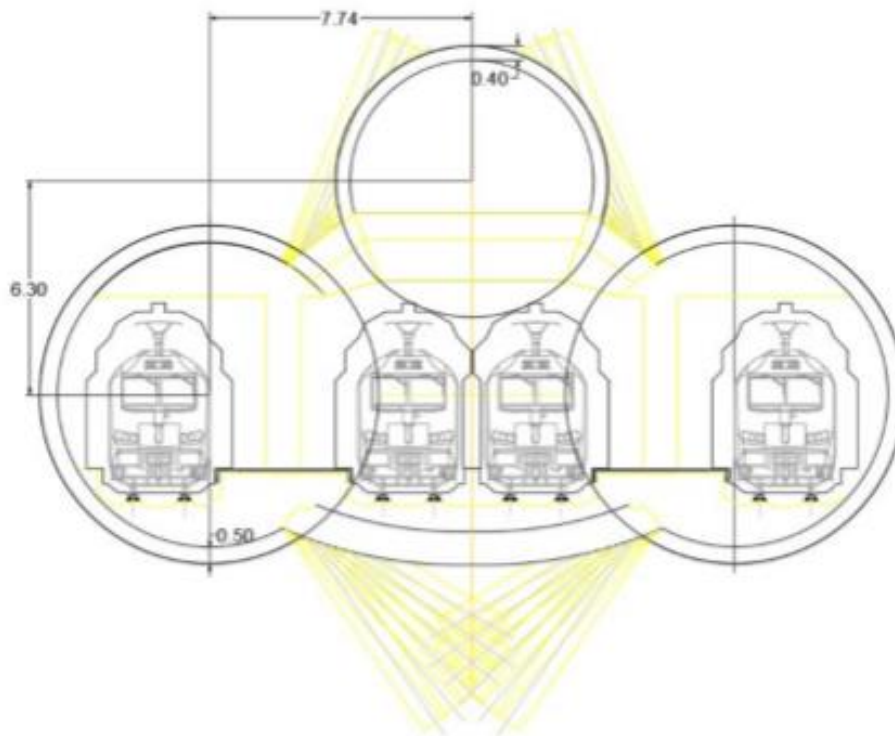


Etude de faisabilité des tunnels forés combinés



Maitre de stage : PROF. DIR. IR Hans De BACKER
Encadrant de stage : DIR Ken SCHOTTE

RESUME

Nous observons ces dernières années un accroissement du développement des villes en périphérie provoqué par la saturation du centre urbain. Il faut donc trouver de nouveaux espaces pour l'aménagement des transports pouvant relier la périphérie au centre. Les constructions souterraines semblent alors être la solution à ces problèmes.

Actuellement, nous construisons des tunnels indépendants reliés par des passages croisés. Mais cette configuration ne rentabilise pas l'espace souterrain car l'espace entre chaque tunnel devient inexploitable et il est donc perdu. C'est pour cette raison que nous recherchons de nouvelles configurations de tunnels plus compactes afin de combiner plusieurs tunnels sur un même espace et ainsi minimiser l'espace perdu. Nous avons donc décidé de travailler sur la faisabilité de construction des tunnels combinés.

De nombreuses méthodes de construction existent mais notre attention s'est tournée vers la méthode séquentielle et le tunnelier. En effet, ces deux méthodes sont le plus utilisées en milieu urbain car peu destructives. Nous cherchons alors à déterminer la méthode de construction qui pourrait réaliser les tunnels combinés. Au fur et à mesure de nos recherches, nous avons constaté que les tunnels combinés sont très peu appliqués dans le monde. Quelques stations de métro les utilisent notamment avec la configuration binoculaire.

En poursuivant nos recherches, nous nous sommes aussi rendu compte que la configuration des structures de secours devait être repensées. En effet, avec deux tunnels indépendants reliés par un passage croisé, celui-ci faisait office de chemin de secours pour évacuer les passagers. Cette configuration n'est donc plus envisageable dans les tunnels combinés. Nous avons donc pensé à de nouvelles configurations en utilisant notamment la partie supérieure du tunnel comme chemin d'évacuation de secours.

Même si la combinaison des tunnels est peu développée, nous voyons de nombreux avantages à son utilisation : nous utilisons le même espace avec plus de fonctionnalités, ce qui minimise la perte d'espace inoccupé. Elle permet aussi de réduire les manipulations sur le terrain ce qui réduit les risques d'instabilité du terrain.

Pour finir, cette nouvelle configuration de tunnel ouvre un axe de développement de recherche à une nouvelle utilisation du sous-sol en combinant les services dans un seul tunnel. En effet, la combinaison des tunnels permet d'avoir plusieurs espaces distincts pouvant accueillir chacun un usage et permettre ainsi le partage de l'espace avec d'autres modes de déplacement par exemple.

ABSTRACT

Underground constructions have steadily increased in recent years and seem to be the solution to an ever-increasing demand for mobility caused by urban sprawl or soil saturation. Underground constructions have many advantages since they not only allow the ground to be used for other activities such as housing or services, but also reduce noise and atmospheric pollution in the city.

Currently, tunnel configuration only allows for independent tunnels, which causes a lot of underground spaces to be lost. This is why we are looking for new configurations of more compact tunnels to minimize the space lost. These configurations are inspired by crossings between two adjacent tunnels which allow the evacuation of passengers in case of fire in one of the two tunnels.

Many methods of tunnel construction exist but our attention has turned to the sequential method and tunneling machine. Indeed, these two methods make it possible to obtain the shape of the combined tunnels but the stability in any type of ground is ensured. As our research progresses, we have found that combined tunnels are very poorly applied in the world. Some metro stations use them in binocular configuration.

By continuing our research to see the feasibility of the project, we realized that the configuration of the emergency structures should be re-evaluated. Indeed, with two independent tunnels connected by a cross passage, this one acted as emergency way to evacuate the passengers. This configuration is no longer feasible in combined tunnels. We thought of new configurations in particular to develop the top of the tunnel in emergency escape way.

Although the combination of tunnels is not very developed, we see many advantages to its use: we use fewer spaces with the same functionality, we do less field manipulation, which reduces risks and costs. Finally, this new configuration of tunnel opens a research development axis to a new use of the basement by combining the services in a single space. Indeed, the combination of the tunnels makes it possible to have several distinct spaces to each accommodate a use and thus allow the sharing of space.

REMERCIEMENTS

Je souhaite tout d'abord remercier Lien DE BACKER, qui s'est occupée des papiers administratifs de notre stage et qui a su m'accueillir de la meilleure des manières en me présentant à toute l'équipe et en m'aidant dans les démarches administratives de l'université.

Je remercie ensuite le doctorant Ken Schotte qui a été mon tuteur tout au long du stage avec qui j'ai pu discuter des problèmes que j'ai rencontré pendant mes recherches et qui m'a apporté des réponses de qualité. Grâce à lui, j'ai élargi ma connaissance dans le domaine du génie civil, dans les techniques de constructions des tunnels et aussi d'une manière générale sur la technique et la connaissance des tunnels. Ce qui me servira pour mon semestre 5 à l'ENTPE mais aussi dans mon futur métier.

Enfin, je remercie le professeur Hans DE BACKER, maître de stage, qui m'a accueilli au sein du groupe de recherche et qui m'a suivi tout au long de mon stage.

THESAURUS

Espaces souterrains, génie civil, innovation, méthode, recherche, sécurité, transport, tunnel

SOMMAIRE

Résumé	2
Abstract.....	3
Remerciements	4
Thesaurus.....	4
I. Organisme d'accueil et mission du stagiaire.....	6
I.1 University of Ghent	6
I.2 Mission du stagiaire.....	7
II. La combinaison de tunnels fores : Etapes de la recherche.....	8
II.1 Etat de l'art des techniques et configurations de tunnels combinés.....	8
II.2 Approfondissement de deux méthodes de construction de tunnels: la méthode séquentielle et le tunnelier	10
II.3 La construction des espaces souterrains liés à l'usage du métro	17
II.5 La planification urbaine et les espaces souterrains.....	25
II.6 Multi-usages des tunnels combinés	27
III. Synthèse du stage	29
III.1 Conclusion de l'étude	29
III.2 Perspectives d'évolution	29
Conclusion	30
Glossaire	31
Bibliographie.....	32
Annexe-PLANNING DES TACHES.....	35

I. ORGANISME D'ACCEUIL ET MISSION DU STAGIAIRE

I.1 University of Ghent

La ville de Gand se trouve dans la région flamande de la Belgique. C'est le chef-lieu de la province de Flandre-Occidentale qui a gardé un patrimoine fort de ces années de colonisation. Aujourd'hui, Gand est la première ville étudiante de Belgique avec une université et de nombreuses hautes écoles et établissements d'enseignement supérieur. La ville est devenue un centre de pointe en recherche dans de nombreux domaines, dont les biotechnologies.

University of Ghent (UGent) fut fondée à l'époque du Royaume uni des Pays-Bas, sous la gouvernance du roi Guillaume 1^{er} en 1817. Elle compte aujourd'hui 11 facultés alors qu'à l'époque de sa construction, elle n'en compté que 4. Les enseignements des facultés permettent d'acquérir des compétences dans un large spectre de domaines touchant à l'ingénierie et à l'architecture, à la médecine et aux sciences de la santé, aux sciences politiques et sociales, au droit et bien d'autres encore.

Faculty of engineering and architecture est l'une des 11 facultés que comprend l'université. Elle permet d'acquérir les connaissances techniques et culturelles qui permettront aux futurs diplômés d'exercer leur métier dans les nombreux domaines liés à l'ingénierie et à l'architecture tels que le génie civil, les mathématiques appliqués, la planification des villes, la chimie, les matériaux et encore bien d'autres domaines. La faculté est ainsi divisée en départements qui reprennent les différents domaines cités ci-dessus.

Département of Civil engineering permet d'obtenir un diplôme ciblé dans le génie civil. Le département comprend les domaines du génie civil (pont, route, tunnel, géotechnique) mais aussi du génie maritime (technologie maritime, hydrologie) et il permet de suivre les enseignements mais aussi de faire de la recherche.

Bridges, Roads and Tunnels Research Group est le groupe de recherche dans lequel j'ai effectué mon stage. Il est composé de plusieurs chercheurs qui s'interrogent notamment sur les questions de durabilité des matériaux vis-à-vis de la circulation routière, la fatigue, la déformation, sur la mobilité de demain, l'intégration du numérique dans la conception des ouvrages mais aussi sur leurs constructions.



Figure 1 : Le site Zwijnaarde où est situé le groupe de recherche

I.2 Mission du stagiaire

Dans un contexte de fort développement urbain, il est important de trouver des nouveaux espaces de mobilité afin de répondre non seulement aux besoins de la population mais aussi pour éviter la saturation des villes. La meilleure solution semble être pour l'instant l'exploitation du sous-sol pour ainsi créer un nouveau réseau de déplacement urbain.

Actuellement, la configuration des tunnels permet d'avoir des tunnels indépendants reliés par des passages croisés. Ce qui fait perdre de l'espace entre chaque tunnel. C'est pour cela qu'il faut trouver de nouvelles configurations de tunnels qui soient à la fois compactes et structurellement possible pour réduire l'espace perdu.

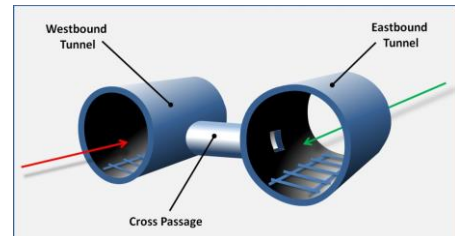


Figure 2 : Configuration de deux tunnels indépendants reliés par un passage

La combinaison de tunnels forés

Le groupe a travaillé sur la structure de la combinaison des tunnels forés et s'est arrêté sur la configuration ci-jointe. La configuration permet d'accueillir 4 rails de métro et il y a une partie supérieure qui peut être exploitée. La configuration est de deux tunnels d'un diamètre de 10 mètres (tunnels inférieurs) et d'un tunnel de 8 mètres (tunnel supérieur).

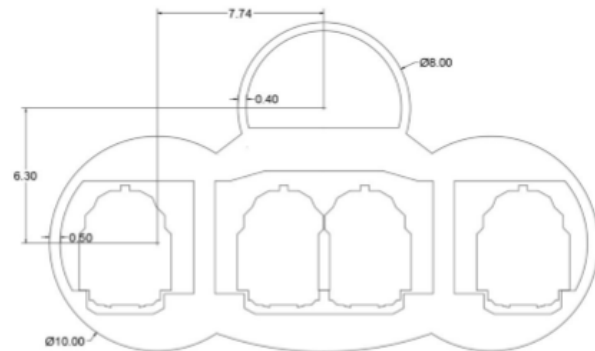


Figure 3 : Design final retenu pour la combinaison des tunnels

Objectifs du stage

Il m'est alors demandé de voir la faisabilité de ce projet en cherchant comment construire les tunnels combinés. Après un rapide état de l'art qui m'a montré que ce modèle était très peu développé dans le monde, j'ai étudié deux méthodes de construction de tunnels qui pourraient être utilisées pour la réalisation des tunnels combinés. Je me suis aussi intéressée aux structures de secours qui doivent être repenser afin de s'adapter à la nouvelle forme du tunnel. Enfin, avec ce nouveau design, j'ai réfléchi à l'exploitation des différents espaces qui pouvaient accueillir différents modes de transports. Vous retrouverez en annexe, le planning de mes tâches.

II. LA COMBINAISON DE TUNNELS FORES : ETAPES DE LA RECHERCHE

II.1 Etat de l'art des techniques et configurations de tunnels combinés

La recherche sur les tunnels combinés a commencé par un état de l'art sur les méthodes de construction et configuration d'ouvrages qui pouvaient exister sur le principe de la combinaison des tunnels.

II.1.1 Double bouclier circulaire

Le projet de transit massif rapide (MRT) de Taoyuan International Airport permet de relier l'aéroport aux villes de Taipei et de Zhongli. Il s'agit de la construction de voies de train express ayant pour objectif de fournir un service de transport de passagers de qualité et de réduire le trafic de la route principale qui relie Taipei à l'aéroport de Taoyuan. La longueur totale du projet est d'environ 51.03 kilomètres. Il existe 22 stations, dont 15 élevées, 7 sous terre et 2 dépôts de maintenance, à savoir Qingpu et Luzzu. Plusieurs méthodes ont été utilisées pour la construction de MRT :

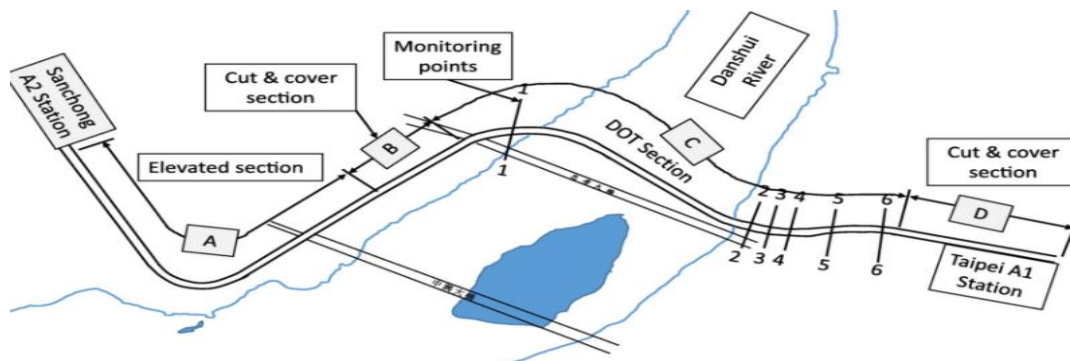


Figure 4 : Implantation des différentes méthodes de construction

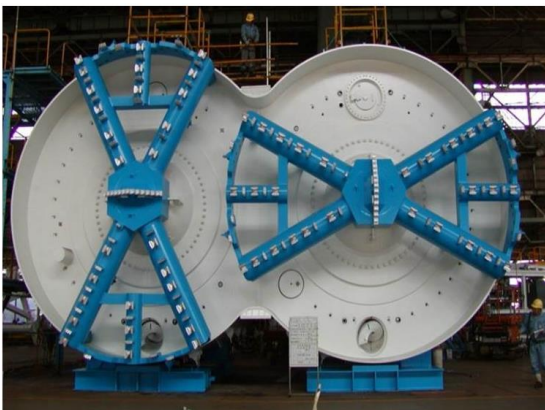


Figure 5 : Bouclier double

Section DOT (Double-O tunnel)

Au sud de l'aéroport, il a fallu adapter la méthode de construction pour la section qui passe sous la rivière. Afin de réduire les risques d'instabilité liés à la rivière, l'entreprise a utilisé un bouclier double pour construire deux tunnels à la fois. Cette méthode permet d'éviter de construire la liaison entre les deux tunnels qui aurait apportée beaucoup de risques.

II.1.2 Configuration binoculaire des stations de métro

Pour construire le métro de Santiago, les ingénieurs ont utilisé la méthode séquentielle. C'est une méthode de conception et de construction utilisée pour les tunnels modernes.

Pour les deux stations de métro situées dans les gisements dominés par l'argile sur la ligne 4 du métro, le modèle d'excavation utilisé est une configuration binoculaire. La conception comprend d'abord la construction du tunnel central qui est renforcé par un pilier en béton. Enfin, ils creusent les deux tunnels latéraux renforcés par une couche de béton projeté. Cette configuration permet de combiner deux tunnels afin d'avoir un espace plus grand pour la station de métro et ainsi accueillir de lignes deux métros.

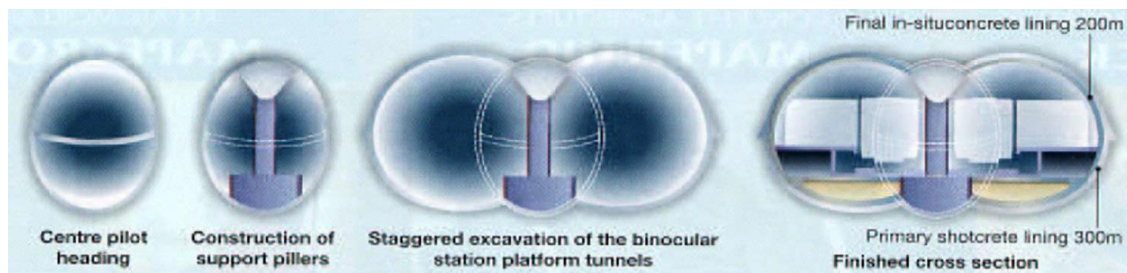


Figure 6 : Configuration binoculaire d'une station de métro

II.1.3 Conclusion

Il existe peu de méthodes et configurations de tunnels combinés, donc ce concept est nouveau. Nous allons oublier l'idée d'utiliser un double bouclier circulaire car cela est trop compliqué à exploiter et beaucoup trop cher. Néanmoins, nous allons chercher si avec un tunnelier « simple » nous pouvons construire des tunnels combinés. Dans cet état de l'art, la configuration de la station binoculaire est très intéressante pour la problématique car elle se rapproche du design retenu par le groupe de recherche.

A travers cet état de l'art, nous pouvons ainsi voir deux méthodes principales pour la construction de tunnels en zone urbaine : la méthode séquentielle et le tunnelier. Pour la prochaine étape, nous allons donc nous intéresser à ces deux méthodes pour voir si elles pourraient s'appliquer aux tunnels combinés.

II.2 Approfondissement de deux méthodes de construction de tunnels: la méthode séquentielle et le tunnelier

Les deux méthodes utilisées le plus en milieu urbain sont la méthode séquentielle et le tunnelier. Dans un premier temps, nous allons comprendre le fonctionnement de ces deux méthodes et puis dans un deuxième temps, comparer ses deux méthodes en synthétisant les caractéristiques de chacune et voir laquelle serait le plus adaptée pour la réalisation de tunnels combinés.

II.2.1 Etude géologique du sol

L'étude géotechnique du terrain est nécessaire car elle permet de savoir la composition géologique de l'environnement de travail et notamment savoir s'il y a une présence d'eau ou non. De manière synthétique, nous pouvons distinguer trois grandes catégories de sol :

- **Le sol non homogène** est constitué de plusieurs couches de sédiments. Les différentes couches ont très peu de résistance à la séparation ce qui en fait un sol instable.
- **Le sol mou** est un sol non compacté dans la roche qui est caractérisé par la présence d'eau. C'est donc un sol instable où il faudra prévoir une isolation hydraulique pour la structure du tunnel.
- **La roche dure** qui est le type de sol le plus stable.

Les études du sol permettent ainsi de choisir la méthode la plus adaptée pour construire le tunnel, celle qui permettra de faire les travaux de la manière la plus sûre mais aussi de réduire les coûts et le temps de construction.

II.2.2 Description des méthodes

II.2.2.1 New Austrian Tunneling Method

La méthode de construction de tunnel autrichienne est une méthode séquentielle qui repose sur la déformation internes des roches afin de supporter la structure du tunnel. C'est une répétition d'étapes réalisée tous les X mètres.

1 : Le creusement du tunnel. Il existe différents méthodes et modèles de creusement en fonction de la nature du sol.

Pour des sols stables, on utilisera les explosifs pour « creuser » le tunnel. Le modèle d'excavation est alors appelé « full face ».

Pour les sols moins stables où l'on peut retrouver différentes couches de roches, on utilisera des machines à attaque ponctuelle pour fracturer la roche.

Le type de modèle utilisé varie en fonction du degré d'instabilité du terrain. Le principe du modèle est de découper la face d'excavation en plusieurs parties afin de contrôler la stabilité du terrain.



Figure 7: Machine à attaque ponctuelle pour creuser le tunnel

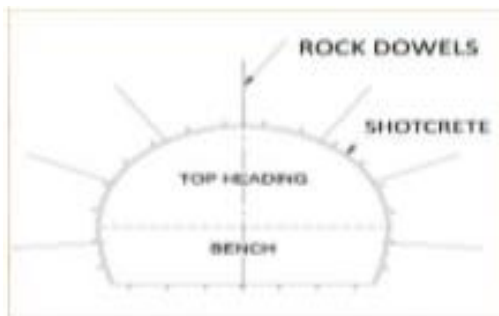


Figure 8: Excavation du tunnel en deux parties avec le modèle du Top heading/bench

2 : Le soutènement primaire vient supporter la partie excavée du tunnel. Cette consolidation se fait avec du béton projeté sur la partie centrale du tunnel ainsi que sur les parois. Le support primaire est une fine couche d'environ 200 mm.



Figure 9: Application du béton projeté sur la partie excavée du tunnel

3 : Le soutènement secondaire vient renforcer le soutènement primaire par des tiges en métal, des arcs et mailles en acier. Ce renforcement provient d'une grande déformation du sol dont le soutènement primaire ne peut pas supporter à lui tout seul. Après avoir installé les renforcements secondaires, une seconde couche de béton projeté est appliquée.



Figure 10: Exemple de montage d'arc en acier (gauche) et de maille en acier (droite) renforçant la structure primaire

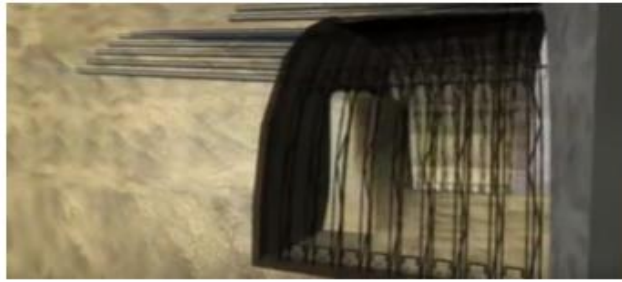


Figure 11: Méthode du forepoling¹ : application de tiges de métal pour supporter la prochaine excavation

4 : Les contrôles de mesures sont effectués tout au long de la construction du tunnel. Ils étudient la déformation de la roche et déterminent les renforcements secondaires à mettre en place. Les principaux contrôles effectués sont les mesures du stress observé dans le béton, les déformations de la roche et la déformation des surfaces alentours à l'excavation. Ces contrôles permettent d'assurer la stabilité et la sécurité du tunnel et des ouvriers tout au long de la construction.

Synthèse NATM : *NATM est une méthode séquentielle qui se décompose en une succession d'étape : creusement, soutènement primaire et secondaire et campagnes de mesures et de contrôles effectuées pour assurer la stabilité de l'ouvrage.*

II.2.2.2 Tunnel Boring Machine (TBM)

TBM est une méthode de construction de tunnel qui utilise un tunnelier pour creuser et, dans certains cas, soutenir le tunnel. De manière générale, la machine est de forme circulaire et de diamètre variable : de 1 mètre (micro tunnelier) à 15 mètres. La machine avance au fur et à mesure de l'excavation du sol et la consolidation de la structure se fait pendant ou après l'excavation. Les principaux composants du tunnelier sont les suivants :

- **La tête de coupe** qui sert à excaver le front de taille du tunnel. Avec un mouvement circulaire, elle va fracturer les roches ce qui va permettre le creusement. En fonction du type de sol, il existe différentes têtes de coupe.
- **La chambre de forage** se situe juste derrière la tête de coupe et permet de recueillir les chutes du sol pour ensuite les évacuer.
- **Le train suiveur** permet d'évacuer les chutes de sol mais aussi de ramener les différents matériels nécessaires au soutènement de la structure.

D'autres éléments constituent le tunnelier en fonction du type de machine. Le type de machine est choisi en fonction de la stabilité du front de taille. On distingue alors deux catégories de tunnelier :

- **Les tunneliers à bouclier ouvert** : Ces tunneliers assurent seulement le creusement du tunnel. Pour avancer, la machine est équipée d'un

¹ Forepoling : voir glossaire pour définition

système de grappe qui permet de s'appuyer contre les parois du tunnel. Ce type de tunnelier est utilisé dans les sols où le front de taille est stable. Comme le tunnelier n'est pas équipé de système de soutènement, la mise en place du support du tunnel se fait après excavation.

- **Les tunneliers à bouclier fermé :** Ces tunneliers permettent de creuser et de soutenir le tunnel en même temps. Lorsque le tunnel creuse, la partie auparavant excavée commence à être renforcée à l'aide d'un érecteur de voussoirs qui permet de mettre en place les voussoirs les uns après les autres pour former les parois de la structure. Ce type de tunnelier est utilisé lorsque le front de taille est moins stable et quand il y a une présence d'eau dans le terrain. Le tunnelier est composé d'une tête de coupe qui sera renforcée afin d'assurer la stabilité du front de taille. On distingue alors deux types de renforcement :
 - **Bouclier à air comprimé :** La stabilité du front de taille est assurée par une pression répartie uniformément sur le sol de manière à équilibrer la poussée du sol ou la pression hydrostatique. Cette pression s'exerce sur la tête de coupe grâce à une chambre sous pression située derrière la tête. Ce type de bouclier est utilisé lorsque le sol n'est pas trop perméable.

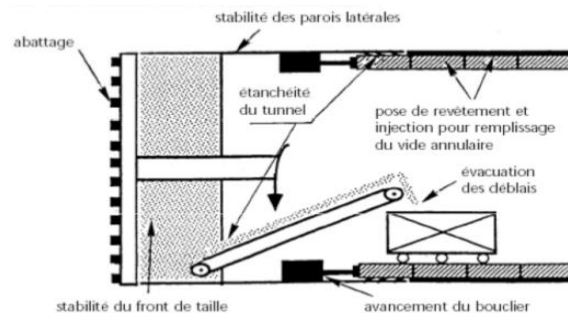


Figure 12: Exemple de tunnelier à air comprimé

- **Confinement par boue :** La boue de bentonite est une boue imperméable qui permet de stabiliser le front de taille en exerçant une pression contraire à celle du sol. Le mélange boue + sol est extrait au moyen de pompes hydrauliques.

Synthèse TBM : Le tunnelier est une vraie usine de construction de tunnel. En effet il permet le creusement et le soutènement de celui-ci dans n'importe quel type de sol, même en présence d'eau, grâce à ses différents types de bouclier (bouclier ouvert pour les sols stables, bouclier fermé pour les sols instables avec stabilisation du front de taille).

II.2.3 Comparaison des deux méthodes NATM et TBM

Dans cette deuxième partie, j'ai comparé les deux méthodes selon les différents points qui me semblaient essentiels pour la réalisation des tunnels combinés.

a) Caractéristiques du tunnel

- **Longueur du tunnel** : De par son aspect économique, le tunnelier sera le plus souvent utilisé dans la construction de longs tunnels afin de rentabiliser son coût d'achat. La méthode séquentielle sera quant à elle utilisée dans les tunnels de faible longueur car c'est un processus itératif long.
- **Forme de la section** : Le tunnelier propose des tunnels de forme circulaire et rectangulaire mais le diamètre peut varier pouvant aller de 1 à 15 mètres. Tandis qu'avec la méthode séquentielle, les formes du tunnel peuvent être beaucoup plus complexe en découpant la face d'excavation en plusieurs parties. La hauteur moyenne d'une section de tunnel avec la méthode séquentielle peut varier de 6 à 8 mètres.

De plus, avec la section du tunnelier nous pouvons avoir qu'une seule voie de circulation dans la section alors qu'avec la méthode séquentielle, nous pouvons avoir des tunnels à double voies.

b) Sol

- **Type de sol** : Le tunnelier est utilisé pour tout type de sol : sol homogène stable ou instable et en présence de nappes phréatiques grâce à ses différents types de bouclier. Quant à la méthode séquentielle, elle sera le plus souvent utilisée dans des sols stables homogène ou non avec une faible présence d'eau.
- **Stabilité** : La stabilité est assurée avec les deux méthodes car avec la méthode du tunnelier, les machines sont équipées de façon à répandre une pression homogène suffisante assurant la stabilité du terrain. Pour la méthode séquentielle, si le sol est trop instable, le modèle d'excavation est ajustable ; c'est à dire que s'il y a des zones d'instabilité dans le terrain, on découpera l'excavation du tunnel en plusieurs parties afin de contrôler le risque d'instabilité. De plus, la méthode séquentielle présente de nombreux contrôles et mesures afin de voir l'évolution de la déformation du terrain.

c) Environnement

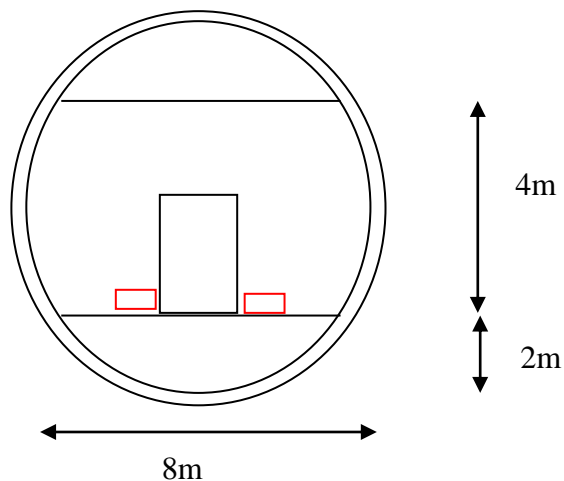
- **Mise en place** : La mise en place du tunnelier requiert d'avoir un grand espace sur le site de construction car la machine est assemblée sur place. Il faut aussi creuser des puits d'accès pour introduire la machine et la sortir afin de la positionner à la profondeur souhaitée. Il faudra aussi stocker sur le site les différents matériels utilisés pour le soutènement. Pour la construction d'un

tunnel avec la méthode séquentielle, l'espace pour la mise en place est moins important.

- **Rapport à l'environnement :** Les problèmes de bruit et de vibrations sont des facteurs importants durant la construction d'un tunnel car souvent ils sont construits en site urbain donc il est nécessaire de ne pas gêner les activités. TBM et NATM sont des méthodes « douces » qui ne gênent en rien la continuité des activités en surface.

II.2.4 Questionnement 2^{ème} étape

Après avoir bien compris le fonctionnement de chaque méthode, je me suis demandée pourquoi combiner les tunnels si une section construite avec un tunnelier d'un diamètre pouvant aller jusqu'à 15 mètres ne pouvait pas contenir plusieurs rails de métro. La section d'un tunnelier est circulaire et le diamètre que l'on retrouve le plus souvent dans les constructions est de 8 m. A la mise en place des voussoirs, le diamètre du tunnel peut perdre de 0,30 m à 0,80 m d'épaisseur. A cela, la partie supérieure du tunnel est souvent utilisée pour la ventilation et la partie inférieure pour faire passer les câbles électriques, les réseaux d'assainissement ou d'eau. De plus, si nous prenons qu'un métro fait environ 2m30 de hauteur sur 3m de largeur et que de chaque côté il faut rajouter 1m de largeur pour les chemins d'évacuation cela nous amène donc à une largeur d'occupation de 5m sur un total de 7,40m. Donc pour respecter les mesures de sécurité, il n'y a pas de place pour un deuxième métro.



C'est pourquoi, dans la littérature, nous retrouvons beaucoup de tunnels simple voie construit avec un tunnelier et de tunnels double voies construit avec la méthode séquentielle. Car la forme des tunnels avec cette méthode est plus arrondie que circulaire donc elle permet d'accueillir deux métros.

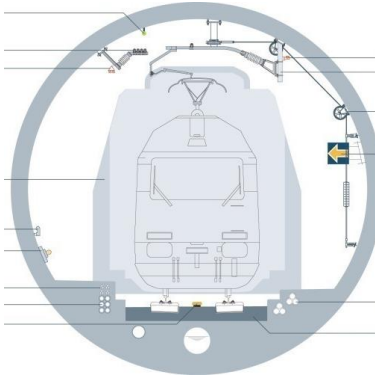


Figure 14 : Section obtenue avec un tunnelier

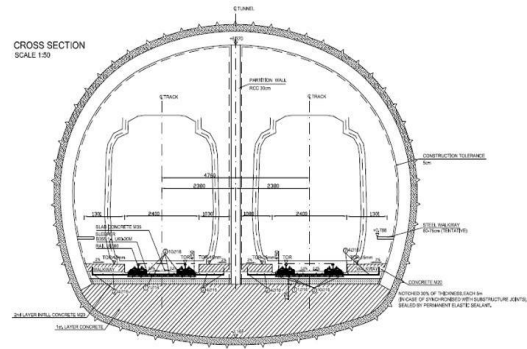


Figure 15 : Section obtenue avec la méthode séquentielle

II.2.4 Synthèse 2^{er} étape

A travers l'étude des deux méthodes de construction de tunnel, j'ai récapitulé les différentes caractéristiques de chaque méthode ans le tableau ci-dessous.

	NATM	TBM
Type du sol	Tous types mais faible présence d'eau	Tous types
Longueur du tunnel	Tunnel de longueur < 6km	Plus rentable pour de grande longueur
Forme du tunnel	Flexible	Circulaire
Stabilité	Contrôlée avec le modèle d'excavation et les mesures	Contrôlée en adaptant la machine

Figure16: Synthèse des méthodes NATM et TBM

Ce tableau retrace de manière théorique les caractéristiques des deux méthodes. Mais la théorie n'est qu'une base et dans la pratique, il se peut que l'on retrouve des projets de tunnels construit avec la méthode séquentielle qui ont une longueur de 10 kilomètres et un tunnel de 2 kilomètres construit avec un tunnelier. Ce tableau est donc indicatif.

Pour répondre à la problématique de la construction des tunnels combinés, les deux méthodes semblent dans un premier temps possible. En effet, avec la méthode séquentielle, nous pouvons contrôler la forme de cette nouvelle configuration de tunnel qui est très complexe à réaliser. Cette méthode est aussi adaptée pour vérifier la stabilité du terrain à chaque étape. Mais elle semble montrer des limites dans son utilisation qui est restreinte dans des types de sol humide ou proche de la nappe phréatique. L'application des tunnels combinés avec le tunnelier semble plus complexe. En effet, l'utilisation de la machine me paraît trop « destructive » pour pouvoir construire des tunnels imbriqués les uns dans les autres dû aux nombreuses vibrations de la machine qui pourrait perturber la solidité du premier tunnel. Il faudra alors faire des recherches approfondies sur l'utilisation du tunnelier (autre que le double bouclier circulaire présenté dans l'état de l'art) avec les tunnels combinés.

II.3 La construction des espaces souterrains liés à l'usage du métro

L'étude des tunnels combinés s'étudie dans le cadre d'une demande de la ville de Bruxelles afin de construire un nouveau métro. C'est pourquoi, à travers des cas d'études utilisant la méthode séquentielle et le tunnelier, j'ai recherché comment on construisait les espaces souterrains du métro, et s'il était possible de remplacer la configuration actuelle des tunnels par des tunnels combinés.

II.3.1 Généralités sur l'espace souterrain du métro

L'espace souterrain lié à l'usage du métro est composé de trois parties :

- **Le tunnel**



- **La station de métro** est l'endroit où les passagers attendent le métro. Elle est constituée d'un quai, et de la station (la structure de la voûte).



- **L'accès à la station** qui correspond au cheminement des passagers depuis l'entrée de la station jusqu'au quai.



II.3.2 Construction des espaces souterrains du métro avec la méthode séquentielle

Le métro de Santiago a été construit dans les années 70 avec la méthode des tranchées ouvertes. Cette méthode a causé beaucoup de perturbations à la surface du tunnel, c'est pour cela que la société a décidé de changer de méthode et de passer à la construction forcée de tunnel. Cette méthode est moins perturbante pour les surfaces environnantes et plus économique. Depuis, ils utilisent la méthode séquentielle pour de nouveaux travaux.

Nous allons nous intéresser à l'extension de la ligne 5 du métro de Santiago. Cette extension mesure 10,9 kilomètres de long. La géologie du terrain comprend différents types de sols : gravier, sable, limon, roche volcanique ce qui fait que la méthode séquentielle a été privilégiée à l'utilisation d'un tunnelier.



Figure 17 : Composition du sol observée pendant la construction du tunnel



Figure 18 : Composition du sol observée pendant la construction de l'accès à la station

II.3.2.1 Construction du tunnel

Le tunnel comprend deux voies de circulation et sa section est de type « fer à cheval ». C'est une section souvent utilisée dans les tunnels ferroviaires car elle présente une section plane au niveau du sol. Cela est très pratique pour le passage du train. La section du tunnel fait 60 m² avec un diamètre de 10 mètres.

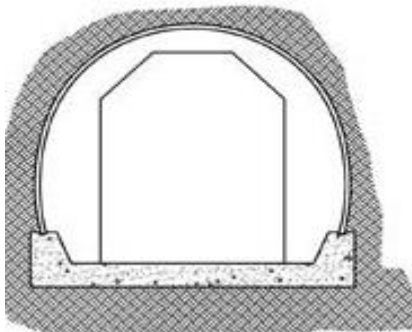


Figure 19 : Section en forme de fer à cheval



Figure 20 : Tunnel double voies

Le soutènement primaire après excavation a été garanti par du béton projeté renforcé par des tiges d'acier. Le soutènement secondaire se compose quant à lui d'un arc en béton projeté renforcé par un treillis métallique et soutenu par une dalle inférieure.

II.3.2.2 Construction de l'accès à la station

La construction de l'accès à la station se fait en 3 étapes : l'excavation de la partie supérieure (top heading) dont un support de tiges métalliques

(forepoling) a été préalablement mis, puis l'excavation de la partie centrale (bench) et pour finir l'excavation inverse (invert).

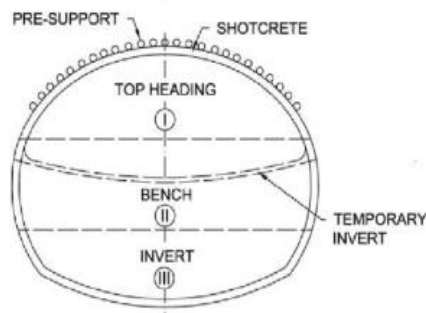


Figure 21 : Configuration de l'excavation de l'accès à la station

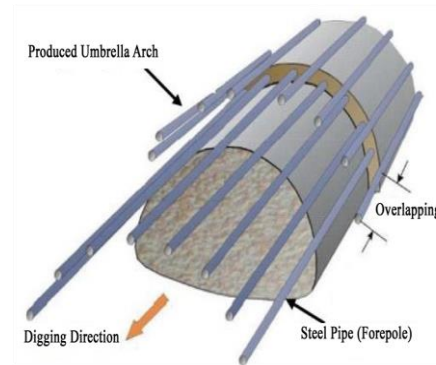


Figure 22 : Méthode du forepoling



Figure 23 : Excavation de l'accès à la station

II.3.2.3 Construction de la station de métro de la ligne 4

Pour la problématique des tunnels combinés, une configuration avec la méthode séquentielle dans la construction de deux stations de la ligne 4 du métro peut être intéressante. Il s'agit de la configuration binoculaire. Ces stations se trouvent dans un terrain dominé par de l'argile. La construction se fait en 3 étapes : tout d'abord le tunnel central est creusé puis renforcé par une colonne centrale en béton. Puis, les tunnels adjacents sont creusés afin d'y accueillir la station du métro. Pour finir une couche de béton projeté est posé afin de soutenir la structure.

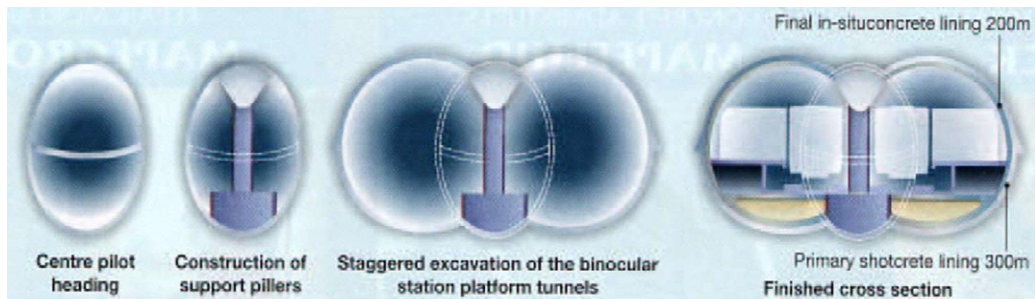


Figure 24 : Configuration de la méthode binoculaire



Figure 25 : Intérieur de la station Plaza Egana construite avec la méthode binoculaire

II.3.3 Construction des espaces souterrains du métro avec le tunnelier

La construction de l'extension du métro de Prague a commencé en avril 2010 pour une ouverture à la circulation en 2014. L'extension mesure 6 kilomètres. La géologie du terrain est principalement composée de roche de schiste argileux.

II.3.3.1 Construction du tunnel

L'extension comporte deux tunnels à simple voie de 4,8 kilomètres, construit à l'aide de deux tunneliers à pression de terre d'un diamètre de 6 mètres. L'autre partie de l'extension d'une longueur de 1,3 kilomètres est constituée de tunnels doubles voies construit avec la méthode séquentielle.



Figure 26 : Intérieur du tunnel



Figure 27 : Deux tunnels à voie unique

II.2.3.3 Construction de l'accès à la station

Pour la construction de l'accès à la station, on peut supposer que celle-ci est préconçue par les puits d'accès du tunnelier. Lorsque l'on veut construire un tunnel avec un tunnelier, il faut construire un puit d'accès qui permet d'insérer la machine à la profondeur souhaitée pour qu'elle commence à forer le tunnel.



Figure 28 : Construction des puits d'accès pour le tunnelier

Comme il n'y a pas d'autres informations sur la construction de l'accès à la station, je pense que celle-ci doit être finie avec la méthode séquentielle. Comme les parois des puits sont déjà renforcées en béton, il ne manquera plus qu'à mettre les différentes installations et équipements.

II.3.3.2 Construction de la station de métro

J'ai recherché des configurations de tunnels combinés construites avec un tunnelier mais en vain, cela n'a pas encore été réalisé. La station Veleslavin du métro de Prague a été construite avec la méthode séquentielle. Elle présente une faible hauteur sous la surface et elle se situe dans une zone de sédiments argileux ce qui explique que la station a été construite sous le modèle binoculaire afin de mieux contrôler la stabilité du terrain. La construction s'est déroulée en trois étapes : tout d'abord l'extraction des deux tunnels adjacents. Ensuite les deux tunnels ont été soutenus avec une doublure imperméabilisée et deux piliers centraux afin de soutenir la future arche du tunnel. Enfin le tunnel du milieu a été construit.

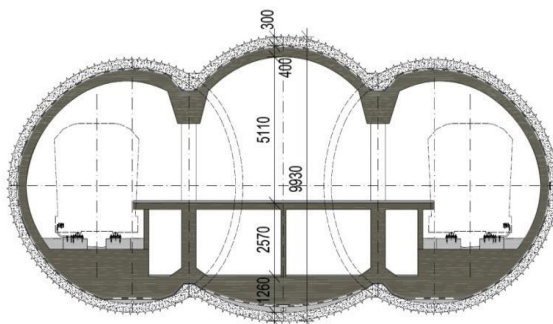


Figure 29 : Coupe transversale de la station



Figure 30 : Construction de la station

Le niveau de la station est à 20,4 mètres sous la surface et la longueur totale de la station est de 201 mètres. Les caractéristiques de la station donnée par la société Metroprojekt Praha a.s. sont :

Largeur maximale : 22.34 m

Hauteur maximale : 10.25 m

Si on applique une règle de trois avec les mesures données sur le dessin pour déterminer la distance entre les deux piliers centraux (donnée demandée lors d'une réunion), je trouve une distance d'environ 6 m entre les deux.

II.3.4 Conclusion sur la faisabilité des tunnels combinés dans les stations de métro

Nous avons vu à travers ces deux exemples de construction que seule la méthode séquentielle est utilisée dans la construction de tunnels combinés. J'ai donc cherché à comprendre pourquoi avec un tunnelier cela n'était pas possible. Je me suis donc questionnée sur la distance minimale qu'il devait y avoir entre deux tunnels construits avec un tunnelier. J'ai donc trouvé dans un article scientifique les données suivantes :

« La distance entre deux tunnels influe sur l'affaissement de la surface, le moment de flexion et les forces axiales dans le soutènement fait avec les voussoirs ». Donc plus on rapproche deux tunnels construits avec le tunnelier, plus il y 'aura des dommages dans le soutènement du premier et sur la surface du sol urbain. La distance à respecter entre deux tunnels n'est pas une donnée fixe. Je pense qu'elle dépend de la section du tunnel ainsi que de la stabilité du sol. Pour finir, je pense que la construction de tunnels combinés n'est pas donc pas réalisable avec le tunnelier vu que cela endommage la structure du premier tunnel.

De plus, la combinaison des tunnels n'est appliquée qu'aux stations de métro et non à l'ensemble du tunnel.

Donc nous pouvons en conclure à ce stade de la recherche que la réalisation de tunnels combinés ne peut se faire qu'avec la méthode séquentielle.

II.4 Structures de secours incluent dans la construction du tunnel

La conception du tunnel doit tenir compte des installations de secours qui permettent l'évacuation des passagers et du personnel ainsi que l'intervention des secours en cas d'accident ou d'incendie dans le tunnel. Ces structures doivent répondre aux exigences de sécurité données par les directives européennes.

II.4.1 Structure de secours

Les structures de secours permettent aux passagers d'échapper le plus rapidement de la zone dangereuse. Dans les stations de métro, le concept d'évacuation repose sur 3 principes :

- Les stations sont très grandes avec de nombreux couloirs et accès. Il faut donc avoir des signalisations claires et un plan d'évacuation d'urgence.
- Distance courte entre les stations (400 à 600 m, max 750 m à Bruxelles). La distance courte entre deux stations est une situation à prendre en compte car si un incendie est déclaré dans une station, la prochaine station pourrait également être évacuée.
- Le freinage d'urgence du métro dans le tunnel.

Les différentes façons de rejoindre les sorties du tunnel dépendent de sa configuration et sont données par la directive européenne relative à la sécurité dans les tunnels ferroviaires :

- **Passage transversal d'urgence** : Les passages croisés relient deux tunnels adjacents. En cas d'accident, l'évacuation se fait sur un autre tunnel qui est en sécurité. Pour les tunnels de longueur supérieure à 1 km, la hauteur et largeur minimale du passage croisé sont de 2,25 m x 1,50m. Ces passages doivent être implantés au moins tous les 500 m.

Exemple : Dans la conception et la construction de Taipei MRT, un passage croisé est mis en place tous les 250 à 500 m de tunnels à double voies pour une longueur totale du tunnel de 11 km.

- **Cheminement piéton de secours** : La voie piétonne de secours longe l'ensemble de la voie du tunnel. Dans les tunnels à voie unique, la voie piétonne est sur l'ensemble de la voie et dans les tunnels à double voie, elle est sur l'ensemble de chaque voie. Pour les tunnels combinés qui comprennent plus que deux voies, la voie piétonne doit être accessible depuis chaque voie. Pour les tunnels de longueur supérieurs à 0,5 km, la hauteur et largeur minimale de la voie piétonne sont de 2,25 m x 0,75 m. Ces moyens permettent aux passagers de rejoindre la sortie de secours.
- **Tube d'échappement parallèle** : pour les tunnels à voie unique, il est possible d'avoir un tube d'échappement parallèle pour évacuer les passagers. La

connexion entre le tunnel et le tube d'échappement peut se faire avec un passage croisé ou une sortie de secours.

- **Sorties d'urgence :** les sorties d'urgence permettent l'évacuation des passagers à la surface du tunnel. Pour les tunnels de longueur supérieure à 1 km, la hauteur et largeur minimale des sorties de secours sont de 2,25 m x 1,50m. Ces sorties doivent être implantées au moins tous les 1 km.

II.4.2 Nouvelles configurations d'espaces de secours dans les tunnels combinés

Pour les configurations de tunnels combinés, nous voyons que les anciennes structures de secours sont obsolètes pour la plupart. En effet, en combinant les tunnels, nous n'avons plus besoin de passages croisés ni de tubes de secours adjacent. Il faut alors trouver de nouvelles solutions pour évacuer les passagers en cas de problèmes. Pour cela, nous gardons toujours les cheminements piétons de secours le long des voies de circulation. La configuration des tunnels combinés se retrouve beaucoup dans les tunnels routiers donc, en s'appuyant sur ce qui peut se faire dans ces tunnels à plusieurs étages, nous pouvons avoir la proposition de configuration de secours suivante :

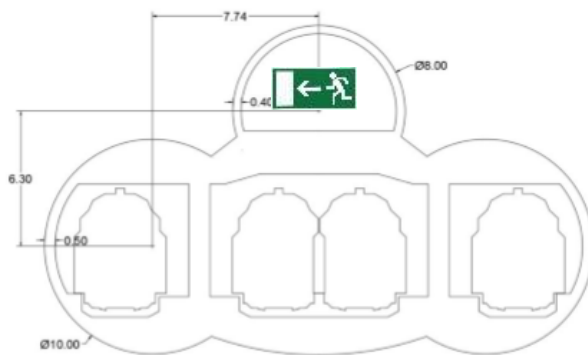


Figure 31 : Proposition de configuration des espaces de secours dans les tunnels combinés



Figure 32 : Exemple de configuration des espaces de secours dans les tunnels routiers

Nous pouvons placer une issue de secours dans la partie supérieure du tunnel. Nous pouvons supposer que l'accès à la station se fait par le haut pour l'ensemble des voies. Peut-être qu'il faudrait aménager des voies de secours à côté des pistes extérieures pour gérer le flux de passagers lors de l'évacuation. Nous pouvons donc en conclure que l'aménagement des structures de secours dans la configuration des tunnels combinés s'y insère bien et est possible.

II.5 La planification urbaine et les espaces souterrains

Au fur et à mesure que la population mondiale a augmentée, en particulier dans le centre-ville, les systèmes de transport souterrain se sont multipliés afin de résoudre divers problèmes que nous allons évoquer dans cette partie. Dans cette section, nous voyons d'abord les avantages de l'utilisation de l'espace souterrain d'un point de vue général et, deuxièmement, les avantages de l'utilisation de tunnels combinés par rapport à des tunnels indépendants.

II.5.1 Avantages de l'utilisation du souterrain

Les environnements urbains denses font face à des problèmes en raison de l'absence d'espace au sol pour les transports, le logement et les services. Cet environnement urbain crée de nombreux problèmes comme la congestion du trafic, des mauvaises conditions environnementales, le bruit et la pollution de l'air qui engendre une mauvaise qualité de vie.

Les espaces souterrains sont une solution pour la planification des transports afin de laisser les espaces urbains en surface pour le logement et les services. En enterrant les transports, nous réduisons la congestion du trafic, le temps de trajet et nous laissons le sol en surface aux autres activités urbaines.

Le développement des transports publics permet d'offrir une offre différente de celle de la voiture, qui, dans certains cas (tram et métro), réduit la circulation routière. Les métros, déconnectés du trafic routier, permettent une économie de temps sur le déplacement. En outre, ils n'utilisent pas d'espace sur le sol ; ils sont soit enterrés soit élevés, donc ils sont une bonne alternative au manque d'espace dans les villes. En développant aussi une offre de qualité des transports publics, nous incitons les personnes à les emprunter ce qui réduit le trafic de surface. Cela entraîne donc une réduction des émissions de polluants dans l'air et le bruit.

D'un point de vue environnemental, avec la concentration de la population, les zones urbaines sont particulièrement vulnérables aux catastrophes naturelles. La croissance de la population entraîne une urbanisation et, par conséquent, l'augmentation des installations artificielles entraînant de nombreux problèmes. En imperméabilisant le sol pour urbaniser les villes, cela provoque des inondations. En utilisant les espaces souterrains, les liaisons de transport seront moins vulnérables aux aléas climatiques. Si nous laissons l'espace urbain pour le logement, les services et les activités, et si nous enterrons les systèmes de transport, la qualité de vie sera meilleure car il y aura de la place pour développer les espaces naturels (parc, verdure).

II.5.2 Avantages d'utiliser les tunnels combinés

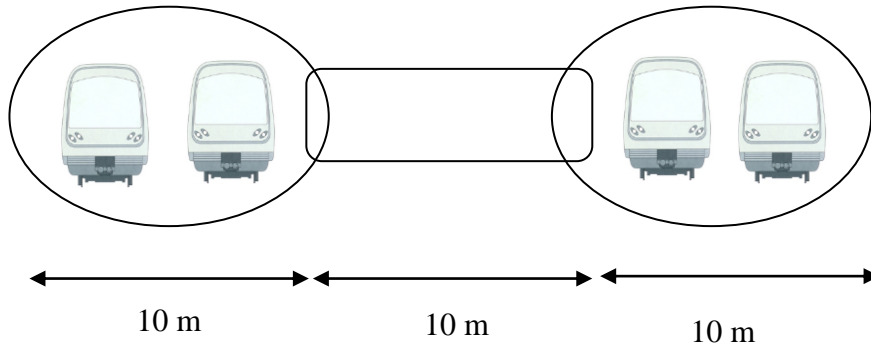
On pourrait penser qu'en combinant les tunnels, nous gagnerions plus d'espace mais je ne pense pas que cela soit vrai directement. J'ai beaucoup réfléchi à cette idée, j'ai essayé de quantifier le gain d'espace (voir page suivante) mais au final cela n'a rien conclu. Mais la combinaison des tunnels permet une meilleure planification du souterrain, ce qui veut dire que nous pourrions construire de nouveaux tunnels beaucoup plus proches des anciens avec la connaissance de la technique. Donc de ce point de vu, oui il y'aura un gain d'espace.

Si on essaye de quantifier le gain d'espace, partons sur les hypothèses suivantes :

Configuration de deux tunnels indépendants reliés par un passage croisé :

Diamètre tube : 10 m (Le diamètre permet d'accueillir deux voies de métro)

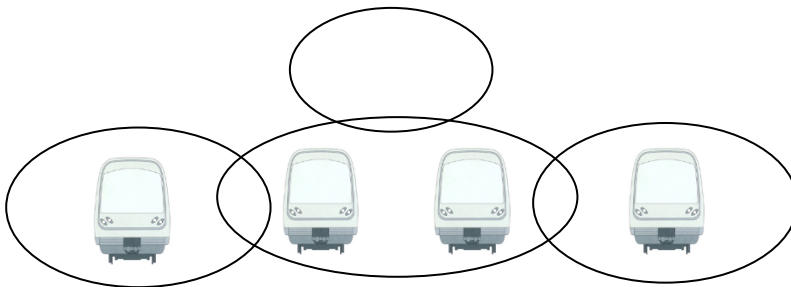
Distance entre les deux tubes : 10 m (Longueur moyenne pour un passage croisé)



Configuration de tunnels combinés :

Diamètre tube inférieur 10 m

Diamètre tube supérieur : 8 m



Comme je n'ai pas toutes les distances voulues pour pouvoir calculer les volumes de chaque configuration, je ne peux pas quantifier le gain. Mais il est à noter que le gain n'est pas énorme sur une station mais peut être rentable sur la combinaison des tunnels de passage de métro puisque nous supprimerions les passages croisés qui sont source de perte d'espace.

D'autres avantages des tunnels combinés sont la réalisation d'espaces plus étendus et le regroupement des services de maintenance (câbles électriques, conduites d'eau, etc.). Pour la structure du tunnel, l'utilisation de tunnels combinés réduit la manipulation sur le chantier, donc cela réduit les coûts de fonctionnement ainsi que les risques.

II.6 Multi-usages des tunnels combinés

Un des avantages des tunnels combinés est la surface d'exploitation que l'on peut diversifier. En effet, la configuration du tunnel combiné présente quatre tunnels indépendants qui peuvent accueillir chacun une activité. Quelques grandes villes ont commencé à développer cette diversification afin d'optimiser l'espace souterrain en combinant l'offre des services de transports en un unique endroit. Malheureusement, cette combinaison s'applique soit sur des tunnels à plusieurs étages, soit dans des tunnels indépendants reliés par un passage croisé. Il n'y a donc pour l'instant pas de développement avec des tunnels combinés.

II.6.1 Exemples d'application

Tunnel sur deux étages, Melbourne

A Melbourne en Australie, un tunnel a été construit pour accueillir sur deux étages, deux lignes de bus sur le niveau supérieur et deux lignes de métro sur le niveau inférieur. Ce tunnel a été construit 40 mètres en dessous de la surface du sol et a été creusé avec un tunnelier d'un diamètre de 15 mètres. Ce projet a pour principal objectif de réduire la « congestion de Brisbane : le pont ferroviaire de Merivale et l'arrondissement de bus du Centre culturel – tout en proposant une solution abordable et élégante » (déclaration du premier ministre Campbell Newman). Ce projet est réalisé dans le but de répondre à une augmentation à long terme de la demande de déplacement engendrée par le développement des banlieues adjacentes qui devraient accueillir 130000 travailleurs dans les 20 prochaines années.

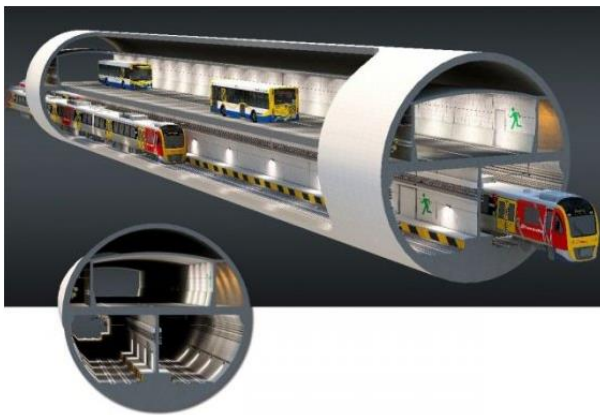


Figure 33 : Configuration du tunnel combiné sur deux étages



Figure 34 : Coupe longitudinale de la nouvelle station bus/métro

Tunnel de la Croix Rousse, Lyon

Le tunnel de la Croix Rousse, à Lyon, est un axe majeur de la ville inauguré en 1952 et emprunté chaque jour par 47.000 véhicules sur près de 1,8 kilomètres. Il permet de passer directement d'un quartier à l'autre, sans s'imposer un énorme détour, ni grimper la Croix-Rousse, 80 mètres plus haut. Il a été mis aux normes de sécurité incendie en 2013 suite à la nouvelle réglementation mise en place depuis l'incendie du tunnel du Mont-Blanc en 1999. Durant cette rénovation, la construction d'un second tunnel ayant comme fonction de galerie de secours et d'évacuation, sera dédié aux modes de circulation « doux ». Dans cette galerie

d'un diamètre de 10 mètres, les bus, les vélos mais aussi les piétons pourront l'emprunter. Elle est reliée au tunnel principal par 11 passages croisés tous les 150 mètres.

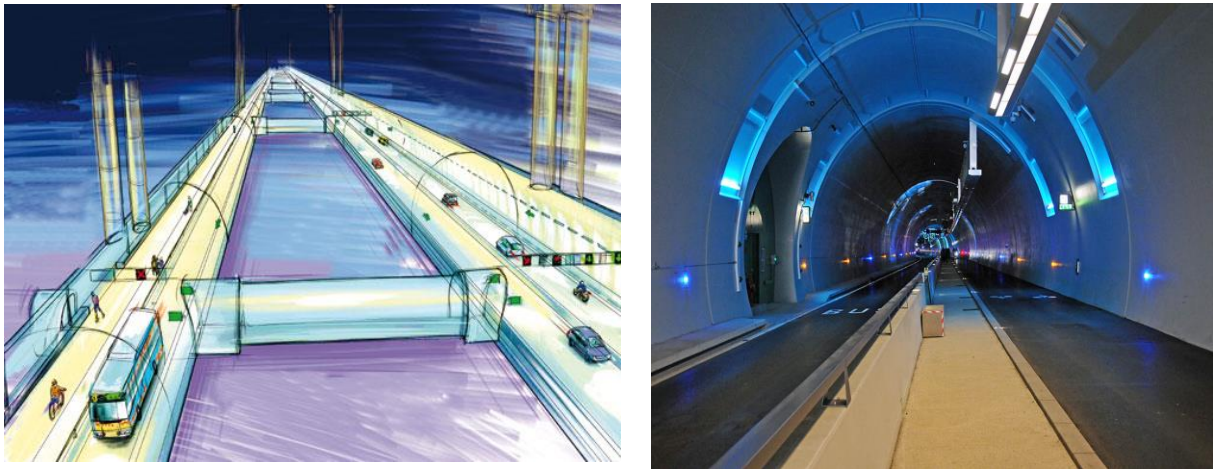


Figure 35 : Aménagement du tunnel « modes doux » de la Croix Rousse à Lyon

II.6.2 Propositions d'aménagement

A travers ces deux exemples, nous pouvons voir que la diversité des services proposés est un axe de développement à approfondir. En effet, avec la combinaison des tunnels, nous pouvons élargir la vision du transport souterrain à d'autres modes de transports comme les bus, les vélos ou même les piétons. Il faut alors voir la faisabilité de ces solutions.

Pour les bus ou les vélos, il n'y a pas de problèmes spécifiques pour l'aménagement d'un tunnel. En revanche pour un tunnel piéton, il y a des règles à respecter pour que cet endroit ne devienne pas dangereux et que l'usage ne soit pas détourné. En effet, il faudra prévoir un éclairage suffisant pour que les piétons se sentent en sécurité. De plus, l'aménagement du tunnel doit être réfléchi. Car si l'on décide d'y installer des bancs, ils peuvent être occupés et devenir des rassemblements donc il y aura un détournement d'usage. Ces problèmes se sont retrouvés dans le tunnel modes doux de la croix rousse à Lyon, où la municipalité a dû revoir les installations afin de réduire les nuisances et offrir un service de qualité.

Mais dans un tunnel où se croisent différents usagers, certains seront plus vulnérables donc il faudra penser à la sécurité de chacun.

On peut donc alors imaginer la diversité des activités dans les différents espaces des tunnels combinés. Pour les tunnels de petites distances nous pouvons dédiés un espace aux piétons et aux cyclistes. Nous pouvons aussi diversifier l'offre du mode de déplacement en y incluant d'autres transports en commun comme les bus ou les trams. De plus, l'espace réservé aux piétons et vélos pourra servir d'espace d'évacuation en cas de problème dans le tunnel.



Figure 36 : Propositions d'aménagement des espaces du tunnel

III.SYNTHESE DU STAGE

III.1 Conclusion de l'étude

A travers un travail de recherche de 12 semaines sur la faisabilité des tunnels combinés nous pouvons apporter les réponses suivantes à la problématique « Comment construire les tunnels combinés ? »

- La méthode séquentielle est la seule technique qui peut être utilisée dans la réalisation des tunnels combinés. En effet, elle a déjà été utilisée pour réaliser des stations de métro avec la configuration binoculaire. Donc cela semble prometteur pour la configuration recherchés par le groupe de recherche.
- La reconfiguration des espaces de secours s'implémente correctement dans le nouveau design des tunnels puisque la partie supérieure peut faire office de chemin d'évacuation de secours.
- De nombreux avantages sont en faveur du développement de cette configuration puisqu'elle permet d'avoir une meilleure gestion de l'espace souterrain en regroupant les services dans un lieu donné.
- Pour finir, ce nouvel aspect de tunnel ouvre un champ de recherche sur une nouvelle utilisation du sous-sol en combinant différents usages de transports (bus/trams/piétons) dans un même lieu.

III.2 Perspectives d'évolution

Comme la configuration des tunnels combinés est très peu développée, il est difficile de trouver des informations à son sujet. Tout reste à faire encore. Il faudra donc continuer à faire des études structurelles ainsi que des études plus approfondies sur la réalisation de cette nouvelle configuration. Je pense qu'il faudrait peut-être approfondir les études sur la configuration binoculaire car elle est réalisable et ajuster le modèle du groupe de recherche en fonction de la configuration binoculaire. Par la suite, les tunnels combinés peuvent être étendus aux tunnels routiers et ferroviaires. De plus, la recherche peut s'étendre à la combinaison de multiples tunnels (au-delà de trois) et ainsi créer un vrai partage de l'espace avec différents modes de transports.

CONCLUSION

Mon objectif pour ce stage était double : effectuer mon stage en anglais afin de développer mon vocabulaire scientifique et pratiquer la langue et travailler dans le domaine du génie civil. Ce stage a été très enrichissant d'un point de vue linguistique (stage en anglais) et d'un point de vue technique. J'ai pu ainsi approfondir les connaissances acquises pendant la formation à l'EIVP et en acquérir de nouvelles sur la conception des tunnels. J'ai appris les différentes techniques de construction de tunnels ainsi que les structures de sécurité rattachées. Je me suis rendu compte des problématiques liées à la gestion de l'espace et du sous-sol et ainsi pu répondre à une problématique donnée. Chercher des réponses à un problème c'est ce qui m'a plu dans le stage, même si cela peut devenir vite très fastidieux.

Ce stage m'aura aussi été bénéfique pour la suite de mes études puisque je termine ma dernière année d'école d'ingénieur à l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE) afin de me spécialiser dans le génie civil. Ce stage m'a permis de découvrir les constructions souterraines, jusqu'à présent j'étais seulement intéressée par la conception des ponts, donc je souhaiterais continuer dans cette voie afin de m'intéresser aussi à la conception des tunnels.

Donc pour moi ce stage a été une réussite car il m'a beaucoup apporté tout au long de ces 12 semaines et qui me seront utiles dans la suite de mon parcours.

GLOSSAIRE

- **Excavation** : Creusement du tunnel.
- **Full Face** : Lorsque le front de taille est excavé en une seule partie par des explosifs.
- **Forepoling** : Méthode de soutènement qui consiste à former une voûte de tiges de métal afin de supporter la structure du tunnel pendant l'excavation.
- **Front de taille** : Face verticale excavée au contact de la tête de coupe du tunnelier. Le front de taille est aussi appelé dans le rapport « partie excavée », « face excavée ».
- **New Austrian Tunneling Method/ Méthode séquentielle** : Méthode de construction de tunnel qui se compose de plusieurs étapes répétitives : Excavation, soutènements, contrôles et mesures.
- **Passage croisé/Passage transversal** : Tunnel reliant deux autres tunnels indépendants.
- **Soutènement** : Le soutènement permet de renforcer une partie devenue instable suite à un creusement.
- **Tunnel Boring Machine (TBM) / Tunnelier** : Machine permettant de percer un tunnel.

BIBLIOGRAPHIE

II.1 Etat de l'art

Sites internet :

- <https://www.tunneltalk.com/Santiago-Metro-Apr03-NATM-optimisation.php>
- <http://tsarchitect.nsflanagan.net/?p=2714>

II.2 NATM et TBM

Sites internet :

- <http://www.planete-tp.com/tunneliers-a230.html>
- https://educnet.enpc.fr/pluginfile.php/8827/mod_resource/content/1/2011-2012/ENPC_CHEBAP_Ouvrages_souterrains_les_tunneliers_1.pdf
- <https://tpelestunnels.wordpress.com/2015/03/16/18/>
- http://www.cttconsulting.ch/Dokumente/Fachartikel/2003_tbm.pdf
- <https://www.tideway.london/the-tunnel/the-engineering/>
- https://en.wikipedia.org/wiki/Tunnel_boring_machine
- http://www.dailymotion.com/video/xvc37_erecteur-pose-des-voussoirs_news
- <https://www.slideshare.net/ctm2015vnit/tunnel-boring-machine-67725721>
- <https://www.tunneltalk.com/Large-diameter-rock-tunnels-Apr10-Robbins.php>
- <http://www.railsystem.net/natm/>
- <https://www.youtube.com/watch?v=HCyz5xMp9gQ>
- <https://structurae.info/ouvrages/tunnels-cavernes-et-puits/nouvelle-methode-autrichienne-nma>
- <http://slideplayer.com/slide/5982653/>
- <https://www.slideshare.net/ADILBINAYOUB/new-austrian-tunneling-method>

Présentations :

- *COMPARISON OF TUNNELLING METHODS NATM AND ADECO-RS*, Czech Technical University in Prague
- *EXCAVATION AND SUPPORT CATEGORIES OF NATM*, by Zeynep ŞEKER
- *Observational Methods and NATM*,
- *Safety of New Austrian Tunnelling Method (NATM) Tunnels*, HSE

II.3 Les espaces souterrains liés à l'usage du métro

Sites internet :

- <http://www.dr-sauer.com/projects/metro-de-santiago-linea-2-south-extension-lo-ovalle-la-cisterna>

- <https://www.tunneltalk.com/Santiago-Metro-Apr03-NATM-for-underground-construction.php>
- https://www.researchgate.net/profile/Alexandre_Gomes2/publication/264971024_Metro_Santiago_-_Building_an_urban_tunneling_industry_from_the_ground_up/links/53f7867c0cf2823e5bd90514.pdf
- <https://www.tunneltalk.com/Santiago-Metro-Mar10-Earthquake-survival.php>
- https://www.researchgate.net/publication/305427903_METRO_SANTIAGO_-_UNDERGROUND_WORKS_OF_THE_NEW_LINE_5_TO_MAIPU
- <http://www.dr-sauer.com/files/drsauer/public/content/file/1489/upload/santiago.pdf>
- <https://www.tunneltalk.com/Santiago-Metro-Apr03-NATM-optimisation.php>
- <https://www.tunneltalk.com/Santiago-Metro-Apr03-NATM-for-underground-construction.php>
- http://en.metrostav.cz/en/technology_tbm/metro/metro_line_v-a_extension
- <http://www.mtr-shatincentrallink.hk/en/construction/construction-methods.html>
- http://www.tunnel-online.info/en/artikel/tunnel_EPBM_Excavations_of_Prague_Subway_Metro_V.A._156414_5.html
- <http://www.metroprojekt.cz/en/home/metro/extension-of-prague-metro-line-a-dejvicka-nemocnice-motol>
- <http://www.geosoftware.hu/projects/>

Présentations :

- *METRO SANTIAGO – UNDERGROUND WORKS OF THE NEW LINE 5 TO MAIPU*, University of Chile
- *METRO SANTIAGO – UNDERGROUND WORKS OF THE NEW LINE 5 TO MAIPU*, University of Chile
- *Construction methods of metro lines*
- *Santiago’s Metro Expands*
- *EPBM Excavations of Prague Subway “Metro V.A.”*
- *Ground movements generated by sequential twin-tunnelling in over-consolidated clay*, City University, London
- *Performance of two EPBMs in twin metro tunnel construction in soft ground*

II.4 Structures de secours incluent dans la construction du tunnel

Présentations :

- RÈGLEMENT (UE) No 1303/2014 DE LA COMMISSION du 18 novembre 2014 concernant la spécification technique d'interopérabilité relative à la sécurité dans les tunnels ferroviaires du système ferroviaire de l'Union européenne
- *Technical Report – Part 1 Design Fire Scenarios*, Fire in tunnel
- *Technical Report – Part 2 Fire Safe Design – metro tunnels*, Fire in tunnel

II.5 La planification urbaine et les espaces souterrains

- *Guidelines for the Design of Tunnels*, ITA Working Group on General Approaches to the Design of Tunnels
- *Examples of Benefits of Underground Urban Public Transportation Systems*, ITA Working Group on Costs-Benefits of Underground Urban Public Transportation

II.6 Multi-usages des tunnels combinés

Sites internet :

- <http://www.20minutes.fr/planete/1216495-20130901-20130901-lyon-tunnel-croix-rousse-renove-rouvre-a-circulation>
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Tunnels_de_la_CroixRousse#R.C3.A9novation_du_tube_existant
- <http://lamanivellebuissonniere.blogspot.be/2014/01/un-tunnel-de-la-croix-rousse-pour-les.html>
- <https://www.google.com/url?q=http://www.railwaygazette.com/news/single-view/view/double-deck-rail-and-bus-tunnel-proposed-for-brisbane.html&ust=1503668760000000&usg=AFQjCNHN7soAdNzRZJ58HGziTe4N76oVHw&hl=fr>
- <https://www.google.com/url?q=http://www.theconstructionindex.co.uk/news/view/brisbane-announces-5bn-double-deck-road-and-rail-tunnel&ust=1503668760000000&usg=AFQjCNGKPTR11P6JmQ0euhKULuJGV3C1Qg&hl=fr>

ANNEXE-PLANNING DES TACHES

Tâches	Temps prévu en jours	Sem 1	Sem 2	Sem 3	Sem 4	Sem 5	Sem 6	Sem 7	Sem 8	Sem 9	Sem 10	Sem 11	Sem 12
T1 : Etat de l'art	10												
	7												
T2 : TBM/NATM	15												
	11												
T3 : Station de métro	10												
	14												
T4 : La planification urbaine	15												
	10												
T5 : Structure de secours	20												
	10												
T6 : Multi usage	15												
	10												
T7 : Réunions et rapport													
			20/06		04/07		24/07			09/08			