

LA PRÉVISION DANS LA CONSTRUCTION DES TUNNELS. GÉOLOGIE ET MÉCANIQUE DES ROCHES

G. LOMBARDI (*)

ABSTRACT

The forecast of the rock behaviour during the construction of a tunnel is of great importance.

It requires the cooperation of different specialists, who should speak the same language in the technological way. The behaviour of the rock is of rheological type, so that the theories of elasticity and plasticity can no longer cope with the problem.

We have to consider the effect of time.

At the face the stress distribution is three-dimensional. The computational methods based on plane fields of displacements are not useful.

In the computations the method of construction has to be considered, which therefore becomes an element of the design. For the railway tunnel at the base of the St. Gothard-mountain, these facts were taken into account in the preliminary stage of the project.

1. INTRODUCTION

Depuis que l'homme a entrepris de construire des ouvrages souterrains, il s'est préoccupé de prévoir ou du moins de deviner avant la construction les conditions naturelles qu'il allait rencontrer.

Si les ouvrages sont destinés à l'exploitation minière, le but de la prévision concerne en premier lieu des dépôts minéraux recherchés, leur extension et leur nature ; en deuxième ligne le comportement du stérile pendant les travaux d'excavation.

Dans le génie civil, c'est le comportement de la roche pendant et après la construction qui intéresse en premier lieu sinon exclusivement.

Avec le développement des sciences naturelles, le constructeur d'ouvrages souterrains s'est tout naturellement orienté vers la géologie et a fait appel aux géologues en leur demandant des prévisions le plus exactes possible sur le comportement de la roche tout en s'étonnant fort qu'ils aient parfois quelque peine à

(*) D^r-Ing. G. Lombardi, via V. Ciseri, 3, 6601 Locarno (Suisse).

donner des recettes infaillibles, la géologie étant une science quelque peu intuitive et spéculative, mais avant tout descriptive du domaine des naturalistes.

Toutefois la nécessité d'une plus grande précision ainsi que le développement naturel propre à chaque science ont amené les géologues à faire usage plus souvent de méthodes d'investigation de plus en plus développées et de plus en plus techniques en commençant par de simples sondages et en recourant finalement à des méthodes géophysiques hautement perfectionnées dont l'emploi demande en général la collaboration de spécialistes.

De son côté l'ingénieur staticien, avant-dernier venu dans la construction souterraine, a essayé d'expliquer les phénomènes observés par des considérations élémentaires dérivées tout naturellement des méthodes de la statique qu'il connaissait et qu'il appliquait habituellement aux structures de ses ouvrages. Il faut bien dire que ces efforts développés tout au long du siècle dernier n'ont pas vraiment permis d'expliquer les phénomènes inhérents au comportement de la montagne, si bien que la construction des tunnels et le choix de leur soutènement sont restés fort longtemps entièrement empiriques ; les décisions à prendre pendant la construction ont été réservées aux personnes qui se trouvaient au front d'attaque sur la base de leur jugement souvent fort sûr et de leur expérience très grande d'ailleurs.

En fait ce n'est que tout récemment qu'avec l'apparition de ce dernier venu qu'est le mécanicien des roches ou le spécialiste en géotechnique, la situation commence à changer.

Certes il n'est pas question d'affirmer que tous les problèmes soulevés par la prévision dans la construction souterraine soient résolus. Les études entreprises et en cours dans la plupart des pays, les difficultés rencontrées sur de nombreux chantiers et la prudence exprimée dans bien des rapports géologiques ou géotechniques démontrent que nous sommes encore loin du but poursuivi.

Mais déjà certaines difficultés sont apparues du fait que sur le même problème se penchent parfois un géologue, un ingénieur spécialiste en mécanique des roches, un ingénieur projeteur et un ingénieur constructeur qui apportent tous une formation et des expériences différentes et qui recherchent des solutions personnelles à des problèmes qui ne sont pas toujours les mêmes. Il ne faut point s'étonner dès lors que dans les études l'accent soit mis par l'un davantage sur certaines questions pétrographiques ou lithologiques, alors que l'autre voudra connaître des angles ou des modules tout en affirmant qu'il n'y a point de différence entre un granite et un calcaire pourvu qu'ils aient les mêmes caractéristiques de frottement, tandis que l'ingénieur constructeur voudra, lui, avoir des indications précises et définitives sur le nombre des boulons qu'il devra prévoir dans son devis ou dans ses documents de soumission.

Sans doute est-il banal d'affirmer que dans l'étude d'un ouvrage souterrain — et je voudrais me limiter dès à présent aux travaux de génie civil, desquels seuls j'ai quelque connaissance — ces spécialistes sont tenus de collaborer et de s'organiser en respectant les nécessités et les possibilités des autres. De même peut-on dire que le domaine principal du géologue reste celui de la description des structures du massif rocheux et des grandes discontinuités ainsi que l'interprétation des sondages et essais géophysiques divers qui seront entrepris, mais il ne doit pas pour autant ignorer les phénomènes physiques, mécaniques et de construction qui intéressent les autres et il devrait comprendre, dans les grandes lignes au moins, les méthodes d'analyse utilisées par l'ingénieur.

L'auteur du projet ou le directeur des travaux devra à son tour savoir interpréter correctement les indications qui lui sont fournies par les experts afin de prendre les décisions voulues en temps utile dans le but de réaliser les travaux qui lui sont confiés avec la plus grande sécurité possible, au moindre coût et dans les délais prescrits. Cela aussi demande une compréhension très avancée des conditions d'équilibre des masses rocheuses autour de la cavité. Pour cette raison il me paraît opportun d'exposer brièvement quelques vues qui commencent à être admises sur la stabilité des ouvrages souterrains.

2. LA MÉCANIQUE D'UNE CAVITÉ

Pour simplifier l'exposé, nous ne parlerons que des tunnels de grande longueur et à section constante situés à une certaine profondeur sous le terrain en délaissant les problèmes inhérents aux cavernes et autres ouvrages particuliers, ainsi qu'aux cavités peu profondes.

2.1. Comportement de la roche

Avant d'entreprendre une quelconque construction, l'ingénieur a l'habitude d'étudier tout d'abord les matériaux dont il dispose afin de connaître leurs caractéristiques mécaniques et en particulier leurs résistances. Certes, cette préoccupation est, historiquement parlant, assez récente, car combien sont les grands constructeurs du passé qui n'avaient des matériaux utilisés, et en particulier de la pierre, qu'une idée fort sommaire et empirique. Mais depuis la naissance de la technique et de la science des constructions il n'en est plus ainsi au moins pour les constructions du génie civil.

Il est tout aussi évident, depuis l'avènement de la mécanique des sols, que l'on étudie les particularités du terrain de fondation avant de bâtir. Il est donc fort curieux de constater qu'aujourd'hui encore l'on construise des tunnels sans s'occuper des propriétés mécaniques de la roche ; mais faut-il vraiment s'en étonner, étant donné l'inertie propre au comportement humain, alors que la mécanique des roches est une science encore si jeune ? Il faut se rendre compte que dans les ouvrages souterrains la roche entourant la cavité n'est pas un support passif de la construction, mais est au contraire appelée à contribuer dans une mesure plus ou moins importante à la stabilité de l'ouvrage. Il faut donc concevoir la roche, au moins dans la partie proche de l'excavation, comme matériau de construction et non comme poids mort inerte qui chargerait simplement le revêtement prévu, encore que cela puisse parfois arriver bien entendu.

Au cours du développement des techniques il est naturel que l'ingénieur soit tenté d'appliquer à la roche des modèles de comportement simples, ceux qui, en fait, lui sont familiers dans d'autres domaines de la construction. Ainsi a-t-on commencé par concevoir la roche comme un corps élastique idéal indéfini auquel des équations différentielles toutes simples pouvaient s'appliquer. Il a fallu bientôt déchanter et se rendre compte qu'en réalité un comportement parfaitement élastique de la roche, sans être évidemment exclu, représente plutôt l'exception que la règle. C'est alors que l'ingénieur civil s'est souvenu qu'il existait depuis fort long-

temps déjà une théorie de la plasticité qui, il faut bien le reconnaître, était plutôt réservée à des ingénieurs d'autres disciplines (Rechsteiner, 1974).

Ce n'est que tout récemment enfin, après avoir d'ailleurs constaté la validité des méthodes élasto-plastiques dans le calcul des tunnels, que l'on s'est rendu compte que la roche était en général un corps rhéologique au comportement fort compliqué et que l'effet du temps c'est-à-dire, si vous voulez, le fluage ou la viscosité, assumait une importance parfois primordiale dans le comportement des cavités souterraines et surtout de leur revêtement.

Ainsi que nous l'allons voir tout à l'heure, on peut démontrer que, sauf exceptions, le revêtement d'un tunnel ne sera sollicité que si la roche comporte une phase visqueuse, c'est-à-dire que si l'équilibre des tensions internes de la roche, dans la zone entourant le tunnel, continue à se modifier après la pose du revêtement.

Le fait d'avoir pris conscience de l'importance de la viscosité de la roche a induit de nombreux chercheurs à développer des modèles rhéologiques parfois fort complexes dans le but d'approcher le plus possible ces phénomènes. Il faut bien reconnaître que si d'une part nous pouvons déterminer avec quelque précision les modules de déformation et les résistances de la roche, c'est-à-dire les paramètres qui régissent son comportement élasto-plastique, d'autre part les valeurs paramétriques des phénomènes visqueux nous échappent encore au moins en grande partie. Il est, bien sûr, plus facile de développer des calculs théoriques complexes que de mesurer effectivement les paramètres qu'il faut introduire dans le modèle rhéologique. En réalité, il est souvent même fort difficile de choisir entre les divers modèles disponibles.

On voit donc que nos vues sur le comportement de la roche se sont modifiées au cours de ces dernières décennies et qu'elles continuent à se modifier. Les méthodes d'analyse les plus théoriques de la mécanique du continu semblent trouver leur application dans la mécanique des roches et cela bien qu'en fait il faudrait recourir plutôt à des méthodes de la mécanique du discontinu ; mais malheureusement dans ce dernier domaine bien peu a été fait jusqu'à ce jour.

2.2. Le problème statique du tunnel

Créer une cavité souterraine et poser un revêtement en vue de la soutenir consiste en fait à introduire un corps étranger à l'intérieur d'une masse sollicitée par l'état naturel des contraintes. Ce corps étranger sera plus ou moins rigide et sera placé dans la cavité avec plus ou moins de jeu (Lombardi, 1971).

On entend dire par là que le vide laissé par l'excavation sera toujours plus petit que le volume de roche excavée mesuré en place, car des mouvements de convergence sont inévitables. Une autre particularité de la construction des tunnels est que la forme, c'est-à-dire la longueur du tunnel, varie constamment en fonction des travaux d'excavation.

Il ne s'agit donc pas d'une cavité préexistante dans laquelle on poserait un revêtement mais bien d'une cavité en cours de construction qui est progressivement revêtue.

Si nous considérons les conditions d'équilibre et de déformation de la roche au voisinage du front d'avancement, nous devons bien convenir que dans cette zone nous aurons un état tridimensionnel de contraintes et de déplacements, ou si vous préférez, que l'état de contraintes naturel plus ou moins homogène y sera très fortement perturbé pour se transformer à une certaine distance derrière le front

en un état de contraintes qui présentera une certaine uniformité dans le sens longitudinal de la galerie, de sorte que l'on pourra parler d'un état de contraintes pseudo-bidimensionnel.

Si nous examinons tout d'abord le comportement d'une tranche de roche perpendiculaire à l'axe du tunnel, suffisamment éloignée du front d'attaque, nous pouvons établir ce qu'il est convenu d'appeler la ligne caractéristique de la cavité (Lombardi, 1969). Dans la figure 1 on voit une telle ligne caractéristique qui indique la relation fonctionnelle existant entre la pression radiale de stabilisation appliquée sur le pourtour de la cavité et la déformation mesurée au même endroit.

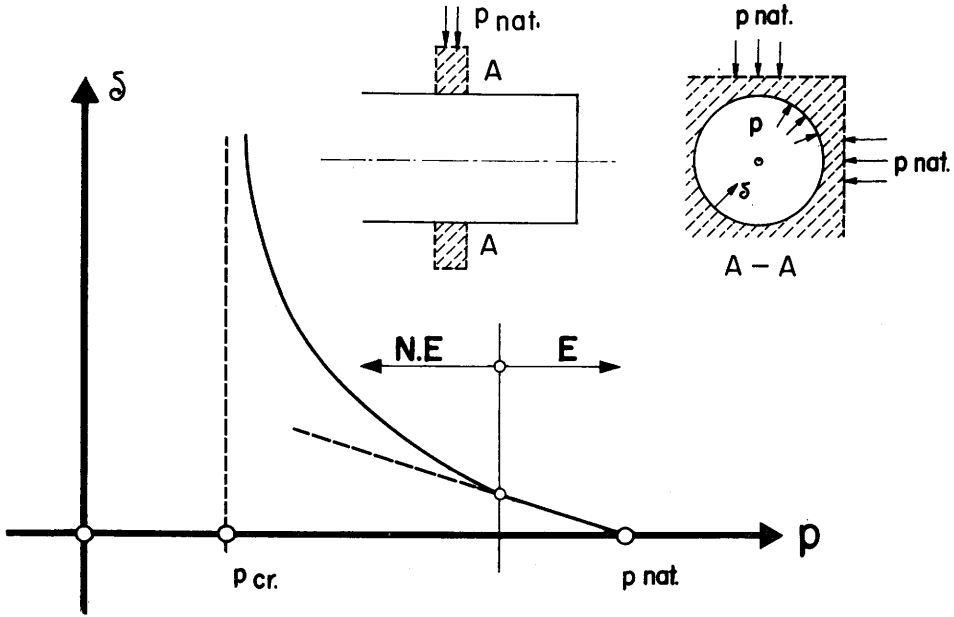


FIG. 1. — Ligne caractéristique d'une cavité (tranche A-A). p , pression radiale de stabilisation ; δ , déformation radiale ; $p_{nat.}$, état naturel des contraintes ; $p_{cr.}$, pression de stabilisation critique (limite inférieure) ; E, élastique ; N.E, non élastique.

Cette ligne caractéristique démontre donc que pour toute cavité de nombreux équilibres sont possibles *a priori*, qui sont représentés chacun par un point de la ligne.

On pourra soit appliquer des forces de stabilisation très fortes qui auront comme conséquence de limiter sensiblement les mouvements de convergence de la cavité, soit au contraire, et cela bien entendu dans certaines limites, des forces plus faibles ou parfois même nulles en acceptant des déformations radiales d'autant plus grandes. En effet si la ligne caractéristique devait couper l'axe des ordonnées, la cavité serait stable d'elle-même sans avoir recours à aucune mesure de soutènement.

Dans cette première figure nous avons négligé les phénomènes de viscosité de la roche. Pour en tenir compte il faut au contraire calculer, ainsi que cela ressort de la figure 2, plusieurs lignes caractéristiques valables chacune pour un certain instant après l'excavation. Sur la même figure on a indiqué la ligne caractéristique valable au voisinage du front de taille qui tient compte de l'effet de voûte dans le sens longitudinal, c'est-à-dire de la déviation des trajectoires des contraintes axiales (Amberg, 1974).

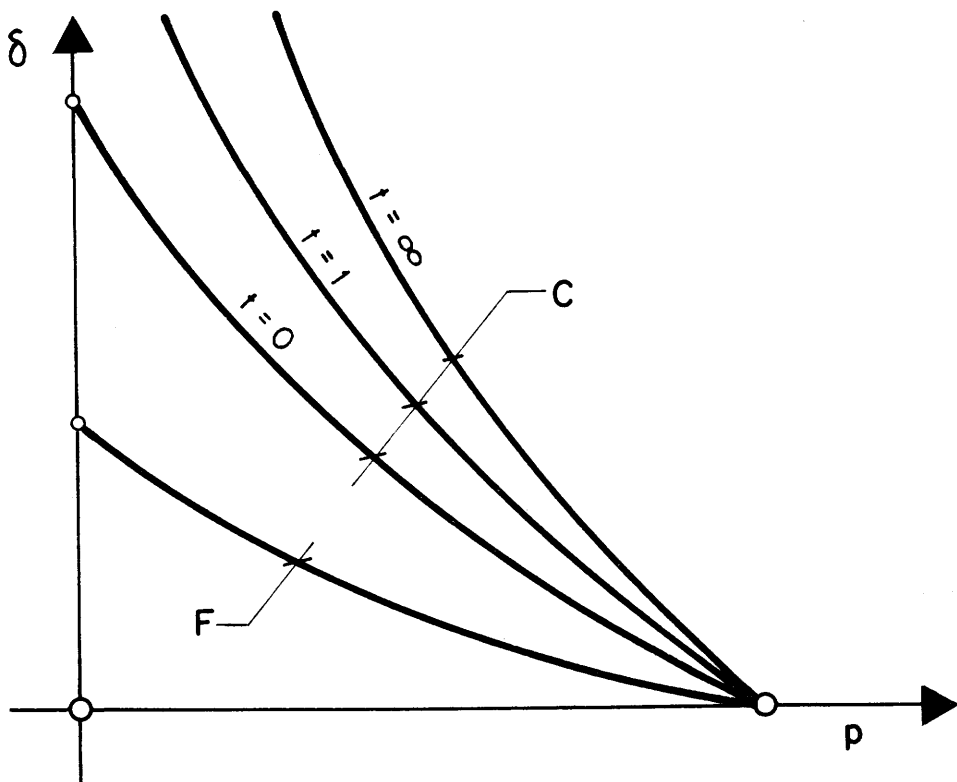


FIG. 2. — Lignes caractéristiques d'une cavité en tenant compte de la viscosité. t , temps depuis l'excavation ; C, lignes de la cavité ; F, ligne du front.

Toutefois aussi longtemps que l'on se limite à considérer le comportement d'une tranche de roche perpendiculaire à l'axe du tunnel, c'est-à-dire aussi longtemps que l'on cherche à résoudre le problème du tunnel en étudiant un état plan de contraintes et de déformations, on ne peut espérer obtenir une solution complète du problème.

On ne peut pas saisir en effet ce qui arrive près du front d'attaque et on ne peut donc d'aucune façon déterminer, sauf en de rares exceptions, lequel des divers points de la ligne caractéristique déjà mentionnée représente l'équilibre réel obtenu et non seulement un équilibre théoriquement possible, mais non réalisable lors de la construction.

Pour ce faire il faut étudier les déformations qui ont lieu dans la zone du front d'attaque ainsi que cela est montré à la figure 3. On voit comme l'élimination d'une masse de roche M dans le front, c'est-à-dire l'excavation d'une volée de roche, influence les déplacements dans une zone qui s'étend aussi loin que ce que nous appellerons « rayon d'action du front de taille ».

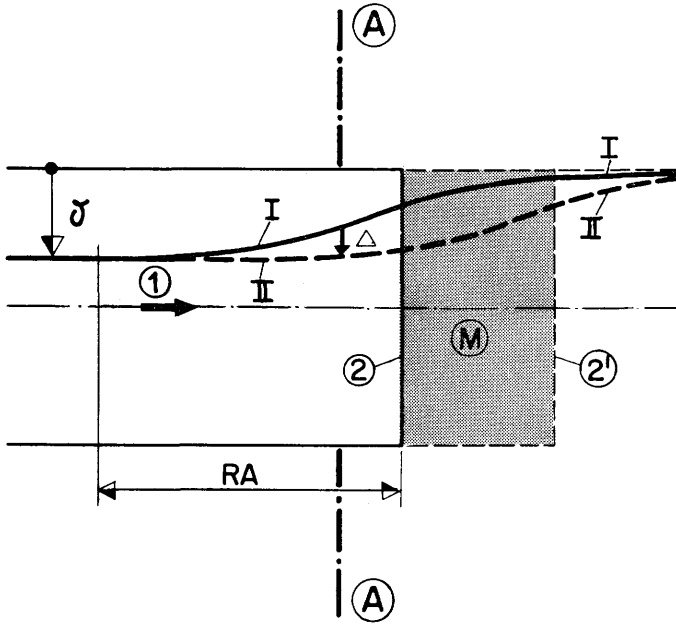


FIG. 3. — Influence de l'avancement du front sur les déformations radiales du bord de l'excavation. (1), avancement ; (2), (2'), positions successives du front ; M , masse de roche éliminée ; I, II, déformées successives de la roche ; Δ , déformation subie par un soutènement placé dans la section (A)—(A) ; RA , rayon d'action du front de taille.

Pour une section fixe du tunnel, par exemple $A-A$, le fait de continuer les travaux d'excavation se traduira donc par une déformation supplémentaire Δ . Si dans cette section on avait déjà placé un revêtement ou une structure de support quelconque, ceux-ci subiront une sollicitation supplémentaire. En l'absence de viscosité de la roche un revêtement ne sera donc sollicité et de ce fait n'aura d'action statique que s'il a été placé assez près du front d'attaque à l'intérieur donc de la zone d'action de l'état tridimensionnel des contraintes.

2.3. L'effet du temps

A une plus grande distance du front, qui correspond à un plus grand délai depuis l'excavation, les effets d'une viscosité éventuelle commenceront à se faire sentir.

Les relations qui existent entre la déformation et le temps sont représentées par la figure 4. La convergence du tunnel se composera de deux parties : une première est indiquée par la ligne (D)-(D) qui représente l'effet instantané dû à la distance du front. Il s'agit de l'influence des phases élastique et plastique qui suit immédiatement la création de la cavité. A cette déformation de convergence s'en ajoute une autre due à la viscosité qui peut être représentée par la ligne (S)-(S) dans l'hypothèse qu'aucun revêtement ne soit posé.

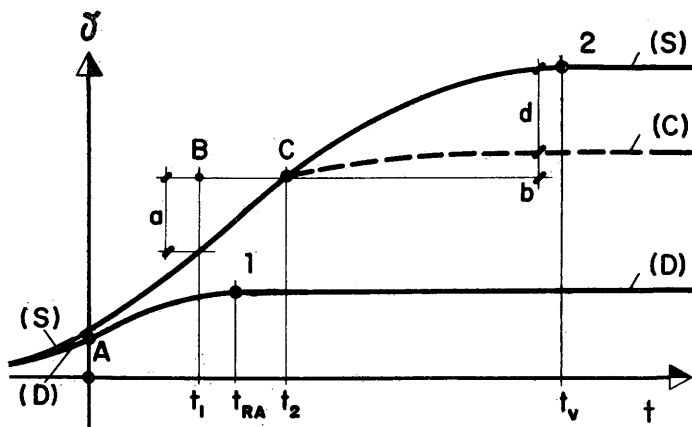


FIG. 4. — Déformation radiale δ de la cavité en fonction du temps t pour une section fixe du tunnel. (D)—(D), sans viscosité ; (S)—(S), avec viscosité, sans revêtement ; (S)—(C), avec viscosité, avec revêtement résistant à partir du point C (temps t_2).

Si l'on met en place un revêtement qui commence à agir statiquement au moment t_2 après que le jeu a se soit refermé, la déformation de la masse rocheuse sera freinée et suivra la ligne (C)-(C). L'effet du revêtement aura été de diminuer la déformation de convergence dans la mesure d , mais en même temps il aura subi une déformation b qui est la mesure de la sollicitation à laquelle il est soumis. Selon les cas il pourra exister un moment indiqué par t_v à partir duquel les déformations de viscosité se seraient pratiquement épuisées. Sans doute il peut aussi en être autrement et l'on peut imaginer des conditions dans lesquelles les déformations visqueuses continuent sans s'arrêter sinon après l'écrasement de la cavité.

Sur la base de ces conditions on peut affirmer ce qui pourrait être un des théorèmes principaux de la théorie du revêtement à savoir : *un revêtement posé dans un tunnel n'est sollicité et n'a donc d'action de stabilisation que si la roche comporte une phase visqueuse à moins qu'il n'ait été posé suffisamment près du front pour subir les effets directs de l'avancement de l'excavation.*

Des mêmes considérations on peut déduire un deuxième théorème qui dit que : *la sollicitation finale du revêtement, donc la charge qui agit sur celui-ci, dépend de l'instant (t_1) auquel le revêtement est mis en œuvre et du jeu (a) qui existe entre la cavité et le revêtement au moment de sa pose.*

Un retrait successif de l'anneau de revêtement ou un fluage de celui-ci correspondent à une augmentation théorique du jeu radial mentionné.

Le procédé de construction devient donc élément du projet et doit être pris en considération depuis le début.

2.4. Bases de calcul

Au risque de répéter ce qui est bien connu, permettez-moi de rappeler les éléments de base nécessaires pour entreprendre un quelconque calcul de stabilité d'une cavité souterraine ou un quelconque calcul statique d'un revêtement.

1. Etat naturel des contraintes avant l'excavation.
2. Propriétés mécaniques de la roche (élastiques, plastiques et de viscosité).
3. Méthode de travail employée (c'est-à-dire méthode d'excavation, instant de la pose des revêtements, distance du front, jeu radial, etc.).
4. Caractéristiques de résistance et déformabilité des structures de soutènement.

Ce n'est qu'avec une bonne connaissance de toutes ces données ou du moins sur la base d'hypothèses plausibles que l'on peut en toute rigueur entreprendre des calculs de stabilité. Quelles méthodes de calcul employer est en fait une question secondaire pour notre propos. La méthode des lignes caractéristiques semble donner de bons résultats.

2.5. Exemples

Ce que l'on vient d'exposer pourrait paraître assez théorique si des observations directes et des mesures de déformation en souterrain ne venaient démontrer la validité de nos affirmations.

La notion de viscosité ou si l'on préfère de déformations lentes sous charge constante est bien connue des constructeurs de tunnels qui ont à faire avec des terrains tendres. Surtout dans les régions minières on a étudié les phénomènes de subsidence. Que des phénomènes semblables aient lieu également dans les massifs granitiques est peut-être moins bien connu.

La figure 5 montre les résultats de mesures effectuées récemment sur le chantier du tunnel routier du Saint-Gothard dans une zone granitique où à partir d'une galerie latérale des extensomètres et des déflectomètres ont été posés dans un plan perpendiculaire à l'axe du tunnel avant le passage de l'excavation. Ces mesures permettent de mettre en évidence les déformations qui ont lieu avant le passage du front de taille à travers le profil de mesure d'une part, mais aussi les déformations lentes qui se développent encore plusieurs mois après le passage de l'excavation. Ceci semble bien confirmer la validité des notions exposées précédemment même pour des roches que l'on pourrait *a priori* estimer rigides et à comportement parfaitement élastique.

3. THÉORIE ET PRATIQUE

Si les notions théoriques de base sont claires et simples, si des calculs mathématiques peuvent étayer parfaitement les raisonnements abstraits des ingénieurs, il

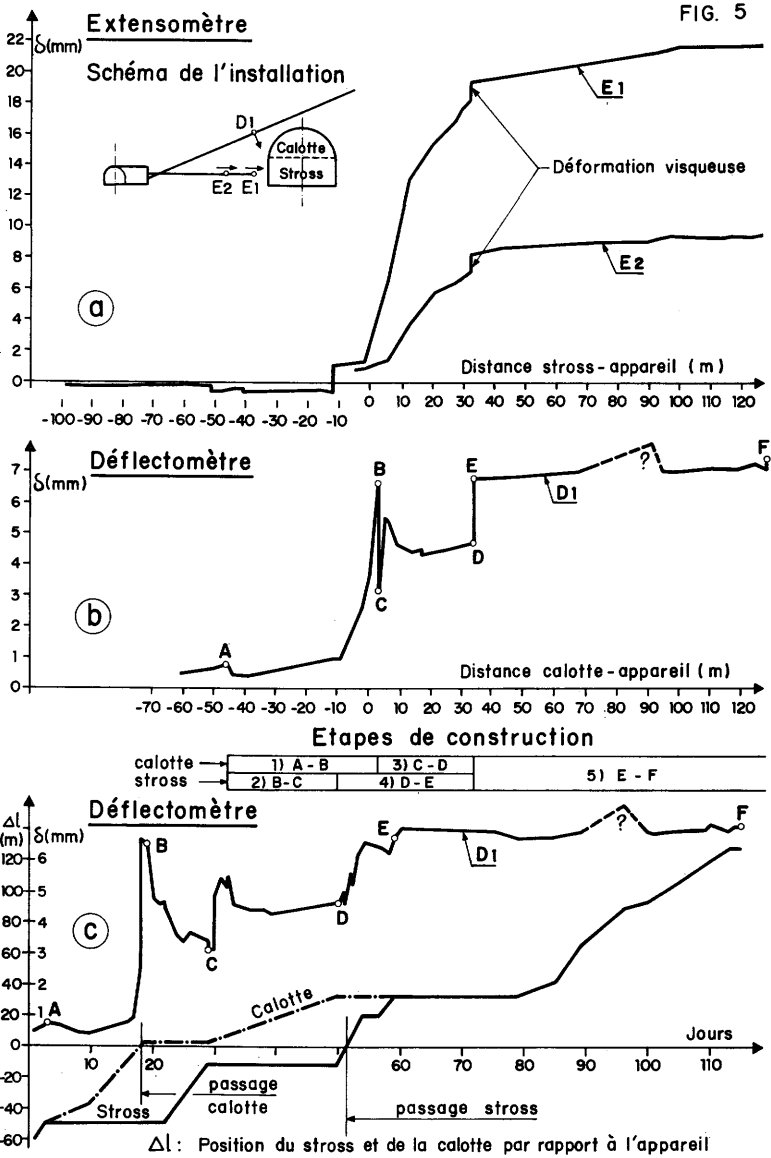


FIG. 5. — Mesures de déplacements dans la roche granitique au tunnel routier du Saint-Gothard. a) déplacement de deux points (E_1 et E_2) de l'extensomètre en fonction de l'avancement de l'excavation ; b) déflectomètre. Résultats des mesures en fonction de l'avancement et indications des diverses étapes de l'excavation (A—B, calotte jusqu'à la section de mesure ; B—C, stress jusqu'à la section de mesure ; C—D, continuation de l'excavation) ; c) mêmes déformations en fonction du temps et indication de l'avancement de l'excavation.

n'en reste pas moins que la réalité concrète que nous rencontrons sous terre est extrêmement complexe et variée et qu'elle ne peut être approchée qu'à l'aide de certaines hypothèses simplificatrices et idéalisatrices.

Ces hypothèses portent sur l'homogénéité et souvent aussi sur l'isotropie des propriétés mécaniques de la roche et supposent que celles-ci puissent être approchées avec une précision suffisante par des lois mathématiques simples.

Les calculs eux-mêmes ne sont possibles qu'avec certaines simplifications.

Faut-il donc croire que tout calcul et toute recherche soient inutiles ? Certainement pas, pourvu évidemment que l'on garde un esprit critique et que l'on sache reconnaître les limites de validité des hypothèses faites et des théories appliquées. Il en est de même de toute bonne étude géologique qui saura indiquer lesquelles de ses prévisions pourront être tenues pour certaines, lesquelles seulement pour probables ou possibles, même en ayant fait recours à tous les moyens offerts par la science géologique, par les techniques d'investigation, mais aussi et pourquoi pas ? par l'intuition.

4. LE TUNNEL DE BASE DU SAINT-GOTHARD

Un effort particulièrement poussé de prévision relatif à la nature et au comportement des roches a été entrepris lors de l'étude du projet du tunnel ferroviaire de base du Saint-Gothard.

Dans le cadre des études pour la réalisation d'une ligne rapide à travers les Alpes, les Chemins de Fer Fédéraux ont fait étudier le projet du tunnel de base du Saint-Gothard.

Il s'agit d'un tunnel de 49 km de longueur à double voie avec des couvertures de roche pouvant atteindre 2 500 m. Le projet prévoit en outre la construction de trois puits verticaux qui serviront chacun à la construction d'un tronçon intermédiaire ainsi qu'à la ventilation du tunnel.

Le diamètre d'excavation du tunnel principal est de l'ordre de 11 m. Parallèlement à celui-ci un tunnel de service de 4 m de diamètre est prévu.

De nombreux ouvrages souterrains, comme : gares de croisement, cavernes pour les appareillages, niches de divers types, sont prévus, qui compliquent parfois les problèmes de stabilité à résoudre.

Des études géologiques générales ont permis tout d'abord d'établir un profil géologique d'ensemble qui a été vérifié par un certain nombre de sondages à grande profondeur (jusqu'à 1 700 m).

Dans le but d'apprécier l'incertitude de toute prévision géologique, deux cas extrêmes ont été considérés.

Dans une deuxième étape toute une série d'essais de mécanique des roches ont été entrepris en vue de déterminer les caractéristiques plus probables des valeurs géomécaniques les plus importantes, telles qu'angles de frottement et cohésion dans les surfaces de discontinuité, ainsi que modules d'élasticité et résistances à la compression de la roche saine (Lombardi, Dalvesco, 1966). A cet effet des échantillons de roche ont été prélevés en surface, dans d'autres tunnels construits ou en cours de construction dans le massif et dans les carottes des sondages.

Il est alors apparu nécessaire de faire un certain nombre d'hypothèses.

Une première porte sur la correspondance entre les caractéristiques mécaniques de la roche des échantillons et celles de la roche que l'on rencontrerait réellement en galerie à plus grande profondeur.

D'autres hypothèses ont dû être faites quant à l'état naturel des contraintes existant au niveau du tunnel car, dans l'état actuel des études, il était évidemment impossible de procéder à des mesures aux profondeurs qui seront atteintes par l'ouvrage.

On a ensuite essayé de se représenter concrètement et de quantifier les divers procédés d'excavation possibles tels que :

- avancement par explosif suivant la méthode traditionnelle et mise en œuvre de divers types de soutènements provisoires et définitifs ;
- avancement au contraire par machine foreuse ou tunnelier normal ;
- avancement par tunnelier muni de systèmes particuliers de boucliers rigides ou articulés.

Sur la base de ces hypothèses qui évidemment représentent une simplification et une schématisation de la réalité, mais qui forment néanmoins une base rationnelle de départ et en tenant toujours compte des fourchettes possibles, on a entrepris toute une série de calculs de mécanique des roches. Le but était d'évaluer le comportement de la roche, d'analyser les possibilités d'emploi des diverses méthodes d'excavation et de prévoir les mesures des soutènements provisoires et définitifs nécessaires pour garantir la stabilité de l'ouvrage pendant et après la construction.

Le premier objectif poursuivi par l'étude était de définir les cas de stabilité probables dans chaque tronçon du tunnel.

Les cas possibles sont les suivants (Lombardi, 1974) :

Cas 1. Front et cavité elle-même stables sans soutènement ;

Cas 2. Cavité stable par elle-même ; front instable ;

Cas 3. Front stable ; cavité nécessitant un soutènement ;

Cas 4. Cavité et front instables nécessitant tous deux un soutènement au front d'attaque.

La méthode de calcul employée est celle des lignes caractéristiques déjà décrite, dont le principe essentiel consiste à faire coïncider des déformations du revêtement avec celles de la cavité, en même temps que l'on garantit l'égalité des charges agissant sur le revêtement et de la réaction que celui-ci exerce sur l'intrados de l'excavation. Bien entendu le comportement tridimensionnel dans la zone du front et le procédé de construction ont été pris en compte.

En fait seule la méthode d'excavation, la distance et le moment de la pose des revêtements provisoires et définitifs ainsi que leurs caractéristiques peuvent être variés par l'auteur du projet, tous les autres facteurs sont donnés par la nature.

Les résultats de ces études sont représentés pour un tronçon du tunnel et pour l'un des divers cas examinés dans la figure 6. Ces études ont permis de proposer des méthodes de construction et de prévoir les caractéristiques du revêtement et du soutènement nécessaires.

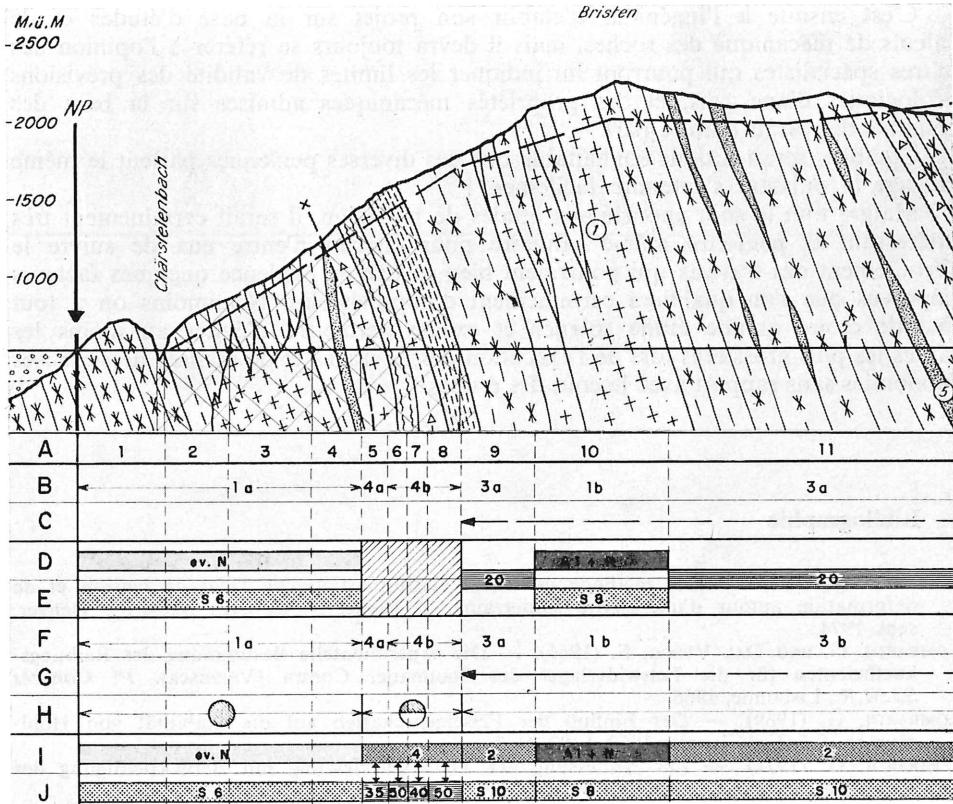


FIG. 6. — Tunnel ferroviaire de base du Saint-Gothard. Extrait du profil géologique longitudinal avec résultats des études de mécanique des roches. Géologie : A, zone géologique considérée homogène. — Avancement mécanique : B, cas de stabilité du tunnel (a, petites ; b, grandes déformations) ; C, danger d'écaillage ; D, soutènement provisoire ; E, soutènement définitif. — Avancement traditionnel (minage et marinage) : F, cas de stabilité ; G, danger d'écaillage ; H, procédé d'excavation (section entière, section partielle, etc.) ; I, soutènement provisoire ; E, soutènement définitif. — Note : pour le cas de stabilité 4, l'avancement mécanique n'est pas possible.

5. CONCLUSIONS

La prévision des conditions de travail qui seront rencontrées dans un tunnel demande la collaboration de nombreux spécialistes. Tout d'abord le géologue devra s'exprimer sur la structure géologique des massifs rocheux, sur leurs particularités et accidents. Le spécialiste d'essais de géotechnique devra chercher à définir le plus exactement possible les propriétés mécaniques des roches à traverser ; pour ce faire l'aide du géologue lui sera très précieuse, qui pourra établir certaines comparaisons et relations entre la roche en place telle qu'il se l'imagine et les échantillons disponibles.

C'est ensuite à l'ingénieur d'établir son projet sur la base d'études et de calculs de mécanique des roches, mais il devra toujours se référer à l'opinion des autres spécialistes qui pourront lui indiquer les limites de validité des prévisions géologiques d'une part, et des propriétés mécaniques admises sur la base des résultats des essais d'autre part.

Combien serait-il donc souhaitable que ces diverses personnes parlent le même langage et puissent s'entendre facilement !

Malgré tout le soin apporté aux études de prévision, il serait certainement très intéressant et peut-être même salutaire pour chacun d'entre eux de suivre le déroulement des travaux qui pourraient bien mettre en évidence quelques facteurs imprévus que l'on qualifiera certainement d'imprévisibles. Néanmoins on a tout lieu de croire qu'une étude soignée et exacte permettra d'éviter au moins les fautes les plus grossières lors de l'exécution des ouvrages et de réaliser de sérieuses économies sans rapport avec le coût des études.

Bibliographie

- AMBERG, W. (1974). — Une méthode de calcul élasto-plastique de l'état de tension et de déformation autour d'une cavité souterraine, 2^e partie. 3^e Congrès S.I.M.R., Denver, sept. 1974.
- LOMBARDI, G. und DAL VESCO, E. (1966). — Die experimentelle Bestimmung der Reibungskoeffizienten für die Felswiderlager der Staumauer Contra (Verzasca). 1^{er} Congrès S.I.M.R., Lisbonne, 1966.
- LOMBARDI, G. (1969). — Der Einfluß der Felseigenschaften auf die Stabilität von Hohlräumen. *S.B.Z.*, 16 janvier 1969, J. 87, H. 3.
- LOMBARDI, G. (1971). — Zur Bemessung der Tunnelauskleidung mit Berücksichtigung des Bauvorganges. *S.B.Z.*, 12 août 1971, J. 89, H. 32.
- LOMBARDI, G. (1974). — Felsmechanische Probleme am Gotthard. *Rock Mechanics*.
- RECHSTEINER, G. (1974). — Une méthode de calcul élasto-plastique de l'état de tension et de déformation d'une cavité souterraine, 1^{re} partie. 3^e Congrès S.I.M.R., Denver, sept. 1974.