

# Construction des ouvrages souterrains: modélisation tridimensionnelle des structures géologiques

Autor(en): **Tacher, Laurent / Mayoraz, Raphaël**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **120 (1994)**

Heft 8

PDF erstellt am: **14.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-78309>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Construction des ouvrages souterrains

Par Laurent Tacher, Dr ès sc., Aurèle Parriaux, professeur, Dr ès sc. GEOLEP, EPFL, 1015 Lausanne et Raphaël Mayoraz, Dr ès sc. Dynamic Graphics, Inc. Atlantic avenue 1015 Alameda 94501 (CA), USA

## Modélisation tridimensionnelle des structures géologiques

En géologie de l'ingénieur, l'emplacement des coupes géologiques est imposé par le tracé de l'ouvrage. Les plans de projection sont ainsi fréquemment inaptes à représenter la géométrie et l'incertitude sur la position réelle des discontinuités. Il est alors efficace de recourir à la représentation informatique tridimensionnelle (3-D).

### 1. Introduction

En géologie académique, la représentation bidimensionnelle (2-D) des structures est utilisée efficacement, parce que le géologue a toute liberté de choisir l'emplacement et l'orientation des coupes, en général perpendiculairement aux axes de plis et aux plans de failles. Pour le géologue attaché aux travaux de génie civil, le choix du plan de projection est gouverné par le tracé de l'ouvrage, souvent oblique aux structures géologiques. Dès lors, la coupe donne une vision trompeuse de l'agencement des formations rocheuses, en suggérant par sa nature bidimensionnelle (2-D) l'orthogonalité des discontinuités (interfaces et failles) par rapport à l'ouvrage. L'incertitude sur la position réelle des discontinuités, qui est un élément important de la conception des ouvrages, souterrains ou de surface, est fonction d'une obliquité qui ne peut être représentée (fig. 1).

De plus, la fracturation joue parfois, en géologie de l'ingénieur, un rôle aussi important que les limites de couches. Il est impossible de visualiser sur une coupe les intersections de l'ouvrage avec toutes les discontinuités.

### 2. Méthodes conventionnelles de représentation

Les techniques usuelles de représentation des structures géologiques sont conditionnées par

la nature même du support utilisé. Sur une feuille de papier, on représentera en général un plan dans lequel on tente de reporter une information variant fortement dans les trois dimensions de l'espace. Si les coupes géologiques permettent une vision claire des structures, leur validité ne peut généralement être étendue au-delà du lieu strict de leur établissement. Pour donner une définition complète de l'espace, il faut alors en construire un grand nombre, dont la consultation simultanée est mal aisée, de sorte qu'une vision d'ensemble est difficile à obtenir. De plus, la vue en coupe suggère la perpendicularité des surfaces intersectées; l'angle entre le plan de coupe et la discontinuité géologique ne pouvant être représenté, il n'est pas possible d'évaluer la précision locale de la coupe (i.e. les conditions d'intersection avec un tunnel), ce qui constitue un facteur d'erreur dans l'interprétation. La carte géologique est un cas particulier. On peut la considérer comme une coupe selon la surface topographique, ensuite projetée dans un plan

horizontal. Ce procédé se justifie par la richesse d'information que procure le levé de terrain, mais présente l'inconvénient de n'être fiable qu'à proximité de la surface et de ne pas permettre la représentation des structures tridimensionnelles que l'on sait pourtant en déduire.

Face aux limitations inhérentes à la nature bidimensionnelle du support, les méthodes de blocs-diagrammes ou de coupes sériées offrent une alternative théoriquement acceptable, mais dont la lisibilité décroît en pratique quand la complexité des structures augmente, de sorte que l'effort important consenti pour leur réalisation s'avère souvent injustifié. Dans de tels modèles, il est ainsi souvent extrêmement difficile de suivre l'évolution d'éléments fondamentaux de la géométrie tels que rejets de failles ou axes de plis.

On reprochera à ces méthodes les défauts suivants:

- Elles ne permettent pas une vision synthétique de l'ensemble des informations disponibles ou supposées, dont le coût d'acquisition invite par ailleurs à tirer le meilleur parti (forages profonds, galeries de reconnaissance, etc.).

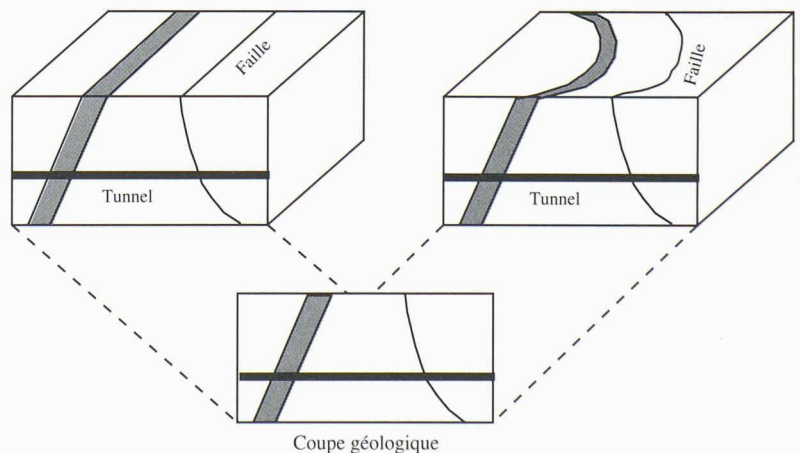


Fig. 1. – Deux contextes géologiques différents donnent lieu à la même coupe géologique, orientée selon un ouvrage en projet. A gauche, le plan de coupe est orthogonal aux discontinuités, dont l'orientation est en outre constante. La coupe géologique est ici un procédé suffisant de représentation. A droite, la coupe est oblique à des discontinuités qui évoluent dans l'espace; l'incertitude sur la position des intersections affecte une grande longueur de l'ouvrage.

Elles n'exploitent donc pas la totalité des données.

- Toute modification de ces modèles, de même que leur vision sous un angle différent, signifie leur entière reconstruction (v. tableau 1).

### 3. Types de modèles 3-D

La modélisation informatique 3D a fait de grands progrès en génie civil et en architecture. En géologie, ces procédés sont appliqués depuis peu; pour en comprendre les raisons, il faut examiner en détail les différents types de modèles. On peut les grouper en trois catégories:

- Les modèles du type «CAD» utilisent des fonctions mathématiques capables de tracer des formes plus ou moins compliquées (transformation de primitives), mais en général peu appropriées au traitement de formes géologiques pouvant être tout à fait quelconques. Les CAD impliquent en outre une simplification extrême du contexte géologique qui peut être dangereuse pour l'implantation des ouvrages.
- Les «modèles géologiques de bassin» (fig. 2) permettent la visualisation en trois dimensions de volumes obtenus par intersection de surfaces interpolées en deux dimensions. Cette approche n'est toutefois possible que lorsque les flancs des plis sont normaux (bassins sédimentaires et pétrole), la variable  $z$  étant interpolée dans le plan  $(x,y)$ .
- Les «modèles tectoniques», enfin (fig. 3), sont véritablement tridimensionnels. Si la structure présente des flancs et/ou des failles inverses, l'interpolation 3-D devient nécessaire pour permettre plusieurs valeurs de  $z$  en un même  $(x, y)$ , en calculant dans un espace  $(x, y, z, p)$ , où  $p$  est une propriété pouvant valoir la nature géologique d'une formation donnée.

**Tableau 1: Avantages et désavantages des systèmes de représentation en fonction de la complexité de la structure. A l'exception des cas simples, la modélisation 3-D s'impose pour exploiter correctement les données de terrain.**

Type de représentation	Complexité spatiale des structures géologiques	
	faible	forte
Carte	nécessaire	nécessaire
Coupe	nécessaire suffisant	insuffisant
Bloc-diagramme conventionnel	parfois utile	illisible
Coupes sériées	parfois utiles	illisibles
Modèle infographique 3-D	inutile	nécessaire

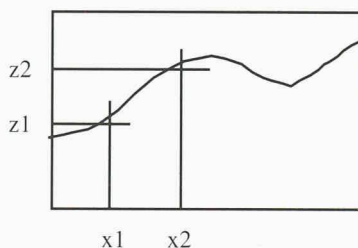


Fig. 2. - Modèle géologique de bassin

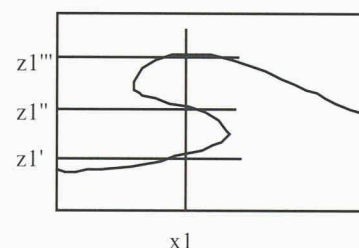


Fig. 3. - Modèle tectonique

Le traitement de ce cas de figure, fréquent dans le contexte géologique des chaînes de montagnes, fait l'objet du logiciel Earth Vision™, développé conjointement par la société Dynamic Graphics, Inc. et le GEOLEP-Laboratoire de géologie de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, et dont les caractéristiques essentielles sont les suivantes:

- véritable interpolation 3-D, permettant la représentation des structures les plus complexes;
- fusion de modèles présentant des propriétés différentes (fig. 4): on peut ainsi visualiser simultanément un modèle géologique et une autre propriété telle que la température, la pression, la résistance, etc.;
- contrôle des structures géologiques générées par imposition par l'opérateur de points de connexion entre les coupes (p. ex. axes de plis).

### 4. Principe de la méthode développée

Le procédé est conçu pour les formes géologiques complexes, ce qui le distingue nettement des outils de CAD, et il opère selon la démarche suivante.

- I. Discrétisation de chacune des surfaces structurales s.l. (interfaces géologiques, failles, topographie),
  - pour les surfaces 2-D (p. ex. topographie): digitalisation puis interpolation 2-D,
  - pour les surfaces 3-D: digitalisation de coupes, imposition de points de connexion, interpolation entre les coupes (linéaire ou spline cubique), puis interpolation 3-D (quadratique).
  - Dans le modèle, ce type de surface est l'isosurface  $p = 0$  d'une propriété fictive.
- II. Définition des surfaces de faille et de leurs relations géométriques, représentatives de la chronologie des

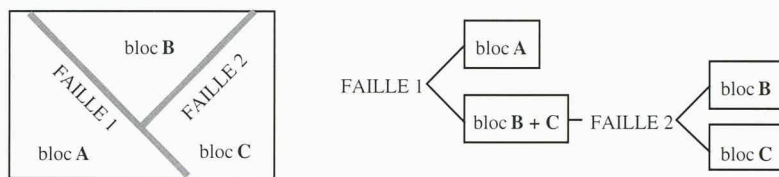


Fig. 4. – Schéma structural et arborescence chronologique correspondante. La faille 1 découpe le modèle en deux blocs (A et B+C). Elle est postérieure à la faille 2 qui découpe le bloc B+C en B et C.

événements de tectonique cassante (fig. 4)

III. Construction interactive de la séquence stratigraphique à l'intérieur de chaque bloc et indication pour chaque surface du type de relation avec les autres surfaces en cas d'intersection. Les relations illustrées par la figure 5 sont notamment disponibles.

IV. Calcul de l'ensemble du modèle selon un maillage 3-D. Soit l'ouvrage du génie civil est considéré comme une formation géologique (représentation volumique), soit représenté par des lignes, des tubes et des surfaces.

V. Éventuellement, fusion avec un modèle représentant une autre propriété (résistance, température, concentration, etc.), obtenu par interpolation 3-D (fig. 6).

### 5. Exemples d'application aux ouvrages souterrains

Ce procédé s'est avéré utile de nombreuses reprises dans les

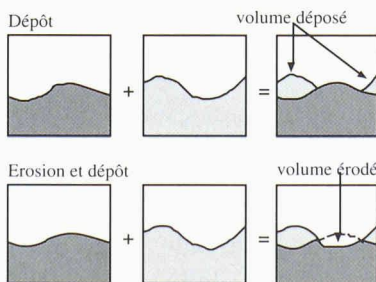


Fig. 5. – Vue en coupe des principaux types de relations géométriques entre formations géologiques, traduites dans le modèle par des règles d'intersection des surfaces. Le dépôt est traduit par une surface recouvrante, l'érosion-dépôt par une surface sécante et recouvrante.

domaines de l'implantation d'ouvrages souterrains (Cleuzon-Dixence, fig. 7), du stockage de déchets nucléaires (NAGRA/CEDRA), de la géologie du Quaternaire et de l'hydrogéologie, de la géothermie (fig. 6, projet pilote SPEOS), des glissements de terrain (autoroute N9) et de la géologie structurale (MAYORAZ, 1993). Nous présentons ci-dessous (fig. 8 à 11) un modèle représentatif des difficultés pouvant se présenter lors du percement d'un tunnel dans le contexte géologique alpin, et de l'apport de la méthode à son implantation. L'intersection de l'ouvrage avec les éléments structuraux apparaît clairement, de même que les régions critiques. Le modèle permet une appréciation de sa propre incertitude et favorise l'élaboration de nouvelles variantes d'ouvrage.

### 6. Pourquoi appliquer ces méthodes aux ouvrages souterrains?

Les modèles, quels qu'ils soient, n'inventent pas les données mais les mettent en valeur. Ils permettent de choisir efficacement de nouveaux points d'investigation, aident à la formulation et à la critique d'hypothèses. A cet égard, la méthode décrite ici intervient dans les diverses phases de construction d'un ouvrage.

- Lors de la *pré-étude*, il est très facile de placer diverses variantes d'un tracé dans un même modèle géologique, qui est également utile pour compléter un dossier d'exécution et pour exposer un

projet au public ou à des tiers (études d'impact, etc.).

- Dans le *projet d'exécution*, la simulation 3-D permet de relever des erreurs difficiles ou longues à percevoir en deux dimensions. Elle est nécessaire à la compréhension des structures les plus complexes, au test des hypothèses géométriques dont l'éventuelle incohérence ne ressortirait pas d'une modélisation 2-D. A ce stade, intervient également le calcul volumique interactif de formes complexes, telles que des classes d'excavation.

- Il est facile de mettre à jour le modèle en cours d'avancement de l'ouvrage. La fonction d'aide à la décision s'applique aussi en phase d'exécution, lors de laquelle on profitera des fonctions de visualisation simultanée de paramètres volumiques tels que champ de pression, résistance, température, etc.

- Les données acquises lors de l'exécution peuvent être enregistrées dans une base de données associée au modèle. L'*archive* infographique est fiable, rapide et facile à utiliser.

L'effort financier que représente la construction d'un modèle efficace est minime en regard du gain que constitue l'utilisation optimale des sommes allouées à l'exploration géologique.

### Référence

MAYORAZ, RAPHAËL: «Modélisation et visualisation infographiques tridimensionnelles de structures et propriétés géologiques», thèse de doctorat EPFL N° 1127, 1993

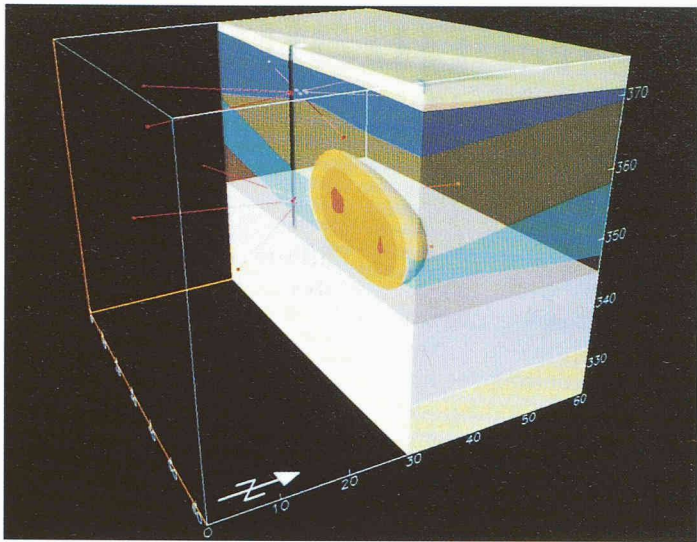


Fig. 6. – SPEOS: Site expérimental de stockage de chaleur dans les aquifères. Le modèle illustre la fusion de deux propriétés (nature géologique et température). Les niveaux aquifères sont présentés en transparence pour montrer simultanément la «bulle» de chaleur pour  $q > 38^\circ\text{C}$ . La migration vers l'est par rapport au puits d'injection apparaît nettement.

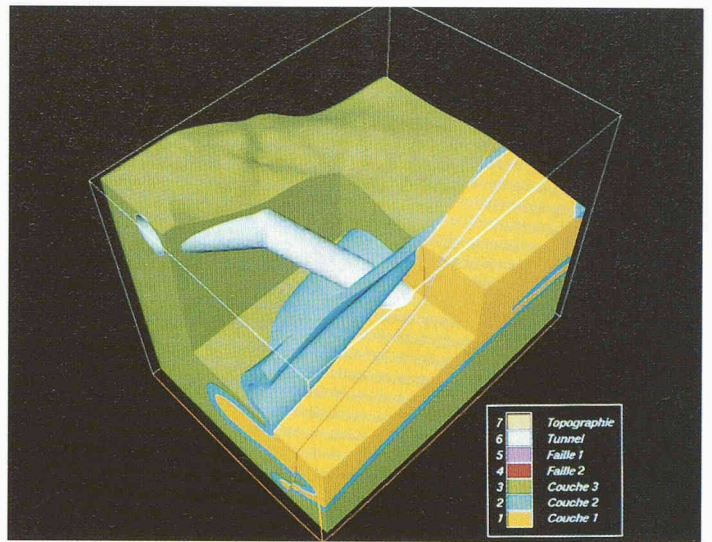


Fig. 7. – Modèle du Drotzé (Cleuzon-Dixence), destiné à optimiser l'injection dans une zone de roches broyées.

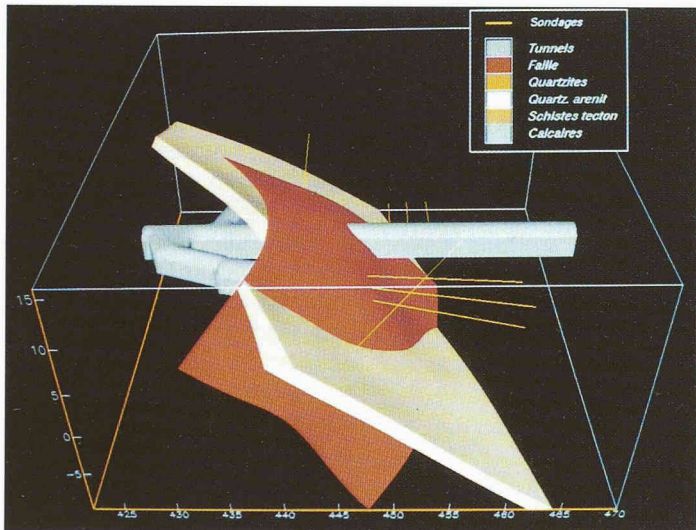


Fig. 8. – Tunnel fictif en contexte alpin  
Coupe oblique le long du tunnel. Le pendage des couches par rapport à la pente du tunnel est nettement observable.

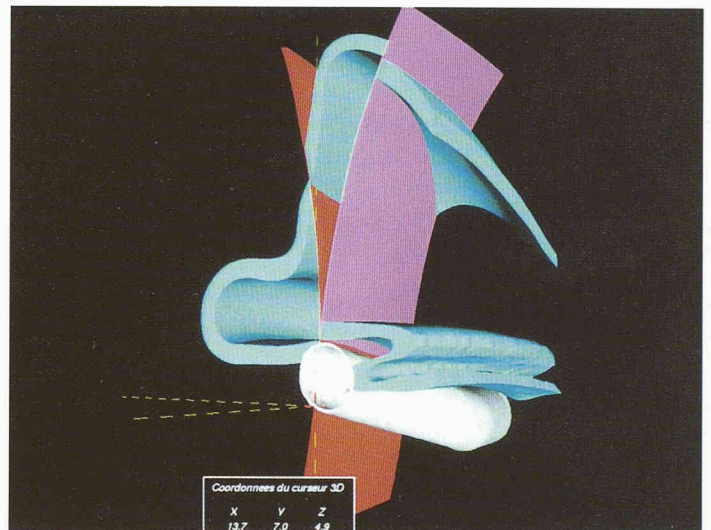


Fig. 9. – Tunnel fictif en contexte alpin  
Utilisation du «chair mode» à l'exception de la couche 2 et du tunnel. Les objets situés au dessus de la topographie ne sont pas affichés.

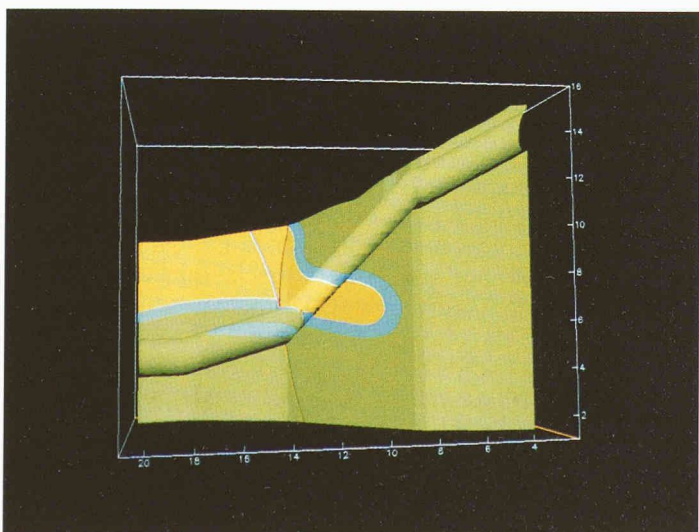


Fig. 10. – Tunnel fictif en contexte alpin  
Le curseur tridimensionnel indique les coordonnées exactes de l'intersection des deux failles et du tunnel.

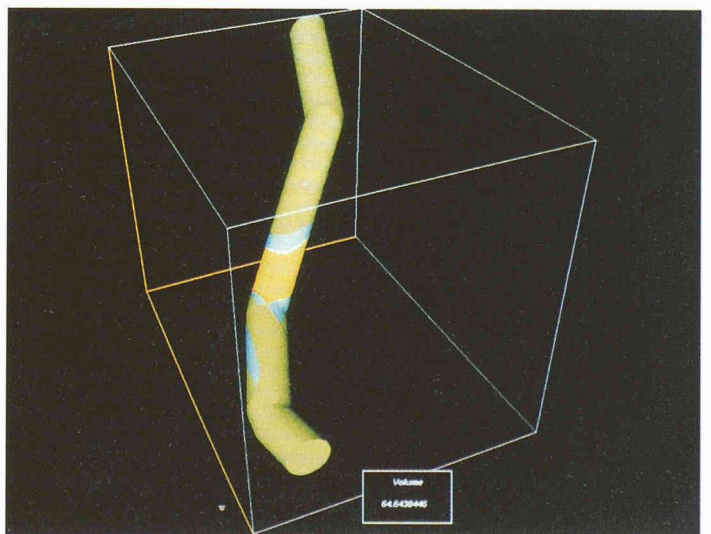


Fig. 11. – Tunnel fictif en contexte alpin  
Exemple de calcul volumique interactif en unités du modèle; ici, le volume total de l'excavation.