

Zeitschrift: Tracés : bulletin technique de la Suisse romande
Herausgeber: Société suisse des ingénieurs et des architectes
Band: 130 (2004)
Heft: 12: Cern construction du LHC

Artikel: Les cavernes pour l'expérience CMS
Autor: Stevenson, Martin
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-99319>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 18.03.2025

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

Les cavernes pour l'expérience CMS

GÉNIE CIVIL

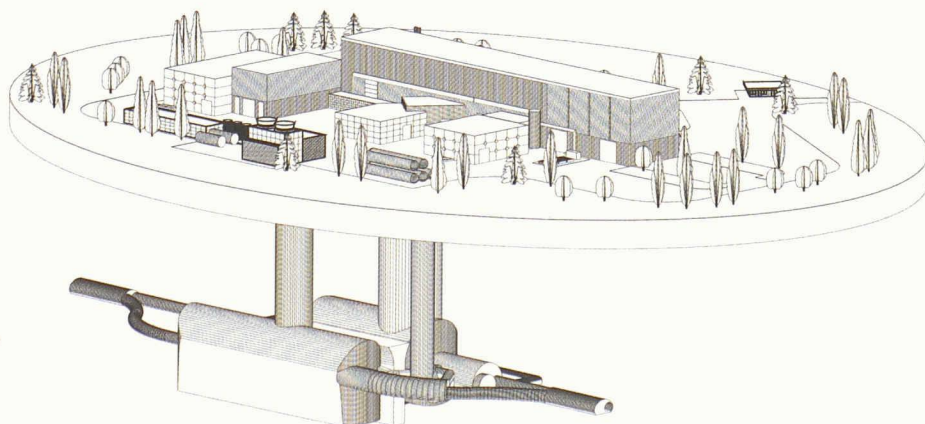
L'aménagement du point 5 mis en place dans le cadre du LEP a dû être considérablement modifié et complété pour accueillir le détecteur de l'expérience CMS (Compact Muon Solénoïd) du projet LHC. En souterrain, cette extension prévoit essentiellement la réalisation de deux puits de gros diamètre et de deux énormes cavernes à quelque 90 m de profondeur, ces ouvrages impliquant tout un système de tunnels et de cavernes secondaires (fig. 1). Ces aménagements comprennent également la réalisation en surface de bâtiments prévus pour le montage et l'entretien du détecteur CMS. Les deux cavernes ont une portée totale d'environ 50 m sous une couverture rocheuse de 20 m seulement. Les exemples de travaux d'une telle ampleur sont rares, tout particulièrement dans des roches stratifiées présentant une faible résistance.

Conditions géologiques et dimensions principales

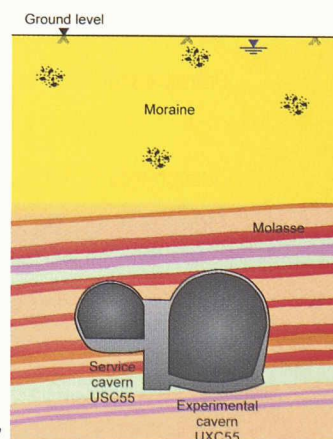
Le sol du site de construction du point 5 se compose de molasses fortement consolidées, recouvertes par environ 50 m de moraines hétérogènes avec une nappe phréatique à faible profondeur. Les molasses, qui se sont déposées pendant l'oligocène et le miocène, présentent des séquences

complexes et alternées de marnes et de grès dont les épaisseurs varient entre 0,1 et 3,0 m. Si les grès et les grès marneux sont très résistants, les marnes fissurées créent des zones de faible résistance dans la masse rocheuse. Par ailleurs, compte tenu de leur sensibilité à l'eau, elles peuvent subir des gonflements importants et des pertes de résistance. De plus, leur comportement évolue avec le temps (*time dependant behaviour*).

La disposition de l'équipement scientifique de la caverne expérimentale (UXC55), destinée à accueillir le détecteur du CMS, imposait qu'elle soit centrée sur l'axe du tunnel du LEP, situé lui-même à 90 m sous le niveau du sol au point 5. Cette première caverne a une largeur de 29 m, une hauteur de 33 m pour une longueur de 52 m. Afin de réduire au minimum les temps de transfert des données entre le détecteur et le centre d'enregistrement des mesures, la caverne de service - 21 m de large, 16 m de haut pour une longueur de 85 m - devait être située aussi près que possible de la première caverne. L'excavation de ce système de cavernes dans de telles conditions géologiques (fig. 2 et 3) constituait un défi de choix pour les ingénieurs responsables des travaux : des déformations excessives dans le massif rocheux risquaient en effet d'engendrer des infiltrations d'eau et une diminution progressive de la résistance pouvant conduire à une rupture.



1



2

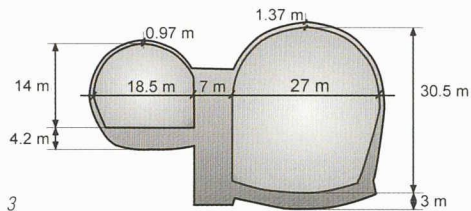


Fig. 1 : Vue générale des installations au point 5
 Fig. 2 : Répartition en différentes unités géotechniques des couches autour des cavernes

Fig. 3 : Coupe transversale des cavernes pour l'expérience CMS

Les exemples de cavernes souterraines ayant une portée supérieure à 30 m sont relativement rares : en fait, pour des conditions relativement similaires, les seuls exemples existants concernent des cavernes réalisées au CERN dans le cadre du projet LEP, où des portées allant jusqu'à 22 m avaient été atteintes.

Conception générale

La conception du système de cavernes a été l'objet de plusieurs variantes visant à développer un système assurant le soutènement de la voûte, tout en garantissant que les déformations du massif rocheux demeurent limitées, et que des éventuelles venues d'eau issues de la moraine n'entraînent pas de pertes excessives de la résistance de la molasse. Toutefois, compte tenu de la géométrie des cavernes, ces solutions visant à limiter fortement les déformations de la roche par la mise en place, avant excavation, d'éléments de paroi et de toiture rigides se seraient révélées peu économiques et auraient entraîné des difficultés importantes durant les travaux.

En conséquence, la solution retenue supposait d'accepter des déformations plus importantes du massif rocheux et d'utiliser au mieux la forme en arc de la caverne pour augmenter sa résistance, ceci tout en prévoyant des renforcements adéquats pour les zones soumises à de fortes contraintes. Cette solution offrait des avantages économiques, notamment en réduisant au minimum le renforcement de la roche en place tout en permettant l'utilisation de méthodes traditionnelles par étape pour l'excavation et le soutènement de la caverne. On a choisi d'effectuer un dimensionnement prudent combiné avec une surveillance des étapes clés, laquelle devait permettre de confirmer les résultats des calculs de dimensionnement. Si cette méthode présente quelques similitudes avec la « méthode observationnelle » souvent utilisée en travaux souterrains, cette dernière ne pouvait cependant pas s'appliquer en raison de l'ampleur des travaux et des difficultés qu'engendreraient des éventuels renforcements en cours d'exécution.

Par ailleurs, afin de minimiser les venues d'eau en provenance des moraines, un réseau de drains a été installé au sommet de la molasse, ce dispositif présentant le double avantage de réduire les risques d'adoucissement (*softening*) de la molasse fortement sollicitée, tout en augmentant les contraintes effectives de confinement et, par voie de conséquence, la résistance au cisaillement.

Pour réaliser des cavernes d'une telle portée, il est nécessaire de réduire les interactions entre les deux cavités à des niveaux acceptables. Cela signifie notamment que le point

d'appui entre les deux cavernes joue un rôle capital. Compte tenu de la qualité de la molasse, il a été admis qu'elle ne serait pas à même d'offrir une résistance suffisante et il a été décidé de la remplacer, avant l'excavation des cavernes, par un pilier en béton armé d'une épaisseur de 7 m pour une longueur de 28 m. Ce pilier permettait par ailleurs de répondre aussi bien aux critères fixés par les scientifiques concernant la protection contre les radiations que les impératifs des ingénieurs pour la reprise des charges des toitures des cavernes.

Analyse et dimensionnement

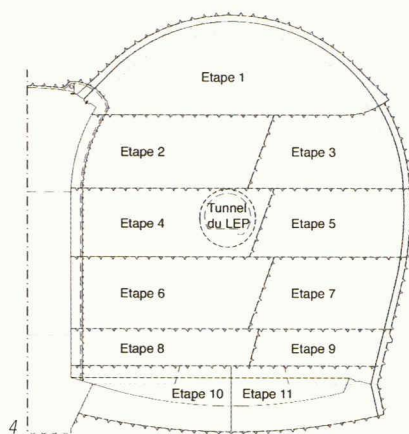
La complexité d'un tel système de cavernes impose d'envisager plusieurs approches pour la conception et le dimensionnement de ses éléments. Il est notamment nécessaire d'utiliser différents outils analytiques pour définir une solution aussi efficace que possible. Dans le cas présent, des modélisations en trois dimensions ont été effectuées pour évaluer les interactions entre les deux cavernes et les divers éléments les entourant (puits d'accès, tunnels et cavernes secondaires). Selon les choix géométriques et les étapes de construction, les résultats de cette analyse ont permis de repérer les zones de fortes sollicitations, zones qui ont alors pu être étudiées en détail. Les cavernes principales ont été modélisées en deux dimensions avec un système numérique de différences finies qui permettait une définition plus détaillée des séquences rencontrées dans les molasses. Partant des données géologiques, la molasse a été décomposée en cinq unités géotechniques distinctes, permettant la description des couches de molasse entre lesquelles les horizons marneux de faible résistance étaient définis comme des éléments d'interface (fig. 2).

Le choix des propriétés géomécaniques pour les différentes unités géotechniques tient compte des propriétés des matériaux en place et de leurs conditions réelles de chargement (nature et direction). Cette méthode prévoit de commencer par déterminer les propriétés des matériaux à partir d'essais en laboratoire. Les valeurs ainsi obtenues sont ensuite affinées pour tenir compte des effets d'échelle, de la teneur en eau et de l'évolution du comportement avec le temps, pour finalement être ajustée itérativement de façon à correspondre aux conditions réelles de déformations. Les résistances retenues ont systématiquement été comprises entre les valeurs de pics et les valeurs résiduelles, ces dernières étant notamment utilisées pour les mauvaises couches marneuses. Lors des itérations, une attention particulière a été portée à la compatibilité des déformations entre les différentes unités utilisées pour la modélisation des roches d'une part et entre ces roches et leurs dispositifs de renforcement d'autre part.

Fig. 4 : Schéma des étapes d'excavation pour la caverne UXC55

Fig. 5 : Vue - depuis le tunnel du LEP - de la caverne UXC55 pendant son excavation

(Tous les documents illustrant cet article ont été fournis par l'auteur)



Le dimensionnement de la voûte et des parois de la caverne prend en compte le maillage créé par le boulonnage servant à la consolidation de la roche - boulons dont la longueur varie en fonction de la position - et la couche en béton projeté recouvrant les parois d'excavation. Par ailleurs, le CERN a exigé que la construction soit parfaitement étanche, raison pour laquelle des étanchéités entre le béton projeté et la couche finale en béton armé ont été mises en place, dispositif qui a été complété par un système de drains.

Exécution des travaux

Les travaux au point 5 ont débuté en 1997 par le percement de deux puits de 21 et 12 m de diamètre. Ces puits traversent les moraines aquifères pour atteindre la molasse dans laquelle sont excavées les cavernes pour l'expérience CMS. La solution retenue pour la traversée des moraines a été de congeler le sol pour permettre une excavation traditionnelle. Après avoir injecté la moraine pour réduire sa perméabilité, le sol a été congelé en faisant circuler une solution de saumure à -28°C dans les puits. Cependant, en raison des vitesses d'écoulement très élevées dans la nappe phréatique, ce seul dispositif s'est révélé insuffisant pour assurer une congélation complète du sol, ce qui a nécessité la mise en place de puits supplémentaires et l'utilisation d'azote liquide.

Une fois la congélation du sol devenue effective, l'excavation et la pose du revêtement primaire en béton projeté et par étapes de 3 m a pu commencer. Dans la molasse, le revêtement primaire se compose de béton projeté combiné avec des tirants d'ancrage pouvant atteindre jusqu'à 6 m de long. Ce revêtement a été complété par une seconde couche en béton armé mise en place à l'aide d'un coffrage glissant.

La mise en place de l'énorme pilier en béton armé séparant les deux cavernes devait impérativement précéder l'excavation des cavernes principales et sa réalisation - excavation et bétonnage - a été effectuée à partir du pied du petit puits. Durant ces travaux, des mesures ont permis de suivre

l'évolution à long terme des déformations dans la molasse: après environ six mois, il a été constaté que les déformations ne se stabilisaient pas aussi vite que prévu et que leur variation dans le temps demeurait quasiment constante. Cette évolution du comportement avec le temps était moins favorable que celle qui avait pu être extrapolée à partir des essais en laboratoire, ce qui a conduit à une révision du dimensionnement des cavernes. Cette révision a pu être calée à partir des mesures faites sur l'excavation du pilier, l'évolution du comportement avec le temps étant simulée par un modèle visco-élastique.

L'excavation de la caverne principale prévoyait 11 étapes avec une attaque par le haut comprenant jusqu'à 5 couches (fig. 4). Des zones de 2 à 3 mètres étaient excavées, la roche étant immédiatement recouverte par la projection d'une couche de béton étanche (fig. 5). Le premier revêtement des cavernes se compose d'une couche de 35 cm de béton de fibres projeté avec des poutres et des armatures en treillis, complétée par des boulons jointoyés pouvant atteindre jusqu'à 12 m de long. La seconde couche de revêtement est faite d'environ 80 cm de béton armé coulé sur place.

Conclusion

La réalisation des gigantesques cavernes pour l'expérience CMS constitue un exemple sans précédent pour l'exécution de tels ouvrages dans des conditions géologiques peu favorables. Les travaux présentés mettent notamment en évidence que le suivi du comportement *in situ* des roches - effectué durant l'excavation du pilier - s'est révélé décisif pour les choix retenus.

L'auteur tient ici à remercier les ingénieurs et les scientifiques du CERN ainsi que ses collègues pour leur excellente collaboration tout au long de ce projet.

Martin Stevenson, ing. civil
Directeur du département ingénierie
Jacobs - Geoconsult - SGI Joint Venture
427 London Road, RG6 1BL, GB - Reading (Berkshire)