

# Insertion des ouvrages souterrains dans un paysage géologique

Pierre Duffaut, Espace Souterrain, Paris

## Résumé :

Avant tout projet l'architecte étudie les conditions du site. En souterrain, plus de façades, plus d'effets du vent ou du soleil, le projeteur apparaît donc plus libre qu'en surface. Pourtant les reliefs et les eaux superficielles restent pertinents, et le terrain, tant en surface qu'à l'intérieur constitue bien une autre sorte de paysage, auquel il y a lieu d'intégrer les ouvrages souterrains. à toute échelle le terrain apparaît *structuré*. Une véritable "*architecture souterraine*" doit donc savoir bénéficier des propriétés structurales du terrain. En faisant un parallèle avec la biologie, on peut grouper les traits de ce paysage en trois aspects, *morphologie* (formes de la surface), *anatomie* (matériaux et structure interne), et *physiologie* (ce qui s'y passe). La géographie de la ville offre aussi des obstacles et des facilités. Les nombreux exemples d'adaptation d'un ouvrage à son site montrent que les contraintes des constructions en surface sont remplacées en souterrain par d'autres. Le terrain enveloppe tout l'ouvrage, d'où son rôle prépondérant : en souterrain plus qu'ailleurs, le terrain commande. Mais il a aussi des qualités propres, dont il y a lieu de tirer avantage.

## Abstract :

Before any project, the architect shall study the site. Underground, there are no longer façades, neither wind or sun problems, so he may feel freer than on the surface. Yet reliefs and surface waters keep relevant, and the ground, as well outside as inside, makes another kind of site, a "groundscape", into which underground buildings have to be integrated. At any scale, the ground proves to be structured. A true *underground architecture* shall understand how to benefit the structural properties of the ground. The features of the ground are paralleled to three aspects of living beings, *morphology* (shape of the surface), *anatomy* (materials and internal structures) and *physiology* (what happens inside). The geography of cities also offers obstacles and opportunities. The many examples quoted show that the constraints on surface buildings are replaced underground by others. As the ground encloses the whole building, its part is preponderant : underground more than elsewhere, the ground shall rule. And it has qualities of its own, of which benefits may be drawn.

## 1. INTRODUCTION

Le programme de tout projet de construction comprend des *objectifs*, les fonctions à satisfaire, volumes et gabarits, liaisons avec l'extérieur et entre volumes, charges des planchers, etc. et des *contraintes* à respecter, coût, délais, qualité, sécurité, sans oublier l'environnement, ainsi que la limitation des nuisances des chantiers. Avant tout projet de bâtiment ou d'urbanisme, l'architecte étudie les conditions physiques du site, le *paysage*, relief, ensoleillement, vents dominants, vues proches et lointaines, puis les conditions de desserte par les *réseaux*, de voirie, de câbles et de conduites, enfin les *règlements* d'urbanisme, alignements, hauteurs, coefficients d'occupation, etc. S'agissant d'ouvrages visibles, il ajoute des critères esthétiques, même pour un bâtiment industriel.

En souterrain, le projeteur apparaît d'abord plus libre : il n'y a plus de vent ni de soleil, plus de façades visibles, l'importance du cadastre et des règlements s'estompe, sinon celle des règlements sur la sécurité des usagers. Pourtant la *géographie* propose les formes de la surface et la position des reliefs et des eaux, et la *géologie* propose le matériau principal, *le terrain*, infiniment moins connu, et souvent beaucoup plus complexe que les matériaux utilisés en construction. La nature des terrains, leur disposition relative et les détails de leurs structures constituent bien une autre sorte de paysage, non moins réel qu'en surface, un "paysage géologique" (qu'on pourrait appeler en anglais *groundscape*), auquel il va falloir intégrer les ouvrages souterrains.

En vérité, le terrain enveloppe tout ouvrage souterrain, d'où son rôle prépondérant ; en souterrain davantage que pour tout autre aménagement ou construction, le terrain commande. Comment adapter au terrain l'urbanisme et l'architecture en souterrain, les chapitres suivants donnent des exemples de ce qui a été fait et de ce qu'on devrait faire.

## 2. IMPORTANCE DE LA GEOGRAPHIE ET DE LA GEOLOGIE

Si c'est la *géographie humaine et économique* qui fournit les arguments en faveur des ouvrages souterrains (comme pour les constructions en surface, qu'il s'agisse d'habitations, d'usines ou de monuments), ce sont la géographie physique et la géologie qui vont fixer les conditions de réalisation.

La ville qui grandit est au premier rang des demandeurs d'espace souterrain, parce que toutes les fonctions assurées par son centre doivent s'adapter à la croissance de la population desservie. Il lui faut toujours davantage d'espace pour l'administration, les hôpitaux et les écoles, la culture, les sports, mais aussi les réseaux, dont les réseaux de transport, les plus gourmands en espace, sans pour autant renoncer aux espaces libres souvent hérités de l'urbanisme des siècles précédents, qui mettent en valeur les monuments et les perspectives.

La maîtrise foncière (parcelles privées et domaine public), les nuisances des chantiers (restrictions de circulation et d'accès aux commerces, bruit, poussières, etc.), la communication avec les habitants sont d'autres aspects de géographie économique et humaine.

De la *géographie physique* on retiendra comme éléments pertinents les formes de la surface, plaines et plateaux, reliefs en creux et bosses, pentes douces ou abruptes, et les eaux superficielles, tant cours d'eau et canaux que plans d'eau, de la mare à la mer. Les sites de villes en sont pour la plupart tributaires, fixés par le port, le gué, le confluent, l'accès au col pour franchir la montagne. On rassemble ici le relief et l'hydrographie de surface sous le concept de *morphologie* du terrain.

De la *géologie*, on retiendra la distinction entre différents terrains, par exemple meubles ou non, tendres ou durs, massifs ou stratifiés, et leur disposition relative, superposition (stratification), intersection (failles et filons), plissements (fig. 1) ; puis la description de chacun des terrains aux échelles pertinentes, c'est-à-dire en quelque sorte l'*anatomie* du terrain ; enfin les champs et flux que l'on peut y reconnaître, qu'on regroupe ici sous le concept imagé de *physiologie* du terrain.

Ce qu'on appelle ici paysage, ou souvent *site*, est donc décomposé en quatre facteurs, morphologie, anatomie, physiologie, et occupation de la surface, les trois premiers soulignant un parallèle avec les sciences naturelles de la vie, la biologie. Ces facteurs ne sont à l'évidence pas indépendants, la structure géologique justifie les traits du relief, qui gouvernent l'écoulement des eaux, et au moins en partie l'occupation de la surface ; leurs limites ne sont pas toujours nettes ; et surtout la plupart des exemples cités mettent en jeu plusieurs de ces facteurs ; mais ils ont le mérite de fournir une première grille de classement.

### 3. ADAPTATION à LA MORPHOLOGIE

Les reliefs appellent les tunnels de *franchissement*, notamment pour les canaux, strictement horizontaux, et pour les faibles rampes des chemins de fer (exception faite des crémaillères et funiculaires). Le premier exemple routier, entre Naples et Pouzzoles, en Italie, aura bientôt 2000 ans. Les autoroutes modernes font de plus en plus appel aux tunnels, y compris pour contourner les villes serrées entre l'eau et la montagne.

Les reliefs escarpés, et parmi eux les falaises les mieux exposées, ont attiré de tout temps les habitats troglodytes comme les temples et les tombeaux (Saletta 1994). En outre les reliefs rocheux sont exploités pour fournir des matériaux de construction, et les carrières souterraines sont souvent réutilisées. Elles offrent ainsi des caves derrière l'habitation et non dessous, qui évitent l'échelle ou l'escalier, et qui échappent plus facilement à la nappe phréatique. Tout relief apparaît donc comme un *gisement d'espace* utile, accessible de niveau, facile à aérer (quelquefois même à éclairer), et dont on peut sortir sans force ni moteur.

Les plaines sont moins favorables aux ouvrages souterrains, en raison des difficultés d'accès : les rampes occupent de l'espace et leur parcours demande de l'énergie ; si la nappe y est peu profonde, les plaines sont humides. Les excavations de nombreuses carrières à ciel ouvert procurent un relief artificiel susceptible des mêmes avantages que les autres, mais il n'y a guère d'exemples de réhabilitation de telles carrières, à vrai dire rarement urbaines.

### 4. ADAPTATION à L'ANATOMIE

Il est rare que le terrain soit indifférencié ; à toute échelle il apparaît au contraire comme structuré par des écarts plus ou moins ordonnés à la *continuité*, à l'*homogénéité*, et à l'*isotropie* (Duffaut 1970 et 1995). Ainsi aux échelles du millimètre au décimètre, on décrira les cristaux, tous anisotropes, les fossiles, les vides etc., tous éléments qu'on peut comparer aux éléments classiques des matériaux et des constructions, bétons, poutres et dalles.

A une échelle convenable, beaucoup de roches, craies, calcaires, grès et granites, montrent une certaine

homogénéité statistique ; mais beaucoup d'autres comportent des inclusions, comme les silex de la craie, les poches d'argile des calcaires karstiques, etc., et beaucoup qui paraissent isotropes révèlent une anisotropie de comportement en déformabilité et en rupture. L'assemblage des bancs est toujours anisotrope, et ce caractère est exacerbé dans les roches *schisteuses*. Les déformations de l'écorce terrestre se traduisent par des plis, des écailles, des failles ; celles-ci peuvent receler des zones broyées, et leur structure est aussi très anisotrope. Les *roches tendres* sont toujours poreuses, donc isolantes, légères, faciles à creuser et à tailler, ce qui en fait des candidats privilégiés tant pour les cavités que pour les matériaux de construction, en France la craie, les faluns, le tuffeau, en Chine le loess, plus tendre encore. Ces qualités s'ajoutent à celles du relief pour justifier les carrières et les troglodytes déjà cités.

Bien connus dans les mines sédimentaires, les terrains *stratifiés* se distinguent des autres par leur aptitude à donner aux "chambres" d'exploitation des toits plans naturellement stables ou faciles à stabiliser. Un exemple remarquable d'adaptation au sous-sol de Paris est donné par la salle de coffres de la Banque de France (fig. 2), creusée en 1925 à 25 m sous son siège : au sein de la formation appelée "calcaire grossier", épaisse de 15 m et horizontale, un toit calcaire est soutenu par 714 piliers sur une surface de 108 m sur 102. Malgré le succès de cet ouvrage, à vrai dire peu connu, son exemple n'a pas été repris à Paris. Mais on peut citer les réalisations de l'université de Minneapolis (Carmody et Sterling 1992).

Les tunnels ne peuvent bénéficier de cet avantage que si le *pendage* des couches ne s'écarte pas trop du profil de la route à suivre. Il acceptent parfois de suivre des couches plissées, ainsi le siphon sous la ville de Niagara Falls (NY) (fig. 3), et même on le sait le Tunnel sous la Manche. L'expérience des mineurs conduit à préférer la direction dite *travers-bancs*, perpendiculaire aux bancs ou feuilletés, à toute autre direction. C'est en effet la plus stable.

En vérité les mineurs bénéficient, sans toujours s'en rendre compte, de ce que leurs cavités se trouvent "par définition" adaptées à la structure du terrain ; ils "démontent" une partie du terrain comme en suivant des pointillés ; c'est ce qui fait la valeur du site extraordinaire de Kansas City, Missouri.

Dans les terrains non stratifiés, c'est l'*effet de voûte* qui assure la stabilité (pourvu que la profondeur soit suffisante). A grande profondeur, le plancher lui aussi doit être voûté et la forme idéale d'une caverne est en général celle de l'oeuf. Il est en effet recommandé d'éviter les grandes parois planes dès lors qu'elles ne sont pas proposées par la Nature. Dans les terrains schisteux, l'allongement de l'oeuf (ou d'une ellipse proche) sera choisi perpendiculaire au plan de schistosité, comme la direction du travers-bancs.

La stabilité des cavités dépend aussi de leur *taille*, à comparer notamment avec l'espacement des fractures (ou l'épaisseur des bancs). Les grottes naturelles montrent des toits plans jusqu'à une portée de 100 m (Poudrey, Doubs, fig. 4). Le banc formant le toit est un calcaire massif de 25 m d'épaisseur. Au-delà la portée maximale d'un toit voûté approche 400 m (Sarawak, Malaisie). Dans les mines souterraines des portées de l'ordre de 100 m existent, mais leur pérennité n'est pas recherchée, bien au contraire. Quant aux cavernes "civiles", elles n'ont osé que tout récemment dépasser 35 m, avec la patinoire olympique de Gjøvik, 61 m. Pour faire mieux, il faudrait choisir un terrain plus massif encore, par exemple le granite des Inselbergs (ou pains de sucre) de Rio de Janeiro (fig. 5), ou un terrain à bancs horizontaux épais, comme à Poudrey.

Enfin on devrait pouvoir ouvrir de *très grande portées*, des "TGP", au-delà même de 200 m, en cumulant l'épaisseur du banc du toit et l'effet de voûte au sein du banc, c'est-à-dire en plaçant la caverne sous une voûte anticlinale (fig. 6). L'intérêt de cette proposition pourrait être de réactualiser les projets de centrales nucléaires souterraines en mettant toute l'installation dans une seule caverne.

Les *failles* méritent une mention particulière car elles sont la principale cause de dépassement des coûts et des délais en matière de travaux souterrains. Le franchissement d'une chaîne est le plus souvent perpendiculaire aux structures tectoniques, donc les failles majeures sont traversées au plus court et en travers-bancs ; au contraire les *couloirs topographiques* empruntés par les cours d'eau et après eux par les voies de circulation rapide s'alignent le long des failles. Dans une vallée sinueuse, comme au col entre deux vallées s'écoulant en sens opposés, le passage souterrain le plus court, celui qui attire l'oeil du projecteur, est justement le passage de la faille. Ainsi dans le Massif central français, beaucoup de tunnels de chemin de fer ont été creusés dans les mylonites (*gouge* en anglais, et désormais kakirite). Il y a un siècle le creusement en a été facilité, mais ils ne doivent leur stabilité qu'à l'expertise des boiseurs d'alors.

## 5. ADAPTATION à LA PHYSIOLOGIE

Les champs électriques et magnétiques ne sont évoqués que pour mémoire, les flux de chaleur sont plus significatifs, mais seuls seront abordés les champs de contraintes et les flux d'eau souterraine. Discontinuités, hétérogénéités et anisotropies influencent tous ces champs. Les phénomènes tectoniques, sismiques et volcaniques sont écartés aussi, sinon pour rappeler que les secousses sismiques sont moins intenses à l'intérieur

du terrain qu'à la surface ; le séisme Hyogoken-nanbu qui a frappé Kobé et ses environs le 17 janvier 1995 n'a pas produit de dégâts dans les vrais tunnels au rocher.

On sait que les *contraintes naturelles* ne s'expliquent pas seulement par la pesanteur ; la prépondérance des contraintes horizontales dans certaines régions (les "boucliers" canadien et scandinave notamment) justifie la meilleure stabilité des tunnels à section aplatie, alors qu'ailleurs les sections élancées sont plus stables ; la caverne de la patinoire olympique de Gjøvik, Norvège, leur doit sa stabilité davantage qu'aux moyens de soutènement mis en oeuvre. Ainsi la forme et l'orientation du tenseur contrainte (qui est pour l'ouvrage une vraie précontrainte) va s'ajouter à celle de l'anisotropie du terrain pour modifier la forme idéale des tunnels et des cavernes. On connaît aussi leur effet sur la séquence classique d'exécution des grandes cavernes élancées : la voûte excavée d'abord a une forme aplatie, compatible avec une forte contrainte horizontale, mais l'excavation complète est moins stable, la voûte en béton de la centrale Tumut (Snowy Mountains, Australie) s'est fissurée pendant cette deuxième phase.

L'eau souterraine est connue comme le principal ennemi du mineur dans les ouvrages profonds, non tant par son débit que par sa pression, d'autant plus redoutable qu'elle ne peut se libérer rapidement : on comparera l'étanchéité relative du terrain et la vitesse d'avancement en les exprimant dans la même unité (10 m/d d'avancement = 10-4 m/s, une perméabilité mille fois supérieure à celle de la craie au tunnel sous la Manche). Les plus graves perturbations des chantiers sont les *débousses*, où l'eau entraîne le terrain comme dans un gigantesque renard (*piping failure* en anglais), et remplit les tunnels jusqu'au portail (sauf s'ils sont creusés en descendant).

Elle est aussi le principal obstacle des ouvrages même superficiels dans les plaines alluviales, surtout en raison des impacts sur l'écoulement des nappes phréatiques, mais aussi du coût des étanchéités, des drainages et des pompes. Pour les usagers qui ne tolèrent pas d'eau du tout, aucun dispositif, sinon un cuvelage d'acier soudé, ne peut garantir durablement contre l'eau sous pression ; ainsi le CERN, Centre européen de recherches nucléaires, a-t-il beaucoup de mal à garder à sec son super synchrotron LEP (sous 150 m de calcaire karstique, au pied du Jura).

Pour échapper à la nappe, la première ligne du métro de Lyon a été construite très près du sol, mais elle n'a pu éviter de former localement un barrage souterrain qui fait remonter la nappe à l'amont, et allonge la longueur de ligne baignée par l'eau. Quant aux "boîtes" construites à ciel ouvert, pour la Bibliothèque de France par exemple, les parois moulées peuvent leur assurer une étanchéité suffisante mais elles obstruent considérablement l'écoulement naturel si des précautions ne sont pas prises, analogues aux dérivations autour des chantiers de barrages.

Hors la terre ferme, le sous-sol des cours et nappes d'eaux suppose une étanchéité particulièrement soignée (parcs à voitures sous un bassin du port de Sète, Hérault, puis sous le Rhône à Genève, et à une échelle plus grande en bord de mer à Monaco).

## 6. ADAPTATION à LA GEOGRAPHIE DE LA VILLE ET ACCES AU SOUS-SOL

Chaque établissement urbain se trouve un jour à l'étroit dans les limites de sa parcelle initiale, et ne peut s'étendre à l'extérieur. Ainsi le Palais du Luxembourg qui abrite le Sénat de la France s'est doté de bureaux enterrés donnant sur des patios, mais aussi de salles de conférences aveugles, et de parcs à voitures. De même le Conservatoire national des arts et métiers a placé sous sa cour d'honneur un grand amphithéâtre, en suivant les idées exprimées depuis les années 30 par Edouard Utudjian (1952). Plus récemment, et comme maint campus américain, le siège parisien de l'UNESCO a eu recours pour s'agrandir à un bâtiment enterré de trois étages autour de six patios.

La ville de Rouen offre un bon exemple de recours au sous-sol : dès 1850 la gare de chemin de fer est placée au coeur de la ville entre deux tunnels ; un siècle plus tard un parc à voitures et un grand tunnel routier seront construits et les années 90 ont vu arriver un tramway souterrain. Ce développement tient beaucoup au relief accusé et à la qualité du terrain, la craie.

Pour échapper aux tréfonds des parcelles privées, les ouvrages souterrains publics, les égouts d'abord, les métros ensuite, et les parcs de stationnement, sont placés autant que possible sous les rues et les places. Mais on s'est peu préoccupé des obstacles que ces ouvrages encombrants allaient constituer pour des aménagements ultérieurs. La principale difficulté des projets urbains modernes, tant métros qu'autoroutes souterraines vient des ouvrages existants. Tous les travaux sous voirie se heurtent d'abord aux petits réseaux de câbles et de conduites qu'il faut le plus souvent déplacer. C'est une occasion de les remettre en état et surtout en ordre, et si possible de les regrouper dans des galeries techniques (Duffaut et Labbé 1994). Les liaisons avec la surface, rampes, escaliers et ascenseurs, gaines de ventilation, accès pour les pompiers, etc. sont toujours difficiles à implanter. La Ville de Paris n'a pas accepté l'accès à la lumière du jour pour les stations de métro nouvelles, contrairement à Lille et Lyon. Elle a accordé de l'espace sur la voirie pour les chantiers de la ligne nouvelle de métro METEOR, même

sur l'avenue de l'Opéra, mais pas pour ceux de EOLE (métro express, à vrai dire dans un quartier dont les rues sont plus étroites). Le maître d'ouvrage a dû négocier des parcelles privées.

Les restes archéologiques sont aussi une contrainte dans les sites occupés depuis les temps anciens. Les travaux du Grand Louvre ont mis à jour des objets de valeur, mais aussi des murs et fondations considérables qui ont pu être conservés et offerts à la vue des visiteurs. Les mêmes problèmes sont communs à Rome, Athènes ou Le Caire.

Les espaces publics non bâtis, parcs et jardins publics, mais aussi cours des casernes, des écoles, des hôpitaux, sont de bons candidats pour des ouvrages souterrains ; ils offrent des possibilités supplémentaires d'accès au sous-sol. La ville de Monaco en offre beaucoup d'exemples.

## 7. CONCLUSIONS

Comme en agriculture, comme dans l'art militaire, et dans de nombreux jeux et sports de plein air, le terrain est donc le paramètre essentiel. Il est ici pris non seulement en surface, mais en volume, dans ses trois dimensions, et avec tous ses attributs. On ne peut pas faire n'importe quoi n'importe où, ni n'importe comment.

Les contraintes qui pèsent sur les constructions en surface sont remplacées par d'autres parfois plus contraignantes encore. Mais le terrain a aussi des qualités propres, dont il y a lieu de tirer avantage. Les sites favorables sont de véritables gisements d'espace souterrain, à l'instar des gisements miniers (Duffaut 1977). L'insertion en souterrain en un lieu donné dépend moins qu'en surface de l'environnement météorologique et social, mais davantage de l'environnement géologique. *Le terrain enveloppe tout l'ouvrage*, d'où son rôle prépondérant ; en souterrain plus qu'ailleurs, le terrain commande. Pour maîtriser la Nature, il faut avoir la sagesse d'en reconnaître la primauté.

## Références

Carmody J. et Sterling R., 1992 ; *Underground Space Design* ; Van Nostrand Rheinhold, N. Y.

Duffaut P., 1970 ; Essai de description structurale des roches à l'usage de l'ingénieur ; 1er Cong. Intern. AIGI, Paris.

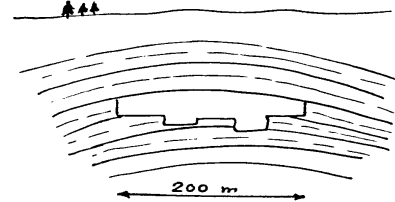
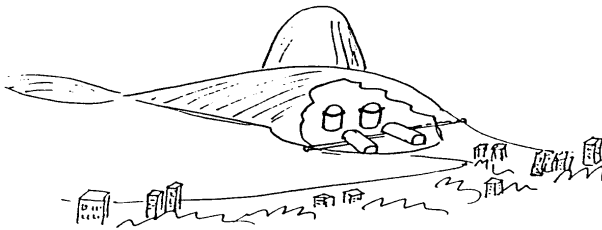
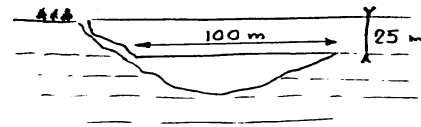
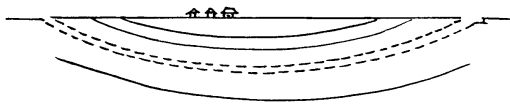
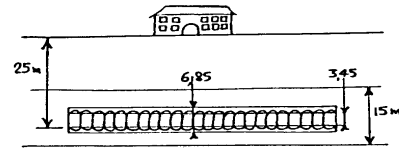
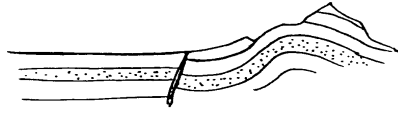
Duffaut P., 1977 ; Site reservation policies for large underground openings ; Proc. Intern. Symp. Rockstore, Bergman M. ed., Stockholm.

Duffaut P., 1995 ; Travaux souterrains et géologie ; *Mines et Carrières*, 77, p 38-43.

Duffaut P. et Labbé M., 1994 ; Les réseaux comme germe d'urbanisme souterrain ; Tunnels et Ouvrages souterrains ; 130, p 255-261.

Saletta P., 1994 ; Sanctuaires souterrains ; Alternatives, Paris.

Utudjian E., 1952 ; L'urbanisme souterrain ; Que sais-je 533, PUF, Paris.



### Légendes des figures :

Fig. 1 : Structure géologique : coupe schématique de terrains stratifiés, plissés et faillés.

Fig. 2 : Schéma de la salle souterraine de la Banque de France, au sein d'une couche horizontale du "calcaire grossier", la même formation où sont creusées à Paris les carrières de la rive gauche.

Fig. 3 : Les galeries hydrauliques de Niagara Falls passent sous la ville en suivant la courbe synclinale de la couche la plus favorable.

Fig. 4 : Coupe de la grotte de Poudrey, dont le toit plan atteint 100 m de portée.

Fig. 5 : Le granite massif des inselbergs de Rio de Janeiro pourrait accueillir des centrales nucléaires souterraines, proches à la fois de la mer qui les refroidirait et des consommateurs d'électricité.

Fig. 6 : TGP, des cavernes stables de très grande portée peuvent être creusées sous des bancs massifs plissés en voûtes anticlinales.