

Depuis des centaines de milliers d'années, le domaine naturel de l'homme a été un espace à deux dimensions

INTRODUCTION

Depuis des centaines de milliers d'années, le domaine naturel de l'homme a été principalement un espace à deux dimensions, la surface du sol.

Poussé par la nécessité, la curiosité et même par la témérité, l'homme a toujours tenté de sortir de cet espace, soit en l'élargissant, ce qui n'est possible que de façon limitée, soit en cherchant à utiliser la troisième dimension. Dans ces tentatives, il a toujours rencontré de grandes difficultés qui n'ont pu être surmontées que grâce à une étonnante ténacité.

Ainsi il en a été et ainsi en est-il encore pour la conquête des continents, des océans ou de l'espace.

Ainsi en est-il pour l'utilisation de l'espace souterrain.

Dans ce domaine, comme dans les autres, la nature lance de nombreux défis et nous devons avec opiniâtreté rassembler nos expériences, tirer des leçons des échecs, améliorer les techniques et utiliser toutes nos capacités d'invention pour réussir.

Les travaux souterrains ont toujours été difficiles. Cela n'a pas empêché leur utilisation dès les premières périodes de l'humanité, comme le prouve la découverte d'excavations souterraines qui sont parmi les premiers témoignages de l'activité humaine.

Bien sûr, c'est la nature et non l'homme qui est à l'origine des premiers ouvrages souterrains. Les grottes et cavernes sont le résultat de l'action de la pluie, des rivières et de la mer, et des nécessités vitales ont poussé les premiers hommes à s'établir dans ces cavités



Une caverne naturelle

naturelles, sans doute pour y trouver une protection contre les intempéries et les agressions. A cet égard, comment ne pas penser que l'humanité doit peut-être sa survie à ces habitats naturels ?

Les habitations troglodytiques furent un événement marquant dans l'utilisation du sous-sol ; avec elles, cette utilisation est devenue intentionnelle et active.



Habitation troglodytique (France)



A toutes les époques, une utilisation considérable des ouvrages souterrains a été faite pour les mines et à des fins défensives.

Pourtant, la croissance la plus rapide en matière de travaux souterrains ne s'est produite qu'au 19^{ème} et plus particulièrement au 20^{ème} siècle, sous l'impulsion du développement économique. A ces époques se produisit un spectaculaire accroissement de l'utilisation du sous-sol, dans le domaine minier, dans le domaine des transports avec le développement des routes, des voies navigables et des chemins de fer et dans le domaine des aménagements hydroélectriques.



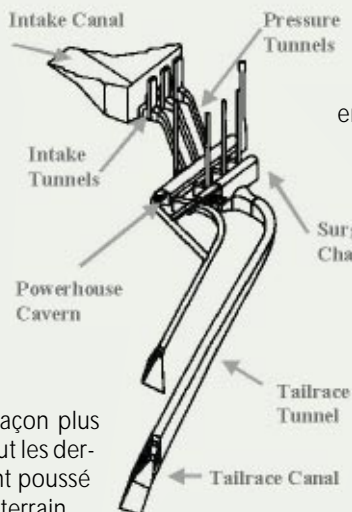
Tunnel du Malpas sur le Canal du Midi (France - Fin du 17^{ème} siècle)

Tunnel du Saint Gothard

Pourquoi aller en souterrain ?



Centrale hydroélectrique de la Serra da Mersa (Brazil)



L'utilisation du sous-sol permet de construire une installation à un emplacement où une installation de surface ne serait pas envisageable, soit du fait d'un manque de place, soit en raison du caractère inacceptable d'une telle implantation pour la collectivité. Nombreuses sont les installations dont l'implantation en souterrain est meilleure ou nécessaire parce que leur présence à la surface est non désirée – réseaux des services publics, stockage de matériaux non désirables, parcs de stationnement, par exemple.

Ainsi, depuis l'aube de l'humanité – et de façon plus intensive pendant les derniers siècles et surtout les dernières décennies – de nombreuses raisons ont poussé l'homme à utiliser et à aménager l'espace souterrain.

Pour une bonne compréhension de ces raisons, il est nécessaire de garder à l'esprit certaines caractéristiques fondamentales du sous-sol.

- En premier lieu, le sous-sol constitue un espace qui peut recevoir des activités ou des infrastructures qu'il serait difficile, impossible, indésirable pour l'environnement ou moins rentable d'établir en élévation.
- Une autre caractéristique fondamentale de l'espace souterrain réside dans la protection naturelle qu'il offre à tout ce qui est implanté en souterrain. Cette protection est à la fois mécanique, thermique et acoustique.
- Par ailleurs, le confinement créé par les ouvrages souterrains présente l'avantage de protéger l'environnement de surface des risques et/ou nuisances liés à certains types d'activités.
- Enfin, une autre importante caractéristique du sous-sol est son opacité. Grâce à l'écran visuel naturel créé par le milieu géologique, un ouvrage souterrain n'est visible qu'à ses points de liaison avec la surface.

Mais quelles sont aujourd'hui les principales raisons qui justifient une utilisation plus intensive et mieux organisée de l'espace souterrain ?



Métro de Tokyo - Station Idabashi

LES RAISONS POUR ALLER EN SOUTERRAIN

Aller en souterrain pour des raisons d'occupation du sol et d'implantation

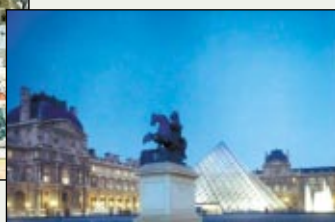
Dans de nombreux cas, l'utilisation du sous-sol résulte d'un manque d'espace à la surface.



Le Grand Louvre (Paris)

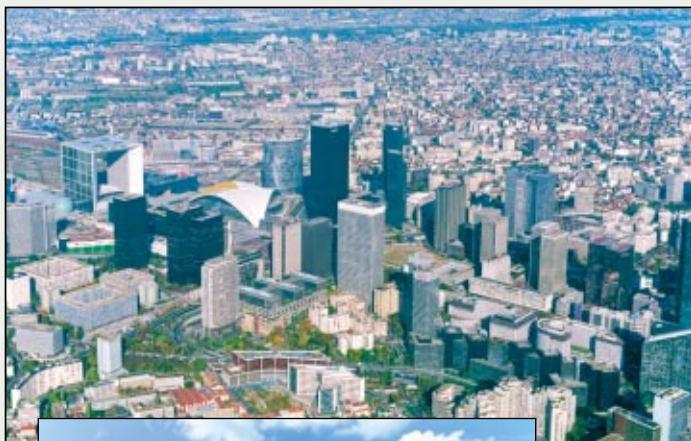


Extension en souterrain de la Bibliothèque Royale Suédoise



Black Station Rotterdam (Pays Bas)





Centre urbain de La Défense (Paris)

La solution souterraine permet également de construire à proximité immédiate d'installations existantes ou sur des zones non constructibles, offrant ainsi un meilleur service aux utilisateurs.

Aller en souterrain pour des raisons d'isolation

Le sol, massif et opaque, offre toute une série d'avantages en matière d'isolation, importante raison pour l'implantation d'installations en souterrain.

CLIMAT

Le sous-sol fournit une isolation vis-à-vis du climat. Le sol ou la roche offre un environnement thermique tempéré et uniforme par rapport aux extrêmes de température de surface. Ces températures modérées et l'inertie thermique du sol offrent un grand nombre d'avantages en matière d'économie et de stockage d'énergie. Ainsi, le sous-sol fournit à la fois une protection contre les climats défavorables et de substantielles économies d'énergie.



Village de Santa Claus - Parc d'attraction sur le thème de Noël, situé sur le cercle arctique en Finlande



CATASTROPHES NATURELLES ET SEISMES

Les ouvrages souterrains sont naturellement protégés contre les intempéries (ouragans, tornades, orages, et autres phénomènes naturels). Ils peuvent aussi résister aux dégâts engendrés par les inondations, sous réserve de prendre des mesures spéciales pour protéger les ouvrages contre l'invasion des eaux.

De plus, les ouvrages souterrains présentent des avantages spécifiques en matière de résistance aux séismes ; ils sont moins sensibles aux ondes sismiques de surface, ainsi que cela a été constaté lors du tremblement de terre de Kobé en 1995, et précédemment à San Francisco et Mexico. Etant contraints de suivre les déplacements du sol, les effets des oscillations sont limités. Par ailleurs, étant dimensionnés pour résister à d'importantes charges de terrain, ils résistent souvent mieux aux forces engendrées par les séismes.



Les structures en élévation sont plus sensibles aux séismes que les ouvrages souterrains - tremblement de terre de Kobé (Japon - 1995) - Importants dégâts pour le bâtiment de la municipalité de Kobé - Aucun dégât pour le centre commercial situé en dessous

PROTECTION

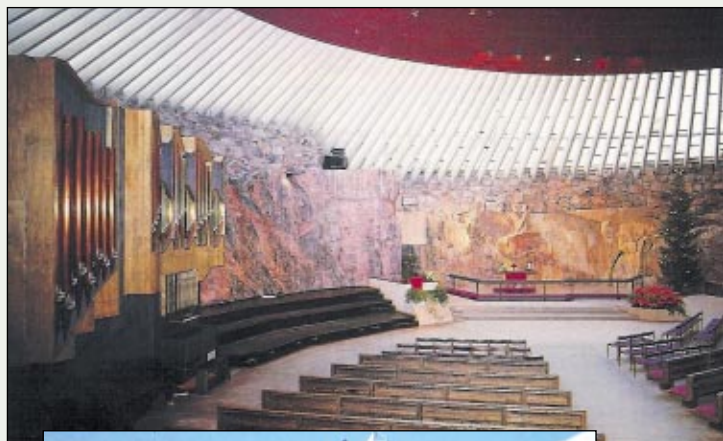
Les ouvrages souterrains offrent des avantages en matière de protection des objets ou produits qu'ils abritent. Par exemple, la conservation des produits alimentaires est améliorée par les conditions de température modérées et constantes et par la possibilité de créer un environnement étanche.

De faibles couvertures de terrain sont très efficaces contre la transmission des bruits ambiants. De la même manière, pour les sources de vibration situées en surface, les niveaux de vibration diminuent rapidement avec la profondeur dans le sol et la distance à la source.

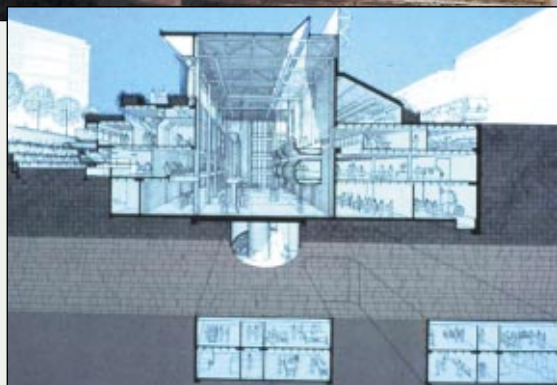
Comme pour les bruits et les vibrations, le terrain fournit une protection contre les explosions, en absorbant les chocs et l'énergie dissipée.



Hôpital souterrain pour le traitement d'allergies dans d'anciennes mines de potasse (Oural)



Eglise dans le rocher à Helsinki (Finlande)

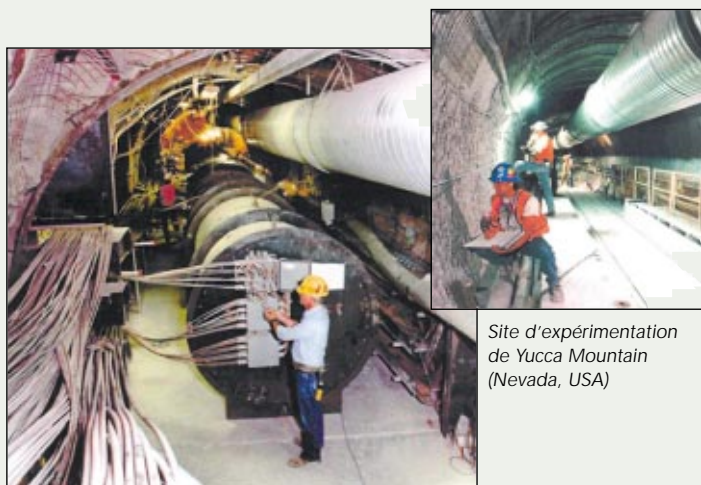


Université du Minnesota (USA)

Dans le cas des explosions, des retombées radioactives et des accidents industriels, les ouvrages souterrains peuvent constituer des abris efficaces, à condition d'être dotés d'équipements de renouvellement d'air ou de filtration de l'air extérieur.

CONFINEMENT

Le confinement est la fonction inverse de la protection. Il est très important pour protéger la surface vis-à-vis des nuisances et dangers créés par certaines installations, comme le stockage de matières dangereuses et les exploitations à risques. Citons par exemple le stockage des déchets nucléaires et certaines installations comme les centrales nucléaires.



Site d'expérimentation de Yucca Mountain (Nevada, USA)

SECURITE

En matière de sécurité, le principal avantage des ouvrages souterrains réside dans le nombre limité de leurs accès et la facilité de les sécuriser.

Aller en souterrain pour préserver l'environnement

Le sol fournit également une série d'avantages en matière de protection de l'environnement. Ces avantages sont surtout importants lorsqu'il convient de concevoir des installations à faible impact sur l'environnement.

ESTHETIQUE

Un ouvrage totalement ou partiellement enterré crée un impact visuel moins important qu'un ouvrage équivalent établi en élévation.



Parking de la place Estienne d'Orves à Marseille. Situation avant et après la construction du parking souterrain

Ceci peut être mis à profit pour cacher des installations techniques dans des secteurs sensibles ou lorsque des installations industrielles doivent être implantées à proximité de zones résidentielles. Ceci est également important pour la préservation des paysages naturels.

Les exigences croissantes tendant à enterrer les réseaux de services publics résultent essentiellement de considérations esthétiques et de préoccupations de protection contre les éléments naturels.



La très grande variété des installations souterraines urbaines

Pourquoi aller en souterrain ?

- Les tunnels routiers urbains dégagent la surface des véhicules ; le bruit de la circulation est réduit, l'air devient moins pollué et la surface des rues peut être en partie utilisée à d'autres fins.



Région parisienne - Le bouclément de l'autoroute A86 à l'ouest

- Les parcs de stationnement et les centres commerciaux souterrains en centre ville libèrent de l'espace en surface pour des activités de loisirs et des terrains de jeu.



Parking souterrain de l'Hôtel de Ville de Paris

- Les galeries techniques à usages multiples sont moins sensibles aux conditions extérieures et causent moins de perturbation en surface lors de la réparation ou de la maintenance des équipements qui y sont installés.

EVALUATION DES OUVRAGES SOUTERRAINS

Les considérations économiques demeurent à tort l'obstacle principal pour le développement de l'utilisation de l'espace souterrain.

Comme le coût de construction des ouvrages souterrains est généralement supérieur à celui des constructions à l'air libre, les ouvrages souterrains sont en quelque sorte « pénalisés » dans toute comparaison avec les constructions à l'air libre effectuée uniquement sur cette base.

En conséquence, les avantages économiques d'une installation souterraine devraient être calculés sur la base des avantages présentés par un tel ouvrage sur toute sa durée de vie.

De plus, il conviendrait de prendre en compte dans l'évaluation des ouvrages souterrains les divers avantages indirects qu'ils présentent, notamment au plan de l'environnement.

Prendre en compte les coûts sur la durée de vie

Les ouvrages souterrains peuvent, sur le long terme, s'avérer économiques. Les économies peuvent concerner le coût d'établissement ou les coûts d'exploitation.

ECONOMIES FONCIERES

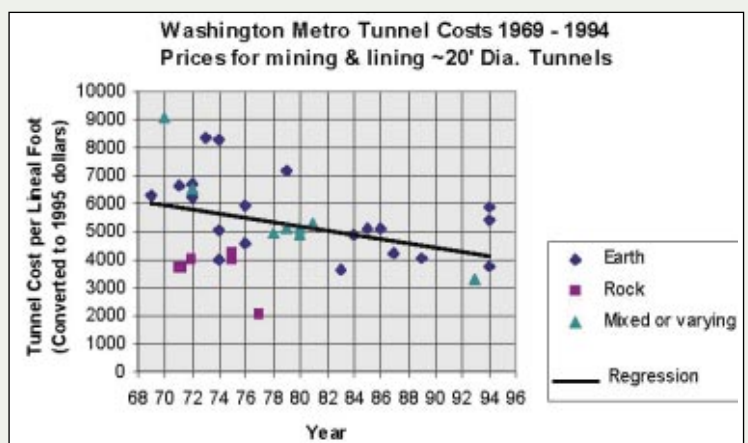
L'économie la plus évidente en coût d'établissement pour une installation souterraine réside dans le coût réduit des achats de terrains ou des droits de passage nécessaires à la réalisation du projet. Dans les zones à coûts fonciers élevés, les achats de terrains peuvent conditionner toutes les décisions concernant le coût d'établissement, notamment au cœur des grandes villes.

Mais l'un des principaux avantages de la mise en souterrain d'une installation réside dans le fait que l'on peut augmenter de façon significative l'utilité, et partant la valeur du sol. A l'origine, l'homme ne construisait qu'à la surface du sol. La construction en souterrain double la valeur d'usage du sol de la même manière que la valeur du sol est augmentée par les constructions sur plusieurs niveaux. Dans bien des cas, le sol, le sous-sol et la hauteur sont mis à profit pour maximiser la valeur du sol.

COÛTS DE CONSTRUCTION

Malgré les importants progrès des connaissances et des méthodes de construction, les coûts de construction des ouvrages souterrains sont en règle générale plus élevés que ceux d'ouvrages équivalents établis en élévation. Mais certains contextes d'environnement, de dimensionnement et de type d'ouvrage peuvent fournir des opportunités de gains sur le coût d'établissement.

Il convient également de souligner que le coût et le délai de réalisation des constructions en souterrain continuent à décroître comparativement à ceux des ouvrages en superstructure. Mais des règlements de conception plus sévères et les coûts relatifs à la prise en compte de l'environnement altèrent la plupart des effets économiques des améliorations enregistrées dans la construction souterraine. Cependant, ces progrès technologiques ont engendré de hauts niveaux de sécurité dans les travaux souterrains.



Coûts des tunnels du Métro de Washington 1969-1994

ECONOMIES RELATIVES A CERTAINES DISPOSITIONS PARTICULIERES

Les caractéristiques physiques des ouvrages souterrains procurent des avantages économiques directs par rapport à des ouvrages de surface.

Par exemple, l'isolation thermique réduit la charge de pointe d'un système de conditionnement d'air, permettant l'installation d'un système moins important et donc moins onéreux.

Les composantes de coût pour réduire les vibrations, assurer une température constante ou le nettoyage peuvent aussi être moins importantes en souterrain qu'en surface.

Pour les constructions en surface qui imposeraient de coûteuses finitions extérieures, d'importantes économies peuvent être faites en souterrain où de telles dispositions ne sont pas nécessaires.

ECONOMIES D'ENERGIE

Les avantages thermiques des constructions souterraines induisent normalement des dépenses d'énergie inférieures pour leur exploitation.

Bien que les coûts inhérents à la ventilation et à l'éclairage puissent augmenter, les avantages thermiques contrebalancent ceux ci sous les climats tempérés ou rigoureux.

COÛTS DE MAINTENANCE

L'isolation physique des ouvrages souterrains vis-à-vis des facteurs d'environnement extérieur responsables de la dégradation des composants des constructions peut conduire à de faibles coûts de maintenance pour les ouvrages souterrains.

COÛTS DE REMPLACEMENT

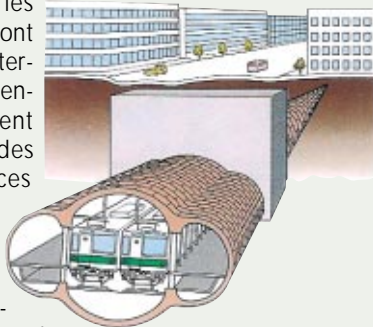
La durée de vie des ouvrages souterrains est beaucoup plus longue que leurs équivalents en surface. Les ouvrages en élévation sont généralement plus sensibles aux dégâts et dégradations. Parmi les bons exemples, citons les nombreux tunnels de chemin de fer en service depuis plus de 100 ans.

ANALYSE DES RISQUES DANS LES TRAVAUX SOUTERRAINS

L'augmentation des exigences pesant sur la construction des ouvrages souterrains a conduit à donner plus d'importance à la prise en compte des risques. Malgré les progrès impressionnants qui se sont produits dans la construction souterraine au cours des dernières décennies, les décideurs manifestent encore des réticences vis-à-vis des risques encourus, même si ces risques existent également pour d'autres types d'ouvrages.

Les études de faisabilité et, plus encore, les documents de soumission et les contrats, doivent traiter des catégories suivantes de risques et d'aléas :

- Risques financiers, tels que surcoûts ou taux de retour sur investissement inférieurs aux prévisions ;
- Risque que les installations publiques ne soient pas acceptées et utilisées au niveau prévu ;
- Risques contractuels, tels que travaux supplémentaires non budgétés, retards, litiges et réclamations ;
- Conditions de terrain, telles que des caractéristiques géologiques ou géomécaniques imprévues, mauvaise évaluation du comportement du terrain au terrassement ou venues d'eaux plus importantes que prévues ;



• Risques de construction, tels que défaillance de tunnelier, consommation excessive d'outils, éboulement du front de taille ou fuite de joints ;

• Risques environnementaux, tels que la dégradation de la qualité des eaux souterraines, les dégâts aux constructions environnantes, la pollution de l'air ou le bruit.

• Risques en exploitation, notamment pour les tunnels de transport.

Ces éléments sont d'une importance capitale pour créer des comportements favorables dans le grand public vis-à-vis des solutions souterraines.

Dans le cadre de son objectif général : « Pour une meilleure utilisation de l'espace souterrain », l'Association Internationale des Travaux en Souterrain constitue des groupes de travail internationaux pour étudier et établir des rapports sur des sujets spécifiques, en rassemblant un large éventail d'information – dans les domaines scientifique, technique, de l'aménagement, économique et social – et d'en déduire des objectifs en matière de recherche et développement, ou plus simplement de diffuser des recommandations auprès des décideurs et aménageurs.

Toutes ces études concernent une ou plusieurs des principales questions abordées dans cet article et ont pour principal objectif de réduire les risques mentionnés ci-dessus. Les résultats de ces études peuvent être trouvés sur le site Internet de l'Association Internationale des Travaux en Souterrain, dont l'adresse est : <http://www.ita-aites.org>.

DE L'UTILISATION DU SOUS-SOL A L'AMENAGEMENT DE L'ESPACE SOUTERRAIN

L'utilisation de l'espace souterrain peut contribuer de façon significative à la résolution du problème que connaît le monde actuel, à savoir de concilier le développement économique, la protection de l'environnement et la qualité de la vie. La mise en œuvre de ces solutions repose pour une grande part sur l'utilisation des techniques de construction de plus en plus efficaces et pertinentes. A cet égard, on ne soulignera jamais assez l'importance du rôle des diverses parties impliquées dans la construction souterraine (aménageurs, maîtres d'ouvrages, ingénieurs, fabricants de matériels et entrepreneurs).

Pourtant, l'expérience montre que, quelle que soit leur importance, les progrès techniques ne sont pas suffisants pour promouvoir une meilleure utilisation du sous-sol, notamment en site urbain. Tous les utilisateurs du sous-sol ont remarqué que l'occupation de cet espace est, dans la pratique, faite de manière totalement inorganisée. En conséquence, il serait souhaitable de prendre en compte l'espace souterrain lors de l'établissement des plans directeurs d'aménagement urbain et lors des prises de décision majeures en matière d'urbanisme. Ainsi, les prévisions de son utilisation pourraient être consignées dans les documents d'urbanisme, tant à l'échelon local que régional.

Ce besoin a déjà été mis en évidence depuis longtemps par certains précurseurs. Mais aucune solution définitive n'est probablement envisageable à court terme, en raison de la complexité des problèmes correspondants. L'industrie de la construction en souterrain souhaite continuer à contribuer aux recherches de solutions pratiques tendant à l'émergence d'une politique plus cohérente pour favoriser un meilleur usage de l'espace souterrain.