

<b>Zeitschrift:</b>	Ingénieurs et architectes suisses
<b>Band:</b>	111 (1985)
<b>Heft:</b>	8
<b>Artikel:</b>	Comportement d'un tunnel à faible profondeur au voisinage du front: étude comparative par modèle numérique et modèle physique
<b>Autor:</b>	Giani, Gian Paolo
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-75622">https://doi.org/10.5169/seals-75622</a>

### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 11.01.2026

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

# Comportement d'un tunnel à faible profondeur au voisinage du front

## Etude comparative par modèle numérique et modèle physique

par Gian Paolo Giani, Turin

L'aménagement du réseau routier a entraîné ces dernières années un nombre croissant de passages à grande circulation en site urbain, le choix de tunnels à faible profondeur s'avérant souvent être la meilleure solution pour l'environnement.

Une question fondamentale pour l'économie d'une exécution en souterrain est la profondeur requise pour garantir la sécurité du tunnel lui-même aussi bien que l'intégrité des ouvrages existant à proximité. Cette profondeur dépend non seulement du terrain en place et de la section du tunnel, mais également de la méthode d'exécution, notamment du mode d'excavation et de la distance entre front d'attaque et mise en œuvre du soutènement.

L'effet stabilisant du front joue donc, avec le facteur temps, un rôle important sur le comportement de l'ouvrage et les tassements en surface. Dans le cadre d'une recherche menée par l'Institut des sols, roches et fondations de l'EPFL, des mesures sur des tunnels en construction sont confrontées avec des essais sur modèles réduits et des calculs numériques.

L'article de M. Giani apporte une contribution sous ce dernier aspect.

F. Descœudres, professeur EPFL

### 1. Introduction

L'application de la méthode des éléments finis (FEM) à la solution du problème statique lié à l'ouverture et à l'avancement d'une galerie comprend :

- l'idéalislation de la structure réelle et donc la création d'un modèle équivalent;
- la définition complète des charges qui doivent être appliquées à la structure représentée par les éléments finis de façon à simuler correctement les différentes phases d'excavation et les éventuelles applications d'un soutènement;
- l'attribution aux éléments du modèle de paramètres de résistance et de déformation adéquats et le choix de la condition de plasticité et de la loi contrainte-déformation la plus appropriée pour représenter le comportement réel de la structure.

Le programme de calcul Adina utilisé pour les analyses de cette étude a été mis au point au MIT en 1976. Il est en mesure de résoudre des problèmes statiques et dynamiques non linéaires dans les domaines bidimensionnel et tridimensionnel et permet en particulier :

- la représentation des structures par des éléments isoparamétriques qui peuvent tenir compte d'une façon suffisamment détaillée des gradients de contrainte créés au voisinage du front de taille;
- l'attribution automatique des charges d'excavation et la destruction des éléments creusés;
- la possibilité de suivre durant les différentes phases de l'analyse FEM une loi élastoplastique.

### Résumé

L'étude ici exposée a pour but de comparer les résultats obtenus par le calcul avec ceux d'une série d'essais exécutés sur un modèle physique du Laboratoire de mécanique des roches de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne dans le cadre d'une recherche sur la stabilité des tunnels routiers à faible profondeur et les tassements en surface.

Un calcul par éléments finis sur un modèle tridimensionnel permet de déterminer le champ des contraintes et des déplacements au voisinage du front de taille dans un massif élastoplastique.

L'analyse par éléments finis a été effectuée en attribuant au modèle les caractéristiques mécaniques et géométriques du modèle physique ; les étapes successives du percement et de l'élargissement du tunnel dans le modèle physique sont également respectées dans la simulation numérique.

A titre de comparaison, les diagrammes des tassements superficiels mesurés et calculés sont reportés pour deux essais différents. Pour ces mêmes essais, on indique également l'allure des convergences verticale et horizontale de la galerie, durant l'avancement du front de taille.

### 2. Caractéristiques du massif

Dans le cadre d'un mandat de recherche du Département fédéral de l'intérieur, le Laboratoire de mécanique des roches de l'EPFL a construit un modèle physique pour étudier la stabilité des tunnels routiers à faible profondeur et les tassements en surface.

La cuve du modèle a une base rectangulaire (largeur 3 m et profondeur 2 m) et a été remplie par un matériau adéquat jusqu'à la hauteur requise pour les différents essais de façon à simuler le comportement du tunnel en fonction de la profondeur.

Afin de déterminer les caractéristiques mécaniques du matériau de modèle, constitué par un mélange de poudre de baryte, d'oxyde de zinc et d'huile de paraffine, des échantillons intacts ont été prélevés lors du démontage de chaque modèle et ont été soumis à des essais de compression simple ou triaxiale.

Le tableau I indique les principales caractéristiques mécaniques du matériau de modèle.

Le programme de l'excavation sur le modèle physique, pour les essais 1 et 6, a été le suivant :

- percement au diamètre 0,30 m jusqu'à l'avancement 1,70 m;
- élargissement de la galerie au diamètre 0,48 m avec pose systématique (seulement pour l'essai 6) des dix sections d'ancrages (écartement des sections : 75 mm);
- prolongement de l'excavation au grand diamètre, sans soutènement, jusqu'à l'avancement maximal de 1,70 m.

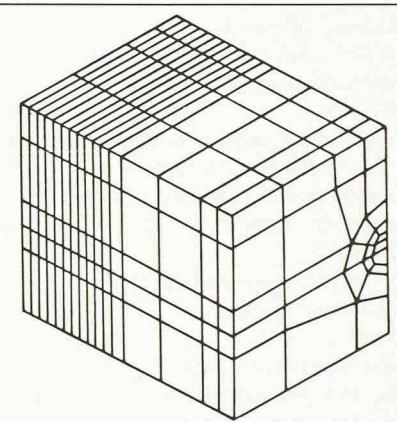


Fig. 1. — Modèle FEM.

TABLEAU I: Caractéristiques des essais 1 à 6

1. Géométrie	Essai No	
	1	6
Profondeur (distance axe de la galerie - surface mobile) z [m]	0.85	1.05
<hr/>		
2. Matériau de modèle		
$\gamma$ [kN/m³]	17.0	19.7
$\sigma_{c,eff}$ [kN/m²]	5.0	15.0
E [kN/m²]	2200	6600
$E/\sigma_c$	440	440
c [kN/m²]	1.5	4.0
$\phi$ [°]	35	35

### 3. Caractéristiques du modèle FEM

#### Réseau d'éléments finis

Le réseau est formé de 448 éléments et 850 noeuds, et par raison de symétrie, il coupe la moitié de l'espace occupé par le modèle physique.

Les éléments adoptés (3D) sont isoparamétriques et peuvent avoir un minimum de 8 noeuds jusqu'à un maximum de 20 noeuds ; pour réduire le temps de calcul,

la structure de programme permet en effet de distinguer des zones d'intérêt majeur où une description précise du champ des déplacements avec des éléments à plusieurs nœuds est nécessaire et des zones d'intérêt mineur avec des éléments à 8 nœuds.

En tenant compte des conditions au contour qui bloquent les déplacements perpendiculaires aux côtés du modèle et les fixent sur la base, le nombre total de degrés de liberté est de 2076.

La figure 1 représente le modèle mis au point pour simuler les opérations d'excavation effectuées dans l'essai 6.

Le modèle FEM a des dimensions égales à celles du modèle physique ( $3 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 1,80 \text{ m}$ ).

Le modèle FEM réalisé pour simuler les phases d'excavation effectuées dans l'essai 1 ne se différencie du modèle de la figure 1 que par la hauteur de la dernière file d'éléments. Elle permet d'atteindre une hauteur globale de 1,60 m en respectant ainsi le modèle physique réalisé pour l'essai 1.

#### Phases d'excavation et conditions de plasticité

La géométrie des éléments qui constituent le modèle a été préparée de façon à simuler numériquement les différentes phases d'excavation qui doivent coïncider avec les différentes opérations adoptées pour les essais 1 et 6, et de façon à ce que le comportement élastoplastique de la structure puisse être suivi très précisément.

La condition de plasticité employée dans les analyses pour définir le passage entre la zone à comportement élastique et plastique est celle de Drucker et Prager et s'exprime par :

$$\alpha J_1 + (J'_2) \frac{1}{2} = K'$$

avec  $J_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$

$$J'_2 = \frac{1}{6} [ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 +$$

$$+ (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 ]$$

et les paramètres de résistance au cisaillement décrits par  $\alpha$  et  $K$  valent :

$$\alpha = \frac{2 \sin \Phi}{\sqrt{3} (3 - \sin \Phi)} \quad K' = \frac{6 c \cos \Phi}{\sqrt{3} (3 - \sin \Phi)}$$

Les paramètres donnés permettent de définir un comportement élastique parfaitement plastique en compression ; en plus, on a introduit un critère de manière à annuler la résistance à la traction.

#### Analyse FEM

Les analyses FEM ont été exécutées sur l'ordinateur VAX II-780 du Département de génie civil de l'EPFL. Les analyses comprennent les phases suivantes :

1. Calcul du champ de contrainte tensionnel initial.
2. Calcul du champ de contrainte et des déplacements durant l'ouverture de la galerie de 0,30 m de diamètre.

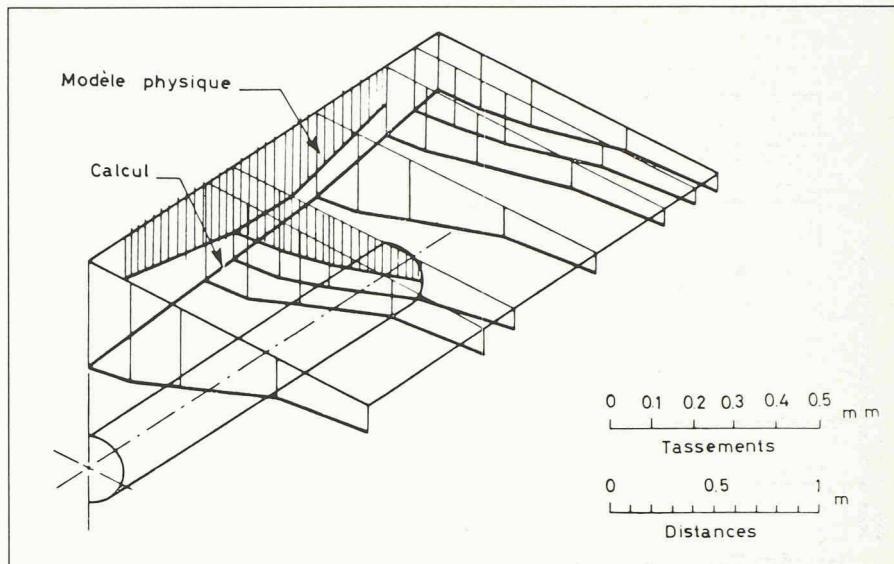


Fig. 2. — Tassements en surface : essai 6 ; avancement considéré 1,70 m — Galerie  $\phi = 0,30 \text{ m}$ .

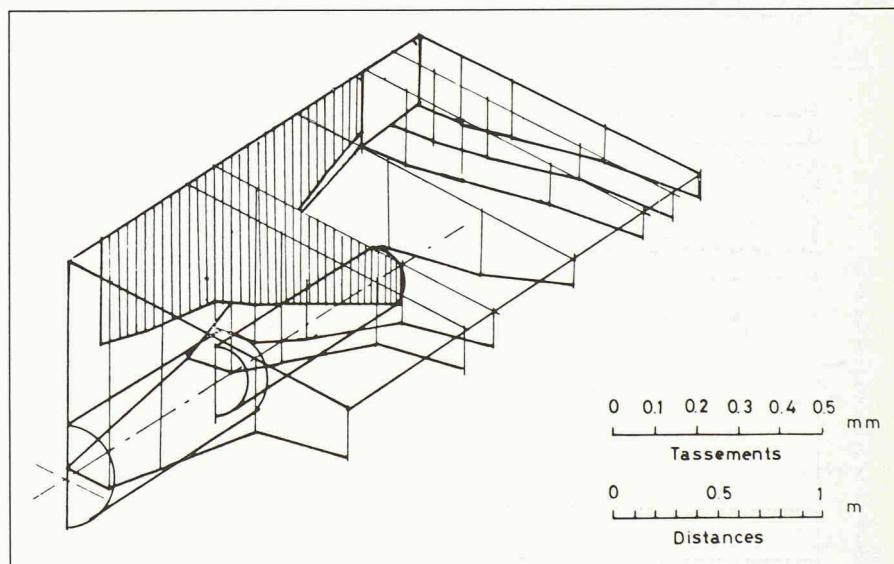


Fig. 3. — Idem mais 0,83 m et  $\phi = 0,48 \text{ m}$ .

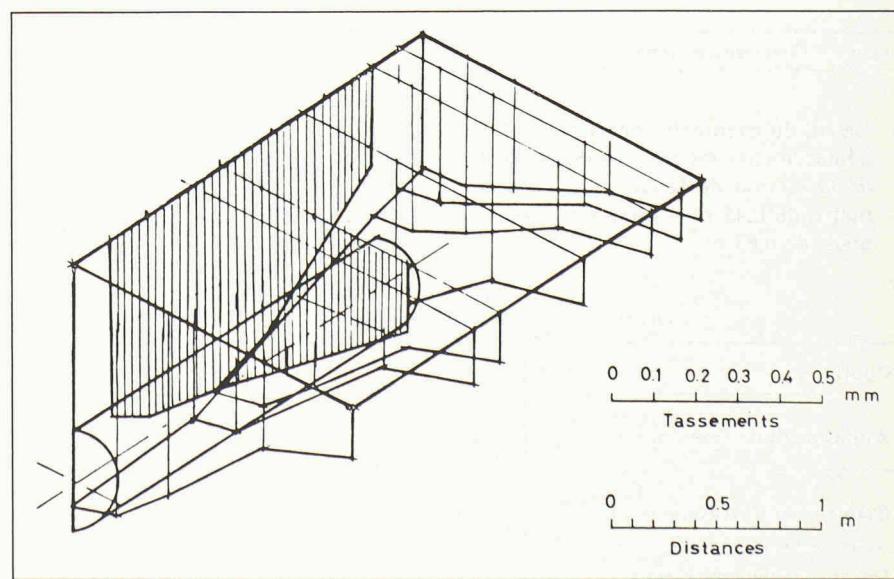


Fig. 4. — Idem 1,70 m et  $\phi = 0,48 \text{ m}$ .

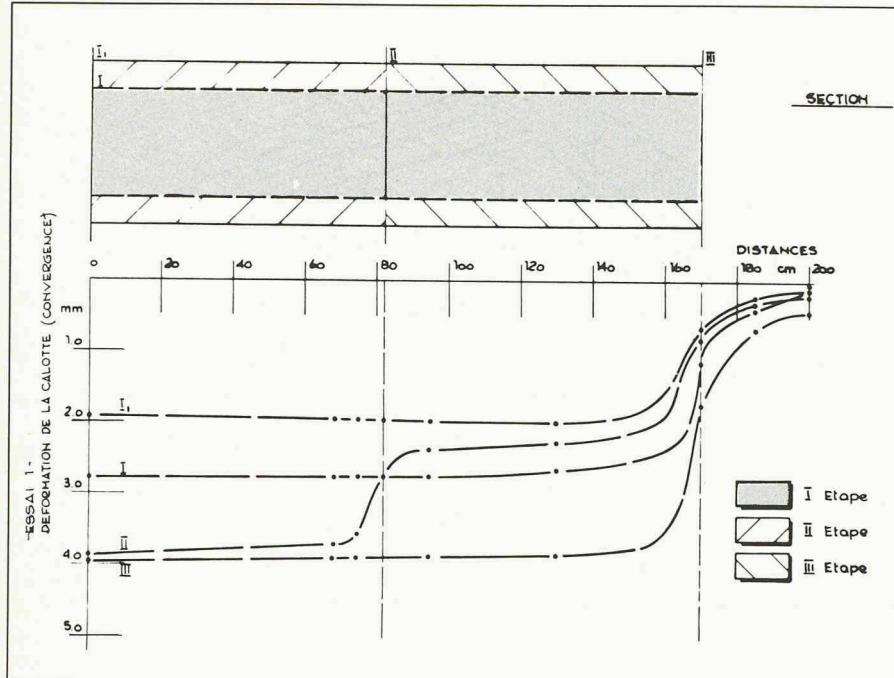


Fig. 5. — Convergences verticales calculées : essai 1.

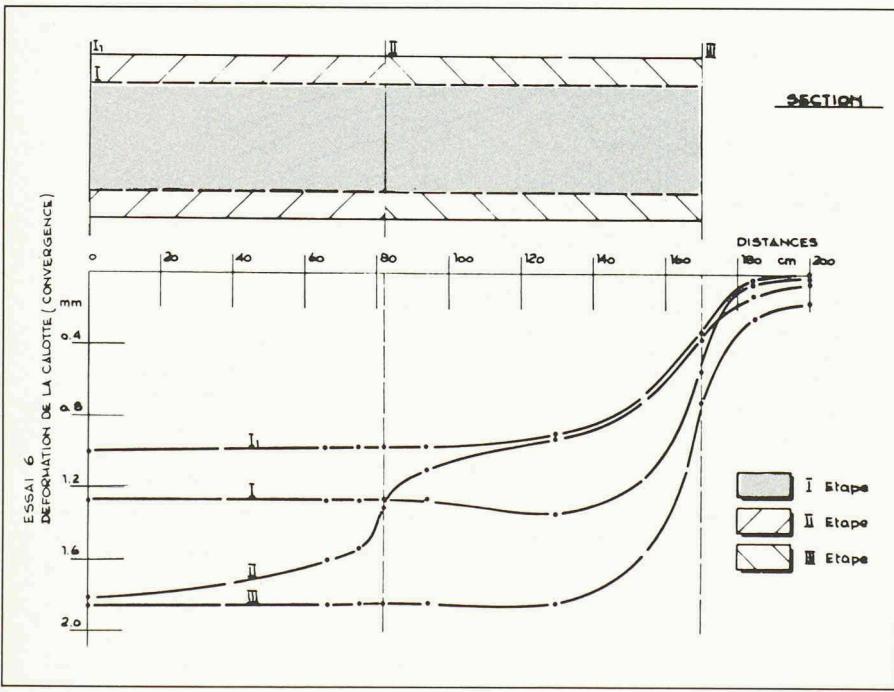


Fig. 6. — Convergences verticales calculées : essai 6.

3. Calcul du champ de contrainte et des déplacements durant l'élargissement de la section de la galerie à un diamètre de 0,48 m jusqu'à un avancement de 0,83 m.
4. Calcul du champ de contrainte et des déplacements durant l'élargissement de la section de la galerie à un diamètre de 0,48 m jusqu'à un avancement de 1,70 m.

Le champ de contrainte initial a été créé en appliquant progressivement les forces dues à la gravité en trois étapes de calcul. Les champs de contrainte et de déplacement décrits aux points 2, 3 et 4, ont été déterminés en trois étapes de calcul pour chacun d'eux.

Les analyses ont été effectuées en refaisant, sur la base des éléments plastifiés ou excavés, la matrice de rigidité à chaque étape de calcul.

Le modèle de calcul a été prévu avec l'intention de représenter également le soutènement introduit dans l'essai 6.

En réalité, à cause de l'extension limitée des zones plastiques rencontrées lors des trois premières phases, l'effet stabilisant dû aux boulons précontraints n'a pas été pris en considération dans la simulation numérique.

Le temps CPU employé pour chacune des deux analyses FEM est de deux heures et demie environ.

#### Résultats des analyses FEM

Les figures 2 à 4 représentent les déplacements superficiels calculés pour les trois différentes phases de taille et pour l'essai 6.

Ces diagrammes sont comparés à ceux mesurés lors des essais conduits sur le modèle physique.

De l'examen des allures mesurées et calculées, on peut mettre en évidence la constatation suivante :

— les valeurs mesurées et celles calculées sont comparables. La différence majeure réside dans la valeur des déplacements près de l'entrée de la galerie et au fond du modèle ; le contact entre les parois du modèle physique et le matériau n'est pas sans frottement et en conséquence les valeurs des déplacements mesurés sont plus faibles.

Les figures 5 et 6 représentent, pour les essais 1 et 6 respectivement, les allures calculées de la convergence entre la calotte et le radier de la galerie dans les trois phases d'excavation.

Les figures 7 et 8 représentent, pour les mêmes essais, les allures calculées de la convergence horizontale.

Quant à la distribution des contraintes, les figures 9 à 12 donnent à titre d'exemple la situation obtenue après la deuxième étape d'excavation, dans une coupe longitudinale verticale et trois profils situés près du front de taille.

TABLEAU II : Légende des courbes des figures 5 à 8

Courbe	I	$I_1$	II	III
Avancement de l'excavation [m]	1,70	1,70	1,70 0,85	1,70
Diamètre de l'excavation [m]	0,30	0,30	0,30 0,48	0,48
Distance radiale du point considéré [m]	0,30	0,48	0,48	0,48

#### Remerciements

L'auteur remercie MM. Descoëudres, professeur EPFL, et Egger, Dr ès sc. techn., qui l'ont chargé de mener ce travail et qui l'ont suivi en ce qui concerne les aspects physiques du problème, ainsi que M. Dysli, de son aide relative à l'utilisation du programme Adina et à l'interprétation des résultats.

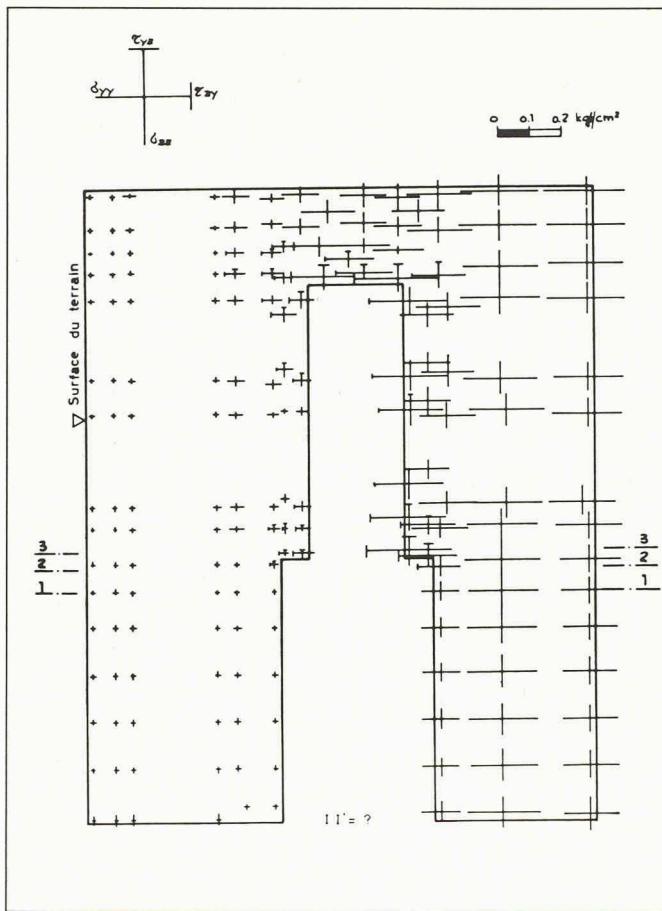


Fig. 9. — Contraintes dans le plan de symétrie vertical : essai 1, 2<sup>e</sup> étape d'excavation — coupe en long.

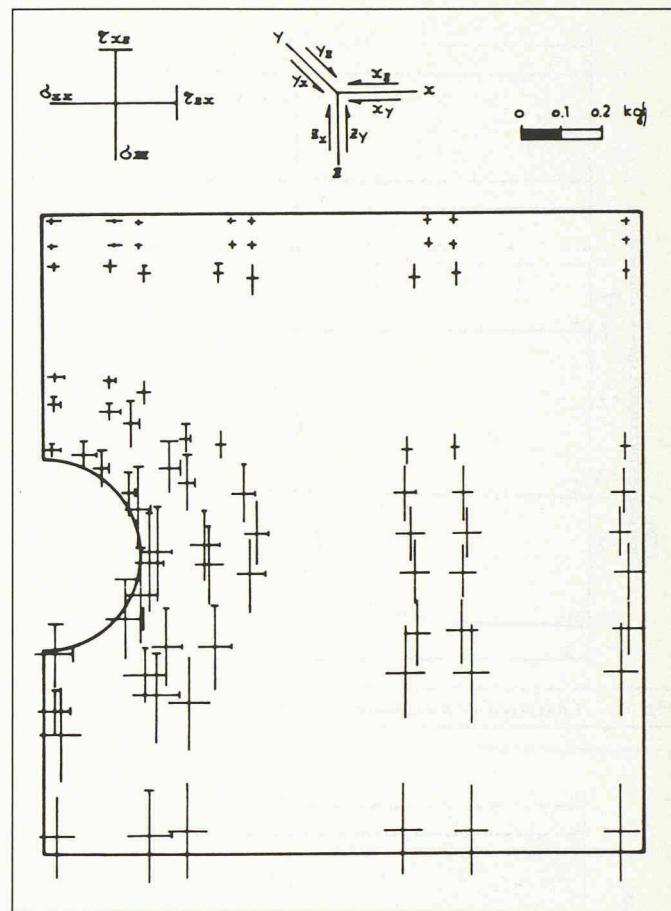


Fig. 11. — Idem section transversale 2-2.

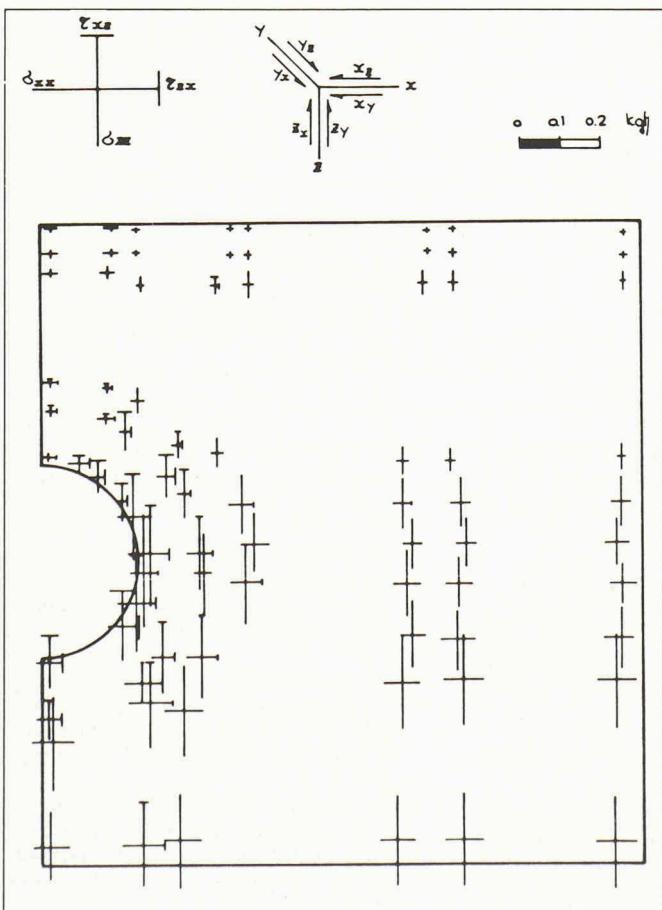


Fig. 10. — Contraintes dans la section transversale 1-1.

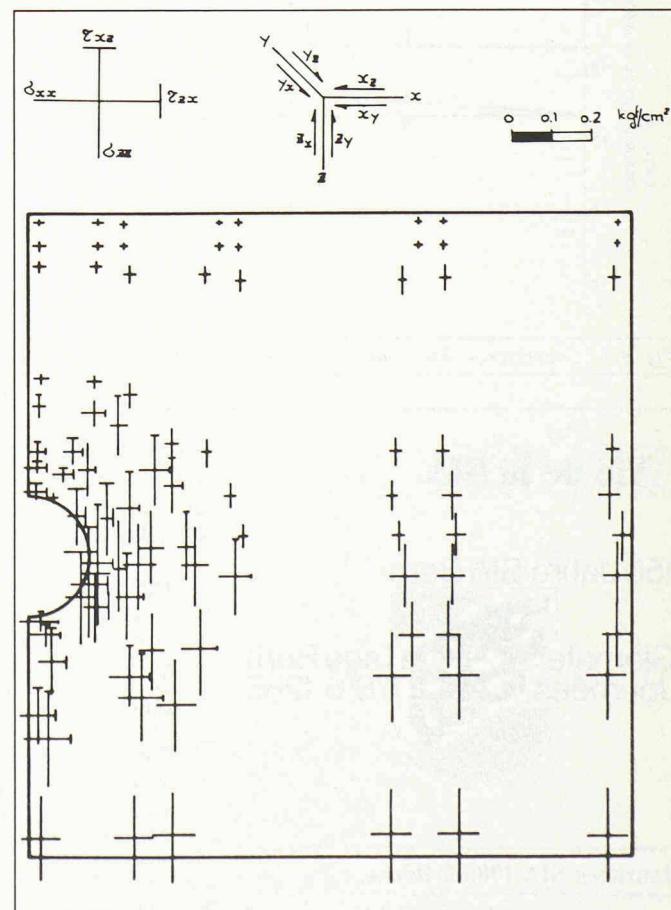


Fig. 12. — Idem section transversale 3-3.

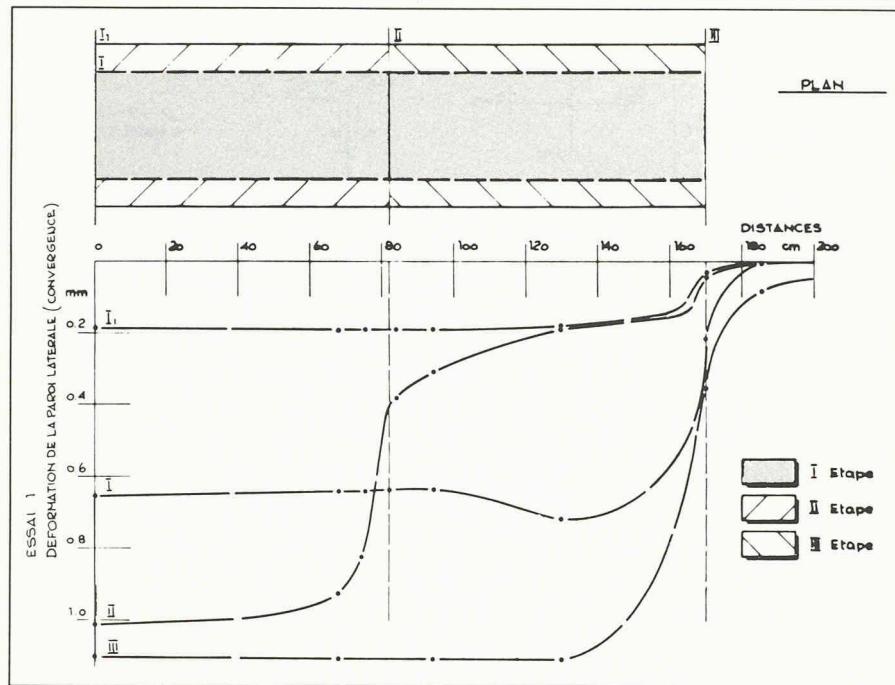


Fig. 7. — Convergences horizontales calculées : essai 1.

## Bibliographie

- A finite element program for automatic dynamic incremental nonlinear analysis (1981), Adina Eng., Inc., Watertown.
- BARLA G., Meccanica delle rocce, 2 vol., Clut, Torino, 1972.
- BARLA G., CRAVERO M., GIANI G.-P., MUNARI D., VALENTE S., CALI M., CARBONE V.-I., Introduzione al metodo degli elementi finiti, Collegio Costruttori, Politecnico di Torino, maggio 1980.
- DESCŒUDRES F., EGGER P., DIAB M., Stabilité des tunnels routiers à faible profondeur et tassements en surface, rapport de recherche en préparation.
- DYSLI M., Use of Adina in soil mechanics with case studies for excavations, Computers and structure, vol. 17, n° 5-6, p. 635-642, 1982.
- ODIER M., EGGER P., DESCŒUDRES F., Exécution et auscultation d'un tunnel sous très faible couverture, CR 10<sup>e</sup> Congrès. Int. MSTF, Stockholm, juin 1981.

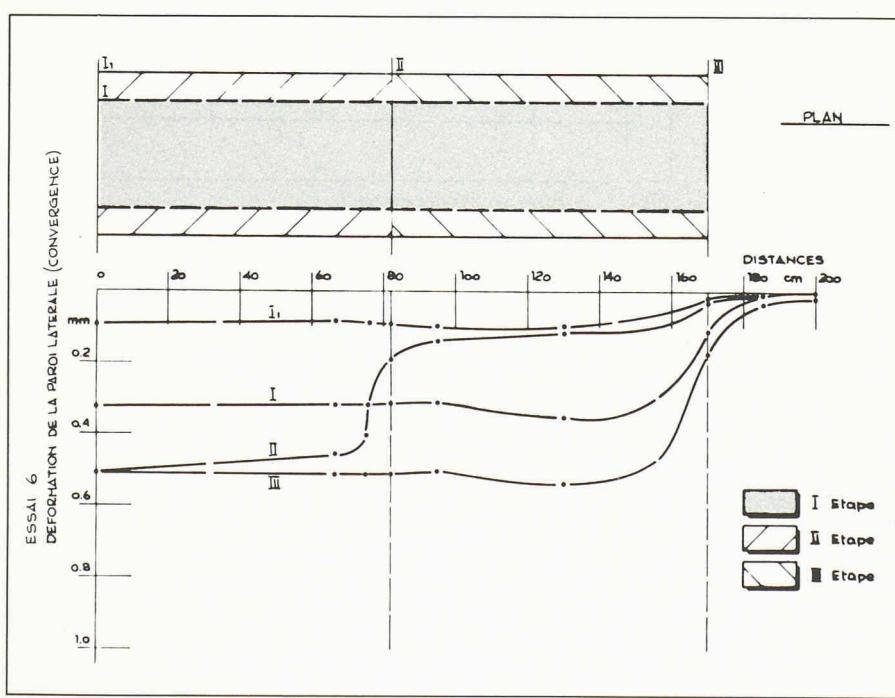


Fig. 8. — Convergences horizontales calculées : essai 6.

Adresse de l'auteur :  
 Gian-Paolo Giani,  
 professeur associé  
 Dipartimento Georisorse  
 e Territorio Politecnico di Torino  
 Corso Duca degli Abruzzi 24  
 I-10129 Torino

## Vie de la SIA

150 Jahre SIA Bern



Giornate SIA Tage Bern Journées SIA 7/8.6.1985

## Journées SIA 1985 à Berne

Comme promis, nous vous présentons en un bouquet les «Happenings» et les

excursions que nous avons préparés à votre intention et qui auront lieu le vendredi après-midi 7 juin et, en partie, le samedi matin 8 juin :

- Par exemple : *Les Troubadours*\*. Markus Traber chantera spécialement pour vous dans un local typique de la vieille ville.
- Par exemple : *La Berne verte*. Les Bernois sont fiers de la verdure de leur ville. Vous comprendrez pourquoi en suivant les jardiniers de la ville dans ses espaces verts.
- Par exemple : *Berne vu d'en bas*. Le département bernois des travaux publics se plongera avec vous dans le système d'évacuation des eaux de la vieille ville.
- Par exemple : *le théâtre municipal*. Après de longs travaux de rénovation, Berne possède un théâtre (presque) neuf. L'architecte responsable vous introduira dans ses coulisses.

\* Seulement vendredi.