

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



N° Ref :.....

Centre Universitaire de Mila

Institut des Sciences et de Technologie

Département de sciences et Technique

Projet de Fin d'Etude préparé En vue de l'obtention du diplôme
LICENCE ACADEMIQUE
en Hydraulique
Spécialité : Sciences Hydrauliques

Thème

La construction, Classification, équipements et Sécurité dans le tunnel

Préparé par :

- Abderrezzak ayoub
- Bouabibssa rabah
- Benatmane walid
- Nouioua noureddine

Dirigé par :

- Mr. Guettiche Abdelhak

Année universitaire: 2013/2014

Remerciements

Après avoir terminé ce mémoire de fin d'étude, nous Réserveons ces lignes

Pour exprimer nos remerciements les plus sincères à notre dieu

Tout puissant de nous avoir donné la santé et la patience pour terminer

Ce travail Nous remercions tout d'abord

ALLAH

Nous tenons à exprimer nos remerciements avec un grand plaisir

Et un grand respect à notre encadreur Mr. Guettiche Abdelhak

Ses conseils, Sa disponibilité et ses encouragements qui nous ont

Permis de réaliser ce travail dans les meilleures conditions.

Nous adressons aussi nos reconnaissances à tous les professeurs qui depuis

Quelques années leurs conseils et leurs connaissances qui nous ont bien servis.

Nous voudrions aussi exprimer notre gratitude envers tous ceux qui nous ont accordé.

Leurs soutien, tant par leurs gentillesse que par leurs dévouement.

Nous ne pouvons nommer ici tout les personnes qui de près ou de loin qui nous ont aidé.

Enfin nous tenons à dire combien le soutien quotidien de notre famille a été Important tout au long de ces quelques années, nous leur dois beaucoup.

Ayoub, Rabah
Walid & Nouredine

Sommaire

Introduction général	1
CHAPITRE I: Rappels sur les tunnels	3
I.1 Définitions	4
I. 2.Historique de tunnel	4
I .3 Classification des tunnels	5
A. Tunnels ferroviaires.....	5
A.1 Section transversale.....	5
A.2 Profil en long et tracé.....	6
B. Tunnels routiers.....	6
B.1 Section transversale.....	6
B.2 Profil en long et tracé.....	7
C. Galeries hydrauliques.....	7
C.1. Section transversale.....	7
C.2. Profil en long et tracé.....	8
D. Collecteurs d’assainissement.....	8
I .4 Technique de construction	9
I .4.1 les méthodes de creusement	9
A. Processus de choix	9
A.1-Première phase.....	9
A.2-Deuxième phase.	9
A.3-Troisième phase	10
B Méthodes de creusement	10
B.1 -Creusement en pleine section.	10

SOMMAIRE

B.2-Le creusement en demi-section	11
B.3-Le creusement en section divisée	11
B.4-Creusement à l'explosif	12
B.4-1-Cycle de creusement à l'explosif	13
I.4.2 exécutés des tunnels	14
I.4.2.1 Les tunnels exécutés en tranchée couverte	14
I.4.2.2 Les tunnels exécutés en souterrain	17
a) Méthodes d'exécution des tunnels en terrains durs ou rocheux	17
b) Méthodes d'exécution des tunnels en terrain meuble	18
c) Méthodes classiques.....	19
I.4.3. Amélioration des méthodes.....	19
a) Amélioration des caractéristiques des terrains soit en consolidant.....	19
b) Amélioration des procédés.....	20
I.4.4 Le tunnelier	20
I.4.5 Principes généraux d'étanchement	22
I.4.6 Revêtement	23
a. Revêtement provisoire	25
b. Revêtement définitif	25
I.4.7 Béton	25
a) Qualités essentielles d'un béton en souterrain	25
b) Injection de collage	26
I.5 Sécurité dans le tunnel	27
A. Une organisation dirigée au Sommet.....	28
B. Formation plus de sécurité	29
C. Issues de secours	29

SOMMAIRE

I.6 Analyse et classification des têtes de tunnel	30
Les Points d'analyse et classification	30
A- La tête de tunnel signifie le tunnel	32
A1 expression de la traversée.....	32
A2 expression des techniques.....	34
B - La tête exprime un statut particulier du tunnel	36
B1 tunnel frontalier.....	36
B2 entrée de ville.....	36
B3 passage d'un site a un autre.....	37
B4 Expression d'un parcours.....	38
C-Relation entre la tête du tunnel et des environnements spécifiques	39
C1 L'intégration au milieu urbain	39
C2 intégration a un milieu naturel	40
I.7 Les tunnels les plus connus dans le monde entier	41
I.7.1 Le tunnel sous la manche	42
I.7.2 Le tunnel du Mont-Blanc	42
I.7.3 Le tunnel de Lærdal	43
CHAPITRE 2 : équipements généraux des tunnels	44
II.1 Assainissement en tunnel	45
II.2 Alimentation électrique	45
II.3 Eclairage	46
II.4 Ventilation-désenfumage	48
a. Ventilation.....	48
a.1 Ventilateurs.....	49

SOMMAIRE

a.2 Avantages de l'accélérateur.....	49
b. Désenfumage.....	50
II.5 Autre équipements.....	50
CHAPITRE3 : les tunnels dans un milieu urbain.....	53
Introduction	54
III.1 Des origines de l'urbanisme souterrain	55
III.2 Les raisons d'aller en souterrain	55
III.2.1 Des raisons d'occupation du sol et d'implantation	56
III.2.2 Des raisons d'isolation	57
III.2.3 Des raisons de protection de l'environnement	58
III.3 Des raisons topographiques	58
III.4 Des raisons sociales	58
III.5 Evaluation des ouvrages souterrains	59
5.1 Coûts de construction	59
5.2 Economies foncières	60
5.3 Economies proportionnelles à certaines dispositions caractéristiques.....	60
5.5 Coût de maintenance	60
5.6 Coûts de remplacement	61
5.6. Analyse des risques du souterrain	61
Conclusion général.....	62

Liste Des Figures

	Titre de figure	page
Fig. I.2	Histoire des tunnels	4
Fig. I.3.1	Coupe type du tunnel de Villejust	8
Fig. I.3.2	Sections transversales de 4 mètres en service en France	8
Fig. I.3.3	Section transversale du tunnel sous la Manche.	8
Fig. I.4.1	Creusement avec tunnelier	10
Fig. I.4.2	Creusement en demi-section	11
Fig. I.4.3	Creusement en section	11
Fig. I.4.4	manières de diviser la section sont possibles	12
Fig. I.4.5	Exécutés en tranchée couverte	15
Fig. I.4.6	Palplanche	16
Fig. I.4.7	Parois berlinoises	16
Fig. I.4.8	Exemple d'un tunnel creusé dans les montagnes	17
Fig. I.4.9	déformation de tunnel de jebel-Elwahech autoroute East-West Constantine	18
Fig. I.4.10	Tunnels exécutés en souterrain (de méthode moderne)	19
fig. I.4.11	Le tunnelier	20
Fig. I.4.12	Autre côte de tunnelier	21
Fig. I.4.13	Principaux types d'étanchement.	22
Fig. I.4.14	cintre métallique(HEB200) sous une force $F=3t/m$	24
Fig. I.4.15	Vue transversale du tunnel	24
FIG. I.5.1	Poste Central de Contrôle au puits de Sangatte Coordination des trafics et de la sécurité	28
FIG. I.5.2	utiles de sécurités	29
Fig. I.5.3	Issues de secours (tunnel du Mont Blanc : France - Italie)	30
Fig. I.6.1	Amorce extérieure du tube	32
Fig. I.6.2	Entrée rocheuse	32
Fig. A 1.3	Tunnel du pas de la Fosse, Savoie	32

Liste Des Figures

Fig. I.6.4	Tunnel de Dullin A-43. Savoie	32
Fig. I.6.5	Tonne/ sous Le Vieux Port à Marseille	33
Fig. I.6.6	Tunnel d'Uzerche, Corrèze	33
Fig. I.6.7	Tunnel Maurice Lemaire, Vosges	33
Fig. I.6.8	Tunnel des Gorges de l'Arly, Savoie	34
Fig. I.6.9	Montrer la ventilation	34
Fig. I.6.10	Tunnel sous Je Mont Blanc	36
Fig. I.6.11	Le tunnel St Antoine à Marseille	36
Fig. I.6.12	De la campagne à la ville	36
Fig. I.6.13	Tunnel de la place de La Comédie à Montpellier, Hérault	37
Fig. I.6.14	D'un site à un autre.	37
Fig. I.6.15	Le tunnel de la Croix Rousse à Lyon	37
Fig. I.6.16	La vue du tracé	38
Fig. I.6.17	Un soutènement au tunnel du Pas du Mortier, Isère	38
Fig. I.6.18	Tunnel de Chamoise, Ain	38
Fig. I.6.19	Tunnel de la Croix Rousse à Lyon	39
Fig. I.6.20	Tunnel Louis II, Principauté de Monaco	39
fig. I.6.21	Le tunnel du Heutor à Salzbourg (Autriche)	40
Fig. I.6.22	Tunnel de Chevril, Savoie	40
Fig. I.6.23	Cheminée de ventilation du tunnel du Fréjus, Savoie	40
Fig. I.7.1	Le tunnel sous la Manche	41
Fig. I.7.2	Le tunnel du Mont-Blanc	42
Fig. I.7.3	Le tunnel de Lærdal	43
Fig. II.1	Exemple d'un réservoir et d'une installation de pompage.	45
Fig. II.2.1	Câble d'alimentation électrique dans le tunnel.	46
Fig. II.2.2	Groupes électrogènes de secours.	46

Liste Des Figures

Fig. II.3	Eclairage dans le tunnel.	47
Fig. II.4.1	Différentes dispositions possibles pour le soufflage et l'aspiration	49
Fig. II.4.2	Ventilateurs	49
Fig. II.4.3	l'accélérateur	50
Fig. II.4.4	Trappe de désenfumage télécommandable	50
Fig. II.5.1	Postes d'appel d'urgence	51
Fig. II.5.2	Boutons-poussoirs d'alarme	51
Fig.III.1	construction d'un tunnel dans un milieu urbaine	55
Fig.III.2	Coupe d'une intégration souterraine en milieu urbain	56
Fig.III. 3	Installation d'ouvrages nucléaires	57
Fig.III.4	La variété des installations souterraines	58
Fig.III.5	Tunnel d'autoroute formant une traversée Vert.	58
Fig.III.6	Tunnel routier urbain	59
Fig.III. 7	Coupe d'un ouvrage souterrain	61

Introduction générale :

Dans le monde d'aujourd'hui les communications et les transports jouent un rôle économique et politique important. (Politiques étrangères favorables, tourisme, etc.) La route étant l'un des moyens les plus utilisés pour le déplacement des personnes et des marchandises, il est donc important que le réseau routier ne soit pas arrêté par les frontières naturelles. Les tunnels sont donc des constructions visant à faciliter les voies de communications entre deux régions, deux pays. (Exemple : le tunnel sous la manche).

Un tunnel peut être utilisé pour permettre et faciliter le passage de personnes (piétons, cyclistes, trafic routier, trafic ferroviaire, canal...) vu la densité des sites urbains.

D'autres tunnels avaient fonction d'aqueduc, construits uniquement pour transporter de l'eau, destinée à la consommation, à l'acheminement des eaux usées ou à l'alimentation de barrages hydroélectriques, alors que d'autres encore sont creusés pour acheminer des câbles de télécommunication, de l'électricité, des hydrocarbures etc.

Il a toujours été plus difficile de réaliser un ouvrage en souterrain qu'à l'air libre. Et malgré tout, depuis très longtemps, l'homme a créé des ouvrages souterrains en réalisant des prouesses.

Ceci était particulièrement vrai dans les temps antiques, quand on ne disposait pas de pompe pour puiser l'eau qui suintait ou qui n'envahissait les galeries, ni de ventilateurs pour renouveler l'air artificiellement, ni de moyens puissants d'éclairage ou de perforation. Quand enfin on avait les plus grandes difficultés à s'orienter, ne disposant pas d'instruments de visées topographiques.

Cependant, contrairement aux projets de structures tels les bâtiments ou les ponts, les tunnels sont entièrement construits dans les terrains et requièrent des informations géotechniques précises concernant le massif environnant et plus abondantes tout au long du tracé. Ces conditions, chacun le sait, sont rarement satisfaites et rendent la réalisation des ouvrages souterrains d'autant plus difficile. Ce problème se pose de manière plus aiguë encore dans le cas des tunnels profonds.

De plus, la modélisation est délicate car le problème d'excavation d'un tunnel est tridimensionnel et d'interaction entre sol (ou roche) et structure.

De nouveaux progrès dans la maîtrise de cette complexité sont encore à attendre. Nous proposons dans le cadre du travail présenté dans ce mémoire

Le travail entrepris pour l'obtention du diplôme de licence en hydraulique dans l'objectif de présenter les ouvrages souterrains (les tunnels), avec les principales parties suivantes :

Objectif :

Cet ouvrage est une étude sur les tunnels de façon généraliser, dans cette étude on voit : les méthodes de construction, les critères d'analyse des têtes des tunnels, sécurité, dans les tunnels, les équipements généraux des tunnels (assainissement dans les tunnels. éclairage. Ventilation.) Et les tunnels dans un milieu urbain.

CHAPITRE I: Rappels sur les tunnels.

Chapitre I : rappelle sur les tunnels

I.1 Définition :

Le mot Tunnel, n'est que la traduction anglaise de la " tonnelle ", nom donné à cet ouvrage et utilisé dès le XVIème siècle pour désigner une longue voûte en berceau, la tonnelle dérive elle-même de " tunna ", mot latin populaire d'origine celtique qui désignait d'abord une outre en cuir, puis une grosse futaille.

Ainsi, aucun tunnel digne de ce nom n'a existé avant 1825. Auparavant, les tunnels se nommaient galeries ou mines, selon leur destination.

Les définitions suivantes sont empruntées au petit dictionnaire Robert, pour qui le tunnel est une " galerie souterraine destinée au passage d'une voie de communication (sous un cours d'eau, un bras de mer, à travers une élévation de terrain) ".

Bien que cette définition ne soit pas totalement admise, on considère souvent qu'un tunnel doit être au moins deux fois plus long qu'il n'est large pour mériter cette désignation. Il doit en outre être fermé de tous les côtés, excepté à chacune de ses extrémités, ce qui le différencie d'un passage en tranchée.

I. 2 Historique de tunnel :

Toutes les civilisations ancienne (les Babyloniens 2100 avant JC, les Egyptiens 1300 avant JC, les Grecs 530 avant JC, les romain...Etc.) construits tunnels pour fournir de l'eau potable ou à l'assainissement, Le tunnel le plus ancien actuellement connu semble bien être celui qui a été construit en Mésopotamie sous l'Euphrate il y a 4 000 ans à l'époque de la reine Sémiramis. D'une longueur de 1 km, il reliait le palais royal de Babylone au temple de Jupiter.

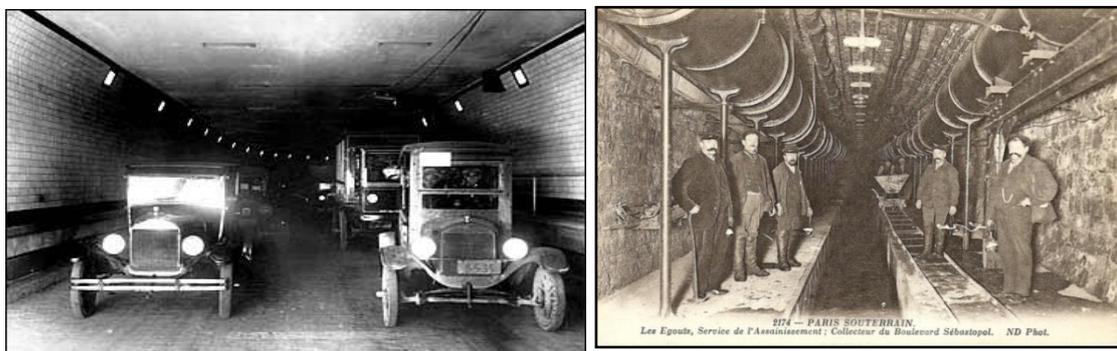


Fig.I.2.Histoire des tunnels

Chapitre I : rappelle sur les tunnels

Les civilisations modernes ont élargi l'emploi des tunnels au domaine des communications pour franchir un obstacle qu'il s'agisse d'une chaîne de montagnes, d'un cours d'eau, ou même du cœur d'une ville. Aujourd'hui, des cavités souterraines sont construites pour assurer le stockage de matières encombrantes ou dangereuses (pétrole, gaz), pour décongestionner la surface des villes (parkings souterrains) ou pour loger des unités de production d'énergie (centrales enterrées). L'importance croissante des considérations d'environnement et la saturation du sol devraient logiquement conduire à un accroissement du nombre des ouvrages souterrains, soit dans le domaine des installations industrielles, soit pour le stockage des déchets, soit pour la protection des populations et des installations vitales en cas de conflit..

De nos jours, l'étude des tunnels intervient aussi dans le cadre des projets de stockage des déchets radioactifs par la nécessité de creuser des galeries profondes (quelques centaines de mètres) à partir desquelles les puits ou galeries de stockage seront réalisés. Cependant, dans ces cas, et pour des raisons évidentes, l'étude rhéologique et hydrologique du massif hôte est faite avec beaucoup plus de soin que dans les autres cas d'ouvrages souterrains. Donc une étude d'impact de l'ouvrage enterré sur l'environnement doit être prise en compte.

I.3 Classification des tunnels :

Il existe une différence de points de vue entre les pays. Dans certains pays, la classification sert de guide pour le projeteur, dans d'autres elle fait office de réglementation. Ce point doit faire l'objet de discussions dans chaque pays. Quel que soit le système adopté, nous recommandons une classification qui inclut les facteurs suivants :

- ▶ Objet et le rôle du tunnel.
- ▶ leur mode d'exécution,
- ▶ la forme géométrique des ouvrages:

Les données du projet diffèrent suivant la destination finale des ouvrages. Nous examinerons donc les données habituelles propres à chaque type de tunnel :

a. Tunnels ferroviaires :

a.1 Section transversale :

La section utile d'un tunnel ferroviaire dépend de plusieurs facteurs et, en premier lieu, du gabarit du matériel roulant appelé à circuler sur la ligne.

On distingue en général le contour de référence et le gabarit limite des obstacles qui tient compte de la nécessaire distance de sécurité et du sur profil nécessaire dans le cas des voies en

Chapitre I : rappelle sur les tunnels

courbe et en dévers. Le contour de référence a évolué avec le temps, tout d'abord en fonction de l'électrification des lignes pour y inscrire les caténaires. Cette première évolution a entraîné de nombreuses modifications des profils de tunnels (alésage des maçonneries ou abaissement des voies) aujourd'hui pratiquement achevées.

Un autre facteur intervient sur les lignes où doivent circuler des trains à grande vitesse, c'est la notion du volume minimal d'air à réserver autour du gabarit pour limiter les effets du pistonnement qui nuisent à la fois au confort des passagers et augmentent les dépenses en énergie de traction.

Méthode d'exécution. L'exemple le plus fréquent est celui de l'utilisation d'un bouclier mécanisé qui entraîne généralement le choix d'une section circulaire.

a.2 Profil en long et tracé :

Sur les lignes anciennes, il existe, en zone montagneuse, des pentes pouvant atteindre 43 ‰ à l'air libre et 34 ‰ en tunnel. La réduction s'explique par la diminution d'adhérence due à l'atmosphère plus humide des souterrains. Sur les lignes récentes, on s'efforce, à l'air libre ou en souterrain, de ne pas dépasser le seuil de 12 ‰ pour les transports de marchandises et le ferroutage. Sur les lignes à grande vitesse, on pourrait admettre des pentes jusqu'à 35 ‰, mais on se limite en général à 25 ‰ (cas du TGV Atlantique). Les courbes de raccordement entre rampes successives doivent avoir un rayon minimal de 12 000 m dans le cas des lignes courantes ; il est de 16 000 m dans le cas des TGV.

b. Tunnels routiers :

b.1 Section transversale :

Le premier des facteurs à prendre en compte pour la définition de la section transversale d'un tunnel routier résulte naturellement des caractéristiques de la voie à laquelle il va livrer passage.

Si une sur largeur des voies elles-mêmes semble effectivement inutile au seul motif qu'il s'agit de tunnel, par contre :

-La largeur de chaque voie doit être, comme à l'air libre, fixée à 3,50 m pour les voies à grande circulation ou les autoroutes, avec réduction possible à 3,25 m en zone urbaine ou en montagne.

-Les dégagements latéraux doivent être d'une largeur suffisante pour éviter l'« effet de paroi ». Une largeur de 1 m entre la bande de circulation latérale et la paroi, ou tout obstacle surélevé, est souhaitable.

Chapitre I : rappelle sur les tunnels

- dans le cas où une bande d'arrêt d'urgence existe à l'air libre, sa largeur peut être, dans certains cas, réduite dans le tunnel, à condition que la signalisation soit adaptée en conséquence et que des limitations de vitesse soient imposées. Dans d'autres cas, elle est remplacée, notamment dans les tunnels de grande largeur, par des niches latérales de 20 à 25 m de longueur régulièrement espacées.

b.2 Profil en long et tracé :

La déclivité maximale doit rester, autant que possible, telle qu'elle permette de maintenir la capacité de service de la route : jusqu'à 4 à 6 % dans les tunnels urbains de courte longueur, mais seulement 2 à 3 % sauf exception sur les longs tunnels autoroutiers. Lorsqu'il est nécessaire d'adopter des pentes plus fortes, sur des longueurs importantes, il pourra être souhaitable de prévoir une voie supplémentaire pour les véhicules lourds dans la mesure où leur vitesse risque de descendre au-dessous de 50 km/h. Mais cette disposition est souvent très pénalisante du point de vue de l'investissement et on devra s'efforcer d'éviter d'y recourir

a) Galeries hydrauliques :

1. Section transversale :

Il s'agit essentiellement des galeries incluses dans les aménagements hydrauliques destinés à la production d'énergie :

Galeries d'aménage en charge en amont des groupes de production, galeries de fuite en aval pour la restitution de l'eau turbinée ou de l'eau de refroidissement dans le cas des centrales nucléaires. Dans les aménagements de compensation destinés au stockage d'énergie pour faire face aux irrégularités de la consommation, certaines galeries peuvent fonctionner alternativement comme galeries d'aménage en charge et comme galeries de refoulement dans la phase de pompage. Dans tous les cas, la section des galeries est déterminée en fonction des débits à amener ou à évacuer pour que le régime hydraulique corresponde à la perte de charge la plus faible possible.

La section circulaire tend à se généraliser dans les projets récents avec le développement de l'emploi des tunneliers pour les creusements et en raison de ses avantages à la fois sur le plan de l'écoulement et sur le plan de la stabilité des parois et du revêtement. La plupart des galeries hydrauliques (90 %) sont revêtues, soit en béton coffré, soit en béton projeté. Les galeries en charge sous plus de 10 m comportent généralement un blindage métallique destiné à résister à la pression intérieure de l'eau.

Chapitre I : rappelle sur les tunnels

2. Profil en long et tracé :

S'agissant de centrales hydrauliques, les galeries sont implantées en région de montagne. Leur tracé et leur profil sont définis en fonction de la topographie et de la qualité des terrains à traverser. Le projet doit ainsi tendre vers un optimum pour concilier les nécessités hydrauliques (tracé direct, pertes de charge aussi faibles que possible) et la réduction des aléas géologiques.

b) Collecteurs d'assainissement :

Les réseaux d'assainissement sont en majorité constitués de tuyaux de petites dimensions à faible profondeur. La plupart sont posés en tranchées. Certains, lorsque l'encombrement de la surface l'exige, sont foncés à partir des puits selon une technique qui tend à se développer. Il s'agit le plus souvent, en tout cas, des canalisations circulaires dont le tracé est conditionné par la nécessité de desservir le plus grand nombre possible d'immeubles riverains à une cote compatible avec le niveau de leurs rejets et dont le profil en long est défini par les conditions minimales d'écoulement hydraulique. Il ne s'agit pas, à proprement parler, d'ouvrages souterrains.[1]

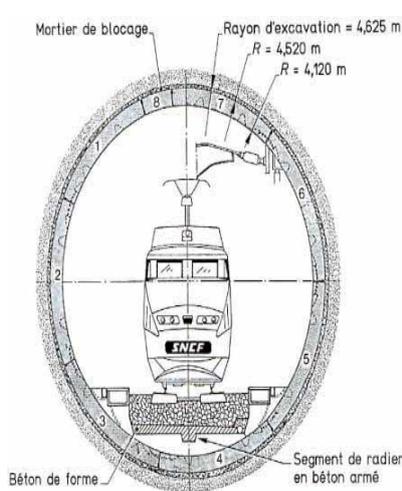


Fig. I.3.1 Coupe type du tunnel de Villejust.

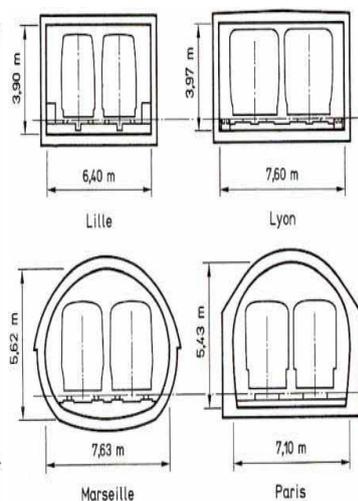


Fig. I.3.2 Sections transversales de 4 mètres en service en France.

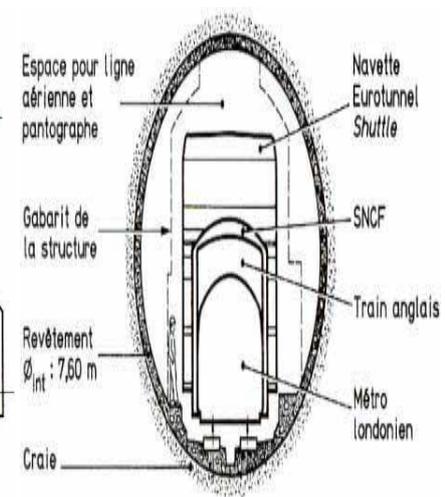


Fig. I.3.3 Section transversale du tunnel sous la Manche.

I.4. Technique de construction des tunnels :

La construction d'un tunnel est une opération complexe faisant intervenir plusieurs corps de métiers. En général, le maître d'ouvrage est une entité publique. Dans cette partie on veut décrire les intervenants et les étapes de construction permettant d'aboutir au résultat souhaité.

Chapitre I : rappelle sur les tunnels

Il existe plusieurs méthodes de construction des tunnels (méthode de construction à ciel ouvert, La méthode de construction par tranchées couvertes, la méthode traditionnelle, la méthode bruxelloise, NATM...).

Ces méthodes sont complètement différentes, donc une présentation succincte des méthodes apparaît nécessaire et facilite la compréhension des chapitres qui suivent, et on va l'étudier en précisant les problèmes qu'on peut rencontrer aux chantiers.

I.4.1 Les méthodes de creusement :

Le choix de la méthode de creusement doit assurer l'abattage du terrain et sa stabilisation

I.4.1. a. Processus de choix :

a.1-Première phase :

Le choix résulte, en première phase, d'un compromis entre les exigences :

1-du terrain encaissant

2-du site et de l'environnement

3-de la géométrie

4-du procédé de construction lui-même

-le processus de raisonnement qui en résulte, procédant par approximations successives, doit aboutir, à chaque stade, à une appréciation du bilan économique d'ensemble de l'investissement (y compris accès, expropriation, bilan de l'usage, etc.....)

-cette démarche, plus ou moins détaillée selon la complexité du projet étudié, aboutit à 2 ou 3 variantes techniques possibles respectant des critères d'économie et de rapidité.

A.2-Deuxième phase :

Le choix de la deuxième phase se base sur les points suivants :

1-la sécurité de l'ouvrage, pendant et après sa construction.

2-une uniformité de méthode sur toute la longueur de l'ouvrage (car les changements nécessitant l'amenée de nouveaux matériels sont toujours longs et coûteux).

3-la souplesse d'emploi (de façon à s'adapter aux difficultés souvent imprévisibles).

4-la limitation des nuisances engendrées sur l'environnement en site urbain notamment.

A.3-Troisième phase :

Chapitre I : rappelle sur les tunnels

-ultérieurement, lors de la consultation des entreprises et du choix définitif, interviennent de nouveaux critères liés à la conjoncture, à la technicité propre des entreprises, à l'économie du projet, etc.....

-conjoncture économique générale et importance du lot de travaux proposés.

-niveau technique des entreprises concurrentes (personnels spécialisés, matériels disponibles, expérience acquise).

-insertion du délai global du chantier de tunnel dans le planning général d'exécution.

-cout de la solution et aléas correspondants.[4]

I.4.1. b Méthodes de creusement :

b.1 Creusement en pleine section :

Bien adapté aux terrains homogènes, sur une grande longueur, ne nécessitant pas l'utilisation d'un autre soutènement que le boulonnage et le béton projeté (soutènement léger).

Ce type de creusement donne lieu au dégagement complet de la section principale de l'ouvrage en une seule fois. Il nécessite l'emploi d'un matériel important :

- grande hauteur de l'excavation.

- importance des volumes de marirage à chaque volée.

- Elle est plus favorable à la maîtrise des déplacements puisqu'elle évite les problèmes liés aux reprises d'excavation dans un terrain déjà déconfiné

- Dans le cas où la longueur à creuser est importante, on peut éliminer ces inconvénients

on utilise un tunnelier.[4]



Fig. I.4.1 Creusement avec tunnelier

Chapitre I : rappelle sur les tunnels

b.2-Le creusement en demi-section :

-Est par contre nécessaire quand un soutènement plus important est requis, par cintres. Pour ce type de creusement, on réalise d'abord le creusement de la partie supérieure de la section, la partie inférieure étant réalisée avec un décalage dans le temps.

-Un soutènement doit éventuellement être mis en place avant creusement du stross, en partie supérieure (cintres, béton projeté) et inférieure (micro pieux, "jet-grouting").

-Le revêtement définitif est généralement mis en place après que l'excavation de la totalité de la section ait été réalisée.



Fig. I.4.2 Creusement en demi-section

-Plutôt adapté en présence de terrains hétérogènes nécessitant l'emploi d'un soutènement important.

-L'avantage principal par rapport au creusement en pleine section, est la mise en œuvre d'un matériel moins important ainsi que de moyens de terrassements habituels pour l'excavation du stross.

-L'avantage principal, par rapport au creusement en section divisée, est la possibilité de pouvoir mettre en place rapidement le soutènement ou le revêtement sur toute la partie supérieure.

b.3-Le creusement en section divisée :

-Choisi quand les caractéristiques du terrain sont insuffisantes pour assurer un soutènement du front de taille dans une ouverture en pleine ou demi-section

-Cette méthode a pour conséquence importante de retarder le moment où toute la section du tunnel sera exécutée. Chaque étape du creusement doit être parfaitement contrôlée de façon à maîtriser l'évolution du terrain. [4]-Il consiste en l'ouverture préalable d'une ou de plusieurs galeries de petite section dont une partie du soutènement participe au soutènement final.

Chapitre I : rappelle sur les tunnels

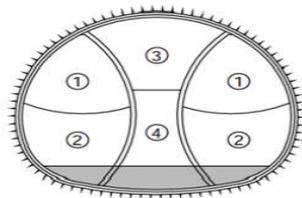
-Si les tassements en surface sont à limiter au maximum, il convient de combiner ce mode de creusement avec un traitement préalable des terrains.[2]



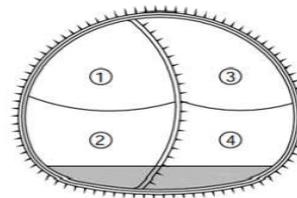
Fig. I.4.3 Creusement en section

Plusieurs manières de diviser la section sont possibles :

Creusement avec cloison centrale



cloison double



cloison simple

Creusement avec galeries aux naissances

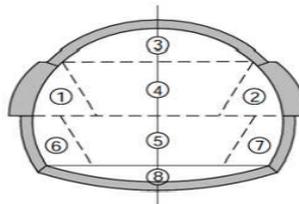


Fig. I.4.4 manières de diviser la section sont possibles

b.4-Creusement à l'explosif :

Pendant de nombreuses années la méthode la plus utilisée dans les roches de dureté moyenne à élevée, méthode 'conventionnelle' d'excavation.

Encore utilisé pour l'exécution des tunnels situés dans les roches pour lesquelles un abattage manuel (marteaux piqueurs, pelle hydraulique) ou un terrassement mécanique n'est plus envisageable, du point de vue technique ou économique.

-On peut aussi bien travailler à section pleine qu'à section partielle (pour les sections importantes, les terrains médiocres, ou lorsque l'orientation des bancs est défavorable au tir par perforation horizontale).

Chapitre I : rappelle sur les tunnels

-La séquence de tir prévoit normalement de faire sauter d'abord les charges situées au centre du front de taille, afin de dégager un bouchon, puis de faire sauter les charges de plus en plus périphériques avec un retard de quelques microsecondes.

b.4-1-Cycle de creusement à l'explosif :

1- Traçage et perforation du plan de tir

Traçage sur la base d'un plan de tir théorique adapté aux conditions particulières du front de taille (fracturation, hétérogénéité, hors profil et en profil) et à la qualité des roches rencontrées. [4]

Perforation au moyen d'outils perforateurs qui suivent les dimensions de la section à réaliser.

Ils sont montés soit :

- sur des poussoirs : marteaux-poussoirs.
- sur des bras à glissière : jumbos de forage automoteur, de **2 à 5** bras avec nacelle.

2- Chargement des trous de mines

Le plan de tir définit également les charges unitaires à mettre en œuvre ainsi que les délais d'amorçage.

3 -Tir de la volée

Par un système d'amorçage classique (détonateurs électriques à micro-retard ou à retard ordinaire par exploseur) ou par tir à amorçage séquentiel, permettant de décupler les échelonnements des mises à feu par le choix d'un délai d'amorçage réglable.

4- Ventilation

Évacuation des gaz et fumées au front de taille (une galerie pilote pour le dégagement des fumées peut s'avérer très utile pour les tunnels de grande longueur).

5 -Purge et Boulonnage

Purge soignée (manuelle et éventuellement mécanique) et complète des parements et voûte déroctés au cours de la volée et des volées immédiatement précédentes, Le boulonnage peut éventuellement être effectué à l'issue de la purge.

6- Marinage : Évacuation des déblais du front de taille

Dans la méthode traditionnelle d'excavation (par abattage aux explosifs), l'évacuation des déblais - ou marinage – débute après l'abattage du front, à peine soient rétablies les conditions de travail. Cette opération a lieu selon le cycle suivant :

Chapitre I : rappelle sur les tunnels

- Chargement
- Evacuation du matériau du front de travail
- Transport définitif au lieu de stockage

Le point essentiel de cette opération est d'arriver à obtenir le dégagement le plus rapidement possible du front d'attaque, de manière à pouvoir poursuivre le cycle d'excavation.

7 -Gunitage

La mise en place du soutènement (généralement, la mise en place de béton projeté – gunitage-suffit).

b.4-2-Avantages - domaine d'emploi :

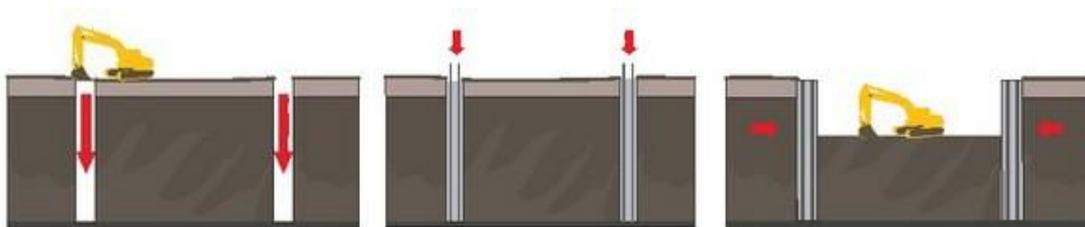
- Souplesse de la méthode, au niveau du profil à réaliser et de l'adaptation aux différentes catégories de terrains rencontrés.
- Plutôt les roches dures : meilleurs résultats d'efficacité et de rendement.
- Utilisation ponctuelle possible pour des terrains hétérogènes : 'pétardages'.
- Les roches fortement broyées représentent par contre une limite technologique pour la méthode (Une solution possible pour ce type de roche peut être la réduction des longueurs de volée, ou l'utilisation temporaire de brise-roches ou de machines à attaque ponctuelle).

I.4.2 exécutés des tunnels :

I.4.2.1 Les tunnels exécutés en tranchée couverte :

Les tunnels exécutés en tranchée couverte, sont construits après creusement d'une fouille à ciel ouvert, ou d'une tranchée, talutée ou non, puis à exécuter un cadre en béton armé à ciel ouvert (fig. 1.2), enfin ils sont remblayés.

L'exécution à ciel ouvert implique un tracé sous les voiries existantes. Des travaux préliminaires de déviation de réseaux des services publics et concessionnaires sont réalisés avant le terrassement.



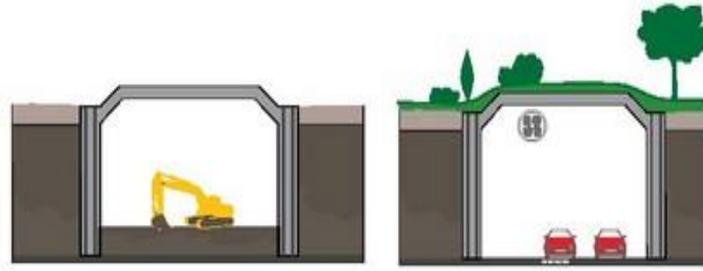


Fig. I.4.5. Exécutés en tranchée couverte

Cette disposition concerne les réseaux parallèles au tracé. Les réseaux perpendiculaires sont soutenus au-dessus de la fouille. [4]

Une fois après la réalisation des travaux préliminaires de déviation de réseaux des services publics et concessionnaires, le problème essentiel qui se pose est celui du maintien des terres excavées. C'est ce qui distingue les différentes méthodes utilisées: fouilles talutées, fouilles cloutées, fouilles blindées, fouilles verticales avec utilisation de palplanches, de parois berlinoises, de parois moulées ou de parois préfabriquées.

1. Fouilles talutées :

Le principe est de creuser une fouille talutée. Sois, l'exécution de radier et piédroit, puis la construction de dalle supérieure de tunnel, enfin le remblaiement et le rétablissement de circulation. C'est la méthode la plus simple qui ne peut le plus souvent être envisagée qu'en rase campagne.

2. Fouilles à parois cloutées :

Elle consiste à clouter la paroi en y enfonçant au fur et à mesure que la fouille est creusée des barres d'acier de quelques mètres de longueur à l'aide de marteaux hydrauliques. Elles sont disposées selon un quadrillage horizontal-vertical, l'intervalle entre elles dépendant des caractéristiques du terrain. Celui-ci est ainsi renforcé sur une certaine profondeur et ces sortes d'armatures, qui créent une véritable paroi armée, permettent de creuser pratiquement à la verticale.

3. Palplanches :

Les palplanches sont des profilés métalliques qui sont enfoncées par vibrofonçage le long des parois des tunnels à construire. Après terrassement de la fouille au cours duquel les palplanches, maintenues par des butons, jouent le rôle de soutènement, les tunnels sont bétonnés.

Chapitre I : rappelle sur les tunnels

Le remblaiement permet ensuite l'établissement de la circulation.



Fig. I.4.6 Palplanche

4. Parois berlinoises :

Ouvrage de soutènement, constitué de profilés métalliques que l'on descend dans des forages et de planches ou de panneaux métalliques, mis en place horizontalement au fur et à mesure de la progression de l'excavation.



Fig. 1.4.7 Parois berlinoises

5. Parois moulées-parois préfabriquées:

Le procédé consiste, dans son principe, à réaliser dans le sol avant toute excavation un mur vertical en béton d'une épaisseur de 50 à 80 cm. exceptionnellement 1,2 à 1,5 m, destiné à servir de mur de soutènement, d'élément porteur et d'écran d'étanchéité.

La méthode des parois préfabriquées dérive de la technique de la paroi moulée. Elle consiste à remplacer le béton in situ par des panneaux en béton armé préfabriqué. La paroi préfabriquée assure en général une triple fonction du blindage de l'excavation, reprise des charges verticale apportées par la couverture, étanchéité en phase de construction et définitive.[3]

Dans la zone urbanisée dense, la construction "à ciel ouvert" est souvent difficilement compatible avec l'utilisation de l'espace urbain pendant la durée des chantiers, voire totalement impossible, donc, la méthode d'exécution en souterrain s'impose.

I.4.2.2 Les tunnels exécutés en souterrain :

Les tunnels exécutés en souterrain, sont réalisés par un creusement souterrain. On distingue la méthode d'exécution suivant les terrains durs ou rocheux et les terrains meubles. [3]

Chapitre I : rappelle sur les tunnels

d) Méthodes d'exécution des tunnels en terrains durs ou rocheux :

C'est dans ces types de terrains que la plupart des excavations souterraines étaient autrefois réalisées en raison de la stabilité que ce milieu garantissait et du fait qu'il n'était généralement pas nécessaire d'étayer les parois de manière autre que sommaire.

Ils ne nécessitent pas de consolidation et utilisés surtout pour les routes passant à travers des montagnes (routes, chemins de fer). Avant, les ingénieurs utilisaient la dynamite pour les explosions à travers les montagnes mais de nos jours, on utilise plutôt des machines spéciales à forer (les tunneliers).

En ce qui concerne l'explosif le principe consiste à perforer des trous de mine dans la paroi du front d'attaque, et de placer dans ces trous des cartouches d'explosifs, puis le sauta produisant un dégagement pour les abattages ultérieurs. [3]



Fig. I.4.8 Exemple d'un tunnel creusé dans les montagnes

Ce soutènement peut être réalisé grâce à la mise en place de cintres métalliques assemblés sur place et soigneusement calés contre le ciel de l'excavation. Des grillages peuvent être également déployés sur celui-ci entre les cintres afin de retenir les blocs risquant de se détacher et de tomber.

Mais il peut également être assuré par boulonnage, qui consiste à "accrocher" les parements aux couches supérieures, moins fragiles car moins affectées par les explosions, grâce au scellement de tiges métalliques dans le massif encaissant, Autre procédé soutènement qui associe, soit les cintres métalliques, soit plus généralement le boulonnage : le béton projeté, encore appelé: Nouvelle Méthode Autrichienne. Il consiste à appliquer sur les parois du souterrain une couche de béton en le projetant à l'aide d'une lance à air comprimé.

Chapitre I : rappelle sur les tunnels

e) Méthodes d'exécution des tunnels en terrain meuble :

D'une manière générale, en terrain meuble (couches plastiques, graviers, sables, vases, etc....), le principal danger qu'entraîne le creusement d'un tunnel est un relâchement ou une relaxation des terrains le surmontant qui tend à combler l'excavation en cours. Ce phénomène, dénommé décompression se manifeste par un fléchissement des couches supérieures et des parois latérales.[3]

Si ce phénomène, bien entendu amplifié en présence d'eau, n'est pas contrôlé, il peut s'avérer particulièrement dangereux pour le tunnel lui-même ainsi que pour le personnel qui y travaille puisqu'il peut entraîner des éboulements localisés, voire un effondrement total.

De plus, cette décompression se répercute plus ou moins rapidement jusqu'en surface et s'y traduit par des affaissements appelés tassements. (Figure I.4.9)



Fig. I.4.9 déformation de tunnel de jebel-Elwahech autoroute East-West Constantine

En effet, l'objet de toutes les méthodes d'exécution en souterrain des tunnels en terrain meuble est, de lutter contre la décompression, d'assurer la sécurité au sens général avant toute considération sur les performances d'avancement.

f) Méthodes classiques:

Chapitre I : rappelle sur les tunnels

La méthode des galeries boisées est la plus classique employée pour le percement des tunnels quelles que soient la cohésion des terrains, la profondeur de l'ouvrage et la hauteur de la nappe phréatique. Elle consiste à effectuer progressivement et par parties successives l'ouverture de l'excavation des ouvrages et le revêtement des différents éléments constitutifs du tunnel: voûte, piédroits et radier

I.4.3. Amélioration des méthodes :

a) Amélioration des caractéristiques des terrains soit en consolidant :

Soit en l'étanchant par:

- Drainage ou le rabattement de la nappe par puits;

Congélation, le principe de la congélation consiste à créer un abaissement de température autour de sondes (ou tubes réfrigérants) forcées dans le sol.

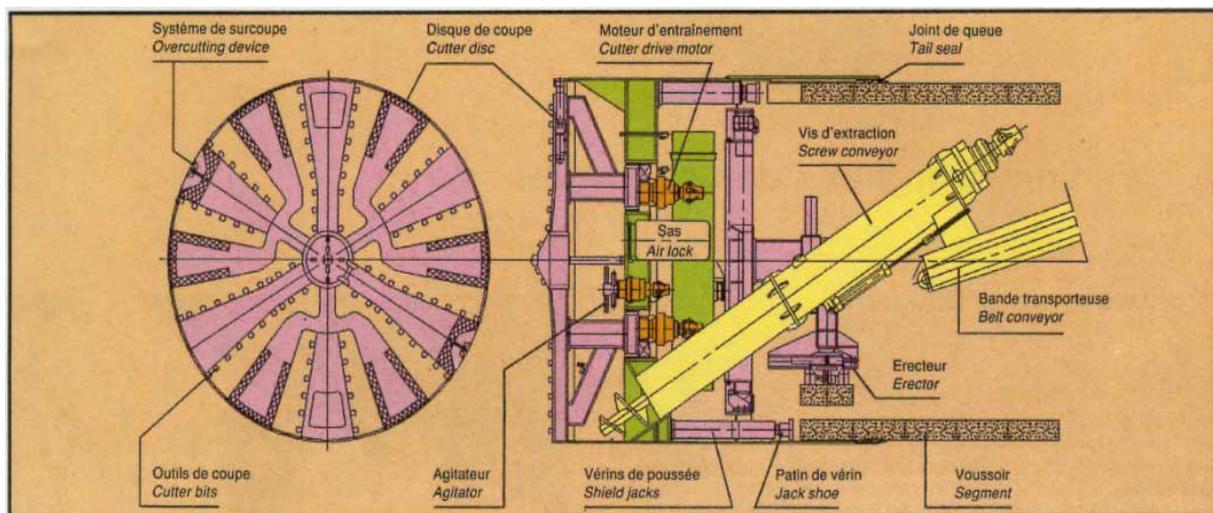


Fig. I.4.10 Tunnels exécutés en souterrain (de méthode moderne)

L'eau de la nappe se transforme en cylindres solides de glace autour des sondes. Dans la mesure où ces cylindres se rejoignent, il y a formation d'une protection homogène, continue, résistante et étanche.

- Injections des coulis, le procédé consiste à faire pénétrer dans les vides du sol (fissures ou espaces interstitiels) un produit liquide, appelé coulis, de viscosité appropriée, se rigidifiant après sa mise en place.

On distingue les injections depuis la surface, appelé Traitement depuis la surface; les injections à partir du souterrain en construction, appelé Traitement à l'avancement; les

Chapitre I : rappelle sur les tunnels

injections auréolaires à partir une galerie pilote préalablement exécutée, dit Traitement auréolaire à partir d'une galerie. [3]

b) Amélioration des procédés :

De nombreuses améliorations ont été entreprises au terrassement et au gros œuvre des tunnels pour les méthodes classiques grâce à l'emploi de l'acier et du béton.

En ce qui concerne le *revêtement*, de grands progrès ont également été accomplis, Son rôle essentiel est d'assurer le soutènement définitif des terrains. Il se substitue au soutènement provisoire mis en place immédiatement après l'excavation ou, dans le cas d'un soutènement métallique, il le renforce sans qu'il soit besoin d'ôter celui-ci.

Traditionnellement en maçonnerie, ce qui constitue un procédé long et onéreux, il est maintenant réalisé en béton coulé sur place avec des coffrages. Le revêtement peut également être préfabriqué. Il est alors composé d'éléments appelés voussoirs, dont l'assemblage constitue un anneau.

I.4.4 Le tunnelier :

est une machine complexe qui assure en continu les fonctions suivantes:

- excavation du terrain;
- stabilisation et soutènement du front de taille;
- soutènement provisoire des parois du tunnel juste derrière le creusement;
- évacuation des déblais;
- mise en place du soutènement provisoire ou du revêtement Définitif;
- guidage selon l'axe théorique prévu;

– avancement automatique à l'aide de vérins. Il permet de creuser des tunnels de diamètre compris entre 2 et 15 mètres. Il est particulièrement adapté pour le creusement de terrains meubles sur de grandes longueurs (du fait de son coût d'investissement). Sa vitesse d'avancement est de l'ordre de 10 à 50mètres par jour. On distingue trois



Fig. I.4.11 Le tunnelier

Chapitre I : rappelle sur les tunnels

types de tunneliers, qui sont choisis en fonction de la nature du terrain à creuser.

- Tunneliers avec machine d'attaque ponctuelle ou d'attaque globale (tunneliers à appui radial, aléasseur). Ils sont utilisés dans le cas de terrain de tenue suffisante ne nécessitant pas de soutènement immédiat. [5]

Tunnelier à boucliers classiques (à front ouvert, boucliers mécanisés à appui radial, à appui longitudinal, à appui mixte) qui assurent simultanément les fonctions d'excavation et de soutènement latéral du terrain. Ils comportent une structure cylindrique rigide (jupe) qui progresse au fur et à mesure du creusement et assure la stabilité du tunnel. Ils sont utilisés pour le creusement des terrains meubles.

- Tunneliers à confinement (ou à front pressurisé). Ces machines assurent simultanément un soutènement latéral et frontal du terrain. Elles sont utilisées dans les terrains alluvionnaires en présence d'eau (terrain meuble et aquifère). La partie avant du tunnelier (chambre d'abattage) peut être mise sous pression afin d'assurer la stabilité du front de taille. À l'intérieur de la chambre, une roue de coupe munie de dents au carbure de tungstène grignote le terrain. Les déblais sont évacués par marinage hydraulique à l'aide de conduite de marinage et de pompes. Selon le type de terrain, le confinement peut être assuré par de l'air comprimé, par pression de terre ou généralement par une boue bentonitique (la boue est formulée en fonction de la granulométrie et de la perméabilité du terrain). Le soutènement de l'excavation est exécuté par le tunnelier, soit par coulage de béton en place, entre le terrain et un coffrage intégré, soit plus fréquemment par la mise en place de voussoirs préfabriqués en béton. Le tunnelier avance en prenant appui sur la zone bétonnée réalisée à l'avancement. [5]



Fig. I.4.12 Autre côté de tunnelier

I.4.5 Principes généraux d'étanchement :

- **Trois principes d'étanchement :**

L'étanchement d'un ouvrage souterrain peut être obtenu en adoptant l'une des attitudes suivantes vis-à-vis de l'eau contenue dans le terrain encaissant :

Chapitre I : rappelle sur les tunnels

1-Constituer sur son cheminement une barrière étanche (béton de revêtement éventuellement traité, injections, couches d'étanchéité). Le dimensionnement du revêtement et le choix de la forme de la section transversale seront conditionnés par la pression hydrostatique totale si la barrière étanche a été mise en œuvre sur tout le pourtour de la section.

2 - Réduire sa pression au moyen d'un dispositif de drainage et la canaliser (drainage, galerie de dérivation, etc...). Le facteur à prendre en compte pour le dimensionnement des organes d'évacuation est alors le débit d'écoulement prévisible.

3 - La laisser circuler sans intervenir dans son écoulement et s'en abriter (voûte parapluie, faux piédroits, etc...). L'eau circule alors librement, sauf dans l'espace utile qui est protégé. Mais cette solution présente l'inconvénient de masquer l'intrados donc d'empêcher sa surveillance visuelle. [6]

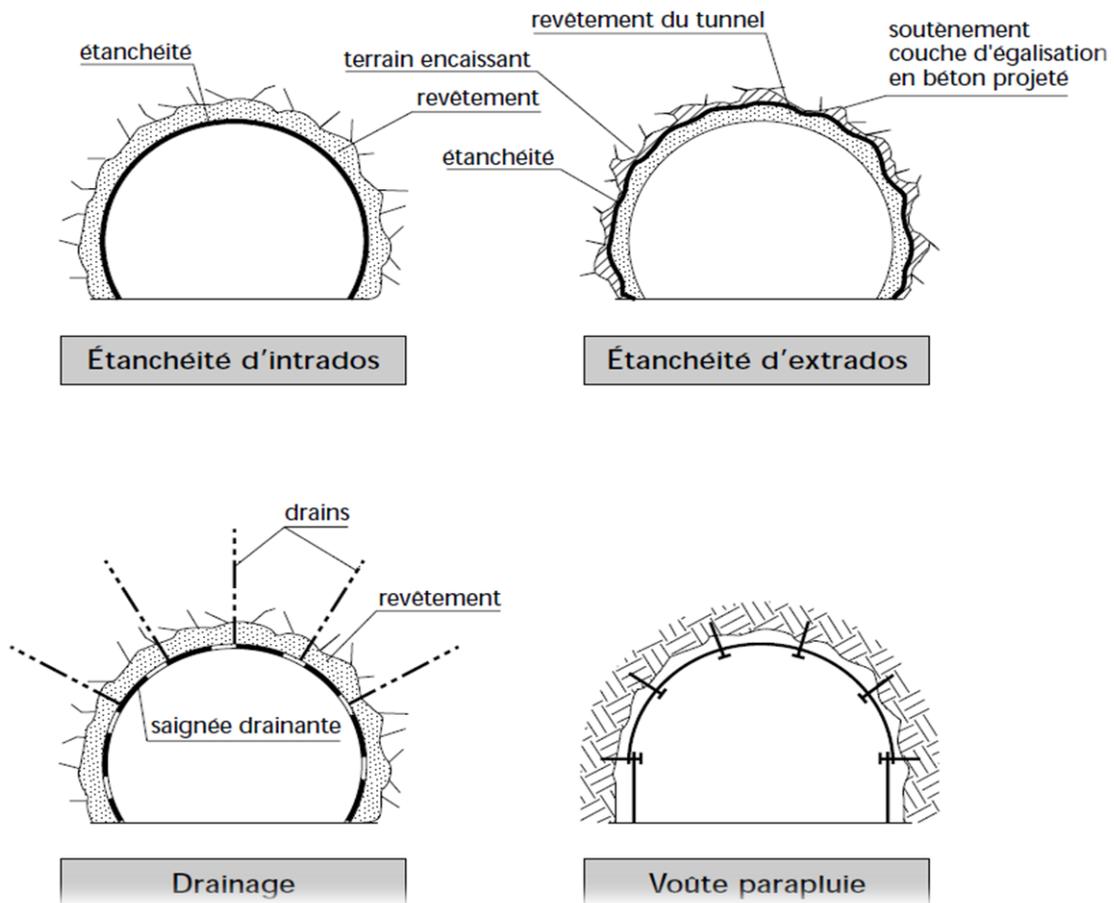


Fig. I.4.13 Principaux types d'étanchement.

I.4.6 Revêtement :

a. Revêtement provisoire :

1. Introduction

Le revêtement provisoire représente l'étape très important dans la construction des tunnels, il assure la stabilité de l'ouvrage lors de creusement, ainsi la sécurité des travailleurs qui sont à l'intérieur. [3]

2. Les éléments du revêtement provisoire

1-Cintre :

Profilé métallique normalisé (IPE, HEA, HEB...) cintré ou des cintres réticulés selon la géométrie du tunnel, et qui servent à soutenir le terrain.

2-Béton projeté :

C'est un mortier courant dont on ajoute un adjuvant (silicate de soude), pour la prise rapide. Ce mortier est projeté pour rigidifier le cintre, et participer au soutènement provisoire de la galerie

3-Treillis soudé: La mise en place d'un treillis soudé permet :

- de mettre en sécurité la paroi de la galerie nouvellement excavée
- permettre au béton projeté de résister à la flexion.

3. Rôle du revêtement provisoire

- pour éviter que le terrain ne s'éboule sous le voutain naturel (rôle protecteur).
- pour répartir les charges sur les éléments porteurs lorsque le terrain ne permet pas d'avoir un effet de voûte suffisant.
- pour éviter un effet "domino" en cas d'effondrement au front de taille (rôle d'écartement et de maintien).

4. Impact du calage du cintre

Le calage du cintre a une influence très importante sur la résistance du revêtement provisoire, car le mauvais calage du cintre engendre des contraintes supplémentaires sur le cintre, l'exemple suivant montre l'impact du calage du cintre sur l'efficacité du revêtement provisoire.

Exemple : L'exemple consiste à appliquer une force de 3t/m sur tout le pourtour du cintre.[3]

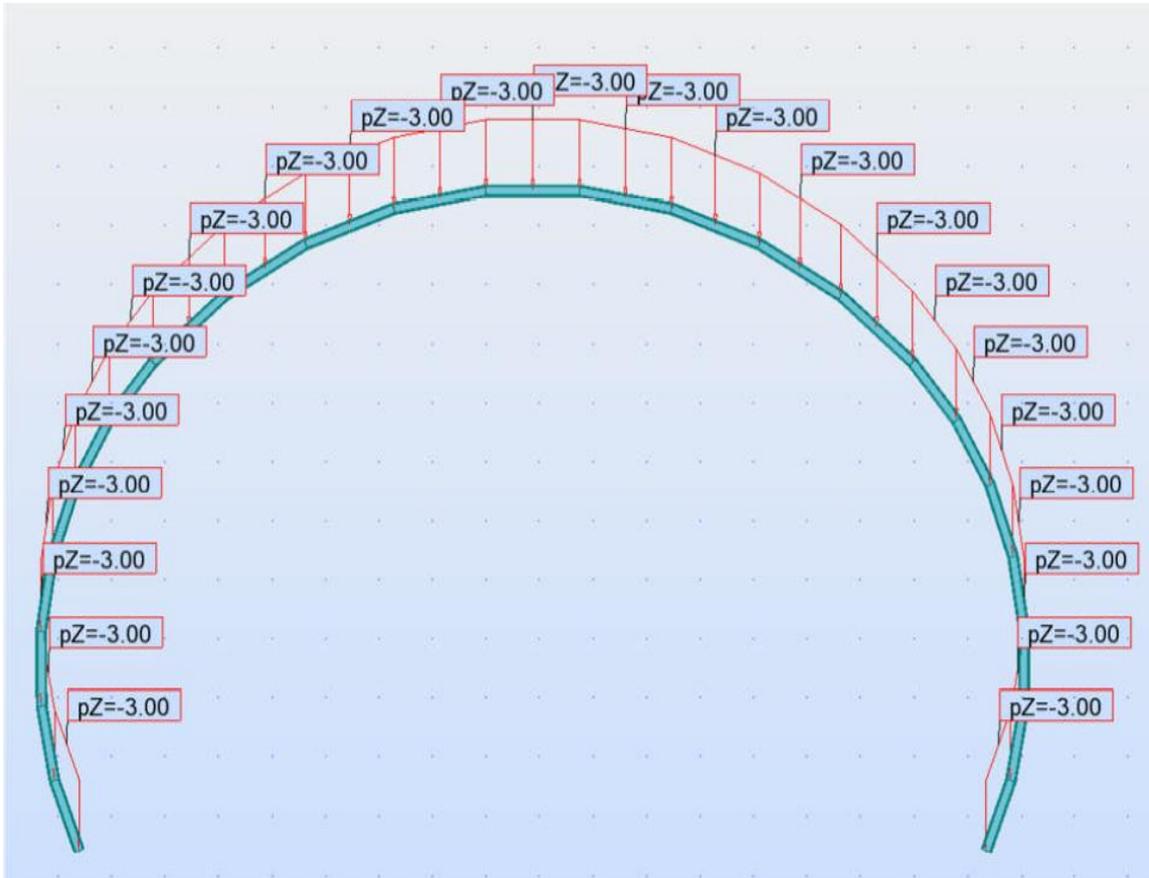


Fig. I.4.14 cintre métallique(HEB200) sous une force $F=3t/m$

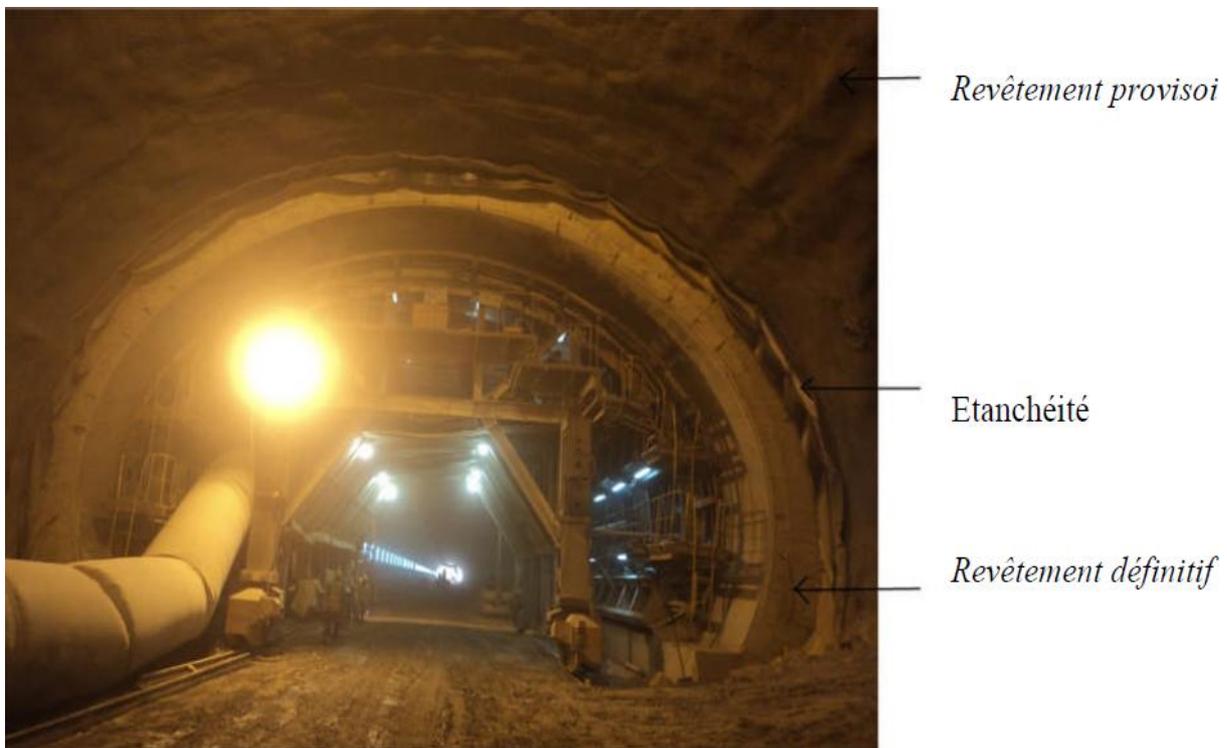


Fig. I.4.15 Vue transversale du tunnel

b. Revêtement définitif :

1. Introduction

La mise en place du revêtement définitif représente l'étape finale dans le cycle de la réalisation du tunnel, il est placé une fois que l'excavation a déjà été stabilisée par le revêtement provisoire, comme il doit assurer la stabilité définitive du tunnel.

2. Fonctions générales

Assure la stabilité du tunnel à long terme.

Imperméabilisation : il empêche la pénétration d'eau à l'intérieur du tunnel à l'aide de

L'étanchéité et Esthétique

Fonctionnelle : pour accroître l'efficacité de la ventilation et de l'illumination.

3. Conclusion

Le choix du type de cintre et sa bonne mise en œuvre ont un Impact très important dans la stabilité à moyen et long terme du revêtement définitif. [6]

I.4.6 Béton :

a) Qualités essentielles d'un béton en souterrain :

En dehors de la résistance contractuelle du béton durci qu'il est nécessaire d'obtenir pour assurer la stabilité de l'ouvrage, les qualités essentielles du béton d'un revêtement coffré de tunnel sont la maniabilité, la compacité et la résistance à la fissuration.

La maniabilité est nécessaire pour obtenir un bon remplissage du coffrage malgré les irrégularités du terrain et la présence des éléments de soutènement. La compacité est nécessaire pour obtenir une étanchéité globale élevée, donc également une bonne résistance au gel et à l'agressivité éventuelle des eaux, agressivité qui réclame souvent des ciments spéciaux.[7]

Pour les mêmes raisons, il est nécessaire que le retrait du béton soit aussi faible que possible, d'autant que ce retrait n'est pas libre, le revêtement étant solidaire du terrain encaissant sur une face, et que le béton n'est pas armé.

Le cas le plus typique est celui des tunnels de grande section qui après percement, sont le siège d'un courant d'air naturel parfois important. La déshydratation rapide et la baisse de la température liées à la vitesse de l'air sont les causes essentielles de l'augmentation du retrait et donc de la fissuration surtout aux jeunes âges.

Chapitre I : rappelle sur les tunnels

Enfin, si on désire des temps de coffrage assez courts, on doit être assuré d'avoir une résistance initiale élevée ce qui peut être contradictoire avec la réduction de la fissuration.

La solution adoptée est donc souvent le meilleur compromis entre ces différentes exigences et les conditions réelles d'exécution compte tenu des moyens qu'il est possible de mettre en œuvre.

Les tunnels récents non revêtus sont très rares, surtout parmi les ouvrages destinés à recevoir du public (tunnels routiers, ferroviaire ou métros). Ils nécessitent un terrain encaissant en roche massive et non évolutive, sans eaux d'infiltration.

Le revêtement définitif des tunnels en **béton projeté** est envisageable pour des ouvrages dont le dimensionnement n'impose pas des épaisseurs de béton supérieures à 15 ou 20 cm. Au-delà de ces valeurs, l'utilisation du béton projeté est actuellement moins économique que celle du béton coffré. Dans l'avenir, la mécanisation et l'amélioration du rendement de la projection peuvent modifier cette limite. D'autre part, dans le cas des tunnels routiers, l'emploi du béton projeté est limité aux tunnels non ventilés ou aux tunnels dont le système de ventilation est semi-transversal, le conduit de ventilation étant alors impérativement en béton coffré.

Les revêtements en béton coffré armé sont tout à fait exceptionnels en souterrain.

Cette solution est adoptée lorsque le revêtement est supposé reprendre une charge hydrostatique importante dans le cas d'un étanchement total de l'ouvrage. Le revêtement peut également être armé lorsque suite à des convergences trop importantes, son épaisseur est insuffisante pour assurer la stabilité de l'ouvrage à long terme.

c) **Injection de collage :**

La campagne d'injection de l'extrados du tunnel se fera par les réservations laissées en clé de voûte.

1. Travaux préparatoire :

Avant l'opération d'injection du coulis de ciment, il est indispensable de calfeutrer les joints entre plots pour éviter la résurgence du coulis à travers les joints. Le calfeutrement d'un joint se compose d'un fond de joint et d'un mastic.

En plus il faut vérifier que les réservations laissées en clé de voûte pour cette opération ne soient pas obturés. Pour cela faire l'essai en injectant de l'eau à travers les réservations laissées et voir si elles sont bouchées ou non.

L'opération d'injection de l'eau permet aussi d'estimer la consommation du coulis à travers ces réservations [8].

2. Travaux d'injection :

L'opération d'injection se fait par lignes horizontales à travers les trous de la première travée du tunnel dans le cas d'un seul atelier d'injection. Pour le cas de deux ateliers d'injection, l'opération se fera de part et d'autre du tunnel.

Lors de l'injection, placer les obturateurs sur le tous à injecter et les quatre trous voisins. La pression de l'injection ne doit pas dépasser 4 bars.

L'injection d'un trou est arrêtée dans les cas suivants:

- Si la pression monte au-delà des 4 bars;
- Si la quantité mise en œuvre est importante;
- S'il y a résurgence de coulis du trou voisin.

3. Coulis d'injection :

Le coulis choisi est un coulis qui permet une mise en contact du revêtement au terrain et un étanchement relatif de l'extrados du revêtement. C'est un coulis stable composé de ciment, bentonite avec un rapport C/E =0.5 avec la composition suivante:

- Ciment : 500 kg
- Eau : 1000 kg
- Bentonite : 30 kg

I.5 Sécurité dans le tunnel :

Les principes de sécurité et d'hygiène ont été intégrés dès la conception par la participation du service spécialisé de sécurité lors de l'élaboration des dossiers d'études techniques avant l'établissement des plans d'exécution ou le lancement des appels d'offres pour la fourniture du matériel ou l'exécution des travaux sous-traités. Dans le même temps des contacts ont été pris auprès de l'Inspection du Travail.

Dans la Direction des Ressources Humaines qui comprenait

- Un service spécialisé de sécurité (15 personnes)
- Un service autonome de médecine du Travail et de premiers soins (2 médecins et 6 infirmières)
- Un service incendie et premiers secours (12 pompiers professionnels).



FIG. I.5.1 Poste Central de Contrôle au puits de Sangatte
Coordination des trafics et de la sécurité

La structure Sécurité a ainsi permis d'assurer la prévention des risques par la formation et la sensibilisation à la sécurité de l'ensemble de personnel à tous les niveaux hiérarchiques. Près de 500 cadres ont participé à un séminaire de deux jours. Les ETAMS et le personnel ouvrier ont tous également consacré une journée sinon deux à cette formation.

Parallèlement l'action des médecins du travail a permis l'adéquation du personnel avec les techniques utilisées. [9]

a) Une organisation dirigée au Sommet

La politique sécurité sur le chantier du tunnel sous la manche est avant tout l'expression d'une volonté de la Direction de l'Entreprise en la personne du Directeur Construction France, qui préside personnellement, assisté de ses adjoints directs (Directeurs de sous-projet), le Comité d'Hygiène et de Sécurité de l'entreprise ainsi que le Collège Interentreprises d'Hygiène et de Sécurité. De plus, deux Comités Particuliers Interentreprises d'Hygiène et de Sécurité sont présidés respectivement par le Directeur du sous-projet Tunnel et celui du Terminal.

La conception industrielle du chantier avec une logistique puissante et fiable assurant la sécurité des hommes et de l'ouvrage permet de s'affranchir au maximum des aléas de terrain, des systématismes et des répétitions de tâches et d'employer des techniciens plutôt que des mineurs traditionnels. Cette conception industrielle du chantier a permis de respecter l'engagement de l'entreprise de recruter plus de 75 % de la main-d'œuvre dans la région malgré l'inadéquation entre les qualifications des demandeurs d'emploi et les niveaux requis par le chantier.

b) Formation plus de sécurité :

Un plan de formation de très grande ampleur, avec le soutien de l'état et de la Région a préparé cette main-d'œuvre à un emploi dont elle ignorait la technicité, les risques et encore moins les mesures pour y faire face.

La formation à la sécurité et au secourisme fait partie intégrante de toutes ces formations professionnelles d'accès chantier. Elle se poursuit grâce à la participation du service spécialisé de sécurité qui apporte son concours à l'élaboration des programmes et à leur mise en oeuvre.

Une procédure de vérification des aptitudes en vue de l'habilitation a été mise en place pour la conduite des engins, appareils de levage et pour les électriciens. Le personnel habilité reçoit un carton d'habilitation de couleur différente suivant la catégorie.

Mais la formation, en matière de sécurité, se vit également au quotidien, grâce à la politique de communication qui a été mises en oeuvre sur les différents sites du chantier.

Les écrans vidéo, par exemple, offrent un support particulièrement performant aux messages "sécurité", également diffusés grâce au bulletin mensuel d'information, aux consignes, aux carnets, à l'affichage.[9]



FIG. I.5.2 utiles de sécurités

c) Issues de secours :

Des issues de secours sont aménagées dans tous les tunnels (à l'exception des tunnels très courts) pour permettre aux usagers de rejoindre à pied, en cas d'incendie, un espace sûr après s'être enfuis de l'espace réservé à la circulation. Pour les tunnels très courts, les têtes de tunnel remplissent cette fonction d'issue de secours. Dans la plupart des tunnels les issues de secours (complémentaires aux têtes de tunnel) sont indispensables pour limiter la distance que les usagers ont à parcourir pour atteindre une zone dans laquelle ils sont en sécurité.

Les issues de secours peuvent être aménagées de différentes manières, et notamment

1. Galeries ou passages connectant les tubes (accessibles aux piétons et pour partie aux véhicules légers). Dans les tranchées couvertes ces connexions sont en général assurées par un passage, équipé d'une porte, aménagé dans le mur séparant les deux espaces de circulation.

Chapitre I : rappelle sur les tunnels

Pour les tunnels forés, les deux tubes sont situés à une certaine distance l'un de l'autre, et la connexion est assurée par une galerie forée équipée de portes à ses deux extrémités.

2. Simples accès à des abris dans lesquels les usagers peuvent se réfugier et être en sécurité pendant la durée de l'incendie. Il est toutefois indispensable que ces abris soient reliés à l'extérieur, soit directement, soit par l'intermédiaire d'une galerie d'évacuation afin de permettre dans un second temps l'évacuation des usagers sous le contrôle des pompiers. Ces abris sont confinés et dotés d'une alimentation indépendante en air frais, d'un poste téléphonique d'appel de secours, et d'équipements de premier secours. L'aspect psychologique de l'utilisation des abris doit être pris en compte dans leur conception, ainsi que dans les procédures de leur utilisation.



Fig. I.5.3 Issues de secours (tunnel du Mont Blanc : France - Italie)

I.6 Analyse et classification des têtes de tunnel :

Les Points d'analyse

Le premier point : d'analyse sera le suivant :

Quelles sont les significations du tunnel et leur mode d'expression par la tête ?

Second point : le tunnel joue parfois un rôle supplémentaire ; il peut être l'entrée d'une ville ou d'un pays. Cela aussi, la tête et l'usine peuvent l'exprimer. Il peut être simplement le passage dans un environnement différent, il est alors souvent ressenti comme une rupture, alors qu'au contraire, il relie. L'entrée peut aussi l'exprimer, et, par-là, redonner valeur positive à l'ouvrage.

Troisième point : l'environnement urbain ou le paysage dans lequel vient s'implanter le tunnel a lui aussi ses propres contraintes et les impose à la tête et à l'usine. La situation est d'autant plus conflictuelle que tête et usine sont porteurs de toutes les nuisances du tube. Le problème est donc ici d'intégrer des contraintes urbanistiques et plastiques totalement extérieures au fonctionnement de l'objet. [10]

Nous allons donc analyser et classer les têtes de tunnel selon trois critères :

A- La façon dont elles expriment les significations du tunnel lui-même.

B - L'expression d'un statut particulier du tunnel.

C -Les contraintes purement extérieures qui s'appliquent aux têtes elle-même.

Les différentes formes de réponses à ces trois critères seront isolées, classées par famille et illustrées d'images types ou d'exemples. Le but de cette grille de classification n'est pas seulement de « répertorier les espèces » de têtes de tunnel, mais d'aider le chef de projet et le maître d'œuvre qui doivent déterminer la forme d'un ouvrage, à poser toutes les questions nécessaires. Les exemples de tunnels présentés ne constituent pas un catalogue de solutions mais les illustrations de critères d'analyse. La plupart des ouvrages réels correspondent ou devraient correspondre à plusieurs de ces critères. La grille d'analyse n'a pas pour unique but de donner des outils aux concepteurs.

A- La tête de tunnel signifie le tunnel :

Nous avons vu que la vérité du tunnel n'était pas affichée immédiatement. Or il est le plus souvent souhaitable de la montrer par la mise en forme de la tête.

Deux ordres de réalité du tunnel peuvent être mis en évidence par la mise en forme de la tête :

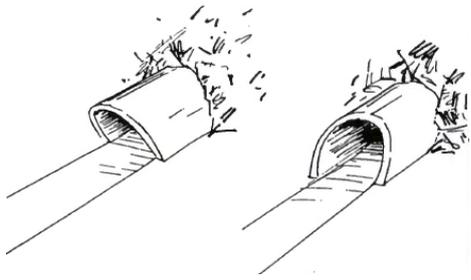
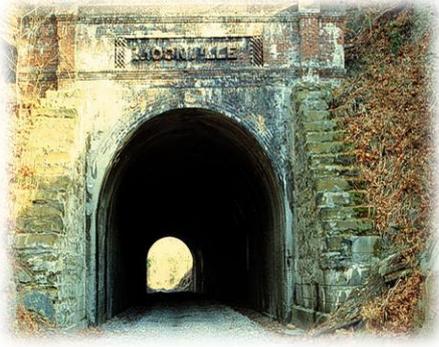
A 1- La traversée :

Signifier le tunnel, c'est d'abord montrer sa fonction première : la traversée d'un obstacle. Si le pont expose l'évidence du franchissement, la traversée par le tunnel ne peut être mise en évidence que par l'entrée.

A 2- Les techniques :

Un tunnel, c'est une machine. Un grand tunnel, c'est une usine complexe, avec des systèmes de régulation de pollution, d'éclairage, de trafic. On peut afficher ce fonctionnement, en faire un argument formel. Les plus petits tunnels ont des problèmes de signalétique qui, à défaut d'être intégrés à l'esthétique de la tête, risquent de lui nuire.[10]

A- La tête de tunnel signifie le tunnel :

A1 expression de la traversée		
<p>A1.1</p> <p>expression de la traversée par une amorce extérieure du tunnel.</p>	<p>C'est le cas très fréquent où le tunnel commence avant la percée, ce qui donne l'impression que le tunnel est un objet qui traverse l'obstacle.</p>	 <p style="text-align: center;">Fig. I.6.1 Amorce extérieure du tube</p>
<p>A1.2</p> <p>expression de la traversée par une entrée rocheuse.</p>	<p>La qualité de la roche permet l'absence de soutènement.</p> <p>On voit que la montagne est percée, c'est le cas de nombreux petits tunnels de montagne</p>	 <p style="text-align: center;">Fig. I.6.2 Entrée rocheuse</p>
<p>A1.3</p> <p>voir la sortie depuis l'entrée.</p>	<p>On arrive de telle façon sur le tunnel que le paysage est cadré par l'entrée et la sortie (tunnels courts), ou qu'un point lumineux apparaît depuis la façade. L'épaisseur de la montagne est révélée.</p>	 <p style="text-align: center;">Fig. A 1.3 Tunnel du pas de la Fosse, Savoie</p>
<p>A 1.4</p> <p>Pressentir la traversée: voir l'obstacle.</p>	<p>Cette configuration est toujours meilleure. Elle est spécialement intéressante quand la montagne apparaît comme un obstacle infranchissable.</p>	 <p style="text-align: center;">Fig. I.6.4 Tunnel de Dullin A-43. Savoie</p>

Chapitre I : rappelle sur les tunnels

<p>A 1.5 expression de la traversée par la plongée.</p>	<p>On descend très sensiblement sous terre. On voit la route s'enfoncer C'est le cas des tunnels sous les fleuves ou les ports. C'est à priori un sentiment désagréable, mais il semble préférable de chercher à montrer et exprimer positivement la plongée sous terre ou sous l'eau.</p>	 <p>Fig.I.6.5 Tonne/ sous Le Vieux Port à Marseille</p>
<p>A 1.6 L'encaissement.</p>	<p>Ici aussi, l'entrée sous terre est sensible, mais la route ne plonge pas. C'est le terrain qui s'élève de part et d'autre. C'est souvent assez désagréable, mais peut servir à raccourcir le tunnel proprement dit, cela peut avoir aussi un aspect positif : montrer simplement le caractère souterrain et l'épaisseur du sol.</p>	 <p>Fig. I.6.6 Tunnel d'Uzerche, Corrèze</p>
<p>A 1.7 la métaphore de la traversée.</p>	<p>Quand la traversée n'est pas manifeste, la perception directe de l'obstacle peut être remplacée et figurée par une expression métaphorique de la percée de la montagne.</p>	 <p>Fig. I.6.7 Tunnel Maurice Lemaire, Vosges</p>

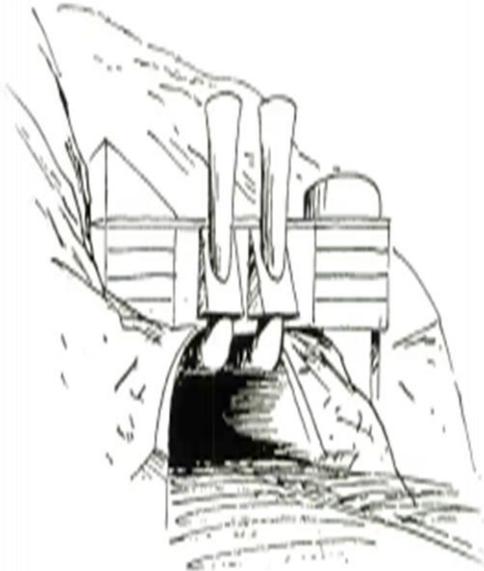
A2 expression des techniques		
<p>A 2.1</p> <p>Signifier la traversée en montrant la technique du creusement.</p>	<p>Lorsque le rocher reste apparent, on peut souvent voir les traces du travail de percement.</p>	
<p>A 2.2</p> <p>Montrer la technique du soutènement.</p>	<p>A l'image d'une esthétique de pont, exposer la reprise des efforts, la rendre explicite. Dans i 'amorce extérieure du tube, mais aussi dans toutes les figures traditionnelles de voûte où ce critère est présent, il peut être affiché encore plus clairement.</p>	
<p>A 2.3</p> <p>Montrer les techniques de ventilation, les réseaux.</p>	<p>On montre que le tunnel est une usine. La complexité de son fonctionnement habituellement dissimulée est ici révélée. On prend conscience d'être servi par une technologie.</p>	

Fig. I.6.8 Tunnel des Gorges de l'Arly, Savoie

Fig. I.6.9 Montrer la ventilation

B - La tête exprime un statut particulier du tunnel :

Les obstacles dont les tunnels permettent le franchissement et leur rapport à la voie ont souvent des significations particulières. Le tunnel se trouve alors investi d'un rôle qui excède sa fonction première. La tête de tunnel est le support privilégié de cette symbolique. Quatre situations types sont envisageables :

B1 tunnel frontalier :

Un certain nombre d'ouvrages de grande dimension traversent des montagnes, des cours d'eau ou des bras de mer qui marquent la frontière entre deux pays, ou de deux régions :

- B1.1 La plateforme.
- B1.2 Monument frontalier.

B2 entrée de ville :

Certains ouvrages donnant accès à des villes prennent, comme les précédents, une signification évidente de porte. Les problèmes complexes de nœuds de circulation à la périphérie des grandes villes amènent de plus en plus souvent des solutions enterrées :

- B2.2 La campagne / La ville.
- B2.3 Urbanisme souterrain en entrée de ville.

B3 passage d'un site à un autre :

Raccourcissant les itinéraires, les tunnels mettent en contact des paysages très différenciés, en supprimant la période de transition qu'offre presque toujours une voie extérieure. De ce point de vue, ils sont des repères sur un parcours. [10]

- B3.1 D'un paysage à un autre.
- B3.2 Passage d'un quartier à un autre.

B4 expression d'un parcours :

Dans les routes de montagne d'abord, puis dans les tracés autoroutiers, la monumentalité du parcours a remplacé la monumentalité des ouvrages, mais les tunnels restent une ponctuation assez forte. Si on veut exprimer cette monumentalité, ou simplement, l'unité d'un parcours, l'aspect des têtes de tunnel est essentiel :

B4.1 La vue du tracé au-delà du tunnel.

B4.2 Le tunnel par rapport aux ouvrages annexes.

B4.3 Rapport avec d'autres ouvrages du parcours.

B4.4 Tunnels en série.

B - La tête exprime un statut particulier du tunnel :

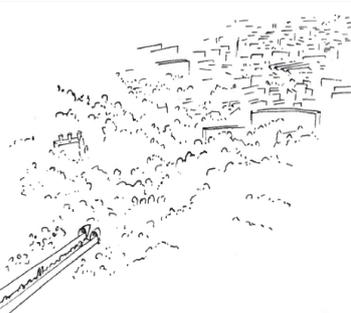
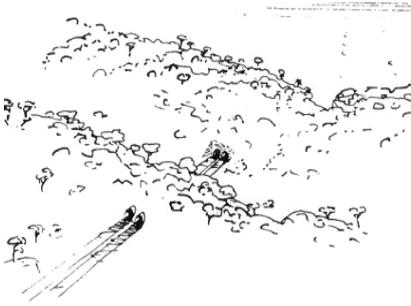
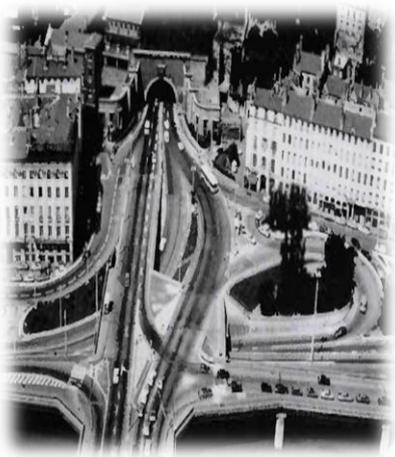
B1 tunnel frontalier		
<p>B1.1 La plateforme</p>	<p>De multiples fonctions sont réunies à l'entrée d'un tunnel situé à une frontière : la tête, l'usine, le péage, les postes de douanes et de police, un bureau de change, une station-service, un parking, les bâtiments d'exploitation.</p>	
<p>B1.2 Monument frontalier.</p>	<p>Le tunnel est la porte d'un pays, la tête peut alors être traitée symboliquement comme une porte monumentale. Nous n'en connaissons pas d'exemples, ceci probablement pour une raison bien simple : la tête du tunnel est située de l'autre côté de la frontière. On ne monumentalise pas l'entrée du voisin.</p>	
B2 entrée de ville		
<p>b2.1 le tunnel est une porte</p>	<p>dans certaines agglomérations, on entre par un tunnel au travers d'une chaîne de collines, ou par-dessous un cours d'eau, comme autrefois on franchissait une enceinte.</p> <p>la tête de tunnel prend alors une évidente signification de porte de la ville. cette situation a donné lieu, en général, à une mise en forme particulière de la tête, et au besoin de l'usine.</p>	
<p>B2.2 la campagne / la ville.</p>	<p>C'est un cas de figure légèrement distinct du précédent, car l'entrée du tunnel est située dans un environnement sinon champêtre, du moins végétal, qui ne laisse pas pressentir totalement la ville. Elle apparaît d'un coup au débouché. Le passage en tunnel a fait l'économie du paysage en transition.</p>	

Fig. I.6.10 Tunnel sous Je Mont Blanc

Fig. I.6.11 Le tunnel St Antoine à Marseille

Fig. I.6.12 De la campagne à la ville

Chapitre I : rappelle sur les tunnels

<p>B2.3 urbanisme souterrain en entrée de ville.</p>	<p>De plus en plus fréquemment, la ville s'implante autour d'un axe. Cela donne lieu à la création d'ouvrages complexes, passages souterrains, trémies, couvertures. On reste dans une logique autoroutière.</p>	 <p style="text-align: center;">Fig. I.6.13 Tunnel de la place de La Comédie à Montpellier, Hérault</p>
<p>B3 passage d'un site a un autre</p>		
<p>B3.1 d'un paysage à un autre.</p>	<p>Lorsque le paysage à la sortie du tunnel est radicalement différent de ce qu'on a pu voir jusqu'à l'entrée, le tunnel devient un point de repère très fort sur un parcours ; la fin de la montagne, le débouché sur une plaine ou une vallée, l'arrivée sur la mer.</p>	 <p style="text-align: center;">Fig. I.6.14 D'un site à un autre.</p>
<p>B3.2 passage d'un quartier à un autre.</p>	<p>Dans ce cas tout particulièrement, le tunnel apparaît comme une coupure, alors qu'il est un lien. La transition entre les quartiers est effacée, le tunnel donne une perception de la ville par fragments, proche de celle qu'offre le métro. Pour diminuer l'effet de coupure, on devra porter une grande attention aux éléments d'urbanisme alentour de la tête et éviter au maximum les connotations routières</p>	 <p style="text-align: center;">Fig. I.6.15 Le tunnel de la Croix Rousse à Lyon</p>
<p>B4 Expression d'un parcours</p>		
<p>B4.1 la vue du tracé au- delà du tunnel.</p>	<p>On voit que la route ou l'autoroute continue après le tunnel : cette configuration a tendance à effacer le tunnel et à rendre la notion de parcours prédominante.</p>	 <p style="text-align: center;">Fig. I.6.16 La vue du tracé</p>

Chapitre I : rappelle sur les tunnels

<p>B4.2 le tunnel par rapport aux ouvrages annexes.</p>	<p>Les problèmes d'esthétique viennent souvent de la présence devant les tunnels d'autres ouvrages: principalement les murs de soutènement. Le traitement de la tête et de ces ouvrages pose des problèmes d'échelle, de liaison, d'unité ou de contraste.</p>	 <p>Fig. I.6.17 Un soutènement au tunnel du Pas du Mortier, Isère</p>
<p>B4.3 rapport avec d'autres ouvrages du parcours.</p>	<p>Le problème est similaire : pour l'expression de la continuité du parcours, on cherchera une unité dans la mise en forme et dans les parements entre les ouvrages vus le long du parcours.</p>	 <p>Fig. I.6.18 Tunnel dChamoise, Ain</p>
<p>B4.4 tunnels en série.</p>	<p>Lorsque le parcours traverse plusieurs tunnels, la « séquence » n'est plus le tunnel, mais la série. Deux partis sont possibles : — On peut marquer le début et la fin de la séquence et, pour les têtes de tunnel intermédiaires, assurer au maximum la continuité. — ou bien proposer une variation sur un thème à chaque entrée.</p>	

C-Relation entre la tête du tunnel et des environnements spécifiques :

Nous allons répertorier ici les critères esthétiques et architecturaux qui peuvent s'appliquer à la tête du tunnel, mais qui sont externes au tunnel lui-même. C'est-à-dire que nous allons regarder de l'extérieur la tête du tunnel comme un projet parmi d'autres.

Nous distinguons :

C1 L'intégration au milieu urbain :

C1.1 La tête du tunnel dans la structure d'un quartier.

C1.2 Rapport avec des ouvrages d'art extérieurs.

C1.3 Contrainte plastique de relation à l'environnement urbain.

C2 intégration a un milieu naturel :

C2.1 Contraintes physiques externes au tunnel.

C2.2 Contrainte plastique de relation à l'environnement naturel

C-Relation entre la tête du tunnel et des environnements spécifiques :

C1 L'intégration au milieu urbain		
<p>C1.1 la tête du tunnel dans la structure d'un quartier.</p>	<p>En dehors de leur fonction propre, la tête de tunnel et l'usine de ventilation ont beaucoup d'importance dans la structure d'un quartier, car elles concentrent en un point les nuisances sonores et de pollution, et les échanges de circulation, créant ainsi un effet de coupure</p>	 <p>Fig. I.6.19 Tunnel de la Croix Rousse à Lyon</p>
<p>C1.2 rapport avec des ouvrages d'art extérieurs.</p>	<p>En milieu urbain, la tête de tunnel est souvent confrontée à des ouvrages extérieurs existants (autres tunnels, ponts, immeubles...) ou créés simultanément pour rétablir une circulation. Dans ce cas, l'étude esthétique et architecturale dépasse largement le seul projet du tunnel et de l'usine. Les ouvrages extérieurs, souvent, vont masquer l'entrée réelle du tunnel</p>	 <p>Fig. I.6.20 Tunnel Louis II, Principauté de Monaco</p>
<p>C1.3 contrainte plastique de relation à l'environnement urbain.</p>	<p>L'ouvrage majeur sera constitué à partir des données propres (Cf. par ex. A2.3. B2.1). Dans le cas de circulation dense ou de caractère autoroutier, on portera attention à l'utilisation des zones résiduelles entre une trame urbaine et une trame de voiries difficilement compatibles.</p>	 <p>fig. I.6.21 Le tunnel du Heutor à Salzburg (Autriche)</p>

C2 intégration a un milieu naturel		
<p>C2.1 contraintes physiques externes au tunnel.</p>	<p>A proximité immédiate du tunnel, la voie peut être soumise à des contraintes externes: avalanches, éboulements, cours d'eau, lumière violente, qui demandent des aménagements spéciaux.</p>	 <p>Fig. I.6.22 Tunnel de Chevril, Savoie</p>
<p>C2.2 contrainte plastique de relation à l'environnement naturel.</p>	<p>On considère ici la tête de tunnel et l'usine de ventilation vues de l'extérieur de la voie. De ce point de vue, cet équipement est un projet architectural comme un autre. Sa relation au site peut être mimétique, ou jouer au contraire d'un fort contraste, mais il doit faire l'objet d'une étude esthétique au même titre que n'importe quel bâtiment ou ouvrage. Les cheminées de ventilation détachées de l'ouvrage principal ne doivent pas être négligées.</p>	 <p>Fig. I.6.23 Cheminée de ventilation du tunnel du Fréjus, Savoie</p>

I.7 Les tunnels les plus connus dans le monde entier :

I.7.1 Le [tunnel sous la Manche](#) :

Fait 50,450 km, dans ce tunnel la sécurité des circulations sera assurée par un système de signalisation en cabine similaire à celui en service sur les lignes tgv actuelles.

les trains seront en liaison constante, par radio uhf, avec les postes de commandement installés sur chaque côté de la manche. Toutes les données nécessaires à l'exploitation des trains et à la gestion des équipements électroniques seront transmises par un réseau de câbles à fibres optiques.

il est envisagé, à terme, de recourir à la conduite automatique. la galerie de service, reliée aux tunnels principaux tous les 375 m. constitue une zone de sécurité et de refuge totalement autonome sur les 50 km du parcours. en cas d'incidents, les passagers seront évacués dans cette galerie grâce aux branches de liaison équipées de sas étanches. ils seront soit pris en charge par des véhicules électriques circulant dans cette galerie, soit dirigés vers le deuxième tunnel où une navette les attendra. le personnel d'eurotunnel veillera au confort et à la sécurité

Chapitre I : rappelle sur les tunnels

des passagers; il s'assurera aussi que les règles élémentaires sont respectées : interdiction de fumer, de mettre en marche le moteur avant l'arrêt du train, ... d'une façon générale, le personnel d'eurotunnel sera formé de façon très approfondie, notamment vis-à-vis de la sécurité et il sera, bien entendu, bilingue. tout le système sera doté des dispositifs, les plus perfectionnés de contrôle électronique, de lutte anti-incendie, de liaison radio et vidéo.



Fig. I.7.1 Le [tunnel sous la Manche](#)

I.7.2 Le tunnel du Mont-Blanc :

est un tunnel routier qui relie [Chamonix-Mont-Blanc](#) en [Haute-Savoie \(France\)](#) ,Le tunnel du Mont-Blanc est constitué d'une galerie unique à double sens de circulation, le doublement du tunnel projeté n'ayant jamais été réalisé pour des raisons d'abord de financement, puis d'opposition farouche des riverains, côté français, en raison des nuisances dues à la circulation intense des poids lourds. Il a permis une réduction de parcours de la France vers [Turin](#) de 50 km et vers [Milan](#) de 100 km. Longueur tunnel : 11,6 km de [Chamonix](#) à [Courmayeur](#). Altitude de l'entrée côté français : 1 274 mètres ; de l'entrée côté italien : 1 381 mètres (le tunnel n'est pas horizontal mais en forme de V inversé pour faciliter l'écoulement des eaux). Il passe à l'aplomb exact de [l'aiguille du Midi](#). La hauteur intérieure du tunnel est de 4,35 m et sa largeur de 8 m (deux fois 3,5 m et deux fois 0,5 m de bande latérale). Après de longues années nécessaires à son percement, le tunnel est mis en service le [19 juillet 1965](#).



Fig. I.7.2 Le tunnel du Mont-Blanc

I.7.3 Le tunnel de Lærdal :

(en norvégien Lærdal stunnelen) est un [tunnel](#) routier de 24,5km reliant [Lærdal](#) à [Arland](#) dans le [comté de sognog Fjordane](#) à l'ouest de la [Norvège](#). À ce jour (janvier 2014), c'est le plus long tunnel routier au monde. Sa construction débute en [1995](#) et est achevée en [2000](#). Le tunnel constitue une partie de la [E16](#) qui relie [Oslo](#) à [Bergen](#).

La conception du tunnel prend en compte la contrainte de la traversée pour les conducteurs. aussi, le tunnel est divisé en quatre sections séparées par trois grandes cavernes creusées dans la montagne, qui cassent la routine, fournissant une vue apaisante et lumineuse. en outre, il existe plusieurs points d'arrêt dans le tunnel.



Fig. I.7.3 Le tunnel de Lærdal

CHAPITRE II :

Equipements

généraux des tunnels

II.1 Assainissement en tunnel :

Les tunnels routiers sont équipés d'ouvrages de drainage et d'assainissement destinés à recueillir les eaux de surface sur la chaussée, les eaux d'infiltration en provenance du terrain, les eaux de lavage, les liquides de déversements accidentels de citerne de transport routier, ainsi que les eaux de lutte contre un incendie.

Les ouvrages de recueil des liquides inflammables ou toxiques constituent un enjeu majeur pour les tunnels dans lesquels le transport des marchandises dangereuses est autorisé. Ces ouvrages de recueil sont essentiels pour réduire la surface des flaques de liquides dangereux susceptibles de se former suite au déversement d'une citerne de transport. Les ouvrages de drainage peuvent avoir un impact important sur la puissance d'un incendie qui ferait suite au déversement de matières inflammables.

Les ouvrages de collecte et d'assainissement consistent en des caniveaux à fente, des regards, des collecteurs, des puisards, des réservoirs et des pompes, des séparateurs d'hydrocarbures et des systèmes de contrôle pour la collecte, le stockage, la séparation et l'évacuation des liquides qui autrement resteraient répandus sur la chaussée. Les réservoirs et les installations de pompage sont en général installés aux têtes de tunnel ou aux points bas.[9]



Fig. II.1 Exemple d'un réservoir et d'une installation de pompage.

II.2 Alimentation électrique :

La plupart des équipements et des systèmes du tunnel nécessitent de l'énergie électrique pour fonctionner, une installation d'alimentation électrique dans le tunnel. Cette installation doit répondre à deux exigences essentielles :

- d) Fournir une alimentation électrique suffisante et sécurisée pour permettre à tous les équipements de fonctionner.

Chapitre II : équipement généraux des tunnels

e) Répondre à toutes les situations d'exploitation (normale, dégradée, critique).

La puissance nécessaire pour alimenter un tunnel est directement liée à la nature et au nombre d'équipements installés. Selon la quantité d'énergie électrique nécessaire (kWh), l'énergie peut être fournie en basse tension ou en haute tension.

Chaque pays a ses propres réglementations concernant les tunnels ainsi qu'une structure particulière en termes de réseaux de distribution : les architectures retenues peuvent donc, pour des tunnels de caractéristiques proches, être sensiblement différentes. Toutefois, il est possible de noter certains principes identiques, notamment :

- la présence d'une alimentation électrique de secours (double alimentation, groupe électrogène, etc.),
- l'installation d'un dispositif permettant de remédier à une perte totale d'alimentation. Ce système (onduleur, groupe électrogène ...) assure, pendant un laps de temps limité, l'alimentation des équipements essentiels à la sécurité. [11]



Fig. II.2.1 Câble d'alimentation électrique dans le tunnel.



Fig. II.2.2 Groupes électrogènes de secours.

II.3Eclairage :

Dans la plupart des tunnels, la pénétration naturelle de la lumière ne permet pas d'assurer des conditions de visibilité satisfaisante pour les usagers. Il est donc nécessaire d'installer un

Chapitre II : équipement généraux des tunnels

éclairage artificiel qui offre aux usagers des conditions de visibilité et de confort satisfaisantes.

En termes de fonctionnalités, l'installation d'éclairage doit permettre d'assurer:

- un éclairage normal qui donne aux usagers une visibilité appropriée, de jour comme de nuit.
- un éclairage de secours qui offre aux usagers une visibilité minimale leur permettant de sortir du tunnel à bord de leurs véhicules en cas de perte de l'alimentation électrique de puissance.

Une installation d'éclairage doit être conçue en respectant de nombreuses exigences, notamment celles relatives aux :

- Niveaux de luminance et d'éclairement sur la chaussée.
- Niveaux de luminance et d'éclairement sur les piédroits.
- Valeurs d'uniformité pour les différents régimes d'exploitation.
- Valeurs d'éblouissement.

Plusieurs types d'installations sont possibles, les plus courantes sont l'éclairage symétrique et l'éclairage à contre-feux. Selon les caractéristiques du tunnel et selon les objectifs à atteindre, les implantations de luminaires peuvent être effectuées sur une ou plusieurs files, au-dessus des voies, en haut des piédroits, etc. [9]

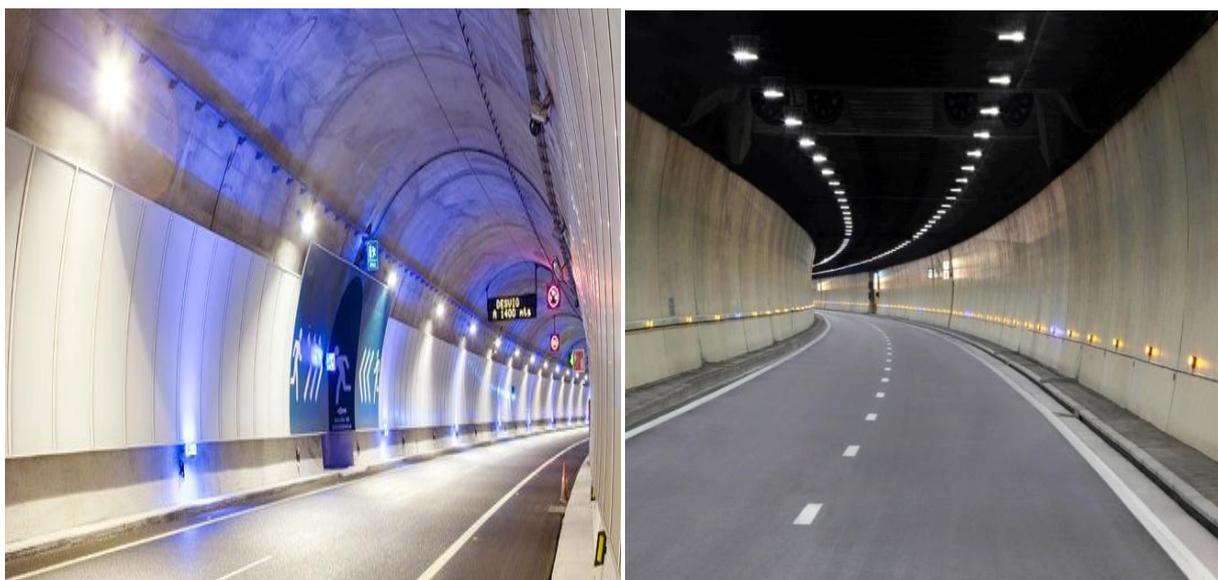


Fig. II.3 Eclairage dans le tunnel.

II.4 Ventilation-désenfumage :

a. Ventilation :

Historiquement, la première raison pour laquelle des systèmes de ventilation ont été installés en tunnel a été la réduction des niveaux de pollution. Bien que les émissions de polluants par les véhicules routiers aient très fortement diminué au cours des dernières décennies, cette fonction reste importante et doit être étudiée avec attention lors de la conception de l'ouvrage. Dans certains cas, la ventilation naturelle due à l'effet de pistonement des véhicules en mouvement peut être suffisante pour satisfaire aux exigences de qualité de l'air en exploitation normale. Les besoins en ventilation mécanique sont évalués en tenant compte de la longueur du tunnel et du type de circulation (unidirectionnelle ou bidirectionnelle) et de son régime d'écoulement (possibilité de congestion).

La ventilation des tunnels assure une double fonction :

- En exploitation normale, elle assure une qualité d'air suffisante dans le tunnel, généralement par la dilution des polluants.
- En situation d'incendie, elle doit permettre de maintenir des conditions aussi sûres que possible pour les usagers du tunnel et les services de secours en contrôlant l'écoulement des fumées de façon appropriée .[11]

► Communications entre les conduits d'air et le tunnel :

○ Principes généraux :

Selon le système de ventilation retenu, la forme de l'ouvrage, le nombre de voies de circulation, le nombre et la fonction des conduits d'air (air vicié (AV) seul, air frais (AF) seul ou AF en fonctionnement normal passant en AV en cas d'incendie), des dispositions très variables peuvent être retenues pour assurer la communication entre les conduits d'air et le tunnel (fig.). Pour la fonction AF seule, deux solutions peuvent être envisagées :

- a) Soit de simples ouvertures situées sur le côté pour les gaines situées en voûte (jet pariétal) ou en partie inférieure dans le cas de gaines latérales.
- b) Soit dans le cas des gaines AF situées en voûte (ou à moindre échelle dans la solution avec gaines AF situées sous la chaussée), mise en œuvre de carneaux de ventilation de manière à ce que l'injection de l'AF se fasse au niveau des trottoirs.

Cette disposition est maintenant réservée aux tunnels pour lesquels il n'a pas été possible de tronçonner la ventilation par cantons élémentaires suffisamment courts (voir section

Chapitre II : équipement généraux des tunnels

Ventilation du document Equipements). Elle peut conduire à une augmentation de l'épaisseur du revêtement pour y inclure les carnaux. [9]

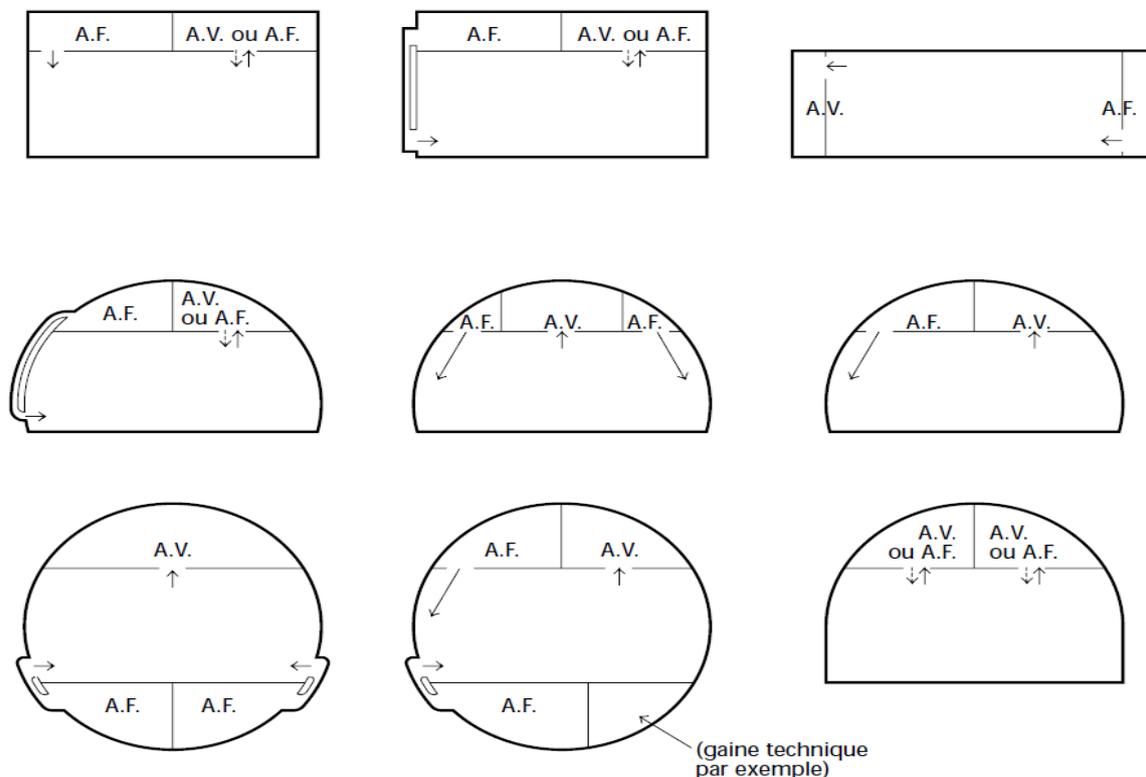


Fig. II.4.1 Différentes dispositions possibles pour le soufflage et l'aspiration.

a.1 Ventilateurs :

Très souvent la ventilation de tunnels impose au système plusieurs modes de fonctionnement :

- Fonctionnement de plusieurs ventilateurs en parallèle pour la dépollution avec un débit modéré.
- En cas d'incendie, l'extraction des fumées demande un débit forcé plus important et une direction du flux d'air imposée par les services de sécurité [11].



Fig. II.4.2 Ventilateurs.

a.2 Avantages de l'accélérateur:

- Moins d'accélérateurs, investissement inférieur pour l'achat des ventilateurs

Chapitre II : équipement généraux des tunnels

- Consommation énergétique inférieure, investissement inférieur pour le réseau électrique
- Si des niches sont prévues, elles peuvent être plus petites donc moins chères
- Coûts d'exploitation réduits en rapport à la faible consommation électrique et au nombre d'accélérateurs à entretenir.

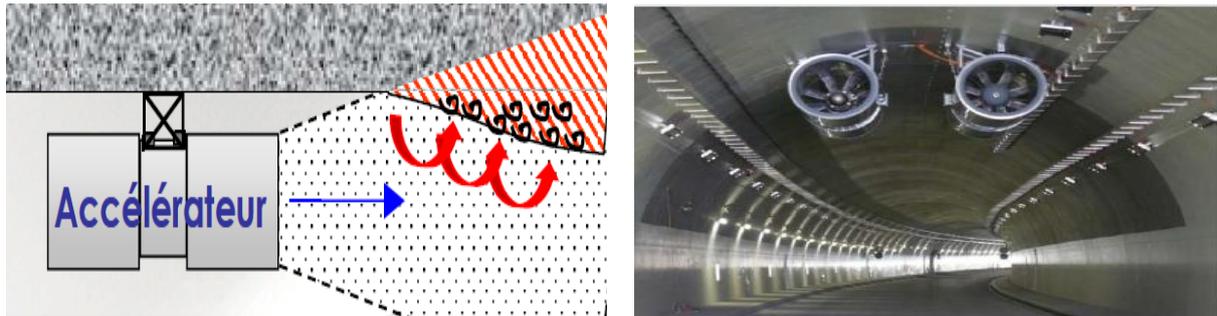


Fig. II.4.3 l'accélérateur.

b. Désenfumage :

Dans le cadre de la rénovation de la ventilation, un nouveau concept de ventilation de désenfumage a été conçu et mis en place par Setectpi.

Ce nouveau système consiste à extraire les fumées d'un incendie par l'ouverture de trappes de désenfumage télécommandables au niveau de l'incendie.

Ce nouveau concept permet d'augmenter l'efficacité du désenfumage et la sécurité des usagers. [9]



Fig. II.4.4 Trappe de désenfumage télécommandable.

II.5 Autre équipements :

1) Systèmes de communication et d'alerte :

Il est important pour un exploitant de pouvoir communiquer avec l'utilisateur. Cette communication doit pouvoir s'établir dans les deux sens : de l'exploitant à l'utilisateur et de l'utilisateur à l'exploitant. Ces échanges doivent être possibles dans toutes les situations d'exploitation : normale, dégradée ou critique.

1) Postes d'appel d'urgence :

Chapitre II : équipement généraux des tunnels

Les postes d'appel d'urgence permettent à un usager, victime d'un accident dans un tunnel, de contacter le centre de contrôle-commande en charge du tunnel. Outre l'établissement d'une liaison vocale, l'utilisation d'un poste d'appel d'urgence par un usager permet également sa localisation précise.



Fig. II.5 .1 Postes d'appel d'urgence.

2) Boutons-poussoirs d'alarme :

Les bouton-poussoir d'alarme permettent à un usager d'envoyer une alarme au centre de contrôle-commande en cas d'accident dans le tunnel. Ces équipements, assez peu coûteux, peuvent être installés à intervalles rapprochés.

Ce type de dispositifs n'est pas très utilisé car, dans une certaine mesure, il fait double emploi avec le poste d'appel d'urgence et surtout, il ne permet pas une communication dans les deux sens entre l'utilisateur et le centre de contrôle-commande.



Fig. 5.2 Bouton-poussoir d'alarme.

3) Alarme automatique lors de l'utilisation des systèmes à disposition des usagers en cas d'urgence :

Pour l'exploitant, il est impératif d'être informé au plus tôt de l'utilisation d'un de ces dispositifs par un usager. Cela ne pose pas de problème pour le téléphone de secours et les boutons poussoirs d'alarme dans la mesure où le poste de contrôle commande est souvent le destinataire soit de l'appel soit de l'information d'alarme. Quand le poste centralisateur des téléphones de secours n'est pas situé dans le poste de contrôle commande, il faut mettre en place des procédures pour que le service qui reçoit l'appel informe au plus vite le poste de contrôle commande.

4) Détection Automatique d'Incident (DAI) :

Chapitre II : équipement généraux des tunnels

Lorsqu'un tunnel est équipé d'un système de vidéosurveillance, les images provenant du tunnel et de ses abords sont visualisées sur des moniteurs installés dans le centre de contrôle-commande. Pour l'opérateur, il est difficile de surveiller simultanément plusieurs moniteurs avec la même vigilance durant plusieurs heures.

5) Radio-retransmission des fréquences FM grand public, des fréquences de l'exploitant et des services de secours :

Un tunnel est un milieu clos et confiné qui, le plus souvent, ne permet pas la propagation des ondes hertziennes émanant de stations de radio extérieures au tunnel. Afin de rétablir cette propagation, il est nécessaire de mettre en place un dispositif permettant la retransmission des fréquences souhaitées.

6) Haut-parleurs :

Les dispositifs qui permettent de s'adresser directement à l'utilisateur pour lui donner des informations ou lui indiquer une conduite à tenir sont peu nombreux. Pour tenter de répondre à ce problème, certains tunnels sont équipés de haut-parleurs. Dans la pratique, selon l'usage qui en est fait, les haut-parleurs offrent différentes fonctionnalités

7) Poteaux d'incendie :

Les poteaux d'incendie sont nécessaires dans le tunnel pour fournir un point de connexion à l'alimentation en eau pour les lances des sapeurs-pompiers. Les poteaux doivent être installés à intervalles réguliers dans le tunnel, Les éléments de connexion doivent être compatibles avec le matériel des services locaux pouvant intervenir dans l'ouvrage.

8) Extincteurs portatifs :

Des extincteurs portatifs sont mis à disposition à intervalles réguliers dans les tunnels routiers pour permettre aux automobilistes et au personnel d'exploitation de combattre un incendie d'ampleur limitée dans le tunnel avant l'arrivée des services de secours.[9]

9) Tuyaux d'incendie :

Des rouleaux de lances à incendie sont installés en tunnel dans certains pays, cependant cela ne représente pas une tendance générale puisque d'autres pays permettent aux services de secours d'apporter leurs propres lances dans le tunnel pour chaque événement.

CHAPITRE III :

Les tunnels dans

Un milieu urbain.

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.

III.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 [12].

III.2 Les raisons d'aller en souterrain :



Fig.III.1 construction d'un tunnel dans un milieu urbaine

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 :

III.2.1 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.[12]



Fig.III.2 : Coupe d'une intégration souterraine en milieu urbain

III.2.2 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. III. 3: Installation d'ouvrages nucléaires

III.2.3 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.
- **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.III.4: La variété des installations souterraines une traversée Vert.



Fig.III.5: Tunnel d'autoroute formant

III.3 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.

II.4 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 peut 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.III.6 Tunnel routier urbain

III.5 Evaluation des ouvrages souterrains :

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.

5.1 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.

5.2 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.

5.3 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

5.4 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.

5.5 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.

5.6 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.

5.6 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 :

- 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. 7: Coupe d'un ouvrage souterrain

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.

Conclusion générale

Conclusion générale :

L'importance croissante des considérations d'environnement et la saturation du sol devraient logiquement conduire à un accroissement du nombre des ouvrages souterrains, soit dans le domaine des installations industrielles, l'étude des tunnels c'est un cas des travaux souterrain dans certains pays, la classification sert de guide pour le projeteur, dans d'autres elle fait office de réglementation. Ce point doit faire l'objet de discussions dans chaque pays.

Quel que soit le système adopté, la classification des tunnels a partir de l'objet et le rôle du tunnel, mode d'exécution et la forme géométrique des ouvrages.

Il existe deux méthodes de construction des tunnels classique employée pour le percement des tunnels quelles que soient la cohésion des terrains et construction par le tunnelier, cette dernière est une machine complexe qui assure en continu les fonctions des excavation du terrain, stabilisation et soutènement du front de taille, soutènement provisoire des parois du tunnel juste derrière le creusement, évacuation des déblais, mise en place du soutènement provisoire ou du revêtement Définitif, guidage selon l'axe théorique prévu et avancement automatique à l'aide de vérins . dans chaque tunnel il y a un système de sécurité et des issues de secours aménagées dans tous les tunnels pour permettre aux usagers de rejoindre à pied, en cas d'incendie, un espace sûr après s'être enfuis de l'espace réservé à la circulation, dans chaque tunnel il y a des équipement est la plupart des équipements et des systèmes du tunnel nécessitent de l'énergie électrique pour fonctionner, une installation d'alimentation électrique dans le tunnel pour la lumière ne permet pas d'assurer des conditions de visibilité satisfaisante pour les usagers. Il est donc nécessaire d'installer un éclairage artificiel qui offre aux usagers des conditions de visibilité et de confort satisfaisantes. Ventilation-désenfumage sont des équipement très important , Selon le système de ventilation retenu, la forme de l'ouvrage, le nombre de voies de circulation, le nombre et la fonction des conduits d'air seul, air frais (AF) seul ou AF en fonctionnement normal passant en AV en cas d'incendie), des dispositions très variables peuvent être retenues pour assurer la communication entre les conduits d'air et le tunnel, Dans le cadre de la rénovation de la ventilation, un nouveau concept de ventilation de désenfumage.

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

Conclusion générale

logiques constructives qui font défaut à nos villes anciennes ; mise en galeries des réseaux concessionnaires, dessertes par des voies rapides, parkings, locaux techniques.

Bibliographie

Bibliographie :

- [1] Pierre Gesta, Travaux souterrains par Ingénieur de l'école centrale de paris.
- [2] dossier pilote des tunnels section 4, procédés de creusement et de soutènement de centre d'études des tunnels.
- [3] la baisse des couts des tunnels mesures, causes et conséquences école nationale des ponts et chaussées.
- [4] dossier pilote des tunnels section 4 procédés de creusement et de soutènement de centre d'études des tunnels.
- [5] Pierre Gesta, Tunneliers, Ingénieur de l'École Centrale de Paris.
- [6] dossier pilote des tunnels section 5 étanchement et revêtement de centre d'études des tunnels.
- [7] Guide du béton coffré en tunnel de centre d'études des tunnels.
- [8] cours Matériaux de construction MDC ,3^{eme} année licence hydraulique 2013- 2014
- [9] Manuel des tunnels routiers Association mondiale de la Route (AIPCR).
- [10] Architecture des têtes de tunnel de centre d'études des tunnels.
- [11] dossier pilote des tunnels section 6 équipements et à l'exploitation de centre d'études des tunnels.
- [12] Techniques de construction de tunnels en milieu urbain U.L.B. – Faculté des Sciences Appliquées.

Site internet :

<http://tunnels.piarc.org/fr/equipements-et-systemes/barrieres.htm>

<http://www.infociments.fr/genie-civil/travaux-souterrains/tunnels>

<http://tunnels.piarc.org/fr>

<http://www.cetu.developpement-durable.gouv.fr>

<http://www.aftes.asso.fr>

<http://www.universalis.fr/encyclopedie>

Symbole

E_m	Module pressiométrique
E'	Module de Young
E_c	Module d'élasticité du béton
E_s	Module d'élasticité de l'acier
P_l	Pression limite
A	Coefficient rhéologique du sol
γ	Densité du sol
Φ	Angle de frottement
ν	Coefficient de poisson
γ_s	Coefficient de sécurité des aciers (égale à 1.15)
σ_s	Contrainte admissible de l'acier
σ_{adm}	Contrainte admissible
σ_{max}	Contrainte maximum
τ	Contrainte tangentiel
f_{bu}	Contrainte admissible du béton
N	Effort normal
A_s	Section des armatures tendues
A'_s	Section des armatures comprimés
A_r	Section des armatures de répartition
f_{c28}	Résistance caractéristique du béton à la compression
f_{t28}	Résistance caractéristique du béton à la traction
f_e	Limite élastique de l'acier
G	Module de cisaillement
F	Force
D, φ	Diamètre
L	Longueur
Θ	Coefficient
g	Accélération de la pesanteur ($g=9.81\text{m/s}^2$)