

# SOMMAIRE

*REMERCIEMENTS*

**SOMMAIRE**

**LISTE DES ABREVIATIONS**

**LISTE DES FIGURES**

**LISTE DES CARTES**

**LISTE DES PHOTOS**

**LISTE DES TABLEAUX**

*INTRODUCTION*

PARTIE 1 PRESENTATION DU CADRE D'ETUDE

Chapitre 1. GENERALITES SUR LE TRANSPORT URBAIN

Chapitre 2. PRESENTATION DU SITE « ANTANANARIVO »

Chapitre 3. URBANISME SOUTERRAIN

PARTIE 2 ANALYSE DE LA PROBLEMATIQUE DU TRANSPORT ET PROPOSITIONS DES SOLUTIONS

Chapitre 4. TRAVAUX DE TERRAIN D'ANALYSE DES PROBLEMES D'EMBOUTEILLAGE

Chapitre 5. CHOIX DES SOLUTIONS POSSIBLES

PARTIE 3 OPPORTUNITE D'IMPLANTATION DE TUNNEL A ANTANANARIVO

Chapitre 6. GEOMETRIE ET SECURITE DES TUNNELS

Chapitre 7. PROCEDE D'EXECUTION ET CHOIX DE METHODE DE CREUSEMENT

Chapitre 8. PROJET D'ANTANIMENA

*CONCLUSION*

**ANNEXES**

**TABLE DES MATIERES**

## LISTE DES ABREVIATIONS

AF :	Air frais
AFD :	Agence française du développement
AOTU :	Autorité Organisatrice des Transports Urbains
AV :	Air Vicié
BDA:	Bureau de Développement d'Antananarivo
CERTU :	Centre d'Etudes sur les Réseaux, les Transports et l'Urbanisme
CETU :	Centre d'Etudes des Tunnels
DDSS :	Direction de la Démographie et des Statistiques Sociales
DRTP :	Direction Régionale des Travaux Publics
DTI :	Direction Technique et Infrastructures
EPP :	Ecole Primaire Publique
ESPA	Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo
FTM :	Foibe Taosaritanin'i Madagasikara
IDH :	Indice de Développement Humain
INSEE :	Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques
INSTAT :	Institut National de la Statistique
IRD :	Institut de Recherche pour le Développement
JIRAMA :	Jiro sy Rano Malagasy
MEM :	Ministère de l'Energie et des Mines
MinEnv EF :	Ministère de l'Environnement, des Eaux et Forêts
PAMU :	Programme d'Amélioration de la Mobilité Urbaine
PC :	Point de contrôle
PCD :	Plan communal de développement
PMA	Pays Moins Avancés
PUDi :	Plan d'Urbanisme Directeur
RN :	Route Nationale
SAMVA :	Service Autonome de Maintenance de la Ville d'Antananarivo
SETRA :	Service d'études sur les transports
UCM	Université Catholique de Madagascar
UV :	Unité de voiture

## LISTE DES FIGURES

Fig. 3.1 « Rue future » imaginée par Eugène Hénard .....	23
Fig. 3.2 Schéma d'implantation des ouvrages souterrains .....	25
Fig. 4.1 Cas de circulation en présence de véhicules garés le long des rues.....	39
Fig. 4.2 Situation des arrêts à Antananarivo .....	39
Fig. 4.3 Carrefour en forme T à trois branchements .....	41
Fig. 4.4 Carrefour en forme "+" à 4 branchements .....	42
Fig. 4.5 Schéma équivalent du carrefour d'Antanimena .....	44
Fig. 4.6 Exemple de situation de création d'embouteillage.....	45
Fig. 4.7 Situation dans la plupart des carrefours à Antananarivo .....	45
Fig. 6.1 Différents types de section d'un tunnel .....	55
Fig. 6.2 Tunnel sous traversant une montagne.....	56
Fig. 6.3 Tunnel sous un fleuve / Lac / Océan.....	57
Fig. 6.4 Éléments de la route en milieu urbain.....	58
Fig. 6.5 Largeur des voies sans arrêt d'urgence par rapport à la vitesse et au type de véhicule .....	59
Fig. 6.6 Dispositions et dimensions des éléments de hauteur du tunnel .....	62
Fig. 7.1 Méthode de réalisation en fouille talutée par rapport à l'emprise du terrain .....	71
Fig.7.2 Technique de réalisation de tranchée en fouille talutée .....	72
Fig. 7.3 Méthode combinée (une partie talutée et une autre avec soutènement) .....	73
Fig. 7.4 Méthode de réalisation en tranchée couvert par rapport à l'emprise du terrain.....	74
Fig. 7.5 Illustration de l'exécution par parois moulée avec un terrassement sous œuvre.....	75
Fig. 7.6 Schéma de tunnel routier sur un croisement des voies rectilignes à 4 branchements .....	76
Fig. 8.1 Schéma du modèle aux réactions hyperstatiques.....	82
Fig. 8.2 Schéma du système équivalent du model hyperstatique.....	82
Fig. 8.3 Profil de la plateforme du tunnel avec ses éléments constitutifs et ses dimensions ..	86
Fig. 8.4 Profil en long du tunnel vu de droite .....	87
Fig. 8.5 Profil en travers du tunnel coupe A-A .....	88
Fig. 8.6 Coupe B- B .....	89

Fig. 8.7 Profil en long du tunnel vu de droite .....	90
Fig. 8.8 Profil en long de la rampe nord.....	90
Fig. 8.9 Profil en long de la rampe sud .....	91
Fig. 8.10 Schéma du Projet tunnel Antanimena (Vue en plan).....	91
Fig. 8.11 Schéma du projet tunnel Antanimena après aménagement des îlots .....	92
Fig. 8.13 Plan de la mise en place des éléments constituant du tunnel pendant l'étape 1 .....	96
Fig. 8.14 Mode d'exécution de la paroi .....	97
Fig. 8.15 Exécution de la paroi par panneaux alternés.....	98
Fig. 8.16 Plan d'excavation du tunnel vue de dessus .....	99
Fig. 8.17 Volume de la terre à déblayer .....	100

## LISTE DES CARTES

Carte. 2.1	Carte géologique de la ville d'Antananarivo et de ses environs .....	11
Carte. 2.2	Extensions urbaine des années 30 – 2000 .....	17
Carte. 4.1	Carte illustrant l'embouteillage sur secteur 1 .....	30
Carte. 4.3	Carte illustrant l'embouteillage sur secteur 3 .....	31
Carte. 4.4	Carte illustrant l'embouteillage sur le secteur 4.....	32
Carte. 4.5	Carte illustrant l'embouteillage sur le secteur 5.....	33
Carte. 4.6	Carte illustrant l'embouteillage sur le secteur 6.....	34
Carte. 4.7	Carte illustrant l'embouteillage sur le secteur 7.....	35
Carte. 8.1	Les infrastructures avoisinantes .....	81
Carte. 8.2	Trois parties du tunnel.....	87
Carte. 8.3	Endroits suffisamment spacieux capables d'être alloués pour la construction des panneaux préfabriqués .....	95

## LISTE DES PHOTOS

Photo 1.1 - Tramway à Karlsruhe (durlash).....	5
Photo 1.2 - Trolleybus VBR de 1947.....	5
Photo 1.3 - Téléphérique de Huy RTBF en Belgique .....	7
Photo 4.2 - Embouteillage sur l'axe Ambanidia - Mandroseza Photo .....	30
Photo 4.3 - Embouteillage à Analakely .....	31
Photo 4.4 - Photo prise du côté d'Ambatoroka à 7h30 le 10 nov 2014 .....	36
Photo 4.5 - Photo prise du côté d'Ambatoroka à 7h30 le 12 août 2014 .....	36
Photo 4.6 - Photo prise à Antanimena à 8h le 11 novembre 2014 (Mardi) .....	37
Photo 4.7 - Photo prise à Antanimena à 8h le 16 novembre 2014 (dimanche).....	37
Photo 4.8 - Arrêt UCM Ambatoroka .....	41

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Evolution de la température et la pluviométrie mensuelle d'Antananarivo.....	14
Tableau 2.2 Nombre de population par arrondissement.....	18
Tableau 2.3 Nombres des véhicules immatriculés par trimestre pour l'année 2013 .....	20
Tableau 2.4 Répartition des immatriculations (en %) selon le type d'acquisition .....	20
Tableau 4.2 Données et information relative à l'embouteillage du secteur 1 .....	28
Tableau 4.3 Données et information relative à l'embouteillage du secteur 2 .....	29
Tableau 4.4 Données et information relative à l'embouteillage du secteur 3 .....	31
Tableau 4.5 Données et information relative à l'embouteillage du secteur 3 .....	32
Tableau 4.6 Données et information relative à l'embouteillage du secteur 5 .....	33
Tableau 4.7 Données et information relative à l'embouteillage du secteur 6 .....	34
Tableau 4.8 Nombre moyen de véhicules par voie à Antanimena au niveau de la demande ..	44
Tableau 6.1 Largeur de chaussée suivant le type de véhicules et la vitesse de référence .....	58
Tableau 6.2 Hauteur minimale pour les gabarits réduits source « CETU » .....	61
Tableau 6.3 Hauteur minimale suivant le type de route source « CETU » .....	61
Tableau 8.1 Estimation par heures d'économie de carburant .....	105
Tableau 8.2 Estimation annuelle de l'économie en termes de carburant .....	105
Tableau 8.3 Estimation de la valeur par heure de gain de temps .....	105
Tableau 8.4 Estimation annuelle de la valeur du gain de temps .....	106

# INTRODUCTION

A l'accroissement rapide de la population actuelle, les grandes villes du monde sont confrontées aux problèmes de transport plus précisément d'embouteillage.

Conscient de ce mal qui sillonne la Capitale, le Gouvernement de la République de Madagascar commence depuis quelques années à s'y pencher. Ses actions se concrétisent, entre autres, par la construction de plusieurs infrastructures urbaines comme le By-pass, le Marais Masay et le Boulevard de l'Europe. Mais actuellement, le problème est loin d'être résolu.

Cet ouvrage a été élaboré afin de mieux appréhender les problèmes d'embouteillage à Antananarivo et de proposer l'utilisation de l'espace souterrain comme une des solutions possibles. Pour ce faire, il ne suffit pas de défendre une intuition, il faut en démontrer la véracité. Une étude bien analysée de la situation ainsi que de la solution présentée doit être effectuée.

C'est dans ce cadre que nous avons choisi le thème intitulé «*utilisation de l'espace souterrain pour l'amélioration du transport à Antananarivo* » en guise de mémoire de fin d'étude en vue d'obtention du Diplôme d'Ingénieur des Mines.

Ce mémoire se subdivise en trois parties qui sont consacrées au transport urbain et à l'espace souterrain en site urbain :

- 1) la première partie concerne les éléments du cadre d'étude en particulier : le transport urbain dans le site d'Antananarivo ainsi que les notions sur l'urbanisme souterrain ;
- 2) la seconde partie, l'étude et l'analyse des contextes liés aux problèmes de transport afin de pouvoir porter des solutions possibles ;
- 3) la troisième et dernière partie repose sur la proposition de solution dont la perspective d'implantation de tunnel à Antananarivo, et est illustrée par un exemple « le cas d'Antanimena ».

**PARTIE 1**  
**PRESENTATION DU CADRE D'ETUDE**

## Chapitre 1. GENERALITES SUR LE TRANSPORT URBAIN

Le transport est un service essentiel, il joue un rôle très important pour de nombreuses activités de la vie quotidienne. Il a un impact sur la consommation d'espace et d'énergie, c'est de ce fait qu'il est un enjeu stratégique majeur. Les investissements énormes y sont attachés.

Concernant ce chapitre, pour mieux cerner l'ouvrage, un bref aperçu de la généralité du transport urbain est donc nécessaire et est abordé.

### 1.1. Définition [40] [41] [43]

Le transport urbain est l'ensemble de deux terminologies : « *transport* » et « *urbain* ». « *Transport* » désigne l'action de déplacement, d'acheminement d'un objet ou d'un individu d'un endroit à un autre et « *urbain* » ayant une relation avec la ville.

Le transport urbain concerne les déplacements en milieu urbain ou en ville.

Celui-ci a connu une importante évolution depuis l'Antiquité. De nouveaux modes de transport ont vu le jour, pouvant transporter un grand nombre de personnes et une quantité importante des marchandises. Les déplacements sont devenus rapides et faciles au fil du temps, mais aussi de nouvelles voies autrefois inaccessibles comme l'eau, l'espace et le sous-sol, ont pu être empruntées.

### 1.2. Différents modes de transport [2] [42]

#### 1.2.1. Transport terrestre

##### 1.2.1.1. *Transport individuel*

###### a) **Marche**

Existant déjà depuis la nuit des temps, la marche ou aller à pieds est un mode de déplacement exclusif et accessible à toute personne en possession de toutes ses capacités physiques.

Elle reste toujours le plus simple et le plus évident des modes de transport. De même, son importance est plus grande en milieu urbain.

###### b) **Deux roues, motorisées ou non**

C'est le mode individuel de transport mécanisé le moins onéreux et le plus écologique qui soit. Son histoire avait commencé avec l'invention de la bicyclette vers 1790 par Mede SIVRAC puis elle devient motorisée depuis la création de moteur à combustion.

### **c) Voiture particulière**

Le premier véhicule automobile fonctionnel a été inventé en 1769 par Joseph CUGNOT sous le nom de Fardier CUGNOT. La voiture particulière est considérée par beaucoup des gens comme symbole de la liberté, de l'autonomie et dans d'autres sociétés, elle matérialise l'ascension sociale. C'est pourquoi, dans les villes développées, l'automobile gagne du terrain au détriment des autres modes de transport de par sa modularité. Elle peut transporter une personne comme elle peut en transporter quatre, avec un peu de matériel. Elle est utilisée pour des courts et même des longs trajets.

### **d) Taxi**

Le taxi considéré comme une activité de transport au service du public, n'est pas du tout un service public. Il est plutôt une activité à l'initiative du privé, à ce titre, sa vocation consiste à vendre à sa clientèle le service qu'il produit et d'en tirer profit. En effet, les taxis jouent un rôle important dans les déplacements des habitants. Ils proposent leurs services à l'ensemble de la collectivité et répondent aux différentes demandes de la mobilité inter-quartiers de l'agglomération surtout, lorsque les bus de transport en commun n'arrivent pas à en satisfaire toute la clientèle.

## ***1.2.1.2. Transports collectifs***

Les transports collectifs représentent le mode de déplacement de masse. Dans les villes modernes, ils jouent un rôle prépondérant en matière de déplacement, parmi eux, on cite :

### **a) Train**

La première locomotive à vapeur apparaît en Cornouailles, dans le sud de l'Angleterre, en 1804. Conçu par Richard TREVITHICK, le train se marque par la possibilité de tirer des tonnes de wagons transportant une importante quantité de matériaux ou de personnes. Ce mode de transport est réservé aux agglomérations étendues et denses.

### **b) Tramway**

Comme son nom l'indique, le tramway est une invention américaine. C'est le New-Yorkais John Stephenson qui, en 1832, construit la première ligne tirée à cheval, entre Manhattan et Harlem. A cette époque, le tramway était encore tiré par des chevaux mais depuis le développement de la technologie en particulier, l'invention de l'électricité, les tramways d'aujourd'hui sont tous électriques comme montre la Photo 1.1.



Source: Cliché Thierry ASSA)

Photo 1.1 - Tramway à Karlsruhe durlash

### c) Bus

C'est un mode de transport collectif motorisé le plus répandu dans les plus petites villes comme dans les plus grandes métropoles.

Depuis le choc pétrolier de 1973 qui a pénalisé durement les déplacements urbains en voiture particulière, le bus a gagné du terrain.

### d) Trolleybus

Les trolleybus sont des bus fonctionnant à l'électricité et alimentés grâce à un réseau de fils aériens (photo 1.2), Ils sont souvent utilisés comme alternative à la fois au bus et au tramway. Le trolleybus offre un mode de transport plus silencieux, plus respectueux de l'environnement que le bus et bien moins coûteux que le tramway.

Son principal inconvénient par rapport au bus est constitué par la flexibilité de ce dernier vis-à-vis d'un itinéraire. Bien qu'aujourd'hui, cet avantage du bus ne soit que peu exploité. Il existe cependant des autobus électriques indépendants d'un réseau filaire grâce à leurs batteries embarquées.



Source : Collection AMTUIR

Photo 1.2 - Trolleybus VBR de 1947

### e) Métro

Le métro concerne plus particulièrement les pays développés à cause du coût très onéreux de sa construction. Le métro est un moyen de transport en commun urbain, défini comme chemin de fer conçu pour constituer un réseau permettant le transport d'un grand nombre de voyageurs à l'intérieur d'une zone urbaine au moyen de véhicules sur rails avec contrôle externe, dans un espace totalement ou partiellement en tunnel.

La ville de Londres était la première à disposer d'un réseau de chemin de fer métropolitain, inauguré le 10 janvier 1863. Dès lors, de nombreuses villes succédèrent Londres et elles se sont dotées respectivement de leur propre réseau de métro à savoir : en 1868 le métro d'Athènes, en 1898 le métro de Paris, en 1904 le métro de New York, en 1913 le métro de Buenos Aires, en 1927 le métro de Tokyo et en 1935 le métro de Moscou. Par la suite, nombreuses autres villes se sont mises à la construction de ce mode de transport.

## 1.2.2. Transport maritime et fluvial

Des navettes fluviales sont parfois mises en place dans les villes traversées par une rivière ou un fleuve. La plupart de ces villes ont au moins étudié un projet de ce type. Peu à peu ce mode de transport se développe. L'avantage est souvent de mettre en avant la particularité de la ville, son fleuve, puisque la vitesse de ces navettes reste faible.

L'objectif est aussi de créer une liaison « plaisir », dont le but d'améliorer l'image du voyage domicile-travail, de rendre ce voyage contraint plus agréable.

## 1.2.3. Transport aérien

### *Transport urbain par câble*

Il consiste à assurer une liaison aérienne d'un endroit à un autre à l'aide d'un câble. On l'appelle « téléphérique » (Photo 1.3). Ce mode de transport peu répandu, similaire aux transports utilisés en montagne, connaît un début de développement en Amérique du Sud et en Algérie pour répondre à des contraintes géographiques particulières telle qu'une importante dénivelée ou une traversée de vallée.



**Photo 1.3 Téléphérique de Huy RTBF en Belgique**

Il existe différents types de moyen de transport, ayant une relation surtout avec les caractéristiques de la zone d'utilisation. Il est donc nécessaire de connaître la situation générale du site étudié qui est l'objet de notre chapitre suivant.

## **Chapitre 2. PRESENTATION DU SITE « ANTANANARIVO »**

La situation démographique, les particularités de la topographie, l'évolution et la physiologie de la ville incombent aux conditions de déplacement des personnes et des biens. Tandis que la connaissance de l'environnement géologique, géomorphologique et hydrogéologique constitue un aspect important dans la conception des projets.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les principales caractéristiques physiques et humaines d'Antananarivo, ainsi que la mobilité en pleine-ville. Ces données nous sont très utiles pour l'analyse de transport à Antananarivo mais aussi pour le choix et la faisabilité des solutions possibles et retenues.

### **2.1. Milieu physique [20] [25] [38] [31] [33] [34]**

#### **2.1.1. Géographie**

Antananarivo, Capitale de Madagascar est située au centre de l'île avec 18° 53' de latitude Sud de 47° 31' de longitude Est. Sa superficie s'élève à 86,4 km<sup>2</sup>. Sur ce point, il constitue le cœur de Madagascar et le lieu de transit de toutes les activités sur la Grande île.

Du point de vue administratif, la Commune Urbaine d'Antananarivo se trouve dans la région Analamanga, elle comporte 6 Arrondissements, eux-mêmes subdivisés en 192 Fokontany.

#### **2.1.2. Relief**

La ville d'Antananarivo est bâtie sur une zone complexe, constituée par un ensemble de collines rocheuses escarpées, dominant une plaine marécageuse qui entoure le site urbain sur trois côtés (Sud, Ouest et Nord).

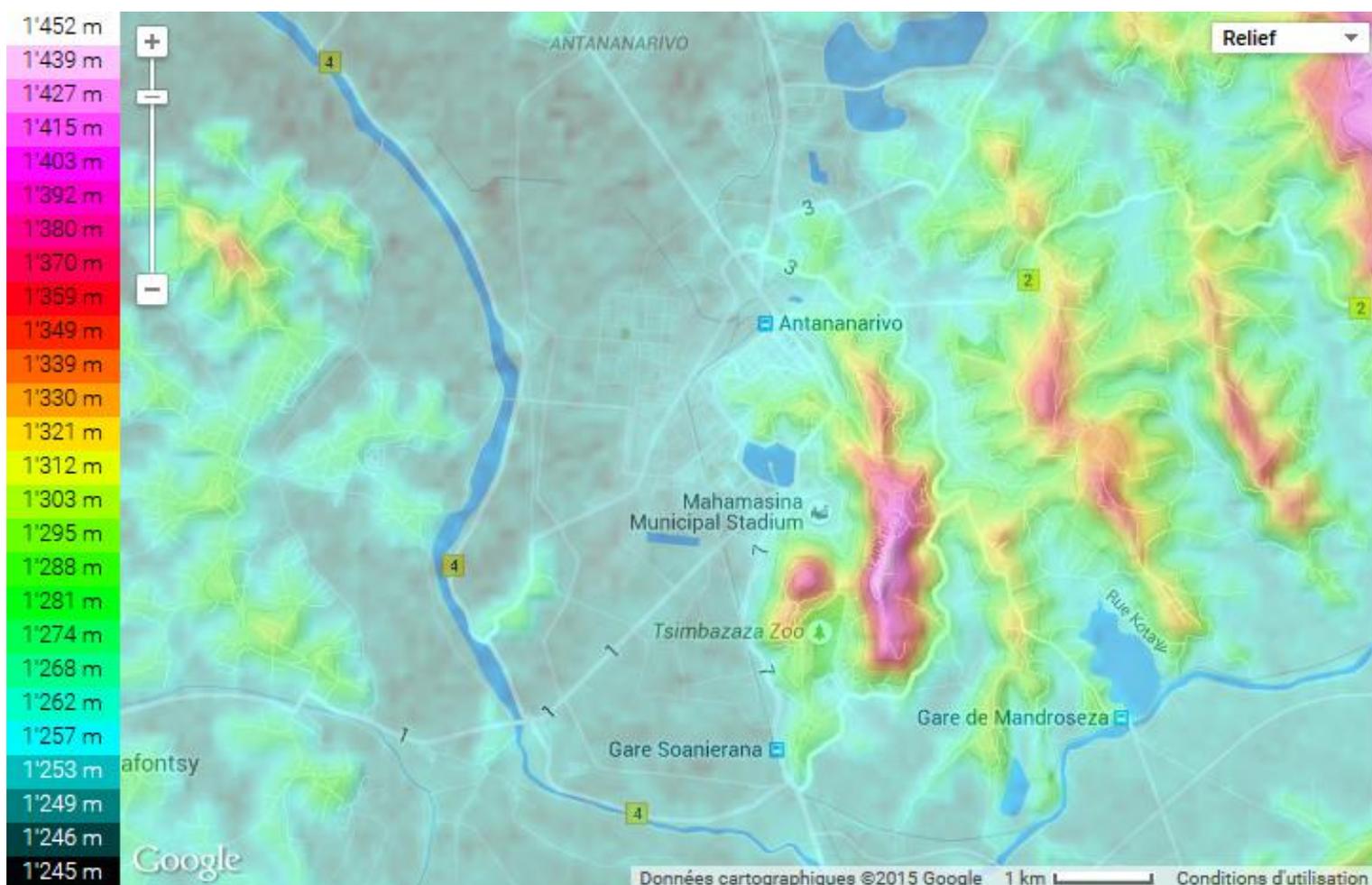
Les quatre crêtes des collines intra-muros sont sensiblement parallèles entre elles et présentent une orientation générale Nord Ouest – Sud Est. Ces collines sont reliées entre elles par des « cols » qui délimitent des bassins versants dissymétriques, c'est-à-dire beaucoup plus étendus vers le Nord que vers le Sud.

Aux alentours, les collines s'imbriquent en désordre dans la plaine en s'émiettant vers l'Ouest sous forme de « tertres » émergeant les rizières environnantes.

La plus haute colline par rapport à la plaine, porte le nom de Manjakamiadana sur laquelle est installé « le Palais de la Reine ». Cette colline donne naissance à l'implantation urbaine. Elle culmine à une altitude de 1475 m.

La plaine a été constituée par le dépôt des multiples cours d'eau descendus de hautes terres voisines et qui convergent vers le Nord-Ouest, au seuil de Bevomanga. L'ensemble des bassins versants drainés par l'Ikopa (la rivière la plus importante) et les autres cours d'eau ont une superficie de 6773 ha dont quelques dizaines de kilomètre carrés de « plaines » où s'accumulent les eaux de crues dont l'écoulement est fortement perturbé à l'aval (Bevomanga).

La carte ci-après représente la topographie générale d'Antananarivo



Source: <http://fr-ch.topographic-map.com/places/Tananarive-4207276/>

Carte. 2.1 Géomorphologie d'Antananarivo

### 2.1.3. Géologie

Le sous-sol de la région, de par sa situation au niveau de l'axe central de Madagascar, est généralement constitué d'une série para gneissique (gneiss à biotite, gneiss à graphite, gneiss à pyroxène, khondalites, quartzites) (*Délubac, 1963*) du bloc d'Antananarivo (*Collins, 2001*)

La ville d'Antananarivo est située en zone de socle formée de gneiss, de granite et quelquefois de quartz et de mica noir. La décomposition de la partie supérieure de ces roches (notamment du gneiss et du granite) donne de l'argile. Cette argile constitue la majeure partie du sol de la ville.

La configuration du sous-sol d'Antananarivo peut être subdivisée en deux parties :

- d'un côté, la haute ville constituée largement par des granites avec une grande abondance de migmatites granitoïdes et granites migmatitiques étroitement associés. Le faciès charnockitique est présent dans la plupart des formations, soit granitiques, soit migmatitiques, soit encore gneissiques, recouvert de formation argileuse et par des sols plus alumineux tendant vers la bauxitisation.

- d'un autre côté, Antananarivo est caractérisé par des bas-fonds et des plaines alluviales emboîtées dans une épaisse couverture latéritique, dominée par des reliefs d'orientation E-W ; l'ensemble reposant sur un socle du Précambrien métamorphique. Les zones basses sont dominées par des sols argileux gris. La plaine alluviale est le résultat du remplissage d'un compartiment effondré du socle.

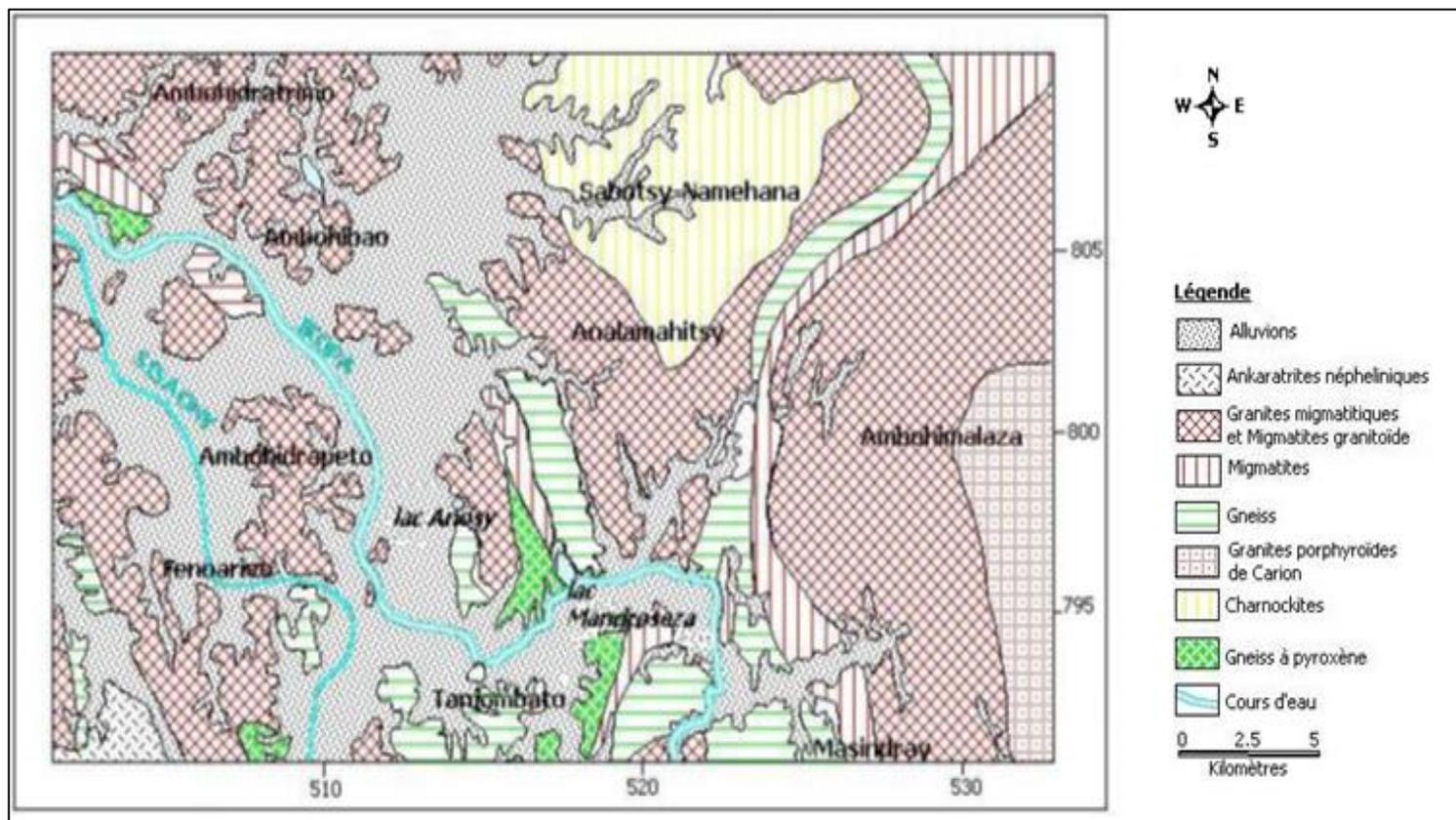
La succession des faciès alluvionnaires est, schématiquement, depuis l'affleurement vers la base :

- d'une formation limono-argileuse observée surtout au niveau des rizières ;
- d'argiles jaunes ou grises, plus ou moins mélangées de la tourbe ;
- d'un niveau d'argiles blanches, kaolinites plus ou moins sableuses et de sable.

Ces alluvions reposent sur des arènes non remaniées issues de l'altération du socle sous-jacent.

En dehors de la vaste plaine alluvionnaire, les bas-fonds du Nord et de l'Est sont issus des phénomènes néotectoniques, des mouvements verticaux et des processus d'altération, d'érosion, de transport et de dépôt. La séquence des matériaux de remplissage est comparable

à celle observée dans toutes les plaines alluviales. Le contexte géologique de la ville est présenté par la carte 2.2 ci-après



Source : Extrait de la Feuille P47 de H. Bésairie

Carte. 2.2 Carte géologique de la ville d'Antananarivo et de ses environs

Pour nous donner plus de précision concernant la structure géologique sur une partie de la zone étudiée (Plaine d'Antananarivo). Cette portion forme la majeure partie du cadre d'étude.

Une campagne de reconnaissance a été exécutée dans le cadre du projet OMS au cours des mois de Septembre et Octobre 1973 suivant chaque secteur suivant.

### 2.1.3.1. Présentation des secteurs étudiés dans la plaine alluviale.

**Secteur 1** : Vallée de l'Ikopa entre Ambohimambola et Tanjombato – vallée de la Sisaony entre Androhibe et Ampitatafika.

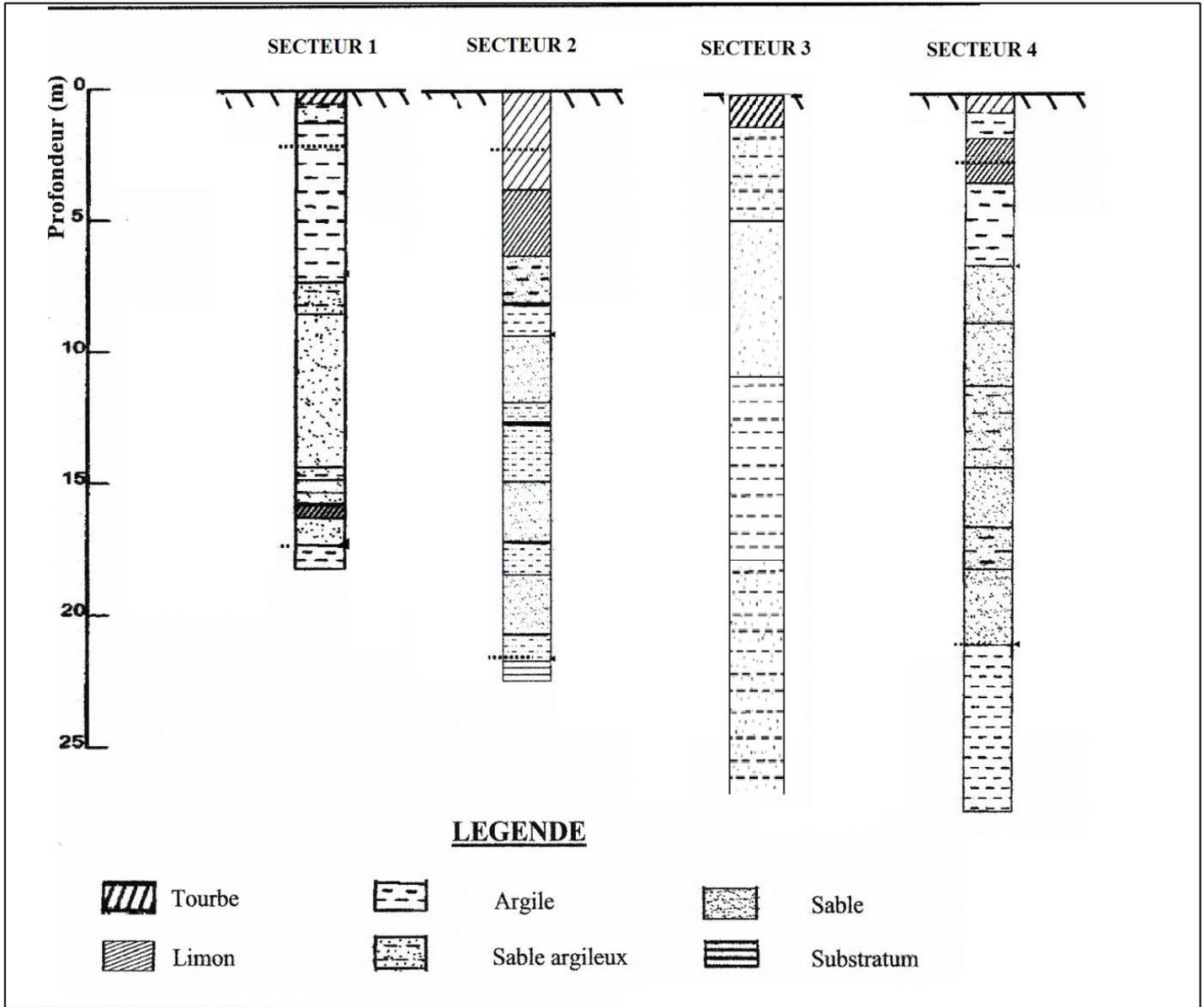
**Secteur 2** : Vallée de la Sisaony - Ambohitrimanjaka - vallée de l'Ikopa – Ambohijafy

**Secteur 3** : Vallée de l'IKOPA entre ANOSIZATO et AMBOHIMANARINA

**Secteur 4 et 5 :** Vallée de la Mamba dans le périmètre limite par les villages suivants : Ambohijanahary au nord - Antanandrano à l'Est- Soavimasoandro au sud - Antaranjana à l'ouest

**2.1.3.2. Les résultats des sondages et forages**

Les coupes lithologiques résultant des sondages et forage (Annexe 7) sont représentées comme suit.



Source : Evaluation de la potentialité en eau de la plaine aluviale de l'IKOPA de L MANDANIRINA

Fig. 2.1 Log des forages stratigraphique

D'après ces données, On peut constater qu'une partie de la ville est constituée de roche tendre, avec la présence de socle à une profondeur assez importante. Ces



caractéristiques ont une influence surtout dans le cadre d'Aménagement et de construction d'infrastructure urbaine.

#### **2.1.4. Climat**

Antananarivo a un climat tropical d'altitude. Elle se situe dans une zone climatique correspondant aux Hautes Terres avec deux saisons bien distinctes :

- la saison sèche s'étant de Mai à Octobre qui se caractérise par des températures basses, des pluies fines ;
- la saison humide se caractérise par des hautes températures, des fortes pluies. C'est durant cette période qu'a lieu la saison cyclonique ;

##### ***2.1.4.1. Température annuelle***

Bien qu'elle soit située dans la zone intertropicale, la température moyenne sur l'année est modérée par les effets de l'altitude. La température en saison fraîche descend rarement au-dessous de 10 °C. En saison chaude, elle dépasse rarement 30 °C. La température moyenne de la zone étudiée est de 19.5°C.

##### ***2.1.4.2. Pluviométrie annuelle***

D'après les premiers relevés pluviométriques en 1862 de valeur 1338 mm, après 141 ans, en 2003 sa valeur est en moyenne de 1365,3 mm réalisée sur la station de d'Antananarivo. On remarque qu'il n'existe pas des écarts significatifs entre les relevés durant cette longue période. La moyenne annuelle des précipitations est de 1346 mm et la saison des pluies s'étend de Novembre en Mars, avec un nombre moyen de jours de pluies de 153 jours répartis principalement dans la saison humide.

La précipitation est très élevée en moi de Décembre-Janvier-Février et peut atteindre plus de 300 mm soit près du 25% de la précipitation moyenne annuelle. Le tableau ....ci-dessous nous donnent une aperçue des variations annule des niveaux des Température et Précipitation de la Ville d'Antananarivo

Les données du tableau 2.1 témoignent encore la stabilité sur le niveau de la pluviométrie durant ces années, mais il ne faut toutefois négliger le changement climatique. Le climat est l'une des sources de l'inondation. Il est l'une des causes de la destruction des infrastructures urbaines et perturbe aussi la circulation en ville. Les zones les plus touchées par l'inondation durant la saison des pluies sont les rues de Besarety, d'Andravoahangy,

d'Ampefiloha, d'Isotry, d'Ankazomanga, d'Andavamamba, d'Antanimena. Le climat intervient sur l'aménagement urbain mais aussi que pour le choix de la période de mise en œuvre de tous travaux de construction urbaine.

Tableau 2.1 Evolution de la température et la pluviométrie mensuelle d'Antananarivo (2000 à 2005)

	Mois	J	F	M	A	M	J	J	O	S	O	N	D
Année		2000											
Température	Tmax	26,6	25,3	24,8	26,5	24,9	20,7	19,8	21,4	23,9	26,6	25,5	26,3
	Tmin	17,1	16,6	16,1	15,7	13,9	11,8	11,2	10,7	11,0	13,6	15,4	17,1
	Tmoy	21,9	21,0	20,5	21,1	19,4	16,3	15,5	16,1	17,5	20,1	20,5	21,7
Pluviométrie	Hauteur mensuel	113,5	256,5	142,4	1,4	4,5	4	15,7	0,6	0,5	28,7	189,6	202,4
	Hauteur annuel	959,8											
	Moyen mensuel	80,0											
Année		2001											
Température	Tmax	26,3	27,0	26,5	26,5	24,5	21,3	20,9	21,9	25,2	24,9	27,2	28,4
	Tmin	17,9	17,3	17,1	15,7	13,9	11,1	10,8	12,5	12,5	14,0	15,1	17,4
	Tmoy	22,1	22,2	21,8	21,1	19,2	16,2	15,9	17,2	18,9	19,5	21,2	22,9
Pluviométrie	Hauteur mensuel	576,5	152,3	45,7	11,3	1,2	1,6	2,1	35,7	0	47,3	31,4	253,3
	Hauteur annuel	1158,4											
	Moyen mensuel	96,5											
Année		2002											
Température	Tmax	27,9	26,0	26,1	23,5	22,6	20,4	22,0	20,2	24,3	25,4	27,8	26,9
	Tmin	16,9	17,7	17,6	15,8	14,4	11,8	10,7	10,7	12,2	13,8	16,3	17,1
	Tmoy	22,4	21,9	21,9	19,7	18,5	16,1	16,4	15,5	18,3	19,6	22,1	22,0
Pluviométrie	Hauteur mensuel	149,1	286,4	74,5	88,7	108,3	10,6	0,2	1,7	45,2	53,6	161,8	274,6
	Hauteur annuel	1254,7											
	Moyen mensuel	104,6											
Année		2003											
Température	Tmax	25,7	26,3	26,2	26,2	25,2	21,7	20,1	22,0	23,0	27,6	27,5	27,4
	Tmin	17,8	17,2	17,2	15,9	15,7	11,2	10,7	10,5	12,5	14,1	16,2	17,2
	Tmoy	21,7	21,7	21,7	21,0	20,4	16,4	15,4	16,2	17,7	20,8	21,8	22,3
Pluviométrie	Hauteur mensuel	616,8	125,7	337,2	15,4	17,0	1,3	6,9	0,6	23,1	15,7	112,5	154,1
	Hauteur annuel	1426,3											
	Moyen mensuel	118,8											
Année		2004											
Température	Tmax	26,8	26,0	24,5	25,8	23,0	20,1	21,6	22,5	24,6	26,4	26,3	26,0
	Tmin	17,8	17,5	17,0	15,5	13,2	11,1	11,2	11,2	13,7	15,6	15,4	17,2
	Tmoy	22,3	21,7	20,7	20,6	18,1	15,6	16,4	16,8	19,1	21,0	20,8	21,6
Pluviométrie	Hauteur mensuel	252,7	247,6	100,1	39,5	3,0	5,6	2,3	23,7	6,6	7,2	145,6	304,9
	Hauteur annuel	1138,8											
	Moyen mensuel	94,9											
Année		2005											
Température	Tmax	26,7	27,7	27,0	26,3	22,8	21,9	20,5	21,0	21,1	24,8	24,1	27,4
	Tmin	17,6	17,9	17,6	16,1	14,2	12,5	10,4	10,7	11,6	13,5	15,3	17,4
	Tmoy	22,1	20,3	22,3	21,2	18,5	17,2	14,4	15,8	16,3	19,1	19,7	22,4
Pluviométrie	Hauteur mensuel	268,8	223,4	207,8	86,9	13,0	1,6	28,1	5,6	4,1		143,6	271,0
	Hauteur annuel	1253,9											

Source : Direction de la Météorologie et de l'Hydrologie d'Antananarivo-Ampandrianomby

## 2.1.5. Hydrologie

### 2.1.5.1. Eaux de surface

La rivière d'Ikopa traverse la ville d'Antananarivo ainsi que ses affluents qui sont la Mamba en rive droite, la Sisaony et l'Andromba en rive gauche. Dans la plaine d'Antananarivo, l'Ikopa traverse le grand Tanà d'Ambohimambola, de Talatamaty en passant par Tanjombato et Anosizato avec une longueur de 60 km et d'une pente très faible de 13 cm/km.

La Mamba une des affluents de l'Ikopa de la rive droite s'étend à une superficie de 104 km<sup>2</sup>, l'Ikopa la reçoit à l'Ouest d'Ambohitrimanjaka. Elle traverse la ville d'Antananarivo au niveau de la plaine de Betsimitatatra.

La Sisaony, qui est l'une des principaux affluents d'Ikopa, rejoint cette dernière hors de la ville, plus précisément en aval du pont de Mahitsy.

L'Andromba qui se situe à la rive droite de l'Ikopa limite le grand Tanà au Sud.

Outre l'Ikopa et ses affluents, ils existent également les lacs naturels comme celui de Mandroseza, de Mahazoarivo, de Tsimbazaza et des ouvrages hydrauliques artificiels comme le canal d'Andriantany draine et irrigue la plaine d'Antananarivo, le marais Masay pour la collecte des eaux pluviales.

La présence de ces eaux de surface a aussi une influence sur l'aménagement d'infrastructure urbaine et doit être prise en compte pour notre étude.

### 2.1.5.2. Eaux souterraines

En 1991, Levy a défini les caractéristiques hydrogéologiques de la Plaine d'Antananarivo d'après les séries d'essai de perméabilité réalisées en 1985. Ainsi, il en est ressorti que :

- l'épaisseur de la couche argileuse superficielle reste assez constante, elle est de 3 m en moyenne ;
- la perméabilité comprise entre  $10^{-6}$  et  $10^{-5}$  m/s est celle des sols semi-perméables;
- la transmissibilité de la couche sableuse se chiffre à  $2 \cdot 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup> et peut être considérée comme homogène dans la zone d'étude ;
- le coefficient d'emmagasinement varie suivant la nature de la nappe :
  - nappes libres:  $\tau = 1-20\%$
  - nappes captives:  $\tau = 0,1-0,001\%$  pendant la période pluvieuse.

Même avec un sol composé d'argile considéré comme semi-perméable les *eaux souterraines* se trouvent tout de même à une profondeur relativement faible, provoquée surtout par la présence des lacs et fleuve en centre-ville qui a une influence sur le niveau de la nappe phréatique.

## 2.2. Physiologie et évolution de la ville [17] [35] [29]

La mobilité et la ville interagissent mutuellement et leur relation devient de plus en plus étroite et complexe à la fois, raison pour laquelle le développement et l'évolution de la ville d'Antananarivo constitue un noyau de l'étude.

Antananarivo est issue de la plus haute colline de la ville Analamanga, à la fin du XVIIe siècle, sous le royaume du Roi Andriamasinavalona. Ce dernier a continué les travaux d'aménagements hydrauliques de la plaine de Betsimitatatra et a développé d'autres sites. Il a construit de nombreuses digues qui sont servies également de chemins traversant les vastes étendues des rizières.

Par la suite, la ville s'est étendue sur les crêtes et les flancs des collines avoisinantes. On constate des prolongements naturels vers le Nord (Faravohitra) et l'Ouest (Isoraka) formant ainsi un « Y ».

Durant la période de colonisation, la ville a subi un important aménagement. Son centre vital s'est ainsi passé de la "ville haute" à la "ville basse". Ainsi, les parties d'Analakely étaient aménagées pour devenir le centre d'Antananarivo.

Des murs de soutènement sont réalisés dans de nombreux quartiers de la ville. La plupart des rues qui existent aujourd'hui dans cette partie de la ville datent du début du XX<sup>ème</sup> siècle. L'architecture civile adoptée est un mélange des cultures malgache et française. En 1925, un plan d'urbanisme destiné à la ville basse a mis l'accent sur l'hygiène.

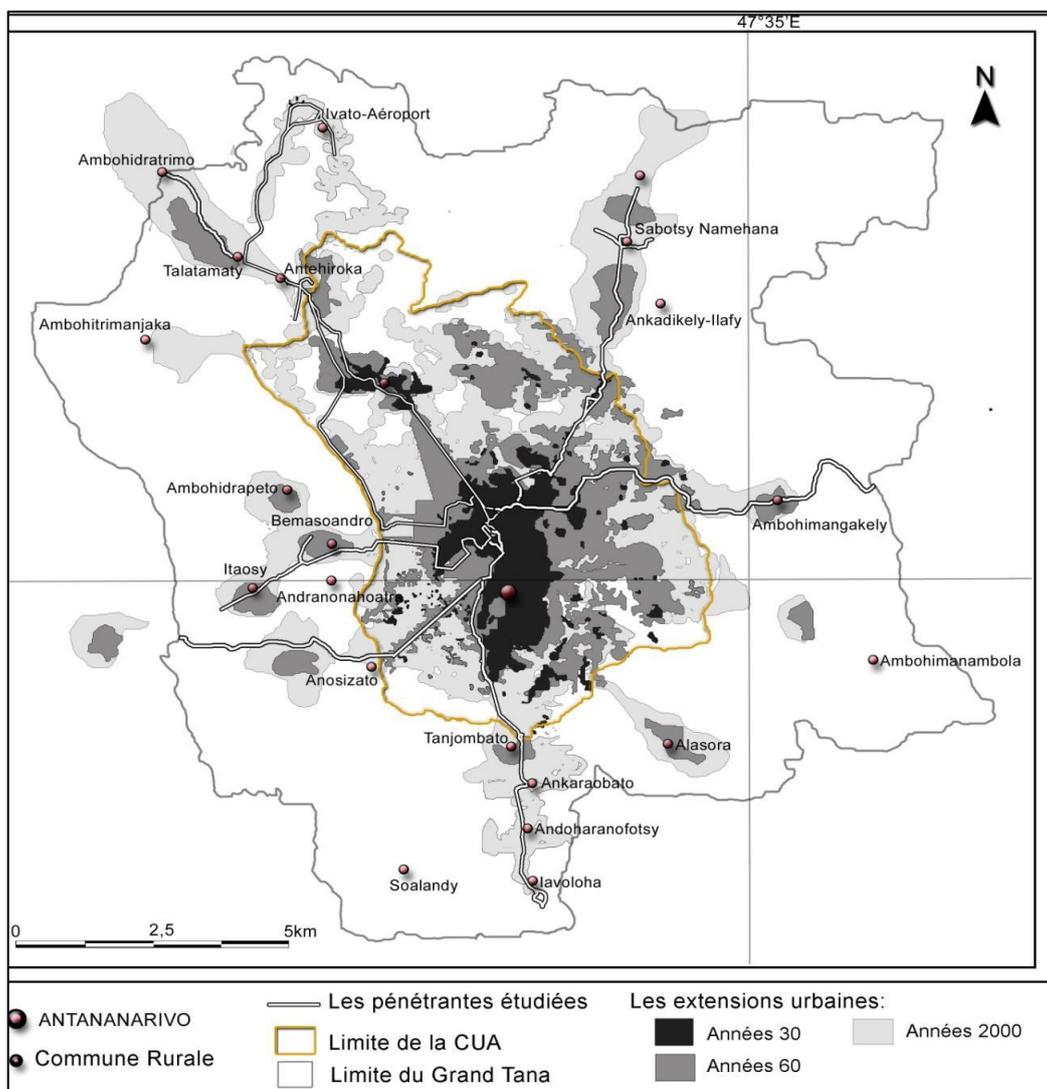
Les travaux d'aménagement et d'assainissement mis en place au début du siècle, se poursuivent, notamment avec la modernisation du Zoma (grand marché du vendredi) et l'élargissement de nombreuses artères.

En 1933, la ville basse est protégée des crues de l'Ikopa et de la Sisaony par l'élévation de digues. Les fonctions entre les deux parties de la ville sont désormais bien réparties : la "haute" devient le lieu de résidence alors que la "basse" devient le lieu du commerce et des loisirs. En centre-ville, 22 hectares de marais sont comblés, créant ainsi un vaste quartier

ordonné autour de l'Avenue Fallières (aujourd'hui dénommée Avenue de l'Indépendance) qui a été inaugurée en 1935.

Dès l'indépendance, un nouveau souffle, le remblaiement du côté d'Ampefiloha et de 67 ha a été mis en œuvre. Mais l'architecture traditionnelle est abandonnée au profit d'un style "international" promouvant les constructions en béton. Le building de l'hôtel Hilton, inauguré en 1970, est le symbole de cette architecture massive. Mais avec le temps, le plan d'aménagement de la cité des mille (Antananarivo) fut de plus en plus abandonné et les grands travaux ne sont plus qu'un instrument de propagande pour les dirigeants, ce qui entraîne avec l'augmentation de la population des problèmes d'espace et de transport.

La carte ci-dessous montre l'extension de la ville depuis l'année 1930 jusqu'au début du XXI<sup>ème</sup> siècle.



Source : Synthèse Journée de concertation « Initiatives Urbaines

Carte. 2.3 Extensions urbaine des années 30 – 2000

## 2.3. Milieu humain

Concernant la Population et la démographie, on sait que Si le nombre de population est élevé, le nombre de personnes à transporter augmente.

En 1610 (point origine), la ville a été habitée par le Roi Andrianjaka et ses mille guerriers. En 1899, la ville comptait 43 000 habitants et l'année d'après 48 000. En 1930, elle comptait 100 000 habitants et en 1960, 250 000. Sa population passait de 450 000 habitants en 1975 à environ 1 200 000 habitants en 2000, soit une croissance de 4,5 % par an c'est-à-dire à peu près 3 % par croissance naturelle et 1,5 % par excédent des arrivées sur les départs. D'après les données de l'INSTAT, la ville comptait 1 848 998 habitants en 2012.

Pour plus de précisions, le nombre approximatif de la population par arrondissement est présenté dans le tableaux 2.2 ci-après.

**Tableau 2.2 Nombre de population par arrondissement**

Arrondissement	Population totale
I	243 750
II	431 502
III	131 203
IV	250 137
V	306 581
VI	127 602
Total	1490775

Source : INSTAT 2012

## 2.4. Mobilité à Antananarivo [19] [20] [30]

D'après une étude faite par la Commune urbaine d'Antananarivo, un nombre de 2 millions d'habitants correspond un nombre de 4 millions de déplacements. De ce fait, pour l'analyse du noyau du problème, il faut des informations concernant les voies empruntées et les moyens de déplacement utilisés. Il est également indispensable de comprendre comment se font les déplacements.

### 2.4.1. Réseaux routier

La mobilité concerne non seulement le terme de déplacement et les moyens utilisés mais aussi l'espace où elle évolue. La plupart des voies actuelles de la capitale datent de la période coloniale vers le début du XXe siècle. En 2001, La longueur du réseau routier de la

ville d'Antananarivo, composée des boulevards, des avenues et des rues, est estimée à 194,9 km. Elle n'a pas subi de réel changement depuis l'année 2004 au cours de laquelle la construction de Marais-Masay et de l'axe Boulevard de l'Europe et du By-pass a eu lieu. A l'heure actuelle, le réseau routier se mesure près de 250 km linéaires de chaussées bitumées.

Le dit réseau est aussi marqué tout dernièrement par la rénovation de la route d'Anosibe, l'agrandissement de quelques rues comme aux 67 Ha, à l'axe Antanimena-Ankorondrano, ainsi que la construction de nombreux ronds-points tels à Anosizato, à Antanimena, à Anosy pour l'amélioration de la circulation.

Même avec ces travaux, les rues au centre-ville sont toujours la cause de problème. Elles sont vétustes, disparates, sous-dimensionnées, et la plupart en mauvais état. La population d'Antananarivo se plaint de la qualité de ces infrastructures.

#### **2.4.2. Moyens de communication les plus utilisés par la population d'Antananarivo et de ses environs**

Les moyens de transport tels que les deux-roues, les voitures particulières, les taxis et les bus appelés « Taxis-be » sont les plus courants à Antananarivo comme dans de nombreuses villes du monde.

Le recensement compte près de 7700 Taxis-ville et 2600 Bus ou Taxis-be qui transportent environ 1 000 000 voyageurs par jour. Ce chiffre correspond à ¼ du déplacement total dans la ville. A part les transports de personnes qui occupent la première place, des différents moyens de transport de marchandises sillonnent aussi la capitale. *Les camions* essentiellement des camions citernes transportant des carburants et aussi d'autres camions de transport alimentaire et de marchandises pour approvisionner la ville. Les camions citerne et les camions de la SAMVA ont des autorisations à circuler en plein jour. Ce qui accentue l'encombrement sur les voies publiques déjà saturées.

#### **2.4.3. Parc automobile en circulation**

Le parc automobile à Antananarivo a subi une croissance rapide. Il est passé d'environ 2 500 véhicules qui circulent chaque jour pour les 100 000 habitants (cette situation représente un rapport de 0,025 véhicule/habitant) en 1930, à 300 000 véhicules pour les 2 millions d'habitants (soit 0,15 véhicule/habitant.) actuellement.

Avec cette croissance importante de 600% alors que les infrastructures n'ont subi que peu d'extension, les infrastructures routières ne peuvent plus satisfaire la demande d'où naît le problème crucial qui est l'embouteillage

D'après l'INSTAT, les données suivantes montrent la répartition de l'effectif des immatriculations selon le genre de véhicules et le pourcentage d'acquisitions de véhicules en 2013

**Tableau 2.3 Nombres des véhicules immatriculés par trimestre pour l'année 2013**

Genre de véhicule	1	2	3	4	Total
Véhicule à deux roues	1 753	1 795	2 532	1 524	7 604
Voiture particulière	1 646	1 221	1 448	1 305	5 620
Voiture camionnette	531	468	491	425	1 915
Transport en commun	435	280	347	318	1 380
Voiture camion	210	184	199	153	746
Poids lourd	102	105	78	87	372
Autres	10	9	43	16	78
<b>Total</b>	<b>4687</b>	<b>4062</b>	<b>5138</b>	<b>3828</b>	<b>17715</b>

Source : INSTAT

**Tableau2.4 Répartition des immatriculations (en %) selon le type d'acquisition**

Genre de véhicules	Etat de véhicules		
	Neuf	Occasion	Mutation de province
Véhicule à deux roues	72,5	2,2	5,0
Voiture particulière	12,2	62,3	48,9
Voiture camionnette	11,1	9,9	14,6
Transport en commun	1,2	15,2	20,1
Voiture camion	2,6	5,2	6,7
Poids lourd	0,4	4,9	3,2
Autres	0,0	0,3	1,5
<b>Total</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>

Source : INSTAT

Ce tableau marque la tendance de répartition et de catégorie de véhicules qui circulent à Antananarivo. Il est remarqué que le nombre de véhicules particuliers qui peuvent transporter qu'un nombre restreint de personne occupent la deuxième place dans la répartition

par catégorie de véhicules, mais surtout que la majorité des véhicules qui y circulent sont presque des véhicules d'occasion.

Si cela concerne l'identification du site, l'urbanisme souterraine est un domaine qui intervient dans le cadre de cette étude, nécessitant un succincte aperçu que nous allons aborder dans le chapitre 3

## Chapitre 3. URBANISME SOUTERRAIN

Le choix de l'étude de l'urbanisme souterrain dans le cadre de ce mémoire est dicté non seulement par le fait que les ouvrages souterrains constituent l'une des disciplines étudiée au sein du Département Mines de l'ESPA. Mais aussi elle figure comme une perspective devenue indissociable au développement d'une grande ville.

Afin de mieux comprendre l'urbanisme souterrain et son utilisation optimale, il faut avant tout savoir son histoire ainsi que les différents champs d'application des ouvrages souterrains.

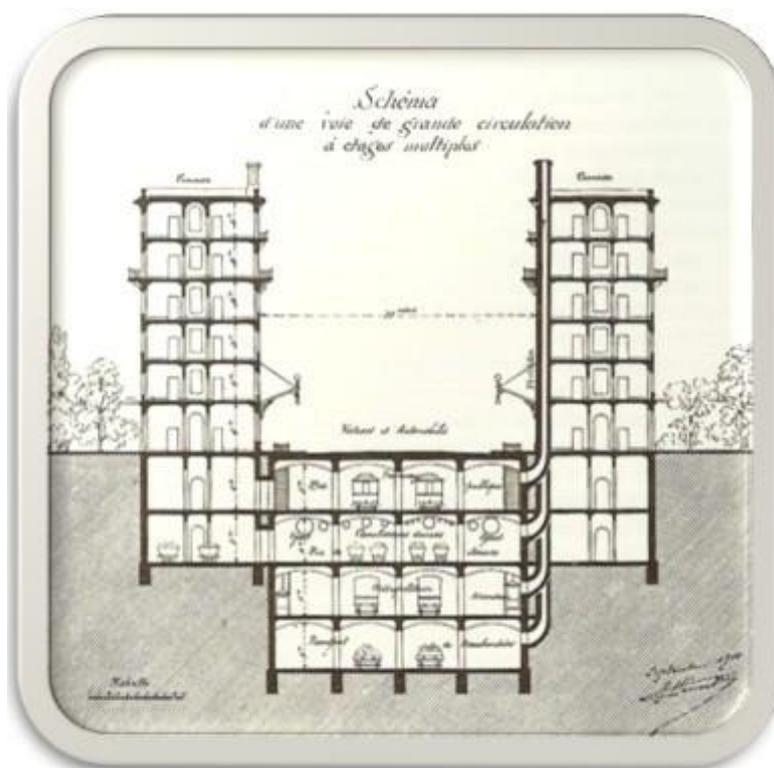
### 3.1. Histoire de l'urbanisme souterrain [14]

L'être humain occupe les espaces souterrains depuis toujours mais la forme d'utilisation a évolué au fil du temps. Avant, ces espaces étaient à l'usage d'habitation dans les cavités et les grottes par nos ancêtres.

L'ingénieur grec EUPHALINOS avait déjà réalisé des canaux souterrains 2000 ans avant Jésus-Christ. Les premiers ouvrages souterrains collectifs concernaient l'eau, en amont « les aqueducs » vers l'aval « les égouts », ouvrages attestés dans les villes du Moyen-Orient puis à Rome. A Paris, le premier égout sous la rue Montmartre, était aménagé en 1370.

En 1830, un ingénieur des travaux publics français Henri-Charles EMMERY qui était en charge du service des eaux de Paris demanda la réalisation d'un nouveau plan de la ville ou « plan du sous-sol » et suggéra l'établissement d'un système de gestion permettant le contrôle et la prévision de l'utilisation de l'espace souterrain.

En 1911, l'architecte français Eugène HENARD a imaginé une rue étagée illustrée à la figure 3.1 dénommée la « Rue future ». Son modèle avait pour but de résoudre la problématique de circulation, de libérer l'espace en surface, tout en évitant l'utilisation désordonnée du souterrain : le « chaos souterrain ». L'idée de HENARD consistait à enfouir sous la chaussée et sous les bâtiments adjacents des rues souterraines. Chaque type de transport profitait d'un espace alloué sur un étage déterminé : un espace était destiné au transport du courrier, un autre à l'emplacement de la circulation des wagons servant à la collecte des ordures.



Source : Hénard, 1911

Fig. 3.1 « Rue future » imaginée par Eugène Hénard

Ce n'était qu'avec l'apparition d'Édouard UTUDJIAN (1905-1975) considéré comme le père de l'urbanisme souterrain que le vrai concept d'urbanisme souterrain était né. Il croyait que l'espace souterrain offrait de nouvelles possibilités en matière de développement, ainsi que des solutions face à certains problèmes urbanistiques. Il rédigea, en 1933, un premier document décrivant son idée, un manifeste intitulé « L'urbanisme souterrain ».

La contribution d'Édouard Utudjian ne s'était pas limitée à la rédaction d'un livre et d'une définition, il a consacré sa vie entière à la promotion, la diffusion et l'avancement du concept. Cette construction incité les gens de créer des groupes et association

### 3.2. Associations internationales [14]

C'est à partir de l'époque d'Edouard UTUDJIAN que des groupes et des associations ont pris naissance avec la création du Groupe d'Étude et de Coordination de l'Urbanisme Souterrain (GECUS) permettant une ouverture mondiale, suivi du Comité Permanent International d'Urbanisme Souterrain (CPIUS). Ce dernier a été créé en 1937 lors du premier congrès international organisé par le GECUS. Le CPIUS avait comme objectif de mettre en place un bureau international du souterrain. Son mandat était de prendre en charge les activités de recherche et de développement en matière d'urbanisme souterrain. *L'Association*

*Française des Travaux en Souterrain* (AFTES) créée en 1972 fut le premier groupe à s'intéresser à l'urbanisme souterrain après la mort d'Édouard UTUDJIAN puis en 1974, l'*International Tunnelling and Underground Space Association/Association Internationale des Tunnels et de l'Espace Souterrain* (ITA/AITES) voit le jour. L'année 1983 marque le début d'une série de conférences internationales portant sur les aménagements et les espaces en souterrain en Australie et qui ont contribué à la création de l'Association des Centres de recherche de l'Utilisation Urbaine du Sous-sol (ACUUS). Lors de la conférence suivante tenue à Paris en 1995, l'ACUUS, une association internationale non gouvernementale est incorporée au Canada.

L'annexe 1 donne les dates de conférences qui ont marqué l'urbanisme souterrain selon l'ACUUS.

Dorénavant, des nombreuses associations à travers différents pays se penchent sur ces cas particuliers, entre autres, celle de Montréal, l'Observatoire de la Ville Intérieure (OVI) est créé à Montréal en 1992 par l'Institut d'urbanisme de la Faculté d'aménagement de l'Université de Montréal. Le Groupement d'Intérêt Scientifique Sol (GIS Sol) a été créé en France en 2001.

L'histoire a forgé le présent. Ainsi, plusieurs villes et pays sont contraints de l'utilisation souterraine. Une liste de ces pays et villes est donnée dans l'annexe 2. Elle nous montre le mode d'exploitation de l'espace souterrain selon ces quelques pays.

### **3.3. Différents champs d'application des ouvrages souterrains [39] [44] [45]**

#### **3.3.1. Usage du sous-sol**

Autrefois, le sous-sol a été utilisé pour des réseaux d'assainissement et son usage a été évolué et a pris d'autres dimensions. Le champ d'application de la solution souterraine dans le domaine d'activité humaine est très large et s'évolue en fonction de la société. Dans cette optique, les ouvrages souterrains concernent, entre autres :

- la voirie souterraine ;
- les passages souterrains ;
- les divers réseaux de circulation (tunnels routiers) ;
- les parkings, les garages ;

- les salles ouvertes au public (salles de sports, salles de spectacles, musées souterrains, espaces commerciaux) par exemple les cas de Moscou où un énorme centre commercial est installé en souterrain et qui a ouvert ses portes en 1997.
- ces exemples montrent la pluralité de l'usage du sous-sol en milieux urbains et la non limitation de l'étude de l'urbanisme souterrain sur le cas théorique. Elle s'est concrétisée par la réalisation de ces nombreux ouvrages.

### 3.3.2. Formes d'usage du sous-sol

Les ouvrages souterrains en sites urbains peuvent se trouver soit dans leur totalité soit en partie, enfouis dans le sol ou dans le massif rocheux. Par exemple, une partie des ouvrages comme les parkings, les gares, les aéroports, les centres commerciaux peuvent être souterrains et une autre partie, en surface comme nous le montre la figure 3.2.

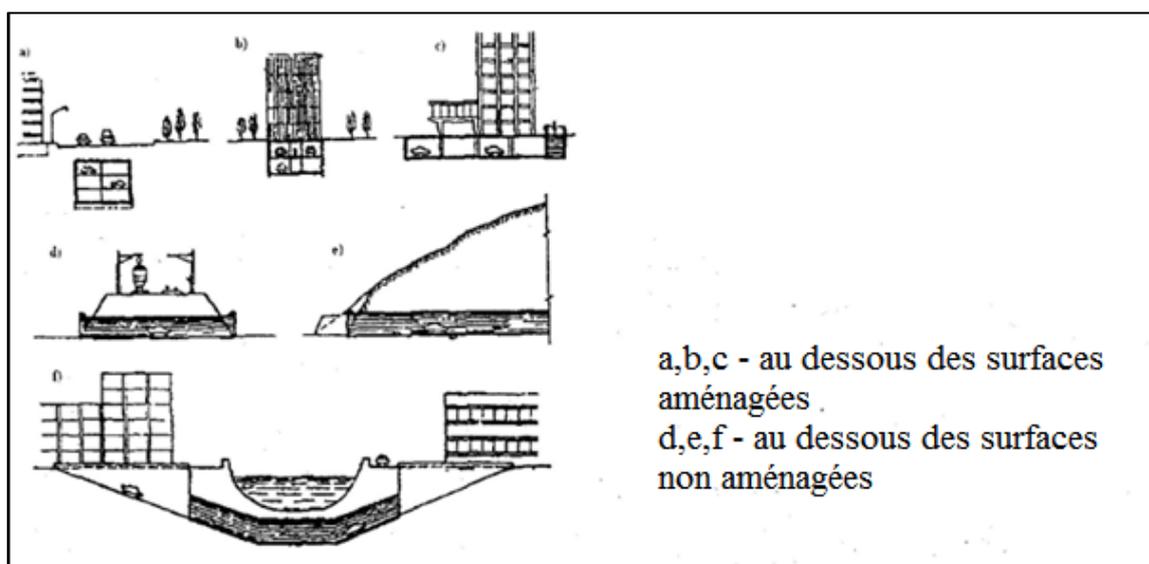


Fig. 3.2 Schéma d'implantation des ouvrages souterrains [35]

Parmi les nombreux types d'ouvrages souterrains en site urbain se démarquent les ouvrages destinés à la circulation.

### 3.3.3. Infrastructures de transports souterrains

Entre autres, l'idée est d'enfouir certaines parties des infrastructures de transport afin d'améliorer l'efficacité et la rapidité des déplacements en milieu urbain où la densité est la plus grande et de libérer de l'espace en surface.

Nous pouvons en distinguer

#### - Le métro

Le métro est un moyen de transport souterrain très développé dans les pays avancés. Par exemple, le cas de la ville de Seoul, capitale de la Corée du Sud qui compte 9,7 millions

d'habitants, la fréquentation de métro est de 7 millions/jour, un pourcentage de 72% ; Pour le cas de Moscou près de 6 millions de passagers par jour pour ses 11.5 millions d'habitants soit plus de 55% empruntent le métro. Ces chiffres montrent l'importance de l'utilisation des voies souterraines, en particulier le métro, dans les grandes villes déjà développées.

Nous pouvons voir aussi dans l'annexe 4, une liste des pays qui se sont mis à la construction de lignes de métro dont des pays africains y figurent.

#### - **Passages souterrains**

L'utilisation d'un espace souterrain a une double finalité : le premier pour protéger les piétons contre les risques d'accidents quand on traverse des voies principales et le second pour améliorer la fluidité de la circulation en surface.

#### - **Ouvrage de circulation souterraine**

Cela consiste à enterrer des voies de circulation automobile. Ils peuvent se trouver en différentes profondeurs par rapport à la surface. Ainsi, on distingue les ouvrages sous faible couverture et l'ouvrage sous forte couverture. Ils sont prévus pour la circulation des véhicules (voitures légères, poids lourds, véhicules de transport en commun ...).

Il permet de franchir des obstacles dans certain cas comme les montagnes et fleuves, ou dans d'autres cas surtout en milieu urbaine, l'objectif est de réduire la circulation en surface mais aussi pour l'accroissement de la capacité de transport de certaines parties des artères principales (carrefour à plusieurs niveaux).

Cette première partie est consistée par la présentation du cadre d'étude, d'abord, par la généralité de ce qu'on entend par transport urbain. Ensuite, la présentation du site « Antananarivo » qui a eu pour objet principal de voir les caractéristiques de la ville. Puis un aperçu sur l'urbanisme souterrain.

Mais pour la question d'existence réelle du problème de circulation, le décèlement de ses causes et de ses conséquences ainsi que la proposition de solution sera étudiée dans la deuxième partie « Analyse de la problématique du transport et proposition de solution »

**PARTIE 2 :**  
**ANALYSE DE LA PROBLEMATIQUE DU**  
**TRANSPORT ET PROPOSITIONS DES**  
**SOLUTIONS**

## Chapitre 4. TRAVAUX DE TERRAIN D'ANALYSE DES PROBLEMES D'EMBOUTEILLAGE

L'embouteillage est un fléau dans la ville d'Antananarivo que tout le monde constate. En outre, il mérite des études sur terrain pour identifier les problèmes et de proposer des solutions appropriées.

### 4.1. Identification du dysfonctionnement

Dans le cadre du présent paragraphe, nous adoptons les conventions ci-après :

- *au niveau des figures*

Les flèches dans les figures représentent la longueur des bouchons ainsi que leur position.

- *au niveau des tableaux*

Les informations et les données de l'embouteillage au niveau de chaque secteur portent sur la longueur, les positions (début et fin) des bouchons ainsi que les durées de parcours. Les heures de pointe(HP) sont définies aux environs de 6h30 à 8h ; de 11h30 à 12h30 et de 16h à 19h.

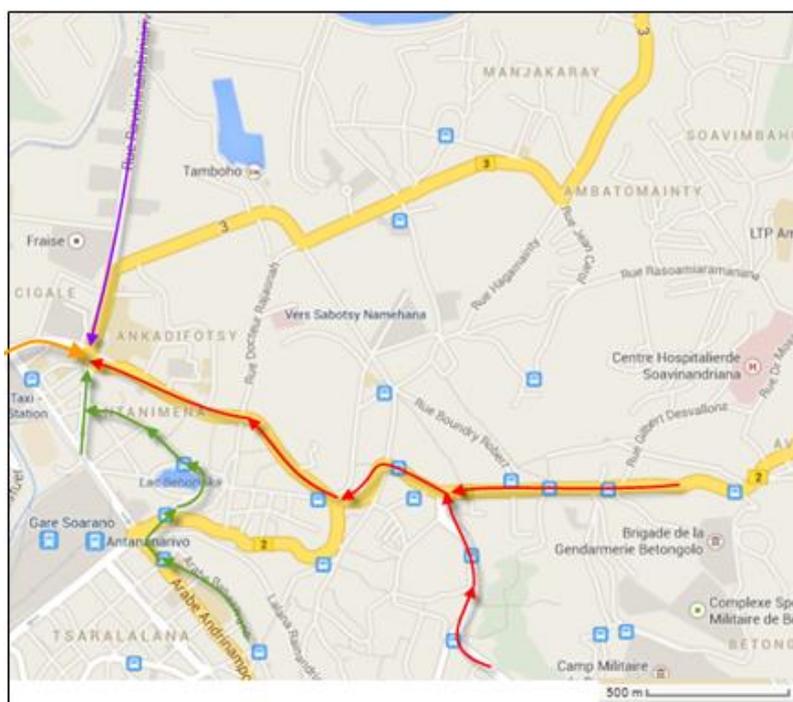
Dans le cadre de cette étude, nous avons subdivisé la ville d'Antananarivo en 7 secteurs

**a) Secteur 1 :** (Axes Antanimena-Ankorondrano-Behoririka-Besarety)

Le bouchon dans cette partie est représenté sur le tableau 4.2. et la carte 4.1

**Tableau 4.1** Données et information relative à l'embouteillage du secteur 1

Légende	Début	Fin	Heures	Distance	Temps de parcours
	Besarety- Ampanandra	Rond-point Antanimena	H-P	1 km à 3 km	45 mn à 1h
	Ankazomanga	Rond-point Antanimena	H-P	200 m à 500 m	15 mn à 45 mn
	Ankorondrano	Rond-point Antanimena	H-P	500 m à 1 km	30 mn à 45 mn
	Behoririka- Analakely	Rond-point Antanimena	H-P	1 km à 2 km	45 mn à 1h
	Behoririka	Analakely	Toute heure	500 m	45 mn



Carte. 4.1 Carte illustrant l'embouteillage sur secteur 1

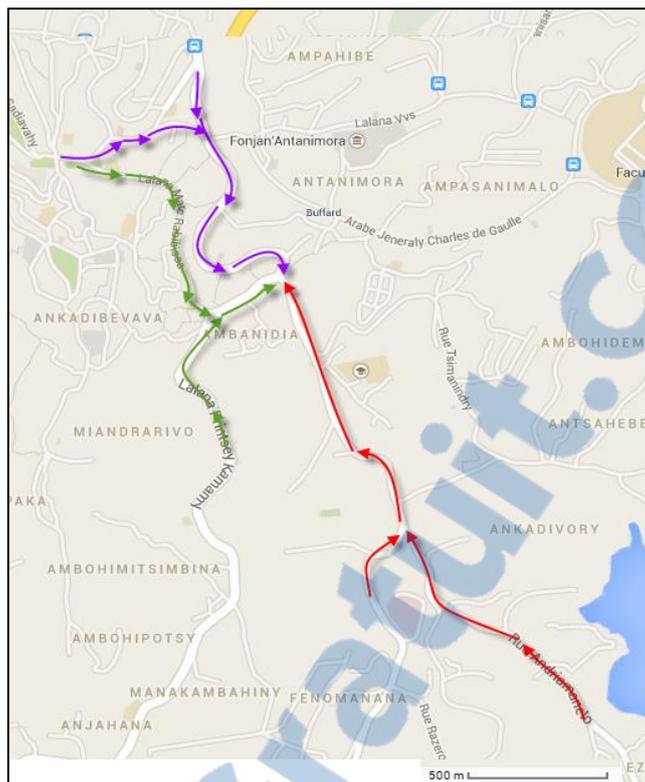
**b) Secteur 2 :** (Axes Ambanidia – Manakambahiny — Mandroseza – Mahazoarivo – Ankorahotra - Antsahabe)

Le dysfonctionnement est représenté sur la carte 4.2 ainsi que dans le tableau 4.3.

La photo 4.2 a été prise durant l'embouteillage à Ambanidia pendant les heures de pointe.

Tableau 4.2 Données et information relative à l'embouteillage du secteur 2

Légende	Début	Fin	Heures	Distance	Temps de parcours
	Mandroseza	Rond-point d'Ambanidia	H-P	2 à 3 km	45 mn à 1h30
	Antsakaviro	Rond-point d'Ambanidia	H-P	500 m à 1 km	30 mn
	Manakambahiny Antsahabe	Rond-point Ambanidia	H-P	500 m à 1 km	45 mn



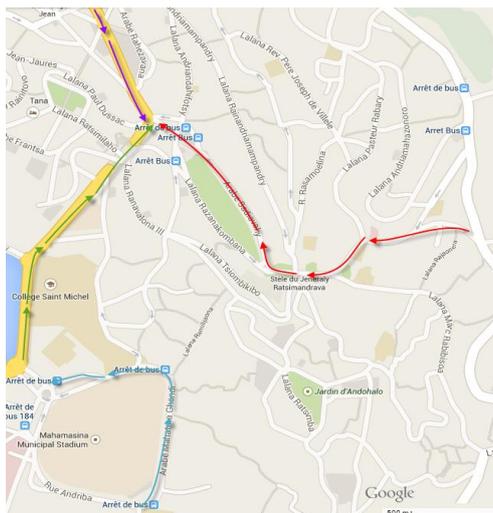
Carte. 4.2 Carte illustrant l'embouteillage sur secteur 1



Photo 4.1 Embouteillage sur l'axe Ambanidia - Mandrozeza Photo prise le 3 août 2014 à 8h

c) **Secteur 3 :** (Axes Analakely –Ambohijatovo –Anosy-Mahamasina)

L'embouteillage y est représenté sur la carte 4.3 et le tableau 4.4, et illustrée sur les photos 4.3a et 4.3b.



Carte. 4.3 Carte illustrant l'embouteillage sur secteur 3

Tableau 4.3 Données et information relative à l'embouteillage du secteur 3

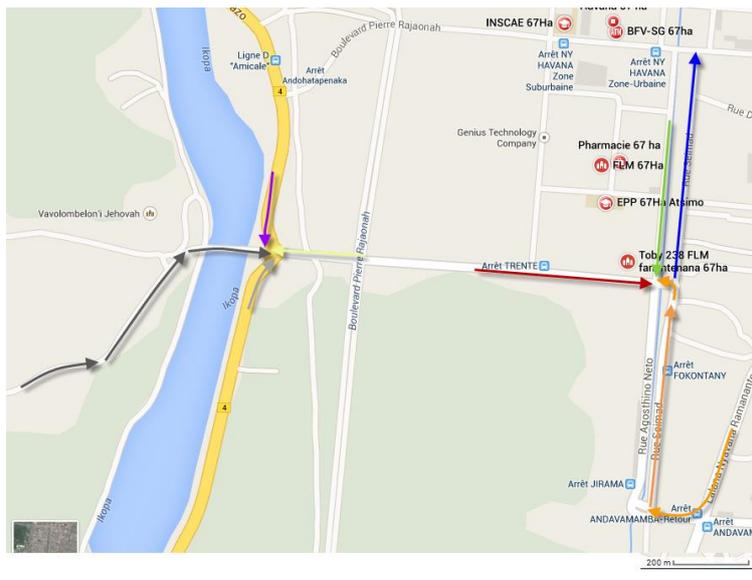
Légende	Début	Fin	Heures	Distance	Temps de parcours
	Antsakaviro	Carrefour Analakely	H-P	1 km	30mn à 45mn
	Anosy	Carrefour Analakely	H-P	500 m à 1 km	30 mn à 45 mn
	Analakely	Carrefour Analakely	H-P	500 m	30 mn
	Tsimbaza	Mahamasina	Jeudi	1 km	30 mn



Photo 4.2 Embouteillage à Analakely

d) Secteur 4 : (Axes 67ha, Andavamamba, Itaosy)

L'embouteillage est illustré sur la carte 4.4 ainsi que le tableau 4.5.



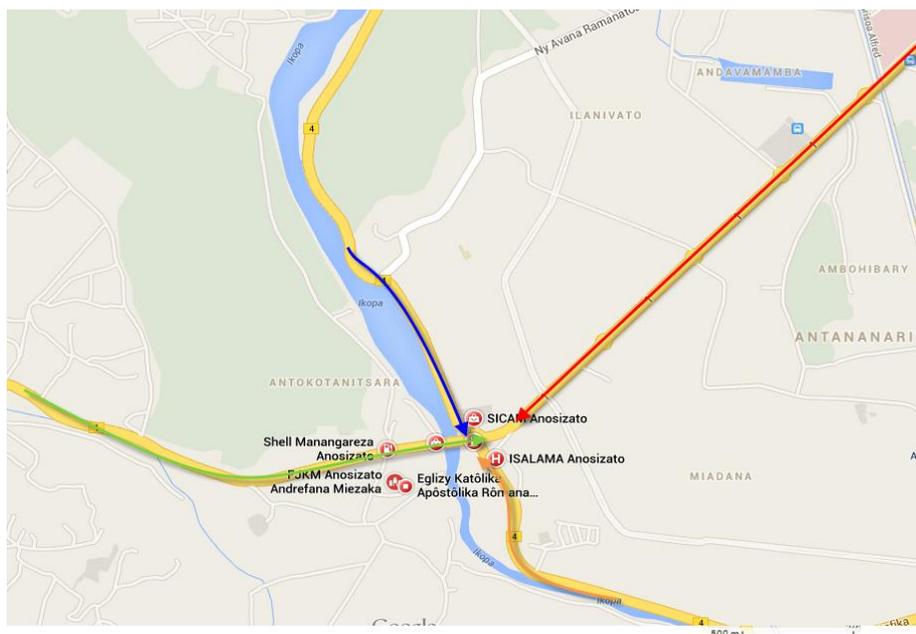
Carte. 4.4 Carte illustrant l'embouteillage sur le secteur 4

Tableau 4.4 Données et information relative à l'embouteillage du secteur 3

Légende	Début	Fin	Heures	Distance	Temps de parcours
	67ha Rue angestino Neto	Carrefour 67ha	H-P	200 m	10 mn
	Andavamamba	Carrefour 67ha	H-P	500 m à 1 km	30 mn à 45 mn
	67ha angestino Neto	Carrefour 67ha	H-P	200 m	10 mn
	67ha Rue seimad		Toute heure	500 m	10 mn à 30 mn
	Itaosy	Ampasika	H-P	500 m à 1 km	15 mn à 45 mn
	Andohatapenaka	Ampasika	H-P	500 m	15 mn
	67ha	Ampasika	H-P	500 m	15 mn

e) **Secteur 5 :** (Axes Anosizato; Anosibe ; Fasan'nyKarana)

L'embouteillage est représenté sur la carte 4.5 et le tableau 4.6.



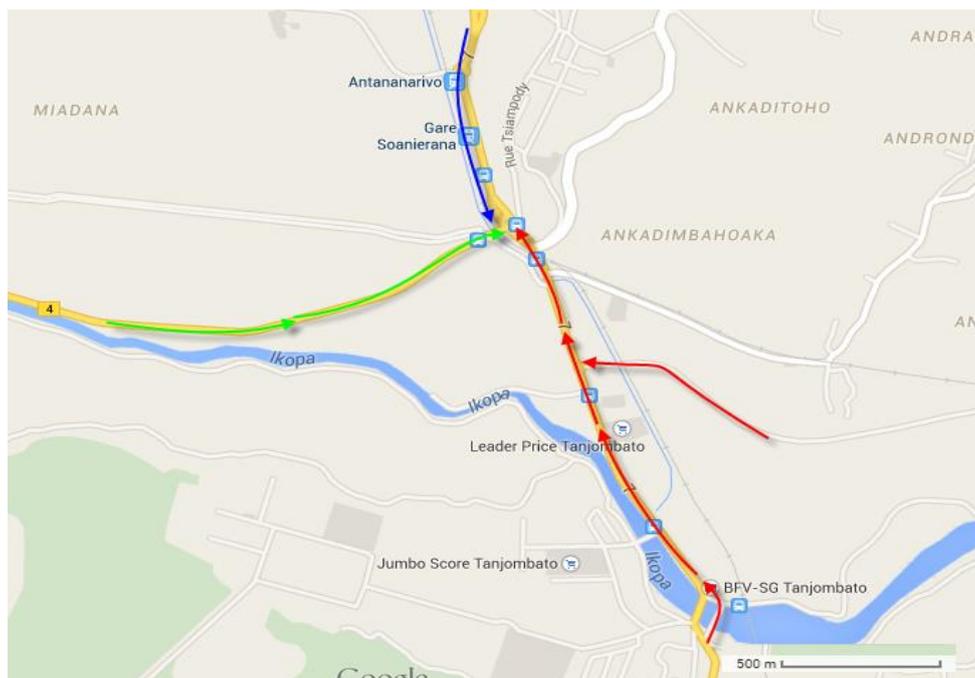
Carte. 4.5 Carte illustrant l’embouteillage sur le secteur 5

Tableau 4.5 Données et information relative à l’embouteillage du secteur 5

Légende	Début	Fin	Heures	Distance	Temps de parcours
	Anosibe	Carrefour Anosizato	H-P	500 m à 1 km	15mn à 1 h
	Fasankarana	Carrefour Anosizato	H-P	500 m	20 mn
	Ampitatafika	Carrefour Anosizato	H-P	1 km à 2 km	15 mn à 1h
	Anosipatrana	Carrefour Anosizato	H-P	500 m	30mn

**f) Secteur 6 :** (axes Ankadimbahoaka – Tanjombato – Andrefan’Ambojanahary – Fasan’ny karana)

L’embouteillage sur ce secteur est représenté sur la carte 4.6 et le tableau 4.2. Ces derniers nous donnent les informations sur la congestion dans ce secteur.



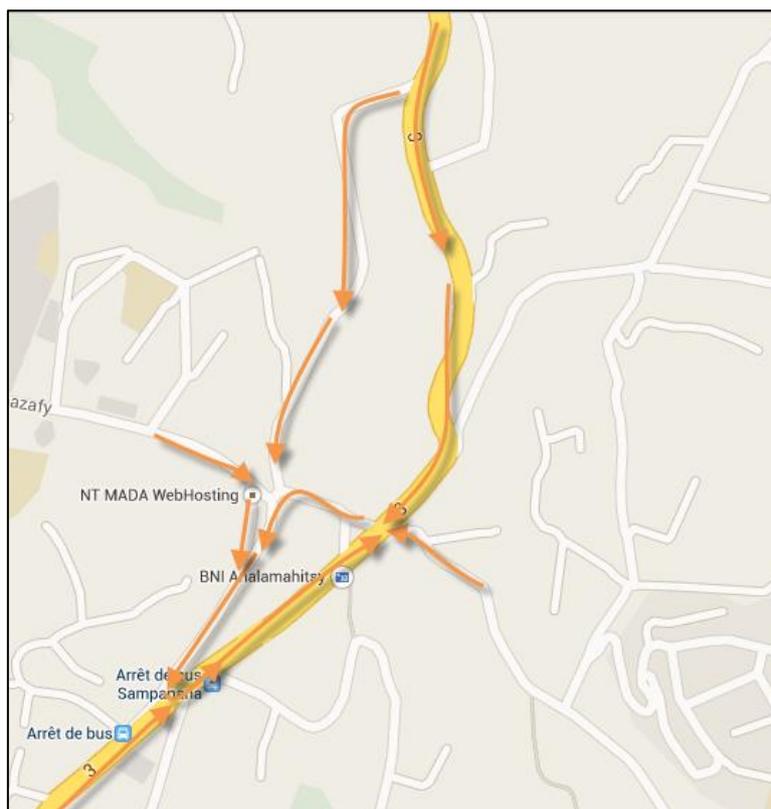
Carte. 4.6 Carte illustrant l'embouteillage sur le secteur 6

Tableau 4.6 Données et information relative à l'embouteillage du secteur 6

Légende	Début	Fin	Heures	Distance	Temps de parcours
	Ankadimbahoaka	Tanjombato – by pass	H-P	300 m à 1 km	30 mn à 1 h
	Ankadimbahoaka	Fasan'ny karana	H-P	500 m à 1 km	15 mn à 1 h
	Ankadimbahoaka	Andrefan'Ambojanahary-Namontana	H-P	500 m	30 mn à 1 h

**g) Pour le secteur 7 (Axe Analamahintsy)**

Ce secteur concerne le quartier d'Analamahintsy qui est marqué par la saturation complète de son réseau routier en heure de pointe pour toutes les directions (Carte 4.6), les embouteillages peuvent atteindre 1km avec une durée de 2h. Cette situation est surtout visible sur la RN3.



Carte. 4.7 Carte illustrant l'embouteillage sur le secteur 7

L'identification des endroits ci-dessous porte surtout sur les dysfonctionnements permanents pendant les heures de pointe. Toutefois, des congestions, à maintes reprises, ont été détectées. Par exemple, on peut citer celles d'Analakely et de 67 Ha mais aussi de façon hebdomadaire pour les quartiers d'Andravoahangy tous les Mercredi et de Mahamasina tous les Jeudi.

La circulation à Antananarivo lors des averses est bloquée surtout dans les zones basses à savoir Besarety, Andravoahangy, Ampefiloha, Anosy, Ankorahoatra, Ambanidia. Des embouteillages pouvant durer jusqu'à 5h, marqués par les voies défectueuses dues aux pluies et l'inexistence des agents de la circulation lors des pluies torrentielles.

Dans les environs de 5h-6h30, 8-11h, 12-16h et de 19 à 21h le bouchon ne se manifeste qu'à quelques mètres. Cela se reproduit aussi durant les week-ends (dimanche) ainsi que pendant les grandes vacances (entre 15 juillet à 15 septembre).

Ces cas sont représentés dans les photos comparatives suivantes. Elles nous montrent la congestion durant les heures de pointe et pendant les weekends (dimanche) et les jours des vacances scolaires prises durant la même heure.



**Photo 4.3** Photo prise du côté d'Ambatoroka à 7h30 le 10nov 2014



**Photo 4.4** Photo prise du côté d'Ambatoroka à 7h30 le 12 aout 2014



Photo 4.5 Photo prise à Antanimena à 8h le 11 Novembre 2014 (Mardi)



Photo 4.6 Photo prise à Antanimena à 8h le 16 Novembre 2014 (dimanche)

## 4.2. Causes de l'embouteillage à Antananarivo

Les identifications ainsi déterminées plus haut nous amènent à déceler les différentes causes des embouteillages à Antananarivo.

### 4.2.1. Problème sur le plan d'urbanisme

Le plan d'urbanisme du décret n° 63 -192 du 27 mars 1963 modifié par le décret n°69-335 du 29 juillet 1969 est obsolète et caduque et ne répond plus à la situation actuelle de la ville d'Antananarivo

L'évolution anarchique de la ville depuis l'indépendance marque le dysfonctionnement au niveau du plan d'urbanisme. Celle-ci a une influence sur la situation actuelle de la ville où

la population ne cesse d'augmenter de jour en jour. La corruption fait rage, la construction illicite de maisons se trouve un peu partout. Cette situation ramène à l'incapacité de l'administration à trouver des solutions adéquates aux problèmes rencontrés.

#### ***4.2.1.1 Problème sur l'aménagement du territoire***

On peut en citer :

- *le problème d'organisation et d'emplacement des marchés quotidiens et hebdomadaires*

L'inexistence et le manque d'emplacement pour les marchés quotidiens entraînent l'occupation par les marchands des trottoirs et d'une partie des rues déjà étroits.

La présence d'embouteillage dans le centre-ville de façon hebdomadaire se manifeste à proximité des emplacements des marchés qui a lieu toutes les semaines à savoir :

- le marché de Mahamasina « jeudi » ;
- celui d'Andravoahangy « mercredi ».

Ce problème a été la cause de la suppression du marché de Zoma d'Analakely.

En effet, lors de ces jours, un nombre important de commerçants se regroupent dans un quartier précis, entraînant à l'occasion un surpeuplement du quartier en question, provoquant par la suite des bouchons sur les rues avoisinantes. Les avenues sont paralysées autant par les vendeurs que par les acheteurs si bien que la multitude de voitures qui y circulent chaque jour peine à se frayer un chemin au milieu d'une foule immense.

- *l'existence des magasins de stockage situés en plein ville*

En particulier, des magasins de stockage de carburant et des marchandises, ce qui entraîne l'entrée des gros véhicules dans la capitale qui est déjà saturée. Cela se manifeste, plus particulièrement, au niveau de l'approvisionnement en carburant sur lequel les camions citernes obtiennent une autorisation spéciale de circuler en plein jour.

- *le manque de parking et de stationnement approprié*

Le manque des lieux de stationnement poussent les utilisateurs de voitures particulières à envahir les trottoirs. Ce cas représente aussi l'une des causes du problème de

la circulation. Le ralentissement des véhicules lors de recherche de stationnement ou même le stationnement dans des endroits inadaptés gêne la circulation. Avec les rues qui sont déjà étroites, la présence des véhicules garés sur les trottoirs ne fait que rétrécir la capacité des rues augmentant ainsi la congestion comme le montre la figure 4.1

Les véhicules 1 et 2 sont contraints de ralentir. Cet état diminuera le flux de circulation créant ainsi l'embouteillage

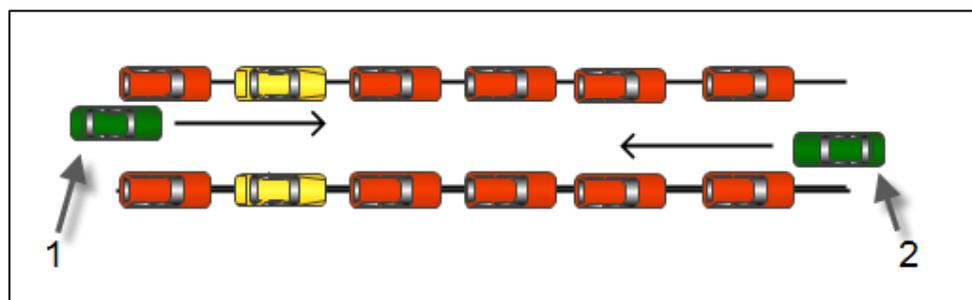


Fig. 4.1 Cas de circulation en présence de véhicules garés le long des rues

- *l'arrêt de bus mal placés*

Les arrêts des bus sont placés à des endroits inadéquats et dont la majorité est très étroite en largeur et en longueur autrement dit ne pouvant contenir que quelques véhicules. A cela s'ajoute le non-respect des chauffeurs au code de la route. Ce phénomène constitue une des sources majeures d'embouteillage.

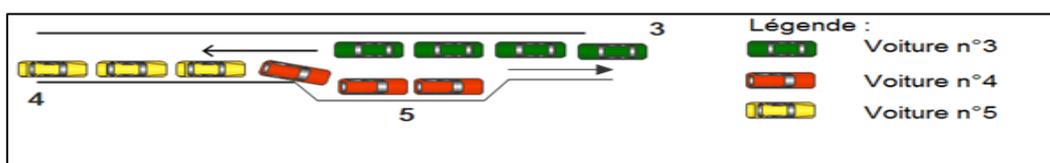


Fig. 4.2 Situation des arrêts à Antananarivo

Sur la figure 4.2 on peut constater que les véhicules n°4 sont bloqués du fait que les arrêts ne sont suffisamment longs pour accueillir un nombre important des « Taxi-Be » (voitures n°5)

**4.2.1.2 Sur le plan du transport urbain**

On peut signaler :

- *la vétusté du parc automobile*

La vétusté du parc automobile s'explique par l'importance massive des voitures d'occasion et en mauvais état et qui peuvent entraîner des pannes et des accidents occasionnels.

Ces accidents et ces problèmes techniques des voitures sont les lots quotidiens des citoyens d'Antananarivo engendrant le blocage d'une partie ou de la totalité de la voie.

- *l'existence des moyens de transport inadaptés*

Les moyens de transport inadaptés circulant encore dans la ville comme les « charrettes » et les « pousse-pousse », avec une vitesse très faible sont aussi l'une des causes des embouteillages. La non maîtrise du code de la route par les tireurs fait que les charrettes et les pousse-pousse constituent une partie intégrante des sources d'embouteillage à Antananarivo. Etant donné l'étroitesse de la largeur des rues, aucun dépassement n'est possible.

Les « Taxis-Be » quant à eux, ne peuvent transporter qu'un nombre limité de personnes par rapport aux bus des pays développés. Ce qui nécessite un nombre plus important de véhicules pour pouvoir transporter le même nombre de personnes. De plus avec le manque de professionnalisme des conducteurs, la non-respect des cahiers de charge, le manque de confort et le problème d'insécurité dans les bus, on constate que les citoyens d'Antananarivo préfèrent utiliser leurs propres véhicules pour leurs déplacements. Ce que démontre les données du tableau 2.2 du sous-paragraphe 2.4.3 où les véhicules particuliers occupent le deuxième rang du point de vue immatriculation à Antananarivo.

#### **4.2.2. Manque de moyens financiers**

Les ressources financières de la Commune Urbaine d'Antananarivo (CUA) ne peuvent pas subvenir aux besoins de la ville, surtout en matière d'investissements. Le budget communal, comparé à la taille de sa population, révèle une situation financière assez problématique.

Le manque d'entretien vient encore aggraver l'état des rues déjà mal construites et ne suit pas les règles de l'art. Par conséquent, les voies se détériorent facilement. La situation est aussi étroitement liée au climat dont la pluie a un effet dévastateur sur les rues déjà non entretenues.

Fautes de moyens financiers et d'un plan d'urbanisme adéquat, les nouvelles constructions des voies de communication sont presque inexistantes. Alors que le nombre de la population et du parc automobile ne cessent d'augmenter.

A part ces différentes causes, l'étude détaillée de la situation démontre l'existence d'une autre origine du problème qui entrave la circulation à Antananarivo. Ce que nous allons voir en détail ci-après. La photo 4.8 montre que même avant les arrêts, l'embouteillage est

déjà présent ce qui nous permet de dire que même en supprimant ces arrêts d'autobus sur cette section, l'embouteillage persiste toujours.

On remarque aussi par ailleurs la présence de congestion sur les axes d'Anosibe-Anosizato carte 4.5 du paragraphe 4.1 ci-dessous. Cet axe est déjà constitué par une route à quatre voies. Ce qui nous conduit à l'identification de la source majeure du problème.



Photo 4.7 Arrêt UCM Ambatoroka

### 4.2.3. Carrefours d'Antananarivo

Les principaux carrefours à Antananarivo sont tous des carrefours plans. On en distingue 2 types : celui en forme de « T » et celui en forme de « + »

Les carrefours en « T » déversent 3 branchements (figure 4.3) avec ou sans rond-point comme ceux d'Analakely et d'Ambanidia

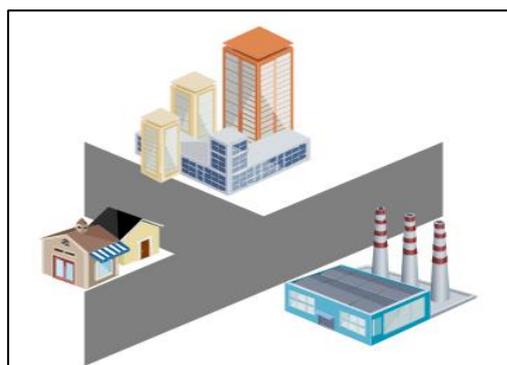


Fig. 4.3 Carrefour en forme T à trois branchements

Le carrefour « + » de la figure 4.4 sert 4 directions avec ou sans rond-point comme ceux d'Antanimena ; du Boulevard de l'Europe à Ankorondrano ; d'Anosizato ; de 67Ha ; d'Ampasika et d'Ankadimbahoaka.



Fig. 4.4 Carrefour en forme "+" à 4 branchements

Tout ceci montre que les problèmes de la circulation ne sont pas seulement liés aux arrêts des bus, mais aussi au mauvais état et à l'étroitesse des voies et à la vétusté des voitures. Mais à plus forte raison, ils sont surtout liés à l'existence des carrefours qui ne sont plus adaptés aux caractéristiques d'une grande ville. On remarque que la majorité des grands embouteillages s'y trouvent sur ces carrefours.

En effet, dans ces artères déjà marquées par un flux intensif de véhicules, les carrefours plans d'Antananarivo présentent quelques inconvénients, Ils ne permettent aux véhicules que de passer un à un venant de chaque direction. De même, pour le système de carrefour avec rond-point, l'ancrage n'est plus possible avec un nombre important de véhicules. D'une manière plus technique, les problèmes du trafic est le fruit de déséquilibre entre l'offre et la demande. Soit  $D$  (demande) devient supérieure à  $O$  (Offre) (cas des heures de pointe). Soit  $O$  devient inférieure à  $D$  (cas des incidents)

- a) La demande devient supérieure à l'offre dans le cas où pendant les heures de pointe, le volume du trafic augmente jusqu'au point où la capacité des voies ne peut plus la satisfaire ;
- b) L'offre devient inférieure à la demande lors des incidents ou de perturbation de la circulation :
  - incident : ce sont les cas d'accident ou de panne de véhicule qui entraînent que la totalité ou une partie des voies n'est plus opérationnelle

- perturbation : les voitures sont contraintes de ralentir du fait que les voies sont détériorées, et que la largeur circulaire est réduite par la présence des véhicules stationnant au bord de la route

Le cas des carrefours figure parmi les raisons où la demande devient supérieure à l'offre.

En effet, l'offre devient inférieure à la demande pendant les heures de pointe dans la plupart des carrefours d'Antananarivo

En guise d'exemple précis, nous allons étudier le cas du carrefour d'Antanimena.

Le carrefour d'Antanimena est équivalent au schéma de la figure 4.5 avec une réduction de 4 à 2voies.

#### **4.2.3.1. Explication**

##### **a) Première explication**

La capacité d'un carrefour est marquée par la capacité d'entrée dans le carrefour et la capacité de l'anneau.

La capacité de l'anneau est représentée par le nombre de voies qui compose le carrefour, Ils sont au nombre de 2 dans le cas d'Antanimena. Or avec le nombre de branchements qui est de 4 où le carrefour est de type « + », les nombres de voies entrant est équivalent à 4. Ce qui nous permet d'affirmer la réduction de 4 en 2 voies

##### **b) Deuxième explication**

Avec l'alternance à l'entrée du carrefour. Son offre est réduite de moitié. La capacité d'entrée est égale alors à la moitié de la capacité d'une voie, donc une réduction de 4 à 2 voies pour les 4 branchements.

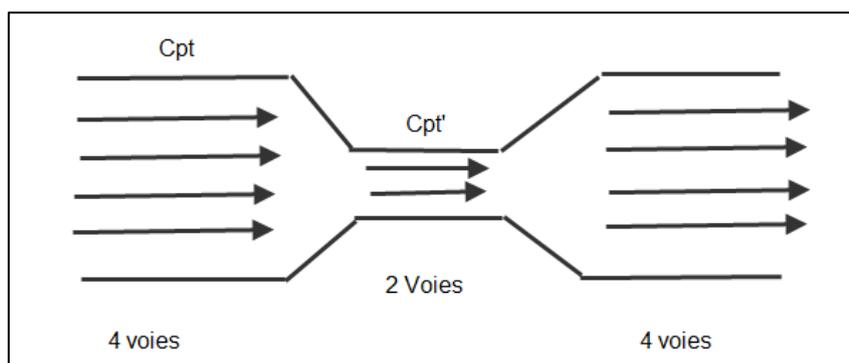


Fig. 4.5 Schéma équivalent du carrefour d'Antanimena

Cpt (Capacité des voies avant et après le carrefour)

Cpt' (Capacité du carrefour)

La capacité moyenne d'une voie est équivalant à 2200 véhicules /h avec une vitesse de référence de 70km/h. Or en pleine ville d'Antananarivo la vitesse réelle estimée est en moyenne de 30 km/h (vitesse réglementaire 40km/h). Ce qui réduit la capacité d'une voie de 42% ou de 924 véhicules /h. Un chiffre qui se rapproche de la synthèse sur les temps de parcours des véhicules de 930 véhicules /h pour 2voies de 5m (SETRA – Septembre 84)

$$Cpt = 3720 \text{ Véhicules par heure } (930 \times 4)$$

$$Cpt' = 1860 \text{ Véhicules par heure } (930 \times 2)$$

Ces données nous montrent l'offre de la rue

Quant à la demande, elle est représentée par le nombre de véhicules qui empruntent les voies. Un nombre moyen de véhicules a été prélevé à Antanimena pendant les heures de pointe mais aussi durant les heures normales ce qui est illustre par le tableau 4.8 suivant :

Tableau 4.7 Nombre moyen de véhicules par voie à Antanimena au niveau de la demande

	1 voie	4 voies
HP	900 Véhicules/h	3600
Heures Normales	400 Véhicules/h	1600

Ces chiffres montrent que pendant les heures normales la demande est inférieure à l'offre d'où le bon fonctionnement du rond-point. Mais pendant les heures de pointe on remarque que la demande devient supérieure à l'offre. Ce qui explique la formation de la congestion durant les heures de pointe.

Mais cette situation est aussi aggravée par un effet où la circulation est complètement bloquée où aucun véhicule ne peut plus avancer comme le montre la figure ci-dessous. Cette situation se produit assez souvent surtout lorsque les agents de la circulation ne sont pas présents sur le lieu.

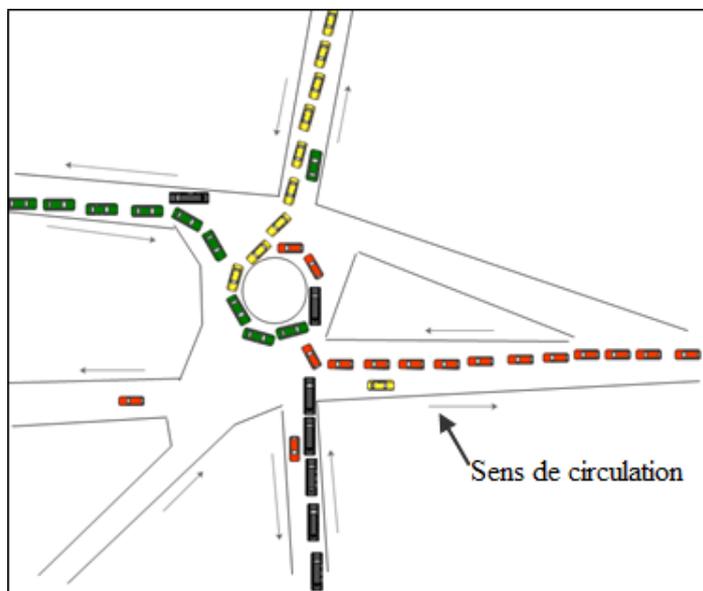


Fig. 4.6 Exemple de situation de création d'embouteillage

De plus, « l'effet boomerang » montre que des fois l'embouteillage se crée de lui-même (figure 4.7). Ce cas se présente quand les véhicules sortant du carrefour subissent des incidents comme des pannes ou accidents ou simplement lorsqu'ils veulent changer de direction. Avec l'embouteillage sur l'autre partie de la route, aucun dépassement ne saurait possible due à l'étroitesse de la rue. Cette situation cause la paralysie totale de la circulation.

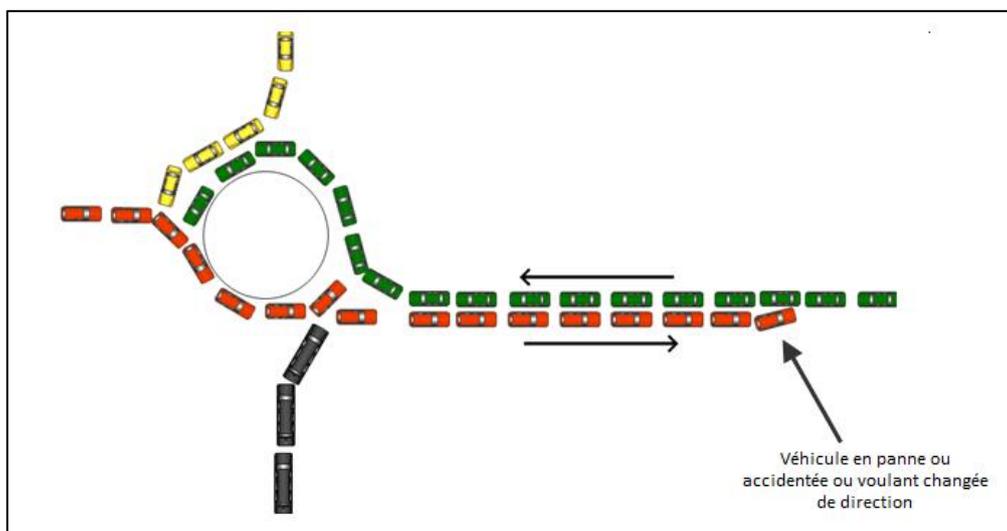


Fig. 4.7 Situation dans la plupart des carrefours à Antananarivo

#### **4.2.4. Inexistence d'infrastructures souterraines**

Concernant principalement notre thème d'étude, on constate que contrairement aux grandes agglomérations des pays industrialisés, la ville d'Antananarivo ne possède presque pas d'infrastructures routières souterraines pour améliorer la fluidité de sa circulation urbaine. Les deux seuls ouvrages souterrains sont le tunnel d'Ambohidahy et celui d'Ambojatovo qui étaient construits pendant la colonisation.

Mais à part les infrastructures routières, les infrastructures urbaines souterraines entre autres au niveau des parkings et des gares routières mais aussi des passages souterrains sur les artères à forte densité de circulation sont totalement inexistantes.

### **4.3 Impacts des embouteillages**

Les embouteillages ont des effets néfastes au niveau de la vie économique, sociale et environnementale de la ville et même pour le pays. Ainsi, ils présentent différents coûts.

#### **4.3.1 Impact économique**

Les petites épiceries et les petits magasins sont ravitaillés par le transport de marchandises passant par les réseaux routiers.

L'augmentation de temps perdu lors du transport rend cher le coût d'acquisition et a un impact sur les prix des PPN sur le marché. Ainsi, se crée l'inflation.

Les carburants consommés lors de l'embouteillage, en sus de coûts environnementaux occasionnés par celui-ci, présentent aussi des coûts économiques pour l'Etat. En effet les produits pétroliers constituent de loin la plus grande importation de Madagascar.

L'augmentation de la consommation de carburant implique donc un surplus de sortie de devises. Celle-ci a des effets néfastes sur l'économie plus précisément sur le taux de change au détriment de l'Ariary et au déficit de la balance commerciale.

#### **4.3.2 Impact social**

La génération de stress apportée par l'embouteillage entraîne des mécontentements de la population. Elle provoque des maladies telles que le problème cardiaque et la perte de concentration dans le travail quotidien.

De plus si l'on considère qu'un individu perd une heure par jour dans un embouteillage. Cela représente environ 239 années de perdue pour les 1,2 millions d'habitants d'Antananarivo (population active)

$$1h \times 1\,200\,000 \times 1/24 \times 1/209j = 239 \text{ années}$$

### **4.3.3 Coût environnemental**

Cela se manifeste par la surconsommation de carburant qui n'est autre qu'un produit non renouvelable. Mais aussi par la pollution atmosphérique occasionnée par le CO<sub>2</sub> du pot d'échappement du moteur de véhicule qui exacerbe ce coût.

Après l'analyse du fait, on a pu constater que le problème d'embouteillage existe bel et bien à Antananarivo. Il est causé par diverses raisons mais le problème de carrefour en est la principale. Cette réalité entraîne des conséquences autant sur le plan économique, social, qu'environnemental. Pour réduire le problème, des solutions doivent être envisagées. C'est l'objet du chapitre qui suit.

## Chapitre 5. CHOIX DES SOLUTIONS POSSIBLES

Les solutions par rapport aux problèmes de circulation urbaine sont nombreuses ; d'autres ont été déjà suggéré depuis longtemps mais reste encore inappliqué et d'autres inadaptées. De plus, vu l'ampleur du phénomène, le problème ne peut être résolu que par une solution unique. Ce chapitre a pour objet de déterminer toutes les solutions possibles ; parmi eux y figure une solution qui fait partie des domaines étudiée à l'ESPA.

### 5.1. Mise en valeur des autres moyens de communication

#### a) Création des lignes de Tramway et de Trolleybus

Ces types de véhicules permettent le transport d'un nombre important de passagers en plus d'être écologique car leur source d'énergie est entièrement électrique. Ces moyens de communication plus précisément le tramway avait déjà fait l'objet de projet en 2005 mais la mise en place des infrastructures pose des problèmes. En effet, il nécessite l'aménagement des lignes électriques à travers toute la ville, de plus avec le problème actuel sur l'énergie, la JIRAMA compte tenue de ses problème actuellement n'est pas encore en mesure de subvenir au besoin énergétique de ce nouvel moyen de transport.

#### b) Remplacement des Taxi-Be par les grands bus

Cette solution a été déjà adoptée mais sa réalisation reste encore à concrétiser. Le remplacement progressif des « taxi-be » par des bus de plus grandes capacités permet de réduire d'une manière conséquente le nombre de ces premiers. Mais, il faut aménager certaines voies pour les adapter à ces grands bus.

#### c) Utilisation de la voie aérienne

La mise en place d'un téléphérique (Un projet de construction de téléphérique entre Andohalo et Anosy a vu le jour récemment) mais ceci reste surtout pour le développement du secteur tourisme mais ne permettant pas de résoudre complètement le problème de la circulation.



## **5.2. Création de nouvelles infrastructures**

L'évolution incontrôlée de la ville a fait naître le problème du manque d'espace, est l'un des blocages de création de nouvelles infrastructures telles que la construction des nouvelles rues ou l'élargissement et même la création de parking en pleine ville. En effet, les déplacements des personnes concernées par la construction posent problème surtout avec la non acceptation des propriétaires à céder facilement leur terrain.

## **5.3. Utilisation de la troisième dimension**

La solution actuelle adoptée par les pays développés est l'utilisation de la 3<sup>ème</sup> dimension qui est l'espace aérien et souterrain.

La construction des infrastructures aériennes (buildings et gratte-ciel) pourrait réduire l'occupation du sol malgré un important nombre d'habitants. Cela constitue une des solutions possibles pour gagner plus d'espaces. Cependant, la majorité de la population d'Antananarivo appartient à la classe moyenne, elle ne peut pas y accéder, faute de moyen financier à ce nouveau type d'aménagement. Sauf si on mettra en place un système HLM (Habitat à Loyer Modéré).

À part les infrastructures habitables, la construction des ponts en hauteur fait partie aussi des choix possibles mais malgré tout, elle présente quelques inconvénients sur le plan architectural et la nécessité d'un large espace libre pour sa construction.

## **5.4. Synergie des solutions**

Compte tenu de la situation actuelle de la ville étudiée dans le chapitre précédent où l'administration est dans l'incapacité de résoudre complètement le problème, des solutions intégrées doivent être adoptées pour dénouer le problème très complexe pour être résolu par une seule solution.

Mais dans le cadre de ce présent mémoire en dépit de l'existence d'une multitude de solutions, on traite plus particulièrement l'espace souterrain comme solution proposée pour l'amélioration du transport urbain de la ville d'Antananarivo

## **5.5. Solution souterraine**

La solution proposée est la valorisation de l'espace souterrain pour l'amélioration du transport à Antananarivo. En effet malgré ses inconvénients, il présente des avantages

particuliers. Il s'expose sous plusieurs formes illustrées dans le sous paragraphe 3.2 plus haut. L'attention particulière sur ce domaine est par le fait que, les champs d'application des ouvrages souterrains en milieux urbains sont nombreux. Parmi eux, se figure l'enfouissement des voies de circulation qui constitue notre centre d'intérêt du fait qu'il touche les problèmes du transport à Antananarivo.

## **5.6. Quelques avantages de construire en souterrain**

### **5.6.1. Raison d'occupation du sol et d'implantation**

Le sous-sol offre un espace qui peut recevoir les infrastructures urbaines qui posent problème à la circulation comme les parkings et les gares routiers. Il peut également recevoir des constructions difficiles, impossibles ou indésirables en surface, et ainsi de libérer de l'espace en surface qui est insuffisant actuellement. L'espace disponible en souterrain peut représenter donc la solution à l'étalement urbain et la rareté de l'espace qui est provoquée par la pression sur le territoire provenant de la croissance démographique.

L'espace tridimensionnel du souterrain offre l'opportunité d'éliminer les problèmes des carrefours. De ce fait, lorsque deux trajets se croisent, il est possible d'éviter le croisement en superposant les deux trajets, limitant ainsi les interactions entre les trajets de différentes directions.

### **5.6.2. Raison de préservation de l'environnement**

Le sol offre une série d'avantages dans le domaine de la protection de l'environnement en réduisant les pollutions sonores, visuelles et écologiques (atmosphériques). On peut citer :

- **pollution sonore**, l'enfouissement des voies de circulation permet de réduire voire d'éliminer nuisance sonore occasionnée par les véhicules.
- **pollution visuelle**, un ouvrage enterré crée un impact visuel moins important, voire nul, qu'un ouvrage équivalent réalisé à la surface. En effet il permet de cacher les infrastructures indésirables à la surface et permet de garder la topologie (paysage) naturelle du terrain ainsi que les réalisations architecturales.
- **pollution écologique**, la libération d'espace en surface par l'enfouissement des infrastructures urbaines sous terre permet la création des espaces verts, elle contribue ainsi à l'amélioration de l'écologie et surtout par la diminution des

pollutions des voitures car avec la diminution de l'embouteillage. Il engendre la réduction du niveau de CO<sub>2</sub> dispersé dans l'atmosphère mais permettent aussi la réduction de la consommation énergétique plus précisément de l'énergie fossile et ainsi la préservation des ressources naturelles.

### **5.6.3. Raisons sociales**

L'espace souterrain a un rôle principal à jouer sur le plan social. Avec la diminution de la pollution et du bruit situé ci-dessus il permet donc d'offrir de bonnes conditions de vie.

Le raison sécuritaire s'associe également aux raisons sociales car le développement organisé des infrastructures de transport en milieu souterrain permet d'assurer des déplacements sécuritaires des piétons et des automobilistes. En réduisant la circulation automobile en surface, les piétons peuvent y circuler avec plus de tranquillité.

### **5.6.4. Raison économique**

Le critère économique se présente comme l'un des premiers critères qui dicte la faisabilité d'un projet dépend toujours des avantages/coût que celui-ci apportera. La prise en compte de la durée de vie de l'ouvrage intervient sur l'avantage de construction en souterrain.

En effet, l'espérance de vie d'un ouvrage souterrain est largement plus élevée que celui d'une construction en surface. Car les ouvrages souterrains sont isolés de tout contact à la surface. De plus un autre moyen d'atténuer cette différence de coûts est de considérer le coût de maintenance, l'économie d'énergie, mais aussi le gain d'espace et de matériaux résultant de la construction souterrain

#### ***5.6.4.1. Coût de maintenance***

L'isolation physique des ouvrages souterrains par rapport au facteur d'environnement en surface comme les perturbations climatiques est un avantage de la construction souterrain

#### ***5.6.4.2. Economie d'énergie***

Grace à l'isolement thermique que bénéficie les constructions souterraines. Il permet de faire des économies d'énergie au niveau de la climatisation de l'ouvrage.

### **5.6.4.3. Gain d'espace**

Comme on l'a déjà cité ci-dessus, la construction souterraine permet de gagner de l'espace à la surface.

### **5.6.4.4. Gains des matériaux**

L'excavation nécessaire à la construction d'infrastructures souterraines permet d'obtenir différents minéraux et matériaux permettant d'atténuer l'écart entre les coûts d'un projet en souterrain et les matériaux qui sont très demandés à Antananarivo surtout avec les projets de construction d'autoroute actuellement en cours.

### **5.6.5. Progrès technique**

La technique de construction souterraine a beaucoup évolué grâce au progrès technologique. Ces progrès ont facilité la construction des tunnels. Parmi eux, on peut citer :

*- les tunneliers « à confinement »*

Ces machines peuvent creuser des tunnels en toute sécurité dans des terrains meubles et aquifères qui auraient nécessité autrefois de coûteuses injections. Elles avancent dans le sol comme de véritables sous-marins, à une vitesse de l'ordre de 200 à 500 m/mois.

*- les développements récents concernent la foration assistée par ordinateur qui permet la rapidité et la qualité de foration pour les creusements à l'explosif.*

*- les « injections de compensation »*

Sachant que tout tunnel assez profond peut engendrer des tassements. On injecte progressivement un coulis de ciment sous les fondations des bâtiments, au fur et à mesure du creusement du tunnel ; on compense ainsi les tassements préjudiciables avant qu'ils ne se produisent.

*- la maîtrise des grandes fouilles*

Une autre manière de créer de l'espace souterrain est de creuser de grandes fouilles à ciel ouvert. On utilise le plus souvent la technique des « parois moulées dans le sol », puis ancrées par des tirants dans le terrain en place au fur et à mesure du creusement de la fouille. Cette technique, totalement maîtrisée, permet de creuser des sous-sols dont le volume utile est équivalent à celui déjà bâti et ce, sans toucher ni endommager les immeubles voisins.

On conclut par ailleurs que la construction souterraine apporte plus d'avantages que d'inconvénients. Il permet de gagner de l'espace ce qui nous manque actuellement dans la capitale mais aussi la mise en place de cet ouvrage permettra de franchir plusieurs obstacles comme les reliefs et les carrefours (source majeure du problème de circulation).

## **5.7. Préalable et défis pour la solution souterraine**

La construction souterraine nécessite cependant une attention particulière dans des domaines spécifiques qui accompagnent ou précèdent les travaux à savoir :

- caractérisation du sous-sol urbain (Etude géologique, géotechnique, hydrologique bien détaillé)
- gestion des incertitudes des données et de l'aléa géologique
- droit du sol et du sous-sol (Études juridiques et réglementaires)
- planification souterraine
- mise en place d'un cadastre 3D
- dispositif sécuritaire bien étudié et bien établie
- investissement financier disponible à l'avance
- intégration avec les autres solutions possibles

La deuxième partie a permis de montrer que le problème d'embouteillage est réel, ses causes et ses conséquences sont multiples, de ce fait, des solutions ont été apportées. Quant à la troisième et dernière partie, elle met en exergue la perspective d'implantation de tunnel à Antananarivo.

**PARTIE 3**

**OPPORTUNITE D'IMPLANTATION**

**DE TUNNEL A ANTANANARIVO**

## Chapitre 6. GEOMETRIE ET SECURITE DES TUNNELS

La circulation en tunnel se distingue de la circulation en surface. Des éléments entrent en compte. Au-delà de la dimension horizontale, la dimension verticale entre aussi en jeu. Des éléments comme les paramètres du terrain étudié (géologie, topographie....) et la sécurité du tunnel déterminent sa géométrie ainsi que sa forme.

La géométrie et la sécurité des tunnels sont deux éléments interdépendants. L'objet de ce chapitre est d'identifier les formes, la géométrie et la sécurité des tunnels correspondant à la caractéristique de la ville d'Antananarivo

### 6.1. Géométrie

La géométrie d'un tunnel dépend de plusieurs facteurs à savoir la nature de terrain à traverser mais aussi les exigences de sécurité ainsi que la géométrie de la route et les profils des véhicules qui y traverseront. On distingue différentes formes géométriques d'un tunnel par rapport à ces facteurs qui seront décrits à travers les différents formes et profils d'un tunnel dans les sous paragraphes suivants :

#### 6.1.1. Les formes

En général, il y a trois formes typiques de section pour un tunnel à savoir :

- la forme circulaire généralement pour les tunnels creusés à l'aide d'un tunnelier (figure 6.1 b) ;
- la forme en fer de cheval /voûtée (figure 6.1 a) lorsque lors d'une importante charge au-dessus du tunnel ne le permettant pas la configuration rectangulaire
- la forme rectangulaire (figure 6.1 c) celle-ci est la plus courante pour le tunnel à faible profondeur et en milieu urbain.

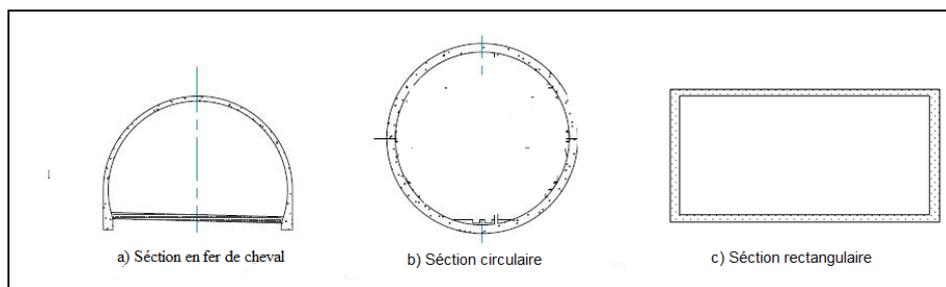


Fig. 6.1 Différents types de section d'un tunnel

Avec le mode d'exploitation du tunnel, on distingue aussi deux profils d'un tunnel qui est :

- *le tunnel à deux tubes unis ou bidirectionnels*. Il permet la circulation des véhicules dans chaque tube isolé qui est placé horizontalement ;
- *le tunnel à niveaux* permettant la circulation à deux ou plusieurs niveaux différents

## 6.1.2. Profils [5] [8] [39]

### 6.1.2.1. Profils en long du tunnel

Ils se distinguent aussi par leur destination, leurs dimensions et leur profondeur d'implantation.

Généralement, un tunnel est constitué de trois parties :

- une rampe d'entrée
- une rampe de sortie
- le tunnel proprement dit.

La configuration de ces parties est influencée par les implications paysagères à savoir la nature de terrain à traverser mais aussi la longueur du tunnel. On distingue par ailleurs la traversée des montagnes (figure 6.2) où les pentes de la rampe ainsi que du tunnel proprement dit sont relativement très faibles pour permettre seulement à l'écoulement des eaux. Il est de l'ordre de  $5^0/00$  au maximum. Dans le cas où les rampes ont une forte inclinaison pour permettre une forte descente et de permettre la réduction de longueur du tunnel ou dans les cas de tunnel traversant un fleuve. Elle ne peut cependant excéder 6% afin de réduire l'émission de CO<sub>2</sub>.

La figure 6.2 ci-après montre la disposition d'un tunnel traversant une montagne.

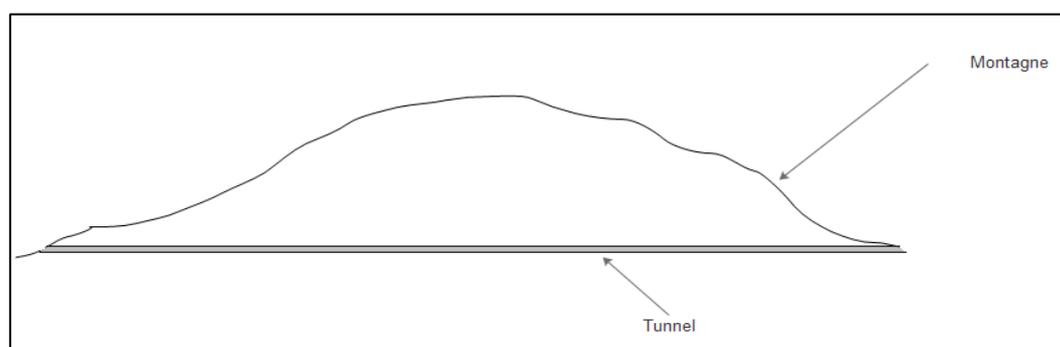


Fig. 6.2 Tunnel sous traversant une montagne

La figure 6.3 montre un tunnel sous un plan d'eau de surface.

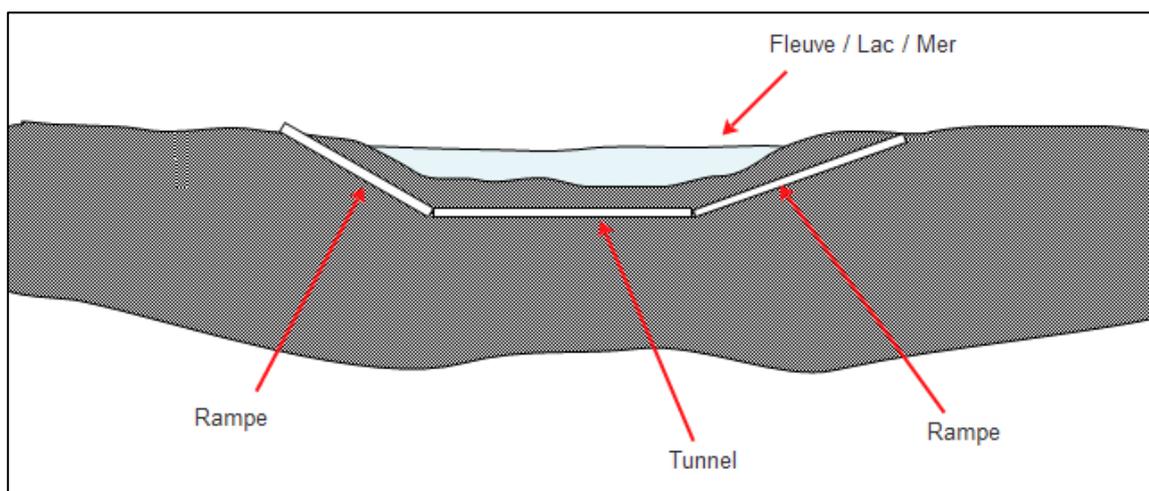


Fig. 6.3 Tunnel sous un fleuve / Lac / Océan

Les dispositions de sécurité sur la visibilité ont une influence sur le profil en long. Elles seront étudiées dans le paragraphe 6.2.

#### 6.1.2.2. Largeur du profil en travers

L'espace disponible et les voiries en surface détermineront la géométrie de l'ouvrage. La plupart des ouvrages à ciel ouvert sont construits sous des voies déjà existantes pour minimiser les dérangements engendrés par les déplacements des riverains. Ces derniers peuvent susciter leurs mécontentements en remettant en cause la viabilité du projet. Les trafics routiers sont aussi un élément à prendre en compte car leurs données sont très utiles pour que le dimensionnement réponde à la fluidité stable de la circulation. Donc les paramètres comme les volumes et le débit de véhicules qui y circulent sont à considérer.

##### a) Profil en travers, utile à la circulation

Les normes et dispositions prises à partir de cette section ont été faites sur la base des recommandations de la CETU (Centre d'Etudes du Tunnel) [5], [7].

Le profil concerne les dimensions nécessaires pour la circulation de véhicules à travers le tunnel car il s'agit d'un tunnel routier.

Le profil en travers comprend les éléments suivants :

- *un isolateur à droite respectivement à gauche* constitué d'un trottoir ou d'un bute-roues (ISD) (ISG)

- une bande dérasée de droite respectivement de gauche pouvant servir (totalement ou non) d'arrêt d'urgence (BDD) (BDG) et peut être appelée aussi bande d'arrêt d'urgence de droite (BAUD) (BAUG).
- plusieurs voies élémentaires de circulation ( $V_i$ ).

La voie routable est désignée par l'ensemble des voies élémentaires, son dimensionnement dépend du choix de vitesse retenue mais impérativement elle doit être supérieure à celle de largeur des véhicules.

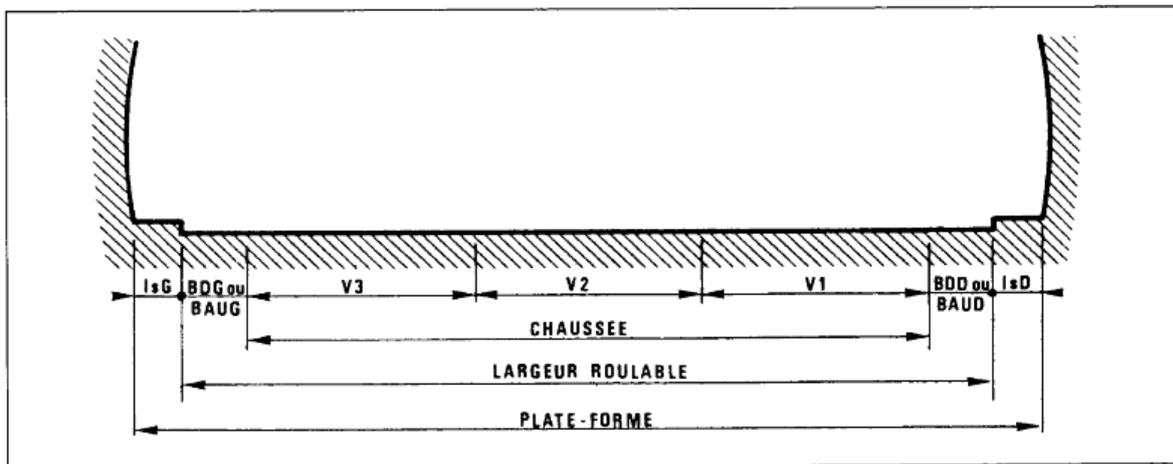
Le tableau 6.1 suivant donne les largeurs de couloirs par rapport à la largeur du véhicule qui est de 1.8 m pour les Véhicules légers et de 2.5 m pour les poids-lourds.

Tableau 6.1 Largeur de chaussée suivant le type de véhicules et la vitesse de référence

Condition de circulation	Type	Véhicule léger [m]	Poids lourd [m]
Véhicule arrêté		2.15	2.85
Véhicule au pas		2.30	3

Source « CETU »

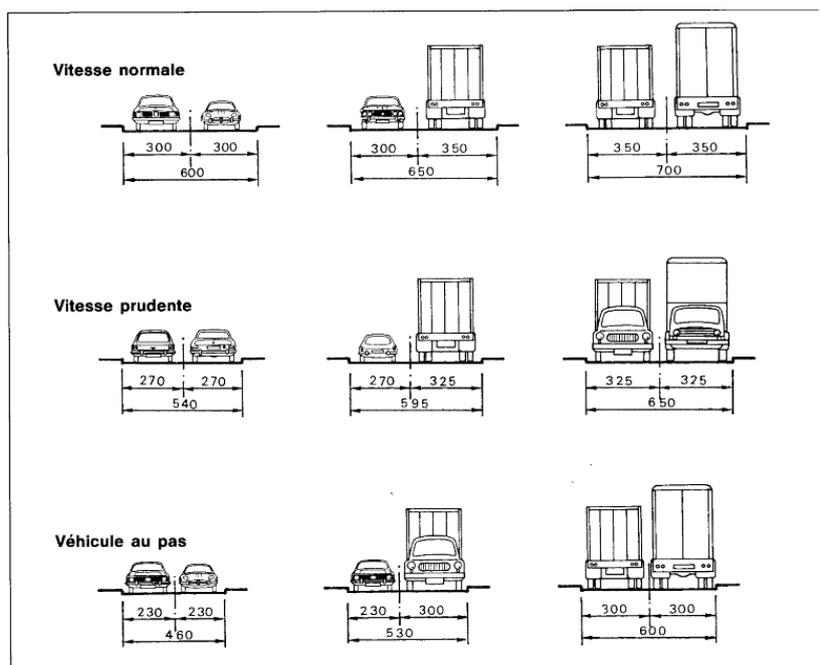
Le profil en travers d'une route et ses éléments constitutifs sont présenter par la figure 6.4 ci-dessous.



Source (CETU)

Fig. 6.4 Éléments de la route en milieu urbain

On trouvera les types de largeur de la chaussée sans arrêt d'urgence sur la figure 6.5



Source : (CETU)

Fig. 6.5 Largeur des voies sans arrêt d'urgence suivant la vitesse et le type de véhicule

### b) Accotements

La largeur des accotements est de l'ordre de 1m à 3m pour les espaces d'arrêt d'urgence et pour les véhicules en panne

### c) Isolateurs

On distingue plusieurs types d'isolateurs. Parmi eux on peut citer :

- *Le trottoir*

Le trottoir permet le passage des piétons dans l'ouvrage. En outre, il offre d'autres avantages avec l'implantation des différents réseaux ou câble mais également il permet aux usagers de la route de sortir du véhicule en cas de panne.

La largeur du trottoir est généralement d'un ordre de 0.75m au minimum pour permettre le passage d'un homme.

- *But-roues*

On pourra remplacer le trottoir par un autre type d'isolateur qui est le but-roues de 0.20m

### d) Séparateur central

Il permet de séparer deux courants de circulation avec une dimension minimale de 0.20m de hauteur et 0.30m de largeur. Mais cependant il n'assure pas totalement le franchissement des véhicules en cas d'accident. On peut installer un séparateur central de dimension plus grande tant en largeur qu'en hauteur de 0.45m empêchant ainsi le franchissement des véhicules en cas de perte de contrôle. Cependant il se pose alors le problème supplémentaire de l'ouverture des portières du fait de cette hauteur.

### **6.1.2.3. Hauteur du Profil en travers**

Les types de véhicules qui emprunteraient les voies sont parmi les premiers critères de choix du gabarit du tunnel. Car les caractéristiques de l'ouvrage dépendent de celles des véhicules qui emprunteront le chemin.

Il convient donc de faire l'inventaire des types de véhicules qui emprunteront le tunnel. Mais ensuite ce critère est suivi du facteur économique si les types de véhicules permettent de réduire les gabarits du tunnel. Car un tunnel à gabarits réduits est plus économique.

Les éléments à prendre en compte sont :

- la hauteur libre de l'ouvrage (H)

Elle est représentée par la distance minimale entre la plate-forme et la partie inférieure des équipements

- la hauteur libre minimale ( $H_m$ )

Elle représente la hauteur libre minimale de l'ouvrage pour assurer la circulation des véhicules durant sa durée de vie.

- le gabarit (G)

Le gabarit se caractérise par la hauteur maximale des véhicules qui circulent.

- la revanche de construction et d'entretien ( $R_c$ )

Il est indispensable de mettre un espace suffisant pour permettre l'entretien de l'ouvrage ou d'une erreur de nivellement éventuelle ou de tassement.

- la revanche de protection ( $R_p$ )

Elle permet la sécurité de tous les équipements en tunnel

- la revanche de signalisation ( $R_s$ )

Entre le gabarit et les caractéristiques des véhicules, des erreurs d'appréciation peuvent poser de problème. Donc il convient de mettre en place une marge pour la protection de l'ouvrage et la sécurité des usagers du tunnel.

Le calcul de la hauteur de l'ouvrage est donné par les formules suivantes :

$$H = H_m + R_c + R_p \quad (1)$$

$$G = H - R_s - R_p \quad (2)$$

Les valeurs règlementaires sont représentées dans le tableau suivant :

**Tableau 6.2 Hauteur minimale pour les gabarits réduits**

Gabarit	2.60	3.5
H <sub>m</sub>	2.75	3.65

Source : CETU

**Tableau 6.3 Hauteur minimale suivant le type de route**

	Routes nationales	Routes de trafic internationales	Autoroutes
H <sub>m</sub>	4.30	4.50	4.75
H <sub>m</sub> pour les tunnels tranchés couverts	4.30	4.50	4.50

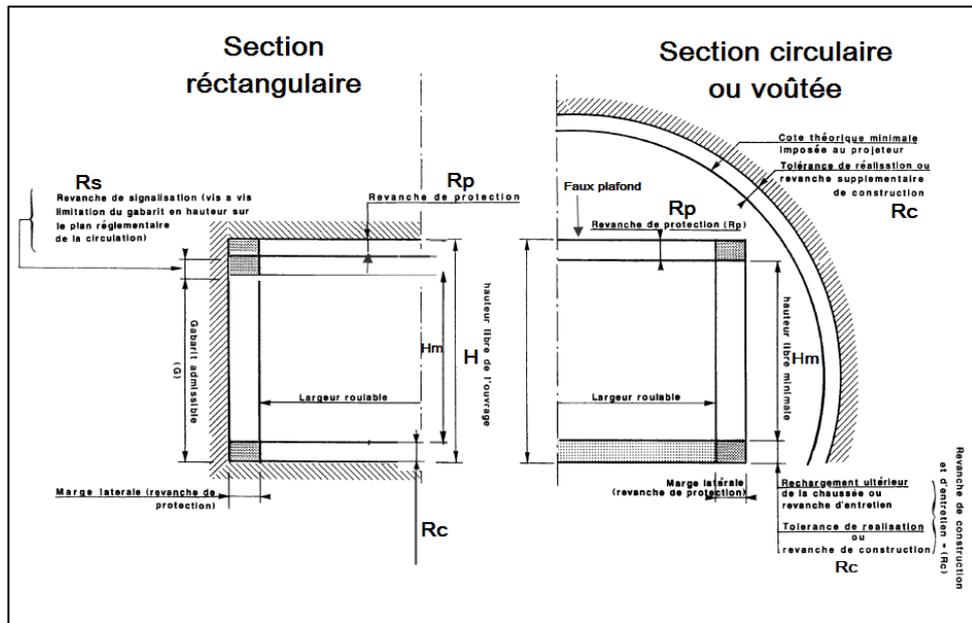
Source : CETU

La revanche R<sub>c</sub> est fixée entre 0.05 à 0.10 m.

Celle R<sub>p</sub> est de 0.10m mais il est convenable d'augmenter cette distance au projecteur et au système de ventilation qui requiert plus d'espaces.

La revanche R<sub>s</sub> est fixée entre 0.20 m à 0.30 m.

Tous ses paramètres sont illustrés sur la figure 6.6 suivante :



Source : (CETU)

Fig. 6.6 Dispositions et dimensions des éléments de hauteur du tunnel source

## 6.2. Dispositions de sécurité et équipement dans les tunnels [7] [9]

Pour permettre le confort et la sécurité des usagers, la mise en place des dispositifs de sécurité ainsi que des équipements est essentielle pour permettre l'exploitation du tunnel.

Comme il s'agit ici de tunnel routier, le nombre de personnes qui l'emprunte est beaucoup plus important que dans les galeries minières. De plus, des moyens financiers importants vont être investis pour sa construction. Un accident ou un incendie causerait des dégâts humains et matériels. Il ne faut pas donc ignorer ou négliger les normes, les dispositifs de sécurité et la mise en place des équipements de tunnel. Avec les dimensions de ces derniers, elles ont une influence sur la géométrie du tunnel. Cependant, ces normes et ces dispositions varient selon la longueur et le type de section du tunnel. Elles sont moins sévères dans le cadre d'un tunnel court généralement inférieur à 300 m.

### 6.2.1. Dispositifs de sécurité

Ils s'appliquent aux nouveaux tunnels routiers de longueur supérieure à 300 m,

- **Des issues de secours** permettent l'évacuation des pieds des usagers bloqués en tunnel suite d'un sinistre grave. Elles prévoient la communication avec l'air libre tous les 200 m ou 400 m. Elles présentent une largeur utile de 1,40 m.

- **Des niches de sécurité** s'ajoutent aux équipements dits de sécurité (téléphone, extincteur, bouton-poussoir, poteaux d'incendie) pour permettre de regrouper les autres équipements comme les armoires de signalisation, les capteurs dans le but de simplifier les problèmes d'entretien et d'exploitation. Ainsi, elles sont implantées tous les 200 m sur le côté droit.

Elles sont, le cas échéant, associées aux issues de secours, les niches d'extrémité étant, de préférence, reportées à l'extérieur de la tranchée couverte. Elles sont, la plupart du temps, fermées par une porte. Leurs dimensions minimales sont les suivantes : largeur de 1,50 à 2 m, profondeur de 0.70 à 1,00 m, hauteur de 2,00 m sur toute la surface.

- **Des bâches de recueil des eaux** dont les dimensions sont à définir, au cas par cas, lorsque la tranchée couverte présente des points bas. Le cas échéant, ces bâches font office de bâches de rétention.
- **Des locaux techniques** et, le cas échéant, des stations et des galeries de ventilation sont à prévoir.

### 6.2.2. Dispositifs d'assainissement et ouvrage de drainage

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 dispositifs d'assainissement du tunnel ont pour objet de collecter les produits de ruissellement intérieurs. Ils ont pour rôle essentiel de capturer l'évacuation du tunnel des eaux sur la chaussée.

Lorsque la longueur du tunnel est inférieure à 200 m, il n'est pas nécessaire d'implanter un dispositif de collecte des eaux de surface.

Entre 200 et 400 m, le dispositif de collecte peut être utilisé comme canalisation principale. Il n'est donc pas obligatoirement nécessaire de doubler un collecteur général, si la pente s'y prête. « supérieure à 400 m », le dispositif de collecte doit obligatoirement être doublé d'un collecteur de diamètre supérieur ou égal à 400 mm et relié à ce dernier par des regards siphoniques espacés au maximum de 100 mètres. Parmi ses dispositifs on distingue le caniveau et le regard. Les caniveaux qui ont pour rôle d'absorber les effluents dans un temps très court afin de limiter la surface d'étalement de la nappe sur la chaussée. Un regard est aussi indispensable pour éviter la propagation de l'incendie dans le tunnel, Il constitue une barrière

infranchissable pour les incendies à l'intérieur du système de collecte d'eau. A cet effet, il doit être un coupe-feu. Le maintien en eau des siphons peut être assuré par le branchement du drain des eaux provenant du massif ou par le lavage périodique des piédroits latéraux.

### **6.2.3. Equipements divers**

#### **6.2.3.1. Ventilation**

La ventilation en tunnel a pour objectif, en situation normale d'exploitation, de maintenir la qualité de l'air au niveau requis. Et en cas d'incendie, elle a pour rôle de mettre les usagers à l'abri des fumées.

Certains tunnels ne nécessitent pas de ventilation mécanique (on parle alors de ventilation naturelle). Il s'agit de tunnels courts.

La ventilation naturelle ne nécessite pas d'équipements spécifiques et a donc un coût d'investissement et d'exploitation nul. Elle n'est applicable qu'aux tunnels courts, car elle ne permet pas d'assurer la sécurité des usagers ni la dilution des polluants à partir d'une certaine longueur de tunnel.

Quant à une ventilation mécanique, il est nécessaire d'avoir plusieurs choix possibles. En situation normale d'exploitation, la méthode retenue pour faire baisser les niveaux de pollution dans un tunnel ventilé est la dilution des polluants. La terminologie traditionnelle distingue deux systèmes de ventilation, basés sur l'usage de la ventilation en situation d'exploitation normale (dans les deux cas celle-ci se procède par dilution). Pour le système *longitudinal* et le système *transversal*, la ventilation mécanique a pour rôle essentiel de diluer les gaz d'échappement (problèmes de toxicité de l'air, de visibilité et de confort des usagers), d'assurer le désenfumage en cas d'incendie et dans le cas échéant, éviter que l'environnement des têtes ne soit pollué par le rejet de l'air usé sortant de la tranchée couverte.

#### **6.2.3.2. Éclairage**

Il permet d'assurer la visibilité des voies évitant ainsi les risques d'accidents et contribue au confort des conducteurs permettant d'embellir le tunnel et de le rendre moins sombre. Il est conçu pour permettre à un automobiliste tout au long de son déplacement, de distinguer un obstacle gisant sur la chaussée, suffisamment loin devant lui pour pouvoir s'arrêter en toute sécurité. La distance de visibilité prise en compte dans les calculs est égale à la distance d'arrêt sur route mouillée correspondant à la vitesse retenue pour le projet.

### **a) Zones d'éclairage**

Il apparaît ainsi en tunnel deux zones successives :

- la *zone de section courante* qui correspond au cœur du tunnel

Le niveau  $y$  est constant et beaucoup plus faible. Mais il assure cependant la visibilité nécessaire au conducteur dont l'œil s'est adapté.

Disposée généralement sur le haut du piédroit ou du trottoir avec une hauteur de 30 cm plus 0.10 m de revanche, elle n'influence pas sur la hauteur du tunnel. Le niveau d'éclairage à installer est d'environ de 150 lux pour les ouvrages urbains.

- la *zone dite d'entrée* où les niveaux d'éclairage sont renforcés et décroissent progressivement vers l'intérieur de l'ouvrage.

Pour cette section, le système identique est à ceux de la section courante mais avec un niveau élevé de 1000 à 3000 lux.

### **b) Types d'installation**

Les tunnels sont les plus souvent équipés de luminaires à flux dirigé, qui projettent la lumière émise par les sources vers la chaussée et la base des piédroits. En pratique deux types d'installation sont utilisés en pratique :

- dans le *système classique, dit symétrique* ;

Le flux des appareils est symétrique par rapport à un plan perpendiculaire à l'axe du tunnel. Il envoie autant de lumière en direction de chaque extrémité de l'ouvrage.

Les obstacles sont vus en contraste négatif, c'est-à-dire qu'ils se profilent en sombre sur le fond plus clair de la chaussée. Le système est utilisé dans tous les cas en section courante. En zone d'entrée, il convient plutôt aux tunnels dont la vitesse d'approche est faible.

- le *système à contre-flux, dit aussi à mobilisation de contraste* ;

Il est basé sur des appareils qui projettent la lumière en direction des automobilistes, dans des conditions qui évitent de les éblouir. Il accentue ainsi la vision des obstacles en contraste négatif.

Ce système n'est adapté qu'aux zones d'entrée, mais il y présente des avantages économiques sérieux en investissement et surtout en exploitation dès que la vitesse d'approche est

relativement élevée (au-delà de 70 km/h). En section courante ce type d'installation est généralement moins économique qu'un système classique. En effet, le respect des uniformités longitudinales et transversales impose de mettre en place presque autant de luminaires qu'en système classique. Alors que le coût unitaire d'un appareil à contre-flux est sensiblement plus élevé que celui d'un appareil classique.

#### **6.2.3.3. Alimentation électrique**

La plupart des équipements et des systèmes du tunnel (éclairage, ventilation ....) nécessitent de l'énergie électrique pour son fonctionnement. Pour le cas de Madagascar celle-ci est assurée par la JIRAMA.

La puissance nécessaire pour les alimenter est directement liée à la nature et au nombre d'équipements installés. Selon la quantité d'énergie électrique nécessaire (KWh), celle-ci peut être fournie en basse tension ou en haute tension.

Pour les ouvrages non ventilés, la livraison de l'énergie est réalisée en basse tension.

Pour les ouvrages ventilés, il faut généralement un ou plusieurs postes à haute tension.

#### **6.2.3.4. Equipements d'exploitation et de sécurité**

##### **a) Réseau d'eau incendie :**

Il est formé par des poteaux incendie disposés dans les niches de sécurité et desservis par une canalisation cheminant généralement sous trottoir ou par piquages individuels directement réalisés sur un réseau de surface.

##### **b) Signalisation variable**

Il faut prévoir une sur-hauteur d'environ 50 cm pour la mise en place de la signalisation variable.

##### **c) Réseau de télévision**

Généralement associé à un système de détection automatique d'incident ; l'implantation des caméras tous les 100 ou 200m doit faire l'objet d'une étude spécifique.

##### **d) Réseau d'appel d'urgence**

Il est constitué par des postes d'appel logés dans les niches de sécurité.

**e) Réseau de gestion technique centralisée**

Il met en œuvre des automates logés dans les locaux techniques et des superviseurs logés au PC, ainsi que des câbles de liaison.

**f) Réseau de rétablissement des radiocommunications**

Le cas échéant, (câble rayonnant courant le long de chaque tube, appareillage implanté en local technique et antennes extérieures).

**g) Autres équipements divers**

D'autres équipements sont aussi nécessaires comme des anneaux d'ancrage scellés en piédroit tous les 30 à 40 m et des hublots de jalonnement disposés en partie basse des piédroits, détecteurs incendie des locaux techniques.

### **6.3. Dispositions liées à la présence de nappes souterraines**

Le problème de l'eau souterraine est étudié dans cette section, du fait que le niveau de la nappe dans les zones basses d'Antananarivo se trouve à une profondeur assez faible.

On distingue deux types de dispositions à prendre pour protéger la structure de l'inondation.

Premièrement, le fait d'empêcher l'entrée de l'eau dans le tunnel par étanchéité ou drainage ou rabattement de la nappe. Ce dernier connaît des inconvénients en site urbaine en raison des tassements qu'il peut engendrer. Le second consiste à évacuer les eaux déjà présentes à l'intérieur du tunnel.

Dans le premier cas, les dispositions de protection sont :

- *la réalisation d'un système de drainage*

Il capte des eaux du massif par un double système de canalisation ; l'une à la base des piédroits, et l'autre sous la chaussée .

- *la réalisation d'une enceinte étanche (parois d'étanchéité)*

La réalisation de l'ouvrage à l'abri d'une enceinte étanche fermée est une solution pour éviter l'entrée de l'eau dans le tunnel cela consiste à la réalisation d'un cuvelage étanche en béton armé, en forme de U ou la mise en place d'un radier.

L'utilisation de l'enceinte étanche et le système de drainage doivent être effectuées ensemble si une nappe souterraine est présente pour protéger l'ouvrage. En effet, la présence

d'une nappe en charge sous le niveau du fond de fouille peut entraîner un soulèvement de celui-ci si la pression hydrostatique au niveau du toit de cette nappe est supérieure à la pression verticale totale des terres à ce même niveau. La solution la plus courante dans ce cas consistera à réduire cette pression hydrostatique, par exemple par pompage dans des puits de décharge ou le drainage.

Dans le second cas, l'évacuation des eaux dans le tunnel est effectuée par les dispositifs d'assainissement (paragraphe 6.2.1.1), et l'utilisation d'un réservoir retenue d'eau et/ou de pompage pour évacuer l'eau éventuelle dans le tunnel vers la surface. Ceci lorsque le niveau de système d'assainissement de la surface est supérieur au point bas du tunnel.

## **6.4. Etude d'anticipation pour le projet de construction**

Pour minimiser le risque de dérangement et de limiter les contraintes temps, des planifications et étude bien établie doivent être faite à l'avance. Il faut éliminer en tant que possible les mauvaises surprises lors des travaux qui vont ralentir la construction et causeraient des surcoûts complémentaires.

### **6.4.1. Choix du période de construction**

L'un des grands soucis lors de l'exécution à ciel ouvert est le risque de dérangement de la circulation en surface occasionné par les travaux. Pour limiter ce dérangement le choix du période de construction doit être anticipé d'avance. Les études faites dans le paragraphe 4.1 plus haut montrent qu'il existe un temps où le trafic est moins dense (week-ends, heures non ouvrables (nuits) et les vacances scolaires).

### **6.4.2. Choix de la méthode de construction**

La méthode d'exécution doit être bien choisie par rapport à la géologie du terrain et des eaux souterraines afin d'éviter les surprises lors de la construction.

Avec un aperçu général des paramètres géométriques et sécuritaires pour tout projet de tunnel à Antananarivo, de différents techniques et procédés peuvent être aussi entrepris selon le cas d'Antananarivo. L'étude, le choix des méthodes de creusement et les procédés font l'objet d'approfondissement dans le chapitre suivant.

## Chapitre 7. PROCEDE D'EXECUTION ET CHOIX DE METHODE DE CREUSEMENT

Comme dans le chapitre précédent, les éléments du site (Géologie, topographie...) ont aussi une influence sur le procédé ainsi que sur la méthode de creusement d'un ouvrage souterrain. Ce chapitre a pour objectif d'identifier ces différents types de méthode et procédé qui conviennent le mieux aux caractéristiques de la ville d'Antananarivo.

### 7.1. Procédé d'exécution

Généralement, comme dans une exploitation minière, on a deux méthodes d'exécution de construction de tunnels qui sont la *construction souterraine* et la *construction à ciel ouvert*.

#### 7.1.1. Construction souterraine

On distingue le creusement en terrain dur ou rocheux avec l'abattage à l'explosif ou par machine à attaque ponctuelle ainsi que l'excavation par machine foreuse à pleine section ; le creusement en terrain difficile avec amélioration du terrain et pré-soutènement ou encore par l'emploi de bouclier à front pressurisé.

L'invention des tunneliers modernes capables de creuser des tunnels en toute sécurité permet de réduire le coût et le délai de réalisation. Ces machines permettent d'assurer en même temps l'abattage, le soutènement provisoire du front de taille et des parois latérales ainsi que le marinage et la pose du revêtement définitif

#### 7.1.2. Construction à ciel ouvert

Généralement adoptée dans les sites urbains de profondeur maximum à 12m, c'est une construction faite depuis la surface. Cette méthode d'exécution se distingue à travers les contraintes d'espace disponible et du caractère hydrogéologique à savoir :

- **La méthode talutée** : cette technique nécessite une emprise importante ainsi que l'absence de nappe phréatique ;
- **La méthode avec blindage ou par soutènement** : c'est une technique qui permet de réduire l'emprise de la construction ainsi que du rétablissement de la circulation très rapidement mais aussi d'éviter le risque de glissement du terrain et d'éboulement par la mise en place des murs de talus en parois moulées ou en parois préfabriquées ; en

rideaux de palplanches et puis d'autres méthodes (soutènement par cloutage ; congélation...)

Le choix de la méthode de terrassement se fonde essentiellement sur la nécessité ou non de rétablir la circulation dans un délai court. Ainsi, on distingue l'excavation à ciel ouvert entre deux parois de soutènement préalablement réalisées ou en souterrain après avoir effectué les piédroits puis la dalle de couverture.

## 7.2. Choix de la méthode

L'implantation des tunnels en grande profondeur à Antananarivo est idéale pour le franchissement des collines (exemple Manjakamiadana). Or comme nous l'avons déjà constaté dans le sous paragraphe 2.1.3 ci-dessus, concernant la géologie de la ville, on remarque que ces parties sont constituées par des massifs rocheux d'une série para gneissique qui a été largement granitisée avec une grande abondance de migmatites granitoïdes et de granites.

L'avantage de ce type de roche réside dans ses résistances mécaniques très élevées, ce qui pourrait exclure la mise en place des soutènements.

Au besoin, on peut mettre des soutènements légers tels que des bétons projetés dans le but d'éviter les altérations éventuelles des roches de la paroi. Mais du point de vue excavation, l'inconvénient est qu'avec la dureté de la roche, la vitesse de creusement est assez faible et nécessite des techniques et des technologies spécialisées.

Malgré l'avantage du maintien de la circulation en surface, par rapport à la construction à ciel ouvert, le coût de construction souterraine est beaucoup plus important compte tenu de la difficulté des travaux et du besoin des matériels onéreux.

La construction de ces tunnels par la méthode d'exécution souterraine nécessite donc une recherche d'investissement très élevé. Avec l'économie actuelle du pays, il serait mieux de commencer d'abord par la construction à ciel ouvert. Elle présente moins de difficulté que celle de la construction souterraine du point de vue technique et financière malgré le dérangement causé pendant les travaux.

Mais surtout les carrefours dénivelés souterrains, une des solutions apportées au problème du transport à Antananarivo s'exécute généralement à ciel ouvert.

De plus pour la construction souterraine en milieu urbain il est préférable au tant que possible de limiter la profondeur du tunnel en évitant une pente très raide.

### 7.3. Tunnels construits à ciel ouvert

#### 7.3.1.1. Méthode d'exécution

Lorsque l'on construit à ciel ouvert, deux possibilités se présentent et ceci dépend de la nature du terrain. On peut soit envisager de construire par la méthode talutée ou soit par la méthode avec blindage (soutènement). Mais le choix dépend fortement des conditions géologique, hydrologique mais surtout de l'emprise du terrain.

##### a) Méthode talutée

Dans le cas d'un sol présentant de bonnes caractéristiques géologiques, en l'absence de nappe phréatique et surtout la possibilité d'avoir une large emprise disponible B1 (figure) nécessaire pour la construction, la tranchée sera réalisée simplement par talutage et l'ouvrage sera réalisé à sec (figure 7.1).

Cette technique est réservée aux ouvrages situés à faible profondeur « H », compte tenu de la large emprise des talus et des importants volumes de terrassements nécessaires.

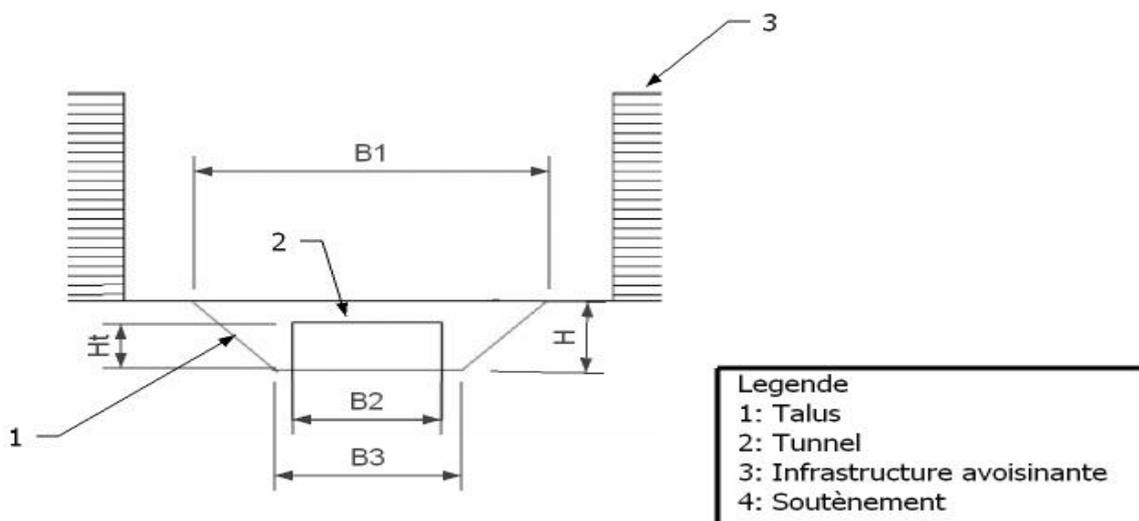


Fig. 7.1 Méthode de réalisation en fouille talutée par rapport à l'emprise du terrain

B1 représente l'emprise de la construction ; B2 la largeur du tunnel ; B3 la largeur du fond de la tranchée ; H la hauteur de la tranchée et Ht la hauteur du tunnel.

Il est possible de travailler aussi à l'abri de la nappe en procédant, pendant toute la phase de travaux, à un rabattement de la nappe phréatique. Les remblais contigus à l'ouvrage sont réalisés avec des techniques classiques de terrassement par couches élémentaires de

l'ordre de 25 cm d'épaisseur. Le compactage est assuré par des compacteurs classiques jusqu'à environ un mètre des parements. Puis à l'aide de compacteurs légers le long de l'ouvrage.

Mais comme la nappe phréatique à Antananarivo est de quelques mètres de profondeur sur les plaines et à cause du manque d'espace en ville, cette méthode est déconseillée sauf dans des cas exceptionnels où les conditions du terrain le permettent. Avec un type de roche très cohérent ou rocheux, où il est possible de faire une fouille à parois verticales cette méthode pourrait quand même être applicable.

La figure 7.2 ci-dessous nous montre les différentes phases de réalisation en fouille talutée.

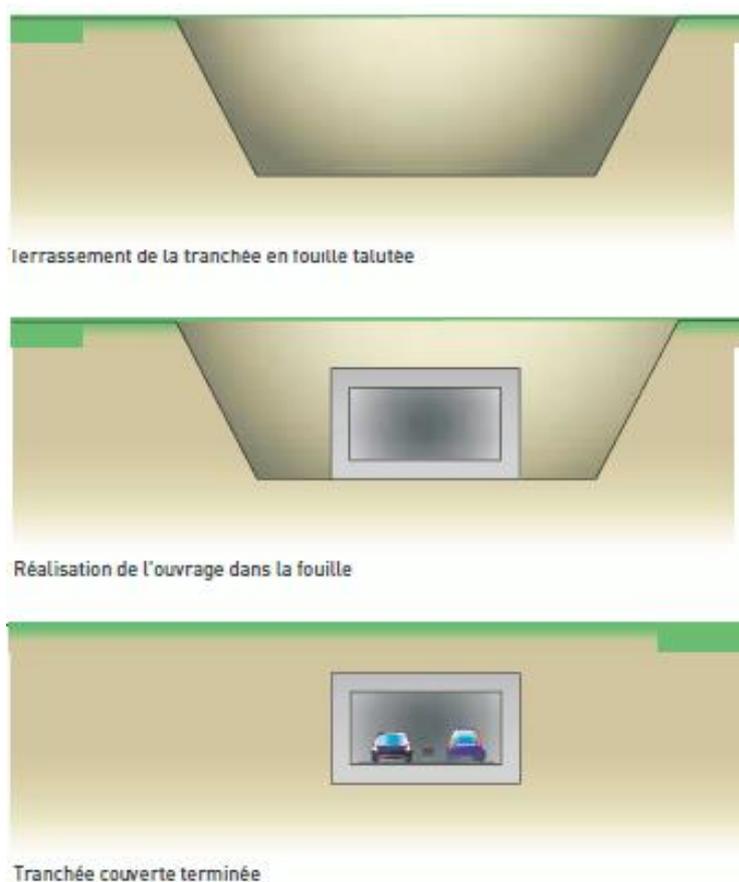


Fig.7.2. Différente phase de réalisation de tranchée en fouille talutée

Il est indispensable de prendre des dispositions particulièrement adaptées avec une mauvaise caractéristique du terrain (roche tendre et surtout meuble) ou encore avec une emprise disponible réduite. Des soutènements peuvent être mis en place pour la protection des infrastructures avoisinante (figure 7.3a). Un soutènement peut être mis en place sur la partie inférieure du talus pour réduire son emprise. (figure 7.3b) ou pour avoir une profondeur  $H1 + H2$  important. (Figures 7.3a et 7.3b).

L'abandon de l'option des talus est impératif lorsque les paramètres géologiques, hydrologiques et l'emprise disponible du terrain ne le permettent pas. On procède alors par une exécution avec soutènement (figure 7.4)

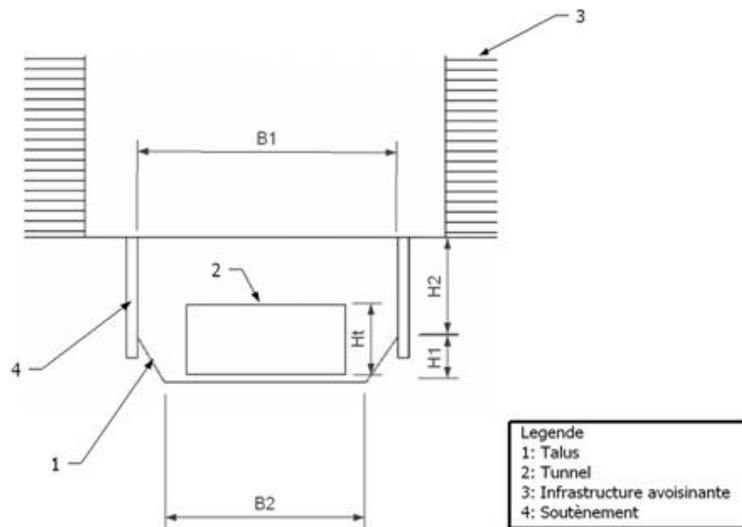


Fig. 7.3a Méthode combiné (une partie talutée et une autre avec soutènement)

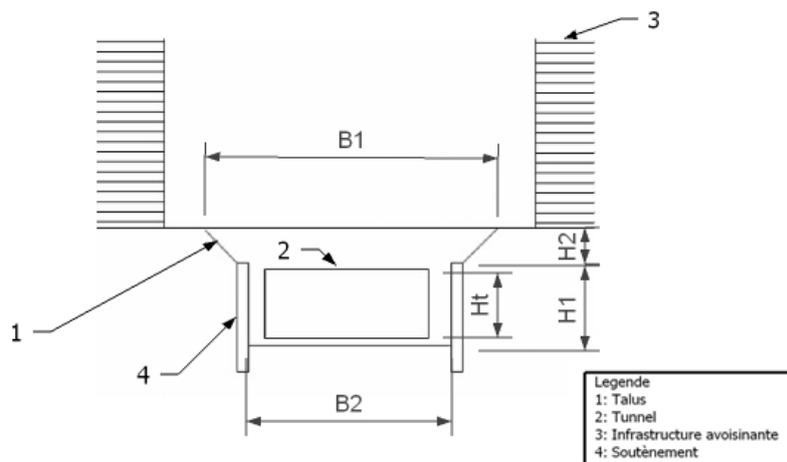


Fig.7.3b Méthode combiné une partie talutée et une autre avec soutènement

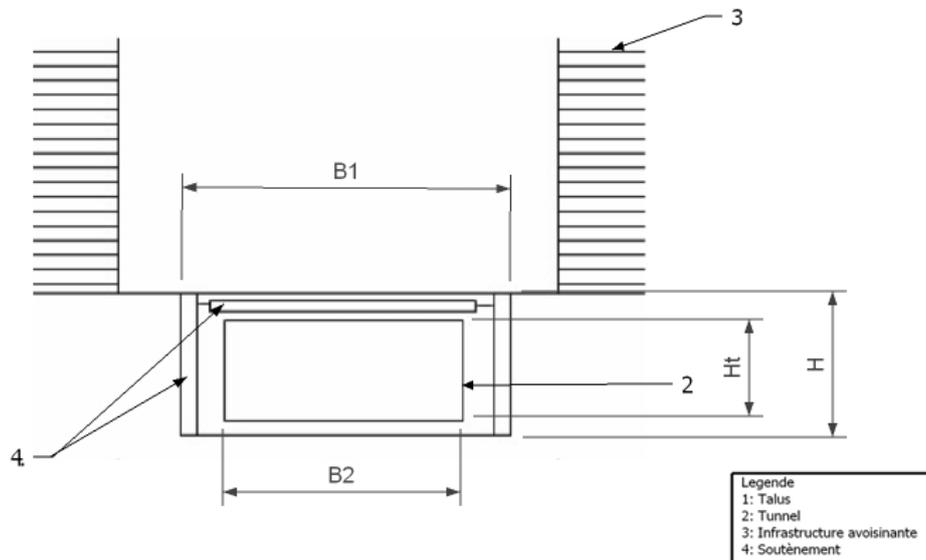


Fig. 7.4 Méthode de réalisation en tranchée couverte par rapport à l'emprise du terrain

### b) Méthodes avec blindage ou soutènement

Les structures de soutènement sont ici nécessaires, soit à titre provisoire pour la protection en phase des travaux (palplanche), soit à titre définitif (Paroi moulée, béton préfabriquée, parois berlinois..), Il assure simultanément les fonctions de soutènement et de revêtement.

Très souvent, l'emprise restreinte disponible pour l'ouvrage comme dans notre cas, nous impose la réalisation de l'exécution par soutènements verticaux.

Deux méthodes peuvent être utilisées pour réaliser le terrassement de la tranchée :

- soit à ciel ouvert, en déblayant l'emprise nécessaire entre les soutènements préalablement réalisés.

- soit en sous-cœuvre (terrassement sous dalle ou en "taupe") (Figure 7.5) après avoir réalisé les piédroits et la dalle de couverture, et en excavant ensuite les sols situés à l'intérieur des parois, à l'abri de cette dalle. Cette technique est, en particulier, employée lorsque les piédroits sont réalisés à l'aide de parois moulées. Elle permet de limiter l'impact du chantier en surface (mis à part la fenêtre d'accès, par laquelle sont évacués les déblais). Le radier en béton est coulé en fond de fouille, une fois le terrassement terminé.

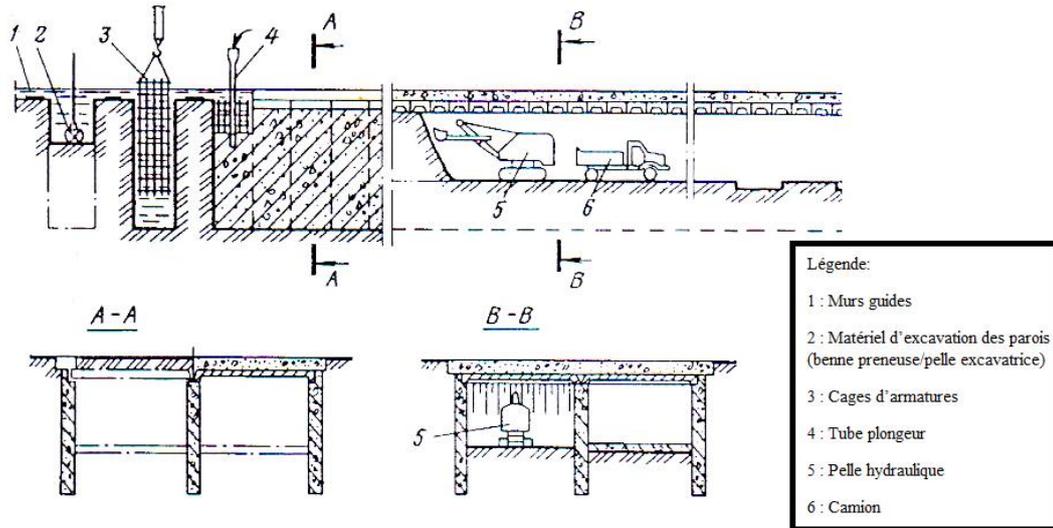


Fig. 7.5 Exécution par parois moulée avec un terrassement sous œuvre

### 7.3.1.2. Carrefour dénivelé (souterraine)

Avec la construction d'un tunnel à ciel ouvert, Il sera possible de déniveler les voies sur les carrefours. Ce dénivellement permet d'éviter le croisement dans les carrefours. Ainsi on arrive à accroître la vitesse de circulation pour éviter toute attente mais aussi d'améliorer les conditions de sécurité de la circulation.

Par la figure 7.7 suivante, on distingue les types d'ouvrages adaptés au carrefour déjà existant à Antananarivo par rapport à la disponibilité d'espace libre :

Ces types d'ouvrages peuvent être placés sur les carrefours des 67ha, d'Antanimena, d'Ampasika, d'Analakely. Mais des études détaillées doivent être effectuées préalablement pour déterminer les caractéristiques réelles de ces ouvrages.

Les constructions en site urbain à faible profondeur ne sont pas cependant limitées au carrefour. On pourra, par ailleurs, construire les ouvrages sous les voies de circulation. Un projet pourra être réalisé en reliant Analakely et 67Ha ou Analakely-Ampefiloha pour la résolution des problèmes sur ses axes.

L'amélioration qu'apportera ce type d'ouvrage pourra être un outil pour favoriser et améliorer la perception de la population sur l'ouvrage souterrain.

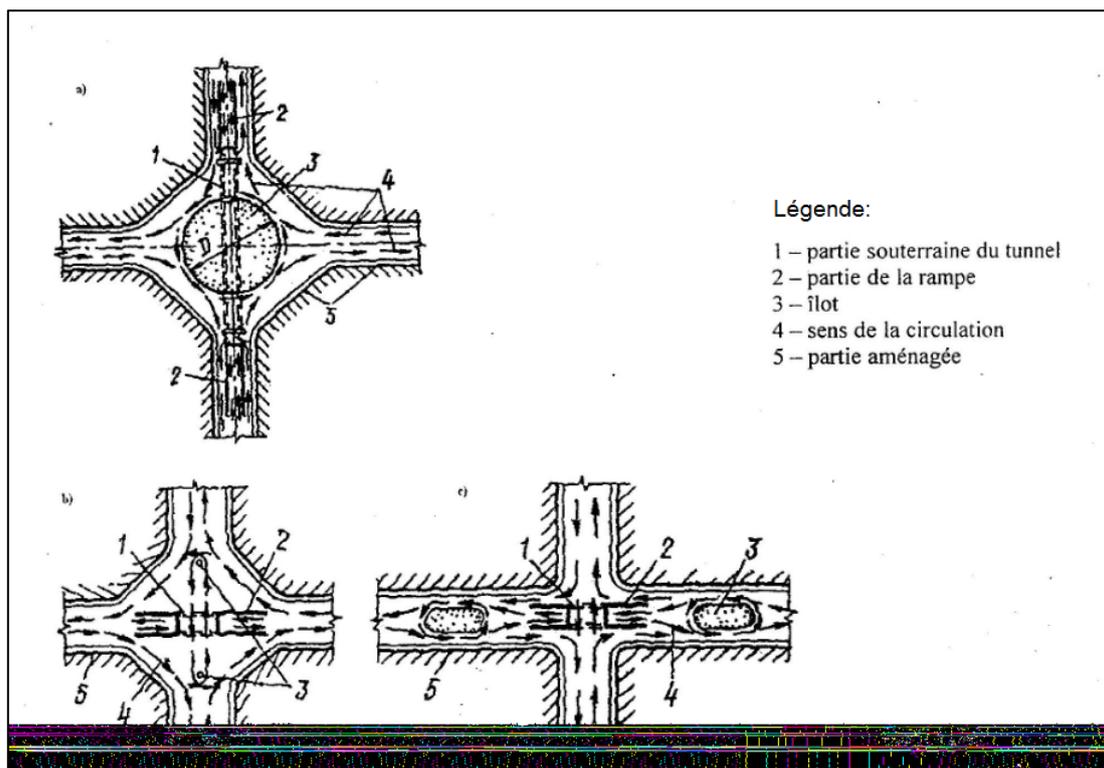


Fig. 7.6 Schéma de tunnel routier sur un croisement des voies rectilignes à 4 branchements

L'étude en général pour la mise en place d'un ouvrage souterrain dans les endroits susceptibles de la ville d'Antananarivo ont été vu jusqu'ici, mais le choix d'Antanimena est penché comme titre particulier dans le dernier chapitre.

## Chapitre 8. PROJET D'ANTANIMENA

Le quartier d'Antanimena est un des axes importants de la ville qui présente les signes d'asphyxie dû aux problèmes d'embouteillage (Cf. sous paragraphe 4.1 - le secteur 1).

Ce quartier est le point de passage de plusieurs axes à savoir ceux d'Ankorondrano et d'Analakely sans oublier ceux d'Andraharo et de Behoririka. A noter la présence de nombreux sites économiques et commerciaux, un signe de développement, mais qui entraîne par la suite une augmentation de la mobilité urbaine.

Le choix s'est porté donc sur le carrefour d'Antanimena à titre d'étude particulière. Mais le contexte pourrait être aussi valable pour tous les carrefours ou les endroits identifiés à problème. Mais cela doit être suivi d'une étude particulière suivant les conditions spécifiques à chaque cas.

### 8.1. Identification de la zone d'étude

Le quartier d'Antanimena se situe dans le premier arrondissement de la Commune Urbaine d'Antananarivo 18°53'51" latitude Sud et 47°31'15" longitude Est sur une altitude de 1265 mètres par rapport au niveau de la mer.

Comme la majeure partie des zones basses d'Antananarivo le sol est constitué de terre latéritique à base d'argile et de sable. Le critère géologique du site est favorable à la construction à ciel ouvert. Des études géologiques détaillées doivent cependant être effectuées lors de la réalisation du projet pour les dimensionnements. Mais cela n'intervient plus sur le choix de la méthode de creusement car en plus du critère géologique, la longueur et la profondeur du tunnel ne permet pas la méthode de creusement souterrain.

La topographie du site est un avantage de plus car on remarque une élévation sur l'axe de direction Nord-Sud dont sa largeur et son hauteur permettent de faciliter la mise en place du tunnel. Cette caractéristique permet de limiter au minimum la pente pour des rampes pour l'entrée et la sortie du tunnel. Des pentes de l'ordre de 4<sup>0</sup>/<sub>00</sub> seulement sont nécessaires pour l'écoulement des eaux. Il ne faut pas négliger les eaux de pluies car le climat sur cette zone est identique à celle d'Antananarivo. Des fortes pluies durant l'été sont à prévoir.

Avec la présence éventuelle de nappe phréatique, cela occasionnera des charges supplémentaires qui peuvent influencer la stabilité du tunnel. Un dispositif de drainage doit donc être placé pour le protéger.

## 8.2. Caractéristiques du trafic

L'objectif est de recueillir les données de circulation auxquelles le tunnel doit satisfaire.

Elle représente le volume du trafic qui tourne autour du quartier d'Antanimena, de cette manière nous allons voir les trafics plus en détail.

On a effectué un recensement des passages des voitures pendant les heures de pointe durant une durée de 2 heures, et en 3 temps pour plus de précision. Le choix de la durée de 2 heures est du fait que durant l'embouteillage les données recueillies sont très variables. En effet, on observe des alternances rapides de congestion/fluidité du fait de l'alternance du passage dans le carrefour. Et il fallait à peu près 2 heures pour que l'embouteillage se dissipe. Ce qui nous a amené à choisir cette durée afin d'éviter d'avoir des données erronées.

Pour *les heures normales*, on a constaté une valeur à peu près constante, entre 5 à 7 véhicules en 1 minute. Le pointage a été effectué pendant une durée approximative de 1 heure.

Pendant *les heures de pointe*, après pointage effectué avant et après les entrées du carrefour, nous avons constaté que pour une durée approximative de 2 heures, plus de 1800 véhicules traversent l'une des entrées. Donc en moyenne 7200 véhicules traversent le carrefour à partir des 4 entrées. Ce qui donne une moyenne de 3600 véhicules/heure.

Pendant *les heures normales*, on a pu constater une diminution de 40%, le nombre de véhicules qui entrent et sortent dans la zone considérée soit en moyenne de 360 véhicules en 1 heure donc pour les 4 branchements, 1440 véhicules/heure.

Le nombre de poids lourds qui traversent la section étudiée est très limité puisqu'ils sont interdits de circulation pendant la journée.

En considérant qu'il y ait 5 heures 30 de pointes en moyenne en une journée et 8 heures normales, en tout, 32040 véhicules passeront dans la zone d'étude.

### 8.3. Voirie dans la zone d'étude

L'objectif est de définir les voies existantes à Antanimena. A travers cette étude, on va tirer le profil de la structure et l'ensemble du projet.

On a un carrefour plan, type « plus + » qui veut dire à 4 directions avec un rond-point au milieu et déversant sur 4 axes différents qui sont Ankorondrano axe 1 ; Ankadifotsy axe 2 ; Behoririka Analakely Axe 3 ; et le quatrième celle venant d'Ankazomanga et d'Andotapenaka axe 4. L'accès vers tous ces axes sera étudié dans le sous-paragraphe 8.4.

L'emprise disponible entre les immeubles, les bâtiments, les infrastructures à l'entrée du carrefour du côté Sud est de 12m et du côté Nord, 17m. Cette donnée intervient surtout sur le choix de la méthode de creusement du tunnel.

### 8.4. Infrastructures dans la zone d'étude

L'objectif est de limiter autant que possible la nuisance et le dérangement provoqués par le projet sur les bâtiments et infrastructures environnants. Ainsi, on va définir toutes les infrastructures présentes qui subiront des impacts ou des dérangements durant et après les travaux ainsi que les mesures d'accompagnement dans la zone d'étude.

Pour cela, des inventaires sont nécessaires pour les bâtiments et les infrastructures qui seront touchés directement ou indirectement par les travaux de construction du tunnel.

#### a. Bâtiment commercial, habitable et zones industrielles

On est en pleine-ville, donc on est en face d'un quartier très peuplé avec la majorité des bâtiments constitués d'immeubles à plusieurs étages. Ils sont localisés sur les zones 1, 2, 4, 5,6 de la Carte 8.1.

Nous avons identifié l'existence de plusieurs écoles à proximité à savoir l'Ecole Sacré Cœur Antanimena « ESCA », Collège d'Enseignement Général ou CEG Antanimena et le Saint François Xavier ou SFX sur les zones 3, 4 et 6, mais aussi plusieurs bureaux et zones industriels zones 1,5 et 4.



### b. Jardin d'Antanimena

Aménagé depuis 2003, le jardin d'Antanimena offre un paysage assez agréable pour la ville. Mais il constitue aussi l'amélioration environnementale de la ville d'Antananarivo déjà polluée.

### c. La Fontaine

Située en plein zone d'étude, elle a été placée au centre du carrefour.

Tout ceci pour nous dire que la présence de ces infrastructures aura une influence qui diminuera l'emprise disponible pour l'exécution à ciel ouvert

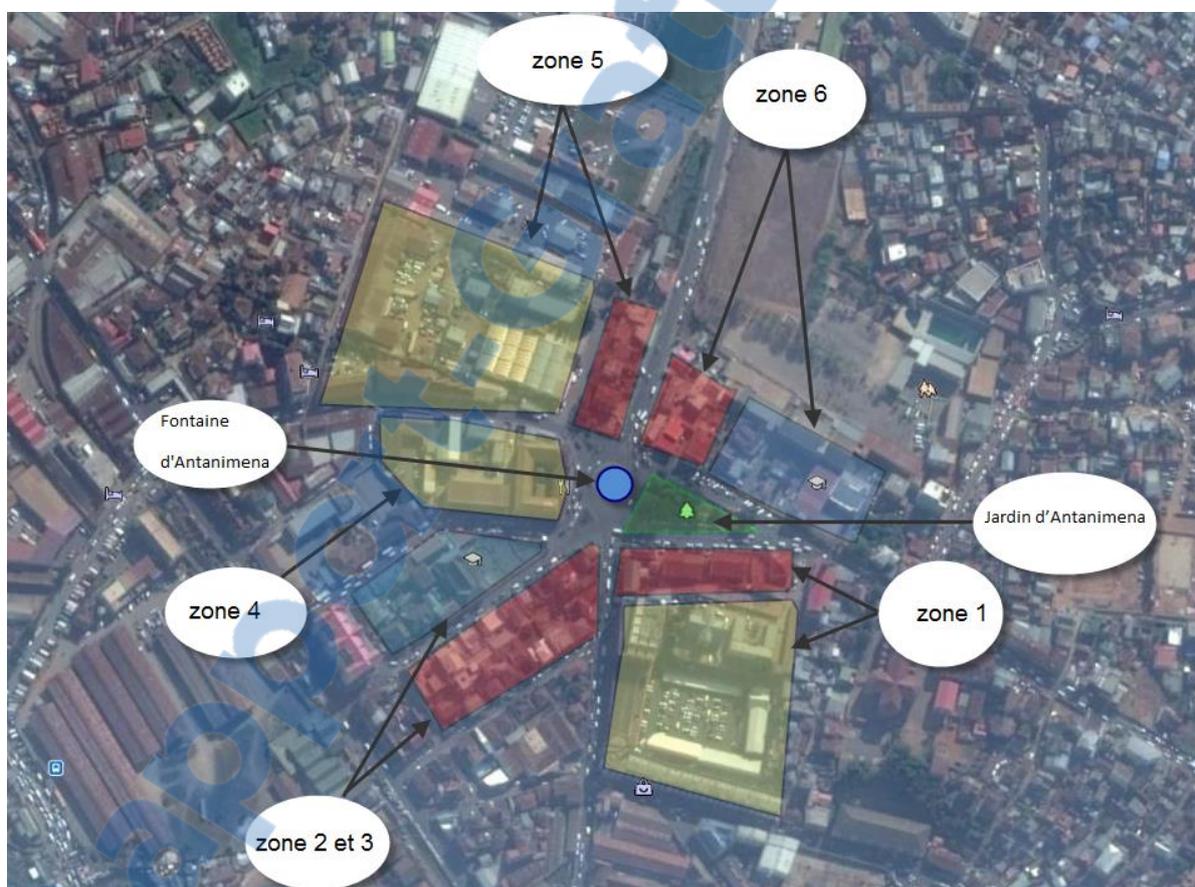


Photo 8.1 « Photo satellite » représentant les infrastructures avoisinantes

## 8.5. Profil du tunnel

### 8.5.1. Largeur du profil du tunnel en travers

#### 8.5.1.1. Calcul de l'ouvrage souterrain [39]

Il existe des méthodes de calcul et de dimensionnement d'un ouvrage souterrain. Pour le projet, le choix s'est orienté sur la *méthode des réactions hyperstatiques*. La *méthode de convergence confinement* est adaptée aux ouvrages en grande profondeur.

La *méthode des réactions hyperstatiques* consiste à modéliser la structure par des barres et à étudier le comportement du soutènement sous l'action de charges extérieures.

On distingue alors des charges dites « actives », qui sont indépendantes de l'état de déformation du soutènement (charges imposées, provoquées par la couverture de terre (surcharge) et par d'autres actions extérieures comme l'eau, trafic...) et des charges dites « passives » qui sont les réactions hyperstatiques dépendant de la déformation (ce sont classiquement les réactions de butée du terrain).

La méthode des réactions hyperstatiques se repose sur les principes et hypothèses suivantes :

- Le soutènement de forme rectangulaire avec une rigidité variable est modélisé à l'aide «d'éléments finis » (poutre et barre)
- Les charges réparties sont remplacées par des charges concentrées appliquées sur les nœuds du système polygonal et dont les valeurs sont égales à la résultante des charges réparties dans la moitié de chacune des arêtes contiguës du système
- Les roches encaissantes sont modélisées comme un milieu linéairement déformable basé sur les principes de déformations locales où les réactions hyperstatiques dépendent directement du déplacement du soutènement au point considéré. Ainsi, les réactions de ces roches sur le soutènement sont prises en compte par des réactions linéaires appliquées sur les nœuds du système. Les réactions perpendiculaires à la surface de contact du soutènement subissent uniquement des efforts de compression travaillant ainsi somme des liaisons unidirectionnelles.

Tout ceci permet de monter le schéma du modèle qui est représenté par la figure suivante représentant les charges actives et passives

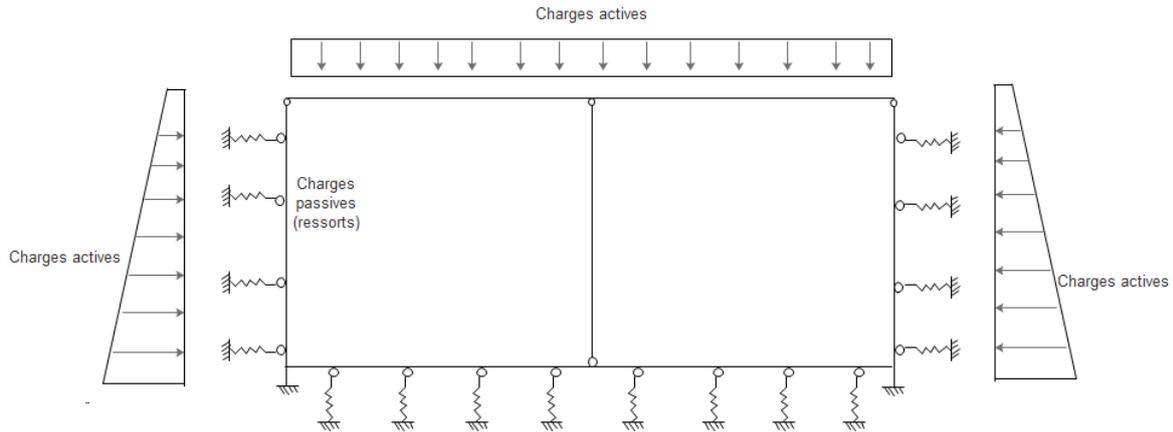


Fig. 8.1 Schéma du modèle aux réactions hyperstatiques.

Avec une structure symétrique et symétriquement chargée, on se ramène à l'étude d'une demi-structure. On a le système équivalent (Figure 8.2) en introduisant des articulations et des moments fléchissant sur les nœuds où sont appliquées les réactions. D'où, les inconnues superflues du problème sont les moments fléchissant  $M_k$  se trouvant dans les sections au niveau de ces nœuds.

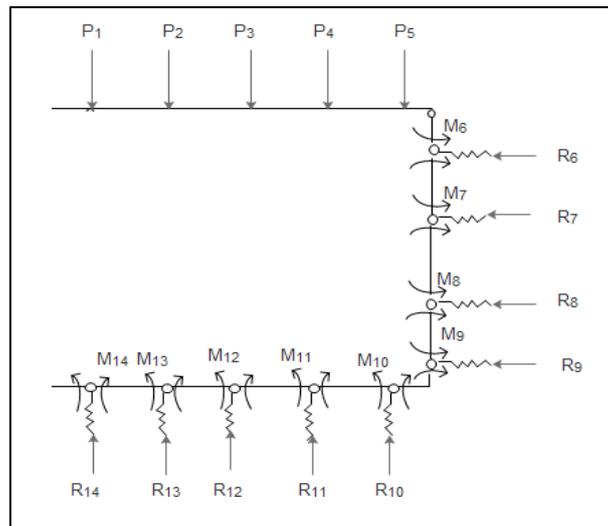


Fig. 8.2 schéma du système équivalent du model hyperstatique

Pour déterminer les inconnues  $M_k$  on a le système d'équations canoniques de la forme

$$\sum_{k=1}^n M_k \cdot \delta_{ik} + \Delta_{ip} = 0 \quad (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad (8.1)$$

où

$\delta_{ik}$  : Déplacement du système équivalent dans le sens de l'inconnue  $M_i$  provoqué par le moment unitaire appliqué au point  $k$  ;

$\Delta_{ip}$  : Déplacement du système équivalent dans le sens de l'inconnue  $M_i$  provoqué par toutes les forces extérieures.

Présentée sous forme de matrice, l'expression (8.1) s'écrit

$$A \cdot \vec{X} + \vec{\Delta}_p = 0 \quad (8.2)$$

où

A : Matrice des déplacements unitaires du système équivalent ;

$\vec{X}$  : Vecteur des inconnues ;

$\vec{\Delta}_p$  : Vecteurs des déplacements du système équivalent provoqués par les forces extérieures ;

La matrice A et les vecteur matrice des déplacements unitaires du système équivalent  $\vec{X}$  et  $\vec{\Delta}_p$  ont donc les formes ci-après

$$A = \begin{pmatrix} \delta_{11} & \cdots & \delta_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta_{n1} & \cdots & \delta_{nn} \end{pmatrix} \quad \vec{X} \begin{matrix} M_1 \\ M_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ M_2 \end{matrix} \quad \vec{\Delta}_p \begin{matrix} \Delta_{1P} \\ \Delta_{2P} \\ \Delta_{3P} \\ \cdot \\ \cdot \\ \Delta_{nP} \end{matrix} \quad (8.3)$$

On a donc :

$$\vec{X} = A^{-1} \vec{\Delta}_p \quad (8.4)$$

où

$A^{-1}$  : Matrice inverse de la matrice A.

Les déplacements  $\delta_{ik}$  sont déterminés par la formule de Mohr.

$$\delta_{ik} = \sum \int \frac{\bar{M}_i \cdot \bar{M}_k}{E I_w} ds + \sum \frac{\bar{N}_i \cdot \bar{N}_k}{E S_m} l_w + \sum \frac{\bar{R}_i \cdot \bar{R}_k}{b \cdot k_w \cdot l_w^*} \quad (8.5)$$

$$\Delta_{ip} = \sum \int \frac{\bar{M}_i \cdot \bar{M}_p}{E I_m} ds + \sum \frac{\bar{N}_i \cdot \bar{N}_p}{E S_m} l_m + \sum \frac{\bar{R}_i \cdot \bar{R}_k}{b \cdot k_m \cdot l_m^*} \quad (8.6)$$

La somme s'effectue suivant m désignant l'indice de la barre du système polygonal.

$\bar{M}_i, \bar{N}_i, \bar{R}_i$  sont respectivement le moment fléchissant, la force normale (longitudinale) et la réaction de butée du système équivalent provoquées par le moment unitaire appliqué au point  $i$  ;

$\bar{M}_k, \bar{N}_k, \bar{R}_k$  sont les mêmes efforts provoqués par le moment unitaire appliqué au point  $k$  ;

$M_p, N_p, R_p$  : Les mêmes efforts provoqués par les charges extérieures ;

$E$  : Module d'élasticité ;

$I_m, S_m, l_m$  sont respectivement moment d'inertie, surface de la section et la longueur de la barre  $m$  du système polygonal ;

$I_m^*$  : moitié de la somme des longueurs de deux barres contigus  $m$  et  $(m-1)$

$$I_m^* = \frac{l_{(m-1)} + l_m}{2} \quad (8.7)$$

$b$  : largeur de calcul de l'ouvrage suivant son axe longitudinal (souvent on prend  $b=1$ )

$K_m$  : La valeur moyen du module de réaction des roches sur la surface  $b \cdot I_m^*$

$m$  : L'indice portant le numéro de la barre du système polygonal correspond au numéro du nœud supérieur.

L'influence des forces longitudinales sur les déplacements dans un ouvrage à configuration curviligne est minime et peut être négligée dans le calcul.

La détermination des moment fléchissant  $\bar{M}_i, \bar{M}_k, \bar{M}_p$  n'appelle aucune difficulté, quant à la détermination des effort  $\bar{N}_i, \bar{N}_k, N_p, \bar{R}_i, \bar{R}_k$  et  $R_p$ . Il est recommandé d'utiliser les méthodes des nœuds du système équivalent.

Après avoir déterminé les déplacements  $\delta_{ik}$  et  $\Delta_{ip}$  et procédé aux vérifications des calculs effectués, on procède à la résolution des équations canoniques par rapport aux inconnues  $M_k$ . Les moments fléchissant  $M_m$ , les forces longitudinales  $N_m$  et les réactions des roches  $R_m$  sur les nœuds et dans les barres du revêtement s'expriment à partir des valeurs calculées de  $M_k$  par les formules ci-après :

$$\left. \begin{aligned} M_m &= M_{mp} + \sum_k M_k \bar{M}_{mk} \\ N_m &= N_{mp} + \sum_k M_k \bar{N}_{mk} \\ R_m &= R_{mp} + \sum_k M_k \bar{R}_{mk} \end{aligned} \right\} \quad (8.8)$$

où

$\bar{M}_{nk}$ ,  $\bar{N}_{nk}$ ,  $\bar{R}_{inp}$  sont respectivement moments fléchissant, forces longitudinales et les réactions des roches sur le nœud dans la barre m du système équivalent provoqués par les moments unitaires appliqués aux nœuds k ;

$M_{mp}$ ,  $N_{mp}$ ,  $R_{mp}$  sont les mêmes efforts mais provoqués par les charges extérieures.

D'une manière générale globale, on peut écrire :

$$\left. \begin{aligned} \bar{M} &= \bar{M}_p + \bar{M}\bar{X} \\ \bar{N} &= \bar{N}_p + \bar{N}\bar{X} \\ \bar{R} &= \bar{R}_p + \bar{R}\bar{X} \end{aligned} \right\} \quad (8.9)$$

Les valeurs des charges sont encore des inconnues dans notre cas. Les calculs exacts et précis de dimensionnement de l'ouvrage pourraient être estimés dans le cadre d'un autre mémoire ainsi que les nombres des piliers qui doivent être mise en place pour la stabilité du structure.

### 8.5.1.2. Géométrie de la plateforme du tunnel

Comme il s'agit de tunnel routier, son profil dépend des caractéristiques des voies qui composent la plateforme. Elle est marquée généralement par la présence des voies roulables et des zones hors chaussée. Dans le cas d'Antanimena avec le manque d'espace il est possible de réduire la dimension de la plateforme au strict nécessaire tout en respectant les normes y afférents en vigueur.

Pour permettre le passage des poids lourds qui a une largeur maximale de 2.5 m selon la norme Européenne, il nous est préférable de prendre une valeur de 3 m. Une valeur qui permettra le croisement des camions dans le tunnel à une vitesse au pas de 40 km/h (figure 6.5).

Généralement, dans un cadre de construction d'un carrefour dénivelé, l'accès au piéton est déconseillé à cause de danger éventuel. Les deux zones hors chaussée sont

désormais constituées par des but-roues à gauche et à droite de 0.3m de large. Une valeur qui permet d'espacer les véhicules à la paroi du tunnel.

En terme de sécurité, un espace de 0.4m « séparateur central (Sc) » est nécessaire pour la mise en place d'un espace d'un isolateur central de 0.3m de large avec 0.2m de hauteur pour éviter le risque d'accident et de collision. Cet espace permet aussi la mise en place des piliers centraux pour stabiliser l'ouvrage.

Calcul de la largeur du tunnel (l) appelée aussi plate-forme (Pf)

$$l = V_1 + V_2 + Sc + IsD + IsG$$

$V_1$  et  $V_2$  : les voies bidirectionnel du tunnel ;

$Sc$  : Largeur du séparateur central

$IsD$  : Largeur de l'isolateur de droite

$IsG$  : Largeur de l'isolateur de gauche

Avec

$V_1$  et  $V_2 = 6m$  (3x2)

$Sc = 0.4 m$

$IsD$  et  $IsG : 0.6m$  (0.3x2).

Ce qui nous donne une largeur de 7 m.

Toutes ses valeurs permettent de représenter le profil de la plateforme provisoire (figure 8.3).

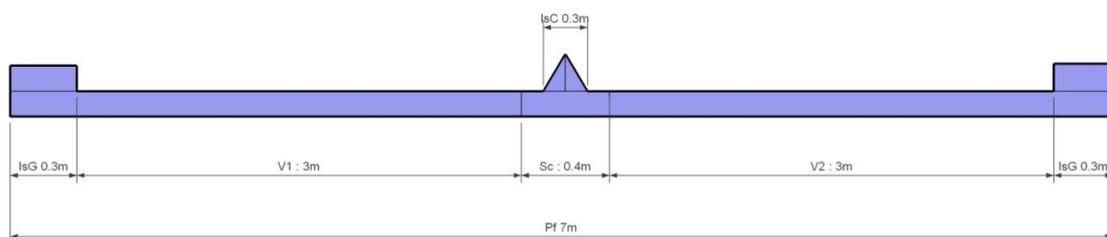


Fig. 8.3 Profil de la plateforme du tunnel avec ses éléments constitutifs et ses dimensions

### 8.5.2. Profil en long

La photo 8.2 et la figure 8.4 représentent les éléments constitutifs et l'allure de la structure.

Le tunnel traverse le flanc de colline d'une hauteur de 5m qui se rapproche à la hauteur du tunnel. Il est constitué de trois parties (deux rampes et le corps du tunnel).

L'entrée de la rampe du côté Nord se trouve à l'altitude de 1260m par rapport au niveau de la mer et se situe à 48 mètres de l'entrée du tunnel proprement dit.

L'entrée du cotée sud se situe à 41 mètres de l'entrée du tunnel proprement dite (cotée sud) et est à 1260m par rapport au niveau de la mer.

La longueur du tunnel proprement dite est de 59 m, ce qui nous donne une longueur totale de 148 m pour tout l'ouvrage



Photo 8.2 Photos represenatn les parties du tunnel

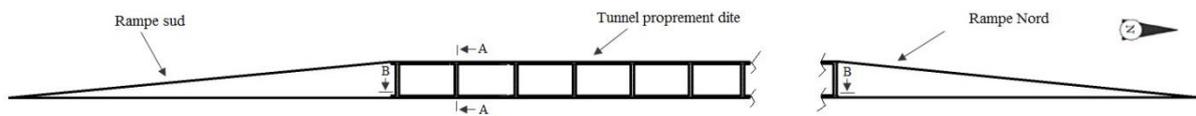


Fig. 8.4 Profil en long du tunnel vu de droite

### 8.5.2.1. Hauteur du profil en travers

Avec un gabarit de 4m correspondant au gabarit d'un poids lourd, la hauteur correspondant à ce type de gabarit est de

$$H = G + R_s + R_p + R_c$$

$R_c=0.2$  cette revanche de construction permet la mise en place d'une pente de  $1^0/00$  utile pour l'écoulement des eaux dans le tunnel. Cette revanche est donc réduite de 0.1 m pour le côté Nord du tunnel.

$$R_p=0.1$$

$$R_s=0.3$$

$R_p$  (Revanche de protection)

$R_s$  (Revanche de signalisation)

$$H = G + R_c + R_p + R_s = 4 + 0.2 + 0.1 + 0.3 = 4.6 \text{ pour le côté Sud}$$

$$H = G + R_c + R_p + R_s = 4 + 0.1 + 0.1 + 0.3 = 4.5 \text{ pour le côté Nord}$$

La différence de cette hauteur est du faite de la mise en place de la pente de  $1^0/00$  pour permettre l'écoulement des eaux de chaussée.

Avec la largeur de la chaussée et la hauteur du profil en travers du tunnel. Un profil approximatif en travers peut être obtenu. Ceci est représenté sur la figure suivante :

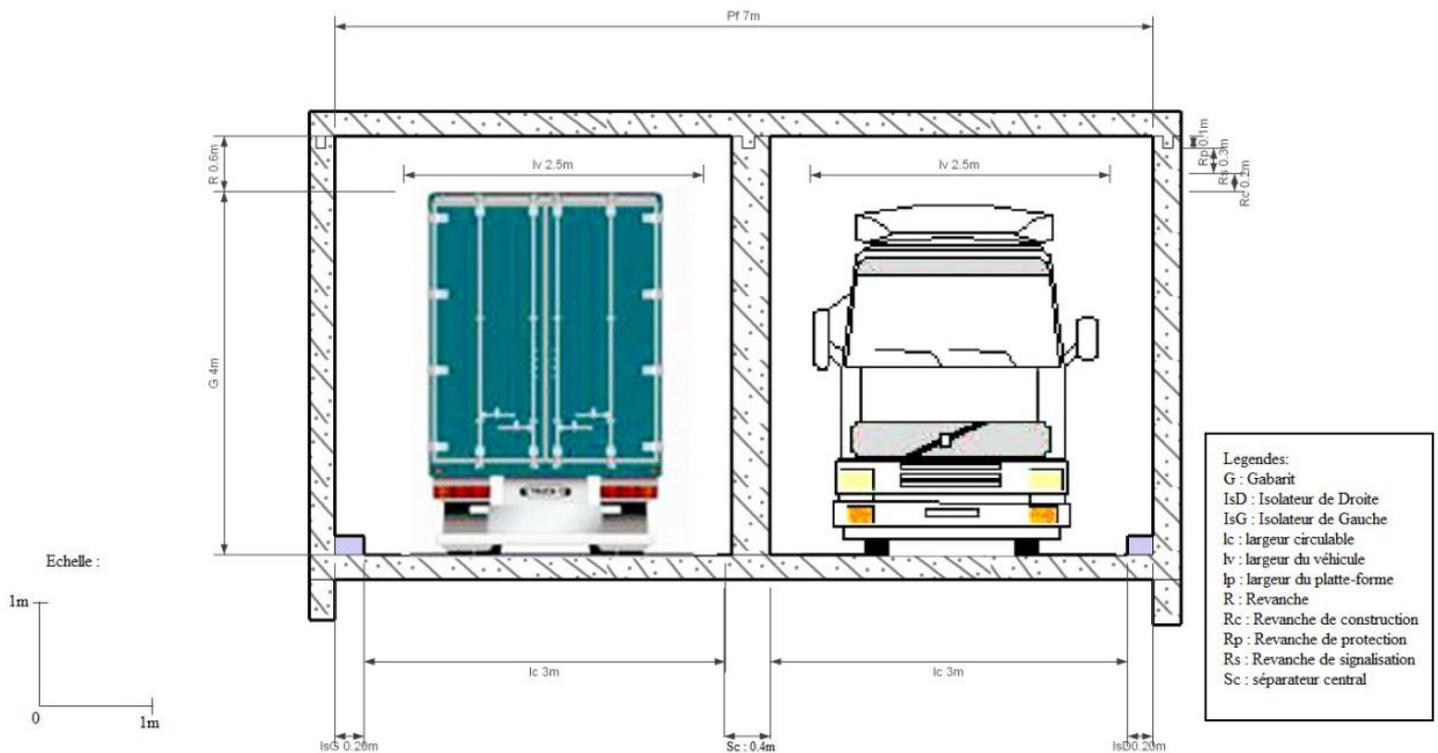


Fig. 8.5 Profil en travers du tunnel coupe A-A

Le profil en long du tunnel proprement dit est représenté dans les figures 8.6 et 8.7 suivantes avec

L (Longueur du tunnel) = 59 m

HTN (hauteur du tunnel cotée Nord) = 4.5 m

HTS (Hauteur du tunnel cotée Sud) = 4.6 m

Une espace de 0.3m est réservée à titre provisoire pour la mise en place du toit du tunnel. Cette valeur ne signifie pas que l'épaisseur du toit est de 0.3 m, avec une valeur plus grande. Il est judicieux dans ce cas de remblayer le dessus du tunnel jusqu'à l'atteint du dite valeur mais aussi qu'un remblai supplémentaire peut être apporté pour minimiser les bruits sous le tunnel.

Ce qui nous permet d'avoir la profondeur approximative du tunnel qui est de 5m correspondant à la hauteur d'élévation. Un garde-corps doit être aussi mise en place aux deux têtes du tunnel.

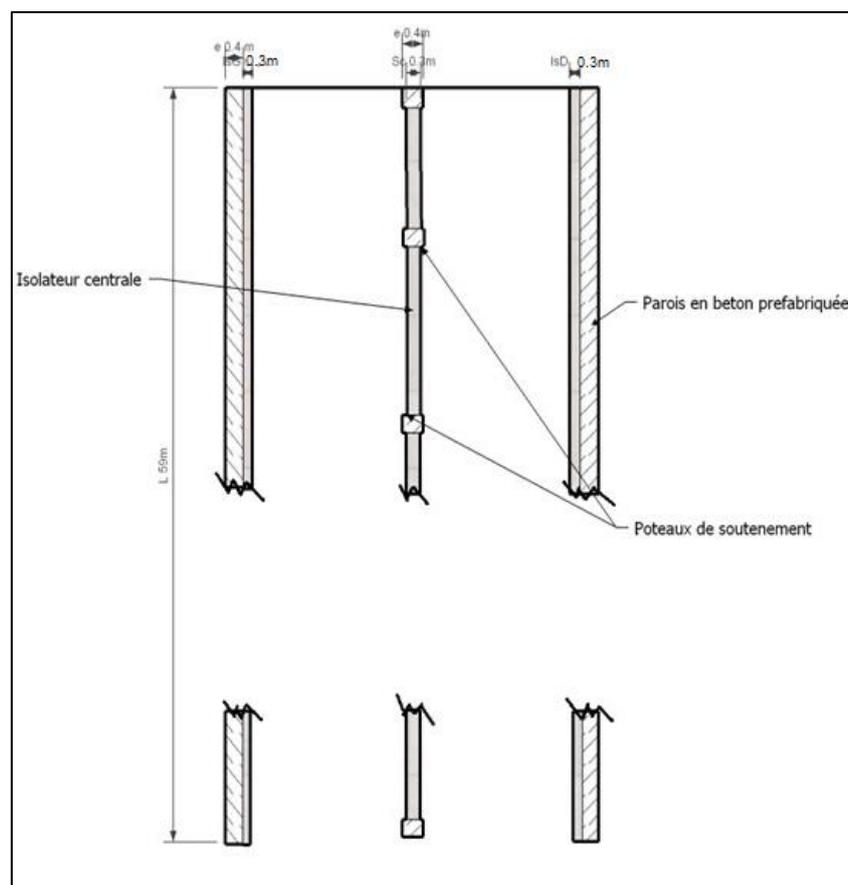


Fig. 8.6 Coupe B- B

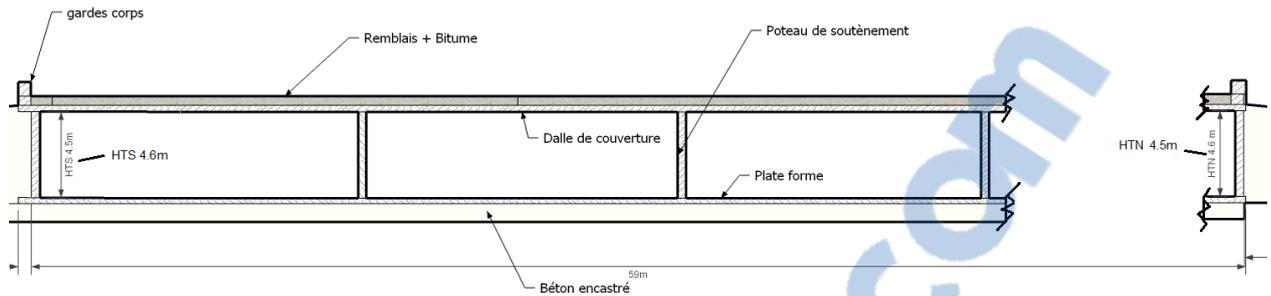


Fig. 8.7 Profil en long du tunnel vu de droite

### a. Rampe Nord

La longueur de la rampe est de 48m.

On a choisi un pente de  $4^0/00$  pour permettre l'écoulement des eaux de chaussée, ce qui nous permet d'obtenir la hauteur aproximative de la pente qui est de 0.2m ( $48 \times 4^0/00$ )

En tenant compte de la hauteur de 4.5m à l'entrée Nord du tunnel proprement dite, de l'épaisseur de la dalle de couverture et la hauteur de la pente 0.2m. La hauteur de la rampe au niveau de la jonction du tunnel proprement dit est de 5m. Cette hauteur est augmentée de l'encastrement qui est nécessaire pour la stabilité du mur.

### b. Rampe Sud

La longueur de la rampe est de 41m.

On a choisi un pente de  $4^0/00$  pour permettre l'écoulement des eaux de chaussée, ce qui nous permet d'obtenir la hauteur aproximative de la pente qui est de 0.1m ( $41 \times 4^0/00$ )

En tenant compte de la hauteur de 4.6m à l'entrée Sud du tunnel proprement dite, de l'épaisseur de la dalle de couverture et la hauteur de la pente 0.1m. La hauteur de la rampe au niveau de la jonction du tunnel proprement dit est de 5m. Cette hauteur est aussi augmentée de l'encastrement qui est nécessaire pour la stabilité du mur.

Les profils des rampes sont représentés par les figures 8.8 et 8.9 suivantes

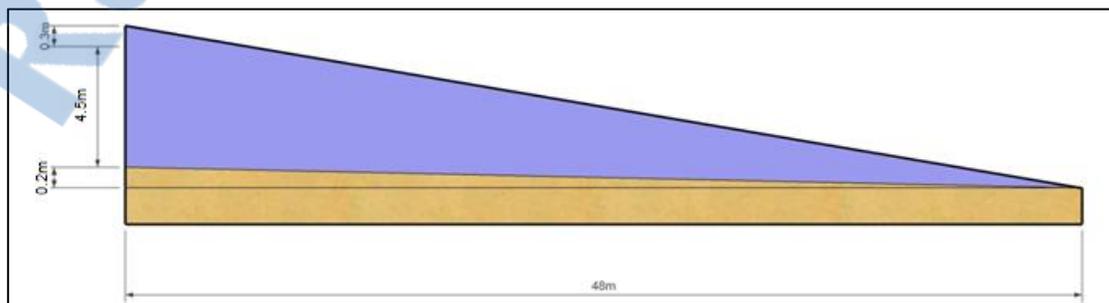


Fig. 8.8 Profil en long de la rampe nord

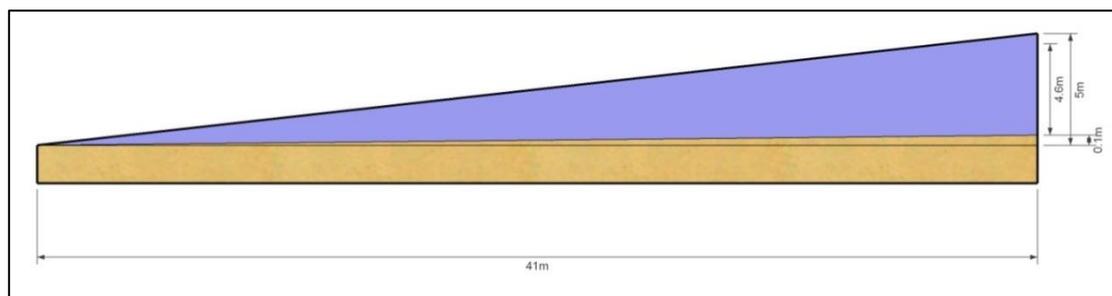


Fig. 8.9 Profil en long de la rampe sud

## 8.6. Plan de masse

Avec les différents points étudiés ci-dessus, on peut imaginer le profil du futur ouvrage, la figure 8.10 suivante montre déjà l'allure du tunnel avec les sens de la circulation.

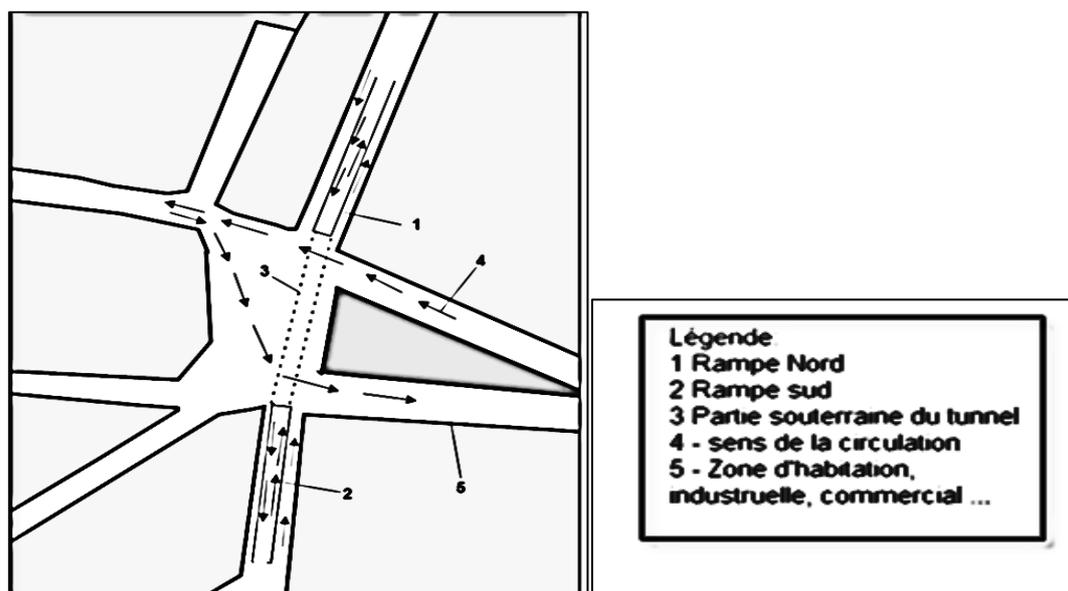


Fig. 8.10 Schéma du Projet tunnel Antanimena (Vue en plan)

Cependant, le raccordement des réseaux de circulation doit être effectué pour assurer la fluidité de la circulation mais aussi pour permettre les manœuvres des véhicules.

### 8.6.1. Mise en place des ilots

En se référant au sous paragraphe 7.3.2, deux ilots peuvent être aménagés en amont et en aval du tunnel. Ils peuvent être considérés par l'aménagement à un endroit proche du tunnel pour le côté Nord à 50m. Et pour le côté Sud, un îlot peut être aménagé à 50 m de la rampe Sud. La figure suivante montre le fonctionnement du système.

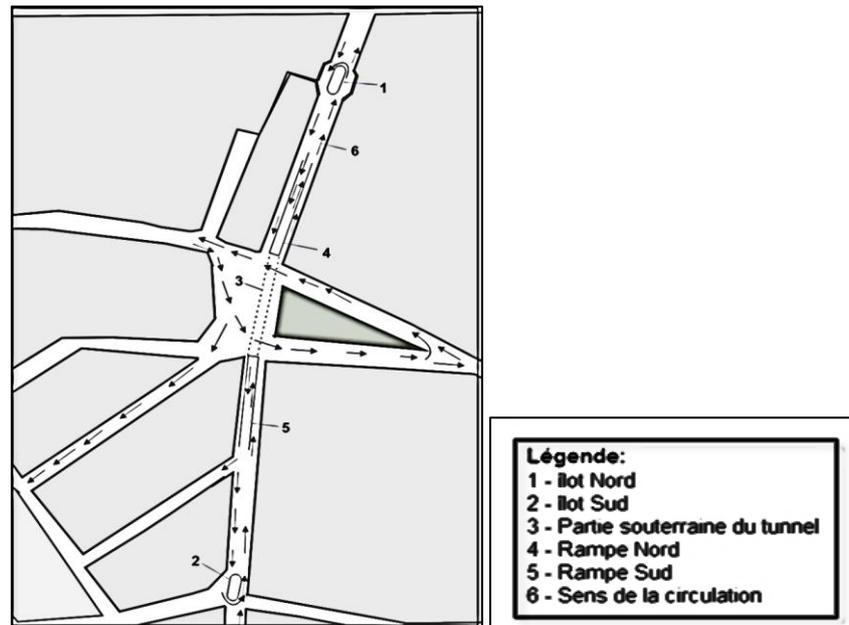


Fig. 8.11 Schéma du projet tunnel Antanimena après aménagement des îlots

## 8.7. Dispositions pendant les travaux et impact après la mise en place du tunnel

### 8.1.1. Dispositions pendant les travaux

Pour plus d'efficacité, nous avons opté pour une exécution des travaux pendant les grandes vacances c'est-à-dire du 15 juillet au 15 septembre. Ce qui nous laisse deux mois pour l'exécution des travaux pendant lesquels les routes devront être coupées.

Cette période constitue le moment où le trafic routier est le moins dense.

De plus, du côté climatique, il s'agit du meilleur moment où le risque de dérangement météorologique est minime.

### 8.1.2. Impact sur les infrastructures

Avec la direction du tunnel (Nord-Sud) la fontaine devrait être enlevée pendant les travaux. Le jardin d'Antanimena, quant à lui, ne subira aucun impact et ne serait pas touché pendant et après les travaux.

## 8.8. Travaux de construction

### 8.8.1. Choix de la méthode de creusement

Le choix de la méthode de creusement du tunnel est déterminé par de multiples facteurs, tels la topographie des lieux, les infrastructures existantes, la configuration géométrique du tunnel, les caractéristiques géologiques des terrains encaissants, sans oublier les facteurs prédominants qui sont d'ordre économique. Avec la faiblesse de profondeur du tunnel qui est de 5m depuis la surface ce qui nous confirme que la méthode à ciel ouvert est la méthode la plus appropriée pour ce type d'ouvrage.

#### 8.8.1.1. Choix 1 Méthode talutage

*Critère géométrique :*

- l : largeur du tunnel et des rampes est de 7m
- H : profondeur du tunnel est de 5m
- Pt : pente de 3/2 est nécessaire pour la stabilité du talus 3m horizontal pour 2m vertical
- e : épaisseur (près de 0.8m d'épaisseur du piédroit) .

Ce qui nous fait une emprise de :

$$E = \left(\frac{H}{Pt} \times 2\right) + (e \times 2) + l$$

Soit  $\left(\frac{5}{1.5} \times 2\right) + (0.8 \times 2) + 7$ , ce qui nous fait une emprise total environ de 15m

*Critères topographiques du terrain :*

- l'emprise disponible pour la partie Nord est de 16 m.
- l'emprise disponible pour la partie centrale est de 48 m.
- l'emprise disponible pour la partie Sud est de 12 m.

L'emprise du terrain pour le côté Sud ne permet pas le mode de creusement par talutage, s'ajoute le risque du dérangement de la circulation qui risquera d'être bloquée durant toute la totalité des travaux de construction.

L'expropriation du terrain pour la partie Sud s'avère difficile du fait que le quartier est composé de bâtiments commerciaux et d'immeubles d'habitation « zone 1 du carte 8.1 ».

### 8.8.1.2. Choix 2 Méthode de creusement à l'aide de soutènement

*Critère géométrique :*

L'emprise est utile à la construction :

- les paramètres sont les mêmes à part la mise en place des soutènements préalables. Ce soutènement permet d'avoir une pente de 90°.
- pour permettre le passage des piétons et des ouvriers durant les travaux, une emprise de 0.8 de chaque cotée des voies doit être gardée.

L'emprise totale de la construction est donc de 9m environ  $((0.8 \times 2) + 7)$

L'emprise de la construction est inférieure à l'emprise disponible pour la totalité de la construction. De plus, la méthode de creusement avec la mise en place de soutènement offre des avantages qui sont de paramètres de la remise en service de la construction après la mise en place de la dalle de couverture pour la partie du tunnel.

Le meilleur choix pour la construction du tunnel est donc la méthode par soutènement.

### 8.8.2. Les éléments de l'ouvrage

L'ouvrage devrait donc avoir :

#### **- une dalle de couverture**

Seule la partie du tunnel nécessite la mise en place de la dalle de couverture, une couverture lourde préconisée pour supporter une circulation routière. Son épaisseur tourne autour de 0.4m pour un béton préfabriqué [5], une valeur que nous allons prendre à titre provisoire mais qui sera précisée par une étude plus détaillée.

#### **- des murs de soutènement**

Le choix des murs de soutènement est valable pour les parois de la rampe et du tunnel. Ces murs sont mis en place dès le début des travaux. Ils peuvent être constitués de :

- parois berlinoises ;
- palplanches (à titre provisoire pendant la phase de construction) ;
- parois moulées ;
- parois préfabriquées ;

Les parois berlinoises sont avantageuses du côté coût de construction mais présente quelques inconvénients du côté durabilité. En effet, les parois berlinoises s'avèrent être

corrosives au contact avec l'eau, de plus la difficulté d'étanchéité s'ajoute à l'effet de la vibration durant sa mise en place. Généralement effectuées par vibrofonçage, elles peuvent nuire aux immeubles avoisinants.

Les palplanches sont utiles seulement à court terme et à une fonctionnalité à titre provisoire, Ils servent de soutènement durant les travaux de construction.

Les parois moulées et préfabriquées ont presque le même mode opératoire pour leur mise en place. Elles offrent les mêmes avantages du côté étanchéité et durabilité mais aussi, une meilleure résistivité par rapport aux parois berlinoises et palplanches.

Le choix entre parois moulée et préfabriquée se différencie par la qualité du béton. Le béton préfabriqué offre des avantages avec une dimension réduite d'ordre de 40cm ou 0.4m, et une exécution plus rapide. Par contre pour la paroi moulée, l'épaisseur du béton peut atteindre jusqu'à plus de 1 mètre et il faudrait du temps pour avoir la résistance mécanique nécessaire.

Cependant, un espace assez conséquent pour les travaux de manutention et de stockage doit être disponible.

Dans le cas présent, on distingue deux zones susceptibles pour ces opérations (carte 8.3). A défaut de cet espace proche pour la fabrication des panneaux préfabriqués, le coût de transport augmenterait les frais de construction. On a donc choisi pour la suite de l'ouvrage les murs en béton préfabriqué par rapport au contexte.



Photo 8.3 Photos représentant les endroits suffisamment spacieux capables d'être alloués pour la construction des panneaux préfabriqués

### 8.8.3. Séquencement des travaux

Les étapes d'exécution des travaux pour la construction doivent être bien planifiées pour une meilleure optimisation du temps qui contribue à la réduction du coût et du dérangement de la circulation.

Les travaux à réaliser pour la mise en place du tunnel ont été subdivisés en 3 étapes :

- « Etape 1 », mise en place des murs de soutènement et la dalle de couverture ;
- « Etape 2 », excavation du tunnel ;
- « Etape 3 », finition.

Il est à noter qu'avant les travaux de construction, des opérations préparatoires pour la mise place du chantier doivent être effectuées.

#### 8.8.3.1. Etape 1

La construction du tunnel commence par l'excavation et la mise en place des parois du tunnel proprement dit. Les mêmes opérations se passent ensuite sur la rampe Sud et tout de suite après sur la rampe Nord. La couverture des dalles termine l'étape 1.

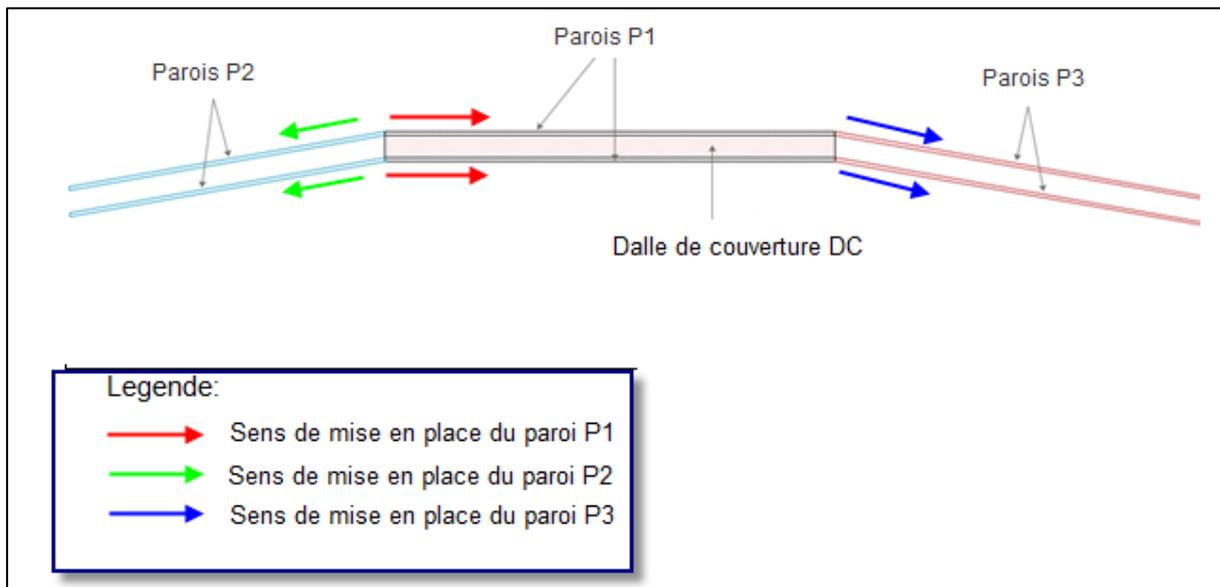


Fig. 8.12 Plan de la mise en place des éléments constituant du tunnel pendant l'étape 1

#### a) Méthode et phase d'exécution des parois

L'exécution se fait en trois phases :

*-première phase*

Réalisation d'une murette guide pour l'alimentation de la paroi de la boue bentonitique. Celle-ci est indispensable pour assurer une meilleure stabilité durant l'excavation. Cette murette permet également le guidage de l'engin d'excavation.

*- deuxième phase*

Excavation ou perforation à l'aide de perforateur ou d'une benne preneuse. Ces engins sont les mêmes utilisés pour l'excavation des parois moulées. La perforation se fait avec une boue bentonitique.

La mise en place des tubes joints éventuelle peut être effectuée pour améliorer l'étanchéité de l'ouvrage.

*- troisième phase*

Descente et positionnement des panneaux préfabriqués dans le tranché déjà excavé à l'aide de grue mobile ou de pelleteuse. Des dispositifs de guidage permettent d'obtenir un bon alignement des panneaux et de mettre en œuvre des joints d'étanchéité (waterstop).

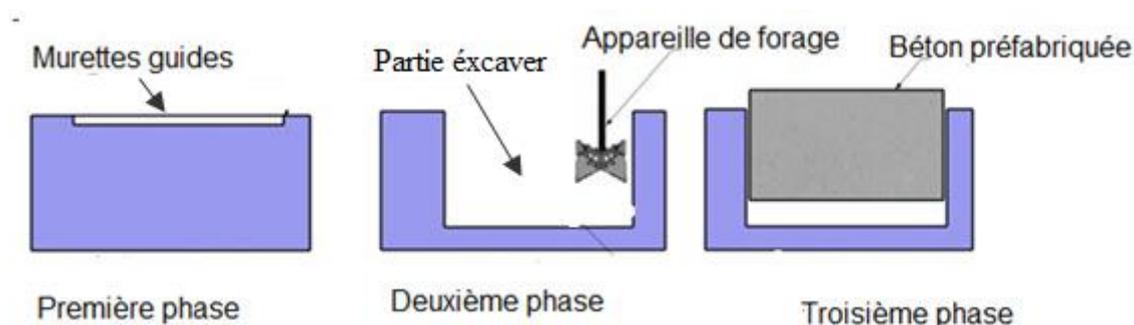


Fig. 8.13 Mode d'exécution de la paroi

La totalité des exécutions « excavation et mise en place » se fait de façon alternée avec la mise en place des panneaux d'ordre impair ou panneaux primaires vient ensuite la mise en place des panneaux secondaires (Figure 8.15).

**b) Jonction des panneaux :**

Les joints entre panneaux constituent le point délicat de jonction. Il permet d'assurer la continuité vis-à-vis des aspects hydrauliques. Les tubes joints figurent parmi l'une des technologies employées depuis longtemps. Cela consiste à mettre en place des tubes joints entre les panneaux et sert de surface d'arrêt, assurant ainsi une bonne reprise avec des panneaux.

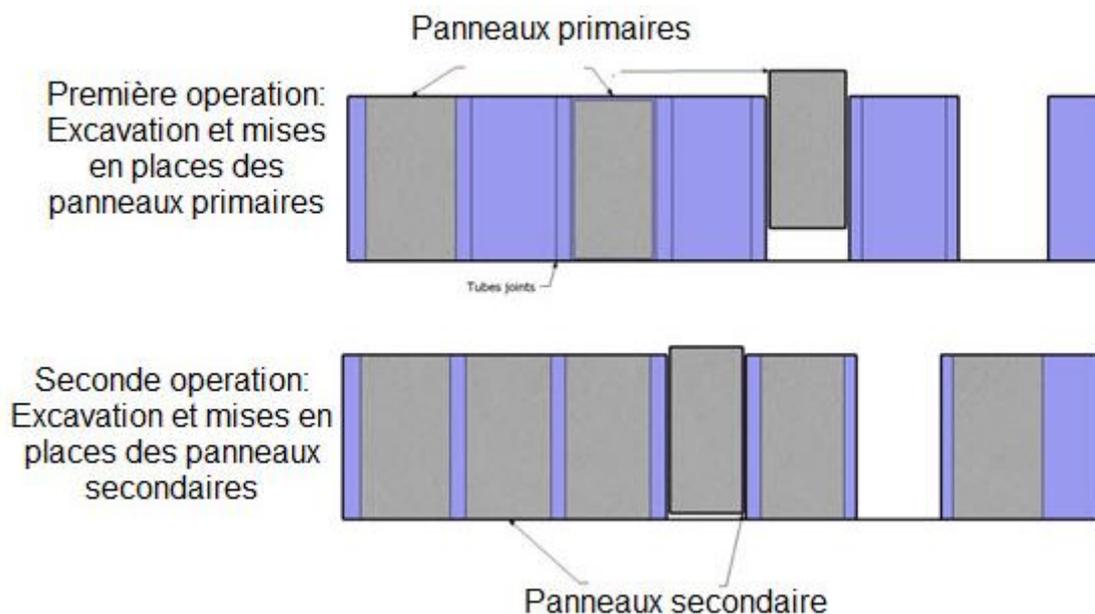


Fig. 8.14 Exécution de la paroi par panneaux alternés

### c) Volume d'excavation minimum pour la mise en place des parois

Le volume d'excavation est identique au volume de paroi en béton à mettre en place

*Pour le tunnel :*

- $e = 0.4 \text{ m}$
- $L = 59 \text{ m}$
- $H = 5 \text{ m}$

Soit un volume de  $118 \text{ m}^3$  ( $0.4 \times 59 \times 5$ ).

*Pour la rampe Nord :*

- Longueur de la rampe  $48 \text{ m}$
- Volume de la paroi de la rampe  $\frac{1}{2} \times 0.4 \times 5 \times 48$  soit  $48 \text{ m}^3$

*Pour la rampe Sud :*

- Longueur de la rampe  $41 \text{ m}$
- Volume de la paroi de la rampe  $\frac{1}{2} \times 0.4 \times 5 \times 41$  soit  $41 \text{ m}^3$

Ce qui nous donne le volume total des terres à excaver pour la mise en place des parois. Ce volume est aussi le volume du béton utile pour la construction du mur soit de 207 m<sup>3</sup>.

Accompagnée du terrassement et l'aménagement de la route au niveau supérieure, la circulation peut être rétablie vers la fin de ces travaux.

### 8.8.3.2. Etape 2

L'excavation des rampes d'entrée et de l'intérieur du tunnel est l'étape suivante. La méthode de réalisation en taupe est choisie pour effectuer le terrassement. Elle est effectuée par front d'attaque soit de direction Nord-Sud soit l'inverse. L'excavation des deux rampes est assimilable à l'extraction à ciel ouvert d'un gisement et celle du tunnel est assimilable à l'excavation d'un tunnel souterrain. Mais la différence de ce dernier est la protection des soutènements et de la dalle de couverture qui sont déjà placées à l'avance.

L'avancement de l'excavation peut être assuré par une pelle hydraulique puis les déblais sont évacués par une chargeuse à chenille de préférence pour permettre une meilleure adhérence et plus de puissance. Elle transporte les déblais vers un camion pour l'évacuation finale.

#### a) Précaution

Avec l'espace confiné à l'intérieur du tunnel, il faut bien faire attention pour ne pas endommager l'ouvrage pendant l'étape d'excavation.

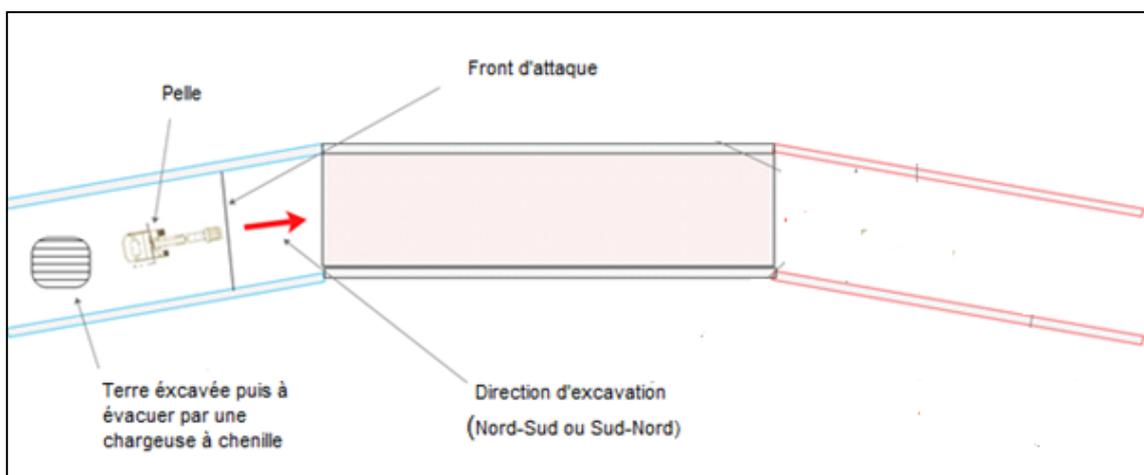
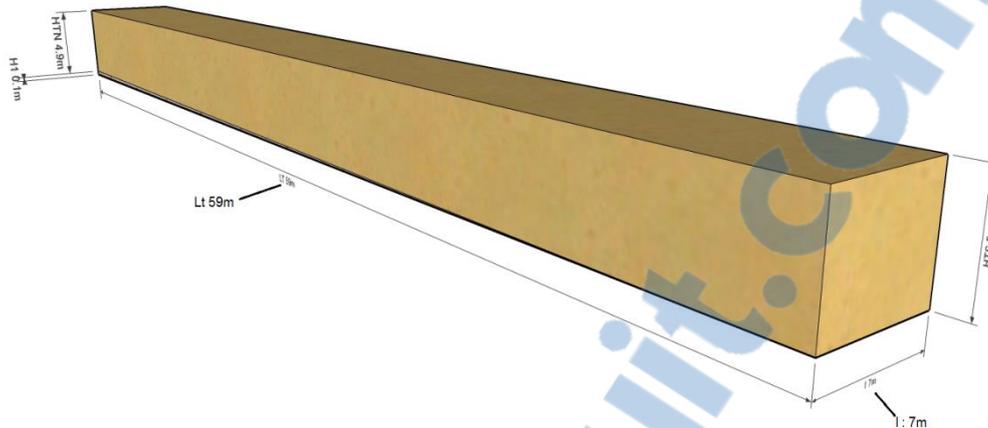


Fig. 8.15 Plan d'excavation du tunnel vue de dessus

#### b) Quantité ou volume de terre à excaver et à évacuer

- **Volume à excaver pour le tunnel proprement dit ( $V_A$ )**



**Fig. 8.16** Volume de la terre à déblayer

Calcul de  $V_A$

Le volume  $V_A$  est calculée par l'expression :

$$V_A = H_T \cdot L_T \cdot l$$

$H_T$  : Profondeur du tunnel 5m

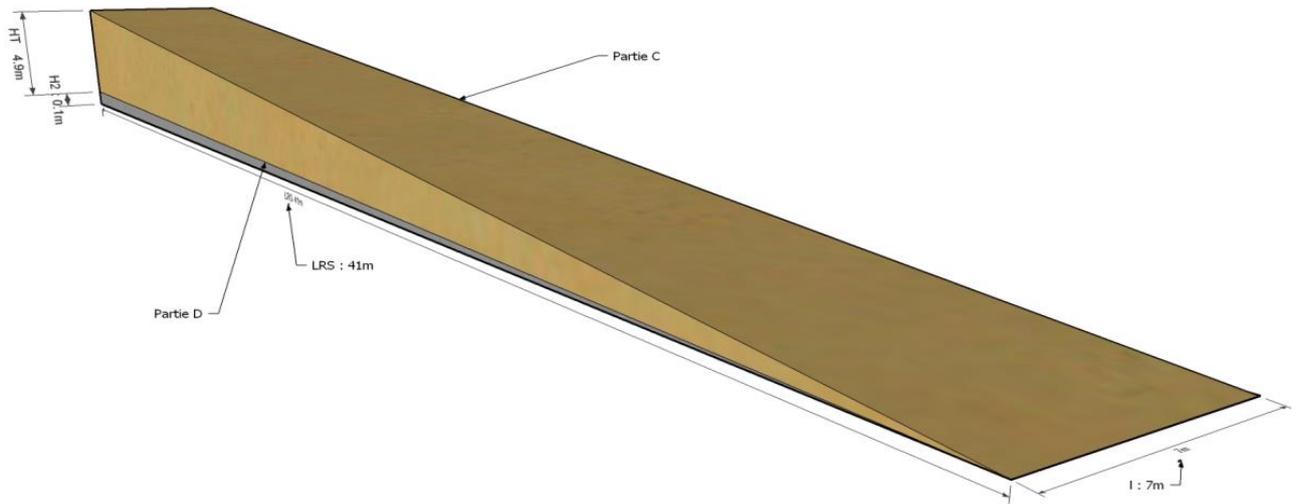
$L_T$  : Longueur du tunnel 59m

$l$  : largeur du tunnel 7m

Le volume du déblai à excaver pour le tunnel proprement dit est donc de  $2065 \text{ m}^3$

Après l'excavation un terrassement peut être effectué pour la mise en place d'une pente de  $2^0/00$  utile pour l'écoulement des eaux de surface. La hauteur de cette pente est donc de 0.1m ( $59 \times 2^0/00$ )

**Volume à excaver pour la mise en place de la rampe côté Sud ( $V_c$ )**



Calcul de  $V_c$

Le volume  $V_c$  est calculée par l'expression

$$V_c = \frac{H_T \cdot L_{RS} \cdot l}{2}$$

$H_T$  : Profondeur du tunnel 5 m.

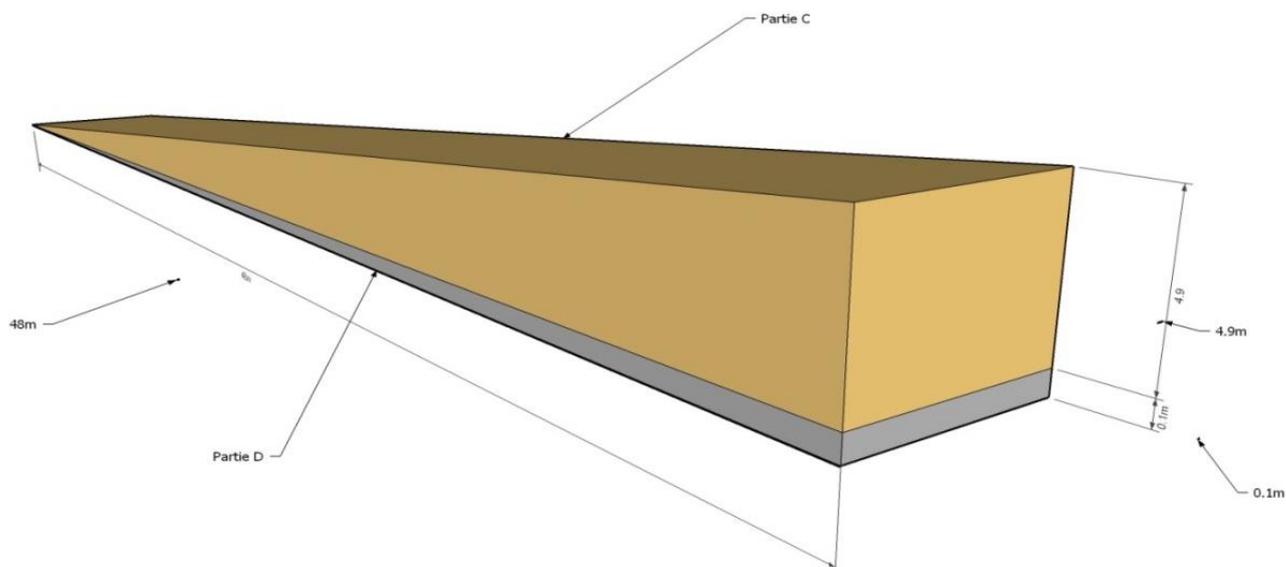
$l$  largeur à l'intérieur du tunnel qui est de 7 m.

$L_{RS}$  longueur de la rampe Sud qui est de 41 m.

Donc, le volume de terre à excaver pour la rampe Sud est de 660 m<sup>3</sup> environ.

Les travaux de terrassement peuvent être effectués après l'excavation avec la hauteur de la pente qui est de  $H_2 = L \cdot pt = 41 \times 4\text{‰} = 0.1\text{m}$ .

c) Volume à excaver pour la mise en place de la rampe côté Nord ( $V_E$ )



Calcul de  $V_E$

$$V_E = \frac{H_T \cdot L_{RN} \cdot l}{2}$$

$H_T$  : Profondeur du tunnel 5 m.

$l$  : Largeur à l'intérieur du tunnel qui est de 7 m.

$L_{RN}$  : Longueur de la rampe Sud qui est de 48 m.

Donc le volume de terre à excaver pour la rampe Nord est de  $840 \text{ m}^3$  environ.

Les travaux de terrassement peuvent être effectués après l'excavation avec la hauteur de la pente qui est de  $H_2 = L \cdot \text{pt} = 48 \times 4\text{‰} = 0.2 \text{ m}$ .

En résumé, le volume de terre à excaver durant la seconde étape est de  $840 \text{ m}^3$  pour la rampe Nord ;  $660 \text{ m}^3$  pour celle du Sud et  $2065 \text{ m}^3$  pour celle du tunnel proprement dit. Ainsi le volume total s'élève à  $3565 \text{ m}^3$  environ.

L'excavation peut être effectuée par une pelle Caterpillar M313C et une chargeuse à chenille à titre d'exemple.

### 8.8.3.3. Etape 3

Cette étape consiste au bitumage et à la mise en place des équipements.

#### a) Bitumage

L'étape finale est la finition des travaux avec la réalisation des voies sous le tunnel. Un travail de terrassement effectué par un boteur ou bulldozer et la construction des voies sous le bitumage tunnel est la phase qui termine les gros œuvres.

Enfin, pour la finalisation de la mise en place des éclairages et des panneaux de signalisation pour guider les automobilistes avant et après le passage du tunnel.

#### b) Equipement

##### - l'éclairage

Avec la longueur du tunnel de qui est de 59m, l'éclairage peut se faire avec la lumière naturelle (Annexe 6) et par des lampes fluorescentes pendant les nuits (Annexe 5) posées sur les côtés latéraux supérieurs de l'ouvrage. Cet emplacement n'influencerait pas le profil du tunnel.

##### - la ventilation

Avec la longueur du tunnel qui est très courte, il n'est pas nécessaire de mettre en place un système de ventilation mécanique. La ventilation naturelle qui ne nécessite pas d'un coût d'investissement et d'exploitation sera suffisante.

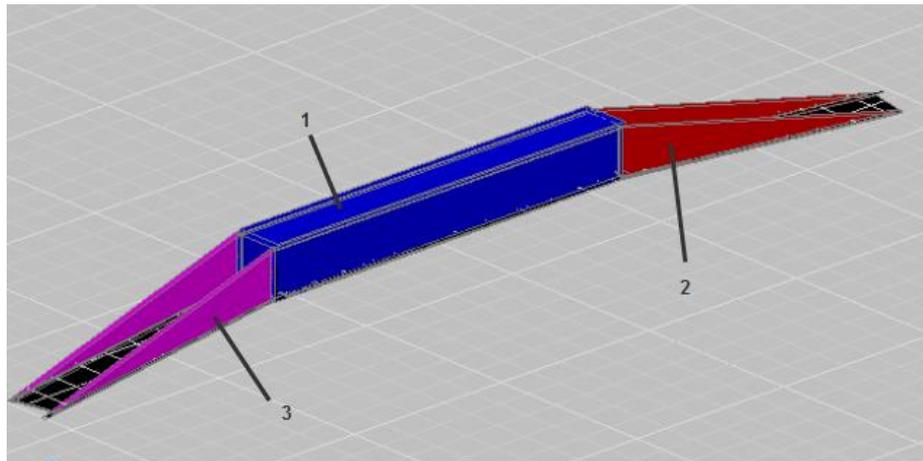
##### - l'alimentation électrique

Ne nécessitant pas la mise en place de système de ventilation mécanique, la livraison d'énergie est réalisée en basse tension.

##### - l'équipement et dispositif de sécurité

Les réseaux d'eau d'incendie de télévision d'appel d'urgence ainsi que la mise en place des niches de sécurité et des issues de secours ne sont valables que pour le tunnel long supérieur à 300m.

Ce qui nous donne donc le profil type du tunnel :



Légende:  
1 - Tunnel proprement dite  
2 - Rampe Nord  
3 - Rampe Sud

## 8.9. Les avantages après la mise en place du tunnel

Le tunnel permettra l'amélioration du transport dans cette zone. En effet le croisement des véhicules est supprimé. Cela contribuerait à la diminution de la congestion et des risques d'accident. Les voies dans le tunnel et au-dessus du tunnel sont totalement indépendantes. Donc les problèmes sur l'une de ces voies n'impacteraient pas l'autre.

La diminution de la congestion permet une économie de carburant et de temps et peut être évaluée.

### 8.9.1. Estimation de consommation de carburant après la mise en place du tunnel

Le nombre de véhicules moyen qui y circule dans tout le système pendant les heures de pointe est de 900 véhicules/h soit 3600 véhicules pour les 4 branchements.

Consommation moyenne de véhicule sans congestion 0.25 litres à 0.5 litres.

Consommation moyenne avec congestion 1 litre à 1.5 litres

**Tableau 8.1 Estimation par heures d'économie de carburant**

Consommation avant [litre]	Consommation après [litre]	Economie par véhicule [litre]	Nombre de véhicule [Unité]	Economie totale par heures de pointe [litre / heure de pointe]
1 – 1.5	0.25 – 0.5	0.5 – 1.25	3600	1800 - 4500

Economie minimale Min 1 – Max 2

Economie maximale Max 1 – Min 2

Total des heures de pointe 5.5h

Prix du carburant 3000Ar

Nombre de jours avec congestion 209 jours

**Tableau 8.2 Estimation annuelle de l'économie en termes de carburant**

Economie de carburant [Litres]	Total heures de point [Heures]	Nombre de jour avec congestion [jour]	Prix carburant [Ar]	En [milliard Ar]
1800	5.5	209	3000	6.207
4500				15,518

La mise en place du tunnel permet une économie de carburant de l'ordre de 6 milliards Ar à 15milliards Ar par an.

### 8.9.2. Estimation de gain de temps

Total heures de pointe 5.5h.

Nombre de personnes bloqués dans l'embouteillage.

**Tableau 8.3 Estimation de la valeur par heure de gain de temps**

Temps écouler avant [Min]	Temps écoulé après [Min]	Gain de temps [Min]	Gain de temps [heure]
45 – 90	5 – 10	35 - 85	0.58 – 1.42

Economie minimal Min 1 – Max 2.

Economie maximal Max 1 – Min 2.

3600 x nombre de passager (minimum 5) ce qui nous donne 18000 personnes

Salaire mensuel 200 milles [Ar].

Avec 8 h par jours et 20 jours par mois cette salaire équivaut à 1136[Ar/h]

Tableau 8.4 Estimation annuelle de la valeur du gain de temps

Gain de temps [Heures]	Salaire [Ar/h]	Nombre de personne	Total heure de point [Heures]	Nombre de jour avec congestion	En [milliard Ar]
0.58	1136	18000	5.5	209	13.633
1.42					33.377

Par rapport au gain de temps cet ouvrage permet une économie de 13 milliards Ar à 33 milliards Ar

Une estimation du gain total annuel avec la mise en place du tunnel est alors évaluée de 19 milliards Ar à 44 milliards Ar, une somme importante qui pourra justifier la prise en compte de cette nouvelle perspective qui est l'espace souterrain.

## CONCLUSION

Durant l'étude, on a pu identifier le problème de la circulation à Antananarivo à partir duquel on a déduit les principales causes et les conséquences.

L'utilisation de l'espace souterrain permettra la diminution de cette complication. Mais ne peut se faire qu'à l'aide d'une meilleure planification pour les travaux mais aussi pour une meilleure utilisation.

Dans ce présent mémoire, on a pu révéler les avantages de l'espace souterrain et dégager ses champs d'application ainsi que la méthode d'exécution la plus adaptée qui est la construction à ciel ouvert.

Le cas d'Antanimena nous prouve que la construction d'un tel ouvrage permettra la résolution du bouchon dans cette zone.

Il faut noter que pour une autre situation nous pourrions utiliser d'autres méthodes. Même dans les endroits où l'embouteillage ne fait pas encore rage, ce type d'ouvrage peut être efficace à long terme. Une synergie pourrait naître entre le nouveau projet actuel et les autres qui sont déjà en place (cas du By-pas).

L'espace souterrain est un domaine à ne pas négliger dans notre pays surtout pour le développement de l'urbanisme. Il offre de nombreux avantages notamment les avantages économiques. La construction du tunnel à Antanimena permettra d'économiser jusqu'à 19 à 44 milliards d'Ariary par an.

Si cette économie a été seulement calculée que sur la base d'Antanimena. Qu'en est-il pour tout le cas d'Antananarivo ? Des économies de carburant pourraient diminuer les déficits dus aux importations de carburant, et pèsera sur l'économie nationale.

Des groupes de recherche devraient naître pour y pencher sur la question avec le nombre d'ingénieurs et enseignants chercheurs que nous possédons.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] BERECHNUNGUND T. (2006) « Comportement, calcul et dimensionnement des tranchées couvertes » 232p
- [2] BERNARD C. , JULIEN P. (1974) « Pour une analyse des transports urbains, architecture d'aujourd'hui » 55p
- [3] BRICE C. , ROMAIN G. , KAROLOS P. , FADI H. « Techniques de construction de tunnels en milieu urbain » 50p
- [4] CETU (1990) « Dossier pilote des tunnels, Géométrie » 64p
- [5] CETU (1992) « Guide pour la conception générale du génie civil des TRANCHEES COUVERTES »
- [6] CETU (1998) « Dossier pilote des tunnels section 3 conception et dimensionnement » 45p
- [7] CETU (1998) « Dossier pilote des tunnels section 7 assainissement, drainage et réseaux divers » 17p
- [8] CETU (1998) « Profil en long dans les tunnels routiers » 22p
- [9] CETU (2003) « Dossier pilote des tunnels éclairage » 155p
- [10] CETU 1998 « Dossier pilote des tunnels section 4 procédés de creusement et de soutènement » 80p
- [11] CUA (2013) Journée de concertation « Initiatives Urbaines » - Quelle densité pour l'agglomération d'Antananarivo 55p
- [12] DUFFAUT P. (2007) –« L'urbanisme souterrain in Techniques de l'ingénieur, dossiers C3061 et 3062. » 125p
- [13] DUFFAUT P. (2008) – L'espace souterrain, un patrimoine à valoriser - Revue Géosciences n° 7/8, 235p
- [14] FARRAY D. « LA VILLE, PROBLEMATIQUE DE L ' ESPACE SOUTERRAIN » 25p
- [15] GERONDEAU C, (1969) les transports urbains, que sais-je, 65p
- [16] HELLUIN J. (2013) « les enjeux de la mobilité urbaine à Antananarivo, planification stratégique en matière de gestion des espaces vert et agricole de la ville d'Antananarivo » 86p
- [17] HENRY A. (2007) « Conception d'une nouvelle Méthode de soutènement descendierie de saint martin la porte » 95p
- [18] HOUPIN S. (2010) « Mobilité urbaine et développement durable en méditerranée : diagnostic prospectif régional » 68p
- [19] INSTITUT DES METIERS DE LA VILLE D'ANTANANARIVO (2010)

- « Programme d'Amélioration de la Mobilité Urbaine » 127p
- [20] KOLOAINA (2013) « Accompagnement familial dynamique des familles démunies de la basse ville d'Antananarivo » 116p
- [21] LANNOY P. , TELLIER C. « Les voies du sous-sol configurations sociotechniques et évolutions historiques des infrastructures souterraines de transport ferré à Bruxelles » 15p
- [22] LES EDITIONS NEOPOL, (2010) «Transport 2000 Québec .Le petit futé « Guide de l'usager : Se déplacer autrement au Québec » 101p,
- [24] MADIO (1999): « Trajectoires biographiques dans l'agglomération d'Antananarivo. Emploi, famille, logement. Projet MADIO, Antananarivo », 75 p.
- [25] MANDANIRINA L. (2015) « Evaluation de la potentialité en eau souterraine de la plaine alluviale de l'Ikopa pour l'alimentation en eau potable de la ville d'Antananarivo et ses périphéries » 71p
- [26] MARCHOEBLICH J. (1983) « L'organisation du relief dans les environs de Tananarivo » 29p
- [27] MARGUERAT Y. « Antananarivo et ses marginalités sociales » 59p
- [28] MARTIN F. (2012) « Mécanique des Roches et Travaux Souterrains » 88p
- [29] MINISTERE DE L'ELEVAGE ET DE LA CULTURE –« Monographie de la région d'Antananarivo » 139p juin 2003
- [30] MINISTERE DES TRAVAUX PUBLICS, DES TRANSPORTS ET DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE (2004) « Plan national de transport (2004-2020) » 25p
- [31] NOIZET, G. (1969). « Reconnaissance pour le projet d'aménagement de la Plaine d'Antananarivo. Service Géologique Ampandrianomby ». 99p
- [32] RAKOTONDRAIBE J. (2005), « Les huit (8) zones Hydrogéologiques et principales nappes de Madagascar, 1974, mise à jour 2005 ». 7p
- [33] RAKOTONDRAOMPIANA S. (2001) « Dynamique actuelle de la croûte malgache a partir de données géophysiques et morphologiques » 7p
- [34] RALAIMARO J. (2004) « Compréhension de la structure et du fonctionnement des aquifères par diverses approches scientifiques, en vue de l'alimentation en eau potable, en zone de socle altéré des hautes terres centrales et en zone sédimentaire du sud-ouest de Madagascar » 181p
- [35] RAMAMONJISOA J. (1983) « Extension urbaine de Tananarive » 75p
- [36] RIES R. « Transports urbains : quelles politiques pour demain ? » 77p
- [37] SOCIETE DE CALCUL MATHEMATIQUE SA (2011) « Le métro du "Grand Paris » 60p
- [38] VERIN P. : « Madagascar. Paris, Karthala, collection "Méridiens", 2000, » 270 p.

- [39] ZAFILAHY Y. V. (2014) « Cours Ouvrage souterraine Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo »

## WEBOGRAPHIE

- [40] <http://www.cnrtl.fr/definition/>
- [41] <http://www.dictionnaire.fr/definition/transport/>
- [42]...<http://www.histoire-pour-tous.fr/dossiers/89-histoire-des-sciences-et-des-techniques>, Date de lecture 10 juin 2014
- [43] <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/transport/>
- [44] <http://www.linternaute.com/actualite/monde/classement/le-classement-des-ville-les-plus-peuplees-du-monde/>, Date de lecture 01 février 2015
- [45] [http://www.toolito.com/voyage/Les 10 métros les plus fréquentés du monde](http://www.toolito.com/voyage/Les-10-metros-les-plus-frequentes-du-monde), Date de lecture 29 janvier 2015

**ANNEXE 1 :**  
**TABLEAU DES CONFERENCES INTERNATIONALES DE**  
**L'ACUUS CONCERNANT LES AMENAGEMENTS ET LES**  
**ESPACES EN SOUTERRAIN**

Ordre	Année	Thème	Lieu
Première	1983	Energy efficient buildings with earth shelter protection	Sydney, Australie
Deuxième	1986	Advances in geotechnical design	Minneapolis, USA
Troisième	1988	New developments of underground space use	Shanghai
Quatrième	1991	Urban Underground Utilization '91	Tokyo
Cinquième	1992	5th International Conference on Underground Space and Earth Sheltered structures	Delft
Sixième	1995	Espace et Urbanisme souterrains	Paris
Septième	1997	Espace souterrain: villes intérieures de demain	Montréal
Huitième	1999	Agenda and Prospect of the Underground Space for the Turn of the Century	Xi'an, Chine
Neuvième	2002	Urban Underground Space: A Resource for Cities	Turin, Italie
Dixième	2005	Underground Space: Economy and Environment	Moscou, Russie
Onzième	2007	Underground Space: Expanding the Frontiers	Athènes, Grèce
Douzième	2009	Using the Underground of Cities: for a Harmonious and Sustainable Urban Environment	Shenzhen, Chine

Créé par Maxime Daoust-Hébert, 2011. Source: ACUUS (2008), Espace Souterrain (2009b)

## ANNEXE 2 :

# LISTE DE QUELQUES VILLES ET PAYS QUI SE SONT MIS A L'EXPLOITATION DE LEUR SOUS-SOL

« sources : Différentes Dimensions pour un Développement urbain Durable et Désirable  
Décliné Dans une Dynamique Dessus / Dessous (10D) »

La **Scandinavie** a joué un rôle pionnier, d'abord en Norvège (entrepôts frigorifiques, piscines et salles de sport souterrains), puis en Suède (stations d'épuration, début de la planification en liaison avec le métro). Enfin, en Finlande, Helsinki présente de nombreux ouvrages souterrains dont des galeries techniques de grande section, et a mis en place un plan directeur de l'occupation de l'espace souterrain ayant force exécutoire en matière de planification urbaine.

**Montréal**, pour des raisons au départ climatique, a créé des transports collectifs, des centres commerciaux et culturels, plébiscités par les habitants. Les stations de métro y jouent le rôle d'espaces publics en sous-sol et des verrières zénithales et des patios apportent la lumière du jour.

Plusieurs villes du **Japon** ont construit sous terre par manque de place et à cause de la saturation des transports. A remarquer les réalisations semi-enterrées réalisées sur l'île musée Naoshima en symbiose avec la nature.

**Monaco**, pour des raisons de manque de place et d'engorgement du trafic, a innové par des mises en souterrain massives, concourant à des récupérations d'espace en surface, comprenant voies ferrées et gare, salles de congrès, d'exposition, opéra, entrepôts, Parkings à proximité de moyens de transport collectifs, Unité de traitement des eaux usées avec unité d'incinération, Collecte souterraine pneumatique des ordures ménagères d'un quartier, Galeries techniques multi-usages, Centre de distribution urbaine de matériaux et de marchandises, Développement de la circulation piétonne mécanisée, pour mieux gérer les déplacements, réduire les circulations de transit en surface et désenclaver la Principauté.

À **Arnhem** aux **Pays-bas**, l'utilisation de l'espace souterrain est promue par laMunicipalité et toutes les parties impliquées dans la planification urbaine, publiques ou privées, doivent désormais envisager l'utilisation de l'espace souterrain dans le cadre de leur projet.

**Zwolle**, toujours aux **Pays-Bas**, a adopté en 2007, un document prospectif « Regardssur le sous-sol de Zwolle » présentant une analyse complète de l'espace souterrain de la ville et identifiant quatre zones dévolues à des usages différents du sous-sol.

**Taiwan** présente un cadre juridique spécifique pour les aménagements souterrains, le plus évolué après celui du Japon.

**Séoul** a mis en souterrain dans le campus de l'Université féminine Ewha, deux bâtiments éclairés par la lumière naturelle via une fosse, à la place d'un ancien parking transformé à l'occasion en jardin.

**Pékin**, avec le quartier de Zhang Guanune offre de 500 000 m<sup>2</sup> sur deux niveaux de soussols, auxquels s'ajoute un troisième niveau de galeries techniques.

**Qianjiang** a créé 2 km<sup>2</sup> d'espaces publics sur 4 km<sup>2</sup> de sous-sol.

À **Shanghai**, l'espace souterrain est une des premières priorités.

**Berlin** a construit un vélodrome et une piscine enterrée à 18 mètres de profondeur, éclairés par la lumière naturelle, au pied d'une austère cité dortoir, pour les fondre dans un jardin de 10 hectares planté de pommiers, de plain-pied avec le quartier.

**Moscou** a développé un ensemble commercial auprès d'une station de métro et envisage de multiplier les installations analogues.

**Sofia**, en **Bulgarie** a conçu en 2009 un quartier mixte de 65 ha, incluant plusieurs niveaux souterrains utilisant la topographie naturelle permettant ainsi une mise en valeur du paysage.

**Issy-les-Moulineaux** dispose d'une usine souterraine de valorisation des déchets et d'évacuation par barges sur Seine.

- **Nantes** projette l'enfouissement de l'extension du musée archéologique Thomas Dobrée, pour préserver le parc actuel, avec un éclairage assuré par la lumière naturelle via une verrière plate traversée par les allées du parc.

## **ANNEXE 3 : PROPRIETE DU FOND D'APRES QUELQUES PAYS**

### **Turquie**

La propriété du fond s'étend jusqu'au centre de la Terre sans restriction ; où l'état doit exproprier les propriétaires pour creuser des tunnels ;

### **Allemagne ou de l'Italie**

La propriété du fond s'étend jusqu'au centre de la Terre avec restrictions ; empêchant les propriétaires de s'opposer à une utilisation de leur sous-terrain à une profondeur où ils n'ont aucun intérêt particulier

### **Japon**

La propriété du fond s'étend jusqu'à une limite légalement où la limite est à quarante mètres auxquels s'ajoutent dix mètres pour les superstructures nécessaires ;

### **Chine ou à Cuba**

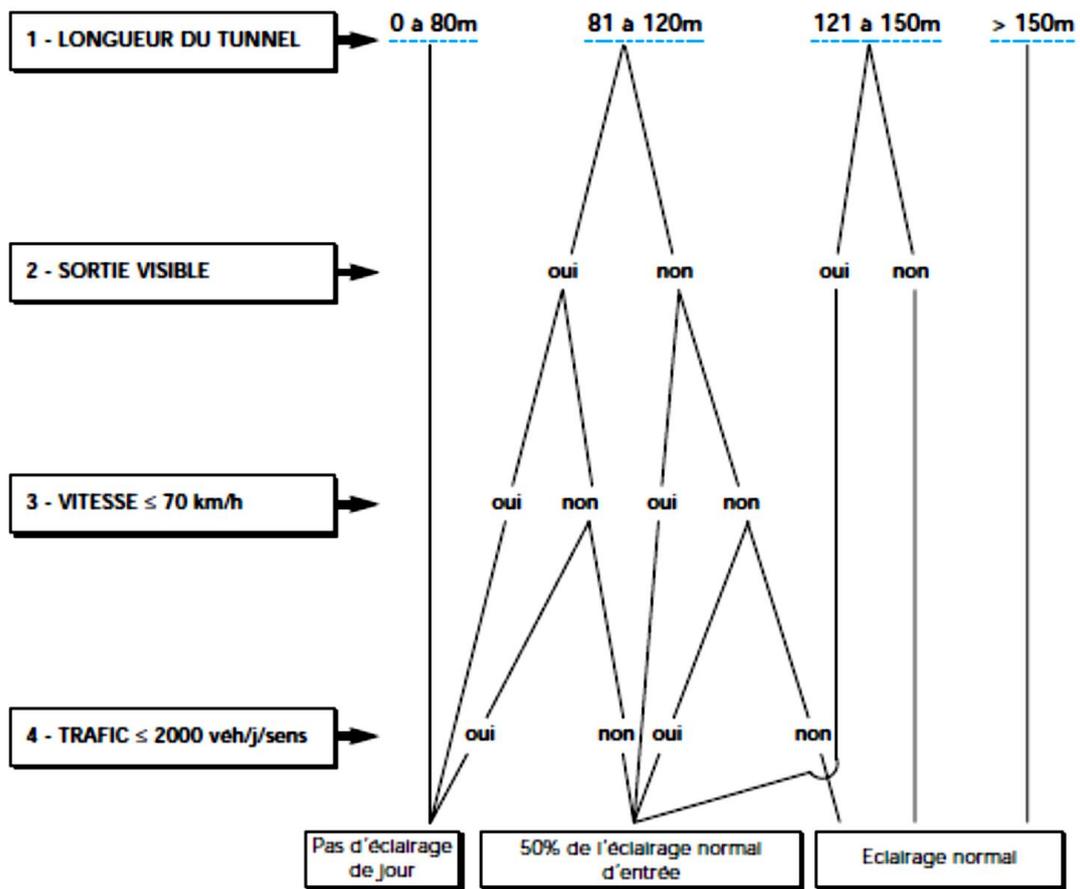
La propriété privée n'existe pas. En général, l'état donne des concessions pour les terrains et leur sous-terrain.

## ANNEXE 4 : LISTE DES VILLES POSSEDANT UN METRO SOUTERRAIN

Villes possédant un métro souterrain					
<b>EUROPE</b>					
Amsterdam	Barcelone	Berlin	Bruxelles	Bucarest	Budapest
Dnipropetrovsk	Francfort	Gênes	Glasgow	Hambourg	Helsinki
Istanbul	Izmir	Lille	Lisbonne	Londres	Madrid
Marseille	Minsk	Moscou	Munich	Naples	Nijni Novgorod
Nuremberg	Paris	Prague	Rennes	Rome	Saint-Pétersbourg
Samara	Serfaus	Séville	Sofia	Stockholm	Toulouse
Turin	Varsovie				
<b>ASIE</b>					
Bakou	Bangkok	Busan	Calcutta	Daegu	Daejeon
Delhi	Erevan	Fukuoka	Guangzhou	Gwangju	Haïfa
Hong Kong	Iekaterinbourg	Incheon	Kôbe	Kyôto	Nagoya
Novossibirsk	Ôsaka	Pékin	Pyongyang	Sapporo	Sendai
Tachkent	Taipei	Tbilissi	Téhéran	Tianjin	Tokyo
Yokohama					
<b>AMÉRIQUE</b>					
Boston	Buenos Aires	Caracas	Mexico	Montréal	New York
Philadelphie	Rio de Janeiro	San Francisco	Santiago	São Paulo	Toronto
Washington					
<b>AFRIQUE</b>					
Le Caire					
<b>OCÉANIE</b>					
Melbourne					

Créé par Maxime Daoust-Hébert, 2011. Source: (Barles, 2006 : 1-2; Bergman, 1986 : 118; Duffaut, 2005 : 277; Fisher, 1978 : 28; ITA, 1998 : 52;

## ANNEXE 5 : ARBRE DE DECISION SUR LE CHOIX DE L'ECLAIRAGE PAR RAPPORT A LA LONGUEUR DU TUNNEL ET VITESSE D'APPROCHE



**ANNEXE 6:**  
**NIVEAU DE LUMINANCE PAR VITESSE D'APPROCHE ET**  
**LONGUEUR DE RENFORCEMENT**

Niveau des voiles	Vitesse d'approche  (km/h)	Niveau de luminance en entrée (partie la plus éclairée) avec système :		Longueur du renforcement pour atteindre :		
		symétrique (cd/m <sup>2</sup> )	contre-flux (cd/m <sup>2</sup> )	8 cd/m <sup>2</sup> (m)	5 cd/m <sup>2</sup> (m)	2 cd/m <sup>2</sup> (m)
<b>Fort</b>	130	-	(440)	600	660	790
	110	(550)	210	360	410	640
	90	(280)	120	300	350	510
	70	150	90	240	290	350
	50	70	-	150	180	270
<b>Moyen</b>	130	-	(290)	550	620	740
	110	(360)	140	300	350	590
	90	180	80	250	300	490
	70	100	60	200	250	350
	50	50	-	120	150	270
<b>Faible</b>	130	-	140	470	530	670
	110	180	70	230	260	420
	90	90	40	170	220	390
	70	50	30	140	180	340
	50	25	-	80	100	220

# ANNEXE 7 : RESULTATS SONDAGE ET FORAGE POUR LA CONNAISSANCE GEOLOGIQUE DES ALLUVIONS DE LA PLAINE D'ANTANANARIVO FAIT EN 1973

## SECTEUR 1

0,00 - 0,50	terre végétale
0,50 - 5,60	tourbe
5,60 - 6,15	sable moyen
6,15 - 6,40	argile
6,40 - 7,00	sable fin à très fins argileuse
7,00 - 7,60	argile compactée altérée
7,60 - 8,55	sable fin à grossier peu argileuse
8,55 - 8,80	sable moyen à grossier peu argileux
8,80 - 9,00	sable fin très argileuse
9,00 - 9,80	sable grossier à moyen
9,80 - 10,30	sable moyen pore
10,30 - 12,50	argile tourbeuse (bois)
12,50 - 12,80	sable moyen propre
12,80 - 13,30	sable moyen à grossier propre
13,30 - 13,80	sable moyen argileux
13,80 - 14,10	sable moyen à grossier avec boules d'argile
14,10 - 14,25	sable grossier à moyen
14,25 - 14,75	argile compacte
14,75 - 15,00	sable moyen à grossier
15,00 - 15,30	sable grossier à moyen argileux

## Secteur 2

0 - 1	terre végétale
1 - 1,3	limon légèrement sableux noirâtre
1,3 - 1,5	sable fin avec quelques boules argilo-sableuses
1,5 - 1,8	passage argilo-limoneux grisâtre, peu micacé
1,8 - 2,3	sable roux fin à moyen, propre
2,3 - 3,05	tourbe avec présence de débris végétaux
3,05- 3,31	limon peu micacé fin avec présence débris végétaux
3,3 - 4,5	tourbe à débris végétaux
4,5 - 4,7	sable fin très argileuse
4,7 - 5,7	sable fin très argileuse

5,7 - 6,0	argile tourbeuse grise
6,0 - 6,75	sable fin peu argileuse
6,75- 7,0	sable moyen à grossier avec quelques boules d'argile
7,00- 7,8	argile plastique grise claire peu sableuse
7,8 - 9,35	sable fin peu argileuse
9,35- 10,75	sable fin à moyen peu argileux
10,75- 13,10	sable moyen à grossier propre
13,10- 14,15	sable grossier propre
14,15- 15,35	sable grossier à gravier peu argileux
15,35- 15,80	sable très grossier à gravier avec des boules d'argile
15,80- 16,20	sable fin propre
16,20- 17,00	sable très grossier à gravier1 propre
17,00- 17,20	sable très grossier à gravier et argile
17,20- 17,30	argile plastique grise peu sableuse
17,30- 17,60	sable fin argileuse
17,60- 18,00	argile plastique grise
18,00- 18,30	sable moyen à grossier argileux
18,30- 19,20	sable moyen à grossier argileux
19,20- 19,70	sable moyen à grossier très peu argileux
19,70- 20,15	sable moyen à grossier argileux, avec boules d'argile gris clair
20,15- 20,45	sable moyen à grossier propre
20,45- 20,55	sable fin à moyen propre
20,55- 21,07	zone d'altération probable : sable fin argileux verdâtre
21,07- 22,15	sable fin avec des cristaux noirs
22,15- 22,85	sable moyen à minéraux noirs et micacé
22,85	arrêt du sondage.

### Secteur 3

0,	
0- 4,5	limons + tourbes
4,	
5- 8	sable argileux
8	
- 11	sable fin
1	
1- 13	sable argileux
1	
3- 21,5	sable moyen à grossier
2	
1,5- 25,5	argile

2 5,5- 31,5	sable moyen légèrement argileux
3 2,5	arrêt du forage dans zone d'altération

Secteur 4/5

0,00 - 0,50	Humus sableux
0,50 - 0,95	argile limoneuse grise, peu sableuse
0,95 - 2,2	tourbe
2,25 - 2,40	argile sableuse grise
2,40 - 3,20	sable moyen très argileux
3,20 - 4,00	sable fin à moyen argileux
4,00 - 4,40	sable fin à moyen propre
4,40 - 5,75	sable moyen très argileux
5,75 - 6,05	argile plastique grise
6,05 - 6,45	sable moyen très argileux
6,45 - 7,15	sable fin à moyen peu argileux
7,15 - 7,70	sable fin à moyen argileux
7,70 - 8,35	sable moyen propre
8,35 - 8,90	sable fin à moyen propre
8,90 - 10,50	sable moyen argileux
10,50 - 11,25	sable moyen à grossier propre
11,25 - 12,20	sable moyen propre
12,20 - 12,55	sable moyen argileux
12,55 - 13,00	sable fin à moyen propre
13,00 - 13,40	sable moyen propre
13,40 - 14,00	sable moyen à grossier propre
14,00 - 14,80	sable grossier propre
14,80 - 15,50	sable moyen à grossier argileux
15,50 - 15,80	argile très plastique grise
15,80 - 17,00	zone d'altération (argile).

# TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS

LISTE DES FIGURES

LISTE DES PHOTOS

LISTE DES CARTES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ABREVIATIONS

<i>INTRODUCTION</i> .....	1
PARTIE 1 PRESENTATION DU CADRE D'ETUDE .....	2
Chapitre 1. GENERALITES SUR LE TRANSPORT URBAIN .....	3
1.1. Définition .....	3
1.2. Différents modes de transport .....	3
1.2.1. Transport terrestre .....	3
1.2.2. Transport Maritime et fluvial .....	6
1.2.3. Transport aérien.....	6
Chapitre 2. PRESENTATION DU SITE « ANTANANARIVO ».....	8
2.1. Milieu physique .....	8
2.1.1. Géographie .....	8
2.1.2. Relief.....	8
2.1.3. Géologie .....	10
2.1.4. Climat.....	13
2.1.5. Hydrologie.....	13
2.2. Physiologie et évolution de la ville .....	16
2.3. Milieu humain.....	18
2.4. Mobilité à Antananarivo .....	18
2.4.1. Voirie .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
2.4.2. Moyens de communication les plus utilisés par la population d'Antananarivo et de ses environs .....	19
2.4.3. Parc automobile en circulation .....	19
Chapitre 3. URBANISME SOUTERRAIN.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
3.1. Histoire de l'urbanisme souterrain .....	22
3.2. Associations internationales .....	23
3.3. Différents champs d'application des ouvrages souterrains .....	24

3.3.1. Usage du sous-sol.....	24
3.3.2. Forme d'usage du sous-sol .....	25
3.3.3. Infrastructures de transports souterrains .....	25
<b>PARTIE 2 ANALYSE DE LA PROBLEMATIQUE DU TRANSPORT ET PROPOSITIONS DES SOLUTIONS .....</b>	<b>27</b>
<b>Chapitre 4. TRAVAUX DE TERRAIN D'ANALYSE DES PROBLEMES D'EMBOUEILLAGE.....</b>	<b>28</b>
4.1. Identification du dysfonctionnement .....	28
4.2. Causes de l'embouteillage à Antananarivo .....	37
4.3 Impacts des embouteillages.....	46
4.3.1 Impact économique.....	46
4.3.2 Impact social.....	46
4.3.3 Coût environnemental.....	47
<b>Chapitre 5. CHOIX DES SOLUTIONS POSSIBLES.....</b>	<b>48</b>
5.1. Mise en valeur des autres moyens de communication.....	48
5.2. Création de nouvelles infrastructures .....	49
5.3. Utilisation de la troisième dimension .....	49
5.4. Synergie des solutions.....	49
5.5. Solution souterraine .....	49
5.6. Quelques avantages de construire en souterrain .....	50
5.6.1. Raison d'occupation du sol et d'implantation.....	50
5.6.2. Raison de préservation de l'environnement.....	50
5.6.3. Raisons sociales .....	51
5.6.4. Raison économique.....	51
5.6.5. Progrès technique .....	52
5.7. Préalable et défis pour la solution souterraine .....	53
<b>PARTIE 3 OPPORTUNITE D'IMPLANTATION DE TUNNEL A ANTANANARIVO .....</b>	<b>54</b>
<b>Chapitre 6. GEOMETRIE ET SECURITE DES TUNNELS.....</b>	<b>55</b>
6.1. Géométrie.....	55
6.1.1. Les formes .....	55
6.1.2. Profils .....	56
6.2. Dispositions de sécurité et équipement dans les tunnels .....	62
6.2.1. Dispositifs de sécurité.....	62

6.2.2. Dispositifs d'assainissement et ouvrage de drainage.....	63
6.2.3. Equipement.....	64
6.3. Dispositions liées à la présence de nappes souterraines .....	67
6.4. Etude d'anticipation pour le projet de construction.....	68
Chapitre 7. PROCEDE D'EXECUTION ET CHOIX DE METHODE DE CREUSEMENT .....	69
7.1. Procédé d'exécution.....	69
7.1.1. Construction souterraine.....	69
7.1.2. Construction à ciel ouvert .....	69
7.2. Choix de la méthode .....	70
7.3. Tunnels construits à ciel ouvert.....	71
Chapitre 8. PROJET D'ANTANIMENA.....	77
8.1. Identification de la zone d'étude .....	77
8.1. Caractéristiques du trafic.....	78
8.2. Voirie dans la zone d'étude .....	79
8.3. Infrastructures dans la zone d'étude.....	79
8.4. Profil du tunnel.....	81
8.4.1. Largeur du profil du tunnel en travers.....	81
8.4.1.1. Calcul de l'ouvrage souterrain .....	81
8.4.2. Profil en long.....	86
8.5. Plan de masse.....	91
8.6. Dispositions pendant les travaux et impact après la mise en place du tunnel 92	
8.6.1. Dispositions pendant les travaux.....	92
8.6.2. Impact sur les infrastructures.....	92
8.7. Travaux de construction .....	93
8.7.1. Choix de la méthode de creusement .....	93
8.7.2. Les éléments du l'ouvrage.....	94
8.7.3. Séquencement des travaux .....	96
8.8. Les avantages après la mise du tunnel.....	104
<i>CONCLUSION</i> .....	107
BIBLIOGRAPHIE .....	i
WEBOGRAPHIE.....	iii
ANNEXES .....	iv

**Intitulé du mémoire :**  
**« Utilisation de l'espace souterrain pour l'amélioration du  
transport à Antananarivo »**

Nombres de pages : 107  
Nombres de tableaux : 18  
Nombre de figures : 37  
Nombre de photos : 10  
Nombre des annexes : 7

Le présent mémoire a pour objet d'apporter la proposition d'utilisation de l'espace souterrain face au problème réel d'embouteillage à Antananarivo.

Les avantages apportés ainsi que les diverses méthodes et techniques pour la construction garantissent la faisabilité du projet.

Mots clés :

*Espace souterrain, Tranchée couverte, Tunnels, Urbanisme souterrain.*

The present memory aims to bring solutions related to use underground space in order to tackle the urban transport issue in Antananarivo.

The advantages brought as well as the various methods and technique for the construction guarantee the feasibility of the project.

Keywords:

*Underground space, Underground urbanism, Cut and cover, Tunnel*

**Auteur :**

ANDRIANOME HARISOA Andritiana

Tel:+261336739274

Email : Hariaandme@gmail.com

**Encadreur pédagogique :**

Docteur ZAFILAHY Ying Vah