

# Système déformable modulaire pour les tunnels en terrain fortement gonflant

## Modular yielding support for tunnels in heavily swelling rock

Kalman KOVÁRI - Ingénieur conseil  
Flavio CHIAVERIO - Aegerter & Bosshardt AG

**RESUMÉ:** L'expérience montre qu'un nombre important de tunnels creusés dans des terrains très gonflants, comme le Keuper gypseux, ont dû être précocement assainis. Ceci a forcément entraîné une restriction temporaire, voire l'arrêt complet de leur exploitation. Dans la planification de nouveaux grands projets d'infrastructures de transport, on s'efforce de garantir une disponibilité illimitée des ouvrages durant 50 à 100 ans. Dans les massifs à fort potentiel de gonflement, cet objectif pourra être atteint grâce à une nouvelle conception du soutènement, le « Système Déformable Modulaire ». Celui-ci permet d'une part de limiter la pression de gonflement à une valeur maximale prédéfinie en plaçant des éléments déformables à haute capacité portante entre le soutènement et le massif rocheux. D'autre part, l'assainissement par le remplacement de ces éléments est possible à tout moment sans gêner le trafic. L'accès direct à la partie du radier exposée au gonflement rend aussi possible une évacuation efficace de l'eau et un contrôle simplifié du comportement de l'ouvrage. Le Système Déformable Modulaire a fait ses preuves de manière optimale au tunnel routier du Chienberg en Suisse, dans des tronçons sous faible couverture présentant du Keuper gypseux sous le radier et des terrains meubles au-dessus de la calotte.

**ABSTRACT:** Experience shows that even in recent times many tunnels located in heavily swelling rock, e.g. gipskeuper, have had to be reconstructed. This inevitably involves a temporary interference with or even a suspension of tunnel operations. Thus in the planning of important new traffic infrastructure projects efforts are being made to provide unlimited use of the structures for a working life of 50 to 100 years. In strongly swelling rock this goal can be achieved by using the new design concept called « Modular Yielding Support », in which compressible elements of high bearing capacity are placed between the structure and the rock. On the one hand, this method permits a reduction of swelling pressure to a predetermined maximum value. On the other hand, replacement of these elements is possible at any time without impairing the flow of traffic. By providing direct access to the base of the tunnel, the region that is most endangered by swelling processes, an efficient control of ground water and a simple monitoring of ground behaviour is possible. The modular yielding support system has been successfully employed in the Chienberg road tunnel in Switzerland in the tunnel sections with gipskeuper at the base of the tunnel, with soil covering the crown of the tunnel as well as a small depth of overburden.

### 1 - INTRODUCTION

Les roches composées d'argile et d'anhydrite ont la propriété de voir leur volume s'accroître lors de l'absorption d'eau. On dit que ces roches sont gonflantes. Lors de la construction de tunnels, le gonflement se manifeste par un soulèvement du radier, ou, si celui-ci est empêché, par l'augmentation de la pression sur la contre-voûte (Fig. 1). Cette pression est qualifiée de pression de gonflement. L'expérience montre que dans de nombreux cas, la pression de gonflement détruit le radier, du moins par endroits, et que le tunnel doit ensuite être assaini. Dans le cas d'une faible couverture ou d'un terrain très déformable, le tunnel entier peut se soulever, ce qui peut même provoquer des soulèvements en surface [1]. Les soulèvements dus au gonflement varient le long du tunnel, ce qui provoque entre autres la formation de fissures typiques en diagonale dans le revêtement. Ceci demande également des opérations d'assainissement [2]. Des limites strictes pour les soulèvements admissibles ont été fixées en particulier pour les tunnels ferroviaires destinés aux trains à grande vitesse, de sorte que dans ce cas, l'état de service est souvent plus difficile à respecter qu'en capacité portante.

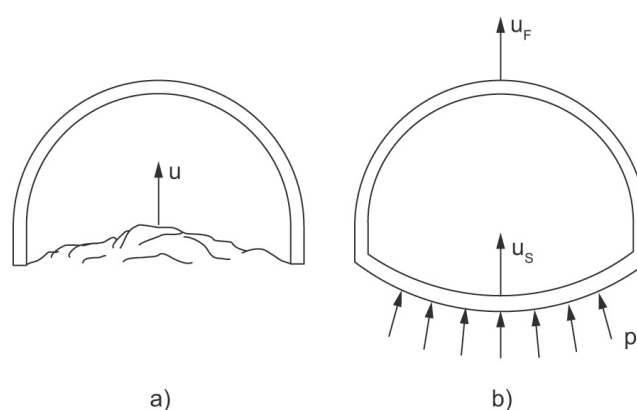


Fig. 1: Répercussion du gonflement sur le tunnel [1]

- a) soulèvement du radier
- b) pression de gonflement avec ou sans soulèvement du tunnel

L'histoire ancienne et plus récente de la construction de tunnels montre que les tunnels dans des terrains gonflants sont susceptibles de dégâts, en particulier dans le Jura suisse et le sud de l'Allemagne avec une grande quantité de formations géologiques à gypse et à anhydrite. Une grande quantité de tunnels ont dû être assainis au cours du temps, et même plusieurs fois sur certains tronçons. En Suisse, on peut citer par exemple les tunnels ferroviaires du Hauenstein, du Ricken ainsi que les tunnels autoroutiers du Belchen et du Seelisberg [3], de même que le tunnel routier de Wagenburg [2] aux environs de Stuttgart en Allemagne.

Les travaux d'assainissement consistent en général à démolir la contre-voûte existante, purger le radier, puis reconstruction une nouvelle contre-voûte ou même refaire complètement le revêtement du tunnel. Ces opérations sont très longues et onéreuses. Jusqu'à présent, une exploitation réduite du tunnel, voire même une fermeture temporaire pendant toute la durée de ces travaux, est généralement encore tolérée. Le tunnel est par exemple fermé la nuit ; si le tunnel ferroviaire ou routier a deux voies, tout le trafic est transféré sur une seule voie ; dans le cas de tunnels autoroutiers à deux tubes, un seul tube est maintenu en exploitation dans les deux sens. Ces conditions difficiles ralentissent la progression des travaux, si bien que la limitation de l'exploitation peut parfois durer des années. Le tunnel de base du Hauenstein précité, au sud de Bâle et long de 8.1 km, en est un exemple. Il a été construit entre 1912 et 1916 et assaini pour la première fois entre 1919 et 1923. Le dernier assainissement (1980 – 1986) a duré environ 6 ans [4].

Ces dernières années, on constate néanmoins un changement dans l'acceptation de grandes restrictions d'exploitation. Les infrastructures de transport modernes sont largement interconnectées et demandent de plus en plus une disponibilité des tunnels sans restriction d'exploitation, ceci d'autant plus que le trafic augmente constamment.

Un bon exemple est le tunnel du Belchen sur l'autoroute A2. Long de 2.3 km, il traverse des formations similaires au tunnel de base du Hauenstein (Keuper gypseux, Argile à Opalines) [3], [4].

Il est prévu d'y percer un troisième tube afin de pouvoir y maintenir le trafic durant des travaux d'assainissement à grande échelle. Ceci sans augmentation de la capacité, mais simplement pour assurer la disponibilité de l'ouvrage existant.

Tout ceci montre que les tunnels importants percés dans des formations gonflantes devront à l'avenir garantir une exploitation sans restriction. Cette exigence pourra être remplie avec le « Système Déformable Modulaire » conçu par K. Kovári. Celui-ci vise un objectif triple : limiter la pression de gonflement sur le soutènement à une valeur prédéfinie ; effectuer les travaux d'entretien sous le radier sans perturbation du trafic ; éliminer l'eau de façon efficace. La technologie a été appliquée pour la première fois dans le tunnel du Chienberg, dont le cas sera détaillé plus loin [5, 6].

## 2 - LE PHÉNOMÈNE DE GONFLEMENT AUTOUR D'UN TUNNEL

Depuis les débuts de la construction des chemins de fers au milieu du 19<sup>ème</sup> siècle, il est connu que le gonflement ne se produit que dans les roches à forte teneur en argile ou en anhydrite, et qu'il est lié aux venues d'eau. Le rôle déclencheur de la modification du champ des contraintes suite à l'excavation n'a été reconnu que bien plus tard par Terzaghi [7].

Le gonflement de l'argile est dû à l'absorption osmotique intracristalline de molécules d'eau dans la structure en plaques des minéraux argileux tels que l'illite, la corrensite ou la montmorillonite. Les essais œdométriques ont montré que la relation entre la pression de gonflement  $\sigma$  et la déformation de gonflement  $\varepsilon$  suit la « loi de gonflement » selon laquelle  $\varepsilon$  décroît linéairement avec  $\log \sigma$  [7], [8]. Le potentiel de gonflement d'une roche est caractérisé par le taux gonflement libre  $\varepsilon_0$  [%] et la pression de gonflement maximale  $\sigma_0$  (avec empêchement total des déformations de gonflement). Le couple de valeurs ( $\varepsilon_0$ ,  $\sigma_0$ ) caractérise le potentiel de gonflement d'un échantillon de roche, resp. d'un type de roche. Dans le cas de roches argileuses, des essais de laboratoire systématiques montrent qu'en règle générale une valeur élevée de  $\varepsilon_0$  correspond à une valeur élevée de  $\sigma_0$  [9].

Le gonflement de l'anhydrite est de nature chimique et correspond à une transformation de l'anhydrite en gypse. Dans des conditions spécifiques de laboratoire, une augmentation de volume nette de 61% est théoriquement possible. Une pression de gonflement maximale  $\sigma_0$  jusqu'à 8 MPa a pu être mesurée sur des échantillons de petite taille avec un empêchement complet des déformations, et ceci avant même que l'état final de ce processus lent n'ait été atteint [10]. Dans les formations à anhydrite, la validité de la loi de gonflement semi-logarithmique n'est prouvée ni de manière empirique ni sur la base de considérations théoriques, en raison de la nature purement chimique du phénomène. On peut seulement montrer qu'une augmentation de la pression de gonflement  $\sigma$

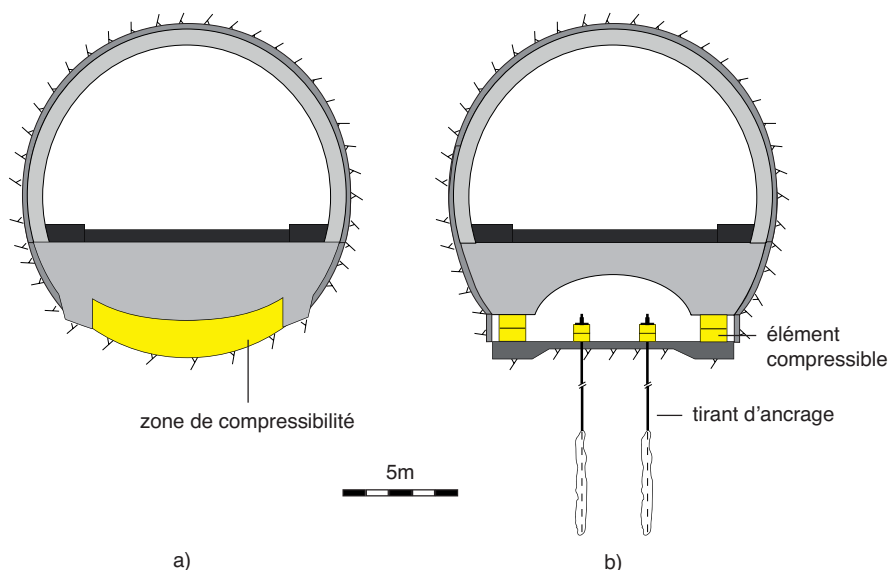


Fig. 2: Principe des systèmes compressibles

a) Système Compressible réparti en plan b) Système Compressible Modulaire

ralentit fortement l'évolution dans le temps des déformations de gonflement  $\varepsilon$ . Laisser libre cours aux déformations de gonflement ne réduit pas forcément la pression de gonflement maximale, ni sa valeur finale, du moins en laboratoire (système fermé) et sur une longue durée [11]. Dans la galerie d'essais du tunnel de Freudenstein, des essais à grande échelle ont été réalisés dans 5 sections avec différentes résistances du soutènement (0, 0.1, 0.25, 0.5 et 0.75 MPa). Ces essais ont montré qu'une augmentation de la résistance du soutènement ralentissait fortement l'évolution du soulèvement du radier dans le temps [3], [11]. A l'inverse, il est possible d'affirmer que pour l'anhydrite aussi, il suffit de faibles soulèvements de gonflement pour réduire fortement l'évolution de la pression de gonflement dans le temps.

- Si l'on observe les processus de gonflement possibles autour d'un tunnel, les facteurs suivants méritent une attention particulière:
- La roche est généralement inhomogène, d'où de fortes variations spatiales de la concentration en minéraux gonflants, et donc du potentiel de gonflement. Ceci à de courtes distances, aussi bien dans la section que le long du tunnel. Les résultats d'essais de gonflement sur des échantillons prélevés dans un même forage sont en général très dispersés.
- La perméabilité du massif est localement très variable en raison de fissures, de failles, de la stratification et des joints de stratification souvent décrochés. Sans oublier les décrochements effectifs et les couches intermédiaires non gonflantes mais fortement fracturées avec une perméabilité particulièrement élevée.
- Dans la roche, l'eau circule à la fois dans les pores et le long des discontinuités. La capacité du massif à emmagasiner de l'eau est en général très variable dans l'espace.
- Le creusement d'une cavité provoque dans son environnement immédiat une modification de l'état des contraintes pouvant augmenter la perméabilité du massif.
- L'excavation d'un tunnel entraîne inévitablement la formation d'un gradient hydraulique.
- Au bord de l'excavation, les pressions d'eau chutent jusqu'à la pression atmosphérique, de telle sorte qu'un courant de filtration se met en place.

D'après les observations et mesures effectuées, il est à retenir que

- Le phénomène de gonflement n'a pratiquement lieu que dans la zone du radier. Jusqu'à présent, seul le tunnel du Chienberg (dans le Keuper gypseux) fait exception à cette règle [5]. Dans ce cas, des soulèvements dus au gonflement ont aussi été mesurés latéralement, au niveau du radier.
- Les déformations de gonflement diminuent lorsqu'on s'éloigne de la cavité, pour disparaître à une profondeur avoisinant un diamètre de la cavité [1].
- Le gonflement peut se produire très rapidement ou de manière différée ; son intensité peut fortement varier dans le temps et il peut durer de nombreuses décennies [3].

Il est établi que lors de la construction d'un tunnel dans un massif gonflant, il est nécessaire de tenir compte des processus de gonflement à long terme, même dans des sections prévues sans eau. Ceci requiert une conception adéquate du soutènement, même avec une évacuation efficace de l'eau durant les travaux.

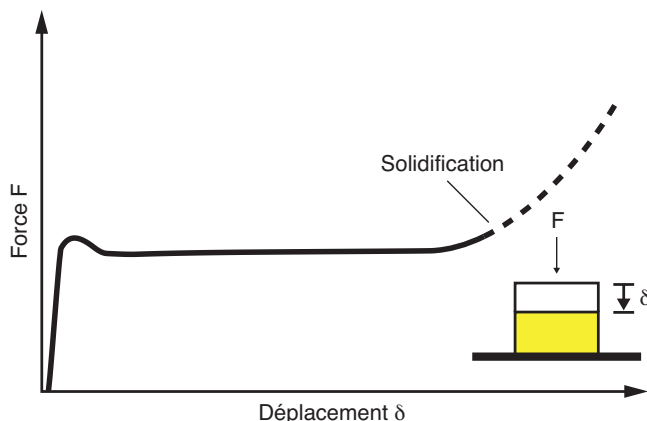


Fig. 3: Diagramme de travail de l'élément compressible

### 3 - CONCEPTION ET CONSTRUCTION

A partir du résumé succinct ci-dessus, détaillant nos connaissances empiriques et théoriques, il est clair que dans la phase d'étude du projet, la prévision du gonflement sur une durée de 100 ans est extrêmement difficile, en particulier dans les roches à anhydrites [11]. Les raisons principales sont, comme expliqué, la connaissance insuffisante de la répartition du potentiel de gonflement du massif rocheux et des venues d'eau vers les matériaux gonflants. Dans le Keuper gypseux s'ajoute l'incertitude liée à la relation entre les pressions et les déformations de gonflement.

Au vu des incertitudes fondamentales énoncées ci-dessus, comment se déroulent la conception et la réalisation d'un tunnel en massif gonflant ? On distingue les étapes suivantes:

- Sur la base des investigations géologiques, des essais de gonflement en laboratoire et de l'expérience sur d'autres ouvrages, on estime des valeurs globales de déformation  $\varepsilon_0$  et de pression de gonflement  $\sigma_0$  pour le massif entier, et on applique la loi de gonflement semi-logarithmique pour les roches argileuses et à anhydrites [1], [12]. Le tunnel de l'Adler des Chemins de Fer Fédéraux suisses, d'une longueur de 5.3 km et d'un diamètre d'excavation au tunnelier de  $\varnothing = 12.5$  m, et qui a été inauguré en l'an 2000, a par exemple été dimensionné pour avec pression de gonflement maximale de 4 MPa (état limite ultime) [13]. Dans le cas du tunnel de base de l'Engelberg, sur l'échangeur du Leonberg, la valeur de la pression de gonflement a été estimée entre 2 MPa et 6 MPa selon la hauteur de couverture [14].
- On choisit un mode de construction et on fait le dimensionnement sur la base des hypothèses précédentes avec des méthodes de calcul spécifiques, comme la méthode de convergence-confinement appliquée au gonflement du radier [1].
- Sur la base d'une analyse de risque, on estime le risque résiduel acceptable suite à un possible dépassement de la pression de gonflement maximale ou des soulèvements admissibles. Les risques résiduels ne sont pas seulement établis selon des critères économiques, mais la disponibilité illimitée de l'ouvrage joue aussi un grand rôle.

- De nouvelles connaissances sur le comportement attendu du massif au cours des travaux peuvent influencer les décisions ci-dessus. A cet effet, les mesures de déformation en cours de creusement revêtent une importance particulière.

Afin de remédier aux effets indésirables du gonflement, deux principes de construction fondamentalement différents ont depuis toujours été utilisés dans la pratique. Le principe dit « de résistance », où le soulèvement du radier est empêché par une contre-voûte qui doit pouvoir reprendre les pressions de gonflement sans dégâts. Le principe « de déformabilité » a par contre pour but de diminuer la valeur maximale de la pression de gonflement grâce à la mise en place d'une zone déformable entre la contre-voûte et le terrain, ce qui permet un certain soulèvement.

Le principe de résistance est la solution la plus courante pour des potentiels de gonflement faibles à moyens, mais se révèle non économique pour des pressions de gonflement élevées. Lors d'une faible hauteur de couverture ou d'un massif déformable en calotte, ce principe s'avère risqué car il peut entraîner un soulèvement du tunnel entier, ce qui peut poser problème aussi bien au niveau de l'état de service de l'ouvrage que de sa stabilité.

Lorsqu'on applique le principe de déformabilité, un matériau déformable est inséré entre le massif et le revêtement dans le but de réduire la pression de gonflement maximale en autorisant des soulèvements du radier. Au tunnel T8 de la route cantonale A16 dans le Jura Suisse, une zone déformable a été réalisée à l'aide de cintres de soutènement à section carrée (0.3 x 0.3 m) espacés de 2.0 m [15]. Le « Système Déformable en plan », formé d'une couche d'argile expansée d'épaisseur 1.2 m, a été mis en œuvre dans le tunnel du Freudenstein des chemins de fer allemands aux environs de Karlsruhe [1], [10]. Dans le tunnel de base d'Engelberg (tunnel à 3 voies avec un diamètre d'excavation de 21 m), la couche d'argile expansée a une épaisseur de 1.7 m [14].

Dans ces ouvrages, on considère que le potentiel de déformabilité de la zone compressible ne sera pas épuisé avant la fin de la durée d'exploitation prévue, sinon cela provoquerait des pressions de gonflement inacceptables sur le radier du tunnel. Le « Système Déformable Modulaire » a été conçu pour exclure ce genre de risque et éviter les soulèvements inacceptables.

#### 4 - LE SYSTÈME DÉFORMABLE MODULAIRE

Comme son nom l'indique, la zone déformable modulaire est composée d'un ensemble d'éléments indépendants. Le profil est conçu de telle manière que ces éléments restent accessibles pour toute la durée d'exploitation et puissent, si nécessaire, être remplacés individuellement sans gêner le trafic dans le tunnel. Le principe est

présenté schématiquement sur l'exemple du tunnel du Freudenstein [1], [10].

La Fig. 2a montre le système déformable réparti en plan qui a été mis en œuvre et la Fig. 2b représente un projet possible pour le Système Déformable Modulaire.

Dans les piédroits du revêtement, le béton est remplacé par un alignement de corps déformables de forme cylindrique avec un espacement faible dans le sens de la longueur du tunnel. Ils agissent comme fondation pour l'ensemble du soutènement et reprennent la pression du terrain sur la calotte, le poids propre et la charge utile. Leur « force de fluage », c'est-à-dire la force pour laquelle les éléments se déforment, doit donc être plus grande que la somme des forces ci-dessus, ceci avec un certain facteur de sécurité. La cote des fondations est donnée par l'épaisseur de la dalle de roulement et par la hauteur sous-jacente nécessaire à l'entretien du radier du tunnel.

Le soulèvement du radier plat entre les éléments de fondation est entravé par une rangée d'ancrages lourds précontraints. Afin que ces ancres n'atteignent pas trop rapidement leur limite de rupture,

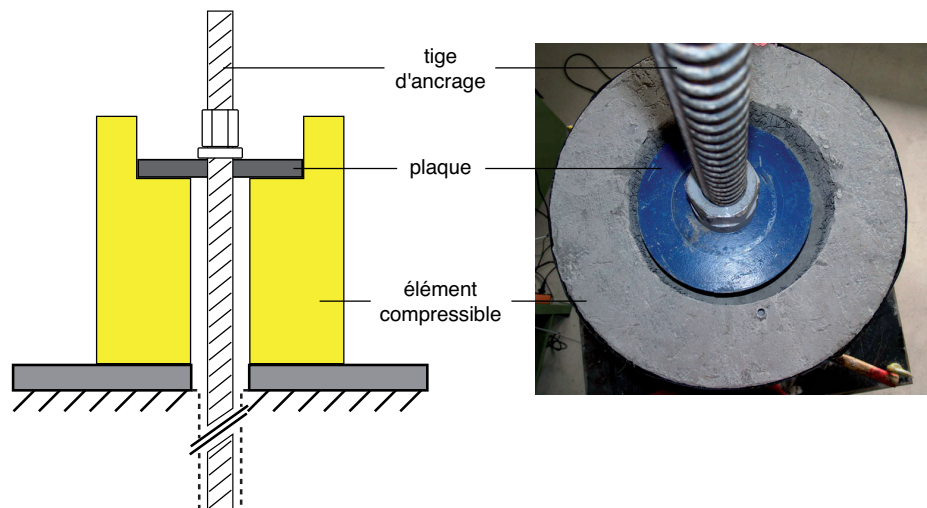


Fig. 4: Élément ancrage compressible avec principe d'enfoncement

les têtes d'ancrage sont conçues de sorte que la force d'ancrage reste pratiquement constante même avec un certain soulèvement du radier. L'expérience montre en effet que le gonflement est très variable le long d'un tunnel, même avec des conditions géologiques similaires. Ceci n'est pas uniquement dû à une variation du potentiel de gonflement, mais aussi aux conditions locales de venues d'eau depuis le massif jusqu'aux zones gonflantes. Pour cette raison, le Système Déformable Modulaire présente un avantage certain, car il permet l'observation simple et directe du processus de gonflement, ainsi que des interventions ponctuelles à tout moment.

Dans l'exemple montré à la Fig. 2b, les corps de fondation peuvent typiquement avoir un diamètre de  $\sigma_F = 1.0$  à  $1.5$  m et les têtes d'ancrage  $\sigma_A = 0.6$  à  $1.0$  m. La hauteur des éléments déformables est à peu près égale à leur diamètre. La force de déformation d'un corps de fondation vaut  $F_F = 5$  à  $10$  MN et celle par tête d'ancrage  $F_A = 1.0$  à  $1.5$  MN. Les éléments ne doivent être remplacés qu'après un rétrécissement de  $0.4$  à  $0.5$  m. A cette occasion, le radier doit être repris sur une hauteur équivalente. Il va de soi qu'il est aussi possible de capter et de drainer l'eau du massif pouvant

apparaître en radier. De cette manière, l'évolution du gonflement peut être fortement ralentie, voire bloquée.

On remarque que dans le cas du tunnel de Freudenstein, le Système Déformable Modulaire aurait nécessité à peu près la même section d'excavation que le Système Déformable Réparti en plan tel que réalisé. Paul et Wichter [2] ont proposé un profil de tunnel similaire à celui de la Fig. 2b avec un évidement pour permettre un soulèvement du radier totalement libre, avec des tubes de tunnel solidement ancrés dans le massif.

### Éléments déformables

Le diagramme force-déplacement de ces éléments soumis à un chargement axial est représenté à la Fig.3. Le but est d'obtenir, sous une force constante, une déformabilité aussi grande que possible avant la rigidification. L'utilisation de ces éléments exclut toute perte de la capacité portante. En vue de leur durabilité, ils sont composés de matériaux inertes comme le ciment, le sable, la mousse de verre poreux et l'acier (sous forme de fibres et d'armatures). Les détails de fabrication des éléments porteurs particuliers (forme, dimensions, matrice, répartition des armatures, etc.) sont déterminés par les conditions pratiques spécifiques, à traiter au cas par cas. Le processus micromécanique agissant lors du chargement est identique pour tous les types d'éléments (cylindrique, cubique ou prismatique). Il s'agit de la fermeture progressive des pores avec empêchement des déformations transversales. Les premiers corps déformables de ce type (hiDCon) ont été conçus pour des tunnels en terrain poussant. Les éléments déformables en forme de poutres intégrés dans la coque en béton projeté à différents emplacements du profil maintiennent une grande capacité portante tout en permettant la déformation du massif (convergence). Les éléments de fondation et d'ancrage du Système Déformable Modulaire construits par après ont tous deux une forme cylindrique, mais l'application de la charge y est différente.

Les corps de fondation se situent entre une fondation en béton et le soutènement effectif du tunnel. A la suite du gonflement du radier, la sollicitation des éléments augmente et, lorsqu'ils atteignent leur limite de fluage, ils commencent à se déformer. Il s'agit d'un chargement axial, mais qui peut également être interprété comme une déformation imposée. Théoriquement, l'état de contrainte est homogène dans l'élément déformable et correspond à sa contrainte de fluage.

Les plaques de répartition des têtes des tirants ont un diamètre inférieur à celui de l'élément déformable et peuvent donc s'enfoncer dans celui-ci (Fig.4). Ce système fonctionne également parfaitement dans le cas d'une application excentrique de la force d'ancrage.

## 5 - MISE EN ŒUVRE DANS LE TUNNEL DU CHIENBERG

Ce tunnel se trouve sur la route nationale H2 entre Liestal et Sisach, en Suisse, environ 25 km au Sud-Est de Bâle. Il traverse entre autres les formations de Keuper gypseux typiques du Jura, avec des sulfates sous forme d'anhydrite et de gypse, ainsi que des marnes altérées. Le tunnel proprement dit a une longueur de 1.5 km. En raison des pressions de gonflement élevées attendues dans le Keuper gypseux, un profil d'excavation circulaire a initiale-

ment été choisi, avec une épaisseur de revêtement interne entre 0.7 m et 1.1 m. Une variante avait été proposée avec une zone déformable répartie en plan similaire au tunnel du Freudenstein dans les tronçons sous faible hauteur de couverture et avec des formations gonflantes sous le radier. Elle n'a toutefois pas été retenue en raison de l'estimation de l'évolution des gonflements du massif à long terme, qui s'est malheureusement avérée inexacte par la suite. Le tunnel a été excavé en section partielle calotte-stross avec béton projeté. En raison des gonflement prévus en radier, la fermeture de l'anneau de revêtement interne devait suivre l'excavation de la calotte avec un délai de moins de 25 semaines, resp. à une distance de moins de 450 m. Dans un premier tronçon d'environ 90 m de longueur et avec une couverture de 25 à 30 m, avec du Keuper gypseux sous le radier et des marnes altérées au-dessus

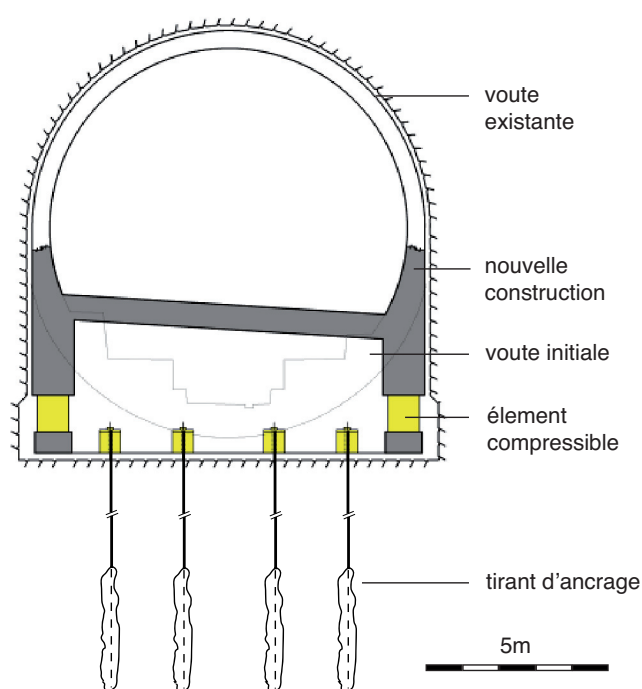


Fig. 5: Tunnel du Chienberg: transformation avec le «Système Compressible Modulaire»

du first, des soulèvements de la calotte se répercutant jusqu'à la surface construite (établis par des mesures de contrôle) sont apparus 4 mois après la fermeture de l'anneau du revêtement interne. Le même phénomène s'est produit dans des délais identiques dans un deuxième tronçon d'environ 140 m de longueur avec une couverture de 40 à 50 m. Après une année environ, le soulèvement maximum de la calotte dans le premier tronçon a atteint 83 mm, et 30 mm dans le second. Une bosse s'est formée sur le terrain construit en surface, avec une extension latérale jusqu'à 50 m perpendiculairement à l'axe du tunnel. Les soulèvements de la calotte atteignaient à cette période une vitesse de 4.5 mm/mois.

Des mesures de déformations dans le terrain ont montré que des parties importantes du massif ont subi du gonflement, non seulement sous le radier, mais également dans les zones latérales, ce qui a remis en question l'achèvement des travaux.

Dans cette situation, et après étude de nombreuses variantes, le Système Déformable Modulaire a été mis en oeuvre grâce aux





Fig. 6: Tunnel de Chienberg - zone du radier, en dessous du tablier

possibilités offertes par les éléments déformables nouvellement conçus. Il s'agissait en fait d'assainir un tunnel existant sur deux tronçons d'une longueur totale de 430 m, ceci avant même sa mise en service. Les détails de ce nouveau système de soutènement et de sa réalisation, ainsi que les premiers bilans depuis l'inauguration du tunnel en décembre 2006, sont décrits en détail dans une autre publication [5].

Nous détaillons ici uniquement les étapes importantes de la réfection du tunnel (Fig. 5). L'excavation de la demi-section inférieure du tunnel pour obtenir un profil en fer à cheval à radier plat a été suivie par la construction d'une nouvelle structure en béton avec

parements et dalle de roulement. L'évolution dans le temps du soulèvement du radier - induit par un gonflement plus ou moins intense - est freiné au moyen de quatre rangées d'ancrages précontraints.

Le soutènement est directement fondé sur la roche par l'intermédiaire des parements et des éléments déformables. Au total 570 éléments de fondation d'un diamètre de 0.9 m avec une contrainte de fluage de 4.5 à 7.5 MN selon la couverture ont été mis en place.

La photo in figure 6 montre l'espace accessible sous la dalle de roulement, avec les têtes d'ancrage déformables et les éléments de fondation latéraux. La réussite de la réfection, se traduisant par l'empêchement des soulèvements de la calotte, est clairement vérifiée par les mesures de contrôles.

Figure 7 montre l'évolution du soulèvement du radier sur une section transversale (TM1120) entre novembre 2005 et mars 2008. Au centre du profil, le soulèvement a déjà dépassé les 600 mm et le gonflement continue à un taux constant d'environ 110 mm par année. Le radier de béton présente une voûte distincte car en bordure, le taux de gonflement est inférieur de moitié. Les éléments d'ancrage sont en mesure d'absorber le gonflement important par une force d'ancrage constante comme le montre aussi les mesures effectuées régulièrement pour tester les forces d'ancrage. Au-delà de la limite de fluage des éléments de béton compressible, on relâche les ancres, on enlève les éléments déformés, on abaisse le radier à la hauteur initiale. Des nouveaux éléments hiDCon sont insérés et les tirants précontraints.

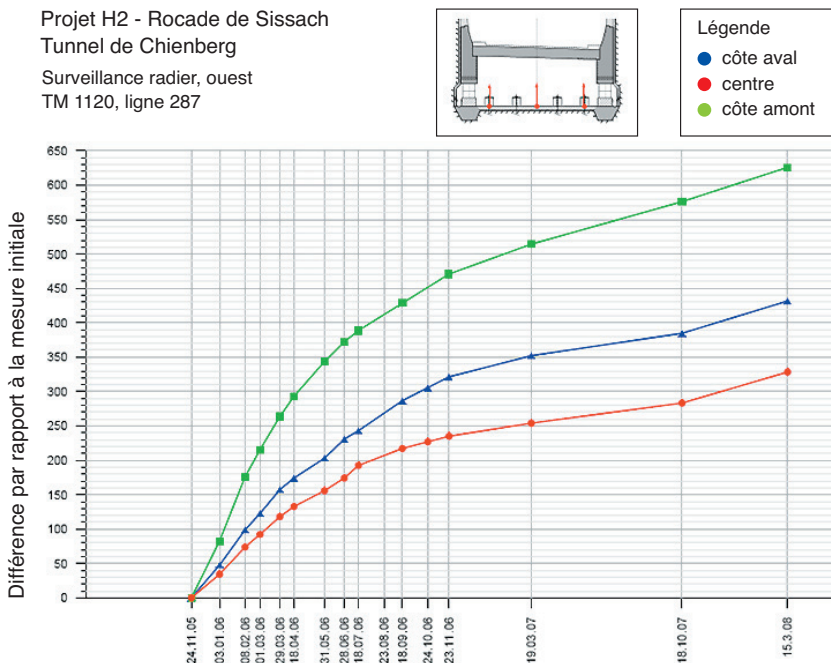


Fig. 7: Tunnel de Chienberg - évolution du soulèvement dans la section de TM 1120

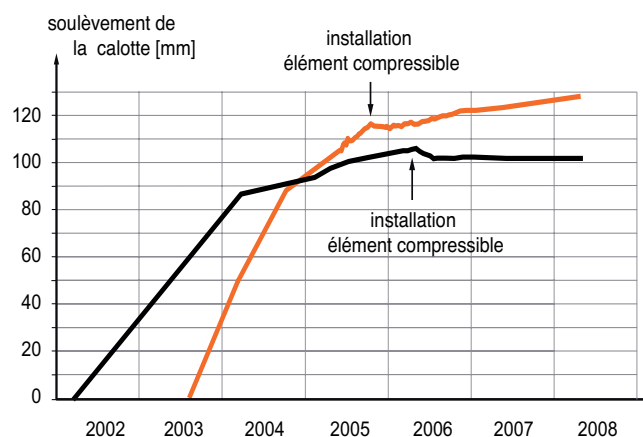


Fig. 8: Tunnel du Chienberg - évolution du soulèvement dans deux zones de la calotte

La Fig. 8 montre des exemples de l'évolution des soulèvements de la calotte dans deux zones touchées. Environ 3.5% des éléments de fondation sont actuellement déjà soumis à une pression de gonflement élevée, entraînant le début de leur déformation de fluage. Leur raccourcissement atteint actuellement plus de 30 mm. D'après l'évolution des déformations après une année, on estime à seulement environ 15% la proportion d'éléments de fondation qui seront à remplacer dans les 25 prochaines années.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Kovári, Kalman; Amstad, Christian, Anagnostou, Georg: Tunnelbau in quellfähigem Gebirge, Mitteilungen der Schweizerischen Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik, No.115, Mai 1987
- [2] Paul, Axel; Wichter, Lutz: Das Langzeitverhalten von Tunnelbauwerken im quellenden Gebirge – Neuere Messergebnisse vom Stuttgarter Wagenburgtunnel, Taschenbuch für den Tunnelbau, Verlag Glückauf, Essen, 1996
- [3] Amstad, Christian; Kovári, Kalman: Untertagbau in quellfähigem Fels, Forschungsbericht 52/94, Bundesamt für Strassen (ASTRA) Bern, März 2001
- [4] Kovári, Kalman; Descoedres, Francois: Tunnelling Switzerland, Swiss Tunnelling Society, 2<sup>nd</sup> edition 2002
- [5] Hofer, Ruedi; Chiaverio, Flavio; Kovári, Kalman: Chienbertunnel Sissach Tunnelhebung infolge Quellen, Swiss Tunnel Congress 2007 Luzern, Tagungsband, FGU Fachgruppe Untertagbau Juni 2007
- [6] Kovári, Kalman; Chiaverio, Flavio: Modulares Knautschsystem für Tunnel in stark quellfähigem Gebirge, STUVA 2007 Köln, Deutschland
- [7] Terzaghi, Karl: Rock Defects and Loads on Tunnel Supports, Rock Tunnelling with Steel Supports, R. V. Proctor and Th. White, Commercial Shearing and Stamping Company, Youngstown, Ohio, USA, 1946
- [8] Huder, Jachen; Amberg, Georg: Quellung im Mergel, Opalinuston und Anhydrit, Schweizerische Bauzeitung, 43, 1970
- [9] Madsen, Franz, Müller Vonmoos, Markus: Das Quellverhalten der Tone, Tonmineralogie und Bodenmechanik, Mitteil. des Inst. für Grundbau und Bodenmechanik, ETH Zürich, Nr. 133, 1988
- [10] Kirschke, Dieter; Kovári, Kalman; Prommersberger, Gerhard: Bemessungsgrundlagen und Konstruktion der Sohle des Freudensteintunnels, Ingenieurbauwerke, DB Neubaustrecke Mannheim-Stuttgart, Nr. 7, (1991)
- [11] Anagnostou, Georg: Zur Problematik des Tunnelbaus in quellfähigem Gebirge, Mitteilungen der Schweiz. Ges. für Boden- und Felsmechanik, Band 154, 2007
- [12] Wittke, Walter; Wittke, Martin; Wahlen, Roman: Zum Quellgesetz für den anhydritführenden, unausgelaugten Gipskeuper; Geotechnik 27, Nr. 2, 2004
- [13] Chiaverio, Flavio; Hürzeler, Daniel: Der Adlertunnel, Schweizerische Bauzeitung, sia Nr. 18, 1996
- [14] André, Peter: Engelberg-Basistunnel und Autobahndreieck Leonberg; Landesamt für Strassenwesen Baden Württemberg, 1999
- [15] Kovári, Kalman; Madsen, Franz; Amstad Christian: Tunnelling with Yielding Support in Swelling Rocks, Proc. Int.Symp. on Weak Rock, Tokyo, 1981

