

Projet de recherche documentaire

« Techniques de construction de tunnels en milieu urbain »

Descriptif et attentes :

- La densité des sites urbains impose, de plus en plus souvent, la mise en sous-terrain des infrastructures liées aux déplacements : trains, métro, voitures, piétons ...
- Il est impératif de limiter l'impact de la réalisation de ces ouvrages sur la ville : limitation de l'emprise des chantiers dans l'espace et dans le temps, limitation des nuisances ...
- A cette fin plusieurs procédés d'exécution sont utilisés. Leur choix est lié au type d'ouvrage à réaliser, à leur profondeur, à l'environnement bâti, à la nature du sol, aux impératifs environnementaux, à l'économie du projet ...
- L'objectif est de répertorier les procédés et d'en donner les domaines d'application en illustrant par des exemples.



Introduction	4
La problématique du transport urbain.....	5
1. La nécessité d’aller en souterrain	5
2. Historique de la problématique de l’urbanisme souterrain	5
2.1 Des origines de l’urbanisme souterrain.....	5
2.2 ... aux associations internationales	5
3. La solution du souterrain	6
3.1 Les raisons d’aller en souterrain	7
3.1.1 Des raisons d’occupation du sol et d’implantation	7
3.1.2 Des raisons d’isolation	7
3.1.3 Des raisons de protection de l’environnement	8
3.1.4 Des raisons topographiques.....	9
3.1.5 Des raisons sociales.....	9
3.2 Evaluation des ouvrages souterrains	10
3.2.1 Coûts de construction	10
3.2.2 Economies foncières.....	11
3.2.3 Economies proportionnelles à certaines dispositions caractéristiques	11
3.2.4 Economie d’énergie.....	11
3.2.5 Coût de maintenance	11
3.2.6 Coûts de remplacement	11
3.3 Analyse des risques du souterrain	11
3.4 Conclusion	12
4. Problèmes liés à la réalisation des travaux et aux chantiers	13
4.1 Aspect juridique	13
4.1.1 Emplacement de l’ouvrage souterrain	13
4.1.2 Nuisances de chantiers constatées par le riverain.....	13
4.2 Encombrement de la surface et du sous-sol	14
4.2.1 Encombrer la surface.....	14
4.2.2 Altération du site	14
4.2.3 Encombrer le sous-sol	14
4.2.4 Transit des matériaux	14
4.3 Critères de choix des techniques	15
4.4 Problèmes liés à l’environnement, aux sols	15
4.4.1 Problème des nappes aquifères.....	15
4.4.2 Problème de mouvements des sols	15
4.4.3 Pollution des sols.....	16
4.5 Conclusion : planifier le projet souterrain à court et long terme	16
Techniques de construction de tunnels	17
1.1 Critères de choix de la méthode	18
1.2 Importance de la nature des terrains rencontrés	19
2. Méthodes de construction à ciel ouvert.....	20
2.1 Tranchée ouverte.....	20
2.2 Tranchée couverte.....	21
2.3 Techniques d’exécution à ciel ouvert.....	22
2.3.1 Méthodes sans blindage.....	22
2.3.2 Méthodes avec blindage	23
2.3.2.1 Fouilles blindées.....	23

Techniques de construction de tunnels en milieu urbain

2.3.2.2	Parois moulées dans le sol.....	24
2.3.2.3	Palplanches métalliques.....	26
2.3.2.4	Pieux sécants	27
3.	Tunnels exécutés en souterrain.....	29
3.1	Méthodes traditionnelles	29
3.2	Tubes foncés	30
3.3	Boucliers & Tunneliers	32
4.	Techniques particulières.....	34
5.	Conclusion.....	34
	Exemples d'application.....	35
	Conclusion.....	37
	Index des figures.....	38
	Bibliographie	39
	Annexe.....	40
1.	Boucliers particuliers.....	40
1.1	Méthode du bouclier à front ouvert.....	40
1.2	Le bouclier à bentonite.....	41
2.	Techniques particulières.....	43
2.1	Injections.....	43
2.2	Jet grouting.....	43
2.3	Congélation du terrain.....	45
2.4	Techniques utilisées en présence d'eau	46
2.4.1	Rabattement de la nappe.....	46
2.4.2	Murs drainants.....	46
3.	Quelques exemples d'applications	47
3.1	Chantier Bériot-Madou	47
3.2	Tunnels sous la rue de la loi	47
3.3	Chantier Arts-Marnix-Toison d'Or	47
3.4	Chantier Arenberg-Ecuyer	48
3.5	Chantier station Monnaie	48
3.6	Chantier rue de la Loi, passage sous le chemin de fer	48
3.7	Chantier Maelbeek, passage de la vallée.....	48
3.8	Chantier station Monnaie : Galeries Anspach.....	49
3.9	Chantier sous le Parc Royal	49
3.10	Chantier rue des Fripiers	49
3.11	Chantier boulevard Anspach	49

Introduction

Pour son organisation en société, l'homme a toujours eu besoin de se déplacer, que ce soit sur de longues ou courtes distances (entre les villes ou dans la ville). Parallèlement à ce besoin de déplacement est apparu le besoin de concentration, de convergence, c'est ce qui a donné naissance aux villes. Au cours du temps, ce phénomène est parfois devenu si important que l'on en arrive à parler de mégalopole (il est en effet courant de rencontrer des villes de plusieurs millions d'habitants).

Ces deux phénomènes conjugués ont conduit les villes à la saturation des réseaux de transport, en particulier en leur centre. Il a donc fallu augmenter significativement la capacité des différents réseaux de transport. Mais la concentration en bâtiments augmentant avec la population, développer ces réseaux n'est souvent plus possible : il est alors nécessaire de penser à aménager la ville autrement.

Des siècles durant, les autorités ont pu aménager les villes sans trop de réticences de la part des citoyens. Mais le 20^e siècle changea la donne avec l'affirmation des opinions publiques. Depuis, il est impensable de transformer visiblement la ville sans l'accord des riverains. C'est ainsi que petit à petit, le sous-sol urbain a été de plus en plus sollicité car il s'est avéré que construire en surface n'était plus envisageable non seulement pour des raisons de congestion mais aussi pour des raisons d'esthétique et de sécurité.

Bien que ces modifications au niveau de la gestion des chantiers en ville soient bénéfiques pour les citoyens, elles posent quand même problème aux ingénieurs chargés de la construction des ouvrages : aux problèmes purement techniques viennent s'ajouter des problèmes d'ordre esthétique et organisationnel.

Ce travail fait le point des diverses contraintes auxquelles doivent faire face les autorités et les ingénieurs lors de l'aménagement du sous-sol. Il comporte une liste non exhaustive des techniques les plus couramment utilisées dans la construction suburbaine ainsi que quelques exemples d'applications (avec justification du choix des techniques) tirés de l'expérience souterraine bruxelloise.

Mais avant de pouvoir vraiment s'attaquer aux problèmes techniques, qui sont les principales préoccupations des ingénieurs, il faut d'abord se poser les bonnes questions quant à l'efficacité et la faisabilité des projets de construction souterraine.

Aller en souterrain présente pas mal d'avantages (la solution souterraine s'avère être la meilleure solution d'un point de vue purement urbanistique) mais apporte aussi son lot d'inconvénients (sans parler des techniques, qui engendrent un net surcoût, il faut aussi tenir compte d'autres aspects tels la sécurité, la maintenance, la qualité de vie). Présenter les diverses implications liées aux constructions souterraines est donc nécessaire pour mieux comprendre l'impact du souterrain sur la ville (et juger sa raison d'être dans celle-ci). C'est ici aussi un autre but recherché par ce travail : étudier la problématique du souterrain d'un point de vue juridique, urbanistique, économique, social, etc. sans oublier l'aspect environnemental.

Ce travail ne se veut en aucun cas exhaustif quant au nombre et aux applications des techniques de même qu'il ne se veut pas complet quant à la description détaillée de chaque technique. Des détails qui nécessitent certaines connaissances préalables en géotechnique ainsi que certaines informations à caractère répétitif ont été volontairement omis.

La problématique du transport urbain

1. La nécessité d'aller en souterrain

La nécessité du souterrain en ville est liée à son développement, notamment à l'augmentation de la densité et des besoins de déplacement à l'intérieur de celle-ci. Autant de facteurs qui conduisent la ville à la saturation de sa surface habitable.

La solution du sous-sol s'impose donc naturellement pour offrir de l'espace et contribuer à la croissance urbaine. Ces dernières années, l'évolution des techniques de construction a permis un développement sans précédent de l'utilisation du sous-sol.

2. Historique de la problématique de l'urbanisme souterrain

2.1 Des origines de l'urbanisme souterrain...

C'est la France qui fut pionnière en ce qui concerne la réflexion sur l'urbanisme souterrain dès le début du siècle passé. Une première réflexion apparut, il fallait dénoncer l'encombrement anarchique du sol urbain, proposer d'enfuir la circulation urbaine, et réclamer la nécessité de penser la surface en même temps que le sous-sol.

Cette réflexion engendrera peu de temps après les prémices de l'urbanisme souterrain au sein du GECUS¹, seul mouvement de cette nature dans les années 30. Ce mouvement se mondialisa rapidement.

Sa création reposera sur plusieurs constats pour alimenter leur projet ; l'un de ces constats est que « l'encombrement de la surface doit entraîner l'implantation de certaines fonctions en souterrain ».

Au sein de ce groupe on trouve des architectes et des ingénieurs. Leurs motivations les conduiront à faire des propositions concrètes d'aménagement et de gestion du sous-sol ainsi qu'à analyser les contraintes techniques, juridique, économique et humaine de leurs projets.

Ils dénoncent à cette époque les maux urbains qui touchaient Paris (hygiène, logement, circulation) qui doivent justifier l'utilisation du sous-sol dont les ressources sont inexploitées.

Cette optique était en totale opposition avec celle de ceux qui préconisaient la reconstruction pure et simple de la ville. Alors que le GECUS avait comme objectif la conservation du patrimoine et l'urbanisme souterrain le permettait.

2.2 ... aux associations internationales

A partir des années 70, l'urbanisme souterrain voit naître un intérêt nouveau: il disparaît en tant que doctrine pour laisser place à une autre approche. On assiste à un éclatement des préoccupations. Les années 70 voient la création de différents organismes fédérant les travaux souterrains dans chaque pays. Ces associations développèrent un objet plus précis : le tunnel et son exécution.

L'AFTES² voit le jour ainsi que l'ITA³. Elles sont puissantes et favorisent une meilleure diffusion des techniques de pointe en matière de construction. Un engouement s'est peu à peu manifesté. Des projets se développent aussi au Canada, en Australie, aux Etats-Unis et au Japon.

¹ Groupe d'Etudes du Centre Urbain Souterrain

Ces dernières décennies, les concentrations urbaines et la croissance continue de la ville n'ont cessé de croître, les déplacements congestionnent les villes (dans les très grandes villes le temps perdu dans les embouteillages semblait doubler tous les six ans).

Les services techniques publics sont chargés de projets qui définissent une nouvelle architecture spatiale de la ville, davantage tournée vers le souterrain. Le nouvel urbanisme souterrain intègre aussi la dimension environnementale dans ses projets (on libère la surface pour la réserver à la nature, on enfouit les déchets).

3. La solution du souterrain

Depuis l'aube de l'humanité, l'homme s'est contenté de planifier en deux dimensions. Cependant, cette planification se révéla petit à petit inefficace. Mais l'intelligence de l'homme lui a permis d'agrandir son champ d'action. En effet, le seul moyen pour augmenter l'espace vital de l'homme sans prendre plus de place à la surface de la terre (car ceci se révèle impossible avec les concentrations actuelles en bâtiments) est de penser dans les trois dimensions. Bien que penser en trois dimensions soit quelque chose d'assez aisé, mettre ces pensées en pratique se révèle bien plus compliqué : les difficultés techniques sont considérables. Mais ces difficultés ont bien vite été surmontées par la science des hommes : en rassemblant les idées, en tenant compte de ses réussites et ses échecs, en utilisant sa force d'imagination et en améliorant ses techniques, l'homme est parvenu à atteindre de bons résultats et a pu construire les premiers ouvrages souterrains.

Construire en souterrain n'a pas toujours été facile. Par contre faire usage de facilités souterraines est chose plus aisée. C'est pour cela que dès le début de l'humanité, l'homme n'a fait qu'utiliser les facilités que la nature avait mises à sa disposition. Car l'origine des premiers ouvrages souterrains est bien la nature : les grottes et les cavernes sont le résultat d'actions naturelles. Mais certains impératifs ont amené l'homme à s'installer dans ces cavités naturelles, notamment pour éviter les rigueurs du climat et les agressions. Les habitations troglodytes jouent encore aujourd'hui un rôle marquant dans l'occupation de sous-sol.

Au début, l'espace souterrain était occupé à des fins de défense. Pourtant, les principales évolutions en matière de souterrain ne se sont faites qu'à partir du XIX^e et surtout dans le XX^e siècle. Et cela suite au développement économique, qui a engendré une croissance dans divers domaines d'activité humaine : les transports (routes et chemin de fer), le « stockage », etc.

Pour la bonne compréhension des raisons d'aller en souterrain, il est nécessaire de citer quelques caractéristiques essentielles du sous-sol :

- Le sous-sol est un espace qui peut recevoir des infrastructures difficiles, impossibles ou indésirables en surface.
- Le sous-sol offre une espace naturel protégé mécaniquement, thermiquement et acoustiquement.
- Le sous-sol offre l'avantage de protéger l'environnement extérieur des risques et nuisances liés à certains types d'activités.
- Le sous-sol est généralement invisible, sauf aux points de liaison avec la surface.

² Association Française des Travaux en Souterrain

³ International Tunnelling Association

3.1 Les raisons d'aller en souterrain

Dès l'aube de la civilisation, et plus fortement aujourd'hui, nombreuses ont été les raisons qui ont poussé l'homme à utiliser et aménager l'espace souterrain. Parmi lesquelles :

- Des raisons d'occupation du sol et d'implantation;
- Des raisons d'isolation ;
- Des raisons de protection de l'environnement ;
- Des raisons topographiques ;
- Des raisons sociales.

3.1.1 **Des raisons d'occupation du sol et d'implantation**

L'utilisation du souterrain découle d'un manque d'espace à la surface et permet de construire à un emplacement où la construction en surface ne serait pas possible. L'implantation en souterrain est préférable pour de nombreuses constructions car leur existence en surface est gênante pour les réseaux de service public.

Il est aussi souvent nécessaire de séparer les activités de transport incompatibles ou d'engendrer des liaisons commodes entre elles, par exemple, la circulation des piétons dans les gares de chemins de fer et dans les ouvrages d'échange entre les bus et les trains. La séparation des niveaux de circulation est généralement préférable et la mise en souterrain des voies de circulation limite souvent les impacts sur la collectivité.



Fig. 1 : Coupe d'une intégration souterraine en milieu urbain

3.1.2 **Des raisons d'isolation**

L'isolation est l'une des principales raisons qui pousse la construction en souterrain ; le sol offre une bonne isolation, les domaines d'isolations sont :

- **Le climat** : le sous-sol fournit un environnement thermique stable et cohérent par rapport au climat qu'on trouve en surface, cela offre un avantage conséquent du point de vue économie et stockage d'énergie.
- **Les catastrophes naturelles et les séismes** : les ouvrages souterrains sont naturellement protégés contre les orages, les tempêtes, les tornades. Ils peuvent aussi résister aux dégâts créés par les inondations, sous précaution de prendre des mesures spéciales pour protéger les ouvrages contre l'invasion des eaux. De plus, ces ouvrages présentant des avantages certains en matière de résistance aux séismes, ils sont moins sensibles qu'en surface.
- **La protection** : les ouvrages souterrains fournissent des avantages en ce qui concerne la protection contre les explosions, en absorbant les chocs et l'énergie dissipée. La seule condition est que l'ouvrage doit être équipé d'un système de filtration de l'air extérieur.
- **Le confinement** : le confinement agit en sens 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 leur exploitation (déchets nucléaires, chimiques, etc.).
- **La sécurité** : le principal avantage des ouvrages souterrains demeure dans le nombre limité de leurs accès et la facilité de les sécuriser.



Fig. 2 : Installation d'ouvrages nucléaires

3.1.3 Des raisons de protection de l'environnement

Le sol offre une série d'avantages dans le domaine de la protection de l'environnement. Ces avantages sont essentiels lorsqu'il convient de concevoir des installations à faible impact sur l'environnement.

- **L'aspect visuel et esthétique** : un ouvrage enterré crée un impact visuel moins important, voire nul, qu'un ouvrage équivalent réalisé à la surface. Ceci peut aider, le fait de cacher des installations techniques dans des zones sensibles, de plus pour la protection des paysages naturels et des réalisations architecturales, c'est également un avantage non négligeable. Les volontés progressives tendant à enterrer les réseaux de services publics résultent, principalement, d'une réflexion sur la beauté et l'amélioration de la protection contre les éléments naturels.
- **L'écologie** : les ouvrages souterrains permettent de protéger la végétation naturelle. Les dommages sont moins importants sur le cycle écologique, aux niveaux local et mondial.



Fig. 3 : La variété des installations souterraines



Fig. 4 : Tunnel d'autoroute formant une traversée verte

3.1.4 Des raisons topographiques

Dans les zones montagneuses, le recours aux tunnels rend réalisables diverses variantes de transport, les routes, les voies ferrées, et il présente une solution intéressante pour le franchissement des fleuves dont la mauvaise qualité de terrains (alluvions gorgées d'eau) comporte de nombreuses difficultés (solution le tunnel immergé). D'une façon générale, l'utilisation de l'espace souterrain présente plusieurs avantages dans le domaine d'aménagement d'installation ou d'infrastructures. Ces avantages résultent principalement de la liberté (sous réserve des contraintes géologiques et économiques, par exemple « le projet du métro de Bordeaux » a été abandonné au profit d'un tramway en site propre, pour des raisons de coûts liés à une géologie difficile, pour des raisons d'urbanisme liées à une géographie urbaine assez étalée) d'engendrer un ouvrage en trois dimensions avec des barrières existant en surface.

3.1.5 Des raisons sociales

L'espace souterrain a un rôle principal à jouer sur le plan social et ce, en offrant de bonnes conditions de vie. Il s'agit ici de la diminution de la pollution et du bruit, de l'utilisation active de l'espace, du développement économique, de la protection du cadre de vie, de la santé publique et de la sécurité. Dans ces différents domaines, il présente des nombreux avantages :

- Les tunnels ont un rôle vital pour amener et évacuer l'eau en site urbain.

- Les tunnels permettent l'installation d'un système de transport qui respecte l'environnement, rapide et discret.
- Les tunnels routiers urbains débarrassent la surface des véhicules ce qui implique une réduction du bruit dû à la circulation, d'autre part l'air devient légèrement moins pollué et enfin l'occupation de surface peu être utilisée à d'autres fins.
- 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.
- Les galeries techniques à usages multiples sont moins sensibles aux conditions extérieures et causent moins de perturbation qu'en surface lors de la réparation ou de la maintenance des équipements qui y sont installés.



Fig. 5 : Tunnel routier urbain

3.2 Evaluation des ouvrages souterrains

Les questions économiques occupent une place très importante dans le processus d'évaluation de la possibilité d'aller en souterrain. En général, le coût de construction en sous-sol est supérieur à celui en surface (une comparaison surface-sol d'un point de vue budgétaire n'a aucun sens). D'un autre côté, les avantages économiques d'une infrastructure souterraine doivent être calculés à long terme. De plus, il convient de prendre en compte les divers avantages au niveau environnemental dans l'évaluation de tout projet souterrain.

Pour l'évaluation d'un projet de construction souterraine, il faut « prendre en compte les coûts de construction et la durée de vie de l'ouvrage ». C'est sur base de ces deux points que l'on pourra réellement évaluer le prix de revient de l'ouvrage.

3.2.1 **Coûts de construction**

Malgré les importants progrès au niveau des méthodes de constructions, le coût de réalisation d'un projet souterrain est généralement plus élevé que celui d'un ouvrage similaire fourni en surface. Cela

même si les avantages pour l'environnement de la solution souterraine peuvent faire bénéficier le projet d'aides financières (souvent de la part de l'Etat). Cependant, il est à noter que les coûts de construction en souterrain diminuent proportionnellement plus que ceux en surface. Mais les règlements plus sévères et les coûts de préservation de l'environnement changent la majorité des effets économiques des progrès enregistrés en construction. Néanmoins, ces progrès techniques ont permis de créer de hauts degrés de sécurité au niveau des souterrains.

3.2.2 Economies foncières

L'économie qu'on peut réaliser en établissant un ouvrage souterrain est la même que si on construisait sur plusieurs niveaux en surface: on peut construire plusieurs étages pour un même prix d'établissement (achat du terrain, droits de passage, etc.). Le prix d'établissement au mètre carré diminue alors de manière significative.

3.2.3 Economies proportionnelles à certaines dispositions caractéristiques

Les caractéristiques physiques des ouvrages souterrains fournissent des avantages économiques par rapport à des ouvrages de surface, par exemple l'isolation thermique diminue la charge d'un système de conditionnement d'air, ce qui permet d'établir un système moins important et donc moins coûteux.

Les coûts peuvent être moins importants en souterrain qu'en surface, à l'usage, et ce sur plusieurs points :

- les vibrations
- une température constante
- le nettoyage

3.2.4 Economie d'énergie

Les avantages thermiques des constructions souterraines aboutissent sur le fait de dépenser moins d'énergie pour le réchauffement ou le refroidissement de l'ouvrage. Tandis que les coûts d'aération et d'éclairage peuvent alors augmenter, mais les avantages thermiques équilibrent ceux-ci sous les climats raisonnables, voir sévères.

3.2.5 Coût de maintenance

L'isolation physique des ouvrages souterrains par rapport au facteur d'environnement en surface responsable de la dégradation des éléments des constructions réduit les coûts de maintenance pour les ouvrages en sous-sol.

3.2.6 Coûts de remplacement

L'espérance de vie d'un ouvrage souterrain est largement plus élevée que celui d'une construction en surface. En effet, les ouvrages souterrains sont isolés de tout contact grâce à la couche terre qui les sépare de la surface ; ce qui les préserve. Par exemple, on relève d'anciens tunnels qui sont en service depuis plus de 100 ans.

3.3 Analyse des risques du souterrain

L'accroissement des besoins pesant sur les constructions en sous-sol a conduit à donner plus d'importance à la prise en compte des risques. Des études de faisabilité, des règlements ainsi des contrats doivent désigner les catégories suivant les risques :

Techniques de construction de tunnels en milieu urbain

- Risques financiers, par exemple, surcoûts ou taux de retour sur investissement inférieurs aux prévisions.
- Risques contractuels, par exemple, les travaux supplémentaires non budgétisés, ou des retards dans les travaux.
- Conditions de terrain, par exemple, caractéristiques géologiques imprévues, mauvaise évaluation de comportement de terrain ou présence d'eau de manière plus importante que prévue.
- Risques de mauvaise construction, par exemple, fuites dans les joints, défaillance de tunnelier.
- Risques environnementaux, par exemple, la dégradation de la qualité des eaux souterraines, les dégâts suite aux travaux ou nuisance sonore.
- Risques en exploitation, par exemple, les tunnels où circulent des moyens de transports.

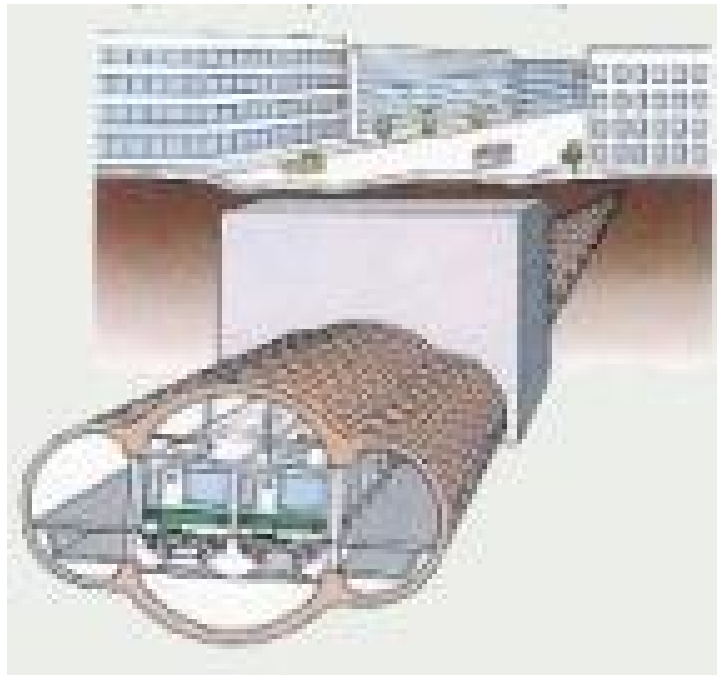


Fig. 6 : Coupe d'un ouvrage souterrain

Dans ce cadre « pour une meilleure utilisation de l'espace souterrain », l'AITES constitue des groupes de travail pour établir des rapports en rassemblant des informations sur les techniques, l'aménagement, l'économie et également aborder un point de vue social.

3.4 Conclusion

L'intérêt qui est porté à l'utilisation de l'espace souterrain urbain est grandissant car il peut être la solution à bien des problèmes actuels. Les aménagements possibles de cet espace peuvent répondre à des notions de valorisation des centres anciens figés dans leur historique et dans leur bâti inadapté à la vie urbaine actuelle. Cette utilisation rationnelle du sous-sol devrait être aussi appliquée aux villes nouvelles afin de répondre, de manière anticipée, aux logiques constructives qui font défaut à nos villes anciennes ; mise en galeries des réseaux concessionnaires, dessertes par des voies rapides, parkings, locaux techniques... Ces propositions semblent d'autant plus réalistes que les moyens et les techniques de creusement des sols permettent de construire à des coûts qui n'ont fait que diminuer au cours des

dernières années. De plus, les conditions de maîtrises technologiques sans commune mesure avec ce qui se pratiquait dans un passé relativement récent.

Pour venir renforcer de tels principes, il semble utile que les décideurs, voire le législateur, considèrent nécessaire le recours à l'usage du sous-sol et déterminent une politique préventive et raisonnée de cet usage. Le législateur doit dans le cadre de cette vision prospective de développement définir cette politique qui regroupe suivant une logique unique d'aménagement en surface et en souterrain.

4. Problèmes liés à la réalisation des travaux et aux chantiers

Un tunnel de métro ou toute autre infrastructure souterraine réalisée en site urbain est générateur de risques et de problèmes. En dehors de l'aspect financier il existe des problèmes d'ordre technique et des nuisances, qui sont les particularités du milieu urbain d'autant plus sensible que l'on se trouve sous un bâti dense.

Parmi les différents aspects des nuisances dues aux chantiers et aux travaux on a principalement :

- Les nuisances sonores et vibratoires ;
- Dégradation du site ;
- Encombrement physique du site (blocage éventuel de la circulation, des surfaces piétonnes, etc....) ;
- Problèmes liés à l'environnement ;
- Problèmes liés aux mouvements des sols et leur répercussion sur les bâtiments en surface.

4.1 Aspect juridique

4.1.1 Emplacement de l'ouvrage souterrain

Les réseaux de transport souterrain doivent être, prioritairement, établis au-dessous du domaine public (par exemple le long d'un grand axe, d'une avenue, des voies publiques) ; alors les seuls problèmes qui se posent sont liés aux dommages et aux nuisances susceptibles d'affecter les propriétés privées voisines.

Mais des impératifs techniques ou la nature des travaux peuvent conduire à déborder du domaine public, et les projeteurs doivent donc obtenir des propriétaires leur consentement pour cet empiètement sur leur tréfonds ou prendre des mesures d'expropriation.

L'indemnisation des dommages et des nuisances se règle habituellement selon le résultat des expertises. Parfois, lorsque l'on sait à l'avance que les nuisances seront importantes, il peut être intéressant d'acquérir les bâtiments pouvant être affectés par les travaux. Le problème se pose également lorsque les travaux interfèrent avec des réalisations déjà existantes (un tunnel de métro au voisinage d'un parking souterrain).

4.1.2 Nuisances de chantiers constatées par le riverain

L'une des plus importantes nuisances constatées par le riverain est la nuisance sonore.

Les nuisances sont plus ou moins supportables selon leur intensité, leur durée et le lieu concerné. Il existe bien évidemment des normes et des règles à respecter mais même dans le respect de la réglementation des engins et matériels, les chantiers peuvent générer des nuisances sonores (ou autres) dérangeantes.

Les moyens de prévention de ces nuisances sonores relèvent principalement de l'initiative du bourgmestre.

Sur base juridique, celui-ci peut limiter les nuisances générées par les chantiers sur le territoire de la commune en définissant notamment les horaires possibles ainsi que les périodes autorisées pour les travaux. Certains travaux considérés comme gênants peuvent être soumis à un contrôle, à travers une autorisation de travaux.

Les deux choses principales qui peuvent justifier une plainte de la part du riverain et qui engendrera une répression sont les suivantes :

- une durée excessive de travaux ;
- le non-respect des recommandations formulées par les experts.

4.2 Encombrement de la surface et du sous-sol

4.2.1 **Encombrer la surface**

Il existe un impact non négligeable sur les autres circulations (trams, voie publique) et réseaux lors de la construction d'ouvrages souterrains. Il faut le prendre en compte, les travaux ne doivent pas gêner ou le moins possible les activités présentes en surface.

Ex : lors de la construction de certains tracés, il est parfois nécessaire de travailler au milieu de la chaussée (parfois sur des accès importants). Il faut donc gérer le problème et trouver un compromis entre la durée totale des travaux et un arrêt partiel ou total de la circulation à cet endroit (par exemple en considérant que l'on peut effectuer le chantier en deux fois en ne gênant qu'une partie de la chaussée à la fois).

4.2.2 **Altération du site**

Dans la même problématique, une autre chose à prendre en compte est le problème de l'aspect du site urbain qui doit être dérangé et « défiguré » le moins possible par les travaux. Cela pose souvent problème lorsque les travaux ont lieu à un endroit important ou très fréquenté. On peut alors se demander si les travaux sont vraiment justifiés à cet endroit et remettre en cause le projet.

4.2.3 **Encombrer le sous-sol**

Il y a aussi un problème d'encombrement du sous-sol juste sous la surface (fondation, canalisations, réseaux, etc....) à prendre en compte. Ainsi on peut éviter les problèmes en creusant sous la voirie ce qui évite l'éventuel renouvellement (destruction, suivi d'une reconstruction) de celle-ci ce qui s'ajouterait au coût de l'ouvrage et augmenterait les nuisances liées au chantier.

4.2.4 **Transit des matériaux**

Un autre problème concerne l'approvisionnement en matériaux et l'évacuation des déblais. Il faut donc un accès au chantier pour assurer ce transit ; ce qui occasionne un dérangement supplémentaire de la surface ; bien que dans certains cas le transit puisse être effectué partiellement en sous-sol moyennant un coût plus élevé.

4.3 Critères de choix des techniques

Se pose le problème du compromis entre le dérangement minimal et les autres impératifs. On doit choisir une technique qui offre le meilleur compromis entre l'encombrement dû au chantier et la facilité d'application sur les lieux, pour un ouvrage particulier sur un site donné. Il ne faut pas négliger le coût de la réalisation qui est un facteur de poids dans le choix de la technique.

En ville on privilégie bien évidemment les techniques de creusement en sous-sol par rapport à celles à ciel ouvert pour gêner la surface le moins possible. Une méthode partiellement à ciel ouvert, bien qu'elle soit souvent la plus avantageuse au niveau du coût et plus simple à réaliser, pose de nombreux problèmes lors des travaux :

- insertion dans des voies de circulation étroites et souvent encombrées (circulation difficilement maintenue) ;
- difficulté du maintien des arbres et espaces verts ;
- nuisances sonores et esthétiques pendant les travaux.

Ces méthodes se heurtent ainsi souvent à l'opposition des riverains.

De plus, il est souvent préférable de creuser plus profond en sous-sol pour éviter le déplacement des infrastructures existantes, telles que les canalisations, les réseaux électriques et téléphoniques, etc.

Dans l'histoire récente des travaux souterrains en zone urbaine, l'intervention des riverains a contraint les techniciens à appliquer de nouvelles techniques : ils ont réduit l'encombrement des chantiers en inventant des machines de très petite taille, en imaginant de nouveaux modes de creusement, en trouvant des solutions d'insonorisation (les caissons).

4.4 Problèmes liés à l'environnement, aux sols

Seuls les impacts hydrogéologiques et géologiques peuvent être défavorables à un projet d'infrastructures souterraines. En effet les autres aspects justifient justement plus la construction en souterrain que les infrastructures de surface (aspects esthétiques, pollution, etc.).

On a souvent un sol meuble, des nappes à faibles profondeurs ce qui posent notamment des problèmes de résistance et de stabilité mécanique (et nécessitent parfois des techniques spécifiques de traitement des sols).

On distingue trois problèmes principaux :

4.4.1 Problème des nappes aquifères

Le sous-sol urbain étant souvent constitué de terrains meubles et aquifères, cette situation géologique implique des difficultés liées à la présence de l'eau. Les techniques actuelles de construction posent essentiellement des problèmes environnementaux : c'est souvent l'impact des ouvrages sur l'écoulement des nappes qui semble avoir le plus grand effet et non les nappes sur l'ouvrage.

4.4.2 Problème de mouvements des sols

Les travaux souterrains peuvent être la cause de désordres sur les immeubles voisins. Ces éventuels désordres, lorsqu'ils sont constatés, proviennent du mouvement des sols. Ceux-ci peuvent aussi bien s'affaisser suite à une décompression du sous-sol, que se soulever après un traitement du terrain. Leur importance peut varier de quelques millimètres jusqu'à plusieurs centimètres. Ils proviennent non pas

d'un manque de savoir-faire mais plutôt d'une insuffisance qualitative et quantitative de la reconnaissance des sols.

Pour faire face à ces problèmes de mouvements des sols, on peut avoir recours à certaines techniques d'amélioration des terrains comme la congélation des sols par exemple. La connaissance approfondie de la géologie doit être un passage obligé. Cette connaissance est à la base de la maîtrise des risques techniques.

4.4.3 Pollution des sols

Les entreprises posent de nombreuses questions concernant l'obligation d'assainir les sols.

Si on prend l'exemple de Bruxelles, aucun texte spécifique visant à la protection du sol n'existe (contrairement à certaines régions) ; la Région de Bruxelles-Capitale fait alors notamment appel à la législation relative au permis d'environnement. Son titulaire est tenu de :

- veiller à éviter une pollution du sol, d'en réduire ou supprimer les dangers, nuisances ou inconvénients si elle survient;
- d'en signaler immédiatement la survenance à l'IBGE⁴ ;
- lors de l'expiration du permis, d'assainir les sols pollués lorsque la pollution présente un danger, une nuisance ou un inconvénient.

4.5 Conclusion : planifier le projet souterrain à court et long terme

Concevoir un projet souterrain est un acte à multiples dimensions simultanées. Que ce soit pour des raisons de nuisances ou d'encombrement de la surface, les travaux ne reçoivent que rarement l'accord du public. Il faut donc essayer de concilier l'intérêt général et celui des riverains sans perdre de vue l'impératif du développement à long terme de la ville. Autrement dit, comment gérer la double dimension de l'intérêt local et de l'aménagement général de la ville ?

⁴ Institut bruxellois pour la Gestion de l'Environnement

Techniques de construction de tunnels

Quelques notions de base sont nécessaires avant de parler à proprement dit des techniques de constructions des tunnels.

- Un tunnel est une galerie souterraine de grande section, donnant passage à une voie de communication.
- Un site urbain est un ensemble formé par une ville et ses banlieues, ou communes isolées comptant plus de 1000 habitants par km².

Toute construction dépend du lieu où elle va être réalisée. Pour les tunnels, il faut donc prendre en compte diverses données, comme le type de sol, la stabilité de celui-ci, la profondeur à laquelle on souhaite arriver, etc. C'est ainsi que les techniques de construction doivent tenir compte de l'hydrologie et la géologie du sol. Pour déterminer les caractéristiques du sol, on fait appel à plusieurs types de sondes qui apportent chacune des informations particulières.

Etant donné la densité des buildings et autres construction en surface, il est parfois nécessaire et impératif de consolider le sol concerné pour la réalisation d'un tunnel. Les consolidations ne sont parfois que temporaires, et ne sont donc réalisées que pendant la durée des travaux. Dans ce cas, on utilise surtout la congélation du sol. Cependant, certains endroits nécessitent un renforcement définitif, on préférera alors les injections.

De plus, en ville, on ne peut pas construire où l'on veut, car des autorisations sont nécessaire (permis de bâtir, etc.) et le sous-sol urbain est souvent déjà fort occupé. De plus, un tunnel placé plus profond coûtera beaucoup plus cher. Et comme cité plus haut, il faut aussi prendre en compte le type de sol ; c'est donc un réel casse-tête, rempli de paramètres différents qui se présente à quiconque entreprend la réalisation d'un tel ouvrage.

C'est ainsi que les plans de constructions (qui justifieront aussi le choix des techniques) doivent tenir compte

- du tracé des voiries ;
- de la largeur entre les façades (et surtout entre les fondations) ;
- de la stabilité du sol et des immeubles riverains ;
- des ouvrages souterrains existants.

De manière générale, les ouvrages doivent être conçus en tenant compte de ces divers impératifs et les procédés d'exécutions doivent être adaptés le mieux possible aux caractéristiques de sol (tant en surface qu'en profondeur). Souvent (et ce fut encore plus le cas à Bruxelles), il n'est pas possible d'envisager une même méthode pour la construction du réseau entier (rares sont les terrains urbains avec des structures hydrologique et géologique constantes).

Cependant, il faut veiller à la cohérence du réseau (du point de vue de la taille des tunnels – mêmes rails, mêmes voitures) et au bon fonctionnement des services à attendre.

Globalement il est possible de distinguer 2 « familles » de techniques :

- A ciel ouvert
- En sous-sol

De plus, en ville, la construction d'ouvrages souterrains est rendue difficile, entre autres exemples, par la position élevée de la nappe phréatique, la présence de constructions mitoyennes ou la nécessité d'exécuter des fouilles de grande profondeur*, l'instabilité des terres, etc. Pour ces types d'ouvrages, il faut faire appel à des techniques spéciales. (Il est à noter que cette difficulté apparaît pour la construction de toute paroi, fondations comprises.)

En ville, la principale difficulté à surmonter est la présence d'eau. La parade la plus simple et la plus économique est de rabattre la nappe aquifère. Mais ce rabattement est souvent impossible. C'est le cas notamment lorsqu'on a à faire à un sol particulièrement étanche qui rend le rabattage par puits filtrants physiquement impossible, ou, lorsque la perméabilité des terrains est très hétérogène de sorte que certains d'entre eux, dénoyés, sont susceptibles de se tasser, provoquant ainsi des désordres dans les structures existantes ou encore lorsque l'importante hauteur de rabattement nécessaire nécessiterait une longue durée de pompage, coûteuse en énergie.

Un autre facteur est la stabilité des terres. Bien que ce facteur influence toute construction souterraine, il est plus délicat en ville dès lors qu'il faut à tout prix éviter les éboulements.

Au cours des dernières décades, on a assisté à une grande multiplication des constructions souterraines dans les grandes agglomérations, souvent pour des raisons de transport et de stockage.

Ce sont surtout les réseaux de transport en commun en site propre qui se développent. Actuellement, la plupart des grandes villes en Europe et dans le monde possèdent un réseau souterrain.

1.1 Critères de choix de la méthode

Les problèmes posés au concepteur et au réalisateur des tunnels en milieu urbain sont particulièrement nombreux et délicats pour les ouvrages du type métro et ce, en raison de leurs dimensions transversales importantes et de multiples contraintes.

Si les tracés en plan répondant aux contraintes d'exploitation en matière de gabarit, de pentes maximales admissibles, de rayons de courbure minimale peuvent correspondre à un axe important de voirie urbaine, et si le profil en long permet de suivre de près le niveau du terrain naturel, le choix de la construction en tranchée s'impose.

Par contre si, en raison de la topographie ou de l'existence d'ouvrages souterrains (tunnels, égouts collecteurs, etc.), le profil en long du tunnel ne peut suivre la pente du terrain et que le volume des déblais et des remblais dépasse notablement celui de l'ouvrage, la construction à ciel ouvert n'est pas économique.

De même, l'existence de rues sinueuses et d'une couche suffisamment importante, située à faible profondeur, d'un terrain dur et homogène peuvent impliquer la construction par avancement.

Dans certains cas, la longueur relativement importante d'un tronçon de tunnel de section constante peut autoriser la mise en oeuvre d'un procédé d'exécution en souterrain nécessitant de grands investissements initiaux (bouclier, machines à forer, etc.).

Qu'il s'agisse de l'une ou l'autre méthode d'exécution, en tranchée, en souterrain, le choix du procédé est influencé par :

* Les nouvelles conditions hydrauliques créées par l'établissement de l'ouvrage imposent des profondeurs plus grandes afin de satisfaire les limites définies par la nature et le degré d'humidité des sols.

- **l'existence dans le voisinage d'ouvrages de construction souterraine** en superstructure (en fonction de leur nature, de leurs importants et des marges de sécurité qui les caractérisent, particulièrement de leur fondation).
- **les propriétés des sols** encaissant, au-dessus, en dessous de part et d'autre des ouvrages : compacité, et résistance, perméabilité, compressibilité et hydrologie. À cet égard, il faut considérer que même si les conditions de terrains sont peu favorables, les techniques modernes de recompression, de consolidation et d'étanchement des terrains permettent de construire un tunnel à l'avancement, sans créer de désordres notables dans les constructions existantes.
- **la présence des canalisations enterrées** de toute nature (gaz, électricité, téléphone) ; les déviations trop nombreuses de canalisations grèvent l'économie d'une solution par rapport à l'autre.
- **le trafic de surface en cours des travaux** (piétons, véhicules automobiles, tramways) et la nécessité de maintenir les accès aux immeubles riverains (industries, commerces, résidences), la gêne étant d'autant plus grande que la voirie est plus étroite ; ces contraintes obligent souvent à avoir recours à la méthode de l'exécution en tranchée couverte, ou à la réalisation à l'abri d'un platelage provisoire permettant le maintien de la circulation.
- **les projets de constructions nouvelles** qui peuvent avoir une incidence sur la conception et les conditions d'exécution des souterrains.

Il ne sera généralement pas possible d'adopter une méthode unique applicable à l'ensemble des tunnels. Il est cependant indispensable que le choix des divers procédés à adopter permette d'aboutir à un ensemble d'ouvrages cohérents du point de vue aspect, gabarit du matériel roulant, services à attendre, et de les mener à bonne fin et au moindre coût.

1.2 Importance de la nature des terrains rencontrés

La plus grande difficulté de l'établissement des projets tient à l'ignorance de l'état géologique, géotechnique et géologique des souterrains où ceux-ci doivent être construits. Pour établir des projets qui présentent le moins d'aléas possibles, il était essentiel de lever cette indétermination.

Une certaine progressivité de l'étude géologique accompagnant la mise au point du projet est nécessaire. Cette étude correspond à trois étapes principales.

- Dans l'étape préliminaire de définition du tracé, les renseignements existants (cartes géologiques, fondations et conditions de construction d'ouvrages dans les sites concernés, etc.) permettent une première approche du problème.
- La seconde étape, qui correspond à l'établissement de l'avant-projet, nécessite de fixer les procédés généraux d'exécution et les structures, ainsi que l'implantation précise de l'ouvrage. Le dossier d'études géologiques qui l'accompagne doit comporter tous les renseignements nécessaires.
- La troisième étape qui est celle de la préparation des marchés d'entreprises demande une connaissance détaillée du terrain. Il faut préciser certaines conditions d'exécution qu'il n'est pas essentiel de connaître au stade précédent, telles que l'importance des installations de rabattement de la nappe et l'adaptation exacte des moyens à mettre en oeuvre. Cette connaissance détaillée peut nécessiter, outre des sondages complémentaires, des chantiers d'essai (puits, galeries, etc.) qui doivent être disposés pour être utiles ultérieurement à la construction proprement dite.

L'étude géologique doit donc accompagner l'avancement du projet et non la précéder. Elle fait partie intégrante du projet et demande une collaboration entre chefs de projet et spécialistes, ces derniers étant à

même d'interpréter toutes les observations possibles pour les obtenir au meilleur compte avec le minimum d'erreur, en appliquant les méthodes de la géologie classique à un problème local.

2. Méthodes de construction à ciel ouvert

Que ce soit en ville ou ailleurs, les travaux de construction ont lieu après les divers sondages et autres opérations nécessaires à la décision de construire l'ouvrage. Passé cette étape, on prépare les environs immédiats à accueillir le chantier : déviations de la circulation, protection des bâtiments riverains, etc. le tout devant être accompli de la manière la plus efficace possible pour ne pas perturber inutilement la vie en surface.

Lorsque l'on construit à ciel ouvert, deux possibilités se présentent : on peut soit envisager de construire l'ouvrage à l'aide de la méthode des tranchées (tout l'ouvrage est à l'air libre jusqu'à l'édification de la superstructure, la dalle de toiture est alors en un seul tenant), soit en utilisant celle en tranchée couverte (on réalise la dalle de toiture à l'air libre, souvent en plusieurs tenants). La tranchée couverte est souvent la seule possible, surtout dans les villes à forte densité d'immeubles ou à trafic important (souvent impossible à détourner). Surtout que la méthode à ciel ouvert durant toute la durée des travaux n'offre plus d'avantages depuis que l'on est capable de construire la dalle de toiture en plusieurs tenants.

2.1 Tranchée ouverte

Les tranchées sont réalisées soit avec talus dont la pente dépend du terrain, soit avec soutènement par parois verticales.

Les mauvais terrains, schistes et argiles (en particulier argiles consistantes fissurées et argiles contenant des couches de sable aquifère), nécessitent de prendre des dispositions particulières adaptées à chaque site. Si les pentes de talus sont trop faibles, il faut s'accommoder de l'emprise disponible. Il est possible d'augmenter ces pentes par des techniques particulières : revêtement en plaques de béton supportées par une poutre en béton armé en partie inférieure, stabilisation par liants hydrauliques ... ou abandon de l'option des talus.

Il est alors possible de remplacer les talus par des parois verticales en prévoyant un soutènement, ce qui autorise des surcharges. Les principaux types de mur de soutènement sont bien connus : murs poids pour les petites hauteurs (jusqu'à 3 m environ) et, surtout, murs profilés et murs à contreforts intérieurs, acceptant des retenues plus importantes.

Lorsque l'on applique cette méthode, l'entièreté de l'ouvrage est réalisée (en préfabriqué ou non) puis la tranchée est recouverte. Cette méthode présente donc deux inconvénients majeurs :

- pré-fabriquer l'ouvrage se révèle irréaliste étant donné les gabarits des tunnels à exécuter ;
- appliquer cette méthode implique un encombrement très important en surface, ce qui n'a pas sa place dans une ville moderne.

Bien que tout à fait réalisable, elle soit la moins coûteuse et la plus simple à mettre en place, cette technique n'a tout simplement pas sa place dans une ville moderne. Mais elle reste cependant possible pour construire à moindre coût des tunnels souterrains. D'ailleurs il est courant de l'utiliser hors zone urbaine, là où la géologie le permet.

2.2 Tranchée couverte.

Lorsque l'ouvrage est à construire dans une artère à grand trafic et qu'il importe donc de réduire significativement les entraves à la circulation, il est préférable d'utiliser la méthode d'exécution en tranchée couverte. Celle-ci est fortement inspirée de la méthode de construction en tranchée ouverte mais avec un encombrement en surface réduit dans le temps.

Après avoir dévié les égouts, les câbles et les canalisations des services publics situés dans les limites de l'ouvrage, on construit successivement les piédroits par l'un ou l'autre des procédés (cf. 2.3), comme on le ferait en tranchée ouverte.

La dalle de toiture est ensuite coffrée à même le sol et en plusieurs parties pour réserver, à tout moment, une ou plusieurs bandes de chaussée pour la circulation de surface. Une fois la dalle terminée, on rétablit définitivement la voirie et on effectue les terrassements à l'abri de la dalle, le radier étant bétonné en dernier.

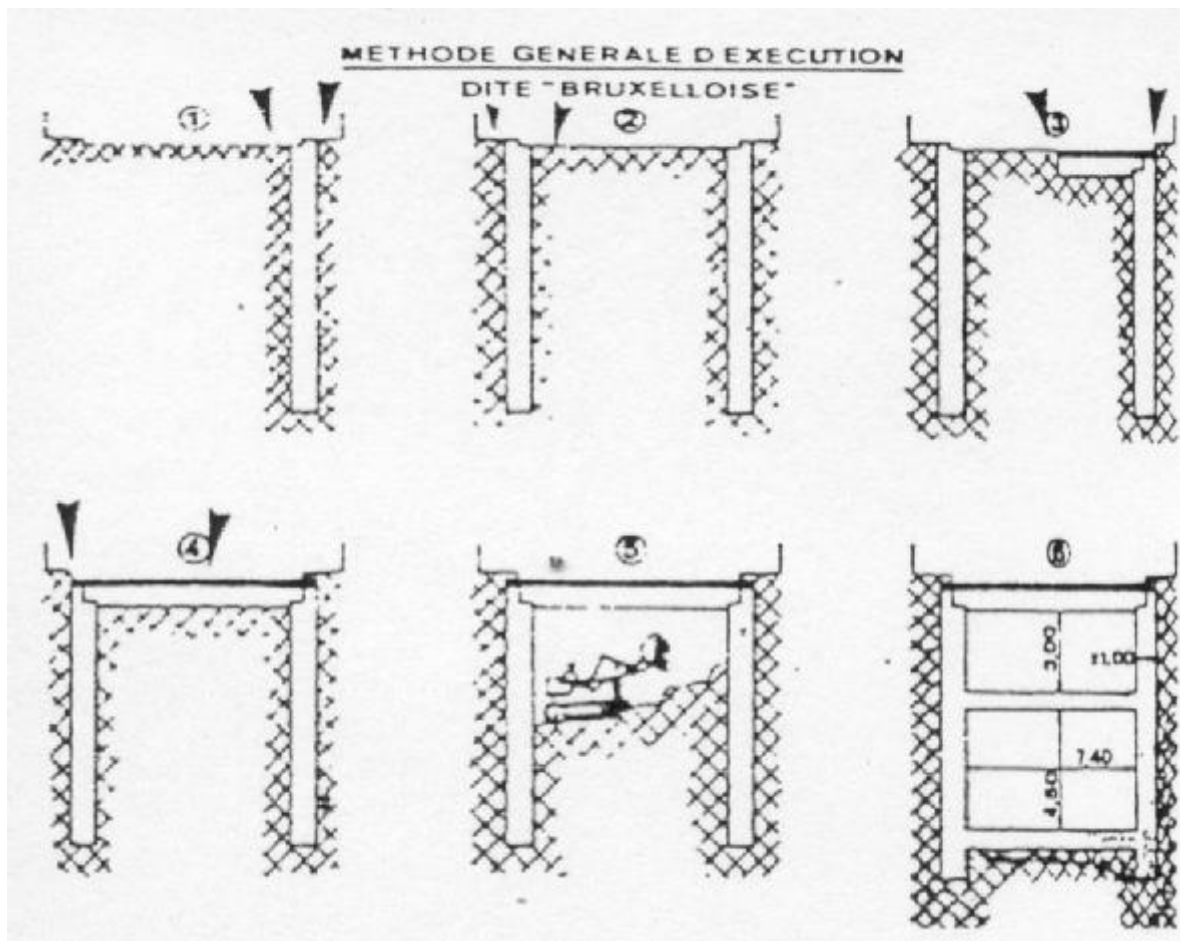


Fig. 7 : La méthode « bruxelloise »

Cette méthode dispense d'employer des platelages provisoires coûteux pour écouler la circulation pendant les travaux.

Lorsque les souterrains occupent une grande superficie, notamment les stations de métro, les dalles aux divers niveaux doivent prendre appui sur un réseau de colonnes intérieures, et ce en plus des murs périphériques. Dans ce cas, il y a intérêt à mettre en place ces colonnes intérieures en même temps que les murs, c'est-à-dire préalablement au terrassement. Ces colonnes peuvent être construites à l'abri d'une fouille blindée, être constituées de pieux en béton moulés dans le sol, ou encore de pieux forés.

Si la section des pieux est jugée trop encombrante dans le volume destiné à devenir utile dans l'ouvrage terminé, on a recours à la technique dite des « colonnes foncées ». Elle consiste à creuser un puits à partir de la surface jusqu'à un meilleur sol. Dans ce puits ainsi réalisé, on introduit les profilés métalliques de la colonne apparente dans le volume utile. Cette colonne est chargée de transmettre la charge au « faux puits » (partie inférieure du puits). On maintient la colonne suspendue pendant le bétonnage du « faux puits » jusqu'à en englober la base de celle-ci.

Les divers plateaux sont ensuite réalisés, du haut vers le bas, par terrassements successifs, en prenant appui sur les colonnes foncées, ce qui évite l'emploi d'étaçons temporaires coûteux ou de tirants d'ancrages pour équilibrer la poussée des terres et de l'eau sur les murs périphériques.

Cette manière de procéder a été couramment utilisée en Belgique (à Bruxelles surtout) et porte le nom de « méthode bruxelloise ».

2.3 Techniques d'exécution à ciel ouvert.

On l'a vu, les méthodes à ciel ouvert reposent sur les mêmes principes : la construction de piédroits. C'est sur cette construction que reposent les ouvrages réalisés à ciel ouvert (c'est le cas de nombreux tunnels à Bruxelles).

Une ligne souterraine doit être le plus près du sol. Compte tenu de la présence d'installations souterraines préexistantes, notamment du réseau d'égouts, et de l'organisation des stations (transports ferrés), la surface de roulement se situe entre 6 et 12 m en dessous du niveau du sol.

Les procédés d'exécution varient suivant quatre critères :

- la place disponible en surface ;
- la nature du terrain ;
- le niveau de la nappe aquifère par rapport au chantier ;
- la proximité de construction à fondations précaires.

Avant l'exécution proprement dite, il faut dévier les canalisations de toute nature situées à l'emplacement de la future ligne. Les premières phases des travaux nécessitent une emprise au sol importante dont il est souhaitable (et généralement possible) de réduire la durée.

2.3.1 **Méthodes sans blindage**

Le cas le plus facile se présente lorsque l'ouvrage peut être exécuté dans une fouille talutée, l'angle du talus est déterminé en fonction de la nature du terrain qui doit impérativement être hors de la nappe phréatique (on peut éventuellement la rabattre). Cette méthode est rarement utilisable en zone urbaine puisqu'elle conduit, d'une part, à une emprise au sol importante sauf dans un terrain très cohérent ou rocheux, où il est possible de faire une fouille à parois verticales, et, d'autre part, à l'abaissement de la nappe sous les immeubles riverains, d'où danger de tassement.

2.3.2 Méthodes avec blindage

Le blindage est indispensable quand le tunnel est construit dans un terrain peu cohérent ou en présence d'eau. Il procure en surface une réduction d'emprise sensible. Les parois latérales du puits doivent être conçues de manière à jouer le rôle de mur de soutènement et plonger profondément dans le sol. La longueur de la fiche est fonction du sol (portance, caractéristiques de frottement, nécessité de descendre dans la couche imperméable en vue d'assécher la fouille, s'opposer aux affouillements).

Le blindage est réalisé par :

- des murs en béton construits en fouilles blindées ;
- des parois moulées dans le sol ;
- des rideaux de palplanches métalliques, récupérables ou non ;
- des pieux sécants en béton ;
- des parois en éléments préfabriqués.

2.3.2.1 Fouilles blindées

a. Description du procédé

Dans l'alignement des parois latérales du tunnel, des fouilles blindées, d'une largeur égale à l'épaisseur des murs, sont creusées par tronçons de 5 à 6 m, tout en maintenant entre deux fouilles un massif de terre de même importance pour réduire la décompression du terrain. Le blindage est exécuté en gîtes 8/23 et rondins.

Lorsque la profondeur est atteinte (possibilité d'atteindre 20 m), on élargit la base de la fouille en forme de patte d'éléphant et par tronçons alternés de 1m de longueur. Le bétonnage s'opère par hauteur de 4 m avec une durée d'interruption correspondant au début de prise. Le blindage du côté extérieur est enlevé au fur et à mesure tandis que le blindage intérieur est récupéré lors de l'enlèvement du stross.

Après achèvement, les tronçons constituant les murs latéraux sont solidarisés par une poutre longitudinale en tête.

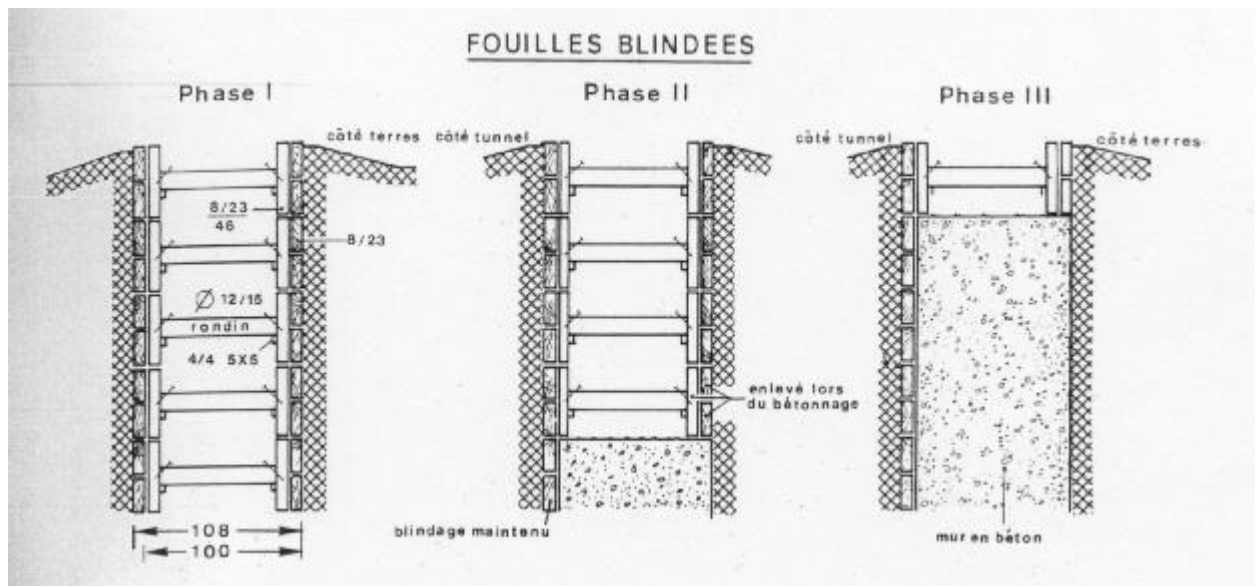


Fig. 8 : La méthode des fouilles blindées

Dans le cas de l'application en tranchée couverte, la dalle de toiture, bétonnée à même le sol, vient s'appuyer sur cette poutre. Lorsque la dalle de toiture a acquis une résistance suffisante, on procède à l'enlèvement du stross moyennant étançonnement des murs, grâce aux outils des différents niveaux, on bétonne petit à petit du haut vers le bas.

b. Avantages du procédé

- Le matériel utilisé (treuils et engins de chargement des terres) étant d'un encombrement réduit, le procédé en fouilles blindées est peu néfaste à la circulation ;
- Les murs sont implantés avec grande précision et présentent un aspect acceptable une fois finis ;
- L'exécution s'adapte facilement à des situations difficiles, comme lors de la construction sous ou immédiatement à côté des voies de tramway ;
- Les bruits de trépidations sont pour ainsi dire inexistantes.

c. Inconvénients

- L'évacuation des déblais pose problèmes ;
- La descente des matériaux et l'évacuation des déblais s'opérant à l'aide de treuils, la technique exige de multiples précautions pour assurer la sécurité du personnel de fond.
- L'avancement est assez lent car le terrassement s'opère tout à fait manuellement mais la possibilité de multiplication des points d'attaque atténue cet effet.
- Le domaine d'application est limité aux terrains suffisamment cohérents, de bonne qualité et où le fond de fouille se situe au-dessus du niveau de la nappe.

2.3.2.2 Parois moulées dans le sol

a. Description du procédé

La construction consiste à réaliser une fouille aux dimensions du mur au moyen d'une machine d'excavation spéciale. Pour empêcher la fermeture de cette tranchée sous l'effet du terrain contigu et ralentir la décompression du sol, on le remplit au fur et à mesure de son creusement par une boue dénommée bentonite⁵.

Au niveau des parois, la bentonite se gélifie sous la forme d'un cake imperméable de quelques millimètres d'épaisseur, qui empêche l'eau de s'infiltrer dans le terrain et l'eau de la nappe phréatique de pénétrer dans la tranchée.

Les phases et réalisation du mur se schématisent comme suit (cf. méthode bruxelloise – 2.2) :

- construction du muret de guidage s'appuyant sur le bon sol et élimination des obstacles (massifs, câbles, canalisations...)
- creusement de la tranchée par panneau de 4 à 6 m de longueur.
- pose de la cage d'armature ;
- bétonnage à l'aide d'un tube plongeur descendu jusqu'au fond de la tranchée ;
- décapage du béton mélangé à de la bentonite à la partie supérieure du mur ;

⁵ Il s'agit d'une suspension thixotropique (liquide tant qu'elle est maintenue en mouvement, rigide au repos).

- bétonnage de poutres de liaisonnement ;
- construction de la dalle de toiture ;
- en utilisation pour tranchées couvertes, évacuation du stross et poursuite de l'exécution à l'abri de la dalle.

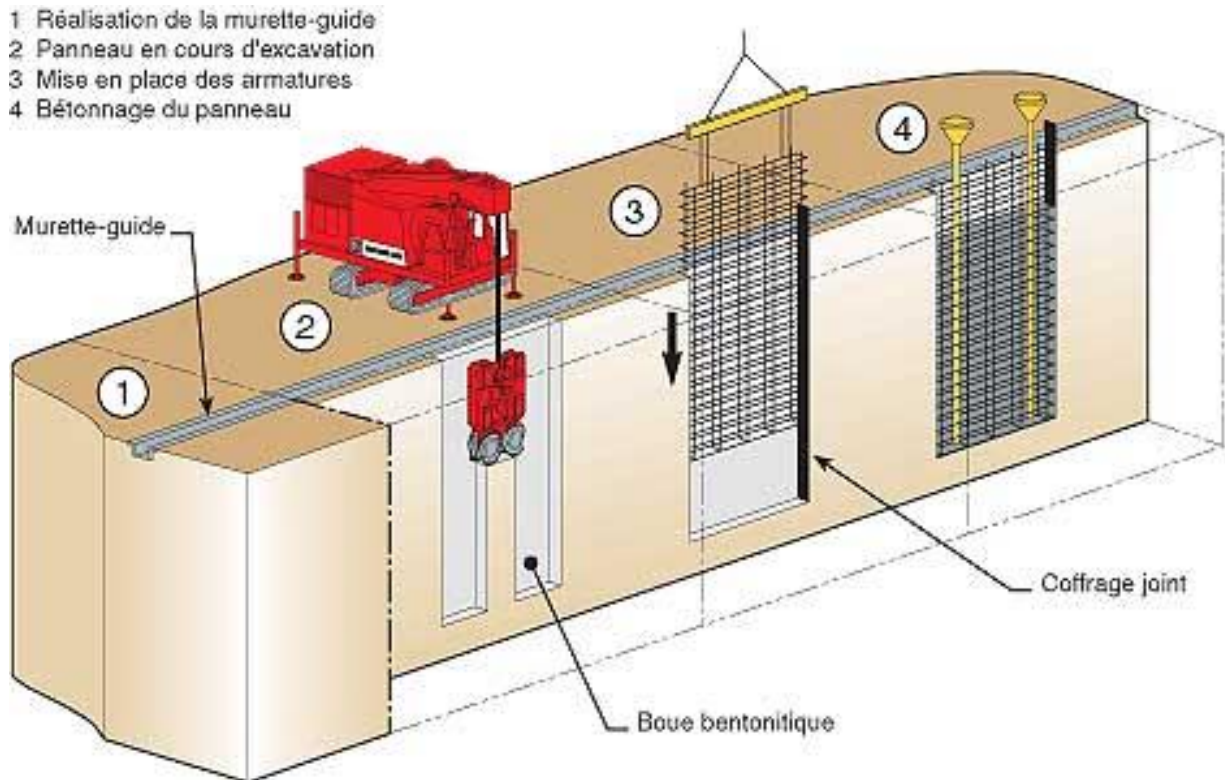


Fig. 9 : La méthode des parois moulées dans le sol

La liaison entre panneaux successifs est obtenue par creusement de rainures dans l'élément fraîchement bétonné par joint tubé, grâce auxquels on donne au bord du panneau exécuté une empreinte semi-circulaire, au creux de laquelle viennent s'aligner les excavations du panneau suivant.

b. Avantages

- La méthode s'accommode de toutes les situations défavorables dues à l'hydrologie du sol et sa mauvaise qualité, notamment dans les vallées ;
- Elle s'adapte particulièrement aux artères étroites et sinueuses du centre ville, où il est souvent inévitable de construire très près des façades d'immeubles anciens à fondations peu profondes ;
- La méthode est particulièrement intéressante lorsqu'il s'agit d'obtenir une fouille générale sèche. On construit alors une enceinte fermée dont les murs plongent dans le fond imperméable. A l'intérieur de l'enceinte, la fouille peut-être asséchée sans que l'épuisement de l'eau ne perturbe la nappe aquifère hors de l'enceinte.

c. Inconvénients

- L'encombrement du chantier gêne fortement les circulations et l'accès aux propriétés riveraines. Pour en atténuer les inconvénients, il est nécessaire soit de n'opérer que d'un seul côté à la fois, soit d'éviter l'emploi d'excavatrices guidées par tiges rigides.

En terrain de compacité normale et homogène, une machine légère, composée d'une sorte de chèvre actionnant un grappin spécial agissant par son propre poids, permet l'obtention des panneaux de verticalité parfaite. Par contre, s'il y a présence de couches dures, tel que bancs gréseux, inclinés ou discontinus, il y a risque de déviation de l'excavation et perte de rendement. Il est alors nécessaire de briser ces couches par trépanage ;

- L'extraction des terres enrobées de liquide et leur chargement sur camions provoquent des éclaboussures sur les passants, les voiries et les façades. Il est possible d'y remédier partiellement par l'équipement du matériel fixe au moyen de panneaux de protection, l'utilisation de camions à benne étanche ou la désignation d'une équipe de nettoyage ;
- Le système d'embrayage du treuil est la source de bruits stridents ;
- Les groupes électrogènes de grande puissance, qu'il convient d'atténuer par des auvents phoniques et une assise anti-vibrations, sont aussi une source de bruits ;
- L'élimination de la bentonite polluée pose problème. Le liquide ne peut être réutilisé indéfiniment car il perd progressivement ses qualités colloïdales (par modification de son pH et parce qu'il se charge en particules sableuses). L'élimination via l'égout ne peut être envisagée à cause des décantations qui s'y produisent et les entreprises de vidange ne possèdent pas un matériel spécialement adapté ;
- Le risque d'effondrement en cas de perte de bentonite par les canalisations non repérées est très présent.

2.3.2.3 Palplanches métalliques

a. Description du procédé

La construction de l'ouvrage a lieu entre deux rideaux de palplanches battues au moyen d'un marteau pilon.

On creuse ensuite une tranchée longeant les palplanches du côté intérieur de manière à souder des consoles métalliques, sur lesquelles viendront prendre appui des poutres définitives de la dalle sous voirie.

S'il existe des voies de tramway, ces poutres peuvent servir d'appui à des longrines supportant les rails et traverses ; un platelage posé de la même façon permet de maintenir le trafic routier.

Les poutres définitives posées sur les consoles sont calées contre les palplanches et servent provisoirement, pendant l'exécution de la fouille, comme étaçons. Il est donc possible d'exécuter les terrassements entre palplanches et de descendre jusqu'au niveau du radier sous la protection d'une ou de plusieurs nappes d'étaçons intermédiaires suivant la profondeur à atteindre.

Le bétonnage se fait ensuite du bas vers le haut, les étaçons étant successivement remplacés par les hourdis des différents niveaux de l'ouvrage.

b. Avantages

- Ce procédé permet une exécution précise des parois verticales délimitant l'ouvrage, d'où épaisseur moindre de ses parois ;
- Les murs finis sont d'un bel aspect ;
- Le rendement est assez bon, s'il n'y a pas trop d'obstacles dont le sol.

c. Inconvénients

- Les bruits et les trépidations au cours du battage ;
- Les difficultés de déplacer la sonnette en site dénivelé ;
- La nécessité d'enlever les obstacles aériens pour lever les palplanches ;
- Les problèmes des transports et d'approvisionnement de palplanches de grande longueur en pleine agglomération ;
- Le coût des palplanches qu'il est généralement impossible de récupérer et qu'on ne peut prendre en considération dans le calcul de la stabilité.

2.3.2.4 Pieux sécants

a. Description du procédé

Le procédé consiste à construire une série de pieux en béton moulés dans le sol. Les pieux se recourent de manière à présenter une épaisseur de 50 à 60 cm au droit de la séquence, pour former une paroi continue et étanche.

On procède d'abord au forage et au bétonnage des pieux de la série impaire ; ceux-ci sont constitués de béton à durcissement retardé et ne sont pas armés. Avant le durcissement complet, on fore les pieux de la série paire en découpant le béton en place ; ces pieux sont armés sur le pourtour et les armatures sont plus denses au droit de la séquence.

Le forage se fait par fonçage de colonnes métalliques provisoires du diamètre des pieux (de 80 à 150 cm) en utilisant le mouvement loupoyant angulaire. Les terres sont enlevées au fur et à mesure de l'enfoncement au moyen d'un grappin spécial.

Lorsqu'on travaille sous la nappe phréatique, le tube est rempli d'eau ou de boue bentonitique pour équilibrer la sous-pression. Le bétonnage s'effectue par tubes plongeurs comme pour les parois moulées simultanément le tube provisoire de forage est remonté par un mouvement de va et vient qui a pour effet de compacter le béton et de le faire pénétrer dans les infractuosités du sol environnant.

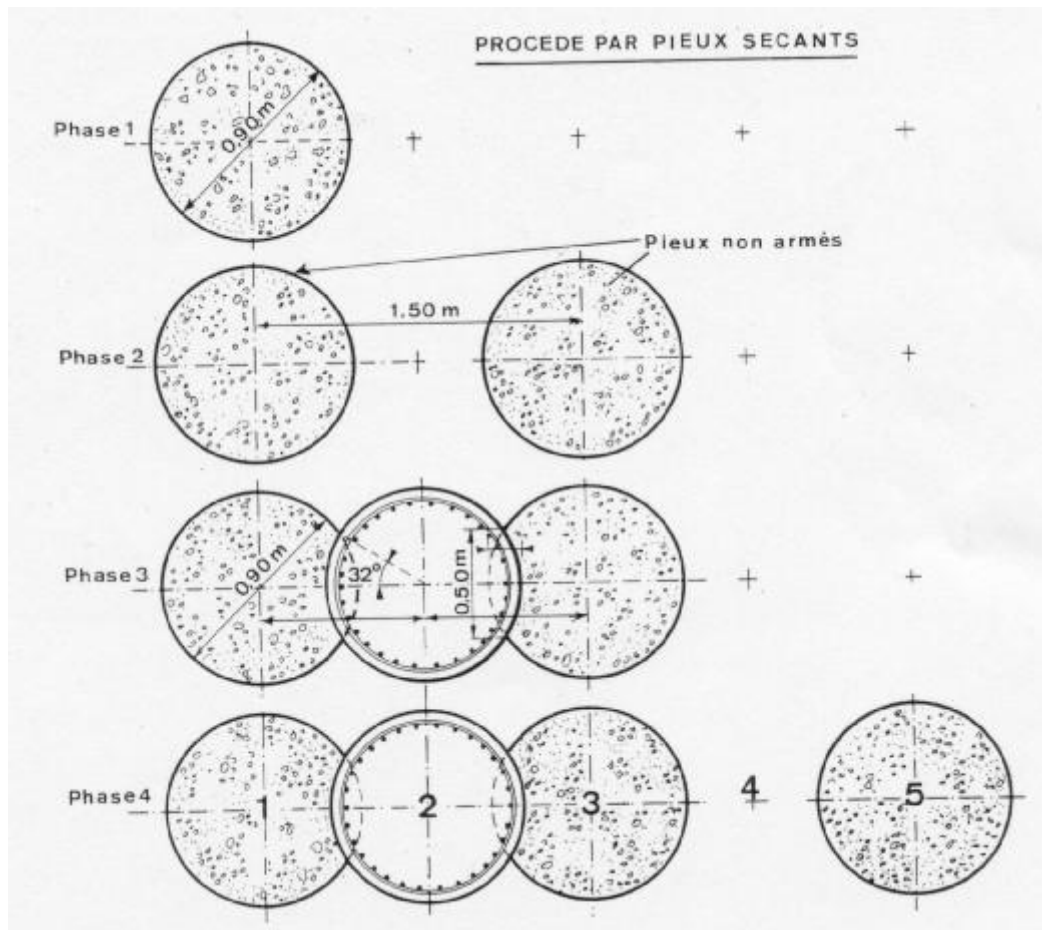


Fig. 10 : L'agencement des pieux sécants

b. Avantages

- Le procédé s'adapte aux conditions de sol les plus défavorables mais avec une sécurité accrue par rapport aux murs emboués. En cas de perte de bentonite par des canalisations non repérée, il n'y a aucun risque d'effondrement.
- La capacité portante des murs est améliorée grâce à une surface de contact au sol supérieure, à volume égal de béton.

c. Inconvénients

- La profondeur des pieux est limitée par la résistance à l'enfoncement et au retrait du tube de guidage.
- Dans les terrains très durs, le tube a tendance à gauchir ce qui provoque la rupture des raccords entre viroles. La reprise des travaux exige le remplissage de la fouille au sable stabilisé et l'arrachage du tube avarié.
- Difficultés d'assurer l'étanchéité en cas de non-séquence de deux pieux.

3. Tunnels exécutés en souterrain

La méthode de construction par tranchées couvertes est une transition entre « le ciel ouvert » et « le tout souterrain ». C'est en effet à l'aide d'un judicieux artifice que l'on arrive à adapter une méthode à ciel ouvert pour travailler en sous-sol.

Car la construction directement en sous-sol est la seule réellement souhaitable en ville, pour des aspects organisationnels surtout. L'homme a dû donc développer des techniques pour construire directement en sous-sol.

Cependant, quoi que l'on fasse, il faudra de toute façon commencer en surface, c'est pour cela que les travaux de constructions exécutées en souterrains commencent toujours par la création de galeries d'accès par les méthodes sus-citées. Dans le cas d'un tronçon du réseau exécuté entièrement en souterrain, on commence par l'édification de la station avant de s'attaquer au tunnel. Il arrive aussi que l'on utilise des galeries existantes.

Une fois dans le sous-sol, il est alors possible d'avancer horizontalement dans le sol. Mais par rapport aux techniques en tranchées, le soutènement occupe une place centrale dès lors que l'on creuse sous une masse de terrain considérable, masse qui ne peut en aucun cas bouger. Ainsi, les risques d'effondrements en surface sont beaucoup plus importants lors de la construction en souterrain.

Bien entendu, la construction en souterrain est beaucoup plus coûteuse que celle à ciel ouvert, cela en raison d'un niveau technique requis pour l'exécution des ouvrages autrement plus élevé.

3.1 Méthodes traditionnelles

À part les terrains rocheux de bonne tenue, tous les terrains exigent un soutènement plus ou moins résistant et plus ou moins élaboré.

En site urbain, les différentes méthodes traditionnelles de terrassement souterrain relèvent toutes du même processus de « section divisée », qui consiste à effectuer progressivement et par parties successives l'ouverture de l'excavation.

À partir de plusieurs galeries longitudinales, on procède à des attaques transversales pour vider toute la partie supérieure correspondant à la voûte de l'ouvrage. L'exécution des piédroits est ensuite entreprise, soit à partir de galeries longitudinales, soit par reprise en sous-œuvre suivant la nature de terrain. On connaît ainsi la méthode anglaise (attaque à pleine section) applicable en terrain rocheux sain ; la méthode de galerie de faite, ou méthode belge ; la méthode des deux galeries (de base et de faite) ou méthode autrichienne ; et la méthode des trois galeries, s'appliquant aux ouvrages de grande section en mauvais terrain

Pendant longtemps, le soutènement et le blindage étaient réalisés en bois ; ces méthodes présentent une valeur indiscutable et une entière sécurité d'exécution, mais elles nécessitent un nombre d'équipes considérable de mineurs boiseurs qui n'existent plus actuellement. En outre, elle s'accommode mal des cadences d'exécution rapide. Aussi, le petit nombre de spécialistes qu'offre encore le marché de la main-d'œuvre doit être affecté obligatoirement aux ouvrages difficiles, de section non standard, où seules les méthodes artisanales sont applicables.

On peut aussi compter sur l'augmentation du rendement des moyens d'extraction et d'évacuation des déblais ainsi que ceux d'acheminement, à gros débit, du béton à l'aide de pompes.

Enfin, les méthodes de traitement des terrains permettent de transformer un terrain cohérent en un terrain pulvérulent.

Le développement de chantier à l'avancement, avec attaque du front de taille sur la superficie maximale de la calotte de l'ouvrage, et systématiquement recherchée. De nombreuses machines dites à attaque ponctuelle remplacent avantageusement les marteaux-piqueurs, lorsque le terrain a une cohésion suffisante.

Pour éviter la décompression des terrains supérieurs, on enrobe les fers de soutènement dans le revêtement, ou bien on constitue le revêtement lui-même d'éléments en béton armé préfabriqués. Une fois le terrassement achevé, il convient d'exécuter sans attendre le revêtement de la voûte. La maçonnerie est couramment exécutée en béton tassé mécaniquement. On s'efforce, pour limiter au maximum la décompression, de diminuer la distance entre le front de taille et la mise en place du revêtement.

Une mention spéciale peut être faite à la nouvelle méthode autrichienne de construction de tunnels, qui reçoit actuellement de multiples applications. Les phases successives de réalisation sont :

- excavation par abattage du terrain, après abaissement de la nappe aquifère par puits d'épuisement ou par drainage ;
- application, au fur et à mesure du creusement du tunnel, d'une coque en béton projeté, armé d'un treillis métallique. L'importance des tassements peut être réduite fortement en réduisant l'intervalle de temps compris entre l'ouverture des voûtes et l'achèvement, dans la région du radier, du revêtement béton projeté.

Ensuite, en fonction des caractéristiques du terrain :

- montage et calage de cintres en acier, plus ou moins rapprochés ;
- boulonnage du terrain au moyen de barres d'ancrage.

Il convient de déterminer et de vérifier si cette méthode est appropriée aux conditions du sol, en perçant un tronçon d'essai, éventuellement précédé d'une galerie d'essai de dimension réduite. Pendant et après le creusement, des mesures doivent être effectuées pour contrôler la déformation de la galerie, les tensions dans la coque en béton projeté, les tassements du terrain et le comportement des bâtiments.

Des applications de ces méthodes ont été réalisées par la construction de pour la construction de tunnels pour métro en zone urbaine et avec par recouvrement de terrains de l'ordre de 11 m au-dessus l'ouvrage. Après achèvement du percement, on a pu constater que, malgré les tassements de deux à 5 cm survenus, aucun dégât important va subsister aux constructions dans la zone du tracé du tunnel.

3.2 Tubes foncés

a. Description du procédé

Il s'agit de construire, en sous-sol, le coffrage de la toiture du tunnel métro au moyen de tubes longitudinaux, enfoncés horizontalement dans le sol (à environ 2 m de profondeur).

Dans un premier stade, on creuse une chambre de travail de dimension suffisante pour y descendre le matériel et y installer les équipements nécessaires. A partir de cette chambre, on enfonce horizontalement dans le sol – au moyen de vérins hydrauliques – des tubes cylindriques destinés à rester dans le sol pour constituer l'enveloppe principale de la toiture du tunnel. L'alignement est contrôlé en permanence par un rayon laser.

Les deux tubes latéraux ont un diamètre plus grand (de l'ordre de 1,8 m) tandis que les tubes centraux ont un diamètre inférieur (autour des 1,4 m). Chaque tube, en asbeste ciment, a une épaisseur d'environ 8 cm. L'entre distance entre les tubes varie de 0 à 5 cm. Les tubes sont foncés élément par élément (généralement 2,50 m à 3 m).

Techniques de construction de tunnels en milieu urbain

Lorsque les conditions des terrains rencontrés sont bonnes, la vitesse d'avancement du fonçage des tubes est d'environ 6 m par jour. Au fur et à mesure de la progression des tubes, on dégage et on évacue les terres à l'intérieur du tube.

La phase suivante consiste à exécuter les parois latérales du tunnel. Ce travail est exécuté en fouilles blindées (ou toute autre méthode d'exécution de parois) depuis les tubes latéraux, donc également en sous-sol. Ces murs sont ferrailés et bétonnés.

La troisième phase est consacrée à la réalisation de la toiture résistante du tunnel (les tubes n'en constituent que le coffrage). Ce travail débute par le percement de saignées transversales entre les tubes. Ces saignées qui n'intéressent que la partie inférieure des tubes sont distantes de 9 m. On y place le ferrailage et les câbles de précontrainte. Lorsque le remplissage de béton sera réalisé, ces éléments constitueront les poutres transversales qui soutiendront la toiture et qui prendront appui sur les murs latéraux.

Au cours de la quatrième phase, les tubes centraux et les saignées transversales sont bétonnés. Cette opération doit s'effectuer en une fois afin de garantir un remplissage parfait des volumes par le béton. Après durcissement du béton, les câbles de précontrainte des poutres transversales sont mis en tension. Les tubes latéraux sont alors remplis de béton ce qui permet d'assurer l'appui définitif de la toiture sur les murs latéraux.

La superstructure de l'ouvrage est alors opérationnelle.

Sous et à l'abri de la superstructure ainsi réalisée, on peut excaver les terres occupant le volume du tunnel proprement dit. Cette opération peut se dérouler jusqu'au niveau du radier du tunnel. Ce radier est alors bétonné. Il reste alors à réaliser l'étanchéité entre les tuyaux. Cette opération se déroule à l'intérieur de l'ouvrage et consiste à coller une membrane élastique sur la face inférieure des tubes et à appliquer des coquilles de protection.

Chaque fois que cette technique a été utilisée en Belgique, elle a donné entière satisfaction.

b. Avantages

- Cette technique ne nécessite qu'un espace réduit en surface. On occupe de la place en surface uniquement pour la construction des chambres de travail et ceci juste le temps de leur construction et de l'acheminement du matériel.
- Les techniques utilisées sont pleinement maîtrisées (en particulier la construction des parois).

c. Inconvénients

- Cette technique est plus coûteuse que les techniques en surface.
- La vitesse d'avancement par cette méthode est assez faible.

3.3 Boucliers & Tunneliers

« Un bouclier est un système de protection constitué d'une structure métallique complète ou partielle à l'abri de laquelle s'effectuent les opérations de terrassement. Le soutènement ou le revêtement peuvent également être mis en œuvre à l'abri du bouclier. »⁶

« Un tunnelier est une machine réalisant en continu le creusement d'un tunnel et, si nécessaire. La mise en place d'un revêtement à faible distance du front de taille. »⁷ En fait, le tunnelier est composé d'un bouclier et d'un train suiveur, l'ensemble étant capable d'assurer le traitement éventuel de l'un ou l'autre élément intervenant dans le processus de construction.

Le tunnelier équipé d'un bouclier mécanisé est donc utilisé pour creuser des galeries en souterrain. Dès lors il se doit d'assurer les fonctions suivantes :

- Abattage du terrain en pleine section ou au moyen d'une machine à attaque ponctuelle ;
- Soutènement du front de taille ;
- Soutènement des parois latérales lors de l'excavation ;
- Progression du bouclier (par appui sur le revêtement mis en place) ;
- Mise en place du revêtement à l'abri d'une jupe métallique ;
- Evacuation des déblais à l'arrière de la machine et transport jusqu'aux installations de décharge.

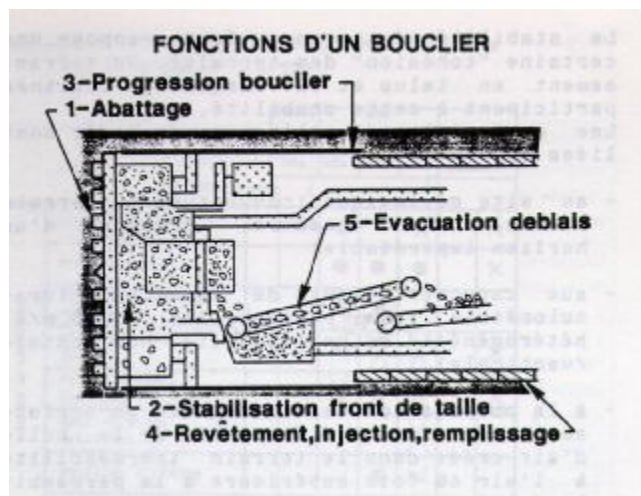


Fig. 11 : Les fonctions d'un bouclier

⁶ Dossier pilote des tunnels : Procédés de creusement et de soutènement, Centre d'études des tunnels (Ministère de l'équipement, des transports et du logement – Direction des routes), France

⁷ Ibid.

Techniques de construction de tunnels en milieu urbain

Pour des raisons de coût et de place (galerie très courte) notamment, on peut ne pas utiliser le tunnelier complet : seul le bouclier est alors utilisé. Dans cette configuration, l'évacuation des déblais est réalisée par des méthodes semblables à celles en tunnelier mais sans être exécutée par une même machine.

Pour des tunnels de section plus longue, on fait volontiers appel au tunnelier. Cependant, de manière générale, on utilise indifféremment le terme bouclier ou tunnelier pour parler de la partie chargée de l'excavation (le bouclier en l'occurrence).

Il existe différents type de boucliers. On les classe dans deux catégories selon les conditions dans lesquelles est réalisée l'excavation. On distingue les boucliers à front pressurisé et les boucliers non pressurisés :

- Le front est dit pressurisé lorsque le confinement du front de taille est assuré de manière mécanique ou par un fluide sous pression (on parle alors de front fermé);
- Le bouclier est non pressurisé lorsque aucune stabilisation du front de taille n'est mise en œuvre (on est à pression atmosphérique et on parle alors de front ouvert).

Evidemment, il existe plusieurs méthodes pour assurer la pressurisation du front de taille : il y a la méthode à air comprimé (bouclier à pression d'air), celle à bentonite (bouclier à pression de boue) et enfin celle à terre (bouclier à pression de terre). Deux types de boucliers sont décrits en annexe.

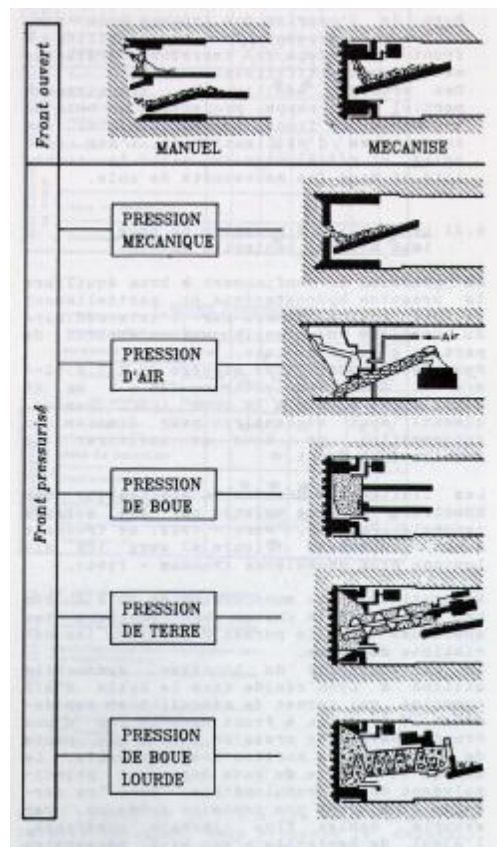


Fig. 12 : Les différents types de boucliers

4. Techniques particulières

Les techniques particulières regroupent des techniques d'appoint qui sont généralement utilisées pour rendre possible l'application des techniques « standard ». Les techniques décrites ci-après sont principalement des techniques de consolidation, provisoire ou définitive.

Les techniques les plus utilisées sont l'injection dans le sol (éventuellement le jet grouting) pour des raisons de consolidation, la congélation du terrain et diverses techniques de rabattement de la nappe phréatique (en présence d'eau). Une information plus détaillée de ces techniques se trouve en annexe. Il est aussi important de prendre en compte que chaque chantier est accompagné de son lot de techniques particulières (puisque chaque chantier est différent).

5. Conclusion

Les travaux à réaliser en agglomération posent aux ingénieurs et aux entrepreneurs des problèmes difficiles en raison des dimensions des ouvrages, de la limitation des emprises, des conditions de circulation pendant les travaux, de l'encombrement du sol, de la rigidité des tracés, de la qualité variable des terrains, souvent en présence de l'eau.

Les évolutions récentes de la technique, qu'il s'agisse de procédés d'exécution en tranchée, ou de la construction du tunnel à l'avancement, ont permis une rénovation des méthodes traditionnelles les plus anciennes et la mise au point de nouvelles méthodes dont certaines sont déjà devenues classiques. Les procédés de traitement des sols, les techniques spéciales utilisées en présence d'eau, le perfectionnement de dispositifs de soutènement des terrains, l'utilisation d'engins modernes d'extraction et de transport des déblais contribuent à une réduction des entraves à la circulation pendant les travaux, à un meilleur rendement et à une diminution de l'importance des tassements de terrain, ainsi que leurs répercussions en surface.

Ces résultats ne peuvent toutefois être acquis que si les procédés et les méthodes d'exécution sont adaptées aux données géologiques. Ceci implique une connaissance complète des terrains traversés et leur comportement au cours des travaux (particulièrement pour des tunnel à exécuter en souterrain).

Il est de surcroît indispensable pour la mise au point des méthodes, et surtout si elles présentent un caractère novateur, d'avoir des moyens de tester ces méthodes et de connaître leur efficacité ; d'où la nécessité de disposer de moyens de sondage afin de déceler, en temps opportun, l'annonce d'un phénomène nuisible.

Malgré les progrès réalisés, les procédés récents sont toujours perfectibles, et l'on peut espérer que les recherches se poursuivent pour une technique plus affinée lors des cas particulièrement difficiles.

Exemples d'application.

Dans le monde de l'ingénierie, rares sont les ouvrages identiques. Cette remarque est d'autant plus vraie dans le monde souterrain. En effet, en surface, il est toujours possible de construire des ouvrages identiques (cela se fait d'ailleurs couramment) car il est possible de rencontrer le même type de terrain en surface sur de grandes étendues. En souterrain par contre, il est rare de trouver deux localisations (identiques ou même très proches). Cela est dû principalement au nombre important de paramètres qui influencent dans le choix de la technique à utiliser : dans tel cas la nappe sera plus importante, dans tel autre cas les immeubles seront plus ou moins rapprochés ou auront des fondations plus ou moins profondes, dans d'autres cas encore le sol sera d'un type différent, les couches auront une épaisseur différente, etc.

Il est aussi à noter que la décision de la construction d'un ouvrage souterrain répond presque toujours à des nécessités d'ordre urbanistique alors que la construction de surface est plus « libre » ; en surface on construit presque partout, ce qui n'est pas le cas dans le sous-sol.

Ainsi, le choix de la méthode sera toujours dépendant de l'environnement qui est, comme expliqué plus haut, souvent unique. C'est ainsi que la structure souterraine et l'application des techniques nécessaires à sa construction sont uniques pour un ouvrage donné.

Dès lors il est plus judicieux de classer les techniques en fonction du type de terrain auquel elles s'appliquent plutôt que d'énumérer les cas d'application de telle ou telle technique. Cette remarque est une remarque d'ordre général et qui reste valable pour tous les domaines de l'ingénierie : en effet, l'ingénieur est chargé de trouver les techniques qui permettent de résoudre de manière optimale tel ou tel problème en fonction d'impératifs (et non de choisir le terrain sur lequel il voudrait appliquer telle ou telle technique).

Les techniques de construction ont été précédemment classées en fonction de leur mode d'application principal, c'est-à-dire à ciel ouvert ou en sous-sol. Ce classement est lié aux impératifs de surface que sont la densité du trafic urbain, l'esthétique du quartier ainsi que d'autres facteurs tels que la position des bâtiments voisins du futur ouvrage par rapport à celui-ci.

Globalement, on distingue différentes contraintes :

- la présence de la nappe phréatique ;
- la nécessité de maintenir un trafic global ou réduit (tramways) en surface ;
- l'obligation de travailler en souterrain (dans les quartiers très fréquentés) ;
- la proximité d'immeubles à fondations profondes ;
- la présence d'ouvrages souterrains ;
- l'exiguïté des lieux ;
- la faible cohérence du terrain (terrain meuble) ;
- la faible portance du terrain ;
- la présence de charges importantes à soutenir ;
- etc.

Techniques de construction de tunnels en milieu urbain

La liste peut être très longue. Mais ce sont les principaux cas rencontrés.

Une première approche consiste à exécuter des injections dans le sol (éventuellement par la méthode du jet grouting) et à opérer un rabattement de la nappe. Il est ainsi possible de retomber sur des cas plus « standards ».

Ensuite, il reste à choisir la méthode la plus efficace en regard des contraintes et aussi du budget alloué au projet. Il faut un compromis entre coût et efficacité dans la conception et l'utilisation des ouvrages.

Conclusion

Depuis le début du siècle précédent, l'aventure souterraine n'a cessé de prendre de l'ampleur à tel point qu'il n'est, aujourd'hui, plus possible de gérer une grande ville sans utiliser des souterrains.

Le problème de la circulation dans les agglomérations urbaines a aujourd'hui atteint un degré tel qu'il n'est plus envisageable d'assurer correctement le développement d'une métropole sans faire usage de facilités souterraines, en particulier pour les transports en commun.

En effet, toute grande ville possède un réseau de transport en commun assez développé. Cependant, l'efficacité de ce moyen de transport n'est optimale que si celui-ci peut circuler en site propre. Le souterrain est une excellente solution pour permettre aux citoyens de se déplacer rapidement dans leur ville, surtout en heure de pointe. Le métro montre bien ce que le souterrain a à offrir.

Malgré cela, des efforts doivent encore être accomplis, tant de la part des ingénieurs que des autorités, pour intégrer pleinement le souterrain à la ville sans encombrer celle-ci (notamment pendant les travaux). Le but recherché est de faire du souterrain une partie de celle-ci.

Au début de « l'ère souterraine », les problèmes rencontrés étaient plutôt d'ordre technique. Cependant, même si ces problèmes sont aujourd'hui dépassés, la construction souterraine n'en est pas plus admise qu'avant. En effet, il faut de plus en plus penser à l'aspect social de la chose. A tel point que maints projets n'ont pu aboutir en raison d'une opinion publique défavorable.

Aujourd'hui, l'ingénieur ne peut plus se contenter uniquement de relever un défi technique, il doit aussi intégrer la dimension humaine. Ainsi les principales inquiétudes restent de concilier les dimensions de l'immédiat et du long terme, ainsi que l'intérêt général et celui des riverains.

L'aspect social a pris une ampleur considérable, de sorte qu'il n'est plus permis de le négliger. C'est pour cette raison que l'ingénieur se doit de concevoir des méthodes de moins en moins nuisibles au citoyen et à l'environnement, et cela à moindre coût. De plus, l'intégration des entités souterraines nécessite une certaine harmonie. Ainsi, le souterrain revêt aussi une dimension architecturale. Car faire usage du souterrain ne doit pas être ressenti comme une corvée. Transiter en souterrain doit être le plus agréable possible.

Index des figures

Fig. 1 : Coupe d'une intégration souterraine en milieu urbain	7
Fig. 2 : Installation d'ouvrages nucléaires.....	8
Fig. 3 : La variété des installations souterraines.....	9
Fig. 4 : Tunnel d'autoroute formant une traversée verte	9
Fig. 5 : Tunnel routier urbain	10
Fig. 6 : Coupe d'un ouvrage souterrain	12
Fig. 7 : La méthode « bruxelloise ».....	21
Fig. 8 : La méthode des fouilles blindées	23
Fig. 9 : La méthode des parois moulées dans le sol	25
Fig. 10 : L'agencement des pieux sécants	28
Fig. 11 : Les fonctions d'un bouclier.....	32
Fig. 12 : Les différents types de boucliers.....	33
Fig. 13 : La consolidation par jet grouting	44

Bibliographie

➤ Problématique du transport urbain

J.P. GODART, « Pourquoi aller en souterrain », Tunnels et ouvrages souterrains, n° 170, Mars/Avril 2002, pp. 56-63

C. LAPIERRE, Christophe.Lapierre@univ-savoie.fr, « Les travaux de construction de tunnels en milieu urbain », <http://www.univ-savoie.fr/mse/ressources/rapports/rapports98/chris/Tunnels.htm>, 1998

S. BARLES, *L'urbanisme souterrain*, Presses Universitaires de France, Paris, 1995

P. DUFFAUT, « Insertion des ouvrages souterrains dans un paysage géologique », <http://www.subsurface.org>

M.LABBE, « Du proche au lointain », <http://www.subsurface.org>

➤ Techniques d'exécution

P. HUERGO, « Constructions souterraines : éléments de conception et calcul », 4e éd., Presses Universitaires de Bruxelles, 2002

A. LOMBART, « Le métro de Bruxelles, conception générale et procédés d'exécution », MEMOIRES C.E.R.E.S (Nouvelle Série), n° 29, Décembre 1969

M. WOITCHIK, « Le métro de Bruxelles, procédés d'exécution des ouvrages de Génie Civil », V^e *Congrès International des Techniques et de l'Urbanisme Souterrain*, Octobre 1969

A. LOMBARD, « Thème 2 : Synthèse des communications », *Colloque National : Géologie et géotechniques urbaines*, Bruxelles, Octobre 1975

« Dossier pilote des tunnels : Section 4, procédés de creusement et de soutènement », Ministère de l'équipement, des transports et du logement – Direction des routes, Bron (France), Juillet 1998

« Spécialités », www.soletanche-bachy.com

Note technique du Service Spécial d'Etudes de la S.T.I.B : « Station Louise, Construction et parachèvement »

Brochure : « Méthodes de construction souterraines », *Le pré-métro à Antwerpen*, MIVA

Nous tenons également à remercier M. Neulant (Administration des Equipements et Déplacements) pour l'interview qu'il nous a accordé et pour les explications complémentaires qu'il nous a fourni ainsi que notre tuteur, M. Provost, qui était présent pour nous conseiller pendant toute la durée du projet.

Annexe

1.	Boucliers particuliers.....	40
1.1	Méthode du bouclier à front ouvert.....	40
1.2	Le bouclier à bentonite.....	41
2.	Techniques particulières.....	43
2.1	Injections.....	43
2.2	Jet grouting.....	43
2.3	Congélation du terrain.....	45
2.4	Techniques utilisées en présence d'eau.....	46
3.	Quelques exemples d'applications.....	47
3.1	Chantier Bériot-Madou.....	47
3.2	Tunnels sous la rue de la loi.....	47
3.3	Chantier Arts-Marnix-Toison d'Or.....	47
3.4	Chantier Arenberg-Ecuyer.....	48
3.5	Chantier station Monnaie.....	48
3.6	Chantier rue de la Loi, passage sous le chemin de fer.....	48
3.7	Chantier Maelbeek, passage de la vallée.....	48
3.8	Chantier station Monnaie : Galeries Anspach.....	49
3.9	Chantier sous le Parc Royal.....	49
3.10	Chantier rue des Fripiers.....	49
3.11	Chantier boulevard Anspach.....	49

1. Boucliers particuliers

1.1 Méthode du bouclier à front ouvert⁸

a. Description du procédé

Le bouclier consiste en un cylindre en tôle d'acier au gabarit du tunnel tubulaire à construire. Il présente une légère conicité vers l'arrière pour faciliter l'avancement.

Dans le cas de la double voie, le diamètre du cylindre est d'environ 10 m et sa longueur de 5 m. À l'avant, le cylindre est compartimenté en trois plates-formes d'abattage. À l'arrière, un appareil érecteur à commande hydraulique est destiné à mettre les voussoirs en place.

L'engin est complété par des appareils d'injection de gravette, ainsi que des vérins de propulsion prenant appui sur le tronçon de tunnel exécuté.

Le démarrage du bouclier se fait dans une chambre en béton armé dont la paroi arrière est conditionnée pour reprendre la poussée des vérins via un certain nombre d'anneaux posés provisoirement.

L'abattage au front de taille dans le cas du bouclier employé à Bruxelles a été manuel mais peut éventuellement être mécanique.

⁸ Source : « Le métro de Bruxelles, procédés d'exécution des ouvrages de Génie Civil »

Dès que l'avancement atteint l'épaisseur d'un anneau (1 m environ), les voussoirs en béton sont mis en place. La largeur des voussoirs varie de 94 cm à 1 m entre les points diamétralement opposés, de sorte que par rotation d'un anneau par rapport au précédent, on peut faire décrire à l'ouvrage une ligne allant de l'alignement à une courbe de 180 m de rayon en plan et en niveau. Tous les voussoirs sont boulonnés entre eux.

Remarque :

Lors de la pose de l'anneau, les poussées du terrain sont reprises par la « jupe » du tunnel. Après passage de la jupe, il existe un vide de l'ordre de 20 cm correspondant à un volume périphérique de 6 m^3 par mètre courant de tunnel. Ce vide est comblé au fur et à mesure de l'avancement, par injection de gravettes et de sable entre le terrain et les anneaux.

b. Avantages

- Le procédé de construction au bouclier permet d'éviter les perturbations dans la circulation générale en surface. Il se recommande dans les cas d'artères dont le trafic est voisin de la saturation.

c. Inconvénients

- L'exécution exige un investissement important, tant en matériels qu'en frais d'installation ; cet investissement ne peut se justifier que pour un tronçon de tunnel suffisamment long. Or, l'application du procédé est fortement tributaire de la nature du terrain. Celui-ci doit en effet présenter les qualités suivantes :
 - être cohérent, pour éviter l'éboulement du front de taille, qui entraîne une décompression au sol en avant du bouclier ou la chute immédiate d'une couche annulaire de terrain autour du tunnel, contrariant ainsi les injections. Il y a lieu de tenir compte du fait que la cohésion du sol a tendance à être détruite par les mouvements du bouclier,
 - être exempt de conglomérats de fortes dimensions, dont l'enlèvement provoque l'affaissement des couches supérieures,
 - être exempt de couches fluentes qui, selon leur position par rapport au front de taille, provoquent soit l'affaissement du terrain sus-jacent au, soit l'enfoncement du bouclier et du tunnel.
- Il n'est possible de pénétrer dans la nappe phréatique que pour autant qu'un refoulement de l'eau par mise sous pression d'air soit possible.
- La profondeur sous la surface du terrain doit être suffisante (au moins 8 à 10 m).
- En cas de passage à proximité d'immeubles à fondations peu profondes, il est prudent de stabiliser le sol par injections. Pour obtenir les effets désirés, il faut que le terrain soit homogène et possède un pouvoir suffisant d'imprégnation (consistance faiblement argileuse).

1.2 Le bouclier à bentonite⁹

a. Description

⁹ Source : « Le pré-métro à Antwerpen : Méthodes de construction souterraines »

Annexe

Il s'agit d'une machine à creuser se présentant sous la forme d'un cylindre horizontal en acier de 6,5 m de diamètre et de 6,5 m de long. Le bouclier complet pèse 210 tonnes.

La partie avant, qui a une longueur d'environ 2m, est isolée hermétiquement du compartiment arrière. Elle est à son tour divisée en deux volumes par une cloison.

Le volume situé à l'avant de cette cloison est entièrement rempli de bentonite. Elle est maintenue sous pression par un coussin d'air situé derrière cette cloison. La bentonite remplit plusieurs fonctions : non seulement elle soutient le front de taille en maintenant en équilibre la poussée des terres et la pression d'eau, mais elle améliore la structure du sol en élevant sa cohésion. Cette technique est bien connue dans l'industrie du pétrole.

Pour maintenir constant le niveau de liquide sous le coussin d'air, on règle le débit de la pompe. Ce système permet de rendre la pression au front de taille indépendante des variations de volume. Un dispositif de coupe constitué de sept bras disposés en étoile et équipés de ciseaux, détache le sol au front de taille. Il peut tourner dans les deux sens à vitesse continue réglable de zéro à deux tours par minute. La boue consiste en un mélange de terre et de bentonite.

Elle est pompée à travers un tamis et envoyée à une installation de dessablage où une partie de la bentonite est et récupérée au moyen d'hydrocyclones.

La progression du bouclier s'effectue au moyen de vérins prenant appui sur la partie du tunnel déjà réalisé. Ces vérins peuvent être alimentés par groupes et travailler sous différentes pressions d'huile. La direction à suivre indiqué au conducteur du bouclier par un rayon laser sur un diagramme. Une unité de calcul compare constamment le trajet effectif au trajet théorique. On évite ainsi les grosses corrections de la direction qui exigent toujours la mise en oeuvre de poussées considérables.

Le diamètre du manteau du bouclier est supérieur au diamètre extérieur du tunnel, dont le revêtement est construit dans la partie arrière du manteau. Un joint spécial se trouvant entre le bord postérieur du manteau du bouclier et le revêtement du tunnel prévient les infiltrations d'eau et la pénétration de terre. Ceci permet de creuser sans mettre sous pression la partie du tunnel déjà réalisée. Le revêtement du tunnel est formé d'anneaux de béton préfabriqués. Chaque panneau comporte sept segments et une clé de voûte.

Ces segments sont placés à l'aide d'un érecteur hydraulique qui permet de les positionner avec toute la précision requise. L'équipement du bouclier comprend également des moteurs, des pompes, des vannes, une bande utilisée pour amener les voussoirs jusqu'à l'érecteur, un sas donnant accès à l'avant du bouclier etc.

Immédiatement après le placement d'un anneau, tandis que le bouclier effectue une nouvelle progression, il est procédé à une injection de mortier derrière le revêtement du tunnel afin de prévenir les tassements.

b. Avantages

- Le rendement du bouclier est très élevé : avec une répartition du travail en trois équipes, on peut atteindre des prestations de pointe de 23 m par jour et 100 m par semaine.
- Outre ces avantages techniques, il faut mentionner un point très important. Le personnel peut travailler sous pression atmosphérique normale.
- Ceci prévient le risque redoutable du « mal du caisson » et évite les longs séjours dans le sas, avec toutes leurs conséquences, telles que bas rendement, les prix élevés etc.

- L'efficacité de cette méthode est démontrée par le fait que les tassements imputables au bouclier inférieur sont vraiment peu importants, leur amplitude maximale se situant entre 5 et 8 mm, ce qui ne représente aucun danger pour les conduites et les bâtiments.

c. Inconvénients

- L'appareillage nécessaire pour maintenir et traiter la bentonite encombre le chantier.
- Comme son homologue à front ouvert, le bouclier à bentonite requiert un investissement initial important (ce qui le prédispose qu'à des tunnels assez longs).

2. Techniques particulières

Les techniques particulières regroupent des techniques d'appoint qui sont généralement utilisées pour rendre possible l'application des techniques « standards ». Les techniques décrites ci-après sont principalement des techniques de consolidation, provisoire ou définitive.

2.1 Injections¹⁰

Ce système, employé depuis des décennies pour le traitement des terrains rocheux, est appliqué depuis peu aux terrains meubles.

Le procédé consiste à injecter, par des forages, des coulis appropriés qui, après durcissement et polymérisation, consolident et étanchent le terrain.

Il y a trois types de coulis utilisables suivant la perméabilité du terrain :

- les coulis à base de ciment, sables et argiles pour les terrains très perméables, tels que les roches fissurées, les graviers et les gros sable ;
- les coulis à base de silicate de soude et réactif, appelé gel de silice, pour des terrains de perméabilité moyenne ;
- les coulis à base de résine qui ont une viscosité initiale très faible et permettent d'injecter des sables argiles des sables très fins et compacts.

La nature du coulis et la disposition des forages dépendent de la répartition granulométrique, de la perméabilité horizontale et verticale, de l'importance de la nappe aquifère, etc.

2.2 Jet grouting¹¹

Le procédé du jet grouting s'applique aux terrains difficilement injectables par les procédés classiques.

Il correspond à un traitement de sol dans la masse par mise en oeuvre sous haute pression d'un jet de coulis à base de ciment réalisant sur place un mélange sol-ciment.

Le terrain est déstructuré par la pression du jet et devient un mélange sol-coulis aux caractéristiques mécaniques et dimensionnelles recherchées.

Le jet grouting fait appel, séparément ou en combinaison, à trois phénomènes physiques :

- déstructuration du terrain par un jet à très grande vitesse,

¹⁰ Source : « Colloque de géologie et géotechnique urbaine : Synthèse des communications »

¹¹ Source : www.soletanche-bachy.com

- extraction d'une partie du terrain jusqu'à la surface par les fluides de jetting,
- incorporation d'un liant apporté par le coulis.

Le traitement se déroule généralement ainsi :

- réalisation d'un forage de petit diamètre (100 à 200 mm) sur la hauteur à traiter ;
- dans ce forage, mise en vitesse d'un jet de fluide envoyé par une pompe à haute pression (plusieurs dizaines de MPa) à travers une ou plusieurs buses de petit diamètre (1 à 10 mm) ;
- remontée lente des tiges, avec mise en rotation pour former une colonne de béton de sol.

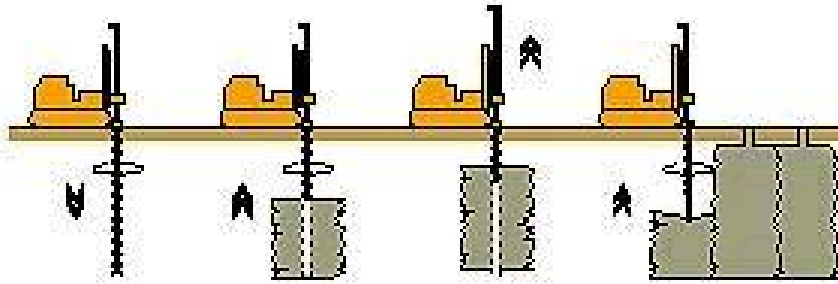


Fig. 13 : La consolidation par jet grouting

Il existe trois méthodes de Jet Grouting :

➤ Jet simple

Dans ce procédé, le fluide du jet est le coulis lui-même, qui assure les trois fonctions de déstructuration, extraction et incorporation.

Une partie importante de l'énergie cinétique du jet est dissipée par frottement dans le terrain mis en suspension et les rejets formés deviennent parfois trop visqueux pour remonter librement jusqu'en tête de forage.

➤ Jet double

Si on protège le jet de coulis à très grande vitesse par un jet d'air annulaire, le rayon d'action du jet en face du même terrain se trouve considérablement augmenté par le cône d'air enveloppant.

Dans le procédé jet double, le rôle de l'air est d'améliorer les possibilités d'extraction du terrain en place par phénomène d'air lift.

➤ Jet triple

Dans le jet triple, les fonctions déstructuration et extraction du terrain sont obtenues par un jet double d'eau et d'air séparément de la fonction d'incorporation du liant assurée par un jet de coulis envoyé simultanément à basse pression (quelques MPa) par une buse inférieure.

La pompe et le circuit haute pression utilisés en jet triple ne supportent que de l'eau, avec en contre partie la nécessité d'une pompe supplémentaire à basse pression pour le coulis et d'une ligne d'outils à triple tube.

2.3 Congélation du terrain¹²

La congélation des terrains aquifères instables est un procédé ancien, à caractère provisoire, employé pour le creusement de fouilles, de puits ou de galeries, qui permet également le « sauvetage » d'ouvrages à la suite d'incidents (renard, débouillage). Elle rend le sol étanche et résistant.

Le schéma de principe du procédé est le suivant:

- exécution de sondages encaissant l'ouvrage à construire, sur la hauteur des couches aquifères, espacement des forages voisin de 1 m,
- mise en place de tubes réfrigérants (sondes) : fermés à leur base, ils contiennent des tubes plus petits ouverts à leur partie inférieure,
- mise en circulation d'un liquide à basse température arrivant par le tube intérieur et remontant dans l'espace annulaire en empruntant la chaleur au terrain encaissant,
- congélation progressive des couches autour des sondes, obtention d'une paroi de terrain gelé dur et imperméable,
- maintien de cette paroi durant les travaux de génie civil.

Il existe plusieurs méthodes:

- la méthode ouverte, à l'azote liquide ;
- la méthode fermée, à la saumure ;
- la méthode dite combinée.

➤ La méthode ouverte

Le liquide réfrigérant est l'azote liquide. Il est transporté au chantier par des camions-citernes spéciaux où il est maintenu à une température de - 196°C sous une pression de 5 bars environ.

Cette pression sert à assurer la circulation de l'azote dans les sondes. A l'aval de la dernière sonde une vanne libère l'azote devenu gazeux dans l'atmosphère, à une température de -60°C environ. Le rejet dans l'atmosphère de l'azote gazeux n'est pas une nuisance, même en ville. Le rendement cryogénique est de 39 kcal/l pour la chaleur spécifique de vaporisation et de 27 kcal/l pour le passage de -196°C à -60°C. La mise en froid du terrain encaissant est rapide: 2 à 3 jours. Ensuite, on assure simplement l'entretien. La résistance du sol ainsi congelé est généralement élevée: écrasement sous 30 à 50 bars en compression simple.

L'inconvénient principal est le coût élevé de la fourniture en azote liquide. La méthode est bien adaptée aux chantiers de courte durée.

➤ La méthode fermée

Un circuit frigorifique primaire, au moyen de compresseurs et de condensateurs, liquéfie le fluide. En se vaporisant, ce fluide assure le refroidissement du liquide réfrigérant qui circule dans les sondes, en circuit fermé. Le fluide primaire peut être l'ammoniaque ou le fréon. Le liquide réfrigérant est généralement une saumure ayant une température d'utilisation variable entre -25 et - 30°C.

Dans ce cas, les sondes ont un diamètre plus grand qu'avec l'azote. Cependant, la mise en froid demande souvent 3 à 4 semaines.

¹² Source : www.soletanche-bachy.com

➤ La méthode combinée

Elle consiste à rendre complémentaires les méthodes précédentes, en utilisant les mêmes tubes congélateurs. On combine ainsi une mise en froid rapide (azote) et un entretien économique (saumure).

Souvent, il est nécessaire d'assurer un traitement préalable du terrain par injection. Il s'agit de faire un traitement léger qui a pour objet de fermer les vides ou les circulations importantes, et de consolider un peu le sol. L'avantage est double : économie de frigories (moins de pertes) et sécurité accrue.

2.4 Techniques utilisées en présence d'eau¹³

2.4.1 **Rabattement de la nappe**

Pour pouvoir abaisser le niveau de la nappe en dessous du souterrain à construire, il faut que le sol soit suffisamment perméable. En outre, pour empêcher le phénomène du « renard » (affouillements), il doit exister, à une profondeur raisonnable sous le souterrain, une couche imperméable dans laquelle les parois latérales viennent se ficher. Cette couche peut éventuellement être réalisée artificiellement par des injections. Dans certains cas, on peut même utiliser le procédé du béton immergé au fond de la fouille remplie d'eau.

Les méthodes de rabattement varient avec le coefficient de perméabilité du terrain :

- des puits de grand diamètre distants de quelques mètres dans les terrains à forte perméabilité,
- des pointes filtrantes de faible diamètre distant de 1 m, essorant le terrain par aspiration dans les terrains à faible perméabilité (sable fin, argiles),
- des puits filtrants à pompe immergée distants de quelques mètres dans les terrains de perméabilité intermédiaire (sables moyens)

D'autres dispositions peuvent également être prises pour abaisser le niveau de la nappe, à titre provisoire ou définitif.

2.4.2 **Murs drainants**

Dans le cas de terrains de faible perméabilité (moins de $5 \cdot 10^{-6}$ m/sec), il arrive que le rabattement de la nappe par un grand nombre de puits filtrants soit insuffisant pour assécher le terrain. On a alors recours à une technique qui consiste à réaliser un mur drainant à l'intérieur du sol.

Ce procédé nécessite les opérations suivantes :

- 1) Forage de puits jusqu'au niveau à assécher ;
- 2) Descente de tubulures en forme de T dans les puits de rang impair et cela jusqu'au niveau supérieur de la nappe (les branches des tubulures sont dirigées vers les puits voisins) ;
- 3) Injection d'eau dans la tubulure et aspiration dans les deux puits voisins (chasse le terrain entre les puits et le ramène à la surface) ;
- 4) Dès que la communication entre les puits est établie, tout en maintenant l'injection d'eau et l'aspiration du terrain, on abaisse lentement la tubulure jusqu'au niveau à assécher (dans cette configuration, les parois sont maintenues par la pression de l'eau) ;

¹³ Source : « Colloque de géologie et géotechnique urbaine : Synthèse des communications »

- 5) Lorsque plus aucune terre n'est aspirée, on ajoute du gravier fin à l'eau injectée et l'on remonte lentement la tubulure jusqu'au niveau supérieur ;
- 6) Un panneau drainant est ainsi réalisé ; il est procédé de la même façon au départ des puits suivants, de manière à constituer un mur continu.

Le mur drainant ainsi établi met le chantier à l'abri de toute pénétration d'eau.

3. Quelques exemples d'applications¹⁴

Ces exemples d'applications proviennent principalement de Bruxelles.

3.1 Chantier Bériot-Madou

Vu la nécessité de maintenir le tramway en circulation, on a fait usage du procédé par palplanches métalliques.

« Le procédé a été utilisé pour la construction d'un tronçon de métro de la Petite Ceinture de Bruxelles, entre la rue Bériot et la place Madou. Dans cette zone, les ouvrages devaient être construits sous des voies de tramway qui devaient être maintenues en service, même pendant les week-end.

Les chantiers étant relativement dégagés quant à leur environnement, les risques d'avaries aux immeubles étaient minimes, et la manutention des palplanches était assez aisée. »

3.2 Tunnels sous la rue de la loi

De par la nécessité de maintenir la circulation générale, on a fait usage du procédé des parois en fouilles blindées en tranchée couverte.

« Afin de respecter les impératifs de circulation, la dalle de voirie a été réalisée en trois tronçons parallèles. Afin de maintenir en tout temps quatre bandes de circulation, il était indispensable de n'occuper qu'une bande étroite de l'artère.

Les piédroits ont été réalisés en fouilles blindées ; ils supportent un tiers de la dalle de toiture. Le tiers central a été coulé dans le sol et les trois éléments de toiture ont été solidarités par câble de précontraintes à partir du trottoir Nord.»

3.3 Chantier Arts-Marnix-Toison d'Or

De par la nécessité de maintenir le tramway en circulation et l'exiguïté des lieux, on a choisi d'utiliser la méthode en fouilles blindées avec soutien des voies de tramway par des poutrelles.

« Le tunnel a dû être établi sous les voies des tramways. Par suite de la nécessité de maintenir le trafic des tramways et de l'exiguïté des lieux, les piédroits ont été exécutés en fouilles blindés. Certains murs ont ainsi été construits sous les voies en exploitation.

En cours d'exécution de la dalle de toiture, les voies ont été soutenues par des poutrelles reposant sur des poutres en béton coulé sur place et reposant sur les piédroits. »

¹⁴ Source : « Le métro de Bruxelles, procédés d'exécution des ouvrages de Génie Civil »

3.4 Chantier Arenberg-Ecuyer

Du fait de la présence de la nappe phréatique, de la proximité des immeubles et de l'exiguïté des lieux, l'on a simplement opté pour la méthode des parois moulées.

« Ces artères sont assez étroites et fort sinueuses. Pour arriver à une implantation de tunnels permettant de donner aux voies des rayons de courbure convenables, il était nécessaire de construire les parois du tunnel très près des façades de certains immeubles (distance d'environ 30 cm).

A partir d'un tiers de sa longueur, le tunnel pénètre dans la nappe phréatique et y baigne complètement vers le bas de la ville. »

3.5 Chantier station Monnaie

De par la présence d'autres ouvrages souterrains, la faible portance du sol et la présence d'eau, l'on a opté pour la méthode des parois moulées avec un fonçage de colonnes.

« Compte tenu de la profondeur de l'ouvrage métro et de celle du complexe Poste, ainsi que des divers problèmes de fondations posés par les caractéristiques particulières du sol et son état hydrologique, une étude poussée des procédés d'exécution a abouti à la conclusion qu'il fallait construire ensemble les deux ouvrages. Les chantiers ont été entourés d'une enceinte étanche en murs emboués (sauf du côté des galeries Anspach), à l'intérieur de laquelle les fouilles ont été asséchées sans perturber la nappe phréatique extérieure.

Au cours des terrassements, les murs d'enceinte ont été étançonnés grâce à un système de vérinage prenant appui sur les plateaux de sous-sol. Ces plateaux étaient supportés par les colonnes provisoires foncées dans le terrain »

3.6 Chantier rue de la Loi, passage sous le chemin de fer

Pour des raisons évidentes de stabilité (nécessité de soutenir des nouveaux ouvrages, nécessité de reprendre la poussée des terres), on a fait appel à la méthode des pieux sécants.

« Le tunnel métro passe sous le chemin de fer, au-dessus duquel un passage supérieur est livré à la circulation routière. Des pieux ont été forés à travers les culées en maçonnerie du pont dans le but de :

- soutenir les voies de chemin de fer ;
- soutenir les nouveaux ouvrages souterrains et la superstructure de la rue de la Loi ;
- reprendre la poussée des terres sur les culées du passage supérieur en vue de la démolition de la voûte et des pieddroits. »

3.7 Chantier Maelbeek, passage de la vallée

La présence de charges importantes et la faible portance du terrain font que l'on a laissé reposer la structure sur des pieux sécants placés dans du sable dur et on a construit les parois en fouilles blindées.

« Par suite de l'extrême médiocrité du terrain au point de vue de son pouvoir portant (remblais légers surmontant des alluvions peu consistantes et de la tourbe) et des charges importantes imposées par les ouvrages (métro plus trois niveaux de parkings), des pieux de 128 cm de diamètre et ont été forés de manière à prendre appui sur le sable dur du fond de la vallée. Les parois extérieures des ouvrages, exécutés en fouilles blindées, reposent sur les pieux. »

3.8 Chantier station Monnaie : Galeries Anspach

Pour soutenir des charges importantes et parce que l'on a des fondations peu profondes, on a fait appel à la méthode des pieux sécants.

« Les galeries Anspach, situées en bordure immédiate de la station, ont des fondations peu profondes (environ 4,50 m) et transmettent des pressions importantes au sol. D'autre part, le radier la station se trouve à plus ou moins 13,50 m. Le creusement d'un rideau de pieux sécants le long des magasins offriraient la meilleure sécurité d'exécution. »

3.9 Chantier sous le Parc Royal

De par l'obligation de travailler en souterrain, on a ici fait appel au creusement par bouclier.

« Le bouclier a été utilisé au passage sous le Parc Royal et une partie de la rue de la Loi jusqu'au boulevard du Régent. À cet endroit la nature sablonneuse du sol, la faible pénétration dans la nappe phréatique et l'absence d'immeubles trop rapprochés ont permis de réaliser un chantier à caractère expérimental en vue d'entreprises futures.

C'est pourquoi une étude spéciale du comportement du terrain et du tunnel en construction a été menée de pair, grâce à des mesures de contraintes, déformations et perturbations subies par le terrain en profondeur et en surface.

La campagne de mesures a ainsi démontré que la décompression du sol se manifestait tout autour du bouclier et que les tassements consécutifs se propageaient à la surface en s'épanouissant suivant un angle voisin de 45° dont le sommet est pointé sur l'axe du tunnel.

Ainsi a-t-on expérimenté plusieurs méthodes de stabilisation du sol par des injections. A ce sujet il est à retenir que le meilleur résultat a été obtenu par injection à forte pression d'une solution de 40 % du silicate de soude et de 60% d'acétate d'éthyle au niveau des reins du tunnel, dans le but de limiter les glissements latéraux vers l'axe de l'ouvrage. »

3.10 Chantier rue des Fripiers

La présence d'eau, de canalisations, et l'impossibilité d'interrompre la circulation on conduit à l'utilisation de la technique de congélation du sol.

« À cet endroit, l'ouvrage baigne complètement dans la nappe phréatique tandis que le sol est constitué surtout de sable bouillant, d'alluvions et de lentilles de tourbe. D'autre part, sous ce carrefour, un réseau très dense câbles et de canalisations diverses rend très difficile l'emploi d'une technique d'exécution en tranchée. En outre, il est impossible de détourner la circulation sans perturber gravement le trafic du centre ville. »

3.11 Chantier boulevard Anspach

La présence d'égouts, l'impossibilité d'interrompre la circulation et la nécessité de soutenir des ouvrages préexistants ont amené à la congélation du sol.

Annexe

« Le tunnel passe sous les anciens pertuis en maçonnerie de la Senne qui doivent être aménagés ultérieurement pour recevoir l'axe Nord-Sud du métro. Cet ouvrage comporte également deux grands collecteurs d'égouts, et est situé sous l'artère centrale de la ville, où une modification des circulations provoquerait de graves perturbations.

Grâce à la constitution de murs de glace pénétrant jusqu'au sol étanche, il a été possible :

- de soutenir les ouvrages existants ;
- de créer une enceinte étanche ;
- d'assurer le soulèvement des terres extérieures ;
- de réaliser sous les pertuis de la Senne un support en poutrelles Préflex™, permettant le passage du tunnel métro. »