

UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANS LACS
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES APPLIQUEES



B.P. : 368 Goma
Département de Génie Civil

**ETUDE EN VUE DU DIMENSIONNEMENT D'UN
TUNNEL IMMERGE RELIANT LA PROVINCE
DU NORD KIVU A CELLE DU SUD KIVU VIA
LA LOCALITE DE NZULO**

Par MUHINDO WAKANDU Joshua
Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur Civil
Option : Structures et Ouvrages d'Arts

Directeur : Prof. Dr. Ir. François NGAPGUE

Encadreur : Msc. Ir. Ernestine NDEZE

Année Académique : 2020 - 2021

EPIGRAPHE

"In order successfully to conceive and to plan a structure or a building of any kind, it is necessary to investigate and to know well its reasons for existence, ..."

Edouardo Torroja, Philosophy of Structures

DEDICACE

A mes chers parents,

WAKANDU LUMIA Germain

KYEYA MAVIRA Dama

Joshua MUHINDO WAKANDU

REMERCIEMENTS

Ce travail, fruit d'efforts et sacrifices de plusieurs, ce serait une ingratitude de ne pas reconnaître tous leurs sacrifices qui ont conduits à l'aboutissement de celui-ci.

A l'Eternel Dieu, en qui réside toutes grâces excellentes, pour ses bontés tous les jours de notre vie.

Nous adressons nos remerciements à notre Directeur, le Professeur François NGAPGUE, pour la direction de ce travail ; à notre Encadreur, le Msc Ir Nigene ERNESTINE, qui nous a encadré dans la réalisation de ce travail.

Nous remercions nos chers parents, WAKANDU LUMIA Germain et MAVIRA KYEYA Dama, pour tous les sacrifices et efforts consentis.

A notre tante, Me Nelly Kyeya et toute notre famille, et à tous ceux qui ont participé, de près ou de loin à notre formation.

A tous nos camarades de promotion, pour l'amitié et la bonne collaboration.

Que Dieu vous rétribue à chacun selon les désirs de son cœur.

Joshua MUHINDO WAKANDU

RESUME

Les tunnels immergés offrent une solution idéale dès lors qu'il convient de traverser des voies d'eau au vu de leur vitesse de construction, leur facilité d'exécution, leur bonne résistance à l'activité sismique, ainsi que leur rentabilité pour les grandes largeurs ayant des nombreuses voies de communication (rail, routes, etc.). Ce travail a fait une étude de faisabilité de conception et de dimensionnement d'un tunnel immergé à Nzulo, qui reliera la province du Nord-Kivu à celle du Sud-Kivu. Implanté à 17 m de profondeur, le tunnel immergé conçu favorisera et permettra l'accroissement des échanges économiques entre les 2 provinces. Les calculs de dimensionnement ont été faits par la méthode de rotation des nœuds. De forme rectangulaire, le tunnel immergé conçu à Nzulo a une longueur de 432 m sur un total de 620 m de tunnel, est constitué de 2 caissons principaux de 130 m de long chacun et 3 caissons de 120 m chacun, de pente longitudinale 5%, et doté d'une ventilation naturelle. Le profil en travers est constitué de 2 voies de circulation de 3 m de largeur chacun, suivi d'un trottoir pour piétons du côté gauche de 1 m de largeur. Une hauteur libre de 5 m qui offrira la possibilité de placer les équipements de signalisation et de sécurité. Le tunnel immergé à Nzulo permet de gagner 25 minutes, car réduit le trajet entre Goma et Minova. Calculées grâce au tableur Excel et suivant la norme BAEL 91 révisées 99, les sections des dalles et voiles ont donné une épaisseur de 60 cm, et vérifient le principe d'Archimède car le tunnel ne flottera pas. Le coût du béton armé a été évalué à 12 060 000 \$. Les résultats conduisent à soutenir l'implantation d'un tunnel immergé à Nzulo. Par ailleurs, les futures recherches peuvent être orientés vers une étude en profondeur des conditions géotechniques, afin de cerner tous les aspects importants liés à la construction du tunnel immergé à Nzulo.

ABSTRACT

Immersed tunnels offer an ideal solution when it comes to crossing waterways due to their speed of construction, easy execution, good resistance to seismic activity, as well as their cost-effectiveness for large widths with numerous communication routes (rail, roads, etc.). This work made a feasibility study of design and dimensions. Located at a depth of 17 m, the designed immersed tunnel will promote and allow the increase of the economic exchanges between the 2 provinces. The dimensioning calculations were made using the node rotation method. The immersed tunnel designed at Nzulo has a rectangular shape, a length of 432 m out of a total of 620 m of tunnel, is made up of 2 main caissons of 130 m long each and 3 caissons of 120 m each, with a longitudinal slope of 5%, and is equipped with a natural ventilation. The cross-section consists of 2 traffic lanes each 3 m wide, followed by a 1 m wide pedestrian sidewalk on the left side. A clearance height of 5 m will offer the possibility to place signaling and safety equipment. The immersed tunnel at Nzulo will save 25 minutes, as it reduces the travel time between Goma and Minova. Calculated with Excel software and following the BAEL 91 revised 99 standard, the sections of the slabs and walls have given a thickness of 60 cm, and verify the Archimedes' principle because the tunnel will not float. The cost of the reinforced concrete was estimated at \$12,060,000. The results lead to support the implementation of an immersed tunnel at Nzulo. Furthermore, future research can be directed towards an in-depth study of the geotechnical conditions in order to identify all the important aspects related to the construction of the immersed tunnel at Nzulo.

TABLE DES MATIERES

EPIGRAPHE.....	i
DEDICACE.....	ii
REMERCIEMENTS.....	iii
RESUME	iv
ABSTRACT.....	v
TABLE DES MATIERES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTE DES FIGURES	x
INTRODUCTION GENERALE	xii
1. Contexte.....	xii
2. Etat du problème.....	xiii
3. Objectifs.....	xiv
4. Méthodologie.....	xiv
5. Structure du mémoire/ Subdivision du travail.....	xiv
CHAPITRE PREMIER : GENERALITES SUR LES TUNNELS IMMERGES.....	1
1.1. Historique et évolution des tunnels immergés	1
1.2. Avancées et Limites des tunnels immergés	6
1.3. Conception et Technique de construction des tunnels immergés.....	7
1.3.1. Conception générale.....	7
1.3.2. Structure Transversale	9
1.3.3. Structure longitudinale.....	10
1.4. Procédés de construction.....	10
1.4.1. Technique de construction des caissons préfabriqués	11
1.4.2. Technique de mise en place des tunnels	12
1.5. Matériaux de construction	13
1.5.1. Tunnel immergé en Acier.....	14
1.5.2. Tunnel immergé en Béton.....	14

1.6.	Conclusion partielle	16
CHAPITRE DEUXIEME : METHODOLOGIE.....		17
2.1.	Introduction.....	17
2.2.	Présentation du site	17
2.3.	Localisation du tunnel.....	17
2.4.	Conception de l'ouvrage.....	18
2.4.1.	L'alignement plan des éléments du tunnel.....	19
2.4.2.	La conception transversale	19
2.4.3.	La ventilation.....	20
2.4.4.	Les évacuations.....	21
2.4.5.	La conception longitudinale	21
2.5.	Prédimensionnement.....	22
2.5.1.	Les dalles.....	22
2.5.2.	Les voiles	22
2.6.	Hypothèses de calculs	23
2.6.1.	Règlements.....	23
2.6.2.	Matériaux	23
2.7.	Schéma statique de l'ouvrage.....	24
2.8.	Méthode de calcul.....	25
2.9.	Calculs des sollicitations	26
2.9.1.	Charges permanentes.....	26
2.9.2.	Moments d'encastremets.....	27
2.9.3.	Moments de flexion.....	28
2.9.4.	Réactions aux appuis	29
2.10.	Poussée d'archimède	30
2.11.	Conclusion partielle	30
CHAPITRE TROISIEME : PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS.....		32
3.1.	Introduction.....	32
3.2.	Conditions géologiques.....	33

3.2.1.	Informations géotechniques disponibles.....	33
3.2.2.	Profils du site.....	34
3.3.	Choix du tracé	35
3.4.	Caractéristiques du tunnel.....	36
3.4.1.	Implantation du tunnel.....	36
3.4.2.	Profondeur du lac	37
3.4.3.	Conception Transversale.....	37
3.4.4.	Conception longitudinale	39
3.4.5.	Ventilation.....	39
3.5.	Approche de dimensionnement.....	40
3.5.1.	Calculs des sollicitations.....	40
3.5.2.	Calculs des sections d'armatures	45
3.5.3.	Evaluation des coûts.....	51
3.6.	Vérification de la condition de flottaison	51
3.7.	Conclusion Partielle.....	52
	CONCLUSION GENERALE	53
	BIBLIOGRAPHIE.....	55
	ANNEXES.....	58

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Combinaisons aux Etats Limites	30
Tableau 3-1 : Analyse comparative du choix du tracé	35
Tableau 3-2 : Valeurs de pré dimensionnement	37
Tableau 3-3 : Caractéristiques géométriques du tunnel immergé	38
Tableau 3-4 : Tableau de synthèse des dispositions techniques de ventilation des tunnels	40
Tableau 3-5 : Données d'entrée.....	40
Tableau 3-6 : Récapitulatifs des sollicitations.....	44
Tableau 3-7 : Récapitulatif des armatures	50
Tableau 3-8 : Evaluation des coûts.....	51

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Vue en plan du Tunnel Immergé de La Havane	3
Figure 1-2 : Vue du Pont Tunnel immergé Louis-Hyppolyte	4
Figure 1-3 : Construction en voie d'achèvement d'un caisson en préfabriqué	4
Figure 1-4 : Tunnel Immergé D'Øresund : Aboutissement du tunnel immergé et pont vers la Suède	5
Figure 1-5 : Vue sur le Tunnel Immergé de Thalys aux Pays Bas	6
Figure 1-6 : L'alignement vertical du tunnel immergé se composant de 33 éléments de tunnel dans le projet HZMB Island-tunnel.....	8
Figure 1-7 : Illustration montrant le principe de l'alignement vertical	8
Figure 1-8 : Coffrage, Ferrailage et coulage des segments d'un élément de tunnel. [11].....	11
Figure 1-9 : Alignement et jointement des segments. [11]	11
Figure 1-10 : Opération de dragage du lit d'un tunnel.....	12
Figure 1-11 : Opération de dragage. [9]	12
Figure 1-12 : Mise en place du caisson de tunnel	13
Figure 1-13 : Mise en place du caisson de tunnel. [9].....	13
Figure 1-15 : Remblayage de la tranchée	13
Figure 1-14 : Enterrement complète de la tranchée.....	13
Figure 2-1 : Localisation Tunnel Immergé en rouge. Crédit Photo Google Earth.....	18
Figure 2-2 : (a) Ventilation longitudinale, (b) ventilation semi transversale, (c) ventilation transversale	20
Figure 2-3 : (a) Trafic bidirectionnel dans un seul alésage, le risque de collision est relativement élevé. (b) Deux forages de circulation séparés par un mur, les personnes évacuées pourraient être heurtées par un véhicule sur l'autre forage. (c) Deux feux de circulation séparés par deux murs. (d) La partie centrale est en outre divisée en deux alésages, un pour l'évacuation et l'autre pour l'extraction des fumées.	21
Figure 2-4 : Distance de franchissement tunnel	21
Figure 2-5 : Portées d'une dalle.....	22
Figure 2-6 : Schéma des nœuds.....	25
Figure 2-7 : Charges agissants sur la structure	27
Figure 3-1 : Nzulo, zone présentant une structure rocheuse de Volcanisme III et IV. [24].....	33
Figure 3-2 : En vert, les roches volcaniques couvrant toute la partie Nord-Ouest de la Ville de Goma et atteignant Nzulo. [19]	33

Figure 3-3 : Fond marin et sédiments de la côte du Lac Kivu, à 25 m de profondeur.....	34
Figure 3-4 : Image du fond marin côte Nord du lac Kivu [19]	34
Figure 3-5 : Profil du site.....	35
Figure 3-6 : Implantation du tunnel immergé à Nzulo	36
Figure 3-7 : Levées des profondeurs du lac Kivu sur le site de Nzulo.....	37
Figure 3-8 : Levé et mesure de la profondeur maximale.....	37
Figure 3-9 : Profil en travers	39

INTRODUCTION GENERALE

1. Contexte

Dans le but de relier et faciliter l'interconnexion entre différents pays, villes et/ou villages, l'homme a toujours créé des routes, qui sont des moyens de communications qui facilitent les échanges économiques entre ces différentes zones, différents pays, etc. Mais en le faisant, l'homme se heurte à des obstacles (rivières, montagnes, mer, etc.) et est obligé de trouver des solutions pouvant aider à les contourner. Les solutions auxquelles il fait recourt, sont ainsi résumées en ponts, viaducs, tunnels, etc. cette dernière solution énoncée, fera l'objet de notre recherche.

En effet, depuis les temps anciens, le tunnel est présenté comme un ouvrage souterrain permettant de franchir un obstacle ou d'éviter un col (tunnel sous une montagne), éviter un long détour (tunnel sous un plan d'eau), réduire les nuisances sur la surface de l'emprise au sol ou sur la mer en utilisant au maximum l'espace souterrain quasi illimité et libérer la surface de l'emprise au sol ou celle de la mer. Les ouvrages souterrains et marins constituent la solution la plus adaptée à la création de nouvelles infrastructures en zone urbaine et au franchissement des zones montagneuses [1]. La construction des tunnels intervient aussi bien pour limiter les nuisances quant au trafic routier et/ou maritime.

Les projets de tunnels peuvent varier suivant plusieurs paramètres notamment : la profondeur des eaux, la géométrie de l'obstacle à franchir, les méthodes d'excavation, etc. tout ceci conduisant à des techniques particulières de mise en œuvre, et celles-ci introduisant des méthodes de calculs et de dimensionnement distincts.

En effet, dans la démarche de conception et dimensionnement des ouvrages tels que les tunnels, il est important de s'adapter à toutes les contraintes, quel qu'elles soient géologiques, structurelles, architecturales, règlementaires, etc. afin de déterminer le meilleur système structurel d'un projet de tunnel ; et d'optimiser les coûts ainsi que la mise en œuvre sur chantier car dit-on, une étude de structure bien réalisée permet, au-delà d'assurer un ouvrage fiable et pérenne, d'optimiser les quantités de matériaux et les coûts de construction. [2]

Il s'avère, par conséquent, très important de pouvoir assurer une étude des faisabilités avant de se lancer dans le dimensionnement de toute structure, le cas espèce, d'un tunnel dans le but d'assurer la possibilité de construction dans le respect des règles et normes en vigueur aussi et

surtout, afin de donner un aperçu sur les possibilités techniques de construction et de dimensionnement des ouvrages.

2. Etat du problème

En effet, la Province du Sud Kivu et celle du Nord Kivu communiquent via la localité de Nzulo en Province du Nord Kivu, et celle-ci est voisine de la localité de Matanda au Sud Kivu. Les deux localités communiquent grâce à quelques faibles échanges entre les deux milieux assurés par une seule pirogue dans un état de délabrement sans précédent, ce qui entraîne des très faibles échanges économiques et sociaux entre les deux régions. L'évolution démographique de la localité de Nzulo par rapport à celle de Matanda reste bien supérieure car la plupart des échanges économiques sont concentrés à Nzulo qu'à Matanda alors que séparés par une étendue d'eau d'environ 400 mètres linaires seulement ce qui affecte également les échanges sociaux qui restent en froid entre les deux régions. La demande en produits agricoles de première nécessité pouvant desservir la ville de Goma, proviendrait bien de la localité de Matanda mais l'absence des voies de communication adéquates et suffisantes s'avère être un grand obstacle à l'approvisionnement de la ville de Goma. De plus, Matanda est plus proche de Minova (cité commerciale qui alimente aussi la ville de Goma en produits agricoles) que Sake de Minova ; ainsi on pourrait bien aménager un tronçon routier ou tunnelier entre Matanda et Minova et réduire le long détour passant par Sake en termes de temps et risques routiers.

Nzulo étant une cité où l'activité sismique est fréquente ; la solution pont, présentant une faible résistance à l'activité sismique ainsi qu'une très longue durée de construction, sans compter les perturbations et nuisances liés au trafic et à l'architecture du milieu, la réduction du bruit des véhicules et celle de la pollution de l'air ; la construction des tunnels contribue à la protection des cadres de vie, de la santé publique, du développement économique et de la sécurité par l'installation d'un système de transport qui respecte l'environnement, rapide et discret [3] [4] c'est au regard de tous ces motifs que nous menons la présente recherche sur une étude des faisabilités pouvant conduire au dimensionnement d'un tunnel immergé reliant la Province du Nord Kivu et du Sud Kivu via la localité de Nzulo.

En pratique, chaque type de tunnel a des caractéristiques qui lui sont particulières et par conséquent, doit faire sujet d'une étude significative adaptée aux conditions rencontrées. Ces études sont importantes pour apporter les résultats appropriés et permettre :

- La réduction du niveau des risques techniques, et environnementaux ;
- La réduction des coûts des matériaux de mise en œuvre ;

- De garantir aux usagers le niveau de sécurité requis.

Pour en arriver là, l'espace sous-marin étant très complexe et difficile d'accès, nous allons supposer que la détermination des meilleures conditions de faisabilité technique d'implantation d'un tunnel immergé à Nzulo permettrait un dimensionnement adéquat et garantirait aux usagers des bonnes conditions d'exploitation du tunnel.

3. Objectifs

L'objectif principal du présent travail est l'étude de faisabilité de la conception, du dimensionnement d'un tunnel immergé à Nzulo.

Afin d'atteindre cet objectif, il est nécessaire :

- D'identifier les principaux paramètres à prendre en compte dans une conception appropriée et ;
- D'élaborer une approche adéquate pour le dimensionnement d'un tunnel immergé à Nzulo.

4. Méthodologie

- La méthode documentaire et technique de calculs va nous aider à comprendre les différentes notions relatives à la réalisation du tunnel par la consultation des ouvrages scientifiques et autres relatifs aux tunnels en général ;
- La méthode expérimentale va nous aider à avoir certaines données quant à la conception du tunnel immergé à Nzulo ;
- La méthode d'interview nous aidera à avoir des informations nécessaires à la contextualisation du présent travail.

5. Structure du mémoire/ Subdivision du travail

Hormis l'introduction générale et la conclusion générale, le présent travail comporte trois chapitres dont le premier qui est consacré aux généralités sur les tunnels et autres ouvrages immergés, les méthodes et techniques d'exécution ; le second qui présente la méthodologie qui nous a permis d'atteindre les résultats, entre autres la méthode de calcul des tunnels immergés appropriée ainsi que les paramètres importants de la conception et le troisième qui présente et interprète les résultats obtenus.

CHAPITRE PREMIER : GENERALITES SUR LES TUNNELS IMMERGES

1.1. Historique et évolution des tunnels immergés

Depuis plusieurs milliers d'années, la Terre est notre propriété naturelle, un espace qui est principalement en deux dimensions. La satisfaction des besoins a toujours conduit l'homme à l'agrandir (ou l'élargir) ; ce qui n'est possible que de manière très restrictive, ou en cherchant à utiliser une troisième dimension, vers le haut ou soit vers le bas. La découverte d'excavations souterraines qui comptent parmi les premières manifestations de l'activité humaine nous en informe davantage. [5]

Les premières exploitations du souterrain, sont d'origines naturelles et non de l'homme en tant que tel, la plupart des grottes et cavernes étaient issues des actions de la pluie et des cours d'eaux. Jusqu'à l'utilisation des espaces souterrains dans le domaine du transport routier, ferroviaire, transport des installations électriques, etc. et en passant par l'exploitation minière ; les techniques d'exploitation du souterrain ont évolué depuis la fin du XIX^{ème} siècle et à ce jour, adoptent des techniques bien particulières pour chaque obstacle à franchir.

La notion de tunnel sous-marin, implicitement comparé au tunnel immergé, voit le jour vers les années 1880, dans les premières études de l'établissement du grand projet du tunnel Sous La Manche, qui apporta de très grandes avancées dans la réalisation des tunnels. En effet, les études pour le projet du tunnel Sous La Manche, ont proposées des solutions afin de franchir l'obstacle (La Manche). Toutes les solutions concevables ont été proposées dans le passé, pour créer une communication fixe entre la Grande Bretagne et la France, dont les plus réalistes d'entre elles ont été étudiées :

- Tunnels forés : il s'agit de tunnels souterrains, c'est qu'on peut appeler la solution classique. C'est elle qui a fait objet d'une recherche beaucoup plus poussée actuellement ;
- Tunnels immergés : il s'agit des tunnels reposant sur « souille »¹ faite au fond de la mer ;
- Pont : mis en place d'un pont pouvant relier les deux parties et ;
- Ouvrage composite : il s'agit d'un ouvrage composé d'un pont et d'un tunnel immergé.

Pour chacune de ses quatre catégories, il y a eu deux possibilités :

- Ouvrages séparés pour les trajets routiers et ferroviaires et ;
- Trajets routiers et ferroviaires dans le même ouvrage, le cas d'un ouvrage mixte.

¹ Souille : Sorte de lit, constitué de sable mou ou de vase qui se forme sous les fonds marins.

Mais une plus grande préoccupation a été celle d'envisager la possibilité d'avoir un trafic à deux sens dans le même ouvrage ou des ouvrages séparés pour chaque sens, on peut aussi y ajouter le fait que le tunnel immergé et le pont Sous La Manche n'étaient pas réalisables à l'époque (1880) ; ce qui a droit conduit au choix d'un ouvrage sous-marin foré.

Les sondages du Tunnel ont porté sur l'étendue de la solution traditionnelle du Tunnel sous-marin foré, car c'est ce qui pose, au point de vue géologique, les problèmes les plus difficiles et qui nécessitent les recherches les plus étendues. [6]

La notion de tunnel immergé comme tel, est introduite par une première tentative qui a eu lieu en 1810 où l'ingénieur britannique Charles Wyatt a proposé le concept de tunnel immergé, utilisant des cylindres en briques, chacun d'environ 15,2 m de long, et les enfonçant dans un lit de rivière dragué, puis les remblayer. Un autre essai intervient avec beaucoup d'attention par un autre ingénieur britannique avec deux modèles, chacun de 7,6 m de long et 2,74 m de diamètre. Les résultats des tests ont été positifs. Mais alors, le coût a été dépassé, et le projet a pris fin. C'est en 1893 où trois canalisations d'égouts (dont le diamètre n'est que de 1,8 m) ont été faites par la méthode de construction de draguage [7].

Au regard de ce qui précède, d'autres grands projets ont vu le jour et ont su franchir d'énormes obstacles bien majeurs que le Tunnel Sous La Manche. C'est le cas par exemple :

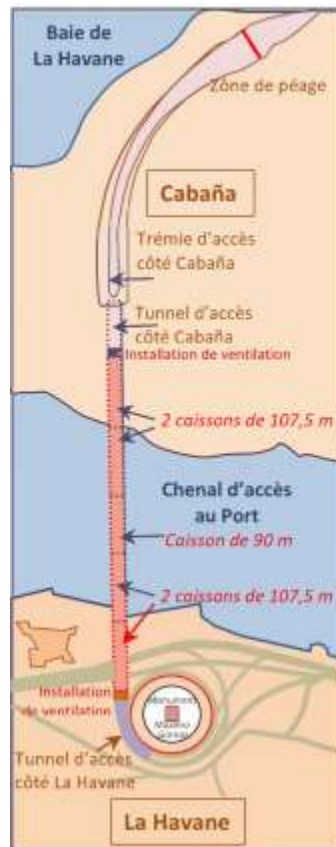
- Du Tunnel sous-marin de la Havane en 1953 :

La ville de La Havane, capitale de Cuba, s'est principalement développé le long de la Baie de La Havane (Golfe du Mexique), le long du port situé dans les terres, et le long du chenal d'accès qui relie le port à la Baie de La Havane. De ce fait, la ville est située en très grande partie à l'Ouest de ce chenal, tandis que l'Est de cette voie était extrêmement peu construit. Le transport d'Ouest à l'Est se révèle très long en distance et en temps. C'est afin de favoriser le développement à l'Est de la ville, et d'offrir des transports rapides qu'a été réalisé le tunnel sous le Chenal accès au port. Il a été construit en 30 mois [8].

Le tunnel immergé comporte 5 caissons préfabriqués en béton précontraint. Le caisson central, horizontal mesure 90 m de long, et les caissons latéraux (deux de chaque côté) mesurent 107,5 m de long chacun, avec une pente de 5,75%. Chaque caisson mesure 21,85 m de largeur et 7,10 m de haut. La figure 1-1 suivante présente la vue aérienne (en plan) du tunnel immergé de la Havanna.

Etude en vue du dimensionnement d'un tunnel immergé reliant la

3 Province du Nord-Kivu à celle du Sud Kivu via la localité de Nzulo.



**Figure 1-1 : Vue en plan
du Tunnel Immergé de La
Havane**

- Du Pont-Tunnel Louis-Hippolyte Lafontaine, Montréal (Canada/Québec) en 1967 :

L'autoroute 25 (section de la route Transcanadienne) franchit le Fleuve Saint-Laurent entre Montréal et Longueuil par un pont tunnel long de 1391 m, voir figure 1-2 ci-dessous, passant par l'île Charon où est installé un échangeur. En effet, le tunnel immergé a été construit par l'Entreprise Grands Travaux de Marseille (Vinci), laquelle avait réalisé de tunnel immergé de La Havane dans les années 1952.

Etude en vue du dimensionnement d'un tunnel immergé reliant la
4 Province du Nord-Kivu à celle du Sud Kivu via la localité de Nzulo.



Figure 1-2 : Vue du Pont Tunnel immergé Louis-Hyppolyte

Ce tunnel long d'environ 1,4 km est composé de 7 caissons immergés dans le lit du fleuve et comporte 3 voies de circulation dans chaque sens ainsi qu'un passage central pour la ventilation et les services. Le trafic y est de 130 000 véhicules par jour. [8]

Les caissons mesurent 110 m de long, 37 m de largeur et 8 m de hauteur pesant 32 000 tonnes chacun. La figure 1-3 suivante, présente la construction d'un des 7 caissons qui furent construits en cale sèche près de l'ouvrage et transportés par flottage à leur emplacement définitif à 24 m sous le niveau du fleuve dans une souille préparée à cet effet.



Figure 1-3 : Construction en voie d'achèvement d'un caisson en préfabriqué

- Du Tunnel Piet Hein aux Pays-Bas en 1997 :

Ce tunnel immergé, passant sous un bassin du port d'Amsterdam, permet de relier le centre de la ville à la rocade. Il donne passage à deux chaussées de deux voies. Il se compose de 8 éléments préfabriqués en béton précontraint de 158 m de long et de 31,6 m de large. La longueur totale du projet, avec rampes d'accès s'élève à 1900 m. les éléments du tunnel ont été préfabriqués dans un bassin à Anvers puis remorqués jusqu'à leur emplacement définitif. [8]

- Du Tunnel de l'Øresund entre le Danemark et la Suède en 2000 :

La liaison de l'Øresund, est à la fois routière et ferroviaire, relie le Danemark et la Suède à travers le bras de mer du même nom. Elle est longue de 16 km et comporte ; d'Ouest à l'Est, un tunnel immergé, une île artificielle et un pont, comme indiqué à la figure 1-4 ci-dessous.

Le tunnel immergé présente une longueur de 3510 m et comporte des rampes d'accès de 650 m côté danois et 110 m côté suédois. Il est formé de 20 caissons préfabriqués en béton de 41,7 m de largeur et 176 m de longueur, chacun pesant 55 000 tonnes. [8]

Ces caissons ont été préfabriqués dans une forme du port de Copenhague, chacun d'eux est constitué de 8 voussoirs de 22 m de long réalisés sur le principe des ponts poussés ; chaque fois qu'un voussoir est coulé, l'ensemble est poussé pour permettre la réalisation du voussoir suivant au même poste de travail. Les caissons, une fois achevés, sont mis en flottaison puis posés sur des vérins pour régler leur position définitive. Du sable est alors injecté pour servir d'assise.



Figure 1-4 : Tunnel Immergé D'Øresund : Aboutissement du tunnel immergé et pont vers la Suède

- Du Tunnel HSL Thalys aux Pays Bas en 2005 :

Ce projet, dont la description se retrouve à la figure 1-5, porte sur la conception et la construction d'une ligne TGV de 16 km au sud de Rotterdam comprenant deux tunnels immergés, des tranchées couvertes, des ponts et 8 km de dalles support de voies ferrées fondées sur des pieux. Chacun des tunnels avec ses tranchées d'accès présente une longueur de 2,6 km environ. Leur largeur intérieure est de 7,35 m et leur profondeur maximale est de 21 m. Ils sont formés de tronçons en béton précontraint longs de 134 à 150 m ; préfabriqués dans une darse voisine. L'un des problèmes les plus délicats était la maîtrise des tassements différentiels entre les éléments qui ne devaient pas dépasser 2 mm. Le volume total de béton utilisé est de l'ordre de 400 000 m³, le volume de terrassements sous l'eau de 1,6 millions m³ sur une durée totale des travaux de 5 ans. [8]



Figure 1-5 : Vue sur le Tunnel Immergé de Thalys aux Pays Bas

Les plus grands projets de tunnels immergés dans le monde, connaissent des très grandes avancées. Plusieurs techniques sont maintenant employées, dans le but de franchir des obstacles et réduire au maximum les risques de nuisances. C'est ainsi, qu'on peut maintenant entendre parler des grands projets de tunnels titanesques dans le monde, le cas du projet de Riyahd, de Chine, Moscou, Dubai, etc.

1.2. Avancées et Limites des tunnels immergés

Actuellement, sur un total de 64 ouvrages de tunnels immergés recensés, un seul a été démoli, (Baytown Tunnel aux Etats Unis qui fut construit en 1957), 2 sont en construction et le reste en service. Cela vérifie que la construction des tunnels immergés s'est déjà développée et cette technique de franchissement d'obstacles est maintenant très répandue dans le monde entier.

Plusieurs sociétés de construction ont repoussé les limites des techniques de creusage de tunnels dans des projets qui ont façonné l'évolution de l'ingénierie des tunnels immergés et contribué à fixer les pratiques de l'industrie. Depuis, les techniques de construction ne cessent d'accroître et donnent lieu à des défis majeurs à surmonter.

Au-delà de ces avancées, franchir des plans d'eau sous une profondeur allant au-delà de 60 mètres sous les eaux reste un défi majeur à relever.

Les avantages des tunnels immergés se résument entre autres :

- Ils peuvent être plus avantageux que d'autres options, c'est-à-dire un tunnel foré sous le cours d'eau traversé ou un pont ;

- Leur vitesse de construction ;
- Ils ont une perturbation minimale de la rivière ou du lac ;
- Ils présentent une bonne résistance à l'activité sismique ;
- Ils ont une sécurité de construction face à un tunnel foré ;
- Ils sont très rentables pour les grandes largeurs ayant des nombreuses voies de communication (route, rail) ;
- Ils peuvent être appliqués aux sols pauvres des fonds marins, seulement après avoir fait une bonne amélioration du sol, comme ils appliquent des contraintes réduites aux sols de fondation améliorés, en raison de la force de flottabilité de l'eau (selon le principe d'Archimède) [3] ;
- Les tunnels immergés sont presque toujours beaucoup plus étanches que les tunnels creusés grâce à la construction en surface des caissons ;
- Etc.

Les limites liées se situent au niveau de la profondeur maximale d'eau utilisé qui ne peut dépasser 60 m, et nécessitent un alignement droit ou presque pour permettre aux éléments en béton et aux joints d'immersion de rester en compression longitudinale pendant et après les séismes ; pour assurer une étanchéité continue, la longueur supérieure est de 4 km, sinon la ventilation du portail peut devenir insuffisante.

1.3. Conception et Technique de construction des tunnels immergés

La conception des tunnels immergés est un des éléments très capital dans la réalisation des tunnels. En effet, se basant sur les différents tunnels immergés construits dans le temps, la conception et technique de construction des tunnels immergés passe par la compréhension et la maîtrise des éléments très capitaux développés dans les lignes suivantes.

1.3.1. Conception générale

De prime à bord, l'emplacement du tunnel immergé dépendra de l'environnement et du milieu ou du site dans lequel il est placé. Ceci pousse à fixer l'alignement du tunnel dans un premier temps en considérant quelques aspects :

- L'alignement plan du tunnel dépendra principalement de ses deux extrémités. Pour l'alignement vertical, c'est-à-dire l'élévation du tunnel, plusieurs considérations devront être prises en compte tel que peuvent l'indiquer les figures 1-6 et 1-7. L'élévation du tunnel ne doit être ni trop haut ni trop bas. Si les extrémités du tunnel sont trop hautes, la profondeur d'immersion sera insuffisante pour le raccordement hydraulique du premier tunnel qui est un élément se connectant à la structure du terrain. Si les extrémités du tunnel sont trop basses, le risque d'inondation augmente car une quantité plus massive d'eau pourrait se précipiter dans le tunnel en raison de la pluie ou d'un débordement.



Figure 1-6 : L'alignement vertical du tunnel immergé se composant de 33 éléments de tunnel dans le projet HZMB Island-tunnel

- Tant que le tracé du tunnel est fixe et que l'environnement qui sera rencontrée par le tunnel est ainsi immobile, les actions telles que le vent, la vague, le courant, et la profondeur de l'eau peuvent également être définie. En bref, la conception structurelle peut être effectuée.

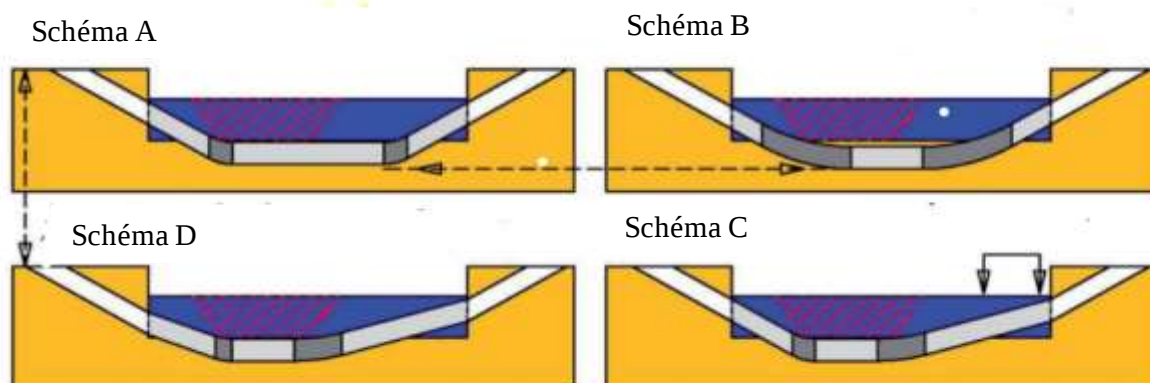


Figure 1-7 : Illustration montrant le principe de l'alignement vertical

Le tunnel immergé est constitué d'un ou plusieurs éléments de tunnel. Par conséquent, la conception du tunnel immergé est, en fait, la conception d'éléments de tunnel. La conception de chaque élément de tunnel se distingue généralement les uns des autres. Une des raisons est

que chaque élément du tunnel existe dans un environnement plus ou moins différent et les actions sur eux sont différentes. [7]

Schéma A : Présente une proposition des pionniers du projet.

Schéma B : Présente un rayon plus grand provoquant une profondeur d'eau plus profonde que celle du schéma A.

Schéma C : Présente une pente plus douce entraînant une section de tunnel immergé plus longue que le schéma A.

Schéma D : Présente un rayon plus grand et de pente plus douce augmentant les risques de collision avec les navires.

1.3.2. Structure Transversale

En fin d'arriver à une meilleure conception transversale, trois aspects sont à prendre en compte dans la conception : le modèle structurel, l'équilibre du poids et l'espace intérieur.

La question structurelle est un sujet familier aux ingénieurs en structure parce que, non seulement les actions permanentes mais aussi les actions momentanées de construction doivent être considérées en ce qui concerne les charges et les actions, car l'état permanent du tunnel immergé peut ne pas conduire la conception comme il le ferait faire pour de nombreux autres types de structures.

L'équilibre du poids signifie que l'élément du tunnel peut flotter lorsqu'il est transporté et peut couler pour l'immersion et la connexion sous-marine ; en outre, pendant la période de service, une attention particulière doit être portée au facteur de sécurité adéquat contre le soulèvement, en cas de conditions météorologiques extrêmes.

L'espace intérieur requis dépend du gabarit routier (c'est-à-dire du minimum d'espace requis pour la circulation routier défini par les règlements), l'espace pour les installations intérieures telles que le ventilateur et les panneaux de signalisation, et l'extra espace pour accueillir les tolérances de construction, de la préfabrication et immersion de l'élément du tunnel.

Avec la forte considération de la conception du confort et de la sécurité des personnes, une attention particulière est accordée à la ventilation et aux évacuations, en plus des trois besoins de base susmentionnés. [7]

Précisons aussi, que les tunnels immergés ont cet avantage de prendre des formes transversales diverses librement. La forme plus répandue par contre, est celle rectangulaire.

1.3.3. Structure longitudinale

La conception longitudinale des tunnels immergés tient aussi compte de trois concepts, à savoir le système structurel, la longueur des éléments et les configurations des joints.

Etant donné la longueur totale linéaire fixe du tunnel, il est possible de déterminer la longueur de l'élément de tunnel ainsi que le nombre d'éléments de tunnel dont on a besoin. Notons que l'élément le plus long du tunnel réduit le nombre total d'élément de tunnel à pourvoir, il réduit aussi de ce fait le nombre total des joints d'immersion à disposer. Aussi, disposer de moins d'éléments de tunnel implique un temps réduit des travaux d'immersion et par conséquent moins de risque de construction. En revanche, plus l'élément de tunnel est court, moins le coût total de préfabrication est élevé, car de ce fait nous aurons moins de terrain à proximité de l'eau nécessaire pour la préfabrication des éléments du tunnel, et ainsi moins la structure de l'élément de tunnel sera sensible à la question du tassement différentiel impliquant un coût réduit du système de précontrainte.

De ce qui précède, il est évident que la conception de la longueur de l'élément du tunnel est une question de garder un équilibre et de trouver l'optimum.

Les joints d'immersion doivent garantir l'imperméabilité à l'eau pendant la durée de service du tunnel en prenant en compte tous les scénarios défavorables tels que l'effet sismique, différentiel et accidentel comme des navires qui coulent.

1.4.Procédés de construction

Une fois terminée, un tunnel immergé ne diffère pas, d'un point de vue opérationnel, d'un tunnel foré ou creusé. En effet, à la fin des travaux de construction d'un tunnel immergé, il en découle que du point de vue fonctionnement, il est comparable aux autres types de tunnels (forés, sous-marin, etc.). Par contre, la différence réside au point de vue technique de construction, qui est totalement différente de celle des autres types de tunnels. [9]

La technique de construction des tunnels immergés passe par des opérations de grandes envergures, de tel sorte qu'il existe, selon les conditions de terrain, différentes méthodes de construction, lesquelles sont non exhaustives, car jusqu'à ce jour, il n'existe aucun règlement régissant la construction et technique d'immersion des tunnels immergés.

Nous pouvons citer la méthode à caisson préfabriqué à l'usine, la plus répandue et celle construite in situ grâce à des batardeaux [10]. Nous allons développer, la première et présenterons quelques problèmes liés à la seconde méthode.

1.4.1. Technique de construction des caissons préfabriqués

Tel qu'énoncé plus haut, l'ouvrage est en général constitué d'une succession de caissons préfabriqués en béton armé ou précontraint construits à sec et mis en place par flottaison et immersion.

La construction des caissons préfabriqués, tel qu'indiqué aux figures 1-8 et 1-9, passe par :

- La fabrication des cadres et/ou cages d'armatures suivi du ferrailage des armatures (coffrage et ferrailage) ;
- La coulée du béton : les spécifications du béton recommandées portent sur un béton présentant une résistance au cube élevée de 10 Mpa à 24 heures, une résistance à 28 jours de plus de 40 Mpa, une température de mise en place du béton ne dépassant pas 28°C pour les caissons préfabriqués ;

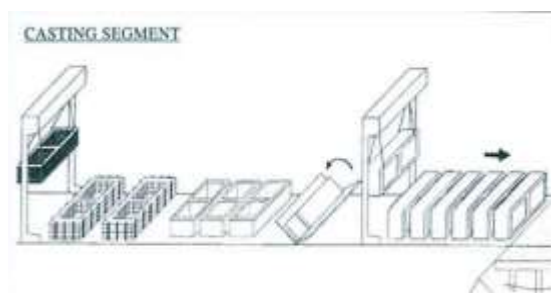


Figure 1-8 : Coffrage, Ferrailage et coulage des segments d'un élément de tunnel. [11]

- Après le durcissement du béton, place à l'inclinaison et alignement des segments de caissons. En effet, les éléments de tunnels sont coulés en segments de 4 à 6 mètres de longueur, lesquels seront par la suite assemblés (étape suivante) pour former un élément de tunnel ;
- Jointement des segments ;

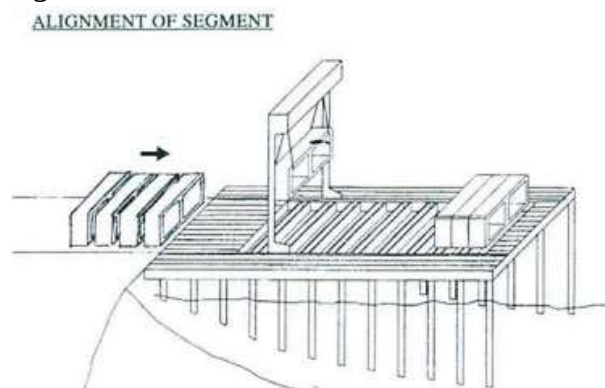


Figure 1-9 : Alignement et jointement des segments. [11]

- Mise en place de la précontrainte (exclusivement pour les tunnels immergés faits en béton précontraint) ;
- Installation des plaques aux extrémités de l'élément de tunnel et de la cloison, lesquels sont mis pour empêcher à l'eau de pénétrer l'élément de tunnel ;
- Abaissement de l'élément de tunnel ;
- Test de fuite ;
- Remorquage par des bateaux. [9]

Il y a lieu de préciser que les caissons des tunnels immergés sont construits à sec dans un chantier de préfabrication appelé darse, qui est un bassin aménagé à l'intérieur d'un port.

1.4.2. Technique de mise en place des tunnels

Les techniques de construction du tunnel immergé, présentent un avantage selon lequel, les trois opérations importantes (c'est-à-dire le dragage, la construction des caissons et la mise en place de ceux-ci) se déroulent au même moment, d'où un gain considérable en termes de temps par rapport aux tunnels forés par exemple, ou une opération ne peut venir après l'accomplissement d'une autre.

- De ce fait, la construction des caissons est faite au même moment que le dragage. [9]. Cette opération, consiste au dragage d'une tranchée de lit d'un canal, d'un lac, sur le site où l'on va placer le tunnel immergé comme le montre les figures 1-10 et 1-11 ci-dessous :



Figure 1-11 : Opération de dragage. [9]

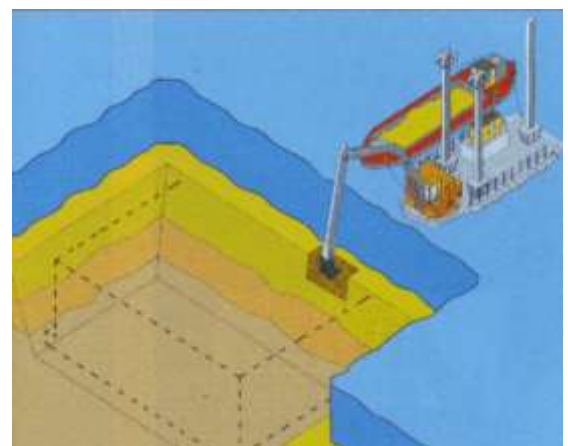


Figure 1-10 : Opération de dragage du lit d'un tunnel

- Les caissons sont mis à l'eau et sont transporté sur le site de l'ouvrage, habituellement par flottaison, et occasionnellement sur une barque ou avec l'assistance d'une grue.

- Le caisson de tunnel est déposé sur le fond de la tranchée creusée comme indiqué aux figures 1-12 et 1-13. Le nouveau caisson est placé contre le caisson précédent sous l'eau. L'eau est ensuite pompée d'entre l'espace se trouvant entre les cloisons étanches. La pression de l'eau sur la face libre du nouveau caisson comprime le joint caoutchouté entre les deux caissons ce qui assure une jonction étanche.

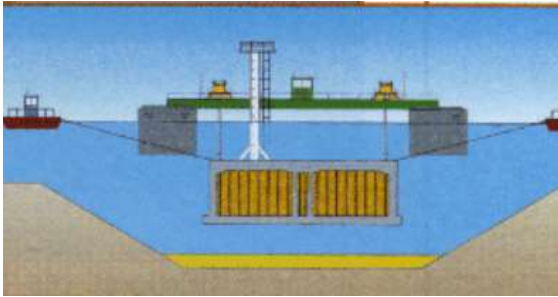


Figure 1-12 : Mise en place du caisson de tunnel



Figure 1-13 : Mise ne place du caisson de tunnel. [9]

- Un lit de remblais est posé de part et d'autre et au-dessus du tunnel afin de combler la tranchée et enterrer définitivement celui-ci tel que le montre les figures 1-14 et 1-15 ci-dessous.



Figure 1-14 : Remblayage de la tranchée

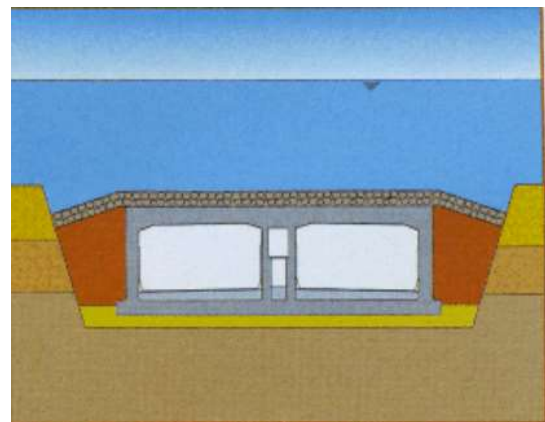


Figure 1-15 : Enterrement complète de la tranchée.

La mise en place des caissons terminée, les ouvrages d'approches peuvent être construits préalablement, après ou simultanément au tunnel immergé afin de s'adapter aux circonstances du milieu. [9].

1.5. Matériaux de construction

Les tunnels immergés sont faits de très grands éléments de béton préfabriqués, ou d'éléments d'acier remplis de béton, fabriqués à sec puis installés sous l'eau [12]. Il y a donc lieu de

différencier deux types de tunnels selon les matériaux constitutifs : ceux en éléments de métal et ceux en éléments de béton.

1.5.1. Tunnel immergé en Acier

Les éléments métalliques sont faits d'acier profilé, sous forme de plaques renforcées avec structure inférieure de béton armé.

A San Francisco, aux Etats Unis, le tunnel immergé traversant la baie, est fait de 57 éléments de tunnel faits en acier sur une distance total de 5,8 km ; ce qui en fait le plus long tunnel en acier au monde. [12]

Un autre tunnel, le plus large des Etats Unis, a une structure en acier immergé. Il s'agit en effet du tunnel immergé à deux tubes.

Par ailleurs, ce type de tunnel reste de loin moins répandu du fait de l'acier en contact avec de l'eau, nécessite plusieurs autres procédés afin de lutter contre l'usure.

1.5.2. Tunnel immergé en Béton

D'une manière générale, les ouvrages en béton construits en site maritime présentent de multiples particularités, celles-ci provenant d'une très grande variété :

- Des types de structures et des solutions constructives offertes par le matériau ;
- Des utilisations des ouvrages ;
- Des techniques et méthodes de construction ;
- Des types de béton utilisés ;
- Des contraintes climatiques lors des phases de construction, qui imposent la mise en œuvre de dispositions adaptées ;
- Etc.

La principale spécificité des ouvrages en site maritime est attachée aux conditions et contraintes environnementales et climatiques qu'ils doivent subir pendant leur durée d'utilisation. Ces contraintes et conditions peuvent provenir des attaques et agressions chimiques de l'eau, des impacts physiques des déplacements de l'eau tel que les vagues, la houle, les courants, les variations de niveau, etc. [13]

Un béton exposé en site maritime est sujet à plusieurs types de contraintes ou agressions :

- Agressions mécaniques : qui sont dues aux mouvements des vagues, de la houle et des marées, abrasion due aux chocs des corps flottants et érosion due aux effets des vagues ;
- Agressions chimiques : qui sont dues à l'action en particulier des chlorures présents dans l'eau de mer et des sulfates, mais aussi des nombreux sels dissous dans l'eau de mer ;
- Agressions climatiques dues aux variations de température ;
- Etc.

De ce qui précède, il convient de formuler un béton qui sera à même de résister aux différentes contraintes induises. Ainsi, les ouvrages continuellement immergés font rarement objet de dégradations importantes tandis que les ouvrages alternativement immergés (qui se situent en zone de marnage déterminés par les niveaux de marée haute ou basse) sont les plus agressés et sont soumis 2 fois par jour au minimum à des imprégnations d'eau de mer alternant cycles humidification-dessiccation. [13]

Le béton peut être armé ou précontraint, selon les contraintes et disponibilité des matériaux présents dans la région.

En effet, les tunnels immergés en béton (armé ou précontraint) devront s'appuyer sur des qualités intrinsèques du béton entre autres, sa compacité, sa perméabilité afin de conditionner sa durabilité. Le béton résiste d'autant mieux à l'action des eaux agressives que sa porosité, sa diffusivité (paramètre de résistance à la diffusion des ions agressifs) et sa perméabilité sont faibles. Les facteurs prépondérants au niveau de la formulation d'un béton pour obtenir une compacité élevée et par conséquent, une faible porosité sont : un dosage en ciment adéquat, une faible teneur en eau, et une granulométrie comportant des éléments fins en quantité suffisante afin de remplir les espaces entre les plus gros granulats. [13]

Le respect des valeurs d'enrobages des armatures, qui s'explique par le respect des différentes épaisseurs d'enrobage permet de vaincre la corrosion des armatures de béton armé. Pour les ouvrages situés en zone de marnage, c'est-à-dire, entre la marée haute et la marée basse, les armatures inoxydables sont une alternative très intéressante pour utilisation.

La température et l'humidité relative pendant la mise en œuvre du béton et les jours suivants sont aussi des paramètres importants conditionnant les performances du béton. [13]

1.6.Conclusion partielle

Il a été question, dans ce premier chapitre, de donner l'évolution des tunnels immergés, dès leurs origines jusqu'à l'état actuel, d'identifier les avancées et les limites auxquelles font face les tunnels immergés d'une manière générale, de leur technique et procédé de construction, des matériaux utilisés, etc. Nous retenons que, dès leur début, la construction des tunnels passe par différents procédés qui offrent des gains précieux de temps car les procédures/étapes de construction peuvent s'exécuter au même moment.

CHAPITRE DEUXIEME : METHODOLOGIE

2.1.Introduction

La conception, dimensionnement et exécution d'un ouvrage de génie civil, doivent se faire de manière à présenter durant toute la durée d'exploitation de celui-ci, des sécurités appropriées. Par leur intervention combinée ou isolée, certains facteurs sont susceptibles d'influencer la sécurité de la structure ou de la compromettre. Il s'agit des facteurs, entre autres :

- Les propriétés des matériaux constitutifs ;
- Les actions appliquées à la structure ;
- Les valeurs des sollicitations ;
- Les méthodes de calculs des sections ;
- Les règles de détails (jonctions, les recouvrements, etc.) ;
- La qualité d'exécution des travaux (qui dépend fortement des règles de contrôle et de la qualification du personnel d'exécution)

Ce chapitre va essentiellement parler de la méthodologie de conception (qui tient compte du milieu d'où une partie présentant le site en étude) et de la méthodologie de dimensionnement (les calculs qui conduisent à la détermination des différentes sections des éléments de structures).

2.2.Présentation du site

Située à près de 10,6 km de la ville de Goma, en Province du Nord Kivu, le village de Nzulo est bâti sur d'anciennes roches issues de l'éruption volcanique de 1977 sur toute son étendue, ce qui ne favorise pas l'agriculture. Elle se situe entre 1°37'00'' O et 29°05'53'' E et s'étend sur une superficie de 1,25 km². [14]

2.3.Localisation du tunnel

Le choix de la localisation du tunnel immergé va permettre de créer une ceinture entre la voie de distribution menant vers la RN2 et une possibilité de créer un tunnel qui va mener vers Minova en Province du Sud Kivu et de ce fait, réduire le trajet entre Goma-Minova. Il est essentiel que ce lien se raccorde directement à la RN2 préexistante, tel que mentionné à la figure 2-1 suivante :

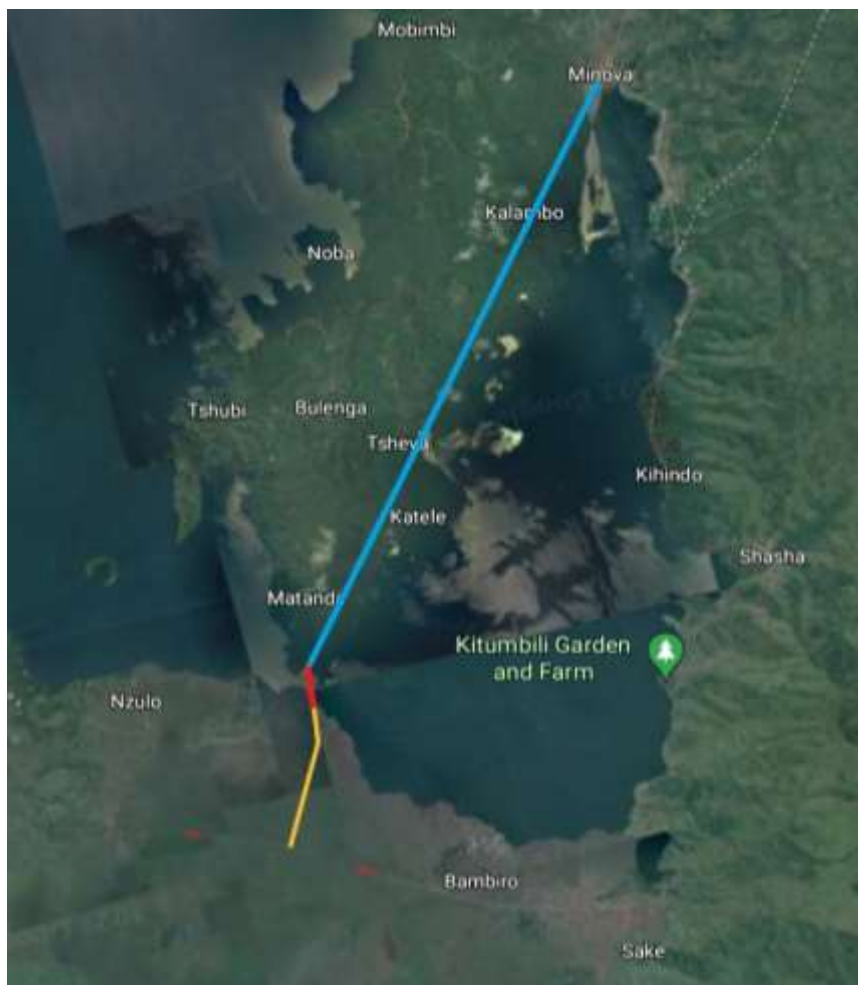


Figure 2-1 : Localisation Tunnel Immergé en rouge. Crédit Photo Google Earth

2.4. Conception de l'ouvrage

La conception d'un ouvrage de génie civil est l'une des étapes préliminaires et indispensables avant le dimensionnement. Elle consiste au design de l'ouvrage dans le but de ressortir les éléments structuraux et plus précisément, pour le cas du tunnel immergé, il s'agit de placer les dalles supérieures et/ou inférieures (tablier supérieur et/ou radier) et les voiles (murs en béton armé) qui transmettent les charges jusqu'aux fondations vers le sol du fond marin. C'est en effet, un procédé plus ou moins complexe par lequel le concepteur doit choisir la forme, les dimensions et l'armature parmi un éventail de possibilités tout en respectant certains paramètres.

Quelques paramètres à prendre en compte pour une conception optimale sont notamment :

- Le respect des normes ;
- Les faisabilités techniques et
- Le coût de mise en œuvre.

Généralement pour le tunnel immergé, et plus particulièrement pour le tunnel immergé à Nzulo, au-delà des facteurs précités, la conception du tunnel, prendra en compte : l'alignement plan des éléments de tunnel, la conception transversale, la ventilation, les évacuations et la conception longitudinale.

2.4.1. L'alignement plan des éléments du tunnel

Elle dépend de la profondeur des eaux, qui sera déterminée par des méthodes traditionnelles. Ces méthodes consistent à attacher une corde à un poids et abaisser le poids lentement dans l'eau. Quand il touche le fond, marquer la corde et retirer le poids. Abaisser le poids dans plusieurs endroits à proximité. Si la marque la plus profonde est sous l'eau, marquer le nouveau point le plus profond et continuez jusqu'à ce que l'on soit sûr de la levée de tous les points désirés. Se déplacer à terre et mesurer la corde avec un ruban à mesurer.

L'alignement plan d'éléments des tunnels dépendra de tous les points levés, qui constitueront le tracé du profil du fond marin.

2.4.2. La conception transversale

Elle reprendra la largeur des voies de circulation, le nombre des voies de circulation, le gabarit routier, les installations intérieurs s'il y en a, panneaux de signalisation, évacuations, etc.

La largeur de la voie conçue sera prise égale à celle d'une route de desserte agricole, tout en tenant compte des paramètres (largeur de la voie, nombre de voies de circulation, gabarit et hauteur de circulation, etc) qui régiront la classe de la route à Nzulo. Or la détermination de la classe d'une route fait mention de la notion du trafic journalier à prendre en compte [15] qui permet de hiérarchiser le réseau routier par rapport aux fonctions qu'il assure.

Ainsi, le trafic est caractérisé par les paramètres suivants :

- TMJA (Trafic Moyen Journalier Annuel)

$$\frac{\text{Trafic total annuel par sens de circulation}}{365} = TMJA \quad [1]$$

- T_i : La classe de trafic déterminée par le TMJA et est décomposée en 10 classes :
 - Classe t_7 : de 0 à 2 PL/j
 - Classe t_6 : de 3 à 10 PL/j
 - Classe t_5 : de 11 à 25 PL/j
 - Classe t_4 : de 26 à 50 PL/j
 - Classe t_{3-} : de 51 à 85 PL/j
 - Classe t_{3+} : de 86 à 150 PL/j
 - Classe T_3 : de 51 à 150 PL/j
 - Classe T_2 : de 151 à 300 PL/j

- Classe T1 : de 301 à 750 PL/j
- Classe T0 : de 751 à 2000 PL/j.

Avec PL : Poids Lourds (Véhicules dont le poids total autorisé en charge est supérieur ou égal à 35 kN soit 3,5 tonnes)

j : Jour

Ces différentes classes définissent deux grandes catégories de routes : les voiries à faible trafic regroupant toutes les classes de t7 à t3- ainsi que les voiries à moyen et fort trafic regroupant toutes les classes de T3 à T0. [15]

2.4.3. La ventilation

Avec la prise de conscience accrue de la conception du confort et de la sécurité des personnes, une plus grande attention est accordée à la ventilation et aux évacuateurs.

Trois solutions sont d'autant plus possibles d'être prise en compte pour une meilleure conception telle qu'indique la figure 2-2.

- La ventilation longitudinale : nécessite des ventilateurs qui augmentent la hauteur du tunnel, conduisant à une fondation plus profonde et à davantage de dragage.
- La ventilation transversale : nécessite des forages spéciaux et augmente ainsi la largeur de la section transversale, conduisant également à plus de volume de dragage.
- La ventilation semi transversale : elle se situe entre la ventilation longitudinale et la ventilation transversale.

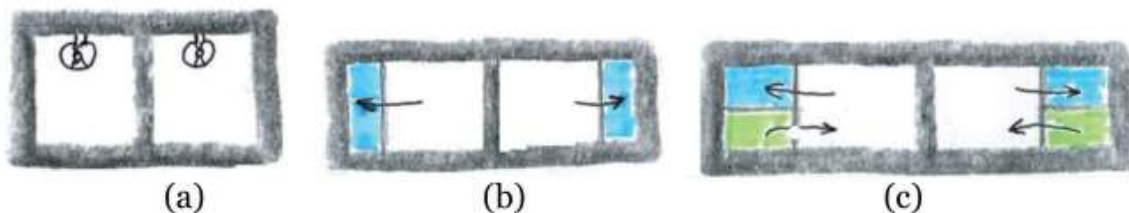


Figure 2-2 : (a) Ventilation longitudinale, (b) ventilation semi transversale, (c) ventilation transversale

2.4.4. Les évacuations

Dans la section transversale, la mise en place des parois intérieures est déterminante. En effet, la figure 2-3 montre le rapport ou la relation entre les parois intérieures et la sécurité des usagers.

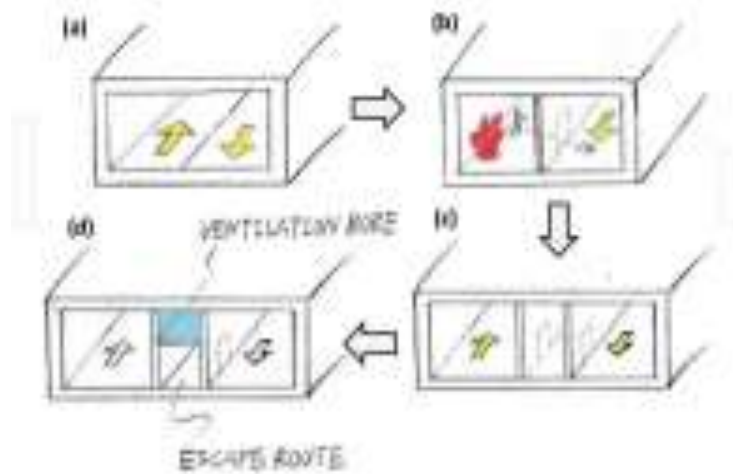


Figure 2-3 : (a) Trafic bidirectionnel dans un seul alésage, le risque de collision est relativement élevé. (b) Deux forages de circulation séparés par un mur, les personnes évacuées pourraient être heurtées par un véhicule sur l'autre forage. (c) Deux forages de circulation séparés par deux murs. (d) La partie centrale est en outre divisée en deux alésages, un pour l'évacuation et l'autre pour l'extraction des fumées.

Également, d'un point de vue purement structurel, plus il y a de murs intérieurs, moins la plus grande portée de la structure en coupe est déterminante.

2.4.5. La conception longitudinale

- La longueur des éléments de tunnels : elle est liée à la distance de franchissement comme indiqué à la figure 2-4.

Soit d , la distance de franchissement. La longueur totale « lt » du tunnel sera prise égale à :

$$lt = d + 2 * a \quad [2]$$

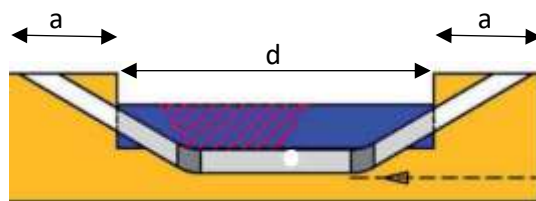


Figure 2-4 : Distance de franchissement tunnel

Le nombre d'éléments de tunnels à disposer « ne » sera donc égal à :

$$ne = \frac{lt}{100} \quad [3]$$

En effet, il n'y a pas de réglementations en rapport avec la longueur maximale ou minimale d'un élément de tunnel mais, se basant des expériences d'autres constructeurs, la longueur d'un

élément de tunnel varie entre 100 et 150 m. Avec 100, la longueur moyenne d'un élément de tunnel exprimé en mètres, variant entre 100 et 150 m suivant les conditions du site. [3]

- Les joints d'immersion « nj » : ils dépendent fortement du nombre d'éléments de tunnels à avoir. Ils seront obtenus par :

$$nj = ne - 1 \quad [4]$$

2.5. Prédimensionnement

2.5.1. Les dalles

Considérons que la dalle est rectangulaire et uniformément chargée. Les portées sont mesurées entre nus des appuis avec lx , la petite portée et ly , la grande portée comme peut l'indiquer la figure 2-5 ci-après.

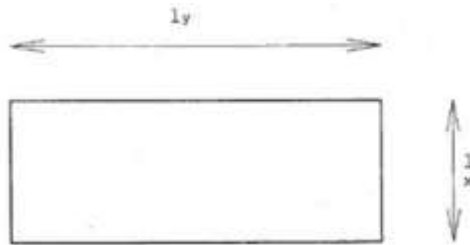


Figure 2-5 : Portées d'une dalle

Le rapport des portées α est donné par l'expression :

$$\alpha = \frac{lx}{ly}$$

La dalle étant simplement appuyée sur deux côtés, si le rapport $\frac{lx}{ly} < 0,4$, la dalle porte dans un seul sens. Ces types de dalles sont calculés comme des poutres dans le sens de la petite portée et cela conduit à l'étude d'une poutre rectangulaire de hauteur h , de largeur 1 m et portée lx [16].

- Pré dimensionnement

Dans la démarche visant à déterminer les minima des constructions et une prise en compte des rations en fonction des portées à franchir, on adoptera une hauteur ou épaisseur de la dalle :

- Pour une dalle isolée : $h \geq \frac{lx}{20}$
- Pour une dalle continue : $h \geq \frac{lx}{25}$ [17]

2.5.2. Les voiles

Les voiles pour les tunnels immergés, sont soumis à la poussée des terres d'une part et d'autre part, à la poussée hydrostatique résultant du niveau de la nappe car en effet, les éléments de tunnels sont enterrés.

Sur le plan vertical, ils pourraient contenir les efforts induits par la dalle supérieure. [17]

De ce fait, la méthode de calculs fera référence à l'article A-4-5,33 du BAEL, qui prend en compte le calcul des voiles enterrés sous deux hypothèses :

- Les voiles sont considérés comme des dalles encastrées sur les côtés et soumises à une flexion dans le sens de la petite inertie ;
- La seconde hypothèse consiste à les considérer comme des poutres à voiles renversées uniformément chargées sur la longueur c'est-à-dire le grand côté et soumise en flexion dans le sens de la petite inertie. [17]

Pour notre cas, nous allons considérer que l'épaisseur des voiles sera égale à la hauteur de la dalle supérieure, afin d'équilibrer la structure.

2.6. Hypothèses de calculs

2.6.1. Règlements

Les calculs pour le béton armé seront orientés suivant les règles du BAEL 91 révisées 99 ;

2.6.2. Matériaux

- **Béton**

Résistance en compression à 28 jours : $f_{c28} = 35 \text{ MPa}$

Résistance en traction à 28 jours :

$$f_{t28} = 0,6 + 0,06 * f_{c28} \quad [5]$$

Densité du béton : 25 kN/m^3

Dosage du béton : 400 kg/m^3

Etat limite ultime (ELU)

Contrainte admissible du béton en compression

$$\sigma_{bc} = \frac{0,85 * f_{c28}}{\gamma_b} \quad [6]$$

Etat limite de service (ELS)

Contrainte admissible du béton en compression

$$\overline{\sigma}_{bc} = 0,6 * f_{c28} \quad [7]$$

- **Acier**

Acier à Haute Adhérence (HA), classe FeE 500

Limite d'élasticité $f_e = 500 \text{ Mpa}$

Contrainte de calcul

$$\sigma_s = \frac{f_e}{\gamma_s} \quad [8]$$

Etat limite de service (ELS) Fissuration très préjudiciable

Contrainte admissible :

$$\bar{\sigma}_s = \min \left\{ \frac{1}{2} f_e; 90 \sqrt{\eta} * f_{t28} \right\} \quad [9]$$

- **Remblai**

Remblai en roche basaltique intact : **28 kN/m³** [18] [19]

Coefficient de poussée des terres **K_a = 0,1715**

Epaisseur de remblai sur la dalle supérieure : **50 cm**

- **Eau**

Densité de l'eau : **1000 kg/m³**

2.7.Schéma statique de l'ouvrage

Plusieurs modèles mathématiques peuvent être étudiés dans le but d'élaborer une approche adéquate du dimensionnement des tunnels immergés faits en éléments de tunnels préfabriqués à l'usine.

Les différentes structures de tunnel en caisson, se comportent comme des « boîtes » ou dalots ou encore des ponts cadres ou encore portiques, c'est-à-dire, des formes de structures qui agissent comme un ensemble parfait. En conséquence, leur stabilité dépend de quelques conditions préalables notamment :

- Un choix convenable des plans tel que la géométrie globale de la boîte reste inchangée lors des actions et différents mouvements ;
- Des liaisons adéquates entre ces plans. [20]

En effet, le pont cadre a comme éléments de structure constitutifs suivants :

- Le tablier ou dalle supérieur ;
- Les voiles et
- Le radier inférieur.

La méthodologie de dimensionnement consiste à déterminer les sections d'aciers de ces différents éléments, les épaisseurs sur base des hypothèses et principes de calculs sus cités.



Figure 2-6 : Schéma des nœuds

Le moment d'inertie de la dalle supérieure et du radier $I1$ est égal au moment d'inertie du voile $I2$. Comme le voile, le radier ainsi que la dalle supérieure sont faits en même matériau, le béton armé, le module d'élasticité E sera constant et peut-être pris égal à 1. [21]

2.8.Méthode de calcul

De manière générale, les études seront faites par bande d'un mètre de tunnel immergé ($b=1m$). L'étude sera faite par la méthode des rotations pour l'étude de l'équilibre de chaque nœud.

Nous allons désigner par :

M_{ij} = moment statique appliqué au nœud i par la barre ij

m_{ij} = moment d'encastrement appliqué au nœud i par la barre j (déterminé par les charges appliquées à la barre)

a_i = rotation du nœud i

k_i = caractéristique de la rigidité des barres horizontales

$$k_1 = \frac{2 \cdot E \cdot I1}{L} = \frac{2 \cdot I1}{L} \quad [10]$$

k_j = caractéristique de la rigidité des barres verticales

$$k_2 = \frac{2 \cdot E \cdot I2}{L} = \frac{2 \cdot I2}{L} \quad [11]$$

Le moment statique sera donné par :

$$M_{ij} = k \cdot (2 \cdot a_i + a_j) + m_{ij} \quad [12]$$

Avec $k = k_1$ ou k_2

b_i = Constante du nœud i .

Pour l'élément de tunnel, si l'on considère une bande de largeur $b = 1\text{m}$, les moments d'inertie I_1 et I_2 seront donnés par :

$$I_1 = I_2 = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad [13]$$

L'équation [13], dans [10], et [11], nous donnera les caractéristiques des barres verticales et horizontales. De ce qui précède, l'équilibre du nœud 1 par exemple, s'écrira :

$$M_{12} + M_{13} = 0 \quad [14]$$

L'équilibre de tous les nœuds sera donné par les équations :

$$\text{Noeud 1 : } 2(k_1 + k_2) \cdot a_1 + k_1 \cdot a_2 + k_2 \cdot a_3 = -(m_{12} + m_{13}) = b_1 \quad [15]$$

$$\text{Noeud 2 : } 2(k_1 + k_2) \cdot a_2 + k_1 \cdot a_1 + k_2 \cdot a_4 = -(m_{21} + m_{24}) = b_2 \quad [16]$$

$$\text{Noeud 3 : } 2(k_1 + k_2) \cdot a_3 + k_1 \cdot a_4 + k_2 \cdot a_1 = -(m_{34} + m_{31}) = b_3 \quad [17]$$

$$\text{Noeud 4 : } 2(k_1 + k_2) \cdot a_4 + k_1 \cdot a_3 + k_2 \cdot a_2 = -(m_{43} + m_{42}) = b_4 \quad [18]$$

2.9. Calculs des sollicitations

2.9.1. Charges permanentes

Les charges permanentes seront évaluées pour 1 m de largeur ($b = 1\text{m}$) d'élément de tunnel.

➤ Dalle supérieure

$$\circ \text{ Poids propre de la dalle} = \gamma_{\text{béton}} \cdot e_{\text{dalle}} \cdot b \quad [19]$$

$$\circ \text{ Poids du remblai} = \gamma_{\text{remblai}} \cdot e_{\text{remblai}} \cdot b \quad [20]$$

$$\circ \text{ Poids de l'eau} = \gamma_{\text{eau}} \cdot h_{\text{profondeur eau}} \cdot b \quad [21]$$

➤ Dalle inférieure

$$\circ \text{ Poids propre du radier} = \gamma_{\text{béton}} \cdot e_{\text{radier}} \cdot b \quad [22]$$

$$\circ \text{ Poids propre des voiles} = 2 \cdot (\gamma_{\text{béton}} \cdot e_{\text{voile}} \cdot b) \quad [23]$$

➤ Poussée du remblai sur un voile

$$Poussée\ du\ remblai = \gamma_{terre} * Ka * h \quad [24]$$

Avec

$Ka = 0,1715$: Coefficient de poussée des terres

h : hauteur du remblai par rapport au point considéré (0 ; 5m)

L'ensemble des charges permanentes, mis à part les poids propres des éléments, sur l'élément de tunnel se présentent donc sous la forme ci-dessous à la figure 2-7.



Figure 2-7 : Charges agissantes sur la structure

2.9.2. Moments d'encastrement

Les moments d'encastrement aux nœuds pour 1 m de largeur d'élément de tunnels sont donnés par :

$$m_{12} = -P_1 * \frac{l^2}{12} * b \quad [25]$$

$$m_{43} = -P_2 * \frac{l^2}{12} * b \quad [26]$$

$$m_{31} = -(Pt_1 - Pt_0) * \frac{h^2}{20} - Pto * \frac{h^2}{12} * b \quad [27]$$

$$m_{13} = (Pt_1 - Pt_0) * \frac{h^2}{30} - Pto * \frac{h^2}{12} * b \quad [28]$$

Avec

$$m_{21} = -m_{12}$$

$$m_{34} = -m_{43}$$

Les équations [25], [26], [27] et [28] successivement dans [15], [16], [17] et [18] ci-dessus nous donneront les valeurs de a_1 , a_2 , a_3 et a_4 pour lesquels nous déduirons les moments statiques.

2.9.3. Moments de flexion

Les moments de flexion ou les moments isostatiques au milieu des travées du tablier, du radier et des voiles seront donnés par :

- Au niveau du tablier

$$M_{ot} = \frac{P_1 * l^2}{8} \quad [29]$$

- Au niveau du radier ou dalle inférieure

$$M_{or} = -\frac{P_2 * l^2}{8} \quad [30]$$

- Au niveau des voiles

$$M_{ov} = \frac{P_{t0} * h^2}{8} + \frac{(P_{t1} - P_{t0}) * h^2}{16} \quad [31]$$

Les moments maximums en travées et sur appuis équivalent à :

- Au niveau du tablier/dalle supérieure

Appui de gauche :

$$M_{agt} = M_{12} \quad [32]$$

Appui droit :

$$M_{adt} = -M_{21} \quad [33]$$

Au milieu de la travée 1-2, nous aurons :

$$M_{tt} = \frac{(M_{agt} + M_{adt})}{2} + M_{ot} \quad [34]$$

- Au niveau du radier/inférieure

Appui gauche :

$$M_{agr} = M_{87} \quad [35]$$

Appui droit :

$$M_{adr} = -M_{78} \quad [36]$$

Au milieu de la travée 3-4, nous aurons :

$$M_{tr} = \frac{(M_{agr} + M_{adr})}{2} + M_{or} \quad [37]$$

- Au niveau de chacune des voiles
Appuis inférieurs :

$$M_{aiv} = M_{31} \quad [38]$$

$$M_{aiv} = M_{42} \quad [39]$$

Appuis supérieurs :

$$M_{asv} = -M_{13} \quad [40]$$

$$M_{asv} = -M_{24} \quad [41]$$

Au milieu des travées des voiles, nous aurons :

$$M_{tv} = \frac{(M_{aiv} + M_{asv})}{2} + M_{ov} \quad [42]$$

2.9.4. Réactions aux appuis

Les réactions à chaque appui sont données par :

- Au niveau du tablier/dalle supérieure :
Appui gauche

$$R_{agt} = \frac{(M_{adt} - M_{agt})}{l} + \frac{P \cdot l}{2} \quad [43]$$

Appui droit

$$R_{adt} = \frac{(M_{agt} - M_{adt})}{l} + \frac{P \cdot l}{2} \quad [44]$$

- Au niveau du radier
Appui gauche

$$R_{agr} = \frac{(M_{adr} - M_{agr})}{l} - \frac{P \cdot l}{2} \quad [45]$$

Appui droit

$$R_{adr} = \frac{(M_{agr} - M_{adr})}{l} - \frac{P \cdot l}{2} \quad [46]$$

Les efforts de compression ou efforts normaux dans les voiles seront donnés par :

Voile de gauche

$$V_{gch} = R_{agt} - R_{agr} \quad [47]$$

Voile de droite

$$V_{droit} = R_{agt} - R_{agr} \quad [48]$$

Les combinaisons possibles aux Etats limites, Ultimes et de Service sont reprises dans le tableau 2-1 suivant:

Tableau 2-1 : Combinaisons aux Etats Limites

ELU	ELS
1,35*G	G
Note : Les charges d'exploitations n'ont pas été prises en compte dans les calculs, car le tunnel sera complètement enterré.	

2.10. Poussée d'archimède

On appelle Poussée d'Archimède, une force verticale qui tend à s'opposer à un corps immergé dans un fluide qui descend vers le fond et à pousser ce corps vers la surface. Elle est exprimée par :

$$P = \rho * g * V_{eau} \quad [49]$$

Avec

ρ : La masse volumique du liquide exprimée en kg/m³

g : L'accélération de la pesanteur exprimée en m/s²

V_{eau} : Le volume d'eau déplacé exprimé en m³

Tout corps plongé dans un liquide subit de la part de celui-ci une poussée de bas en haut égale au poids du volume de liquide déplacé. Il faut donc tenir compte de cette poussée, vérifier que l'élément de tunnel ne se mette pas à flotter et, dans le cas contraire, calculer une hauteur de béton suffisante pour que son poids puisse s'opposer à la poussée hydrostatique. Le calcul se fera dans le cas de charge le plus défavorable, c'est-à-dire sans charge d'exploitation. [16]

2.11. Conclusion partielle

Cette partie a traité de la démarche entreprise en vue d'arriver aux résultats escomptés. La méthodologie employée, est passée de la conception, phase indispensable dans l'étude d'un

projet, ensuite de la démarche de dimensionnement qui nous aidera à déterminer les sections des armatures et sections de béton à utiliser.

CHAPITRE TROISIEME : PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

3.1.Introduction

Tel que présenté, la conception et dimensionnement des tunnels immergés est particulière pour chaque type de tunnel rencontré. Le présent chapitre fait une présentation des résultats obtenus en donnant les différentes caractéristiques qui conviennent les mieux pour la conception et les sections des différents éléments de structure lors de l'exécution du tunnel immergé à Nzulo.

Le choix des meilleures conditions de faisabilités sera orienté à l'aide des couleurs :

1. La couleur Verte représentera les conditions jugées favorables ;
2. La couleur Jaune représentera les conditions jugées peu favorables ;
3. La couleur Rouge représentera les conditions jugées défavorables et
4. La couleur Noire représentera les conditions jugées très défavorables.

Nous allons présenter les conditions géologiques trouvées sur le site, les caractéristiques du tunnel immergé qui conviennent le mieux à Nzulo, ainsi que les exigences opérationnelles et de sécurité lors des opérations d'exécution et utilisation.

3.2. Conditions géologiques

3.2.1. Informations géotechniques disponibles

Plusieurs sondages ont été effectués dans les années antérieures sur les conditions géologiques du site. Ces études se subdivisent en deux catégories : nous avons d'une part, la détermination des caractéristiques physiques du site et le comportement en cas de séisme d'autre part. Nous nous sommes basés sur des études récentes effectuées en Mars 2002 par le Comité Scientifique International sur les investigations du Lac Kivu qui, dans sa conclusion, indique que toute la cité de Nzulo est recouverte par la roche volcanique issue des très anciennes éruptions volcaniques, et s'enfonce dans le lac Kivu, du côté de Nzulo comme peuvent indiquer les figures 3-1 et 3-2 ci-dessous. [19]

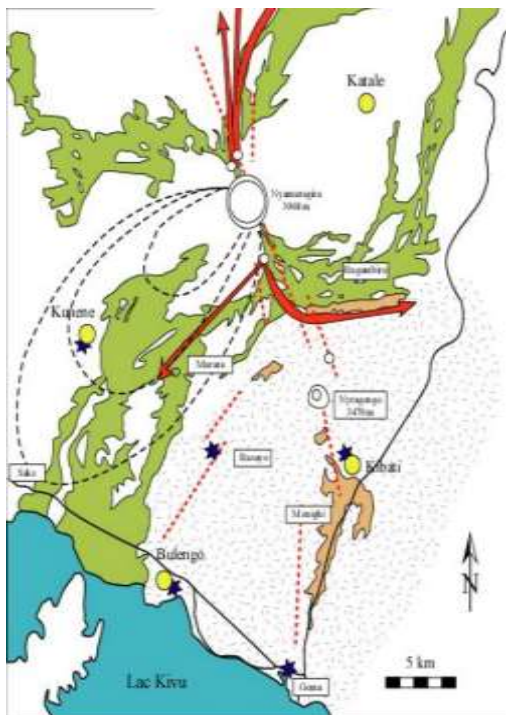


Figure 3-2 : En vert, les roches volcaniques couvrant toute la partie Nord-Ouest de la Ville de Goma et atteignant Nzulo. [19]

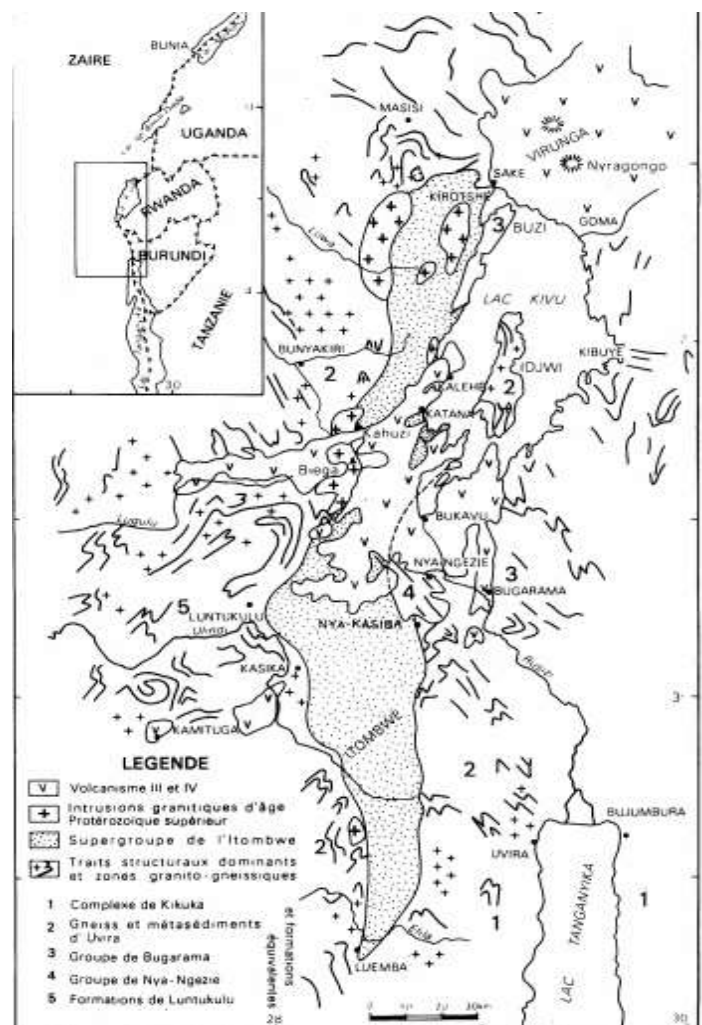


Figure 3-1 : Nzulo, zone présentant une structure rocheuse de Volcanisme III et IV. [24]

La caractéristique des sols rencontrés à Nzulo prend corps dans les sols minéraux bruts sur laves, observés dans toute la région des volcans, au Nord du lac Kivu. Les coulées récentes (avant

1960) sont dépourvues de végétation ; les coulées anciennes, couvertes d'une forêt, présentent déjà une accumulation de matières organiques. [22]

De ce qui précède, les investigations de l'an 2002 [19] renseignent sur la formation géologique sous-marine du lac Kivu en générale, et particulièrement sur les sites touchés par les éruptions volcaniques.

Quant à la détermination du socle du fond marin, le rapport indique que, le fond marin de la côte Nord du Lac Kivu, est constituée d'une roche d'épaisseur 1,20 m, comme indiqué aux figures 3-3 et 3-4 ci-dessous. [19]



Figure 3-4 : Image du fond marin côte Nord du lac Kivu [19]



Figure 3-3 : Fond marin et sédiments de la côte du Lac Kivu, à 25 m de profondeur

3.2.2. Profils du site

Le tunnel est localisé dans la localité de Nzulo et relie celle-ci à la localité de Matanda. Ces deux localités, étant séparées par une étendue d'eau d'environ 1,2 km ; cette étendue d'eau est bordée au Nord par une plaine sur une roche volcanique et au Sud par des escarpements atteignant des hauteurs entre 150 m et 200 m. Le terrain s'élève rapidement au Sud, alors qu'au

Nord le terrain reste relativement bas. Au droit du tunnel immergé projeté, le lac a une largeur de 432 m comme décrit à la figure 3-5 ci-dessous :

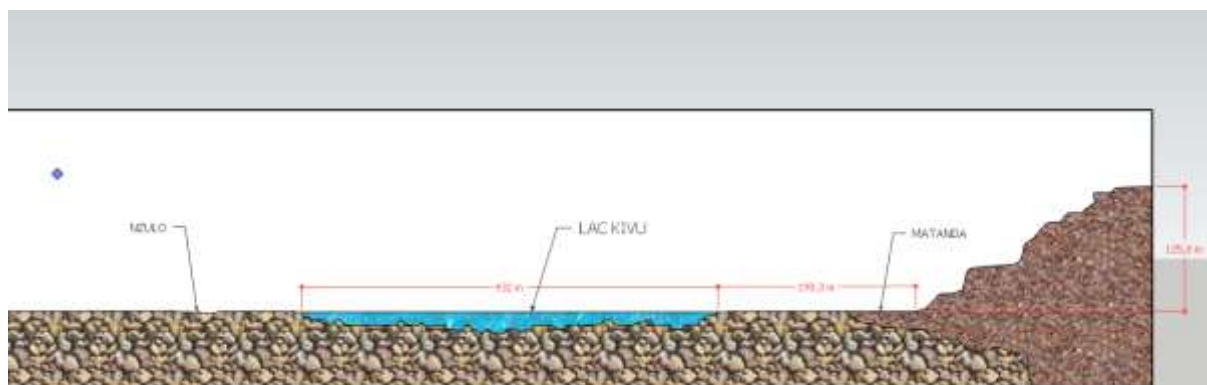


Figure 3-5 : Profil du site

3.3.Choix du tracé

Le tunnel immergé est routier, le choix du tracé (et spécifiquement de la traversée du lac) s'est basé sur les critères suivants :

- Le meilleur raccordement d'avec les tracés routiers préexistants ;
- L'alignement plan du tunnel (c'est-à-dire celui favorisant un accès facile aux deux extrémités du tunnel) ;
- La profondeur des eaux ;
- Etc.

Dans la présente étude, le tracé du tunnel offre une possibilité de raccordement à la voie de distribution venant de la RN2-Nzulo, franchissant le tunnel immergé et donnant une sortie à l'extrémité du tunnel côté Matanda qui devra être raccordée à un nouveau tracé de route et celui d'un tunnel foré qui reliera Matanda et Minova.

Tableau 3-1 : Analyse comparative du choix du tracé

Trajet	Distance de Parcours	Temps de parcours	Observation
Goma-Saké-Minova	45 km	55'0''	
Goma-Nzulo-Minova	34 km	30'0'	

Interprétation: Nous remarquons que la condition jugée favorable est celle du tracé Goma-Nzulo-Minova car réduit non seulement la distance parcourue pour acheminer les marchandises de Minova vers Goma mais également le temps de parcours est réduit, ce qui est très positif pour une vitesse de 60 km/h, dans les mêmes conditions.

3.4.Caractéristiques du tunnel

3.4.1. Implantation du tunnel

Suivant la configuration du site, et après étude et analyse, nous avons choisi de placer le tunnel du côté Nord-Ouest de la cité, à une distance totale de 432 m qui sépare Nzulo de Matanda telle qu'indiquée à la figure 3-6 suivante :



Figure 3-6 : Implantation du tunnel immergé à Nzulo

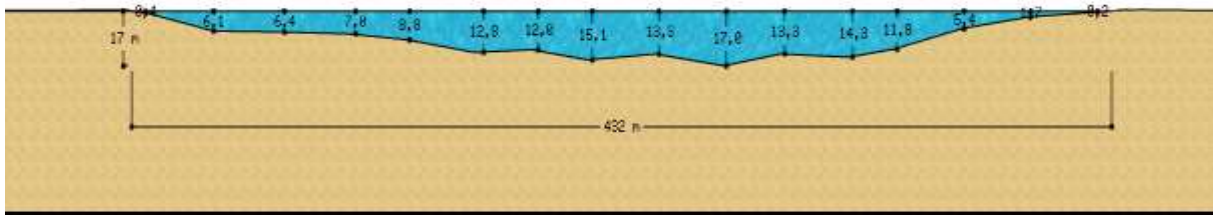


Figure 3-7 : Levées des profondeurs du lac Kivu sur le site de Nzulo

3.4.2. Profondeur du lac

Il en ressort que la profondeur maximale obtenu est de 17 m. Les levées des profondeurs ont été fait tous les 25 – 30 m pour des raisons de vagues. La figure 3-8 suivante, donne le dernier point levé par des méthodes traditionnelles :



Figure 3-8 : Levé et mesure de la profondeur maximale.

3.4.3. Conception Transversale

Le profil en travers d'un tunnel immergé, qui peut adopter des formes rectangulaires, carrées ou circulaires, doit mener à l'obtention d'une forme optimale qui permette de satisfaire les exigences relatives aux conditions de stabilité et de bonne utilisation.

Le Tableau 3-2 : Valeurs de pré dimensionnement3-2, présente les caractéristiques géométriques, résultats du pré dimensionnement du tunnel immergé conçu à Nzulo.

Tableau 3-2 : Valeurs de pré dimensionnement

Dalle supérieure		Voile droit et gauche		Dalle inférieure	
Epaisseur/Hauteur	0,6 m	Epaisseur	0,6 m	Epaisseur/Hauteur	0,6 m

Il en ressort que, la dalle supérieure aura une épaisseur de 0,6 m, de même que la dalle inférieure. Comme, l'épaisseur de la dalle influe celle des voiles, nous adoptons une valeur de 0,6 m comme épaisseur pour les deux voiles. Ceci conduit à adopter un tunnel routier de forme rectangulaire.

Les valeurs caractéristiques du tunnel projeté sont résumées dans le tableau 3-3 suivant :

Tableau 3-3 : Caractéristiques géométriques du tunnel immergé

Désignation	Valeur
Largeur de la voie	3 m
Hauteur libre	5 m
Profondeur maximale des eaux	17 m
Longueur totale du tunnel	620 m
Longueur de l'élément de tunnel le plus long	130 m
Nombre d'éléments de tunnels	5

Le tunnel projeté étant de type routier de classe t6, avec un TMJA (Trafic Moyen Journalier Annuel) de 3 PL/j, la voirie est considérée comme une voirie à faible trafic, constitué d'éléments suivants :

- Deux bandes de circulation de 3 m de largeur pour chaque voie comprenant avec un devers unique de 2% pour la collecte des eaux, et autres produits déversés sur la chaussée en cas d'incidents ;
- Un trottoir du côté gauche de 1m de largeur ;
- Les eaux seront canalisées jusqu'aux points bas du profil en long pour être relevées par un système de pompes aux deux extrémités du tunnel ;
- Les équipements de signalisation et sécurité seront placés selon leur fonction au-dessus de voies de circulation et sur les sections latérales des parois du tunnel dans les espaces hors-chaussée ;

De ce qui précède, en définitif le schéma du profil en travers est présenté à la figure 3-9 ci-dessous :

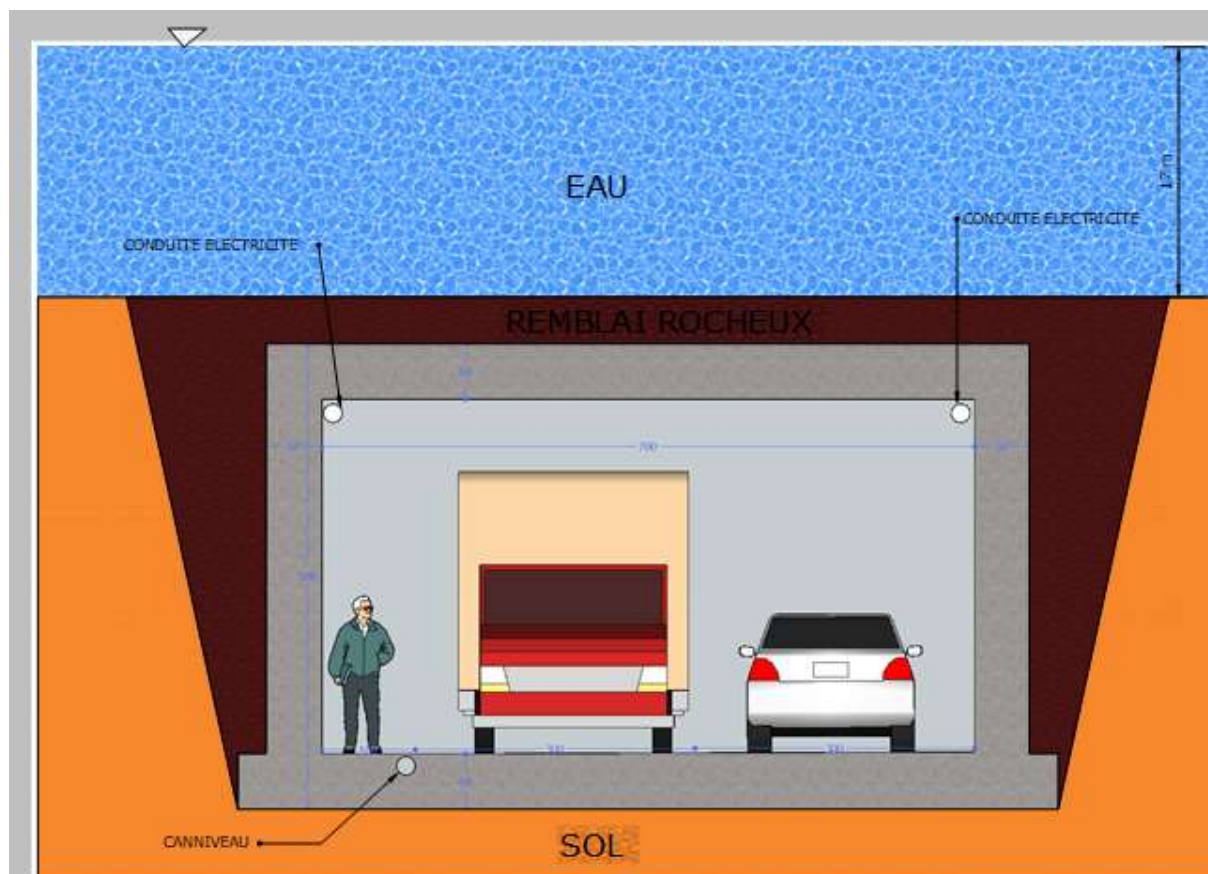


Figure 3-9 : Profil en travers

3.4.4. Conception longitudinale

La coordination du tracé en plan avec le choix du profil en long doit faire l'objet d'un soin particulier dans un projet de tunnel pour favoriser le niveau de confort et de sécurité des usagers. L'effet visuel des changements de pentes en profil en long, aux points hauts par exemple, est un des éléments importants à prendre en compte. Ainsi, pour une vitesse affichée de 60km/h, le tracé du profil en long renseigne :

- Un total de tunnel immergé de 432 m sur 620 m de longueur total de tunnel ;
- 3 éléments de tunnels de 120 m de long chacun ;
- 2 éléments de tunnels de 130 m chacun, constituant ainsi les plus longs éléments de tunnels ;
- 2 ouvrages de raccordement construit en tranchée couverte ;
- La pente est prononcée (+5%).

3.4.5. Ventilation

Le tableau 3-4 de synthèse des dispositions de l'instruction technique annexée à la circulaire 2000-63 [23] suivant, pour les tunnels de longueur supérieur à 300 m, renseigne que les

différentes possibilités du choix d'un système de ventilation pour les tunnels non urbains à trafic faible sont :

Tableau 3-4 : Tableau de synthèse des dispositions techniques de ventilation des tunnels

Longueur	Absence de ventilation	Ventilation longitudinale	Ventilation transversale	Obs.
$300\text{ m} < L < 1000\text{ m}$	Possible	Possible	Possible	
$1000\text{ m} < L < 1500\text{ m}$	Interdit	Possible	Possible	
$1500\text{ m} < L < 3000\text{ m}$	Interdit	Interdit	Possible	
$3000\text{ m} < L$	Interdit	Interdit	Possible	

Interprétation : Notre tunnel immergé à Nzulo, étant d'une longueur totale de 620 m, nous nous retrouvons dans la fourchette $300\text{ m} < L < 1000\text{ m}$; nous avons le libre choix d'utiliser tous les systèmes de ventilation, longitudinale ou transversale. Par ailleurs, pour des raisons économiques, nous optons pour une absence de ventilation, en adoptant une ventilation naturelle.

3.5.Approche de dimensionnement

L'approche de dimensionnement choisie, est celle dite « méthode des rotations ». En effet, cette méthode, dans le dimensionnement des tunnels immergés, présente des avantages tels que :

- Elle facilite la recherche des moments fléchissant, qui sont des inconnues hyperstatiques aux extrémités des poutres ou des barres ;
- Elle est utilisée pour le calcul des structures constituées des barres, généralement droites.

3.5.1. Calculs des sollicitations

Considérant les hypothèses prises sur les matériaux, le tableau 3-5 suivant donne les données d'entrée pour les calculs des sollicitations et moments respectifs :

Tableau 3-5 : Données d'entrée

Données		
Désignation	Valeurs	Unités
$\gamma_{\text{béton}}$	25	kN/m ³
γ_{remblai}	28	kN/m ³

γ_{eau}	10	kN/m³
Epaisseur dalle supérieure	0,6	m
Epaisseur dalle inférieure	0,6	m
Epaisseur des voiles	0,6	m
Profondeur des eaux	17	m
Largeur (b)	1	m
Ka	0,171572875	
Hauteur du tunnel	5	m
Lx (Petite portée)	7,6	m
Ly (Grande portée)	130	m

Les caractéristiques des barres, sont telles que :

I1=I2	0,018	m⁴
k1	0,005142857	N/mm
k2	0,005142857	N/mm

Les sollicitations trouvées sont les charges permanentes sur la structure, de telle sorte que :

Sur dalle supérieure		
Poids propre Dalle supérieure	15	kN/ml
Poids du remblai	16,8	kN/ml
Poids de l'eau	170	kN/ml
Total sur Dalle supérieure	201,8	kN/ml
Sur Voile		
Poussée du remblai	48,04040507	kN/m²
Total voile	48,04	kN/m²
Sur dalle inférieure		
Poids propre Dalle inférieure	15	kN/ml
Total Poids des Voiles	231,8	kN/ml
Total sur Dalle inférieure	246,8	kN/ml

Les moments d'encastrement aux nœuds pour 1 m de largeur d'éléments de tunnels sont donnés par :

m_{12}	-824,02	kNm
m_{21}	824,017	kNm

m_{43}	-1007,8	kNm
m_{34}	1007,77	kNm
m_{31}/m_{42}	-60,051	kNm
m_{13}/m_{24}	60,0505	kNm

De ce qui précède, nous avons obtenu les moments de flexion/moments isostatiques au milieu des travées suivant :

M_{ot} (tablier)	1236,03	kNm/ml
M_{or} (radier)	-1511,7	kNm/ml
$M_{ov1}=M_{ov2}$ (voiles)	75,0631	kNm/ml

D'où, nous déduisons les moments maximums en travées et sur appuis (gauche et droit ; supérieur ou inférieur : pour le cas des voiles) suivants :

TABLIER			
Appui gauche	M_{agt}	-824,02	kNm/ml
Appui droit	M_{adt}	-824,02	kNm/ml
Milieu travée	M_{tt}	412,008	kNm/ml
RADIER			
Appui gauche	M_{agr}	1007,77	kNm/ml
Appui droit	M_{adr}	1007,77	kNm/ml
Milieu travée	M_{tr}	-503,88	kNm/ml
VOILE 1			
Appui sup	M_{asv}	-60,05	kNm/ml
Appui inf	M_{aiv}	-60,05	kNm/ml
Milieu travée	M_{1tv}	15,0128	kNm/ml
VOILE 2			
Appui sup	M_{asv}	-60,05	kNm/ml
Appui inf	M_{aiv}	-60,05	kNm/ml
Milieu travée	M_{2tv}	15,0128	kNm/ml

Les réactions au niveau des appuis ont donné les résultats suivants :

TABLIER			
Appui gauche	R_{agt}	706,3	kN/ml
Appui droit	R_{adt}	706,3	kN/ml

RADIER			
Appui gauche	R_{agr}	-863,8	kN/ml
Appui droit	R_{adr}	-863,8	kN/ml
VOILES			
Voile gauche	V_{gch}	1570,1	kN/ml
Voile droit	V_{droit}	1570,1	kN/ml

Note : Pour le cas des voiles, les réactions aux appuis constituent les efforts normaux, dits efforts de compression.

Tableau 3-6 : Récapitulatifs des sollicitations

Ouvrage	Sollicitations en kNm/ml et kN/ml		Charges G		ELU		
Tablier	Moments fléchissant	Gauche	-824,02	kNm/ml	-1112,42	kNm/ml	-
		Droit	-824,02	kNm/ml	-1112,42	kNm/ml	-
		Milieu	412,0078	kNm/ml	556,211	kNm/ml	-
Radier	Moments fléchissant	Gauche	1007,77	kNm/ml	1360,49	kNm/ml	1
		Droit	1007,77	kNm/ml	1360,49	kNm/ml	1
		Milieu	-503,8831	kNm/ml	-680,242	kNm/ml	-
Voile	Moments fléchissant	Inférieur	-60,05	kNm/ml	-81,0682	kNm/ml	
		Supérieur	-60,05	kNm/ml	-81,069	kNm/ml	
		Milieu	15,01232	kNm/ml	20,2666	kNm/ml	
	Effort normal		1570,1	kN	2119,63	kN	1

Interprétation : Nous constatons que les moments aux appuis gauche et droits, tant que la structure restera gauche et à droite. Les moments fléchissant en travée (au milieu) étant différents aux moments sur appuis, nous maximaux en travée et sur appuis pour le cas de la dalle supérieure et inférieure ainsi que les efforts normaux r les aciers dans les différentes parties de l'ouvrage, pour une facilité de mise en œuvre, ainsi que pour nous p d'armatures ; d'où un gain en matériau.

3.5.2. Calculs des sections d'armatures

- Calcul des armatures du tablier/dalle supérieure

Les calculs seront conduits comme une poutre rectangulaire, de largeur $b=1\text{m}$. Les calculs présentés sous tableau Excel, ont donné les résultats suivants :

- A mi travée

PROJET : Etude en vue du dimensionnement d'un tunnel immergé à Nzulo		
OUVRAGE : TUNNEL IMMERGE		
Dressé par : Joshua Muhindo		

Données de calcul		
Dimensions caractéristiques	Largeur de la poutre	$b = 1,00 \text{ m}$
	Hauteur utile des aciers tendus	$d = 0,54 \text{ m}$
	Hauteur utile des aciers comprimés (si nécessaire)	$d' = 0,05 \text{ m}$
Contrainte de l'acier utilisé		$F_e = 500 \text{ MPa}$
Contrainte du béton à 28 jours		$F_{c28} = 35 \text{ MPa}$
Moment ultime	$1.35 G + 1.5 Q$	$M_u = 0,556211 \text{ MN.m}$
Moment réduit ultime		$\mu_l = 0,371$
Conditions de fissuration		TP TP

Calcul des contraintes		
Contrainte de compression du béton à l'ELU	$(0.85 \times F_{c28}) / 1.5$	$F_{bu} = 19,83 \text{ MPa}$
Contrainte de traction des aciers	$(F_e / 1.15)$	$F_{su} = 434,78 \text{ MPa}$
Contrainte de compression du béton à l'ELS	$0.6 \times F_{c28}$	$\sigma_{bc} = 21 \text{ MPa}$
Résistance du béton en traction	$0.6 + (0.06 \times F_{c28})$	$F_{t28} = 2,70 \text{ MPa}$

Calcul des moments réduits		
Moment ultime réduit	$M_u / (b \times d^2 \times F_{bu})$	$\mu_\mu = 0,096$
Etat limite de compression du béton	Si $\mu_\mu < \mu_l \Rightarrow$	Système d'armatures retenu
	Pas d'aciers comprimés	
	Si $\mu_\mu > \mu_l \Rightarrow$	
	Aciers comprimés nécessaires	Pas d'aciers comprimés

Calcul des paramètres caractéristiques de la section		
Coefficient de la fibre neutre	$1.25 \times (1 - (1 - (2 \times \mu_\mu))^{1/2})$	$\alpha = 0,127$
Ordonnée de la fibre neutre	$\alpha \times d$	$y = 0,07 \text{ m}$
Bras de levier du couple interne	$d \times (1 - (0.4 \times \alpha))$	$Z_b = 0,51 \text{ m}$

Détermination de la section théorique des aciers tendus		
Section théorique d'acier	$M_u / (Z_b \times F_{su})$	$A_{st} = 24,95 \text{ cm}^2$

Choix des sections commerciales des tendus			
Lit n° 1	Choix :	10 HA 14	Ast 1 = 15,39 cm ²
Lit n° 2	Choix :	10 HA 14	Ast 2 = 15,39 cm ²
Lit n° 3	Choix :		Ast 3 = cm ²

Section réelle d'acier	Ast 1 + Ast 2 + Ast 3		Ast = 30,78 cm ²
Aciers de peau	Si h > 70 cm ; (3 cm ² x hauteur (m))		Choix :

- Appui gauche et droit

Les moments aux différents appuis, gauche et droits, étant les même, nous allons calculer qu'un seul appui et référencer les résultats obtenus vers l'autre appui.

PROJET : Etude en vue du dimensionnement d'un tunnel immergé à Nzulo

OUVRAGE : TUNNEL IMMERGE

Dresser par :

Données de calcul			
Dimensions caractéristiques	Largeur de la poutre	b =	1,00 m
	Hauteur utile des aciers tendus	d =	0,54 m
	Hauteur utile des aciers comprimés (si nécessaire)	d' =	0,05 m
Contrainte de l'acier utilisé		Fe =	500 MPa
Contrainte du béton à 28 jours		Fc28 =	35 MPa
Moment ultime	1.35 G + 1.5 Q	Mu =	1,11242 MN.m
Moment réduit ultime		μl =	0,371
Conditions de fissuration		TP	TP

Calcul des contraintes			
Contrainte de compression du béton à l' ELU	(0.85 x Fc28) / 1.5	Fbu =	19,83 MPa
Contrainte de traction des aciers	(Fe / 1.15)	Fsu =	434,78 MPa
Contrainte de compression du béton à l' ELS	0.6 x Fc28	σbc =	21 MPa
Résistance du béton en traction	0.6 + (0.06 x Fc28)	Ft28 =	2,70 MPa

Calcul des moments réduits			
Moment ultime réduit	Mu / (b x d ² x Fbu)	μμ =	0,192
Etat limite de compression du béton	si μμ < μl ==>	Système d'armatures retenu	
	Pas d'aciers comprimés		
	si μμ > μl ==>		
	Aciers comprimés nécessaires	Pas d'aciers comprimés	

Calcul des paramètres caractéristiques de la section			
Coefficient de la fibre neutre	1.25 x (1 - (1 - (2 x μμ)) ^{1/2})	α =	0,221
Ordonnée de la fibre neutre	α x d	y =	0,12 m
Bras de levier du couple interne	d x (1 - (0.4 x α))	Zb =	0,59 m

Détermination de la section théorique des aciers tendus			
---	--	--	--

Section théorique d'acier	$Mu / (Z_b \times F_{su})$	Ast = 43,53 cm ²
Choix des sections commerciales des tendus		
Lit n° 1	Choix : 12 HA 16	Ast 1 = 24,13 cm ²
Lit n° 2	Choix : 12 HA 16	Ast 2 = 24,13 cm ²
Lit n° 3	Choix :	Ast 3 = cm ²

		-
Section réelle d'acier	Ast 1 + Ast 2 + Ast 3	Ast = 48,26 cm ²
Aciers de peau	Si h > 70 cm ; (3 cm ² x hauteur (m))	Choix :

- Calculs des armatures de la dalle inférieure

- A mi travée :

PROJET : Etude en vue du dimensionnement d'un tunnel immergé à Nzulo
OUVRAGE : TUNNEL IMMERGE
Dresser par :

Données de calcul		
Dimensions caractéristiques	Largeur de la poutre	b = 1,00 m
	Hauteur utile des aciers tendus	d = 0,54 m
	Hauteur utile des aciers comprimés (si nécessaire)	d' = 0,05 m
Contrainte de l'acier utilisé		Fe = 500 MPa
Contrainte du béton à 28 jours		Fc28 = 35 MPa
Moment ultime	1.35 G + 1.5 Q	Mu = 0,68024 MN.m
Moment réduit ultime		$\mu_l = 0,371$
Conditions de fissuration		TP TP

Calcul des contraintes		
Contrainte de compression du béton à l' ELU	$(0.85 \times F_{c28}) / 1.5$	Fbu = 19,83 MPa
Contrainte de traction des aciers	$(Fe / 1.15)$	Fsu = 434,78 MPa
Contrainte de compression du béton à l' ELS	$0.6 \times F_{c28}$	$\sigma_{bc} = 21$ MPa
Résistance du béton en traction	$0.6 + (0.06 \times F_{c28})$	Ft28 = 2,70 MPa

Calcul des moments réduits		
Moment ultime réduit	$Mu / (b \times d^2 \times F_{bu})$	$\mu_l = 0,118$
Etat limite de compression du béton	si $\mu_l < \mu_l \Rightarrow$	Système d'armatures retenu
	Pas d'aciers comprimés	
	si $\mu_l > \mu_l \Rightarrow$	
	Aciers comprimés nécessaires	Pas d'aciers comprimés

Calcul des paramètres caractéristiques de la section		
Coefficient de la fibre neutre	$1.25 \times (1 - (1 - (2 \times \mu_l))^{1/2})$	$\alpha = 0,139$
Ordonnée de la fibre neutre	$\alpha \times d$	y = 0,08 m
Bras de levier du couple interne	$d \times (1 - (0.4 \times \alpha))$	Zb = 0,57 m

Détermination de la section théorique des aciers tendus		
--	--	--

Section théorique d'acier	$Mu / (Zb \times Fsu)$	Ast = -27,44 cm ²
Choix des sections commerciales des tendus		
Lit n° 1	Choix : 10 HA 14	Ast 1 = 15,39 cm ²
Lit n° 2	Choix : 10 HA 14	Ast 2 = 15,39 cm ²
Lit n° 3	Choix :	Ast 3 = cm ²
		----- -
Section réelle d'acier	Ast 1 + Ast 2 + Ast 3	Ast = 30,78 cm ²
Aciers de peau	Si h > 70 cm ; (3 cm ² x hauteur (m))	Choix :

- Appui gauche et droit

Les moments aux différents appuis, gauche et droits, étant les même, nous allons calculer qu'un seul appui et référencer les résultats obtenus vers l'autre appui.

PROJET : Etude en vue du dimensionnement d'un tunnel immergé à Nzulo

OUVRAGE : TUNNEL IMMERGE

Dresser par :

Données de calcul		
Dimensions caractéristiques	Largeur de la poutre	b = 1,00 m
	Hauteur utile des aciers tendus	d = 0,54 m
	Hauteur utile des aciers comprimés (si nécessaire)	d' = 0,05 m
Contrainte de l'acier utilisé		Fe = 500 MPa
Contrainte du béton à 28 jours		Fc28 = 35 MPa
Moment ultime	1.35 G + 1.5 Q	Mu = 1,360485 MN.m
Moment réduit ultime		μ_l = 0,371
Conditions de fissuration		TP TP

Calcul des contraintes		
Contrainte de compression du béton à l' ELU	$(0.85 \times Fc28) / 1.5$	Fbu = 19,83 MPa
Contrainte de traction des aciers	$(Fe / 1.15)$	Fsu = 434,78 MPa
Contrainte de compression du béton à l' ELS	$0.6 \times Fc28$	σ_{bc} = 21 MPa
Résistance du béton en traction	$0.6 + (0.06 \times Fc28)$	Ft28 = 2,70 MPa

Calcul des moments réduits		
Moment ultime réduit	$Mu / (b \times d^2 \times Fbu)$	μ_μ = 0,235
Etat limite de compression du béton	Si $\mu_\mu < \mu_l \Rightarrow$ Pas d'aciers comprimés Si $\mu_\mu > \mu_l \Rightarrow$ Aciers comprimés nécessaires	Système d'armatures retenu Pas d'aciers comprimés

Calcul des paramètres caractéristiques de la section		
Coefficient de la fibre neutre	$1.25 \times (1 - (1 - (2 \times \mu_\mu))^{1/2})$	α = 0,340
Ordonnée de la fibre neutre	$\alpha \times d$	y = 0,18 m
Bras de levier du couple interne	$d \times (1 - (0.4 \times \alpha))$	Zb = 0,47 m

Détermination de la section théorique des aciers tendus		
--	--	--

Section théorique d'acier	$\mu_u / (Z_b \times F_{su})$	Ast = 67,08 cm ²
Choix des sections commerciales des tendus		
Lit n° 1	Choix : 12 HA 25	Ast 1 = 37,70 cm ²
Lit n° 2	Choix : 12 HA 25	Ast 2 = 37,70 cm ²
Lit n° 3	Choix :	Ast 3 = cm ²

Section réelle d'acier	Ast 1 + Ast 2 + Ast 3	Ast = 75,40 cm ²
Aciers de peau	Si $h > 70 \text{ cm}$; (3 cm ² x hauteur (m))	Choix :

○ **Calcul des armatures au niveau des voiles**

Nœuds inférieurs et supérieurs	ELU
μ_u	81,0682037 kNm
N_u	2119,63494 kN
$e = \mu_u / N_u$	0,0382463 m
$M = \mu_u + N_u \cdot e_{xc}$	610,97694 kNm
$\mu = M / (b \cdot d^2 \cdot f_b)$	0,10564321
$\alpha = 1,25 \cdot (1 - (1 - 2 \cdot \mu)^{0,5})$	0,13988065
$Z = d \cdot (1 - 0,40 \cdot \alpha)$	0,50978578
$A_u = (M / Z - N_u) / \sigma_s$	21,1861631 cm ²

D'où le choix de 2 lits d'armatures de 10 HA 12.

Note : Les moments étant les même au niveau des appuis inférieurs et supérieurs, nous allons adopter la même section d'armatures.

Milieu de la travée	ELU
μ_u	20,2666276 kNm
N_u	2119,63494 kN
$e = \mu_u / N_u$	0,00956138 m
$M = \mu_u + N_u \cdot e_x$	550,175363 kNm
$\mu = M / (b \cdot d^2 \cdot f_b)$	0,09513009
$\alpha = 1,25 \cdot (1 - (1 - 2 \cdot \mu)^{0,5})$	0,1251807
$Z = d \cdot (1 - 0,40 \cdot \alpha)$	0,51296097
$A_u = (M / Z - N_u) / \sigma_s$	24,0829952 cm ²

D'où le choix de 2 lits d'armatures de 11 HA 12.

Tableau 3-7 : Récapitulatif des armatures

OUVRAGE	Sollicitations en kN/ml		ELU	ELS
DALLE SUPERIEURE	MOMENT FLECHISSANT	GAUCHE	-1112,42301	-824,02
		DROITE	-1112,42333	-824,02
		MILIEU	556,2105797	412,01
DALLE INFERIEURE	MOMENT FLECHISSANT	GAUCHE	1360,485232	1007,77
		DROITE	1360,485305	1007,77
		MILIEU	-680,242232	-503,88
VOILE	MOMENT FLECHISSANT	INFERIEUR	-81,0682037	-60,05
		SUPERIEUR	-81,0690153	-60,05
		MILIEU	20,26662758	15,01
	EFFORT NORMAL		2119,634943	1570,10

3.5.3. Evaluation des coûts

De ce qui précède, nous allons évaluer les coûts des différentes quantités de matériaux (béton et acier) trouvées précédemment. L'évaluation des coûts sera faite par un élément de tunnel, les calculs pourront être multipliés par le nombre total d'éléments de tunnels dont on dispose. Ainsi le tableau suivant, présente les éléments dimensionnés :

Tableau 3-8 : Evaluation des coûts

Qté	Unité	Désignation	PU	PT
408	Tonnes	Bars de 12	1200 \$	489 600 \$
160	Tonnes	Bars de 14	1200 \$	192 000 \$
487	Tonne	Bars de 16	1200 \$	584 400 \$
487	Tonnes	Bars de 25	1200 \$	584 400 \$
Coût d'armatures pour 1 élément de tunnel				1 850 400 \$
Coût d'armatures pour 5 éléments de tunnels				9 252 000 \$
9360	M ³	Béton	300 \$	2 808 000 \$
Coût du Béton				2 808 000 \$
Cout total BA				12 060 000 \$

Nous remarquons que la prise en compte des moments aux appuis ainsi qu'en travée, nous a conduit à des choix de sections d'armatures différentes, qui d'ailleurs nous permettent une économie en termes de matériaux à utiliser. Cette méthode de dimensionnement nous amène à faire un choix économique des matériaux pour différentes sections d'armatures.

3.6.Vérification de la condition de flottaison

Soit $\rho_l = 1000 \text{ kg/m}^3$ et $\rho_c = 2500 \text{ kg/m}^3$; respectivement la masse volumique de l'eau et celle du béton armé. Et $V_c = V_l$ (Volume total du tunnel qui est égal au volume total du liquide déplacé V_l).

En appliquant le théorème d'Archimède, l'élément de tunnel va couler si le Poids P_c du tunnel est supérieur à la Poussée F . D'où :

$$P_e = \rho_c * V_c * g > \rho_l * V_l * g$$

De ce qui précède, $P_e > \text{Poussée } F$, d'où le tunnel coulera.

3.7.Conclusion Partielle

Ce dernier chapitre a présenté les résultats de la conception ; avec un accent particulier sur les paramètres importants à prendre en compte notamment : le choix du béton armé comme matériau de construction au vu de sa grande disponibilité dans la région et la profondeur maximale du fond marin trouvé de 17 m, qui oriente le choix de l'alignement plan du tunnel ainsi que du profil en long du tunnel ; les résultats de la méthode de calcul employée pour la détermination des sections d'éléments de structures, qui a conduit à un choix rationnel d'armatures correspondantes, pour chuter par une vérification de flottaison du tunnel lors de son implantation.

CONCLUSION GENERALE

Au terme de cette recherche portant sur l'étude en vue du dimensionnement d'un tunnel immergé reliant la Province du Nord Kivu à celle du Sud Kivu via Nzulo, nous avons voulu débattre une question sensible de faisabilités techniques conduisant à un modèle de conception et la détermination des sections d'éléments structuraux, dalles et voiles.

C'est pour cette raison que nous avons jugé important de concevoir un projet d'implantation dans un cadre particulier, qui favorise les échanges économiques entre les 2 provinces en réduisant les trajets et en désengorgeant la route Goma-Saké-Minova sujette à des accidents du aux multiples courbures.

L'objectif était de mener une étude de faisabilité de la conception et du dimensionnement d'un tunnel immergé à Nzulo. C'est ainsi que nos préoccupations principales consistaient à identifier les principaux paramètres à prendre en compte pour arriver à concevoir un tunnel immergé à Nzulo, et présenter une approche de dimensionnement adapté au contexte du site.

Alors que l'étude des faisabilités liées à la conception et au dimensionnement d'un tunnel immergé nécessite une minutieuse étude d'impacts environnementaux devant répondre aux exigences locales du milieu, nous avons fait usage des méthodes et techniques telles que : la méthode documentaire, les interviews, méthode analytique (pour les calculs), les descentes sur terrain et la méthode expérimentale.

Le premier chapitre a traité des généralités sur les tunnels immergés, le second de l'approche méthodologique pour l'obtention des résultats et le troisième a soulevé les résultats des études menées notamment la conception et le dimensionnement.

Cela étant, après analyse des données et interprétation de résultats, nous avons constaté ce qui suit :

- Une bonne conception d'un tunnel immergé à Nzulo doit nécessairement impliquer les paramètres profondeur du fond marin, et prendre en compte le béton armé comme matériau de base au vu de sa disponibilité dans la région.
- L'approche de dimensionnement par la méthode de rotation des nœuds, est la mieux adaptée car elle rend plus aisée les calculs des moments fléchissant aux extrémités ou aux appuis, d'où un choix bien déterminé d'armatures à utiliser.

Nous avons donc conçu un tunnel immergé long de 432 m, sur un total de 620 m de tunnel à 17 m de profondeur de la surface du lac et constitué de 5 caissons (éléments de tunnels) dont 2 d'une longueur de 130 m et les 3 autres de longueur 120 m, doté de 2 bandes de circulation de 3 m chacun et un trottoir pour le service de 1 m. Le coût global du béton armé, c'est-à-dire, des sections de béton et armatures trouvées, est évalué à 12 060 000 \$.

Compte tenu des résultats escomptés, l'hypothèse de la détermination des meilleures conditions de faisabilité technique d'implantation d'un tunnel immergé à Nzulo est vérifiée et garantit aux usagers des bonnes conditions d'exploitation du tunnel.

Nous affirmons n'avoir pas recensé tous les aspects relatifs à l'analyse et l'étude de faisabilités d'un projet de tunnel immergé à Nzulo, mais cette contribution demeure manifeste dans le domaine de l'ingénierie. Cependant, aux futurs chercheurs de creuser un peu plus en profondeur sur les aspects géotechniques, et économiques. Quant à nous, nous restons ouverts à toutes les suggestions, recommandations qui seront formulées à l'égard de ce travail pour éliminer les lacunes qu'il contiendrait.

BIBLIOGRAPHIE

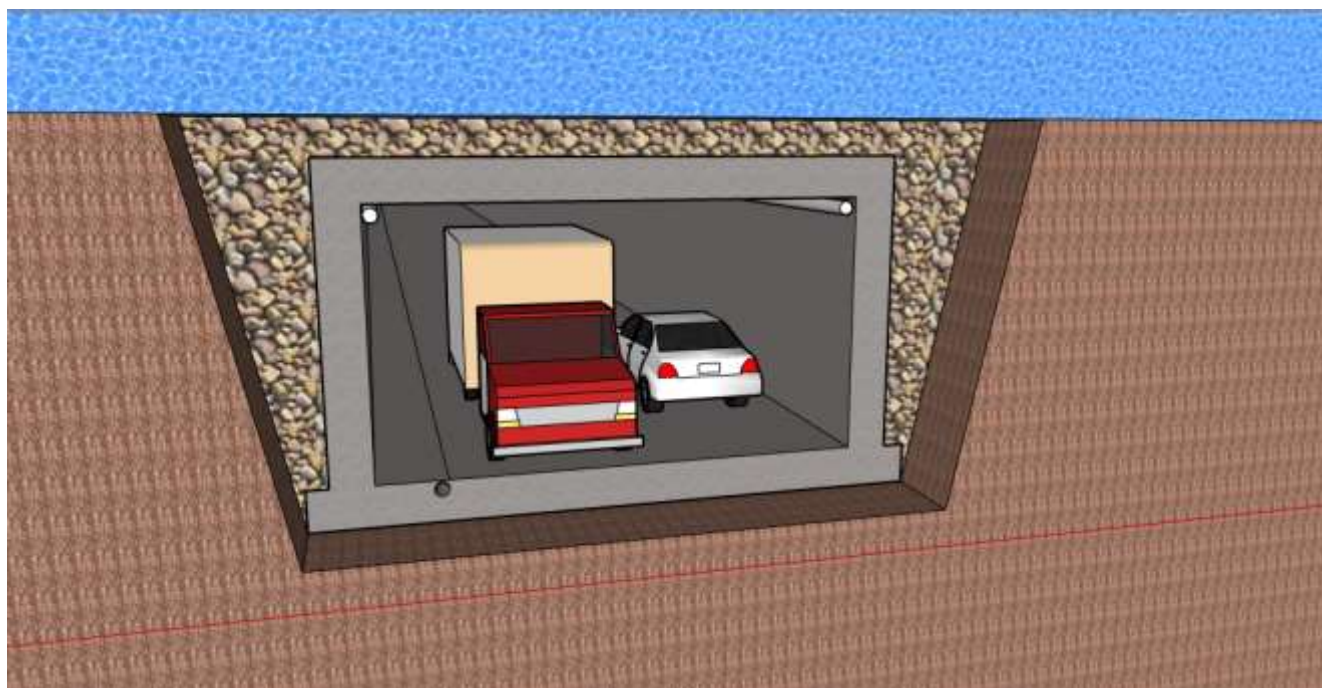
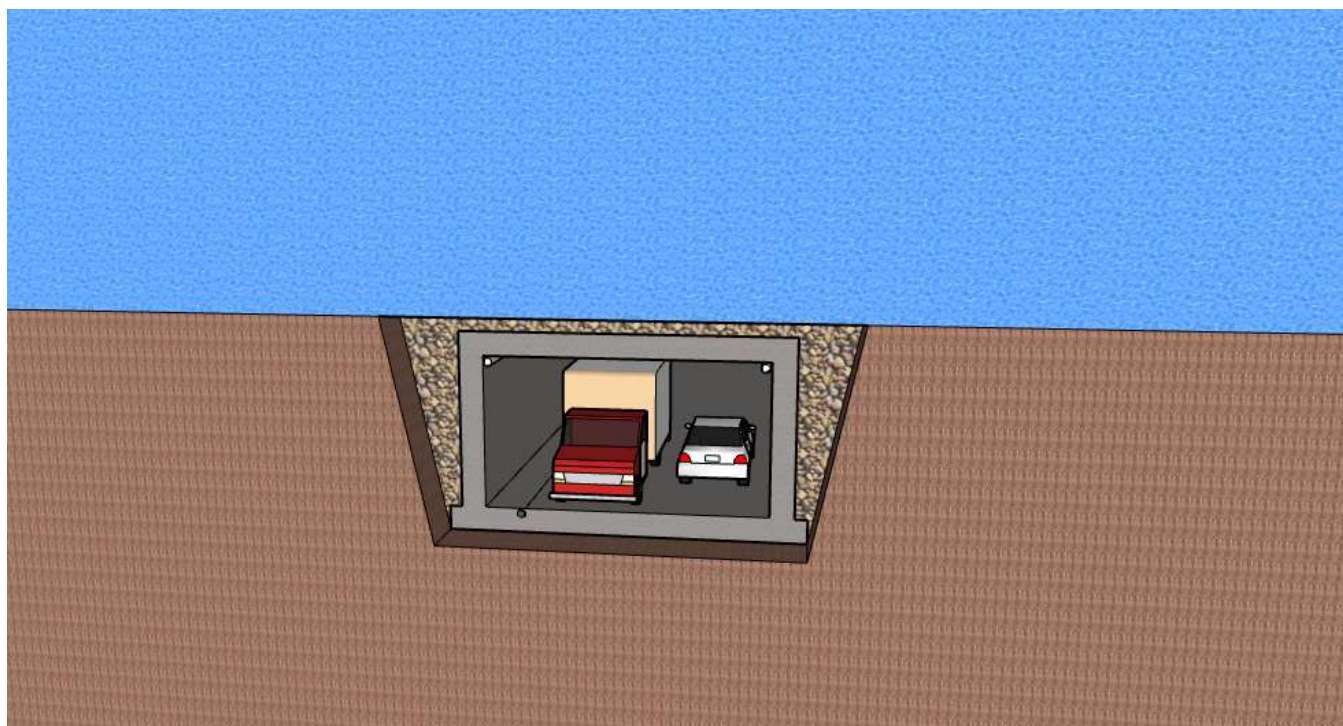
- [1] D. B. f. Zohra, Polycopié de cours et exercices : Tunnels et Ouvrages Souterrains, Université 8 Mai 1945 GUELMA.
- [2] [En ligne]. Available: [be-gph.fr/Faire une étude de structure](http://be-gph.fr/Faire_une_étude_de_structure).
- [3] I. EGELI, Dynamic Analysis of Immersed Tunnel in Izmir, Turkey: Usak University, 2017.
- [4] C. B. Paterné, Calcul des tunnels par éléments finis de poutre et de coque : cas du tunnel routier Place de l'indépendance-Nyawera, ville de Bukavu. Mémoire, Goma: FSTA, ULPGL, 2019-2020.
- [5] D. B. F. Zohra, Tunnels et Ouvrages Souterrains, Algerie, 2020.
- [6] I. R. MALCOR, Le Tunnel sous la Manche, 1960.
- [7] M. L. H. Y. a. X. L. Weilin Lin, "Design of Immersed Tunnel and How we research Submerged floating Tunnel," IntechOpen, China, 2019.
- [8] J. P. T. e. B. R. Georges Pilot, Ouvrages de Génie Civil français dans le monde: Tunnels 1958-2015, Paris: Ingénieurs et Scientifiques de France, 2016.
- [9] Tribune, "Immersed Tunnels - a better way to cross waterways?," IMMersed AND FLOATING TUNNELS, pp. 1-18, Mai 1999.
- [10] "Immersed Tunnels," in Delta Tunnelling Symposium, Amsterdam, 1978.
- [11] S. G. a. S. Sasaki, "Quality in ready-mixed concrete - A case study on specialised marine concreting in Singapore," in 23rd conference on our world in concrete and structures, Singapore, 1998.
- [12] WPS. [En ligne]. Available: <http://www.wps.com>.
- [13] P. GUIRAUD, «Solutions Béton,» Les ouvrages en Béton en site maritime, pp. 1-8, 2016.

- [14] B. d. c. d. Localité, «Rapport Annuel,» Bureau Groupement Kamuronza, Village de Nzulo, 2019.
- [15] «Infociments,» Mai 2019. [En ligne]. Available: <http://www.infociments.fr>. [Accès le 12 Août 2021].
- [16] A. A. Kane, Conception et dimensionnement en BA d'un immeuble, de haut de gamme, à vocation d'habitation, sis à Dakar, Dakar: Université Cheik Anta Diop de Dakar, 2005-2006.
- [17] Principes de prédimensionnements.
- [18] «Aide Contextuelle GEO5,» Fine Software, [En ligne]. Available: <http://www.finesoftware.fr>. [Accès le Octobre 2021].
- [19] P. M. HALBWACHS, «Investigations in Lake Kivu after Nyiragongo Eruption of January 2002, Specific study of the impact of the Sub-water lava inflow on the Lake stability,» European Community Humanitarian Office - ECHO, Paris, 2002.
- [20] R. F. Z. Miloudi M, Etude dynamique non linéaire de l'interaction sol-structure, Mémoire Master, Université de Tlemcen, 2014.
- [21] E. Yirdon, Dimensionnement hydraulique d'un ouvrage de franchissement sur l'axe Botou-Boulel dans la région Est du Burkina Faso, Ouagadougou, 2010-2012.
- [22] C.SYS, Cartes des sols et de la végétation du Congo Belge et du Ruanda-Urundi, Bruxelles: I.N.E.A.C., 1960.
- [23] Dossier pilotes des tunnels : ventilation, France-Paris: Centre d'études des tunnels - CEDEX, 1998.
- [24] M. VILLENEUVE, Les formations précambriennes antérieures ou rattachées au Supergroupe de l'Itombwe au Kivu Oriental et Méridional, Bruxelles: Bulletin Belge de Géologie, 1980.
- [25] I. E. V. Le Khac, Ponts cadres et portiques: guide de conception, 1992.
- [26] K. Bekarlar, Steel–Concrete–Steel Sandwich Immersed Tunnels, Rotterdam, 2016.

- [27] «Construction et Entretien des petits ports de p^héche et débarcadères de village,» 1996.
[En ligne]. Available: <http://www.fao.org>. [Accès le Août 2021].
- [28] R. T. e. B. Eldjouzi, Dimensionnement des voiles en BA - Documents Génie Civil.
- [29] O. Gagliardini, Cours de Béton Armé, Grenoble 1, 2004.

ANNEXES

1. TUNNELEN PROJECTION



2. NZULO



3. POIDS AYANT SERVI POUR MESURER LA PROFONDEUR



4. ETUDE DU MILIEU

