

CERN HL-LHC POINT 1, Le soutènement « souple » de la caverne US/UW17, une solution innovante

CERN HL-LHC POINT 1, The 'flexible' US/UW17 cavern temporary lining, an innovative solution

Jérémy VOIRON, *setec ch, Genève, Suisse*

Bénédicte MADINIER, *setec terrasol, Lyon, France*

Hervé LE BISSONNAIS, *setec terrasol, Paris, France*

Résumé

Le projet du Grand collisionneur de hadrons à haute luminosité (LHC à haute luminosité) comprend la réalisation d'infrastructures souterraines complexes. Les principales structures souterraines du HL-LHC Point 1 (Atlas) consistent en un nouveau puits, relié à une caverne de service (US/UW17), elle-même connectée à une galerie de conversion de puissance, et à des galeries de service.

La géologie au droit du projet se caractérise principalement par la Molasse Rouge du Chattien Inférieur, typique dans le bassin genevois, et connue pour sa forte anisotropie.

Durant les premières phases de conception, il a été mis en évidence que l'excavation de la caverne US/UW17 au sein de cette Molasse anisotrope pouvait générer des contraintes asymétriques élevées dans la masse rocheuse près de la connexion entre la caverne et le puits. Ces apports de contraintes pouvaient ainsi occasionner alors des forces de flexion et de compression très élevées dans le béton projeté du soutènement provisoire de la caverne dans les quelques mètres les plus proches de la connexion, impliquant un renforcement drastique du soutènement et donc, de sa rigidité au risque d'augmenter de nouveau ses sollicitations...

Afin de proposer une conception plus optimisée, il a été développé une solution technique permettant de limiter les sollicitations dans le soutènement provisoire de la caverne US/UW17, en intégrant à la coque de béton projeté des éléments compressibles en béton.

L'objectif de cet article est de présenter les avantages de l'utilisation de ces éléments compressibles dans un contexte où la Molasse est peu sujette aux déformations.

Abstract

The Large Hadron Collider (LHC) project involves the construction of complex underground infrastructure. The main underground structures of the HL-LHC Point 1 (Atlas) consist of a new shaft, connected to a service cavern (US/UW17), itself connected to a power conversion gallery, and service galleries.

The geology at the project site is mainly characterized by the 'Molasse Rouge du Chattien Inférieur', typical in the Geneva basin and known for its strong anisotropy.

During the early design phases, it was shown that excavation of the US/UW17 cavern within this anisotropic Molasse could generate high asymmetrical stresses in the rock mass near the connection between the cavern and the shaft. These stress contributions could then cause very high bending and compression forces in the shotcrete of the temporary cavern lining in the few meters closest to the connection, implying a drastic reinforcement of the lining and thus of its rigidity at the risk of increasing again its stresses.

In order to propose a more optimized design, a technical solution was developed to limit the stresses in the US/UW17 cavern's temporary lining by installing compressible concrete elements into the shotcrete.

The objective of this paper is to present the advantages of using these compressible elements in a context where Molasse is not very prone to deformation.

CERN HL-LHC POINT 1, Le soutènement « souple » de la caverne US/UW17, une solution innovante

CERN HL-LHC POINT 1, The 'flexible' US/UW17 cavern temporary lining, an innovative solution

Jérémy VOIRON, *setec ch, Genève, Suisse*

Bénédicte MADINIER, *setec terrasol, Lyon, France*

Hervé LE BISSONNAIS, *setec terrasol, Paris, France*

1 Introduction

Le projet du Grand collisionneur de hadrons à haute luminosité (LHC à haute luminosité) comprend la réalisation d'infrastructures souterraines complexes dans le bassin genevois. Côté Suisse, le Point 1 consiste en un nouveau puits (PM17), relié à une caverne de service (US/UW17), elle-même connectée à une galerie de conversion de puissance (UR15), et à des galeries de service (UA/UPR 13 & 17 et UL 13 & 17).

Le puits PM17 est un ouvrage de 60 m de profondeur, de 10 à 12 m de diamètre en section courante et qui présente à sa base un anneau renforcé de 14 m de diamètre et de 80 cm d'épaisseur, ancré dans les terrains molassiques. Cet anneau renforcé constitue l'ouvrage de connexion entre la base du puits et la voûte de la caverne. La caverne US/UW17 de 18 m de diamètre et de 45 à 50 m de longueur est connectée à la galerie de conversion UR15 au niveau de son tympan Est et à la galerie de service secondaire UA17 au niveau de son piédroit Sud (cf. Figure 1).

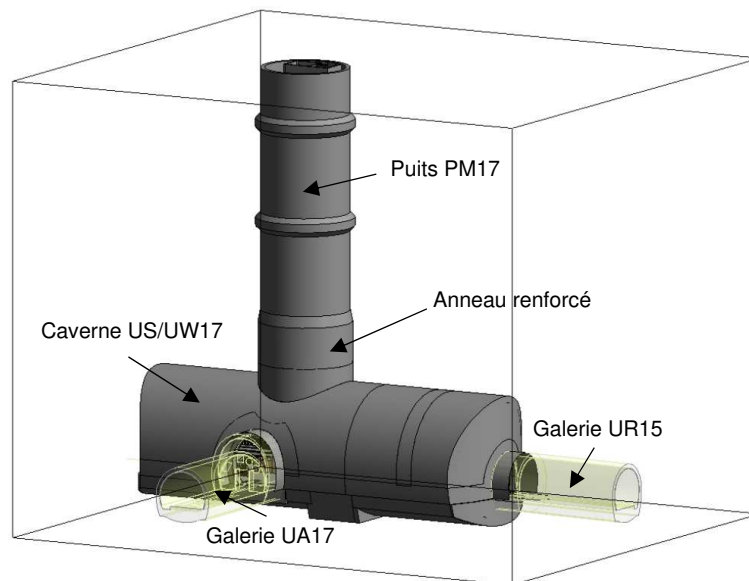


Figure 1. Connection entre la caverne US/UW17 avec le puits PM17 et les galeries UR15 et UA17

2 La géologie

2.1 La géologie au droit du Point 1

Le site se trouve dans le bassin Genevois, et est caractérisé par des dépôts glaciaires d'épaisseurs variables reposant sur un substratum molassique de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur.

En surface, nous retrouvons les gisements de moraines Würmienne d'épaisseur métrique recouvrant deux affleurements de la Molasse Rouge du Chattien Inférieur.

La Molasse est constituée de lentilles de roches sédimentaires à lit subhorizontal présentant une gradation spatiale latérale et verticale progressive allant de l'argile au sable. Elle est composée de

couches successives de marnes et de grès du Miocène Tertiaire et résulte de la diagenèse des détritiques Alpines. Cette sédimentation est contrôlée par la variation spatiale de l'activité géologique, ce qui rend toute prévision de site très difficile. La Molasse présente un champ de contraintes anisotropes résultant de la poussée tectonique des Alpes.

Au droit du projet, quatre types de faciès ont été distingués dans la Molasse. Le passage d'un faciès à l'autre peut être progressif et graduel, et leur distinction n'est pas toujours aisée :

- Les Marnes "Grumeleuses" ('Weak Marl') sont principalement des marnes très hétérogènes issues de la diagenèse d'argiles à haute plasticité. Elles sont caractérisées par de nombreuses microfissures fermées, polies, discontinues, multidirectionnelles et courbes, ce qui leur donne des caractéristiques fortement anisotropes. Elles sont très sensibles à l'eau et se dégradent rapidement à l'air ;
- Les marnes plates ('Soft Marl') sont composées de 45 à 60% d'argile, de 15 à 30% de quartz microcristallin, et de 20 à 30% de minéraux calcaires. L'argile dominante est l'illite (gonflante), mais elle peut également contenir de la smectite (gonflante) ou de la chlorite (non gonflante) jusqu'à 18% ;
- Les marnes sableuses ('Medium Marl') présentent des proportions de 20 à 45% d'argile, de 20 à 40% de quartz et de 20 à 30% de calcite. Leur degré de cimentation augmente avec la profondeur ;
- Les grès et les grès marneux qui varient de tendre (légèrement cimenté) à très dur (fortement cimenté). Les grès tendres ('Soft Sandstone') sont constitués de matériaux granulaires à grains fins peu cimentés et contenant un peu d'argile. Ils sont plus tendres que les marnes sableuses. Les grès durs ('Hard Sandstone') sont composés de matériaux à gros grains bien cimentés. Ils sont composés de 40 à 70% de Quartz, de 5 à 10% de Feldspath, de 5 à 20% d'argile et de mica et de 5 à 45% de ciment calcaire. Ils possèdent de bonnes propriétés mécaniques avec de rares discontinuités.

Sur la base des reconnaissances géologiques menées au droit du projet, nous estimons que la répartition des différents types de faciès composant la Molasse est d'environ 50% de grès, de 25% de marnes sableuses et de 25% de marnes plates et grumeleuses.

2.2 La géologie au droit de la caverne US/UW17

Le profil en long géologique a été déterminé à partir des reconnaissances menées au droit du projet et des ouvrages existants du Point 1. Celui de la caverne, essentiellement à partir du sondage carotté C1 réalisé en 2015 lors de la phase de reconnaissance. Ce dernier a été réalisé depuis la surface jusqu'à environ 80 m de profondeur (cf. Figure 2).

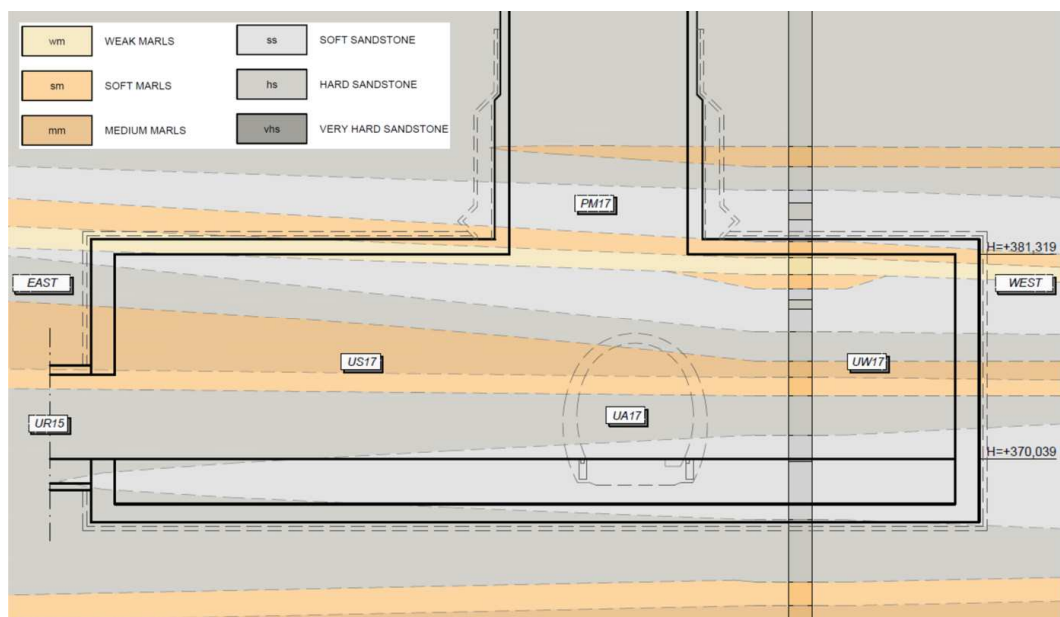


Figure 2. Profil en long géologique au droit de la caverne US/UW17

Au droit de la caverne et du puits renforcé, il était attendu une proportion de l'ordre de 20 à 40% d'horizons marneux ('Weak Marl', 'Soft Marl' et 'Medium Marl') de quelques centimètres à quelques mètres d'épaisseur, et de 60 à 80% d'horizons gréseux ('Soft Sandstone' et 'Hard Sandstone') pouvant atteindre plusieurs mètres d'épaisseur.

2.3 Particularité de la Molasse Rouge du Chattien Inférieur

Le champ de contraintes in situ est connu pour être anisotrope à proximité des massifs montagneux, les contraintes majeures et intermédiaires étant horizontales et les mineures étant verticales. Cette anisotropie est due à la poussée des Alpes sur le plateau molassique contre le Jura.

Des essais réalisés au dilatomètre à 92 m de profondeur dans la Molasse ont confirmé ce champ de contraintes anisotropes. La direction de la contrainte principale majeure s'est avérée être orientée dans la direction Nord-Est / Sud-Ouest, selon les relations suivantes :

$$K_{0,x} = \sigma_{xx} / \sigma_{zz} = 2.2 \quad (1)$$

$$K_{0,y} = \sigma_{yy} / \sigma_{zz} = 1.5 \quad (2)$$

σ_{xx} et σ_{yy} indiquent respectivement (à quelques degrés près) les contraintes horizontales perpendiculaires et parallèles à l'axe longitudinal de la caverne US/UW17.

σ_{zz} indique la contrainte verticale.

3 Soutènement provisoire envisagé pour la caverne US/UW17

Du fait des grandes dimensions de la caverne, et de la présence d'une couche de marnes grumeleuses ('Weak Marl') en voûte, le phasage d'excavation de la caverne a été subdivisé (cf. Figure3) :

- Excavation de la voûte en deux sections (phase 1 et phase 2) ;
- Excavation du premier banc supérieur, puis de la contre voûte (phase 3 et phase 4).

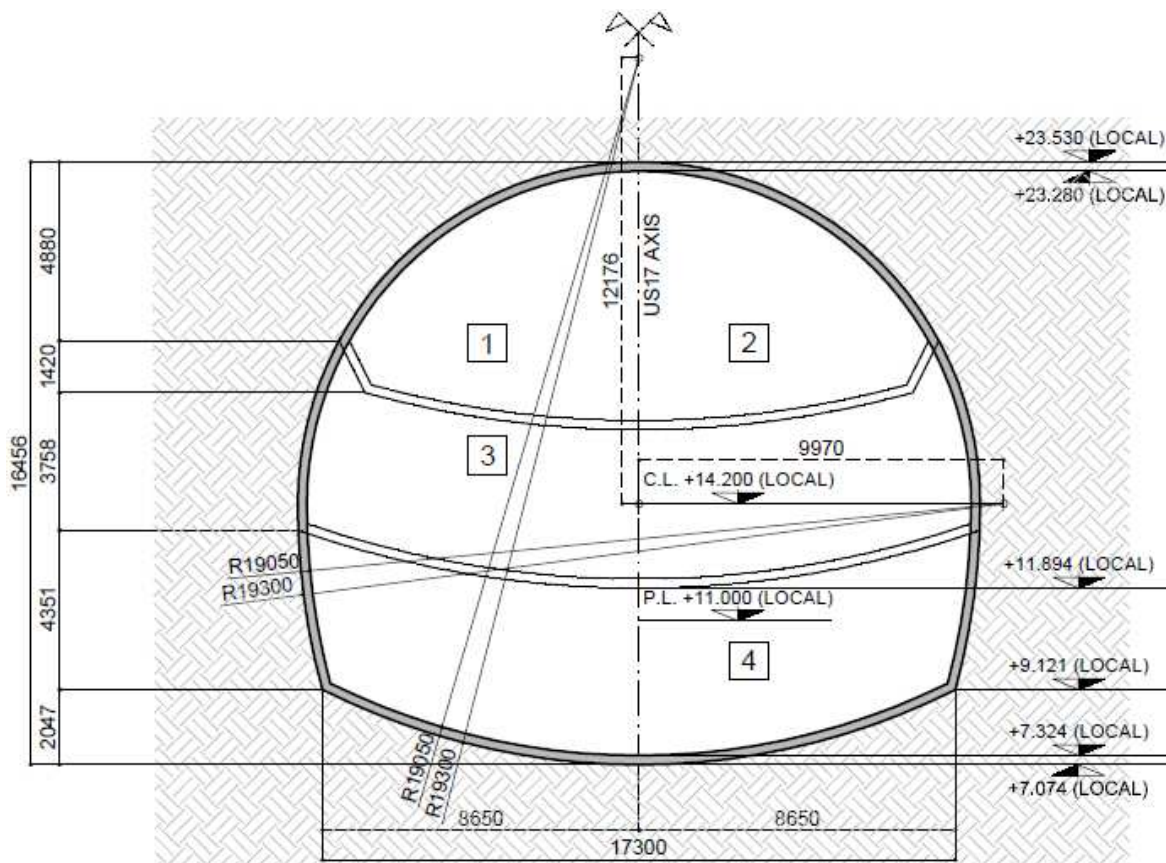


Figure 3. Phasage d'excavation de la caverne US/UW17

Le soutènement provisoire envisagé pour la caverne est constitué d'une coque en béton projeté de 25 cm d'épaisseur réalisée en trois phases (5 cm renforcé par des fibres métalliques, puis 15 cm également renforcé par des fibres métalliques et enfin, 5 cm non fibré pour éviter l'endommagement de la membrane d'étanchéité).

La coque en béton projeté est ancrée à des auréoles de boulons en acier à ancrage réparti et injectés au ciment sur une longueur de 6 m, ou en fibres de verres dans les zones en interface avec les travaux ultérieurs d'excavation. Ces derniers présentent un maillage serré de 1 m par 1 m.

4 Dimensionnement du soutènement de la caverne US/UW17

4.1 Dimensionnement via une approche aux Eléments Finis en 3D

Le dimensionnement du soutènement de la caverne US/UW17 a été réalisé via une approche aux Eléments Finis à l'aide du logiciel Plaxis 3D. Les dimensions du modèle 3D sont de 200 m x 200 m, par 106 m de profondeur. Le maillage est composé d'environ 350 000 éléments de sol et d'environ 510 000 nœuds.

Dans la modélisation 3D, le puits PM17, la caverne US/UW17, et les amorces des galeries UA17 et UR15 ont été considérés pour l'évaluation des interfaces entre les différents ouvrages (cf. Figure 4).

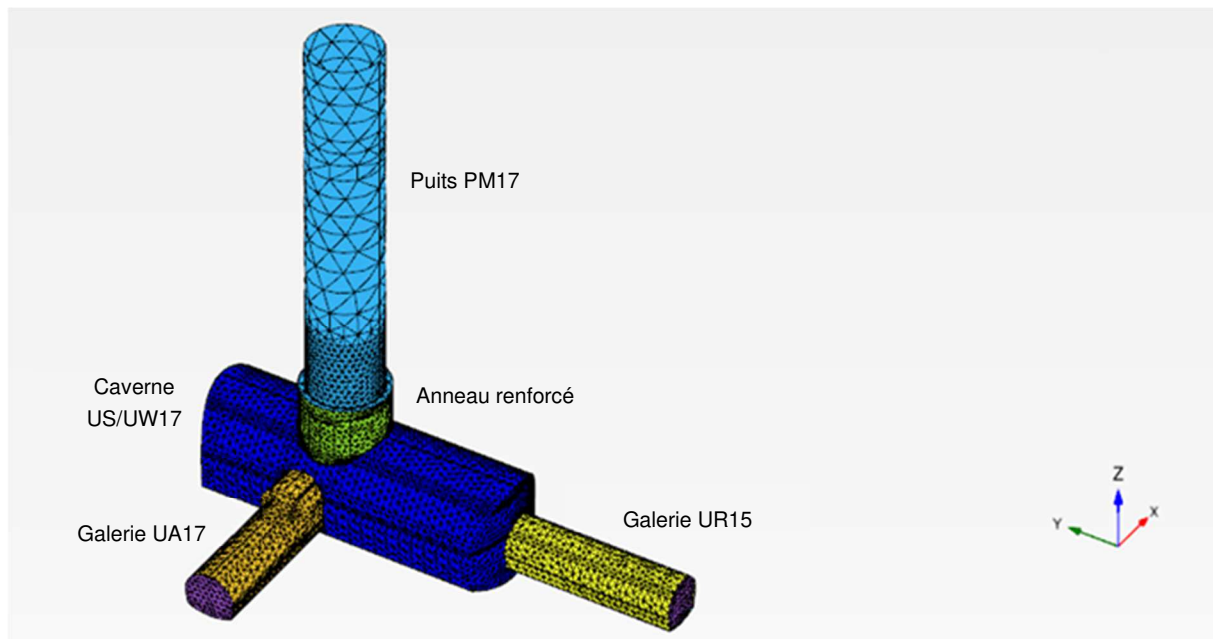


Figure 4. Modélisation 3D de la caverne US/UW17

Nous avons à travers ce modèle, tenté de reproduire le plus fidèlement possible le comportement du massif molassique. Nous avons ainsi opté pour une approche non-linéaire de type Hoek & Brown, considéré l'anisotropie du massif présentée au chapitre 2.3, et modélisé toutes les couches de sol, notamment les couches marneuses très fines.

4.2 Premiers résultats issus de la modélisation aux Eléments finis

Dès l'obtention des premiers résultats, il a rapidement été mis en évidence que l'excavation de la caverne US/UW17 au sein de la molasse anisotrope, génère des contraintes asymétriques élevées dans la masse rocheuse à proximité de la zone de connexion entre la caverne et le puits.

Ces apports de contraintes occasionnent alors des moments de flexion importants et l'apparition d'une compression très élevée dans le béton projeté du soutènement provisoire de la caverne dans les quelques mètres les plus proches de la connexion. L'image de la Figure 5 montre le diagramme de répartition des sollicitations non pondérées sous effort normal dans le béton projeté de la caverne US/UW17, selon sa direction transversale.

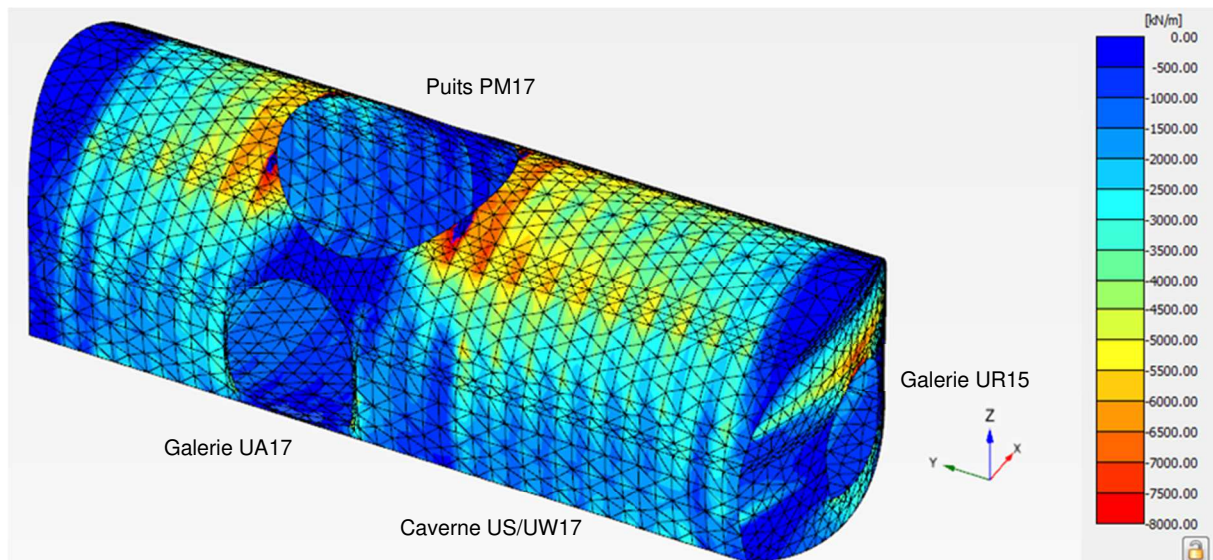


Figure 5. Répartition des sollicitations sous effort normal dans le béton projeté de la caverne US/UW17

Nous notons que localement à proximité de la connexion, les contraintes sont de l'ordre de 25 MPa à l'Etat Limite de Service (ELS), et sont donc bien au-delà de la limite structurellement admissible pour une coque en béton projeté de 25 cm d'épaisseur.

Afin de viser une contrainte moyenne acceptable dans la coque de béton projeté, une première solution aurait été d'augmenter son épaisseur, et donc de passer de 25 cm à environ 50 / 60 cm d'épaisseur.

Mais cette solution a rapidement été abandonnée car outre les conséquences sur le budget de l'opération, un renforcement drastique du soutènement et donc de sa rigidité impliquerait une augmentation de ses sollicitations.

4.3 Recherche d'une solution alternative

Afin de proposer une conception plus optimisée, il a été développé une solution technique permettant de limiter les sollicitations dans le soutènement provisoire de la caverne US/UW17, en intégrant à la coque de béton projeté des éléments compressibles en béton, dispositifs utilisés auparavant pour certains grands projets d'ouvrages souterrains présentant de fortes convergences à court ou long terme (Bonnet-Eymard et al. 2011, Henry 2011).

Les éléments compressibles ont été intégrés au niveau de la voûte et au niveau de la connexion entre le puits et la caverne (zones les plus sollicitées), afin de diminuer la rigidité de la coque en béton projeté, de lui permettre plus de déformation, et par conséquent, de réduire ses sollicitations.

4.4 Calage de la solution alternative via une approche aux Eléments Finis en 2D

Le calage de la solution alternative a été effectué via une approche aux Eléments Finis en 2D à l'aide du logiciel Plaxis 2D à partir de deux modèles :

- Le premier modèle « Modèle de référence », a été exécuté sans considérer d'élément compressible en voûte de la caverne, et a été calé en effort à partir des résultats du modèle aux Eléments Finis en 3D présenté au chapitre 4.2 ;
- Dans le second modèle « Modèle avec éléments compressibles », les éléments compressibles ont été considérés en voûte de la caverne.

L'analyse des résultats de cette étude comparative, a permis de mettre en évidence l'impact lié à la mise en place des éléments compressibles au sein du soutènement. En effet, comme mis en évidence par les diagrammes des Figures 6 et 7, les sollicitations liées aux efforts normaux déterminées dans le « Modèle avec éléments compressibles » sont deux fois moins importantes que celles déterminées avec le modèle tridimensionnel initial (Plaxis 3D) et le « Modèle de référence ». Il en est de même pour les sollicitations de flexion, mais selon un facteur nettement moins notable.

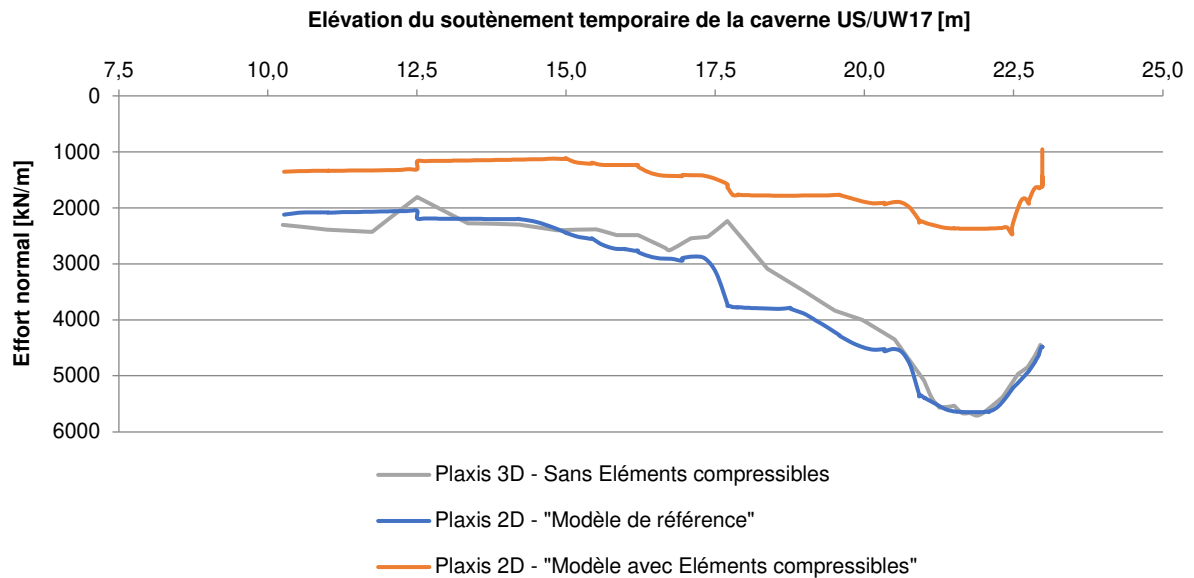


Figure 6. Sollicitations sous effort normal dans le béton projeté de la caverne

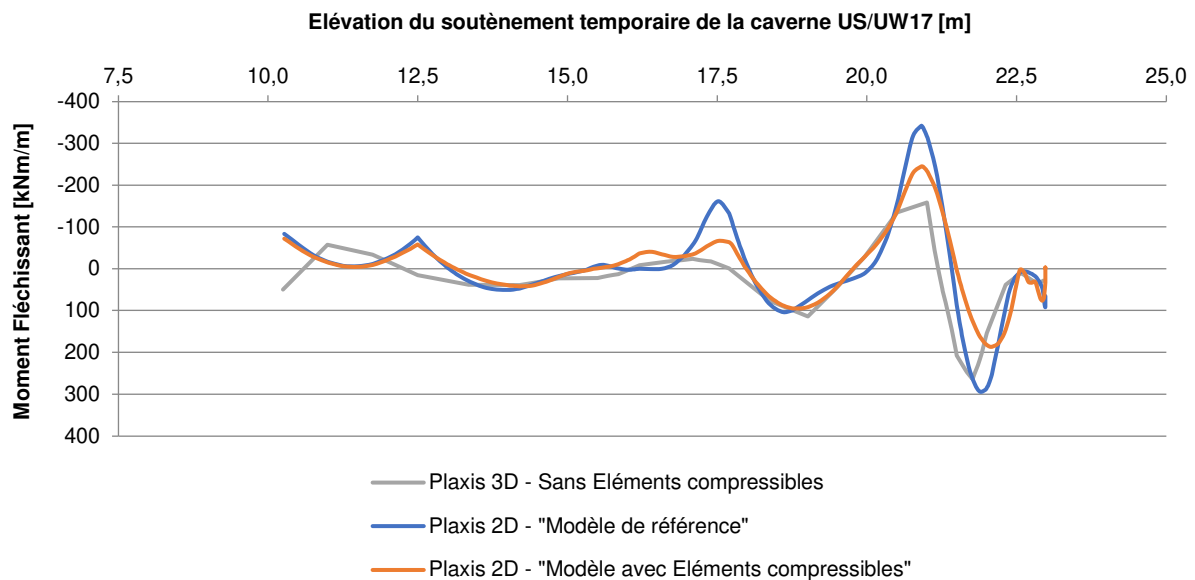


Figure 7. Sollicitations sous moment de flexion dans le béton projeté de la caverne

Les résultats de cette analyse comparative valident donc en deux dimensions que la mise en œuvre d'éléments compressibles en voûte de la caverne US/UW17 permet de réduire les sollicitations dans le soutènement provisoire.

4.5 Validation de la solution alternative via une approche aux Eléments Finis en 3D

Le modèle tridimensionnel Plaxis 3D prend en compte des éléments compressibles en voûte de la caverne US/UW17 et également à l'interface entre le puits renforcé et la caverne du fait de leur rigidité respective (puits quasi-indéformable au regard du soutènement « souple » de la caverne).

Les résultats de la modélisation aux Eléments Finis en 3D permettent de valider l'intérêt de l'utilisation des éléments compressibles. La Figure 8 fait apparaître les contraintes au sein du soutènement avec ou sans la prise en compte des éléments compressibles. La coque de béton projeté de classe C35/45 a ainsi été maintenue à 25 cm d'épaisseur, et les zones très partiellement tendues au-delà de la limite admissible ont été traitées par l'ajout de treillis soudés.

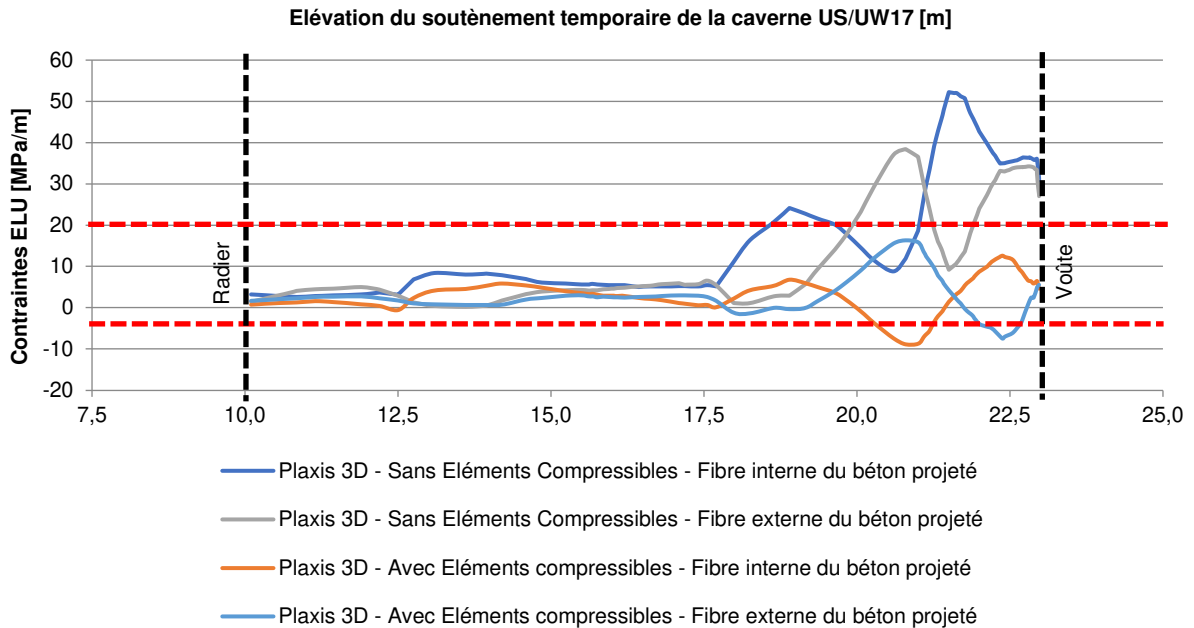


Figure 8. Diagramme des sollicitations en contrainte dans le soutènement de la caverne US/UW17

4.6 L'intégration des éléments compressibles au soutènement de la caverne

Les éléments compressibles ont été mis en œuvres en voûte de la caverne, et à l'interface entre l'anneau renforcé et la voûte de la caverne.

Leur installation a été effectuée sur la base d'un plan de phasage de pose (cf. Figure 9) et d'un cahier des charges particulier établis selon le cahier des charges Solexperts (2016).

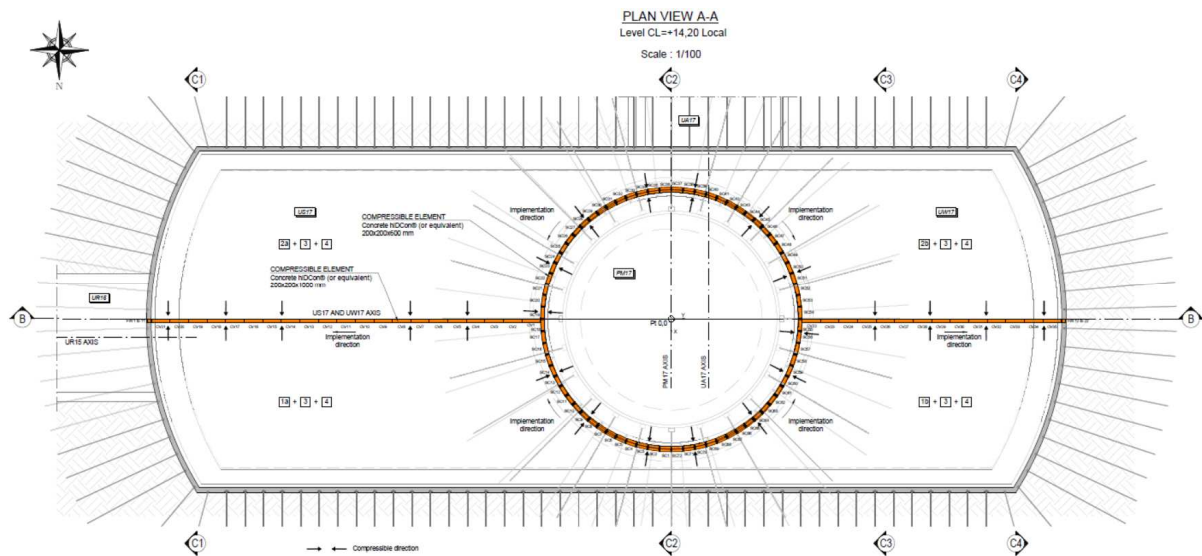


Figure 9. Extrait du plan de phasage de pose des éléments compressibles de la caverne US/UW17

5 Application en phase travaux

5.1 La pose des éléments compressible

Par application directe du plan de pose présenté en Figure 9, les éléments compressibles ont été installés par l'entreprise Marti Tunnel AG au fur et à mesure de l'avancement des travaux d'excavation de la caverne US/UW17 (cf. Figure 10).



Figure 10. Installation des éléments compressibles entre le puits renforcé PM17 et la caverne US/UW17

5.2 Le suivi de l'instrumentation de la caverne US/UW17

L'excavation de la caverne US/UW17 a débuté mi-février 2019 et s'est terminée début juin 2019. Au cours des travaux d'excavation, une instrumentation importante a été mise en œuvre (cf. Figure 11) pour assurer le suivi du comportement de l'ouvrage (déformations, contraintes dans le soutènement).

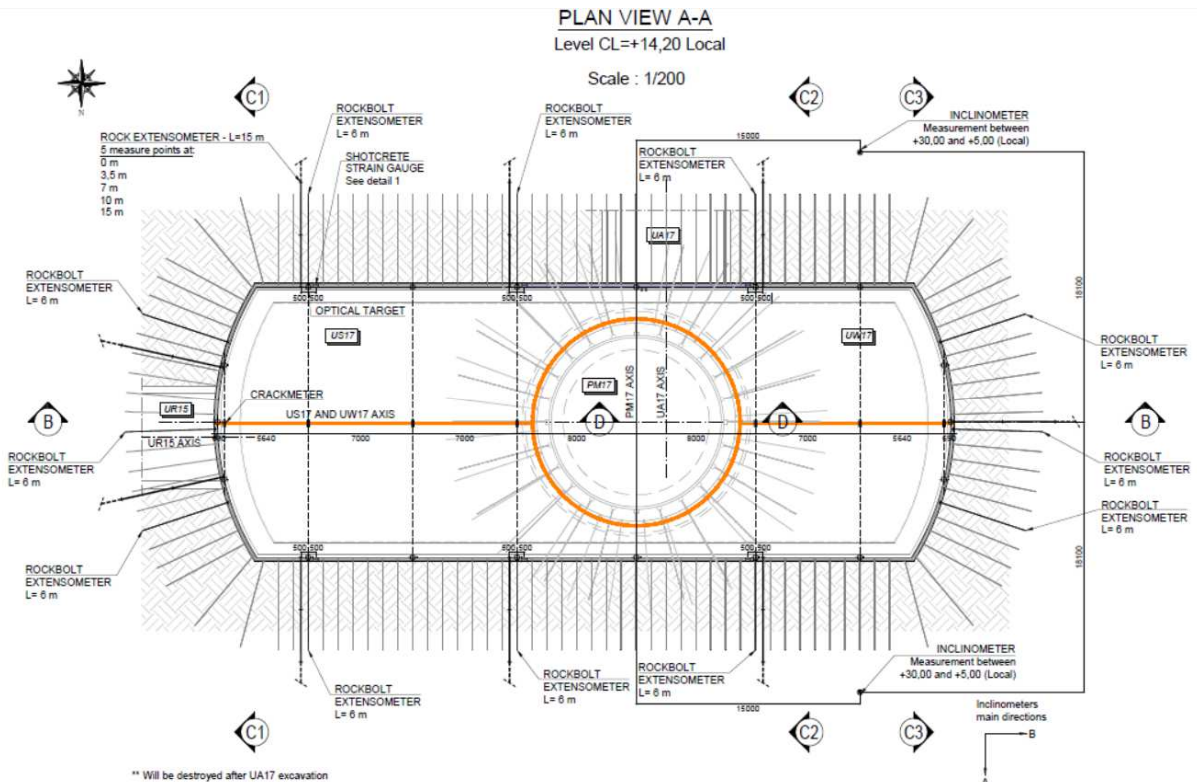


Figure 11. Instrumentation mise en œuvre dans le soutènement de la caverne US/UW17

En section courante de la caverne US/UW17, 5 profils transversaux de mesure dont :

- 3 sections entièrement instrumentées comprenant la pose d'extensomètres radiaux de 15 m de longueur, de jauges d'efforts sur boulons, de jauges de contraintes dans le béton projeté, de fissuromètres, ainsi que de cibles de convergences.
- 2 sections partiellement instrumentées comprenant uniquement la pose de cibles de convergences.

Sur chaque mur de front de la caverne US/UW17, 1 profil de mesure comprenant :

- La pose d'extensomètres radiaux de 15 m de longueur, de jauges d'efforts sur boulons, d'une jauge de contrainte dans le béton projeté, d'un fissuromètre ainsi que de cibles de convergences.

Environ 8 mois après la fin des travaux de la caverne US/UW17 et respectivement 7 et 9 mois après le début des excavations des galeries UA17 et UR15, un état des lieux de toute l'instrumentation posée dans la caverne a été effectué. Les mesures étaient stables ou tendaient à se stabiliser :

- Sur 80 % des instruments, les mesures étaient stables depuis plusieurs mois
- Sur les 20% restants, les mesures étaient en cours de stabilisation.

En outre, toutes les mesures effectuées étaient en dessous des seuils de vigilances ou d'alertes en déplacements (cf. Tableau 1), en contraintes (cf. Tableau 2) et en effort (cf. Tableau 3) fixés dans les spécifications du marché.

Tableau 1. Déplacements mesurés et estimés du béton projeté de la caverne US/UW17

Direction des Déplacements	Déplacements mesurés pour le béton projeté [mm]	Déplacements estimés dans les Modèles EF [mm]	Seuil d'alerte contractuel défini dans le marché [mm]
Horizontaux	1 à 15, $\bar{x} < 10$	20 à 45	50
Verticaux	1 à 3, $\bar{x} = 1$	10 à 20	20

Tableau 2. Contraintes mesurées et estimées dans le béton projeté de la caverne US/UW17

Localisation	Contraintes mesurées dans le béton projeté [MPa]	Contraintes estimées dans les Modèles EF [MPa]	Seuil d'alerte contractuel défini dans le marché [MPa]
En clef de voûte	1 à 6, $\bar{x} = 3$	4 à 6	20
En voûte	1 à 12, $\bar{x} = 6$	2 à 4	20
En piédroit	1 à 9, $\bar{x} = 3$	1 à 3	20

Tableau 3. Efforts dans les boulons d'ancrage de la caverne US/UW17

Localisation	Efforts mesurés dans les boulons d'ancrage [kN]	Efforts estimés dans les Modèles EF [kN]	Seuil d'alerte contractuel défini dans le marché [kN]
En clef de voûte	10 à 170, $\bar{x} = 50$	30 à 80	200
En voûte	10 à 180, $\bar{x} = 60$	20 à 160	200
En piédroit *	10 à 110, $\bar{x} = 50$	50 à 80	200

* A noter : La maille du boulonnage a été relâchée au niveau des piédroits (passage de 1 m x 1 m à 2 m x 2 m) du fait de la bonne réponse de la structure et des faibles convergences du massif, la comparaison présentée est donc biaisée.

Nous retiendrons de cette analyse que les efforts et les contraintes mesurées dans le soutènement de la caverne US/UW17 (cf. Tableaux 2 et 3) sont du même ordre de grandeur que ceux estimés dans les modélisations aux éléments finis en 2D et 3D. En revanche, comme mis en évidence dans le Tableau 1, les déformations mesurées sont inférieures à celles estimées.

Un recalage des modèles aux Eléments Finis est prévu au cours du premier semestre 2020 afin de réévaluer les paramètres de sol en fonction des lithologies observées, du soutènement mis en œuvre et de l'ensemble des résultats d'instrumentation disponibles. Ce recalage permettra notamment de réévaluer les contraintes transmises au revêtement final de la cavité US/UW17 dans l'objectif de son éventuelle optimisation (réévaluation de la forme de la contre-voûte, réduction de l'épaisseur de la voûte et de son renforcement).

5.3 Optimisation du phasage d'excavation de la cavité US/UW17

Comme présenté au chapitre 3, le phasage d'excavation de la voûte de la cavité a été subdivisé en deux sections (cf. Figure 3). Il était initialement envisagé durant les études d'exécution d'excaver la totalité de chaque phase dans son intégralité avant de débuter une nouvelle phase.

Du fait de l'installation des éléments compressibles en voûte de la cavité et à l'interface entre le puits et la cavité, les différentes coques en béton projeté de la cavité avaient un fonctionnement totalement indépendant les unes des autres.

Le phasage de réalisation de la voûte de la cavité a ainsi pu être adapté, ce qui a permis d'avoir jusqu'à trois fronts d'attaques en parallèle (fronts 1A, 2A et 1B concomitants, cf. Figures 12 et 13). Les travaux ont donc été très optimisés du fait de la possibilité de rotation des tâches d'excavation, de boulonnage et de bétonnage.

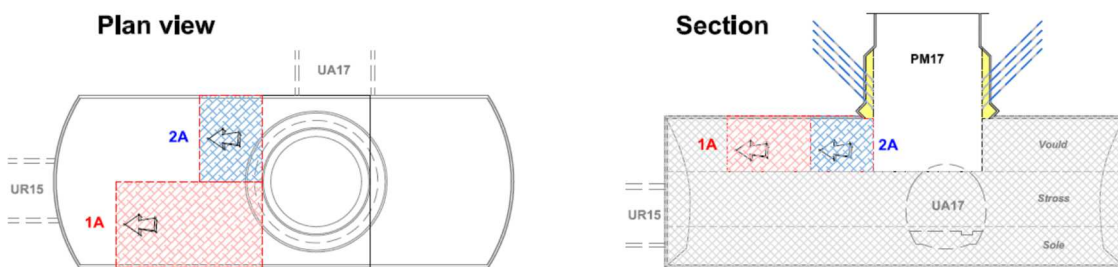


Figure 12. Optimisation du phasage d'excavation de la voûte de la cavité US/UW17 (1/2)

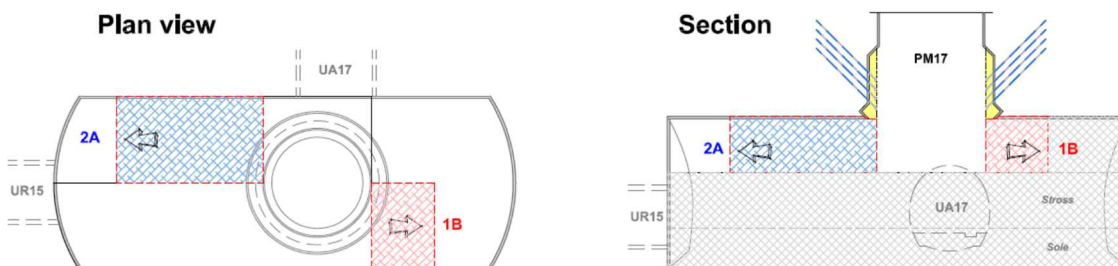


Figure 13. Optimisation du phasage d'excavation de la voûte de la cavité US/UW17 (2/2)

5.4 Optimisation du boulonnage de la cavité US/UW17

La coque en béton projeté est ancrée à des auréoles de boulons en acier à ancrage réparti et injectés au ciment sur une longueur de 6 m. Dans les études d'exécutions, le maillage retenu (1 m x 1 m) était très serré.

Le suivi renforcé de l'instrumentation mise en œuvre (présentée au chapitre 5.2) et des conditions géologiques observées, a permis de réduire la quantité du boulonnage en dehors de la zone d'influence du puits et du puits renforcé, zone estimée à 10 m autour du puits (soit environ un diamètre) selon la modélisation aux Eléments Finis tridimensionnelle.

Par application de la méthode observationnelle, le nombre d'ancrages en acier a été réduit de moitié, et le nombre d'ancrages en fibre de verre, de l'ordre de 80% (cf. Tableau 4).

Tableau 4. Optimisation du boulonnage de la caverne US/UW17

Type de boulonnage	Soutènement mis en œuvre	Soutènement prévu dans les plans d'exécutions
Quantité de Boulons HA injectés au mortier	800	1500
Quantité de Boulons Fibre de Verre injectés au mortier	50	250

6 Conclusion

Les éléments compressibles étaient jusqu'alors intégrés à des soutènements boulonnés ou cintrés en section courante pour la maîtrise des convergences dans des terrains sujets à fortes déformations à court ou long terme. A travers cette étude, nous avons mis en évidence par la modélisation aux éléments finis, qu'il était également possible d'obtenir des résultats très satisfaisants, par l'utilisation de ces éléments compressibles dans des zones d'interfaces complexes, et notamment à la jonction entre le puits PM17 et la caverne US/UW17 de grande dimension, deux ouvrages au comportement structurel très différents.

Le suivi permanent des travaux d'excavation et l'application de la méthode observationnelle, a ainsi permis d'optimiser le phasage d'excavation et le soutènement 'souple' de la caverne US/UW17, notamment via la réduction de la densité du maillage des ancrages.

Par la suite, un recalage des modèles aux Eléments Finis sera réalisé dans l'objectif d'optimiser le revêtement définitif de la caverne US/UW17.

7 Références

- Henry, A. 2011, Conception d'une nouvelle méthode de soutènement, Descenderie de Saint-Martin La Porte. HAL Id, hal-00595361
- Bonnet-Eymard, T., et al. 2011, Soutènement souple pour le creusement de galeries dans les argilites du CMHM. Publication AFTES
- Solexperts, 2016. Manuel technique Solexperts, Installation manual hiDCon elements in combination with lattice girders