

Zeitschrift:	Ingénieurs et architectes suisses
Band:	120 (1994)
Heft:	8
Artikel:	Construction des ouvrages souterrains: modélisation tridimensionnelle des structures géologiques
Autor:	Tacher, Laurent / Mayoraz, Raphaël
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-78309

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: 04.02.2026

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

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

Construction des ouvrages souterrains

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 sérielles 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.).

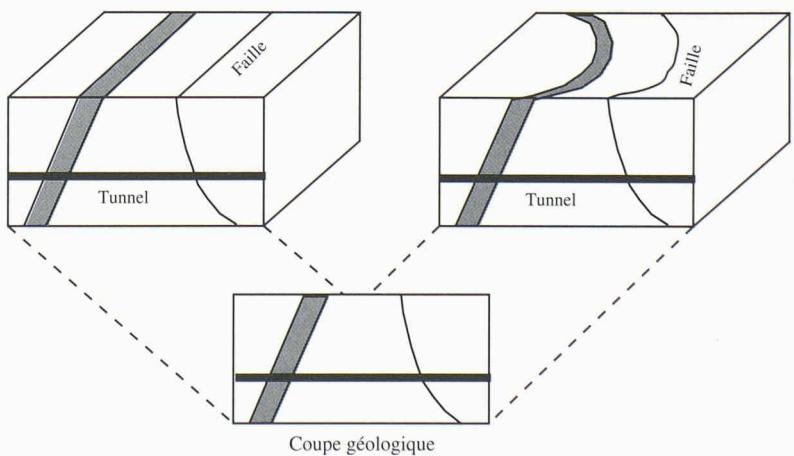


Fig. 1. – Deux contextes géologiques différents donnent lieu à la même coupe géologique, orientée selon un ouvrage en projet. A gauche, le plan de coupe est orthogonal aux discontinuités, dont l'orientation est en outre constante. La coupe géologique est ici un procédé suffisant de représentation. A 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 séries	parfois utiles	illisibles
Modèle infographique 3-D	inutile	nécessaire

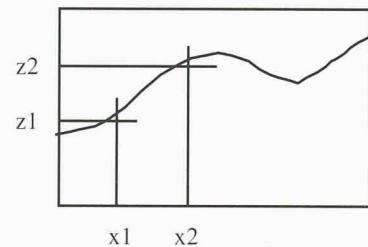


Fig. 2. – Modèle géologique de bassin

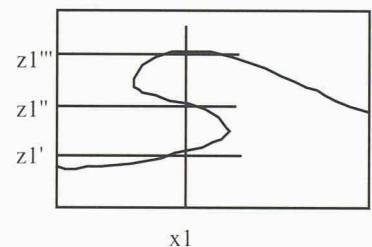


Fig. 3. – Modèle tectonique

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 GÉOLEP-Laboratoire de géologie de l'Ecole 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 (linéaire ou spline cubique), puis interpolation 3-D (quadrique).
 - 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

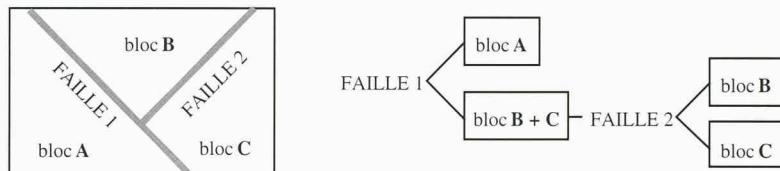


Fig. 4. – Schéma structural et arborescence chronologique correspondante. La faille 1 découpe le modèle en deux blocs (A et B+C). Elle est postérieure à la faille 2 qui découpe le bloc B+C en B et C.

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 à de nombreuses reprises dans les

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

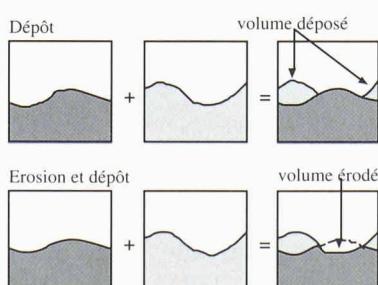


Fig. 5. – Vue en coupe des principaux types de relations géométriques entre formations géologiques, traduites dans le modèle par des règles d'intersection des surfaces. Le dépôt est traduit par une surface recouvrante, l'érosion-dépôt par une surface sécante et recouvrante.

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'*archivage 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

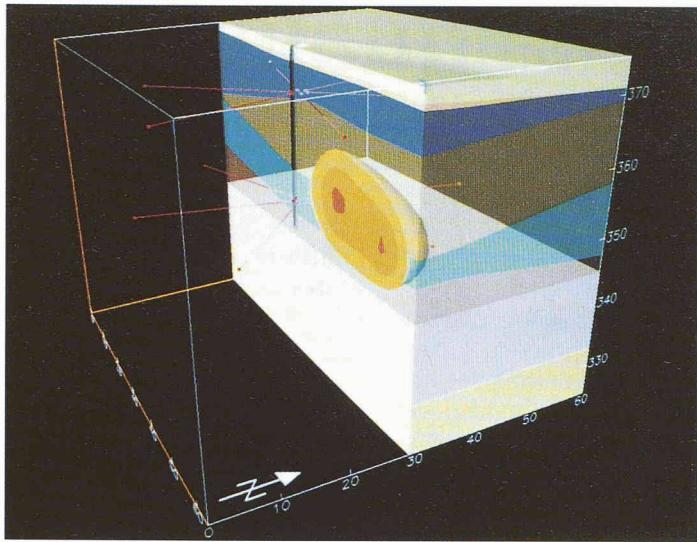


Fig. 6. – SPEOS: Site expérimental de stockage de chaleur dans les aquifères. Le modèle illustre la fusion de deux propriétés (nature géologique et température). Les niveaux aquifères sont présentés en transparence pour montrer simultanément la «bulle» de chaleur pour $q>38^{\circ}\text{C}$. La migration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

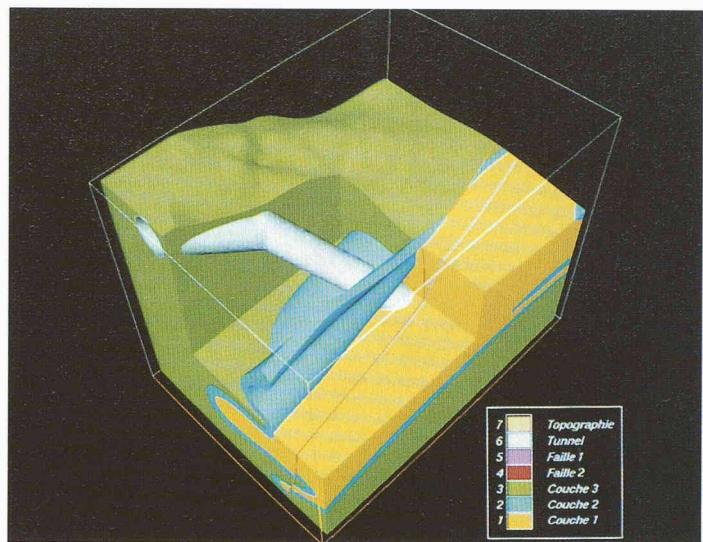


Fig. 7. – Modèle du Drotzé (Cleuzon-Dixence), destiné à optimiser l'injection dans une zone de roches broyées.

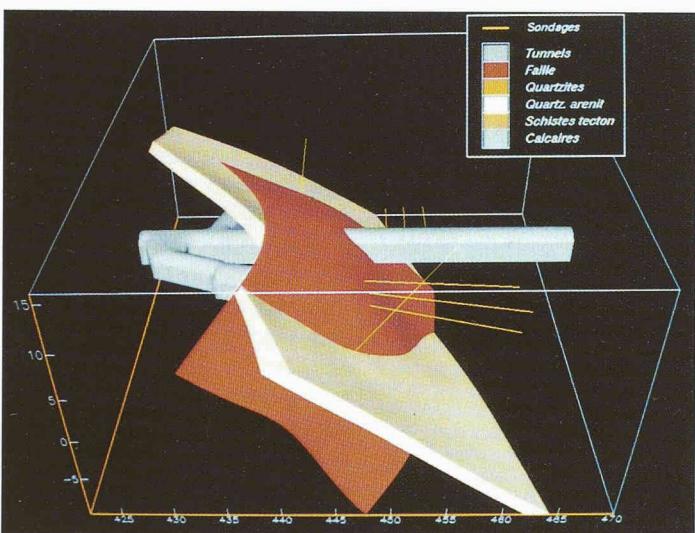


Fig. 8. – Tunnel fictif en contexte alpin
Coupe oblique le long du tunnel. Le pendage des couches par rapport à la pente du tunnel est nettement observable.

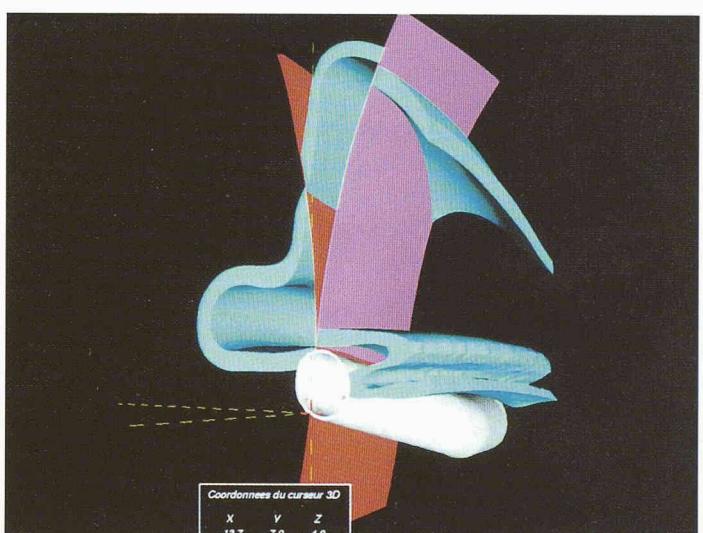


Fig. 9. – Tunnel fictif en contexte alpin
Utilisation du «chair mode» à l'exception de la couche 2 et du tunnel.
Les objets situés au dessus de la topographie ne sont pas affichés.

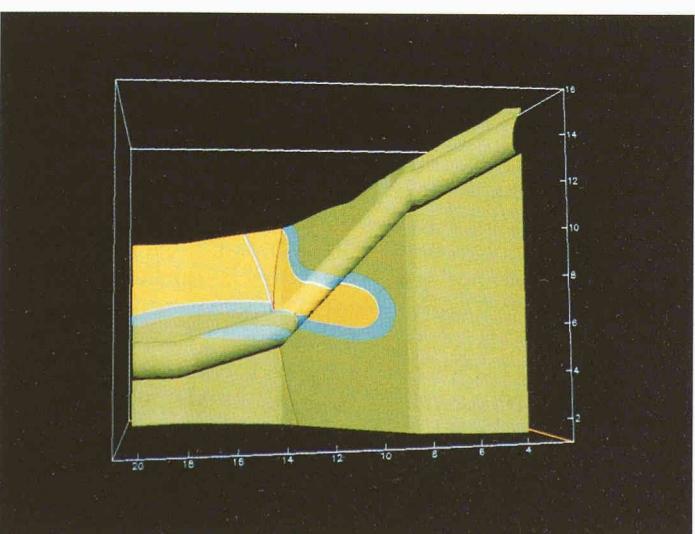


Fig. 10. – Tunnel fictif en contexte alpin
Le curseur tridimensionnel indique les coordonnées exactes de l'intersection des deux failles et du tunnel.

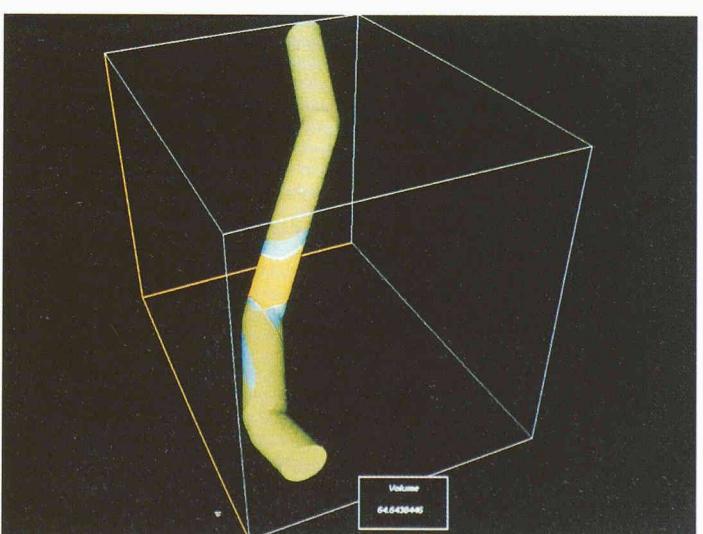


Fig. 11. – Tunnel fictif en contexte alpin
Exemple de calcul volumique interactif en unités du modèle; ici, le volume total de l'excavation.