibé en raison du potentiel de gonflement des argiles pouvant provoquer d'importants dégâts et mettre en péril l'aptitude au service de l'ouvrage ou sa sécurité structurale.

4.7 Monitoring de l'excavation et surveillance de l'ouvrage

Durant les phases d'excavation, différents équipements de mesures géotechniques sont mis en œuvre afin d'enregistrer les déformations du massif rocheux et du soutènement. Le résultat de ces mesures est interprété régulièrement afin d'anticiper les instabilités de l'ouvrage et d'engager un éventuel renforcement du soutènement.
Le système le plus simple à mettre en œuvre est l'installation de sections de convergences. Deux types sont utilisés dans le cadre de la surveillance effectuée dans le laboratoire souterrain du Mont Terri. Les premières, appelées mesures de convergences INVAR, font appel à plusieurs mesures linéaires effectuées entre les 5 points d'une section (Fig. 4.6). Ces mesures sont réalisées à l'aide d'un distomètre et repose sur l'installation de fils en métal invar. Ces mesures sont précises, mais exige la confection et le stockage des fils de chaque diagonale mesurée. Les secondes, appelées mesures de convergences 3D, sont des mesures géodésiques effectuées avec un théodolite sur des cibles installées dans une même section. Elles permettent une mesure rapide et fournissent des informations sur le déplacement de chaque cible dans l'espace.

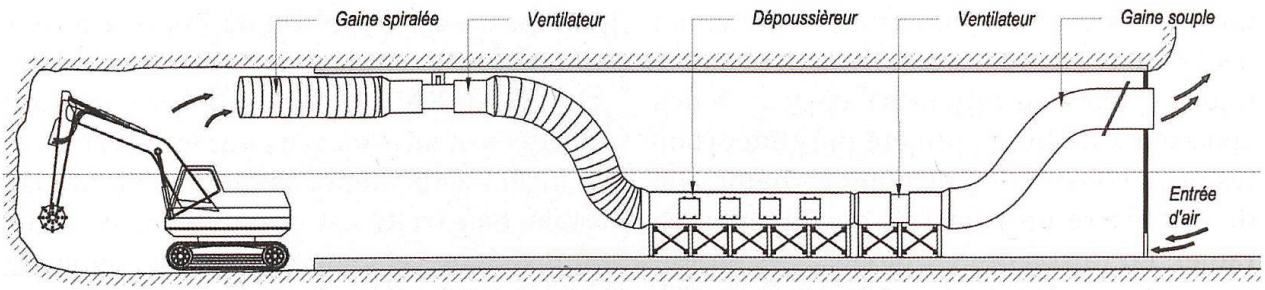
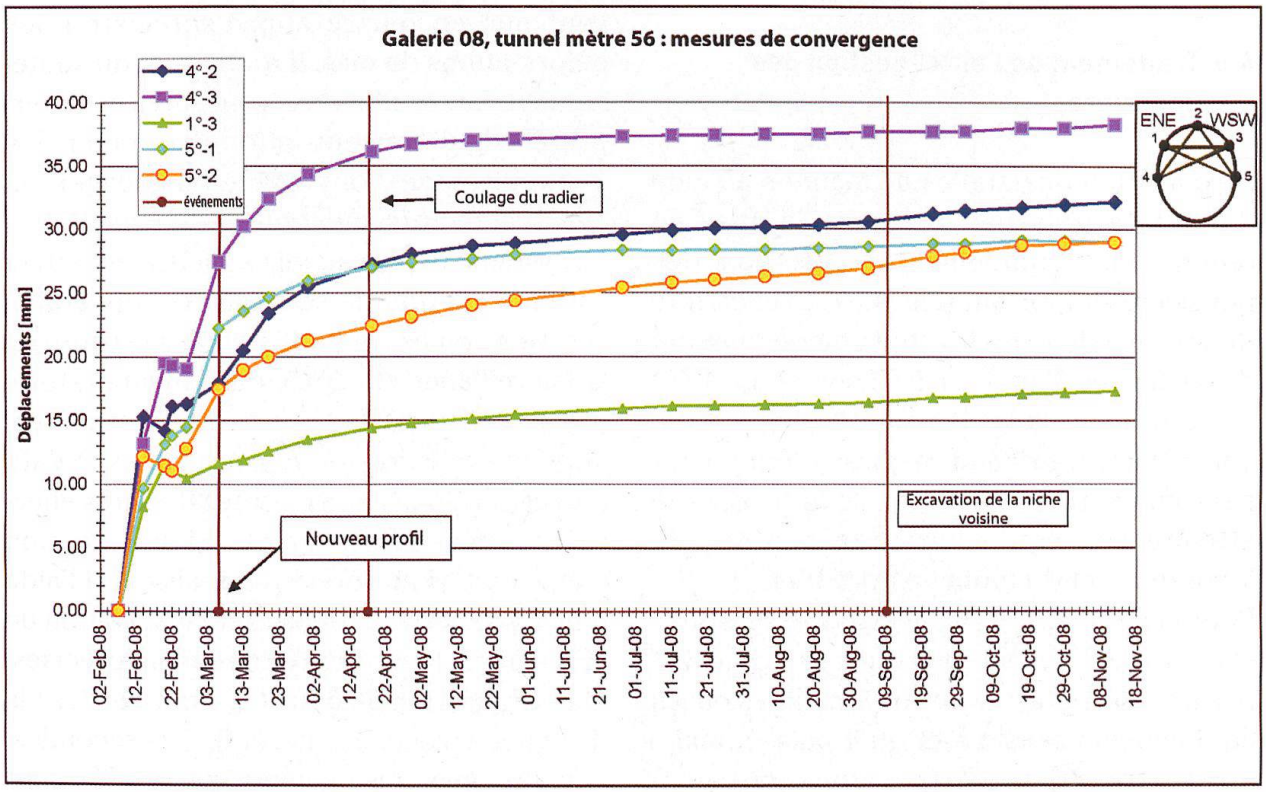


Fig. 4.5: Principe d'évacuation des poussières.

La mise en œuvre d'inclinomètres, d'extensomètres ou de cellules de pression permettent également d'enregistrer le comportement du massif rocheux ou de l'ouvrage durant les travaux d'excavation. Reliés à un système de surveillance automatique continu, les équipements installés permettent d'anticiper les déformations et de donner l'alarme aux ouvriers en cas de brusque augmentation des déformations.

Après les travaux, le concept de conservation de l'ouvrage permet d'assurer la sécurité structurale du laboratoire souterrain et d'en garantir son exploitation en toute sécurité. Il repose sur une surveillance et un entretien régulier de celui-ci. La surveillance régulière s'appuie sur des observations, des inspections et des contrôles par mesure. Le plan de surveillance définit et planifie ces différentes activités.



Graph Ga08 TM-56DistometerGa08 TM-56

Fig. 4.6: Graphique de convergences INVAR. Pour chaque point de la section de mesure, la courbe correspondante donne l'évolution des déformations dans le temps. Une valeur positive indique une réduction de la corde mesurée, c'est-à-dire une convergence de la section sous l'effet des forces issues du massif rocheux.

En phase d'exploitation du laboratoire, les contrôles par mesure reposent principalement sur l'enregistrement des déformations du massif rocheux ou du soutènement. Des mesures géodésiques, des profils de convergences, des extensomètres, des témoins de gypse et des jauges de déplacement permettent de suivre l'évolution des déformations et de définir ainsi les mesures de maintenance ou d'assainissement nécessaires (Burrus et al. 2010). Les graphiques de résultats présentent une vue d'ensemble de l'évolution d'une section et de l'efficacité des mesures d'assainissement. En effet, le but du laboratoire souterrain n'est pas de mettre en œuvre un soutènement lourd, coûteux et définitif, mais de permettre l'observation des déformations du soutènement en assurant toutefois la sécurité des usagers.
Chaque année, après analyse des mesures enregistrées et sur la base des observations effectuées, le plan de surveillance est réadapté et appliqué.

5. Discussion

5.1 Quelles sont nos connaissances et qu'a-t-on appris?

Nos principales expériences en matière de forages et d'excavation de tunnels dans les argiles à Opalinus se résument comme suit:

- Pas d'utilisation d'eau: les forages sont effectués avec de l'air ou un gaz (azote, argon) et les excavations se font à sec, sans eau. Ceci permet d'écarter les risques de gonflements accidentels et a ainsi une influence positive sur la stabilité.
- Instabilités dues à l'anisotropie des couches et à l'assèchement: Les décollements des parois des forages et les effondrements de galeries sont principalement dues à l'anisotropie des couches (env. 70%) et moins à la redistribution des contraintes (env. 30%). Les forages et tunnels parallèles au pendage des couches sont instables et peuvent s'effondrer après quelques heures. Les forages et tunnels perpendiculaires au pendage restent cependant stables assez longtemps. Il ne faut pas sous-estimer l'assèchement des argiles à Opalinus par la ventilation des galeries. Des fractures de retrait parallèles à la stratification se forment en quelques semaines ou mois, ce qui conduit à des hors-profils dans les galeries sans ou faible soutènement.
- Assèchement et résistance: Il existe une relation claire entre l'assèchement et la résistance a la compression uniaxial. Lorsque l'eau interstitielle diminue de 1% massique dans le faciès argileux, la résistance augmente de 5–10 MPa. Il faut en tenir compte lors du choix de la méthode de l'excavation (usure des outils).
- Pas de drainage de l'eau: De par la perméabilité hydraulique très faible, il n'est pas nécessaire d'effectuer des drainages à la base du tunnel. Nous n'avons pas observé des venus de l'eau de la roche au tunnel par advection dans les argiles à Opalinus. Dans de très rares cas, nous avons observé, à l'intérieur ou à l'entrée de trous de forage, des endroits humides, principalement lors des travaux d'excavation.
- Soutènement et revêtement: Afin de minimiser l'assèchement, nous avons appliqué une couche de 5 cm de béton projeté immédiatement après l'excavation. Cette couche de béton projeté permet encore des déformations. Après environ une semaine, une deuxième couche de 10 cm peut être appliquée. Le béton projeté peut être combiné avec des armatures ou des filets. Avec cette méthode, les galeries restent stables environ 10 à 15 ans. Ensuite, le revêtement devra être partiellement rénové.
- Évacuation des poussières: Les forages peuvent être effectués quasiment sans émission de poussière (circuit de poussières fermé, sédimentation par aspirateur et dépoussiéreur). Les excavations dans les argiles à Opalinus avec des machines à l'attaque ponctuelle sont plus difficiles et

produisent une poussière extrêmement fine qui se répand sur de longues distances. Nous avons fait d'excellentes expériences avec notre propre système d'aspiration: la poussière est aspirée avec une gaine au front du tunnel. Cette gaine est reliée à un ventilateur et la poussière passe dans un dépoussiéreur, où les poussières sont sédimentées dans des filtres. L'air est ensuite évacué par une longue gaine qui l'amène à la surface, hors du tunnel. Il est souvent difficile de respecter les règles de la Suva au front du tunnel près de la machine à l'attaque ponctuel. C'est pourquoi les mineurs doivent porter des masques de protection pendant la fraisage mais aussi pendant la mise en place des bétons projeté et coulé.

5.2 Transfert des résultats sur un dépôt géologique profond

La question qui se pose est si les résultats géotechniques et l'expérience techniques acquises dans le laboratoire souterrain du Mont Terri peuvent être transposés tels quels sur les sites de dépôts géologiques en profondeur. Il n'y aura jamais de dépôt en profondeur au Mont Terri, du fait des nombreux chevauchements tectoniques dans le sous-sol de la région. La Nagra a cependant sélectionné, dans le cadre du plan sectoriel «Dépôts géologiques en profondeur», trois sites où des déchets hautement radioactifs pourraient être enfouis dans les argiles à Opalinus. Ces sites se trouvent dans le nord de la Suisse: Zurich Nord-Est, Lägern Nord et le Jura Est dans les cantons de Zurich et d'Argovie.

Il existe trois différences principales entre le laboratoire souterrain Mont Terri et les sites de stockage potentiels dans le nord de la Suisse: 1] le laboratoire souterrain se trouve dans le Jura plissé. Les couches d'argiles à Opalinus y sont inclinées de 40° vers le sud-est. Dans le nord de la Suisse, les argiles à Opalinus se trouvent dans le Jura tabulaire ou la zone d'avant-plis, où les couches sont pratiquement horizontales et non perturbées. 2] Le laboratoire souterrain se trouve à une profondeur de 330 m sous terre au maximum. Les sites proposés dans le nord de la Suisse se trouveraient dans des couches bien plus profondes, entre 400 et 900 m sous terre. 3] Les conditions du champ de contraintes et la pression de l'eau interstitielle dans le laboratoire souterrain Mont Terri diffèrent assez fortement des conditions dans le nord de la Suisse.
De par ces différences, il n'est pas possible de transposer directement les résultats obtenus. On peut s'attendre à ce que la zone endommagée par le creusement soit beaucoup plus étendue à des profondeurs entre 400 et 900 m, surtout en ce qui concerne la fréquence des failles et l'étendue autour de la galerie (Amann et al. 2009). Cela signifie que le revêtement et le soutènement appliqués dans le laboratoire souterrain du Mont Terri ne peuvent pas être utilisés dans un centre de stockage. Les décollement et les hors profils lors des excavations des galeries ne sont pas directement comparables avec ceux du Mont Terri. C'est pourquoi il faut un revêtement qui est beaucoup plus fort dans une profondeur qui double celle du Mont Terri. Les propositions correspondantes sont déjà contenues dans la démonstration de faisabilité de la Nagra (Nagra 2002). La construction pourra être testée dans un laboratoire souterrain propre à l'emplacement construit sur les lieux d'un centre de stockage autorisé.

Ce sont surtout les aspects qualitatifs qui peuvent être transférés du Mont Terri dans un dépôt géologique profond: par exemple des processus géotechniques et dynamiques qui font qu'il y ait une zone endommagée par le creusement EDZ dans les argiles à Opalinus. Ces processus sont les mêmes dans le nord de la Suisse et au Mont Terri. Pour les aspects quantitatifs, certaines caractéristiques de la roche peuvent être repris du laboratoire souterrain du

Mont Terri, par exemple la relation entre la résistance à la compression uniaxiale et la teneur en eau (voir Fig. 1.5) qui seront repris avec d'autres caractéristiques dans les lois constitutifs et la modélisation roche mécanique. Ces modèles peuvent être calibrés pour l'état de la roche au Mont Terri. En modifiant les paramètres, il est possible d'établir des prédictions quant à la mécanique des roches pour de plus grandes profondeurs et d'autres conditions de contraintes, comme celles auxquelles on peut s'attendre dans un dépôt en profondeur dans le nord de la Suisse. Il sera intéressant de vérifier si ces modèles correspondent à la réalité, par exemple des convergences, d'un site de stockage.

Références

Allia, V. 1996: Sedimentologie und Ablagerungsgeschichte des Opalinustons in der Nordschweiz. Ph.D. dissertation, Geologisch-Paläontologisches Institut, University of Basel, Nr. 10, 1996.

Amann, F. & Löw, S. 2009: Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager: Beurteilung und Anwendung der bautechnischen Auswahlkriterien. ETH-Fachgutachten Nr.: 3465/63 Zu Handen des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorates. ENSI, Industriestrasse 19, 5200 Brugg, Schweiz.

Becker, A. 2000: The Jura Mountains: An active foreland fold-and-thrust-belt? Tectonophysics 321, 381–406.

Blaesi, H.-R. 1987: Lithostratigraphie und Korrelation der Doggersedimente in den Bohrungen Weiach, Riniken und Schafisheim. Eclogae Geol. Helv., 80, 415–430.

Blaesi, H.-R., Peters, T. J., Mazurek, M. 1991: Der Opalinuston des Mont Terri (Kanton Jura). Lithologie, Mineralogie und physiko-chemische Gesteinsparameter. NAGRA internal Report.

Bossart, P. & Thury, M. 2008: Mont Terri Rock Laboratory. Project, Programme 1996 to 2007 and Results. – Rep. Swiss Geol. Surv. No. 3. swisstopo, Seftigenstrasse 264, 3084 Wabern, Switzerland.

Bolliger, T., Engesser, B. & Weidmann, M. 1993: Première découverte de mammifères pliocènes dans le Jura neuchâtelois. Eclogae Geol. Helv., 86, 1031–1068.

Burkhalter, R. M. 1996: Die Passwang-Alloformation (unteres Aalenien bis unteres Bajocien) im zentralen und nördlichen Schweizer Jura. Eclogae Geol. Helv., 89, 875–934.

Burkhalter, R. M., Blaesi, H.-R. & Feist-Burkhardt, S. 1997: Der «Dogger b» (oberes Aalénien) in den Bohrungen Herdern-1, Berlingen-1 und Kreuzlingen-1 (Nordostschweiz) und seine Beziehung zu den gleichaltrigen Schichten im Nordjura. Eclogae geol. Helv. 90, 269–292.

Burrus, F., Bossart, P. & Nussbaum, Ch. 2010: Mont Terri Project, Gallery 08 : Documentation of the excavation and the convergence measurements. Mont Terri internal report; swisstopo, Seftigenstrasse 264, 3084 Wabern-Switzerland.

Freivogel, M., & Huggenberger, P. 2003: Modellierung bilanzierter Profile im Gebiet Mont Terri - La Croix (Kanton Jura). In: Heitzmann, P. & Tripet, J.-P. (Eds.), Mont Terri Project - Geology, Paleohydrology and stress field of the Mont Terri region. Bern: Rapports de l'OFEG, Série Géologie, No.4.

Giamboni, M., Ustaszewski, K., Schmid, S. M., Schumacher, M. E. & Wetzel, A. 2004: Plio-Pleistocene transpressional reactivation of Paleozoic and Paleogene structures in the Rhine-Bresse transform zone (northern Switzerland and eastern France). International Journal of Earth Science, 93, 207–223.

Kälin, D. 1993: Stratigraphie und Säugetierfaunen der obersten Süsswassermolasse des Nordwestschweiz. Ph.D. dissertation, ETH Zürich, Zürich, Switzerland.

Kastrup, U., Zoback, M. L., Deichmann, N., Evans, K. F., Giardini, D. & Michael, A. J. 2004: Stress field variations in the Swiss Alps and the northern Alpine foreland derived from inversion of fault plane solutions. Journal of Geophysical Research, 109. doi:10.1029/2003JB002550.

Laubscher, H. P. 1963: Erläuterungen zum Geologischen Atlasblatt «1085 St-Ursanne, 1:25'000». Basel: Schweizerische Geologische Kommission.

Madritsch, H., Schmid, S. M., Fabbri, O. 2008: Interactions between thin-and thick-skinned tectonics at the northwestern front of the Jura fold-and-thrust belt (eastern France). Tectonics, 27, TC5005. doi:10.1029/2008TC002282.

Madritsch, H., Preusser, F., Fabbri, O., Bichet, V., Schlunegger, F. & Schmid, S. M. 2010: Late Quaternary folding in the Jura Mountains: evidence from syn-erosional deformation of fluvial meanders. Terra Nova, 22, 147–154. doi: 10.1111/j.1365.3121.2010.00928.

Nagra 2002: Project Opalinus Clay. Safety Report. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). NTB 02-05, Nagra, Hardstrasse 73, 5430 Wettingen, Switzerland.

Nussbaum, C., Bossart, P., Amann, F. & Aubourg, C. 2011: Analysis of tectonic structures and excavation induced fractures in the Opalinus Clay, Mont Terr underground rock laboratory (Switzerland). Swiss Journal of Geosciences: Volume 104, Issue 2 (2011), Page 187–210. DOI: 10.1007/s00015-011-0070-4.

Schaeren, G., & Norbert, J. 1989: Tunnels du Mont Terri et du Mont Russelin. La Traversée des «Roches à Risques»: Marnes et Marnes à Anhydrite. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Documentation, SIA D 037, Zürich, 19–24.

Suppe, J. 1983: Geometry and kinematics of fault-bend folding. American Journal of Science, 283, 684-721.

Suter, M. 1981: Strukturelles Querprofil durch den nordwestlichen Faltenjura, Mt. Terri-Randüberschiebung-Freiberge. Eclogae Geol. Helv., 74, 255–275.

Thury, M., & Bossart, P. 1999: Results of the hydrogeological, geochemical and geotechnical experiments performed in the Opalinus Clay (1996–1997). Bern-Ittigen: Geological report no. 23, Swiss Geological Survey.

Ustaszewski, K., & Schmid, S. M. 2006: Control of preexisting faults on geometry and kinematics in the northernmost part of the Jura fold-and-thrust belt. Tectonics, 25, TC5003.

Ustaszewski, K., & Schmid, S. M. (2007). Latest Pliocene to recent thick-skinned tectonics at the Upper Rhine Graben – Jura Mountains junction. Swiss Journal of Geosciences, 100, 293–312.

Valley, B., & Evans, K. F. 2009: Stress orientation to 5 km depth in the basement below Basel (Switzerland) from borehole failure analysis. Swiss Journal of Geosciences, 102, 467–480.