RÉPUBLIQUE DÉMOCRATIQUE DU CONGO

UNIVERSITÉ LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS

« ULPGL/GOMA »



B.P 368 Goma

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

Département de Génie Civil

ÉTUDE DE FAISABILITÉ D'UNE VOIE FERRÉE ENTRE LE ROND-POINT CCLK ET LA GRANDE BARRIÈRE

Mémoire de Licence présenté et défendu en vue de l'obtention du Diplôme de Bachelor en Sciences de l'Ingénieur.

Par **MUSHOBORA BINJA**

Directeur **: Prof. Dr. Ir. BISHWEKA Chérif**

Année académique 2022-2023

Epigraphe

'Savoir faire c'est une chose. Savoir ce qu'il ne faut pas faire, c'est presque aussi important.'

MARCEL BLEUSTTEIN-BLANCHET

Dédicace

Ce travail est dédié à toute la communauté d'Ingénieurs, ainsi qu'à la grande famille MUSHOBORA.

MUSHOBORA BINJA

Remerciements

Nous remercions principalement l'Eternel Dieu de nous avoir permis de rédiger ce présent travail, qui par sa grâce nous donne le souffle de vie et la force nécessaire pour la réalisation de ce travail. À lui revient en premier lieu l'expression de notre très grande gratitude.

Au Professeur BISHWEKA CHERIF d'avoir accepté la direction de ce travail.

Nous remercions aussi les autorités de l'Université Libre des Pays des Grands Lacs, à celles de la Faculté des Sciences et Technologies plus particulièrement, pour leur accompagnement scientifique au cours de l'élaboration de ce travail.

À la grande famille MUSHOBORA qui nous prend toujours en charge dans toutes nos perspectives d'études et recherches scientifiques, nos parents BADESIRE MUSHOBORA Didace et Julienne FAIDA BUROKO ; ainsi qu'à nos tuteurs ici à Goma : le couple Henry BORA-UZIMA KABASHA et Joséphine NSIMIRE MUKANIRE.

À notre cousin Grâce KIKA BONANE et nos amis ALINIRHU MASIRIKA Adrien, KAMBALE TAVULYANDANDA Emery, qui ont beaucoup contribué sur l'évolution en bien de ce travail ; nos reconnaissances à votre égard ne finiront jamais car vous nous avez montré encore une fois de plus que la famille et l'amitié comptent beaucoup et cet amour vrai existe encore.

À nos amis, nos camarades ainsi qu'à tous ceux qui ont de près ou de loin contribué à la réalisation de ce travail ; recevez ici notre expression de reconnaissance.

Résumé

La ville de Goma, située dans l'Est de la République Démocratique du Congo, a connu une croissance rapide de sa population ces dernières années. Cette croissance implique une demande en infrastructure, qui, l'état des infrastructures routières nous a boosté à nous tourner vers les voies ferrées et dont a fait l'objet de notre recherche **: « Etude de faisabilités d'une voie ferrée entre le rond-point CCLK et la Grande Barrière ».** L'objectif global de ce travail est de concevoir un projet techniquement admissible et financièrement acceptable. Cependant, nous avions effectué quelques études préliminaires nous permettant à nous prononcer sur certains points comme : le choix des sols de plateforme, le choix du type de rails et celui des traverses. Ainsi, la classe du sol retenue pour la plateforme est une plateforme P2, les traverses seront en béton et les rails choisis sont les rails standard de 60kg/m. Une méthode analytique nous a permis de dimensionner notre voie et nous avons retenu une structure avec une couche de forme de 0,35 m, une couche de fondation de 0,18 m, une couche de sous-ballast de 0,20 m et une couche de ballast de 0,30 m. seul la couche de forme est en granulats non traités, mais les autres couches les granulats sont bien gradués. Enfin, nous avons effectué une étude portant sur l'estimation du coût de construction et il s'élève à un montant de vingt millions deux cent vingt-huit mille six cent trois dollars américains et trente-six cents (20 228 603,36 $) pour le premier tracé et un montant de dix-neuf millions quatre cent treize mille huit cent quarante-six dollars américain et vingt-neuf cents (19 413 946,29 $) pour le second tracé.

Mots clés :Rails, Traverses, Ballast, Faisabilité.

Abstract

The city of Goma, located in the east of Democratic Republic of Congo, has experienced rapid population growth in recent years. This growth implies a demand for infrastructure, which, the state of road infrastructure has boosted us to turn to railways and which was the subject of our research**:<< Feasibility study of a railway between the round-point CCLK and the Great Barrier>>.** The overall objective of this work is to design a technically eligible and financially acceptable project. However, we had carried out some preliminary studies allowing us to decide on certain points such as: the choice of platform floors, the choice of type of rails and that of the sleepers. Thus, the soil class obtained for the platform is a P2 platform, the sleepers will be made of concrete and the rails chosen are standard rails at 60kg/m. An analytical method allowed us to dimension our track and we selected a structure with a subgrade layer of 0,35 m, a foundation layer of 0,18 m, an under-ballast layer of 0,20 m and a ballast layer of 0,30 m. Only the subgrade layer is made of untreated aggregates, but the other layers the aggregates are well graded. Finally, we carried out a study relating to the estimation of the cost of construction and it amounts to an amount of twenty million two hundred twenty-eight thousand six hundred and three American dollars and thirty-six cents ($20,228,603.36) for the first route and an amount of nineteen million, four hundred and thirteen thousand, eight hundred and forty-six American dollars and twenty-nine cents ($19,413,946.29) for the second route.

Keywords: Rails, Sleepers, Ballast, Feasibility.

Table des matières

Epigraphe i

Dédicace ii

Remerciements iii

Résumé iv

Abstract v

Table des matières vi

Liste des abréviations viii

Liste des tableaux ix

Liste des figure x

INTRODUCTION GÉNÉRALE 1

Chapitre I GÉNÉRALITÉS 3

I.1 Introduction 3

I.2 Historique des chemins de fer [2] 3

I.2.1 Histoire des chemins de fer en RDC [3] 5

I.3 Quelques notions sur les chemins de fer 7

I.3.1 Définition 7

I.3.2 Constitution [5] 7

I.3.3 La gare [6] 15

I.4 Les Systèmes de voies [7] 16

I.4.1 Principe de fonctionnement ferroviaire [7] 17

I.5 Avantages et les inconvénients du chemin de fer [9] 22

I.6 Conclusion partielle 22

Chapitre II MÉTHODOLOGIE DE TRAVAIL 23

II.1 Introduction 23

II.2 Présentation du site 23

II.3 Les levées topographiques 24

II.3.1 Le tracé en plan 24

II.3.2 Le profil en long 27

II.3.3 Profil en travers 29
II.4 Choix de la structure d'assise [11] 29
II.4.1 Introduction 29
II.4.2 Constituants de la structure d'assise 30
II.4.3 Choix du sol de la couche d'assise 31
II.5 Choix de la traverse [12] [13] 34
II.6 Choix du rail [12] [14] 36
II.7 Les assemblages [12] [15] 37
II.8 Conclusion partielle 38

Chapitre III PRÉSENTATION DES RÉSULTATS 39
III.1 Introduction 39
III.2 Proposition des tracés 39
III.2.1 Le premier tracé 39
III.2.2 Le second tracé 39
III.3 Le tracé en plan 39
III.4 Le profil en long 40
III.5 Le profil en travers 40
III.6 Dimensionnement de la ligne ferroviaire du projet 40
III.6.1 Dimensionnement de la plateforme 40
III.6.2 Détermination du poids des rails 42
III.6.3 Détermination du poids des traverses 42
III.7 Estimation du coût de construction 43
III.7.1 Estimation du coût de construction du tracé 1 45
III.7.2 Estimation du coût de construction du tracé 2 45
III.8 Coût de la voie totale 47
III.9 Conclusion partielle 47

CONCLUSION GÉNÉRALE 48

Bibliographie ..... **Erreur ! Signet non défini.**

ANNEXES 50

Liste des abréviations

BCK : Compagnie du chemin de fer du Bas-Congo à Katanga

CCLK : Centre Chrétien du Lac Kivu

CFL : Compagnie du chemin de fer au Congo et aux grands lacs africains

GPS : Global Positionning System

HCB : Huileries du Congo Belge

LA : essai Los Angeles

LKD : Léopoldville-Katanga-Dilolo

MDE : essai Micro Déval

NF : Norme Française

ONATRA : Organisation Nationale des Transports

QGIS : Quantum Geographic Information's System

RDC : République Démocratique du Congo

SCTP : Société Commerciale des Transports et des Ports

SIG : Système d'Information Géographique

SNCC : Société Nationale des Chemins de fer Congolais

SNCF : Société Nationale des Chemins de Fer

UIC : Union Internationale des Chemins de fer

ULPGL : Université Libre des Pays des Grands Lacs

Liste des tableaux

Tableau 1. Avantages et Inconvénients des chemins de fer 22
Tableau 2. Classification des sols UIC719R.....31
Tableau 3. Classification des sols de plateforme 32
Tableau 4. Résultats des épaisseurs de la plateforme et la couche de forme.....41
Tableau 5. Eléments des deux tracés.....46

Liste des figure

Figure 1. Les constituants d'une voie ferrée 8
Figure 2. Le rail 8
Figure 3. Rail Vignole 9
Figure 4. Rail à gorge 9
Figure 5. Rail double champignon 10
Figure 6. Traverses en bois 11
Figure 7. Traverses en béton 11
Figure 8. Traverses métalliques 12
Figure 9. Traverses en plastique 13
Figure 10. Les ballasts 13
Figure 11. La gare 15
Figure 12. Les signalisations ferroviaires 17
Figure 13. Roulement roue-rail 17
Figure 14. Boudins d'essieux ferroviaires 18
Figure 15. Profil transversal de la roue 18
Figure 16. Inclinaison des rails 19
Figure 17. Ecartement des rails 19
Figure 18. Les essieux sur la voie 20
Figure 19. Mouvement des roues sur la voie 21
Figure 20. Mouvement des essieux dans la courbure 21
Figure 21. Zone d'étude du tracé 23
Figure 22. La Clothoïde 27
Figure 23. Les constituants de la structure d'assise 30
Figure 24. Profil en travers 40

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les infrastructures sont des structures et des équipements qui sont essentiels au fonctionnement d'une société. Elles comprennent des éléments tels que les routes, les ponts, les tunnels, les aéroports, les ports, les réseaux électriques, les réseaux de communication, etc. Elles jouent un rôle important dans le développement économique et social d'un pays. Elles joueraient un rôle important dans la ville de Goma, en le reliant aux autres villes et région de la République Démocratique du Congo(RDC) et du monde extérieur. La ville de Goma située dans l'Est de la RDC ; sa situation en matière de sécurité est instable et incertain. À tout moment il peut avoir le besoin d'évacuer la ville pour cause soit de l'éruption volcanique, soit la guerre à nos portes.

La projection démographique de la ville de Goma étant de 2 476 587 habitants en 2050 [1], la ville touristique de la RDC, Goma, nous présente que des voies routières et, vu les embouteillages remarqués à tout moment dans la ville (rond-point, carrefour, le long de la route, …) et surtout aux heures de pointe (matin, midi et soir), le besoin en infrastructure se voit augmenter et nos pensées se tournent vers les voies ferrées qui seraient une autre piste de solution pour Goma. La hausse du prix des bus dans ces heures est due au manque d'organisation dans le secteur routier et un besoin inconscient d'infrastructure. Les retards qui se font remarqués à l'école (pour élèves et étudiants), au travail (pour les travailleurs) et les particuliers.

L'apport d'une voie ferrée contribuerait beaucoup au développement de la ville, mais surtout réduire le désordre que nous présente la voie routière car, une partie du fret routier se tournerait vers le chemin de fer pour le transport des personnes (et des marchandises au futur) et ça serait une importante infrastructure pour Goma.

L'illustration des problèmes cités ci-haut, conduit aux questions suivantes :

- Quel serait l'impact de cette voie ferrée sur l'environnement ?
- La nature du sol serait-elle une contrainte pour ne pas rendre faisable ce projet ?
- Le coût afférent à ce projet, le permettra-t-il d'être réalisable ?

Nos réponses à ces questions sont les suivantes :

- Les voies ferrées présentent moins d'émission de gaz à effet de serre, un levier pour émettre moins de particules fines et d'oxydes d'azote, …, améliorant ainsi la qualité de l'air et contribuant pas au réchauffement climatique.
- Evidemment, car la nature du sol est essentielle pour la construction des voies ferrées.
- Les avantages à long terme que nous offrent les voies ferrées justifient l'investissement pour ce projet.

Le principal objectif de cette étude est d'évaluer la faisabilité de construction d'une voie ferrée entre CCLK et la Grande Barrière. Mais aussi quelques objectifs à long terme s'imposent :

- Proposer des tracés en améliorant la connectivité entre CCLK et la Grande Barrière ;
- Dimensionner et pourquoi pas estimer les coûts de construction de cette voie ferrée.

Pour arriver à ces objectifs, une méthode documentaire sera utilisée. Cette méthode consiste à rassembler une certaine littérature ou certaines informations nécessaires pour l'étude de faisabilité des voies ferrées et particulièrement la ligne CCLK-Grande Barrière ; et ensuite faire la conception et une méthode analytique pour le dimensionnement de ladite ligne pour qu'à la fin nous puissions évaluer les coûts de construction de cette voie ferrée. Mais aussi une méthode par trajectoire pour prélever les données géographiques avec le récepteur GPS : cette méthode consiste à collecter des points GPS en continu tout en se déplaçant d'un point à un autre.

A part l'introduction générale et la conclusion générale, ce travail comporte trois chapitres qui sont :

- Le chapitre premier qui parlera des généralités ;
- Le chapitre deuxième qui présentera les méthodologies ;
- Le chapitre troisième qui se focalisera sur la présentation des résultats

Chapitre I GÉNÉRALITÉS

I.1 Introduction

Ce chapitre nous parle de l'historique des chemins de fer en générale et ceux de la RDC en particulier ; ainsi que quelques termes pour bien comprendre les notions des chemins de fer.

I.2 Historique des chemins de fer [2]

Le chemin de cher a tout comme d'autre mode de transport évolué car dans l'histoire, le développement des territoires s'est fait autour des installations ferroviaires comme on pourrait le remarquer dans le développement du nord de l'Amérique.

Le chemin de fer s'est vraiment développé lors du boom ferroviaire des années 1840 mais de nombreuses innovations avaient eu lieu au cours des siècles précédents. L'un de premiers exemples des chemins de fer guidés est celui du diol Kos, un système permettant aux bateaux de franchir l'isthme de Corinthe en Grèce, construit au 6ieme siècles av-JC. Des charriots tirés par des bêtes de somme circulaient sur des blocs de pierres entaillées. Ce chemin guidé a fonctionné jusqu'au 1er siècle.

La réapparition des transports guidés a eu lieu en Europe aux alentours de 1550, pour des voies minières. Celles-ci utilisaient des rails de bois. La première voie ferrée a été Établie au Royaume-Uni au début du XVIIe siècle, principalement pour le transport du Charbon d'une mine à un canal, d'où il pouvait être chargé sur des barges. On trouve des traces de ce genre de chemins de fer à Broseley dans le Shropshire. Les rails étaient constitués de bois nu, les roues étaient munies de boudins, comme sur les véhicules ferroviaires actuels.

En 1768, la compagnie Coalbrookdale eut l'idée de remplacer ses rails en bois par des rails en fonte moulée, pour limiter l'usure de la voie et transporter de plus lourdes charges. Les rails d'acier sont apparus au début du XVIIIe siècle. L'ingénieur William Jessop conçut des rails prévus pour être utilisés avec des roues sans boudin : ils constituaient une sorte de cornière. Ces rails devaient être utilisés pour un projet dans le secteur de Loughborough, Leicestershire en 1789.

En 1790 il était de ceux qui fondèrent une aciérie à Butterley, Derbyshire pour produire des rails. Le premier chemin de fer ouvert au public a été le Surrey Iron Railway, ouvert en 1802 par Jessop. Les convois étaient tractés Par des chevaux. La première locomotive à vapeur a fonctionné sur des rails a été construite par Richard Trevithick et essayée en 1804 à Merthyr Tydfil au Pays de Galles. Cette tentative ne fut pas couronnée de succès, l'engin étant si lourd qu'il brisait la voie.

En 1811, John Blenkinsop conçut la première locomotive réellement utilisable. Cette locomotive, cependant, pourrait être utilisée pour la traction sur les routes seulement. George Stephenson, qui a réalisé en 1814 la première locomotive à vapeur utilisée pour la traction dans les chemins de fer, a le mérite de perfectionner le design. Il fit breveter. Un système de transport du charbon mû par une locomotive à vapeur. La ligne Fut construite, raccordant Middleton Colliery à Leeds. La locomotive a été construite par Matthew Murray, (Murray and Wood). Le Middleton Railway fut donc le premier Chemin de fer à utiliser la vapeur avec succès dans un objectif commercial. C'est également le premier à faire l'objet d'actes juridiques.

Le premier chemin de fer public au monde a été ouvert à la circulation le 27 septembre 1825 entre Stockton et Darlington au Royaume-Uni. Simultanément, d'autres pays d'Europe ont également mis au point de tels systèmes ferroviaires ; la plupart des trains introduits pour le transport de passagers pendant cette période.

Le premier chemin de fer en Allemagne a été ouvert de Nurenberg à Furth en 1835. Les États-Unis ouvrent leur première ligne de chemin de fer entre Mohawk et Hudson en 1833. Le premier réseau voit le jour en Europe continentale dans la région de SaintÉtienne, et en Amérique du Nord, la période de plus grand développement du chemin de fer va de 1848 à 1914 le chemin de fer a cette période connut un développement remarquable les pays qui disposaient de charbon, ou qui pouvaient facilement en importer, comme l'Europe et les Etats-Unis. Bénéficiant de la révolution industrielle, les grands réseaux ferrés furent construits entre 1830 et 1890.

Après la Première Guerre mondiale, le chemin de fer continue à se développer, notamment les lignes secondaires à voie étroite, mais il est fortement Concurrencé, sur les courtes distances, par l'automobile et le camion. Après la Seconde Guerre mondiale arrive la concurrence de l'avion sur les longues distances ; les lignes secondaires disparaissent. La crise pétrolière de 1973 marque le début du renouveau du chemin de fer, Principalement pour les transports de

voyageurs à l'intérieur des grandes métropoles et grâce à de nouvelles lignes inter cités, parcourues par des trains à grande vitesse.

Au cours des 30 dernières années, l'amélioration de la qualité de la vie dans les grandes villes, le bouleversement dramatique Congestion routière et aéroportuaire, l'intensification de la pollution atmosphérique et sonore, Ainsi que la crise énergétique persistante, ont tous crée un problème écologique massif.

Ainsi, le chemin de fer a fait son grand retour puisqu'il s'agit d'un mode de transport respectueux de l'environnement et devenir plus à jour, et peut se déplacer à très grande vitesse. L'utilisation du transport ferroviaire est de plus en plus jugé impératif, tant pour les déplacements en milieu urbain que suburbain.

I.2.1 Histoire des chemins de fer en RDC [3]

L'absence des infrastructures de communication entre les différentes villes freine le développement socioéconomique des 26 provinces de la RDC. Le transport en RDC a toujours été un défi en raison de la morphologie du terrain et des conditions climatiques difficiles. Les réseaux ferroviaires et fluviaux, à l'origine incomplets pour des raisons historiques ou géographiques, ont vu leur état général se dégrader depuis l'indépendance, à cause notamment des conflits survenus.

Le réseau routier est lui-même considérablement altéré. Kinshasa n'est plus accessible par la route depuis les autres villes principales du pays que sont : Mbuji-Mayi, Lubumbashi, Kisangani, Kananga et Goma. Les liaisons de la capitale avec l'extérieur du pays se sont cependant améliorées au début des années 2000 avec la réhabilitation de la route de Matadi. La République dispose de 5 033 km de voies ferrées non interconnectées et n'ayant pas les mêmes standards. 858 km de voies électrifiées desservent la région minière au sud du Katanga, 1 026 km de voies à un écartement de 0,6 m desservent la région agricole et aurifère du nord-est de la RDC, le tronçon Kisangani – Ubundu a un écartement de 1,00 m tandis que tout le reste du réseau a un écartement de 1,067 m.

Le chemin de fer en RDC est actuellement organisé en 4 réseaux distincts ; à savoir une ligne permettant de relier Matadi et Kinshasa d'une part, ainsi qu'un réseau plus étendu, en liaison avec la Zambie, l'Angola et le lac Tanganyika, avec Lubumbashi comme point central, une ligne reliant Kisangani et Ubundu, pour pallier les Stanley Falls sur le Congo, et enfin une ligne à voie étroite dans la région de l'Uélé (nord). Il existe par ailleurs des projets de prolongement

des lignes existantes, dont une liaison entre Kinshasa et Ilebo, ce qui permettrait de joindre les deux réseaux les plus importants. La ligne qui relie le port de Matadi à Kinshasa est longue de 366 kilomètres.

Cette ligne de la SNCC est exploitée par la Société commerciale des transports et des ports (SCTP, anciennement ONATRA) selon un accord, signé par les deux compagnies. Mais cette ligne a perdu de grandes parts du marché, dû à son état lamentable, à l'insécurité sur le rail (certains trains sont attaqués) et à la remise en état de la route le long du rail en 2000. Le pont de Matadi, le plus grand pont-rail suspendu du monde, n'est pas actuellement exploité pour le chemin de fer. Il existe par ailleurs un vague projet de création d'un pont entre Kinshasa et Brazzaville, pour lequel une option ferroviaire pourrait être retenue, et permettrait de relier Kinshasa pour la première fois avec un port en eaux profondes de Pointe-Noire (Congo Brazzaville).

I.2.1.1 Les lignes du Katanga, Kasaï et du Benguela [3]

Ce réseau s'étend sur 3 641 kilomètres de voies ferrées (dont 858 kilomètres électrifiés) au Katanga, au Kasaï-Occidental, au Kasaï-Oriental et au Maniema. Ces lignes sont exploitées aujourd'hui par la Société nationale de Chemins de fer Congolais (SNCC).

- ✓ La ligne des Grands Lacs est une seconde section de Kindu - Kabalo - Kalemie. Cette ligne est reliée à sa première section par un service fluvial de 320 kilomètres. Les 355 kilomètres de Kindu à Kongolo ont été construits entre 1907 et 1910 par la Compagnie du Chemin de fer du Congo Supérieur aux Grands Lacs africains (CFL), les 273 kilomètres de Kabalo à Albertville entre 1911 et 1917, toujours par le CFL.
  La section manquante entre Kongolo et Kabalo n'a été construite qu'entre 1937 et 1939. Ce réseau était en voie métrique et mis à l'écartement de 1067mm en 1955, en vue de la connexion avec le réseau de Katanga.
- ✓ La ligne de Katanga : Kabalo - Kamina - Likasi - Lubumbashi - Sakania - Zambie. Cette ligne a été construite entre 1909 et 1918 de Sakania à Bukama et de 1952 à 1956 entre Kamina et Kabalo par la Compagnie du Chemin de Fer du Bas Congo à Katanga (BCK).
- ✓ La ligne du Kasaï : Ilebo - Kamina. Cette ligne a été construite entre 1923 et 1928 par le Chemin de Fer Léopoldville-Katanga-Dilolo (LKD).
- ✓ Le chemin de fer de Benguela : Kamina - Dilolo - Angola (Chemin de fer de Benguela). Cette ligne a été construite entre 1928 et 1931 (de Tenke jusqu'à la frontière) par le BCK.

- ✓ Une ligne entre les lacs Kivu et Tanganyika fut ouverte en 1931 par le Céfaki (Chemins de fer du Kivu) entre Kalundu et Kamaniola. La seconde partie jusqu'à Bukavu ne fut jamais construite et la ligne fermée en 1958. Elle était à l'écartement de 1067mm, pour être intégrée dans la ligne anglaise "Cap - Caire".
- ✓ Les lignes vicinales du Mayumbe et de l'Uélé.
- ✓ Le chemin de fer du Mayombe (vers le nord à Tshela au départ de Boma), long de 140 kilomètres, a été construit par étapes entre 1898 et 1914 par la Société des Chemins de fer vicinaux du Mayumbe.
- ✓ Les chemins de fer des Uélé relient Bumba à Bondo et Mungbere. Le dernier tronçon semble être en service entre Aketi et Isiro avec un train tous les deux ou trois mois. Ce réseau a été construit entre 1924 et 1937 par les Chemins de fer vicinaux du Congo, et dans les années 1970 pour le tronçon Aketi - Bumba ; il totalise 842 km. Il comprend les lignes Aketi - Mungbere (685 km), Komba - Bondo (121 km) et Liénart - Titule (31 km).
- ✓ Lignes industrielles : Chemin de fer entre Charleville et Makumbi, le premier convoi tracté par locomotive à moteur à combustion interne relia ces deux points au mois d'octobre 1926. D'autres lignes à 60 cm, avant tout industrielles, ont existé, dont Charleville (Djokupunda) – Makumbi, exploité par la Forminière, Muyumba–Manono pour accéder au port fluvial et Alberta (Ebonda) – Yamisiko–Yamaluka–Yangunda, exploité par les Huileries du Congo belge (HCB).
- ✓ D'autres lignes ont existé et sont actuellement inexploitées.

I.3 Quelques notions sur les chemins de fer

I.3.1 Définition

Le chemin de fer est un système de transport guidé servant au transport de personnes et des marchandises. Il se compose d'une infrastructure spécialisée, de matériels roulants et des procédures d'exploitation faisant le plus souvent intervenir l'humain, même si dans le cas des métros automatiques cette intervention se limite en temps normal à de la surveillance [4].

I.3.2 Constitution [5]

La voie ferrée est constituée par deux parties distinctes la superstructure et l'infrastructure. L'infrastructure est composée soit de la plate-forme ; interface entre voie proprement dite et le sol soit de l'ouvrage d'art sur lequel la superstructure est posée.

La superstructure de la voie ferrée est composée de divers composants : rails plus les accessoires d'attache et de fixation, traverses, d'une couche d'assise composée de ballast, d'une sous-couche (sous ballast), d'appareils de voie divers et de passage à niveau...etc.

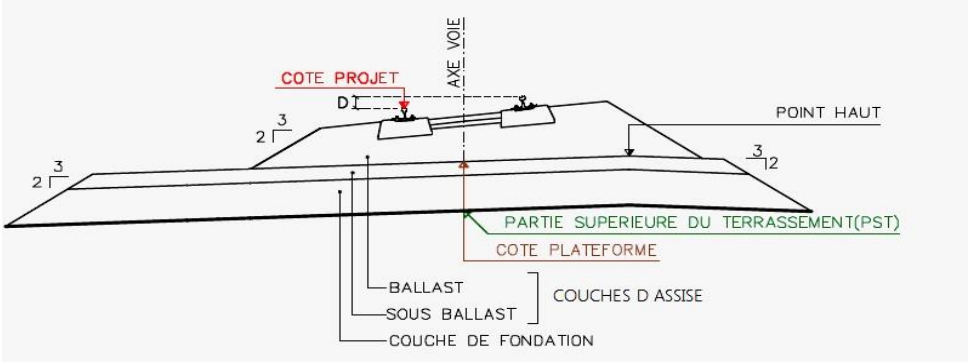


Figure 1. Les constituants d'une voie ferrée

I.3.2.1 Les rails [5]

Les rails sont des longues barres d'acier profilées, qui mises bout à bout servent à former un chemin de fer. Les rails servent à la fois de guide et de support de roulement pour les véhicules. Une voie ferrée est constituée de deux files des rails posées en parallèle sur des traverses. Les rails sont montés sur les traverses pardessus des patins élastiques auxquels ils sont fixés au moyen d'un ensemble de maintien de rail appelé fixation des rails**.**

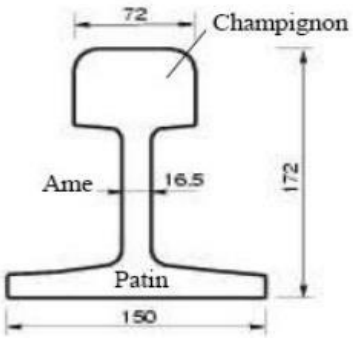


Figure 2. Le rail

Étant conducteurs électriques, ils peuvent aussi être utilisés pour la transmission de signaux (circuits de voie) et pour le retour des courants de traction et des auxiliaires du train (ligne train pour le chauffage et la climatisation sur les rames tractées).

I.3.2.1.1 Types des rails

a. Le rail Vignole

Le rail moderne est généralement du type « Vignole » ; dans une section transversale, on distingue le patin qui s'appuie sur la traverse, le champignon qui constitue le chemin de roulement, et l'âme, filet vertical qui relie le champignon au patin. Sur les lignes importantes, la masse linéique standard du rail **U54** est de 54 kg/m.

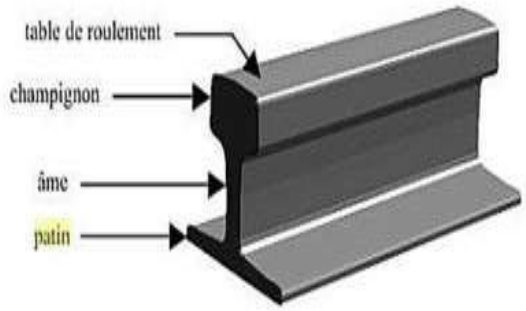


Figure 3. Rail Vignole

Il est constitué de trois parties : le champignon, l'âme et le patin.

- ✓ Le champignon : Le profil du bourrelet du rail et celui du bandage de la roue sont étudiés en vue de réaliser les meilleures conditions de roulement et d'assurer le guidage le plus satisfaisant du mentonnet de la roue.
- ✓ L'âme résiste au cisaillement produit par le chargement de la voie.
- ✓ Le patin constitue une sorte de buté contre le renversement du rail suite aux efforts transversaux.

b. Le rail à gorge

Les rails à gorge (type « Broca ») sont utilisés pour les voies encastrées dans des chaussées routières et pour les installations industrielles.



Figure 4. Rail à gorge

c. Le rail double champignon

Le rail à « double champignon symétrique » avait été conçu pour permettre de retourner le rail usé et donc doubler sa durée de vie. Le défaut de ce système était que lorsque le rail était

retourné, il était déjà abimé (poinçonnements dû à l'écrasement au niveau des berceaux). Ce principe a été abandonné. Des rails type « double champignon asymétrique » ont également été employés : un seul côté, de plus forte section, était utilisé pour le roulement. La simplification apportée par la fixation du rail type Vignole a amené à l'abandon de ce système.



Figure 5. Rail double champignon

I.3.2.1.2 Rôles des rails

Ils ont pour rôles de :

- ✓ Recevoir les forces dynamiques verticales et horizontaux venant des rails et les transmit au couche de ballast ;
- ✓ Amortir ces efforts dynamiques ;
- ✓ Garder l'écartement de la file de rails ;
- ✓ Donner l'inclinaison de rails qui est équivalente à 1/18.

I.3.2.2 Les traverses [5]

Une traverse est un élément fondamental de la voie ferrée. C'est une pièce posée en travers de la voie, sous les rails, pour en maintenir l'écartement et l'inclinaison, et transmettre au ballast les charges des véhicules circulant sur les rails. On utilise principalement des traverses en bois, métalliques ou en béton (et depuis peu il existe des traverses en plastique dur recyclé).

I.3.2.2.1 Types de traverses

On en distingue quelques types :

a. Les traverses en bois

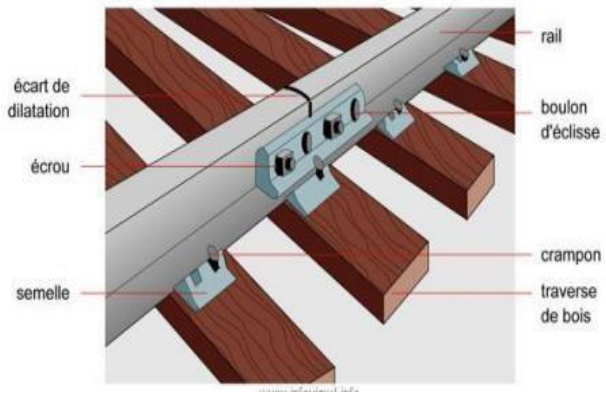


Figure 6. Traverses en bois

✓ Avantages :

- Les traverses en bois sont très élastiques par rapport aux autres types des traverses ;
- Elles sont faciles à confectionner ;
- Facile à exploiter et à transporter ;
- Elles ne coutent pas chère ;
- Les traverses en bois à une grande résistance à la rupture, au matage et au cisaillement.

✓ Inconvénients :

- Elles ont une faible durée de service (de l'ordre de 3 à 5 ans) ;
- Il faut 80 m^3 de bois pour 1km de voies c'est-à-dire destruction de forêt, problème d'environnement.

b. Les traverses en béton



Figure 7. Traverses en béton

✓ Avantages :

- Conservation de la nature ;
- Peuvent supporter des grandes charges ;
- Peuvent résister aux grands efforts et déplacement à cause de leur poids ;
- Avoir une longe durée de service (de l'ordre de 40 à 50 ans).

✓ Inconvénients :

- Moins élastique que le bois ;
- Plus fragile ;
- Conducteur de courant électrique ;
- Plus lourd à manipuler.

c. Les traverses métalliques



Figure 8. Traverses métalliques

La traverse métallique est un produit industriel de fabrication simple. Elle est constituée d'un laminé en forme de U renversé, embouti à ses extrémités, pour former des bêches qui s'enfoncent dans le ballast et s'opposent au déplacement transversal de la voie. Le rail est fixé au moyen de crapauds qui appuient sur le bord du patin. Ces crapauds sont serrés par des écrous vissés sur des boulons et la combinaison de deux ou trois modèles permet de réaliser une gamme progressive d'écartement de la voie. On peut également adapter des dispositifs élastiques. La traverse métallique, en acier, est relativement légère (80 kg) et est principalement utilisée dans des voies à circulation de moyenne vitesse.

d. Les traverses plastiques ou composites



Figure 9. Traverses en plastique

La traverse plastique est habituellement fabriquée à partir d'un recyclât de polyoléfine et renforcée de fibres. Elle est respectueuse de l'environnement. La traverse composite est une alternative à la traverse en bois imprégnée de créosote, l'EU envisageant une restriction sur l'utilisation de la créosote dans les années à venir. La traverse plastique possède d'excellentes caractéristiques mécaniques, supérieures à la traverse en bois. Elle résiste très bien aux intempéries et aux produits chimiques. Elle peut aussi permettre une réduction de nuisance sonore. Plusieurs pays de l'EU ont déjà opté pour cette traverse 100% recyclable. Elle peut être installée en voie standard, en appareil de voie ou encore sur des ouvrages d'art (pont, tablier métallique non-ballasté).

I.3.2.3 Les ballasts [5]



Figure 10. Les ballasts

Le ballast est un granulat de 25/50 mm utilisée actuellement en Algérie, il provient du concassage des roches dures (granite, quartzite, grès, gneiss, etc. …). La couche de ballast a une épaisseur de 25 à 30 cm avec le rôle de/d':

- ✓ Stabiliser le sol ainsi que les voies et à leur éviter des déformations dues au poids des trains ;

- ✓ Limiter les vibrations au passage des trains sans quoi elles pourraient se faire ressentir à plusieurs centaines de mètres à la ronde ;
- ✓ Ralentir l'invasion de la végétation entre les voies.
- ✓ Transmettre des efforts engendrés par le passage des trains au sol, sans que celui-ci ne se déforme par tassement.
- ✓ Enchâsser les traverses afin d'assurer une résistance aux déformations longitudinales, particulièrement importante pour la technique des longs rails soudés.
- ✓ Assurer en raison de sa granularité particulière le drainage et l'évacuation des eaux superficielles ;
- ✓ Constituer un amortisseur de vibrations très efficace grâce à ses propriétés rhéologiques (dissipation de I 'énergie vibratoire par attrition des éléments de ballast).
- ✓ Permettre, au moyen du bourrage-dressage mécanisé, la rectification très rapide du nivellement et du tracé.

I.3.2.3.1 Les essais réalisés sur le ballast

Généralement on utilise de la pierre concassée, de granulométrie variant entre 20 mm et 63 mm, de déférentes natures :

- ✓ Sable ou du gravier tout venant, de rivière ou de carrière.
- ✓ Pierre cassée, granitique, siliceuse ou calcaire (dans ce cas, elle doit être dure et non gélive).
- ✓ Cailloux.
- ✓ Laitier de haut fourneau

Les éléments du ballast doivent s'imbriquer, de façon à former une masse compacte, mais perméable.

La qualité du ballast est définie par un « coefficient de qualité » qui précise la résistance à l'usure, au frottement et aux chocs modérés, déterminée à partir des essais classiques :

- ✓ Essai de la résistance à l'usure (essai Deval ou micro-Deval) ;
- ✓ Essai de la résistance à la fragmentation (essai de Los Angles)
- ✓ Essai de la résistance à la compression Référence normative : NF EN 13450 Granulats pour ballasts de voies ferrées.

Le ballast utilisé en chemins de fer doit avoir au moins les qualités suivantes :

- ✓ La résistance à la compression simple Rc ≥ 1200 kg/cm2
- ✓ Coefficient Micro Deval MDE ≤ 15 à 20
- ✓ Coefficient Los Angles sec LA ≤ 20 à 25

Où : LA + MDE < 40 pour v ≥ 160 km/h.

LA + MDE < 50 pour v < 160 km/h

Néanmoins, un bon ballast doit présenter les qualités suivantes : perméabilité, élasticité, solidité, se prêter au bourrage, ne pas être gélif, ne pas se désagréger sous l'influence des agents atmosphériques.

I.3.3 La gare [6]

Une gare est l'ensemble de bâtiments et installations établis aux stations des lignes de chemin de fer, elle est destinée à faire embarquer et descendre des passagers et aussi à charger et décharger des marchandises ainsi que faire des opérations commerciales. Elle se distingue généralement d'un simple arrêt par son envergure et ses équipements :

- ✓ Permettre la montée ou la descente des voyageurs, ou le chargement et le déchargement des marchandises ;
- ✓ Pour certaines d'entre elles, assurer des fonctions de sécurité dans la circulation des trains.

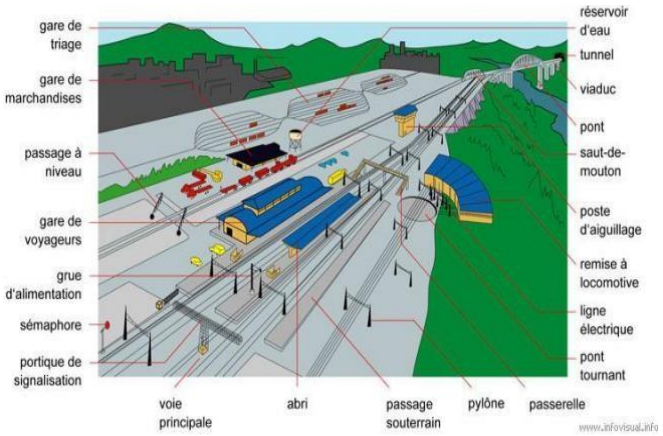


Figure 11. La gare

I.3.3.1 Type de gares selon leur utilité

a. Gare à marchandise

Une gare à marchandises appelée gare de fret, est une gare ferroviaire destinée uniquement au trafic des marchandises, elle assure la totalité du traitement du trafic de marchandises, et peut être dotée de halles à marchandises et de vastes cours de débord, sans équipements pour les voyageurs qui n'y ont d'ailleurs pas accès. Cette dernière comporte un bâtiment principal à vocation administrative, des halles à marchandises et des entrepôts.

b. Gare de triage

Une gare de triage ou simplement un triage, également appelée gare de formation, est une gare ferroviaire spécialisée où les wagons de marchandises isolés de leur rame initiale sont triés pour être incorporés dans de nouveaux trains de marchandises, c'est-à-dire la recomposition des trains qui acheminent les « wagons isolés ». Un triage est une installation spécialisée dans le traitement du trafic de fret.

c. Gare des voyageurs

Les gares des voyageurs sont de taille très variable. Les gares peu importantes, qui constituent un simple point d'arrêt, souvent sans personnel permanent, sont appelées « haltes » ou ‘‘points d'arrêt’’. Les gares principales situées dans les grandes villes sont des lieux d'échange entre le mode ferroviaire et les divers modes de transport urbains (bus, tramway, métro). Elles voient passer quotidiennement un nombre considérable de personnes, venant fréquenter les nombreux commerces qui s'y sont souvent installés. On distinguera deux types de gares de voyageurs :

- ✓ **Les gares terminus** : Le bâtiment est généralement au bout des quais et perpendiculaire à ceux-ci, il est souvent composé symétriquement un côté pour les départs et l'autre pour les arrivées ;
- ✓ **Les gares de passage** : Le bâtiment est généralement le long des voies, du côté orienté vers le centre de l'agglomération. On accède aux quais par une passerelle ou un souterrain. Il arrive qu'il soit placé au-dessus des quais.

I.4 Les Systèmes de voies [7]

- ✓ Les systèmes de lignes qui comprennent les passages à niveau et les systèmes d'électrification, de signalisation et de télécommunication.
- ✓ Les installations et les locaux comprenant les gares, les dépôts et d'autres installations (bâtiments administratifs, entrepôts, etc.).

Il est important de signaler qu'un passage à niveau est un croisement à niveau d'une ligne ferroviaire avec une voie routière ou piétonnière. La circulation des convois ferroviaires y est toujours prioritaire sur les usagers de la route. Pour produire les risques de collusion, on cherche de plus en plus à éliminer les passages à niveau soit en le remplaçant par des passages dénivelés, soit en les supprimant purement et simplement, ou lorsque cela n'est pas possible à les automatiser.

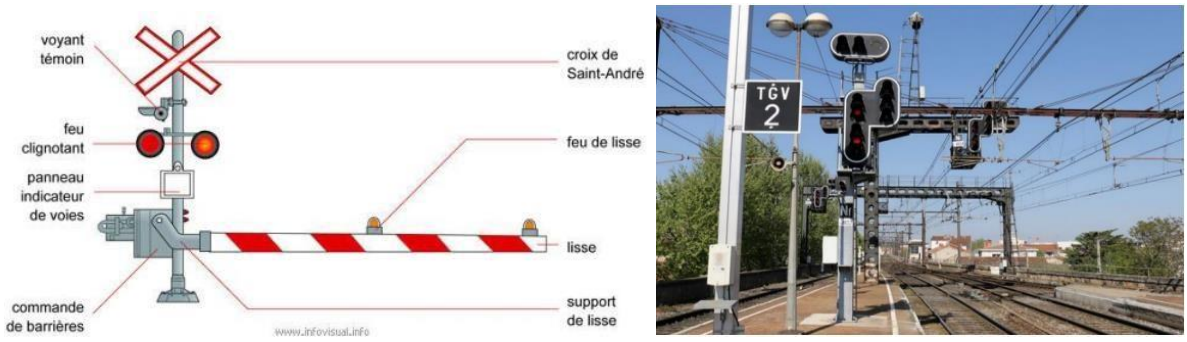


Figure 12. Les signalisations ferroviaires

I.4.1 Principe de fonctionnement ferroviaire [7]

Les deux « unités techniques » de base qui assurent le « transport » par des moyens ferroviaires sont l'ensemble des Roues du véhicule et des Rails. Les essieux montés se composent de trois parties de base :

- ✓ L'essieu
- ✓ Les roues
- ✓ Les boites d'essieux

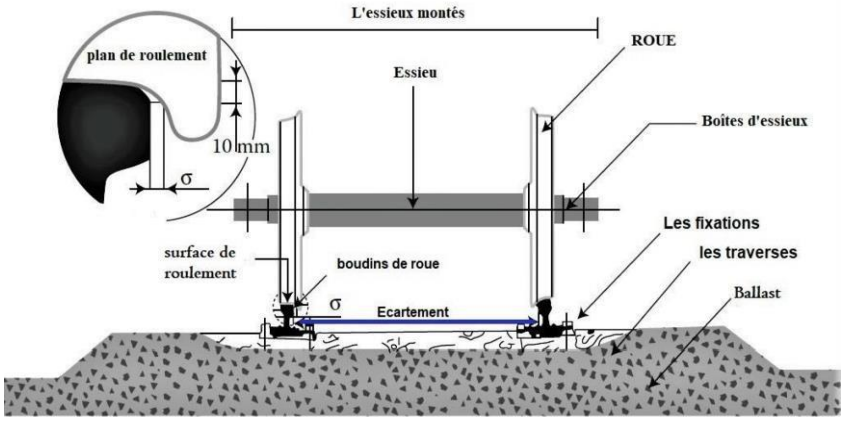


Figure 13. Roulement roue-rail

- **Les roues sont constituées** de la bande de roulement ; c'est la partie extérieure des roues qui permet le roulement sur les rails ainsi que le corps de roue.
- **Les boudins de roue** sont caractérisés de la section intérieure des roues. Leur mission est d'empêcher le déraillement dans le cas où le déplacement latéral de

l'ensemble de roues exclut les limites fixées par l'écartement de la voie.

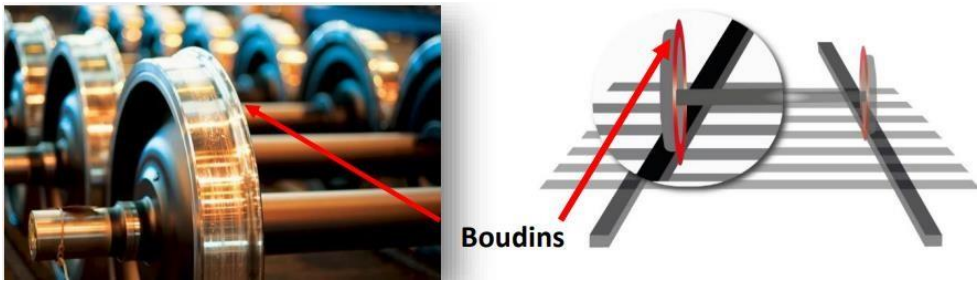


Figure 14. Boudins d'essieux ferroviaires

Pendant ce temps, les boudins supportent l'autoguidage des essieux montés lors du passage à travers Aiguillage et le passage à niveau. La section transversale des roues (profil) n'est pas orthogonale comme dans le cas des pneus de véhicules routiers. Il présente une légère conicité variable qui « s'ouvre » vers la partie intérieure de la voie.

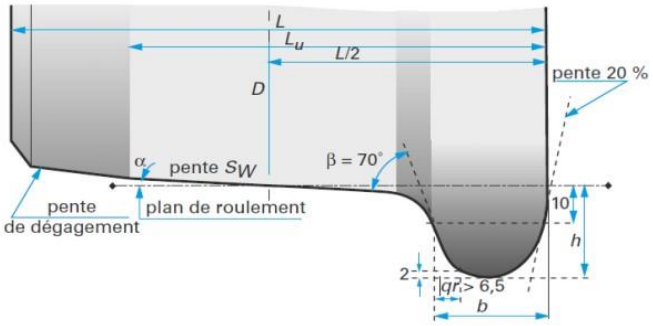


Figure 15. Profil transversal de la roue

- Largeur : L (0,135 ≤ L ≤ 0,140 m)
- Diamètre nominal moyen : D (≥ 0,330 m) mesuré à L/2
- Pente de la génératrice (ou 1/2 conicité) : SW

Les valeurs les plus utilisées sont :

- 1/20 (5 %) (α = 2° 51' 51'')
- 1/40 (2,5 %) (α = 1° 25' 57'')

Pente de dégagement (15 %) suivie du chanfrein d'extrémité ;

Largeur utile : Lu = L – longueur de pente de dégagement (= 0,105 m)

Hauteur de boudin, mesurée à partir du plan de roulement : h (= 0,036 m) ;

Largeur de boudin, mesurée à 10 mm du plan de roulement : b.

Les valeurs sont :

- b > 0,022 m pour D > 0,840 m
- b > 0,0275 m pour D ≤ 0,840 m

Caractéristique de l'épaisseur du boudin en fonction de son usure : qr > 6,5 mm Angle de raccordement du boudin au plan de roulement : β = 70°. La surface supérieure du champignon du rail est un cylindre de rayon r (m). La roue de profil en pente SW, vient en contact avec le rail au point C. Le point C où s'applique le poids de la roue n'est donc pas dans l'axe du rail. Deux conséquences en résultent :

- L'âme du rail, siège principalement de son inertie, subit une contrainte de flexion ;
- L'action du poids ne se répartit pas symétriquement sur le patin.

Pour éviter ce décalage d'application de l'effort de la roue, le rail est positionné sur la traverse avec une inclinaison, ou pente SR, dirigée vers le centre de la voie. Cette inclinaison permet l'application de l'effort appliquée par la roue sur le rail, dans l'axe du rail, à condition que SR = SW.

L'inclinaison du rail SR, la plus courante, est 1/20. Si la pente de la roue SW est plus faible, 1/40 par exemple, le point de contact C est décalé vers l'extérieur de l'axe du rail.

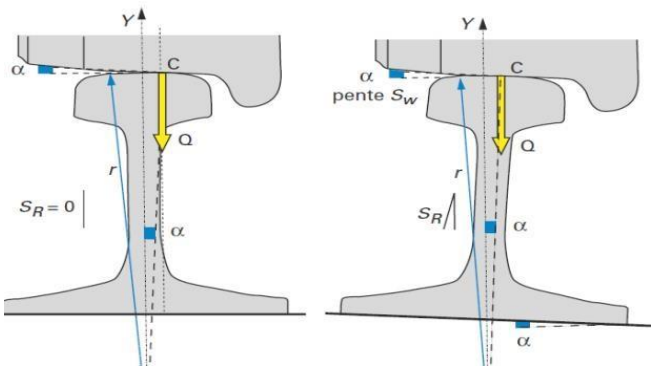


Figure 16. Inclinaison des rails

Les deux roues sont reliées de manière rigide par une tige cylindrique (axe), ce qui entraîne la rotation des roues et de l'essieu à la même Vitesse angulaire. Le système « essieu / roue » ci-dessus est appelé système conventionnel (ou classique). Les essieux montent sur un rail de guidage en acier constitué de deux rails parallèles fixés à une distance fixe entre eux (face interne du rail), communément appelé écartement de rail.

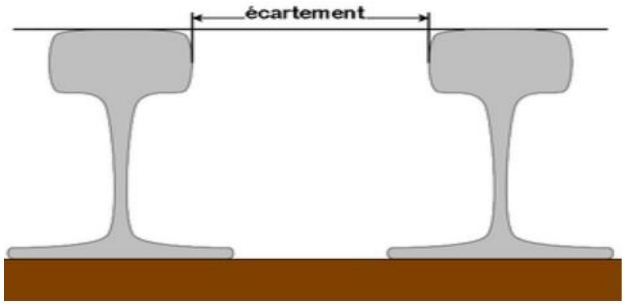


Figure 17. Ecartement des rails

Il existe différentes normes d'écartement des rails :

- ✓ Standard : 1435 mm qui est le plus repandu
- ✓ L'écartement ibérique : 1674 mm (Espagne et Portugal)
- ✓ L'écartement russe : 1520 mm (Russie, Biélorussie, Ukraine)
- ✓ L'écartement irlandais : 1600 mm (Irlande)
- ✓ Il existe des réseaux secondaires à voie métrique (1000 mm ou 1067 mm)

a. Fonctionnement à chemin droit [8]

Nous considérons une paire de roues de chemin de fer conventionnelle centrée sur la voie, circulant à vitesse constante, V, sur un trajet rectiligne. En alignement, le roulement théorique a lieu sur le diamètre nominal D, identique pour les deux roues parcourant la même longueur sur les deux files de rail.

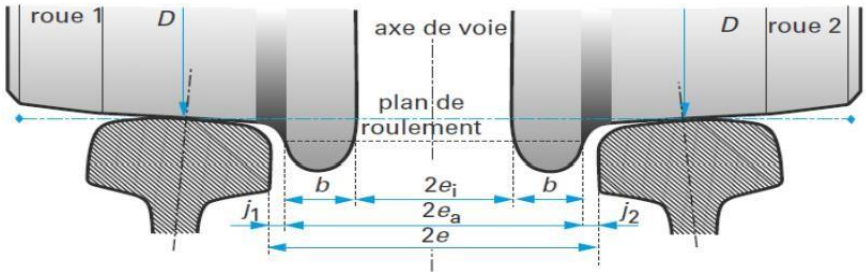


Figure 18. Les essieux sur la voie

- ✓ Écartement de voie : 2e
- ✓ Écartement des faces actives de roues : 2ea
- ✓ Écartement des faces internes de roues : 2ei
- ✓ Largeur de boudin : b
- ✓ Jeu entre boudin de roue 1 et rail : j1
- ✓ Jeu entre boudin de roue 2 et rail : j2

En pratique, tout déséquilibre de force s'exerçant sur les roues, provenant soit d'un désaxement de la charge verticale, soit d'un effort transversal extérieur (défaut d'horizontalité de la voie, vent latéral sur le véhicule), provoque un désaxement du roulement d'une roue par rapport à l'autre qui a tendance à se compenser (les deux roues roulent avec des rayons différents (r1 ≠ r2)). Il en résulte un mouvement transversal périodique autour de la position médiane : c'est le « lacet » le mouvement parasite de l'essieu. Son amplitude est limitée par le contact entre boudins et champignons de rails.

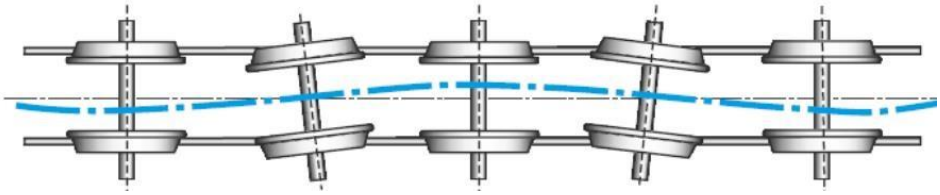


Figure 19. Mouvement des roues sur la voie

b. Fonctionnement dans les courbes [7]

Examinons la structure ci-haut. En entrant dans la courbe, la paire de roues est déplacé de "y" par rapport à sa face extérieure. En raison du profil conique des roues, le rayon de roulement initial R0 des deux roues passe respectivement à r1 et à r2 pour la roue extérieure et la roue intérieure respectivement.

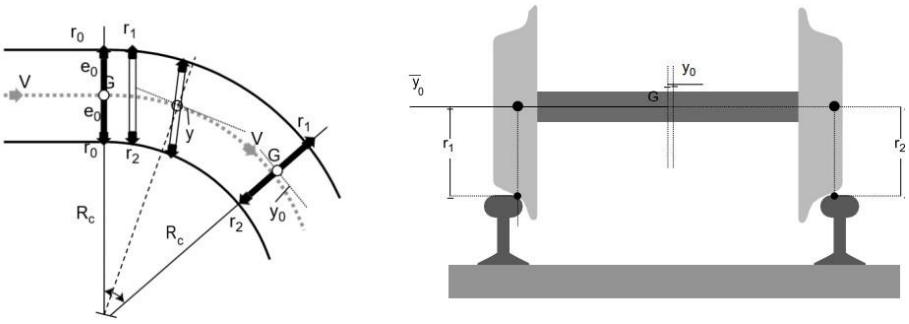


Figure 20. Mouvement des essieux dans la courbure

Le rayon de roulement de la roue extérieure est plus grand. L'iniquité r1> r2 s'applique et, par extension, V1> V2 s'applique également (où V1, V2 : vitesses relatives des deux roues). En raison de la liaison rigide des roues, l'ensemble de roues à tendance à tourner seul vers la face interne de la courbure, décalée de y_o, en recherchant un positionnement radial à l'intérieur de la courbe (les deux roues recouvrent des chemins inégaux). Comme dans le cas de pistes droites, lorsque le décalage transversal de l'ensemble de roues dépasse le jeu existant de la bride « σ », le roulement des roues sur les rails est assuré par la présence de boudins. La motion décrite ci-dessus concerne un seul essieu isolé. La négociation des bogies dans les courbes est plus complexe et le positionnement de l'essieu est affecté par les mouvements des bogies et de la carrosserie.

Cependant, le mécanisme d'inscription des essieux dans les courbes reste le même. Depuis la naissance du chemin de fer (1825) jusqu'à maintenant, le système décrit ci-dessus représente l'unité de base matérialisant le mécanisme physique de guidage des véhicules ferroviaires sur un trajet rectiligne et en courbes. Contrairement aux autres moyens de transport, les véhicules

ferroviaires ne nécessitent pas intervention humaine (commande au volant) ou mécanismes compliqués.

I.5 Avantages et les inconvénients du chemin de fer [9]

Tableau 1. Avantages et Inconvénients des chemins de fer

Avantages	Inconvénients
✓ Capacité de transport élevée ; ✓ Voyage à grande vitesse ; ✓ Sécurité de voyage ; ✓ Services ferroviaires quelles que soient les conditions météorologiques (Régularité des services) ; ✓ Transports respectueux de l'environnement ; ✓ Un degré de liberté (automatisation de plusieurs Opérations) ; ✓ Confort du passager / état d'esprit détendu ; ✓ Petite prise de terre (droit de passage).	✓ Besoins accrus en conception de géométrie de voie (Alignement horizontal, longitudinal) ; ✓ Faible coefficient d'adhérence roue-rail ; ✓ Un degré de liberté (Un degré de liberté (pas de services porte à porte) ; ✓ Roulement difficile (bruyant) ; ✓ Faible densité de réseau.

I.6 Conclusion partielle

Pour ce premier chapitre, on arrive à voir l'évolution des voies ferrées dans le monde et bien évidemment en RDC plus particulièrement. Mais aussi quelques notions de base introduisant à l'étude des voies ferrées, telles que les rails, traverses, ballasts, attaches, etc.

Chapitre II MÉTHODOLOGIE DE TRAVAIL

II.1 Introduction

Ce chapitre présente les méthodes utilisées pour la réalisation de ce travail. Le GPS permettra de prélever les données sur terrain pour donner l'allure du tracé, et en suite mettre ces données dans le logiciel QGIS où elles seront traitées et faire ressortir le tracé et enfin les mettre dans Civil3D pour avoir la distance de nos tracés ainsi que le profil et le tracé en plan. Les méthodes de dimensionnement pour les voies ferrées permettront de se prononcer sur la faisabilité de la voie ferrée entre le rond-point CCLK et la Grande Barrière.

II.2 Présentation du site

La ville de Goma située à l'Est de la RDC, à environ1500m d'altitude dans la vallée du Rift. La ville de Goma est le chef-lieu de la province du Nord-Kivu. Elle s'étend sur une superficie de 66,45Km² couverte des roches volcaniques aux reliefs onduleux au pied du volcan Nyiragongo. Elle se situe au bord du Lac Kivu, à 29°14' de longitude Est et à 1°45' de latitude Sud. Elle est limitée au Nord-Ouest par le Parc de Virunga, à l'Est par la République du Rwanda et au Sud par le Lac Kivu. Sur le plan administratif, elle est divisée en 2 communes : Commune de Goma et Commune de Karisimbi. Ces deux communes sont séparées par la route principale allant de la Petite Barrière vers Sake [1].

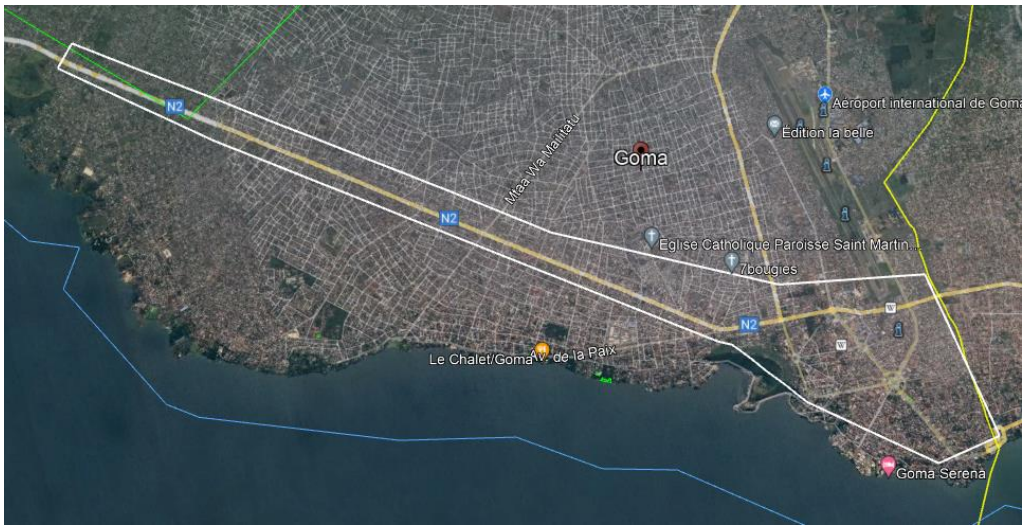


Figure 21. Zone d'étude du tracé

II.3 Les levées topographiques

Pour faire les levées topographiques(nivèlement) ; il existe plusieurs méthodes différentes ; parmi ces méthodes nous pouvons citer : la méthode par cheminement aller et retour, méthode de la double station, méthode de retournement de la lunette, méthode de nivellement indirecte ou trigonométrique, méthode de nivèlement barométrique, méthode de prélèvement par le récepteur GPS, …. Dans ce présent travail nous allons utiliser la méthode de prélèvement des données par le GPS pour sa précision, sa fiabilité et sa facilité d'utilisation. Cette méthode va nous permettre d'obtenir certaines données topographiques que nous allons importer dans le logiciel QGIS pour l'allure des tracés, et, une fois les données topographiques obtenue, nous allons alors faire le tracé en plan et le profil en long dans le logiciel Civil3d, et enfin proposer un profil en travers avec Archicad.

II.3.1 Le tracé en plan

Le tracé en plan est une succession de droites reliées par des liaisons. Il représente la projection de l'axe routier sur un plan horizontal qui peut être une carte topographique ou un relief schématisé par des courbes de niveau. Les caractéristiques des éléments constituant le tracé en plan doivent assurer les conditions de confort et de stabilité et qui sont données directement dans les codes routiers en fonction de la vitesse de base et le frottement de la surface assuré par la couche de roulement.

Pour faire le tracé en plan il faut : Choisir la vitesse de référence ; avoir les éléments du tracé en plan et faire la clothoïde.

II.3.1.1 Choisir la vitesse de référence

La vitesse de référence (Vb) c'est le paramètre qui permet de déterminer les caractéristiques géométriques minimales d'aménagement des points singuliers pour le confort et la sécurité des usagers. Le choix de cette vitesse de référence dépend : du type de voie, de l'importance et genre de trafic, de la topographie et des Conditions économiques d'exécution et d'exploitation.

II.3.1.2 Les éléments du tracé en plan

Un tracé en plan moderne est constitué de trois éléments : des droites (alignements), des arcs de cercle et des courbes de raccordement (CR) de courbures progressives.

a. Alignements droits

Il existe une longueur minimale d'alignement $Lmin$ qui devra séparer deux courbes circulaires de même sens, cette longueur sera prise égale à la distance parcourue pendant 5 secondes à la vitesse maximale permise par le plus grand rayon des deux arcs de cercles. Si cette longueur minimale ne peut pas être obtenue, les deux courbes circulaires sont raccordées par une courbe en C, Ove, S, ou à sommet. La longueur maximale $Lmax$ est prise égale à la distance parcourue pendant 60 secondes.

L_{min}=5 V

L_{max}=60 V

Avec **V** en **(m/s).**

b. Les arcs de cercle

Dans un virage de rayon R, un véhicule subit l'effet de la force centrifuge qui tend à provoque une instabilité du système, afin de réduire l'effet de la force centrifuge en incline la chaussée transversalement vers l'intérieure du virage (éviter le phénomène de dérapage) d'une pente dite devers exprimée par sa tangente. Le devers « d » ne doit pas être trop grand (risque de glissement à faible vitesse par temps pluvieux ou verglas). Le devers « d » ne doit pas être trop faible pour assurer un bon écoulement des eaux.

- ✓ **Rayon horizontal minimal absolu** : C'est le rayon minimum pour lequel la stabilité du véhicule est assurée, il ne faut jamais descendre au-dessous de cette valeur, et il est défini comme étant le rayon de devers maximal.

$$RH_M = \frac{V_b^2}{127.(ft+d_{max})}$$

- ✓ **Rayon minimal normal :** Le rayon minimal normal (RHN) doit permettre à des véhicules dépassant Vb de 20 (km/h) de rouler en sécurité.

$$RH_N = \frac{(V_b + 20)^2}{127.(ft+d_{max})}$$

- ✓ **Rayon au dévers minimal :** C'est le rayon au dévers minimal, au-delà duquel les chaussées sont déversées vers l'intérieur du virage et tel que l'accélération centrifuge résiduelle à la vitesse Vb serait équivalente à celle subit par le véhicule circulant à la même vitesse en alignement droit.

$$RH_D = \frac{V_b^2}{127 \times 2 \times d_{min}}$$

- ✓ **Rayon minimal non déversé** : Si le rayon est très grand, la route conserve son profil en toit et le devers est négatif pour l'un des sens de circulation, le rayon min qui permet cette disposition est le rayon min non déversé ($RHnd$).

$$RHnd = \frac{V_b^2}{127 \times d}$$

c. Courbes de raccordement

Le fait que le tracé soit constitué d'alignement et d'arc ne suffit pas, il faut donc prévoir des raccordements à courbure progressif, qui permettent d'éviter la variation brusque de la courbe lors du passage d'un alignement à un cercle ou entre deux courbes circulaires et ça pour assurer : La stabilité transversale du véhicule, le Confort des passagers du véhicule, la transition de la forme de la chaussée, un tracé élégant, souple, fluide, optiquement et esthétiquement satisfaisant. [10]

II.3.1.3 Clothoïde

La Clothoïde est une spirale, dont le rayon de courbure décroît d'une façon continue dès l'origine ou il infini jusqu'au point asymptotique ou il s'annule, la courbure de la clothoïde est linéaire par rapport à la longueur de l'arc. Parcourue à vitesse constante, la clothoïde maintient constante la variation de l'accélération transversale, ce qui est très avantageux pour le confort des usagers.

La Courbure K linéairement proportionnellement à la longueur curviligne.

K = C.L On pose: $1/C = A^2 \Rightarrow L.R = A^2$

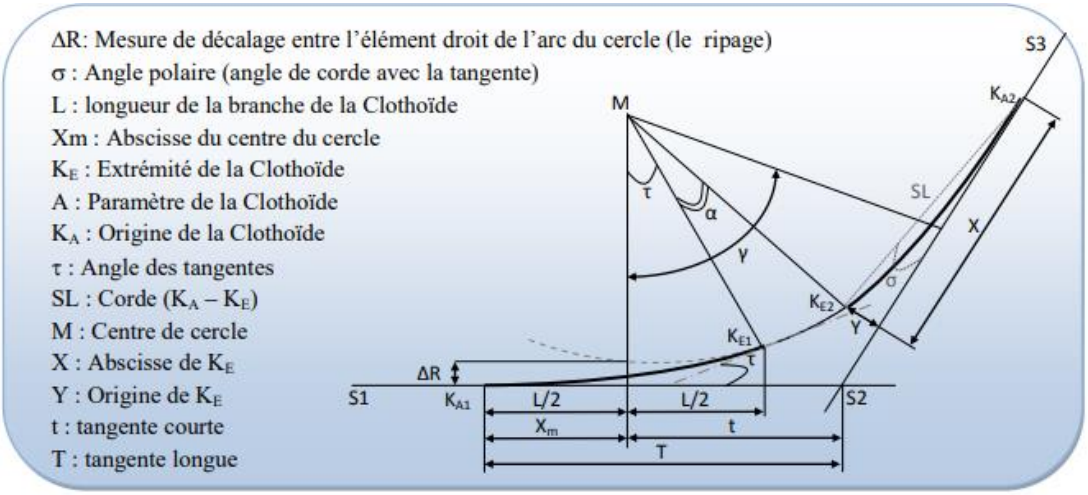


Figure 22. La Clothoïde

Application au projet : Les calculs sont effectués automatiquement à l'aide du logiciel Autodesk Civil 3D 2021.

II.3.2 Le profil en long

Le profil en long d'une route est une ligne continue obtenue par l'exécution d'une coupe longitudinale fictive, donc il exprime la variation de l'altitude de l'axe routier en fonction de l'abscisse curviligne. Le but principal du profil en long est d'assurer pour le conducteur une continuité dans l'espace de la route afin de lui permettre de prévoir l'évolution du tracé et une bonne perception des points singuliers. Le profil en long est toujours composé d'éléments de lignes droites raccordés par des paraboles.

II.3.2.1 Règles à respecter dans le tracé de la ligne rouge

Le tracé de la ligne rouge qui constitue la ligne projet retenue n'est pas arbitraire, mais elle doit répondre à certaines conditions concernant le confort, la visibilité, la sécurité et l'évacuation des eaux pluviales. Parmi ces conditions il y a lieu :

- ✓ D'adapter au terrain naturel pour minimiser les travaux de terrassement qui peuvent être coûteux.
- ✓ De rechercher l'équilibre adéquat entre le volume de remblais et de déblais.
- ✓ De ne pas dépasser une pente maximale préconisée par les règlements.
- ✓ D'éviter de maintenir une forte déclivité sur une grande distance.
- ✓ D'éviter les hauteurs excessives de remblais.
- ✓ Prévoir le raccordement avec les réseaux existants.

- ✓ Au changement de déclivité (butte ou creux) on raccordera les alignements droits par des courbes paraboliques.
- ✓ D'assurer une bonne coordination entre le tracé en plan et le profil en long.

II.3.2.2 Eléments de composition du profil en long

Le profil en long est constitué d'une succession de segment de droites (rampes et pentes) raccordés par des courbes circulaires. Pour chaque point du profil en long on doit déterminer : L'altitude du terrain naturel ; l'altitude de la ligne du projet et la déclivité de la ligne du projet

II.3.2.3 Condition de confort

Lorsque le profil en long comporte une forte courbure de raccordement, les véhicules sont soumis à une accélération verticale insupportable, Le rayon de raccordement à retenir sera donc égal à :

$\mathbf{v^2 / Rv < g / 40}$ avec $g = 10\ (m/s^2)$ et $v = V/3.6$

D'où :

$Rv_{min} \geq 0,30\ V^2$ (cat 1-2).

$Rv_{min} \geq 0,23\ V^2$ (cat 3-4-5).

Tel que :

Rv : c'est le rayon vertical (m) et V : vitesse de référence (km /h).

II.3.2.4 Condition de visibilité

Elle intervient seulement dans les raccordements des points hauts comme condition supplémentaire à celle de la condition de confort. Il faut que deux véhicules qui circulent en sens opposé puissent s'apercevoir à une distance double de la distance d'arrêt minimum. Le rayon de raccordement est donné par la formule suivante [10] :

$$R_V \geq \frac{d^2}{2.(h_0+h_1+2.\sqrt{h_0.h_1})} \approx 0,27D^2$$

- **d** : Distance d'arrêt (m).
- $\mathbf{h_0}$: Hauteur de l'œil (m).
- $\mathbf{h_1}$: Hauteur de l'obstacle (m).

Dans le cas d'une route unidirectionnelle :

h_0 =1.1 m, h_1= 0.15 m

On trouve : $R_v = a\ d_1^2$ $a = 0.24$ pour cat **1-2**

$R_v = 0.24\ d_1^2$

Application au projet : Les calculs sont effectués automatiquement à l'aide du logiciel Autodesk Civil 3D 2021.

II.3.3 Profil en travers

Le profil en travers est une coupe transversale menée selon un plan vertical perpendiculaire à l'axe de la route projetée. La création de ce profil en travers sera faite et générée par le logiciel SketchUp.

II.4 Choix de la structure d'assise [11]

II.4.1 Introduction

Le lit de voie ou la sous-structure est le fond sur lequel repose cette voie. Il répartit la charge des traverses sur le quai, amortit les vibrations de la superstructure et contribue à la stabilisation longitudinale et latérale de la voie. Ses propriétés et son épaisseur peuvent donc assurer un bon fonctionnement des voies ferrées en termes de rigidité, de résistance et de drainage.

Sans une connaissance approfondie des sols et des roches rencontrées, les projets de nouvelles lignes ne peuvent être économiquement et techniquement suffisamment sûrs et réussis. En règle générale, des enquêtes de pénétration, des excavations et des tests en laboratoire doivent être effectués, ce qui doit également garantir le respect des exigences techniques et des réglementations environnementales. L'épaisseur et le type de couche de base dépendent des facteurs suivants :

- ✓ Caractéristiques générales du sol de la plate-forme (qualité, capacité portante, sensibilité à l'eau et au gel).
- ✓ Conditions climatiques du site.
- ✓ Volume de trafic (tonnage, charge utile, vitesse).
- ✓ Equipement (profil du rail, type et espacement des traverses).

II.4.2 Constituants de la structure d'assise

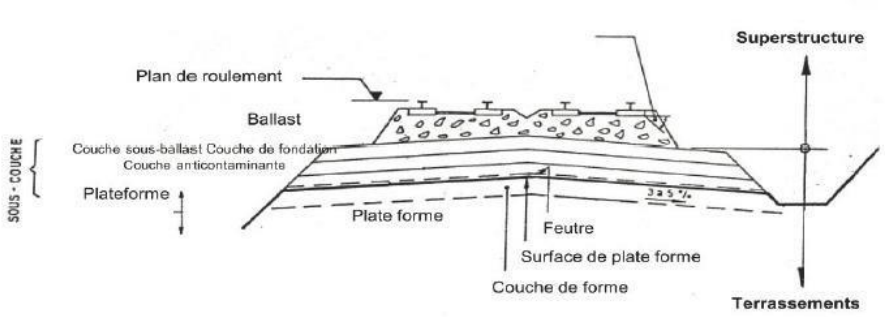


Figure 23. Les constituants de la structure d'assise

II.4.2.1 Profil du ballast

L'épaisseur minimale du ballast (mesurée sous la traverse à l'aplomb du rail en partie basse) dépend du trafic et du type de traverse. L'épaisseur recommandée de la couche de gravier sous le rail inférieur est d'au moins 30 cm ; pente du remblai de gravier (remblai entre le fond et le dessus de la couche de gravier) est d'environ 33°.

L'expérience a montré que la résistance latérale d'une piste correspond à la force exercée à travers la piste. L'essieu est principalement dû au coefficient de frottement élevé sur le dessous traversée en gravier, puis le profil est étagé sur 0,80 m et prend en charge les arrêts de 0,90 m ; 0,25 m à 0,35 m.

II.4.2.2 Profil de la sous-couche

La sous-couche est une couche de conditionnement qui est placée entre la couche de gravier et la plate-forme, et la sous-couche peut-être une couche ou plusieurs couches.

Cette sous-couche est constituée d'une couche sous-ballast, d'une couche de fondation et d'une couche anti-contaminant.

Elle a pour rôles :

- ✓ Augmentation de la flottabilité et de la répartition des charges transmises.
- ✓ Contribution à l'amélioration des caractéristiques vibratoires.
- ✓ Antipollution entre plate-forme et couche de gravier.
- ✓ Protéger la plate-forme de l'érosion et du gel.
- ✓ Évacuation des eaux du zénith.

II.4.2.3 La plateforme

La plateforme est la partie supérieure de l'ouvrage en terre supportant la sous-couche. Elle est constituée de terres rapportées dans le cas d'un remblai ou du sol en place dans le cas d'un déblai.

II.4.3 Choix du sol de la couche d'assise

a. **Les quatre classes de qualité Si de sols sont :**

- ✓ **QS0** : Sols "impropres" à la réalisation d'une plateforme correcte et à la suite nécessitent certaines mesures correctrices (substitution du matériau sur une certaine épaisseur, traitement aux liants, utilisation de géotextiles, renforcement par pieux, etc.) ;
- ✓ **QS1** : Sols médiocres acceptables utilisés en conditions hydrogéologiques favorables. Ces sols peuvent, éventuellement, être transformés en sols de meilleure qualité par un traitement approprié, (traitement aux liants) ;
- ✓ **QS2** : Sols moyens ;
- ✓ **QS3** : Bons sols

Tableau 2. Classification des sols UIC719R

Classification des Sols **Identification Géotechnique**	**Classe de qualité des sols**
Sols organiques ;	**QS0 sols impropres.**
Sols fins (comportant plus de 15% de fines) foisonnés, humides et donc non compactables ; Sols comportant des matériaux solubles (sel gemme ou gypse) ; Sols comportant des matériaux polluants (ex : déchets industriels) ; Sols mixtes (minéraux organiques) ; Roches très évolutives (craies, marnes...) ; Sols comportant de 15 à 40% de fines ; Roches tendre (MDE en présence d'eau supérieur à 40, LA SUP à 40.	**QS1 sols médiocres.**
Sols comportant de 5 à 15% de fines ;	**QS2 sols moyens.**

Sols comportant moins de 5 % de fines Mais uniforme. Cu inf. ou égal à 6 ; Roches moyennement dures (25≤MDE≤40 et 30 ≤ LA≤40).	
Sols comportant moins de 5 % de fines ; Roches dures MDE≤25 et LA≤30	**QS3 bons sols.**

b. **Classe de portance des plateformes**

La portance d'une plateforme dépend de la qualité du sol constituant le corps de remblai ou du sol en place en fond de déblai, et de la qualité et de l'épaisseur de la couche de forme (lorsqu'elle existe).

On peut distinguer les trois classes de portance de plateforme suivantes :

- ✓ P1 : plateforme médiocre.
- ✓ P2 : plateforme moyenne.
- ✓ P3 : plateforme bonne.

Tableau 3. Classification des sols de plateforme

Spécifications pour le cœur de remblai ou esplanade naturelle de déblai		**Classe de portance Envisagée pour la Plateforme**	**Couche de forme à mettre en œuvre Pour obtenir cette classe de portance**		
Classe de qualité de Sol	**CBRmin(a)**		**Classe de qualité**	**CBRmin(b)**	**Épaisseur**
QS1	**2-3**	P1	**QS1**	**2-3**	_
		P2	**QS2**	**5**	0.55
		P2	**QS3**	**10-17**	0.38
		P3	**QS3**	**10-17**	0.50
QS2	**5**	P2	**QS2**	**5**	_
		P3	**QS3**	**10-17**	0.35
QS3	**10-17**	P3	**QS3**	**10-17**	_

c. **Détermination de l'épaisseur de la couche d'assise**

Une feuille UIC719R a été utilisée pour déterminer l'épaisseur minimale (m).

La formule est : **E (m) = e + a + b + c + d + f + g**

Tel que :

E : L'épaisseur de la couche d'assise « E = épaisseur du ballast+ épaisseur de la sous-couche (+couche de fondation) ». Elle dépend des facteurs suivants :

- ✓ e : facteur dépendant des classes de portance (P1, P2 ou P3).
- ✓ a : facteur dépendant de groupe de l'UIC (groupe 1 à 6, UIC 714).
- ✓ b : facteur dépendant de type de traverse.
- ✓ c : facteur dépendant des conditions de travail.
- ✓ d : facteur dépendant de la charge maximale d'essieu des véhicules.
- ✓ f : facteur dépendant de la vitesse.
- ✓ g : facteur dépendant de l'installation de géotextiles.

Avec ;

e = 0,70 m pour les plates-formes de classe de portance P_1 ;

e = 0,55 m pour les plates-formes de classe de portance P_2 ;

e = 0,45 m pour les plates-formes de classe de portance P_3 ;

a = -0,05 m Pour les groupes UIC 3et 4 ;

a = -0,10 m pour les groupes UIC 5,6 et 7,8 et 9 avec voyageurs ;

a = -0,15 m pour les groupes UIC 7, 8, 9 sans voyageurs ;

b = 0 ; pour les traverses bois de longueur 2,6 m ;

b = (2,50-L)/2; pour les traverses béton de longueur L (en m) ;

b peut être négatif si L>2,50 m ;

c = 0 pour un dimensionnement normal ;

c = -0,10 m à titre exceptionnel pour des opérations difficiles sur les lignes existantes de groupe UIC 7 ,8 et 9 sans voyageurs ;

c = -0,05 m à titre exceptionnel pour des opérations difficiles de groupe UIC 7, 8 et 9 sans voyageur ;

d = 0, lorsque la charge maximale d'essieu des véhicules remorqués ne dépasse pas 20 KN ;

d = 0,05 m lorsque la charge maximale d'essieu des véhicules remorqués ne dépasse pas 22,5 KN ;

d = 0,12 m lorsque la charge maximale d'essieu des véhicules remorqués ne dépasse pas 25 KN ;

f = 0, pour toutes les lignes à v ≤ 160 km/h et pour les plates-formes de portance P3 des lignes à grande vitesse ;

f = 0,05 m, pour les plates-formes de classe de portance P2 des lignes à grande vitesse ;

f = 0,10 m, pour les plates-formes de classe de portance P1 des lignes à grande vitesse ;

g ≥ 0, lorsque la couche de forme est en sol QS1 ou QS2 ;

g = 0 (pas de géotextile), lorsque la couche de forme est en sol QS3.

II.5 Choix de la traverse [12] [13]

Le dimensionnement d'une traverse consiste à trouver les dimensions appropriées d'une traverse, qui est un élément structurel important utilisé dans la construction de chemin de fer. Le dimensionnement d'une traverse dépend de plusieurs facteurs, tels que la charge qu'elle doit supporter, la portée de la voie ferrée, les matériaux utilisés et les règlementations en vigueur.

- ✓ **La charge :** il est important de connaitre la charge maximale que la traverse devra supporter, y compris les charges permanentes et les charges variables telles que les véhicules, les trains ou les piétons. Cela permet de déterminer la résistance structurelle nécessaire de la traverse.
- ✓ **Matériaux :** les traverses peuvent être fabriquées à partir de divers matériaux tels que le bois, le béton, l'acier ou des composites.
- ✓ **Portée :** la portée est la distance entre les appuis de la traverse. Plus la portée est grande, plus la traverse doit être dimensionner pour résister aux charges et aux contraintes. Des méthodes d'analyses structurelles, telle que la méthode des éléments finis peut être utilise pour évaluer la performance de la traverse dans différentes conditions de charge.
- ✓ **Normes et réglementation :** les normes de conception et de construction spécifient les exigences minimales pour les traverses afin de garantir la sécurité et la durabilité des structures. Il est important de prendre compte des normes et réglementations lors du dimensionnement des traverses.
- ✓ **Facteurs environnementaux :** lors du dimensionnement d'une traverse, il est également important de prendre en compte les facteurs environnementaux, tels que les

conditions climatiques, la corrosion, les tremblements de terre, etc. Ces facteurs peuvent influencer la conception et les choix des matériaux utilisés.

Pour ce travail, le choix de traverses s'est porté sur les traverses en béton pour ses caractéristiques en termes de résistance, de durabilité et de cout. On a alors les caractéristiques suivantes :

- ✓ **Matériau :** les traverses en béton utilisent le béton précontraint, ce qui signifient qu'elles sont renforcées avec des câbles d'acier tendus à l'intérieur du béton pour augmenter leur résistance et leur durabilité.
- ✓ **Dimensions :** les dimensions des traverses en béton varient en fonction de la spécification de la ligne et des charges attendues. Généralement, elles ont une longueur d'environ 2,00 à 3,50 mètres, une largeur d'environ 0,23 à 0,30 mètre et une hauteur d'environ 0,16 à 0,23 mètre.
- ✓ **Forme :** les traverses en béton ont généralement une forme rectangulaire avec des extrémités biseautés pour faciliter les passages des roues des trains.
- ✓ **Poids :** le poids d'une traverse en béton varie également en fonction de sa taille et de sa conception, mais il est généralement compris entre 500 et 1000 kilogrammes
- ✓ **Résistance et durabilité :** les traverses en béton précontraint offrent une bonne résistance aux charges statiques et dynamiques générées par les trains. Elles sont conçues pour résister aux contraintes mécaniques, aux vibrations et aux variations de température.
- ✓ **Installation :** les traverses en béton sont installées sur le ballast (le lit de pierres sous les voies) à une distance régulière les unes des autres, formant ainsi une base solide pour les rails.

Il existe une formule approximative qui permet de calculer le poids de traverse

$$\mathbf{p = L * l * h * d}$$

Avec **L** comme longueur de la traverse, **l** largeur de la traverse, **h** la hauteur de la traverse et **d** la densité du matériau utilisée.

Dans de nombreux pays, l'espacement standard entre les traverses pour une ligne de chemin de fer ordinaire est généralement d'environ 60 à 80 centimètres. Cependant, il est important de noter que l'espacement exact peut varier en fonction de divers facteurs tels que le type de voie ferrée, le poids et la vitesse des trains, les conditions géographiques et les normes spécifiques du pays ou de la région concernée.

Pour ce travail, on prend un espacement de 60cm.

II.6 Choix du rail [12] [14]

Le dimensionnement des rails fait référence au processus de détermination des dimensions appropriées des rails utilisés dans la construction de voies ferrées. Il est essentiel de choisir les bons types et les bonnes dimensions de rails pour garantir la sécurité, la stabilité et la durabilité du réseau ferroviaire. En réalité il n'y a pas une méthode appropriée pour déterminer les dimensions des rails, généralement pour déterminer les dimensions de rails on se réfèrent à des normes de certains pays car il y a une certaine standardisation en fonction de spécificités de norme du pays, de spécificité de la voie, et ainsi de suite.

Pour ce travail, nous allons utiliser les rails gorge qui sont les plus utilisés actuellement dans le monde et sont même appelés les rails à acier standard et offrent une bonne résistance et une grande durabilité. Ces rails sont polyvalents et peuvent convenir à une large gamme de condition de trafic.

Ils ont généralement pour caractéristiques selon la SNCF : une longueur standard de 36 mètres ; section transversale en forme de « I » ou de « U » inversé. La partie supérieure du rail appelée la table, est plate et fournit une surface de roulement pour les trains. La partie inférieure du rail, appelée âme, a une forme spécifique pour fournir la résistance et la stabilité nécessaires. Le Poids par mètre linéaire compris entre 40 et 60 kilogrammes. Le poids du rail dépend de la capacité de charge requise et de la vitesse de circulation des trains. Les rails peuvent être fabriqués en acier, généralement en acier au carbone ou en acier allié pour assurer la résistance nécessaire.

Différents types d'acier peuvent être utiliser en fonction des exigences spécifique du réseau ferroviaire. L'écartement standard pour une ligne ordinaire en France est de 1435 mm ce qui correspond à l'écartement standard utilisé dans de nombreux pays dans le monde. Il est utilisé pour assurer l'interpolarité des trains et des infrastructures ferroviaires entre différents réseaux.

L'écartement standard sera utilisé dans ce travail.

- **Détermination du poids des rails**

Comme on l'a dit précédemment, il n'existe pas une méthode scientifique permettant d'établir le poids des rails le plus approprié à une ligne donnée. En effet ce paramètre est lié, de manière assez complexe à d'autres paramètre tels que :

- ✓ La charge par essieu P (t)
- ✓ La vitesse maximale V (km/h)

- ✓ Le tonnage annuel du trafic ferroviaire T
- ✓ Le type de traverse et leur espacement
- ✓ Un coefficient A égal à 1.2

En principe, le choix doit aboutir à minimiser pendant la vie d'une voie, le cout total d'entretien et d'amortissement et des investissements. A ce sujet, on emploie normalement des formules empiriques mises au point sur la base des expériences de différents campagne de chemin de fer.

Cependant, nous avons :

- ✓ La formule proposée par « la conférence ferroviaire du Caire » est $\mathbf{q = 2.5P}$
- ✓ La formule proposée par le professeur YERSHOV est $\mathbf{q= \frac{Vmax}{2.2}}$
- ✓ La formule proposée par le professeur SHULGA est $\mathbf{q = 31.046 * T^{0.203}}$
- ✓ La formule proposée par JEAN ALIAS dans la « revue générale de chemin de fer la voie Africaine-supplément n° 7 /8 1988 » est $\mathbf{q = 2 * P + 2}$
- ✓ La formule de SHA JUNIANZ est $\mathbf{q = A * (1 + T^{0.25})(1 + 0.012 * V)^{\frac{2}{3}} * P^{\frac{2}{3}}}$

q étant le poids par mètre linéaire du rail (en ***kg/m***)

II.7 Les assemblages [12] [15]

Les assemblages sont des éléments essentiels de la voie car sans eux il est difficile de parler concrètement d'une voie. Les différents éléments ont besoin d'être connecter entre eux afin de maintenir une stabilité de la voie.

Les systèmes de fixation les plus courantes sont les attaques élastiques, qui permettent une flexibilité pour absorber les vibrations et les contraintes dues au passage des trains. Les traverses en béton peuvent être équipées d'ancrages ou des plaques de fixation pour assurer leur stabilité et empêcher tout déplacement latéral ou longitudinal. Ces dispositifs garantissent que les traverses restent solidement ancrées dans le ballast. On fait souvent recours au joints des dilatations ; les assemblages en béton et des rails doivent tenir compte de l'expansion thermique des rails. Des joints de dilatation sont généralement prévus à des intervalles réguliers pour permettre l'expansion et la contraction des rails en fonction des variations de températures.

Pour la traverse en béton, le rail est fixé à l'aide d'un boulon-tirefond vissé dans une gaine isolante ou non, elle-même scellée dans la traverse à l'aide d'un boulon à tête marteau.

En parlant de la fixation des rails sur traverse en béton, il est à noter que la selle et le traverse en béton sont intercalées par une semelle en caoutchouc. Ce dernier favorise la transmission des charges et empêche la fissuration du béton.

II.8 Conclusion partielle

Dans ce chapitre, nous venons de présenter les méthodes qu'on a eu à utiliser pour faire le tracé et le dimensionnement de notre ligne ferroviaire reliant le rond-point CCLK et la Grand-Barrière.

Chapitre III PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

III.1 Introduction

Dans cette section, nous aurons à présenter les résultats de ce présent travail en commençant par proposer deux tracés et d'évaluer la faisabilité de ces tracés pour qu'en fin évaluer le coût de ces derniers après leurs dimensionnements.

III.2 Proposition des tracés

Les annexes 1, 2 et 3 sont respectivement les propositions du premier tracé, du second tracé et la représentation de ces deux tracés sur une même carte.

III.2.1 Le premier tracé

A la sortie du rond-point CCLK le tracé prend l'allure de la RN2, passant par : la station SIMBA, l'entrée CAJED, le rond-point TERMINUS, … jusqu'à la Petite Barrière et fait un détour dans le quartier MAPENDO(Birere) et continue jusqu'à la Grande Barrière.
L'illustration de ce tracé est en annexe (annexe 1)

III.2.2 Le second tracé

Ce second tracé commence aussi par le rond-point CCLK et suit également l'allure de la RN2 et arrivé à l'INTIGO il passe au rond-point SOLDAT et continue jusqu'à atteindre la Grande Barrière.
L'annexe 2 montre la proposition du second tracé.
Et enfin l'annexe 3 montre l'allure de ces deux tracés cités ci-haut.

III.3 Le tracé en plan

Le tracé en plan consiste à représenter l'axe de la route par une succession de lignes brisées appelées alignements généraux (segments de droites). Notre tracé en plan est généré par le logiciel CIVIL 3D. En annexe, on trouve les tracés en plan de nos deux tracés proposés.

L'annexe 4 représente le tracé en plan du premier tracé proposé et l'annexe 5 représente le tracé en plan du second tracé proposé.

III.4 Le profil en long

On distingue deux types de profil en long et ces deux profils sont généralement présentés sur un même profil et tel est notre cas : le profil en long du terrain naturel en vert et le profil en long du projet en rouge. Le profil en long est généré par le logiciel CIVIL 3D.

Les annexes 6 et 7 sont respectivement les profils en long du premier et second tracé.

III.5 Le profil en travers

Le profil en travers de la route est représenté par le tracé de la chaussée et du terrain naturel sur un plan vertical orthogonal à l'axe de la route. Pendant la représentation du profil en travers, l'œil de l'observateur est fixé vers l'origine du projet. Le profil en travers a été fait dans le logiciel SketchUp.

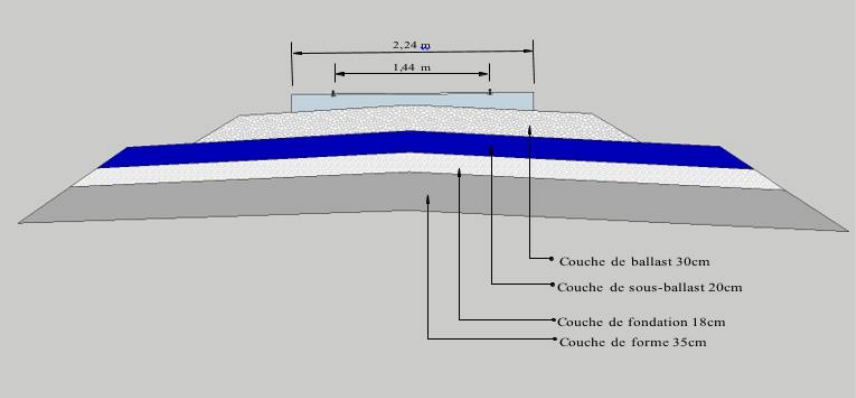


Figure 24. Profil en travers

III.6 Dimensionnement de la ligne ferroviaire du projet

III.6.1 Dimensionnement de la plateforme

D'après la classification des sols selon UIC719 au ***Tableau 2*** ; on trouve un sol QS2

Le système sur voie est un rail sur traverse en béton

D'après le ***Tableau 3*** ; on a une ligne de plateforme P2, ce qui veut dire qu'on aura e=0,55m ; f=0m

On prend le groupe UIC3 car la vitesse à utiliser est de v≤160km/h→a=-0,05m

Pour les traverses en béton, on a une longueur L=2,245m selon VAX U31

→ $b=\frac{(2,50-2,245)}{2}$=0,1275m

On prend b=0,13m

Pour le dimensionnement normal c=0m

On prend le chargement par essieu de 22,5KN

→ d=0,05m

Nous supposons que la structure se posera sur un bon sol, d'où la couche de forme est de classe QS3 ce qui signifie qu'il n'y a pas de géotextile.

→ g=0m

On a alors :

a=-0,05m ;

b=0,13m ;

c=0m ;

d=0,05m ;

e=0,55m ;

f=0m ;

g=0m.

L'épaisseur de la couche d'assise est alors : E = e +a +b +c +d +f +g

= (0,55-0,05+0,13+0+0,05+0+0) m

E=0,68m

La couche de forme à mettre en place pour obtenir une classe de portance P2 pour la Plateforme QS3 est e_f= 35cm.

D'où :

Tableau 4. Résultats des épaisseurs de la plateforme et la couche de forme

Couche	**Epaisseur(m)**	**Matériaux**
Ballast	0.30	GC (grave concassée) 25/50 mm
Sous-ballast	0.20	Grave bien gradué 0/31.5 mm
Couche de fondation	0.18	GC (grave concassée) 0/50 mm
Couche de forme	0.35	GNT

III.6.2 Détermination du poids des rails

Les rails sont du type gorges, ils ont été choisi parce qu'ils sont les plus utilisés au niveau mondial. Comme on l'a dit précédemment, il n'existe pas une méthode scientifique permettant d'établir le poids des rails le plus approprié à une ligne donnée.

Cependant, nous allons déterminer le poids des rails avec la connaissance de certains paramètres.

- ✓ La formule proposée par « la conférence ferroviaire du Caire » est

  $\mathbf{q = 2.5P = 56,25\ kg/m}$

- ✓ La formule proposée par le professeur YERSHOV est

  $\mathbf{q = \frac{Vmax}{2.2} = 72,72\ kg/m}$

- ✓ La formule proposée par le professeur SHULGA est

  $\mathbf{q = 31.046 * T^{0.203} = 266,82\ kg/m}$

- ✓ La formule proposée par JEAN ALIAS dans la « revue générale de chemin de fer la voie Africaine-supplément n° 7 /8 1988 » est

  $\mathbf{q = 2 * P + 2 = 47\ kg/m}$

- ✓ La formule de SHA JUNIANZ est

  $\mathbf{q = A * (1 + T^{0.25})(1 + 0.012 * V)^{\frac{2}{3}} * P^{\frac{2}{3}} = 295,85\ kg/m}$

Avec : *A=1,2*

P=22,5 tonnes (charge par essieu) ;

v=160km/h (vitesse) ;

T=40000 tonnes/an ;

T est le tonnage annuel des véhicules importés à Goma en 2021.

D'après la caractérisation des rails selon l'UIC, on peut prendre le poids linéaire **q=60kg/m**, car ces cinq formules nous laissent dans l'intervalle de 47 kg/m et 295,85 kg/m.

III.6.3 Détermination du poids des traverses

Les traverses choisies sont celles en béton de dimensions :

L=2,245m ; l=0,25m et h=0,20m.

On peut donc déterminer le poids d'une traverse en utilisant la formule

$$\mathbf{p=L\times l\times h\times d}$$

Avec **d** la masse volumique du matériau utilisé.

On a alors : p=2,245×0,25×0,20×2500

$$\mathbf{p=280,645\ kg}$$

III.7 Estimation du coût de construction

Vous trouverez ci-après les principaux éléments considérés pour la réalisation de l'estimation. De façon générale, les coûts unitaires utilisés dans l'estimation ont été validés à partir de travaux récents dans le même domaine. Pour ce qui est de la superstructure (rails, dormants et ballast), les coûts unitaires ont été fixés après quelques recherches.

Aucun montant pour l'achat des engins et wagons nécessaires au transport du produit n'est inclus dans l'estimation. Il en est de même pour les véhicules qui serviront à l'entretien de la voie ferrée en opération.

a. La superstructure

La superstructure de la voie ferrée comprend tous les matériaux et éléments se situant au-dessus de la ligne d'infrastructure (ballast, sous-ballast, rails, traverses en béton 2,245m de longueur, soudage des rails et autres petits éléments).

Les quantités ont été évaluées en tenant compte des éléments suivants :

- ✓ L'épaisseur du ballast serait de 0,30m sous les traverses ;
- ✓ L'épaisseur du sous-ballast serait de 0,20m ;
- ✓ Les rails seront joints par le procédé de soudage par étincelage et le nombre de joints a été calculé pour des sections de rails de 36m de longueur. Soit 346 joints pour le premier tracé et 332 joints pour le second tracé ;

Les coûts unitaires au mètre sont de 698 $ pour du rail dans les zones en tangente et de 714 $ pour du rail dans les courbes. On aura à utiliser les rails de 698$ le mètre.

b. Les panneaux de signalisation

Cette section couvre tous les coûts pour l'installation de différents panneaux de signalisation aux principaux endroits suivants :

- ✓ Passages à niveau (chemins, routes, …) ;
- ✓ Indicateurs de vitesse ;
- ✓ Dérailleurs ;
- ✓ Aiguillage et équipements divers ;
- ✓ Un coût moyen de 150 $ du panneau a été pris en considération.

D'où pour les deux tracés, au moins 2000 panneaux ont été envisagés.

c. Environnement

Les travaux inclus dans la présente section de l'estimation incluent tous les ouvrages nécessaires à la protection de l'écoulement d'eau pendant les travaux ainsi que le contrôle des poussières pendant les opérations de concassage du roc.

Comme les données de terrain et le tracé de la voie ferrée sont encore très imprécis à cette étape, le montant nécessaire a été évalué en considérant une pratique qui consiste à considérer un montant de 1 % du coût des travaux.

d. Organisation du chantier

Les travaux couverts par la présente section incluent toutes les installations temporaires de chantier (bureaux, entrepôts, …), le couvert pour les travailleurs pendant la durée des travaux ainsi que le personnel-cadre administratif nécessaire à la gestion de ces travaux. Pour évaluer le montant de cette section, un montant équivalent à 4 % du coût des travaux a été appliqué.

e. Contrôle de qualité

Dans le cadre de ce travail, il s'agit des coûts pour le contrôle de la qualité nécessaire lors de l'exécution des travaux sur les rails et les granulats seulement. Comme il s'agira sans doute de rails neufs, les coûts pour le meulage des rails et leur vérification par ultrason ont été exclus. Ces contrôles sont déjà faits en usine et certifiés par le fabricant. Les coûts rattachés au contrôle de la qualité sont inclus à ceux de la superstructure.

f. Les éléments exclus de cette estimation

Les éléments de ce projet qui ne seront pas pris en compte dans cette estimation sont :

- ✓ Les taxes liées à ce projet ;
- ✓ La fourniture ou la location des engins et des wagons qui seront nécessaires au transport du matériau ;
- ✓ Les terrassements ;
- ✓ L'obtention des terrains ;
- ✓ Le coût de construction des gares ;
- ✓ Comme il s'agira d'un long tracé de voie ferrée, l'achat de deux camionnettes rail/route ainsi que d'un véhicule d'entretien complet avec sa remorque et tout l'équipement nécessaire à son autonomie pour l'entretien et la réparation de la voie ferrée. À noter que le coût pour ces véhicules serait de 1,5 M$.

III.7.1 Estimation du coût de construction du tracé 1

Après introduction de nos données géographiques dans le logiciel CIVIL3D, on trouve une distance de 12428,17m avoisinant 12,5km de longueur pour le tracé 1.

La largeur de la voie étant de 2,25 m et l'épaisseur du ballast étant : 0,35m pour la couche de forme ; 0,18m pour la couche de fondation ; 0,20m pour le sous-ballast et 0,30m pour l'épaisseur du ballast.

- Pour le ballast on a : ***0,30*2,245*12428,17=8370,372495 m^3 de grave concassée 25/50***
- Pour le sous-ballast on a : ***0,20*2,245*12428,17= 5580,24833 m^3 de grave concassée 0/31,5***
- Pour la couche de fondation on a : ***0,18*2,245*12428,17= 5022,223497 m^3 de grave concassée 0/50***
- Pour la couche de forme on a : ***0,35*2,245*12428,17= 9765,4345775 m^3 de granulats non traités.***

La longueur des rails sera le double de la longueur de la route car le véhicule ferroviaire s'appuie sur deux rails.

Pour ce projet, on a adopté le poids linéaire du rail de 60kg/m.

Alors pour L_{rail}***=12428,17*2=24856,34m*** ;

Le poids total du rail pour ce second tracé est de ***24856,34m*60kg/m=1491380,4kg***

Les traverses, on a pris un espacement entre elles de 60cm.

Le nombre de traverses qu'on aura est ***:*** $\frac{12428,17m}{0,60m}$***=20713,6166 soit 20714 traverses***

Le poids d'une traverse étant de 280,625kg, alors le poids total des traverses sera : ***Ptot=280,625*20714=5812866,25 kg***

Le volume du béton est $V=\frac{5812866,25}{2500}$***=2325,1465 m^3***

III.7.2 Estimation du coût de construction du tracé 2

Après introduction de nos données géographiques dans le logiciel CIVIL3D, on trouve une distance de 11920,13m avoisinant 12km de longueur pour le tracé 2.

La largeur de la voie étant de 2,25 m et l'épaisseur du ballast étant : 0,35m pour la couche de forme ; 0,18m pour la couche de fondation ; 0,20m pour le sous-ballast et 0,30m pour l'épaisseur du ballast.

- Pour le ballast on a : ***0,30*2,245*11920,13=8028,207555 m^3 de grave concassée 25/50***

- Pour le sous-ballast on a : ***0,20*2,245*11920,13= 5352,13837 m^3 de grave concassée 0/31,5***
- Pour la couche de fondation on a : ***0,18*2,245*11920,13= 4816,924533 m^3 de grave concassée 0/50***
- Pour la couche de forme on a : ***0,35*2,245*11920,13= 9366,2421475 m^3 de granulats non traités.***

La longueur des rails sera le double de la longueur de la route car le véhicule ferroviaire s'appuie sur deux rails.

Pour ce projet, on a adopté le poids linéaire du rail de 60kg/m.

Alors pour L_{rail}***=11920,13*2=23840,26m*** ;

Le poids total du rail pour ce second tracé est de ***23840,26m*60kg/m=1430415,6kg***

Les traverses, on a pris un espacement entre elles de 60cm.

Le nombre de traverses qu'on aura est ***:*** $\frac{11920,13m}{0,60m}$***=19866,8833 soit 19867 traverses***

Ptot =280,625*19867=5575176,875 kg

Le volume du béton est $V=\frac{5575176,875}{2500}$***=2230,07075 m^3***

D'où :

Tableau 5. Eléments des deux tracés

N°	Désignation	Unité	**Tracé 1**	**Tracé 2**
1	Longueur	m	**12428,17**	**11920,13**
2	Nombre de traverses	unité	**20714**	**19867**
3	Longueur des rails	m	**24856,34**	**23840,26**
4	Quantité matériau ballast	m^3	**8370,372497**	**8028,207555**
5	Quantité matériau s-ballast	m^3	**5580,24833**	**5352,13837**
6	Quantité matériau c. fondation	m^3	**5022,223497**	**4816,924533**
7	Quantité matériau c. forme	m^3	**9765,4345775**	**9366,2421475**
8	Nombre d'attaches	unité	**2000**	**2000**
9	Nombre des joints	unité	**346**	**332**
10	Volume du béton	m^3	**2325,1465**	**2230,07075**

III.8 Coût de la voie totale

Le coût du projet excluant les taxes se résume à :

- ✓ Superstructure : 18 979 622,24 $ pour le premier tracé et 18 203 758,37 $ pour le second tracé ;
- ✓ Signalisation : 300 000 $ pour les deux tracés ;
- ✓ Environnement : 189 796,2224 $ pour le premier tracé et 182037,5837 $ pour le second tracé ;
- ✓ Organisation de chantier : 759 184,8897 $ pour le premier tracé et 728 150,335 $ pour le second ;

Total des travaux : 20 228 603,36 $ pour le Tracé 1 et **19413946,29 $** pour le Tracé 2.

Le détail de ces montants est inclus à l'annexe 4.

III.9 Conclusion partielle

En ce chapitre, nous venons de présenter les résultats de l'étude qui a fait l'objet de notre recherche. En évaluant ces tracés, on trouve qu'ils donnent tous les mêmes avantages malgré que le premier donne une distance un peu longue que le second. Cela entrainant un coût plus élevé que le second tracé, mais malgré que le premier tracé soit le plus coûteux c'est celui qui traverse des endroits stratégiques sur le plan commercial.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le développement des infrastructures de transport est un point stratégique de toute politique d'aménagement du territoire. Les infrastructures sont un facteur incontournable de civilisation et de développement nécessitant des grands investissements et impliquant une démarche scientifique et professionnelle pour sa réalisation afin d'assurer sa pérennité. C'est dans ce même optique que nous avons travaillé sur les voies ferrées qui, l'implantation d'un réseau ferrée à Goma pourrait s'avérer bénéfique pour la ville et ses régions à plusieurs niveaux : décongestion routière, promotion du tourisme, organisation du développement urbain, …

Des études ont montré que le mauvais état des routes en RDC en général et dans la ville de Goma en particulier, réduisent les échanges entre habitants influant ainsi les conditions économiques. Cependant, il s'avère important de remarquer que l'avènement d'une voie ferrée est une réponse pour réduire la congestion routière (les embouteillages) dans la ville de Goma.

Ce travail est le résultat de différentes documentations et recherches, dans le cadre d'apporter une meilleure solution aux problèmes des infrastructures dans la ville de Goma.

Au terme de cette étude, il ressort que cette voie ferrée aura une couche de forme de 0,35 m d'épaisseur, de granulats non traités, une couche de fondation de 0,18 m d'épaisseur, une couche de sous-ballast de 0,20 m d'épaisseur et enfin une couche de ballast de 0,30 m d'épaisseur. Les normes précédemment citées dans ce travail, nous ont permis de choisir le type des rails et des traverses.

Nous avons effectué une étude quantitative et estimatif du projet, ce qui nous a permis d'estimer le coût global de construction du projet.

Au final, nous ne croyons pas avoir épuisé toutes les facettes d'analyse de ce sujet, mais nous accueillons toute sujétion, tout conseil et ouvrons une piste à tout chercheur qui viendra nous compléter avec l'étude géotechnique, le dimensionnement des gares, ….

Bibliographie

[1] Goma et ses avenues, 2015.

[2] A. GOLOIN, "Les premiers chemins de fer", [Online].

[3] "Wikipédia,", 2015 [Oneline].

[4] G. reseach, «Chemin de fer,» 2023. [En ligne].

[5] T. HAK, Suivi et réalisation du contournement ferroviaire de la ville de BISKRA, sur 18.8, Juillet 2019.

[6] ETUDE EN APD DE LA NOUVELLE LIGNE FERROVIAIRE, 2019.

[7] C. Pyrgidis, Railway transportation systems, 2016.

[8] E.T.L., Infrastructure ferroviaire et matériel roulant, 2018.

[9] M. EDDINE, Mise àdouble voie électrifiée et modernisation des installations ferroviaires, tronçon ISSER-TADEMAIT sur 22km, 2010.

[10] Institut International d'Ingénierie , GUIDE DE DIMENSIONNEMENT CORPS DE CHAUSSEE, 2027.

[11] T. Ouzou, Cours: Chemin de Fer, chapitre 2. G. Civil, 2021/2022.

[12] J. Crepin, Conception des voies ferrées.

[13] J. Albenque, Les ouvrages ferroviaires.

[14] C. Mattieu, Voies ferrées: conception et maintenance.

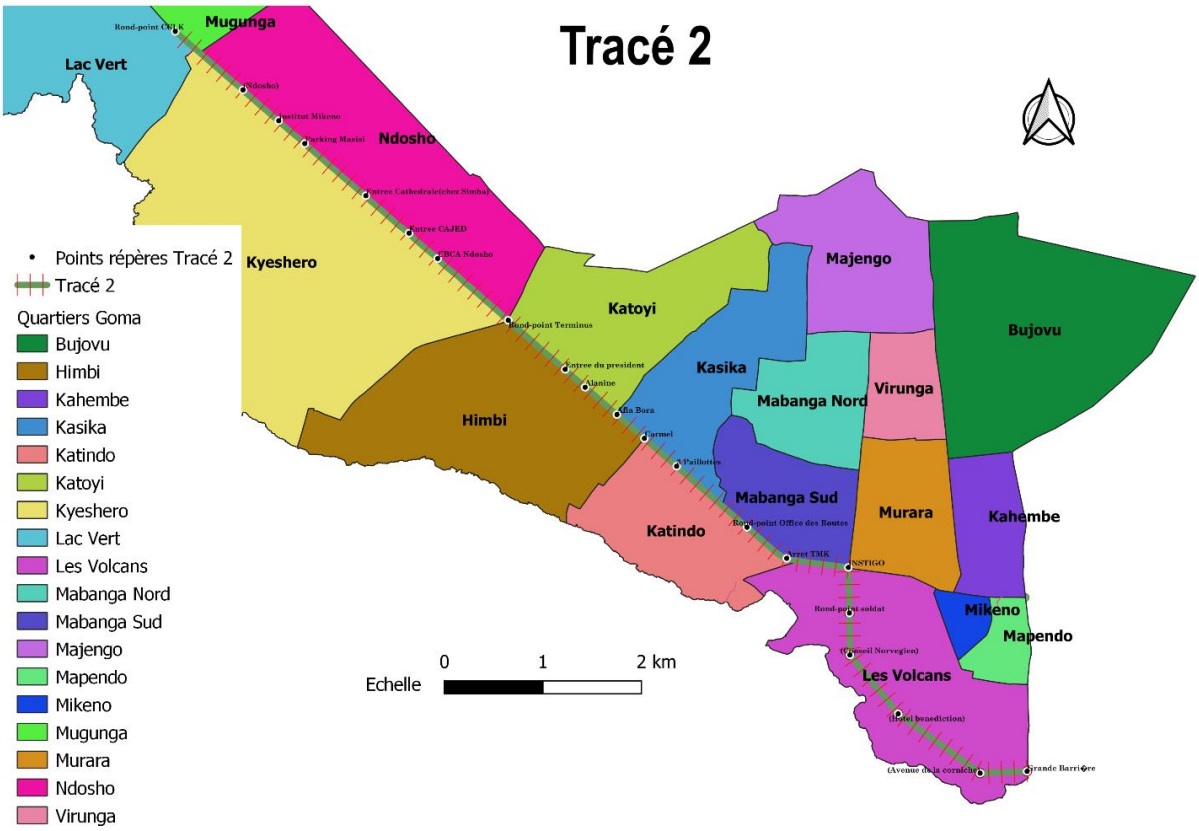
[15] M. Lutz, Génie Ferroviaire.

ANNEXES

ANNEXE 1 : PROPOSITION DU PREMIER TRACE



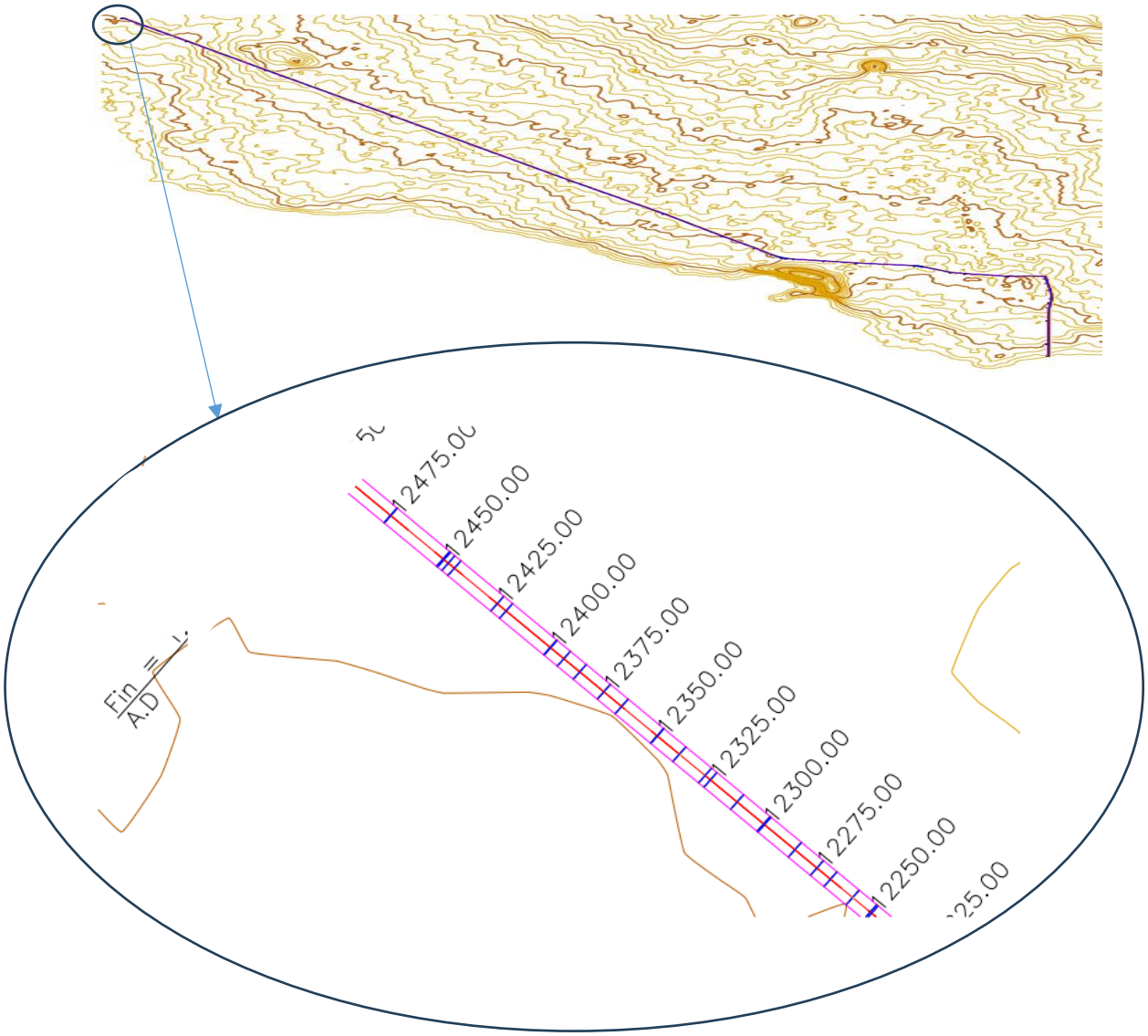
ANNEXE 2 : PROPOSITION DU SECOND TRACE



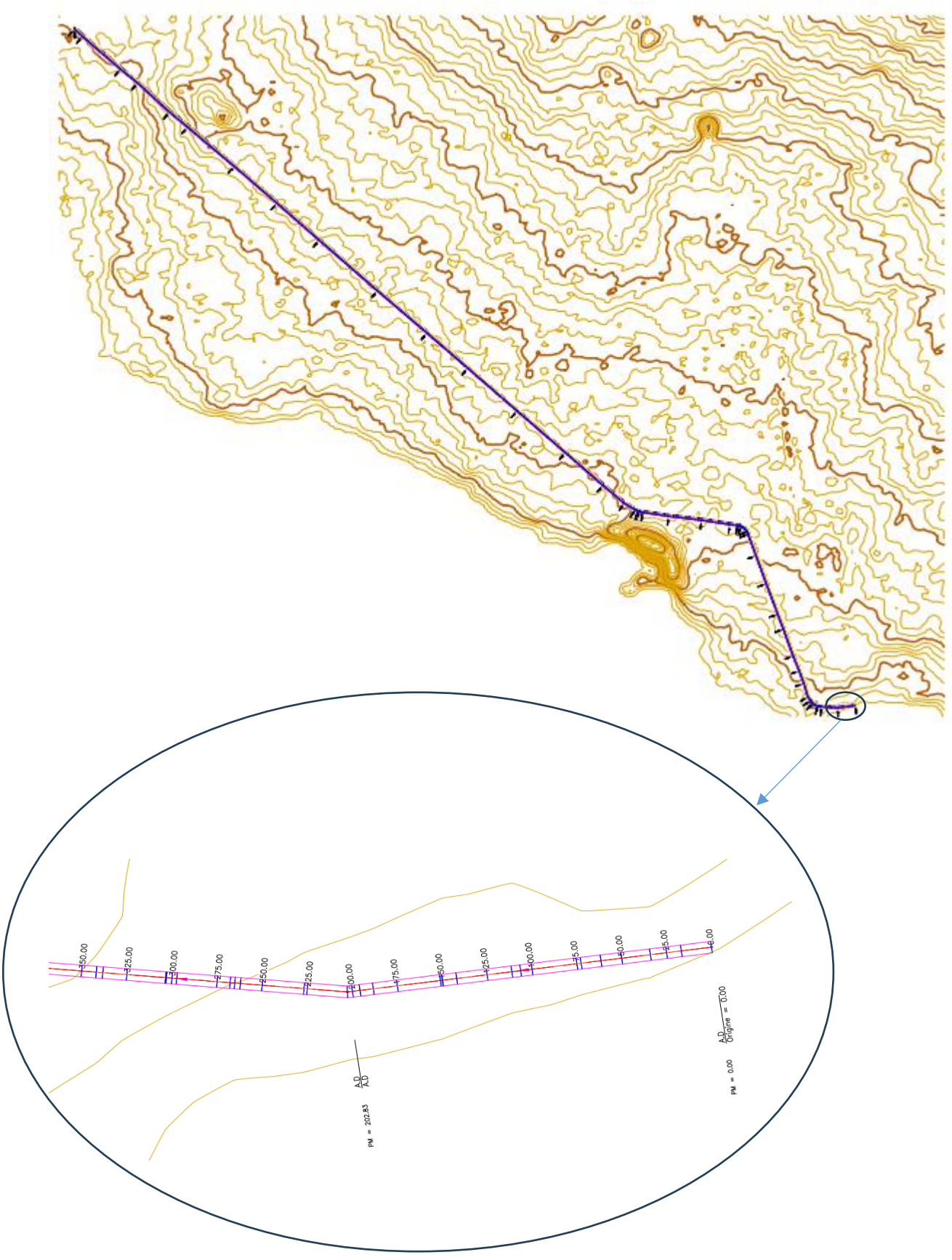
ANNEXE 3 : REPRESENTATION DES DEUX TRACES SUR UNE MEME CA



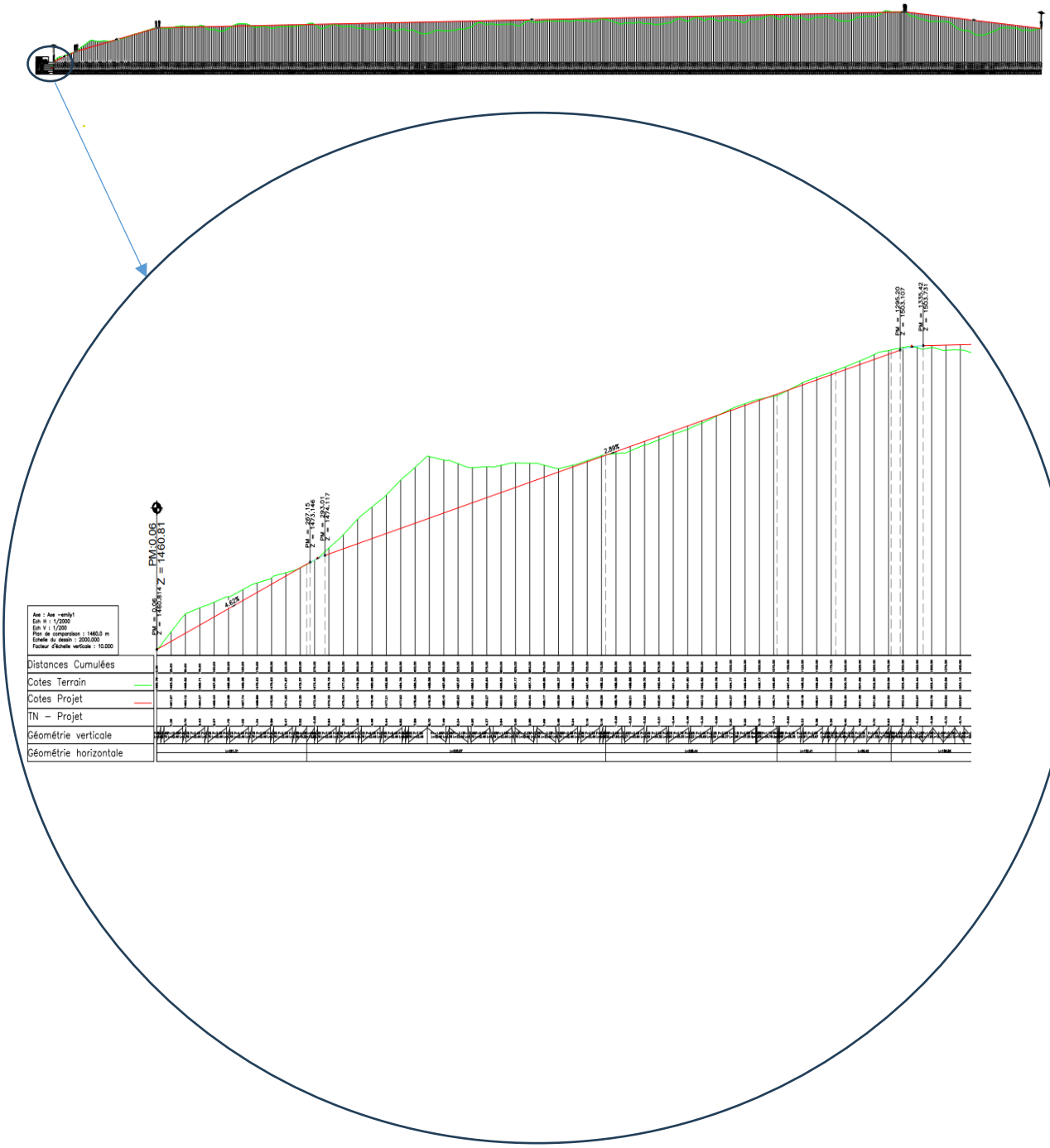
ANNEXE 4 TRACE EN PLAN DU PREMIER TRACE



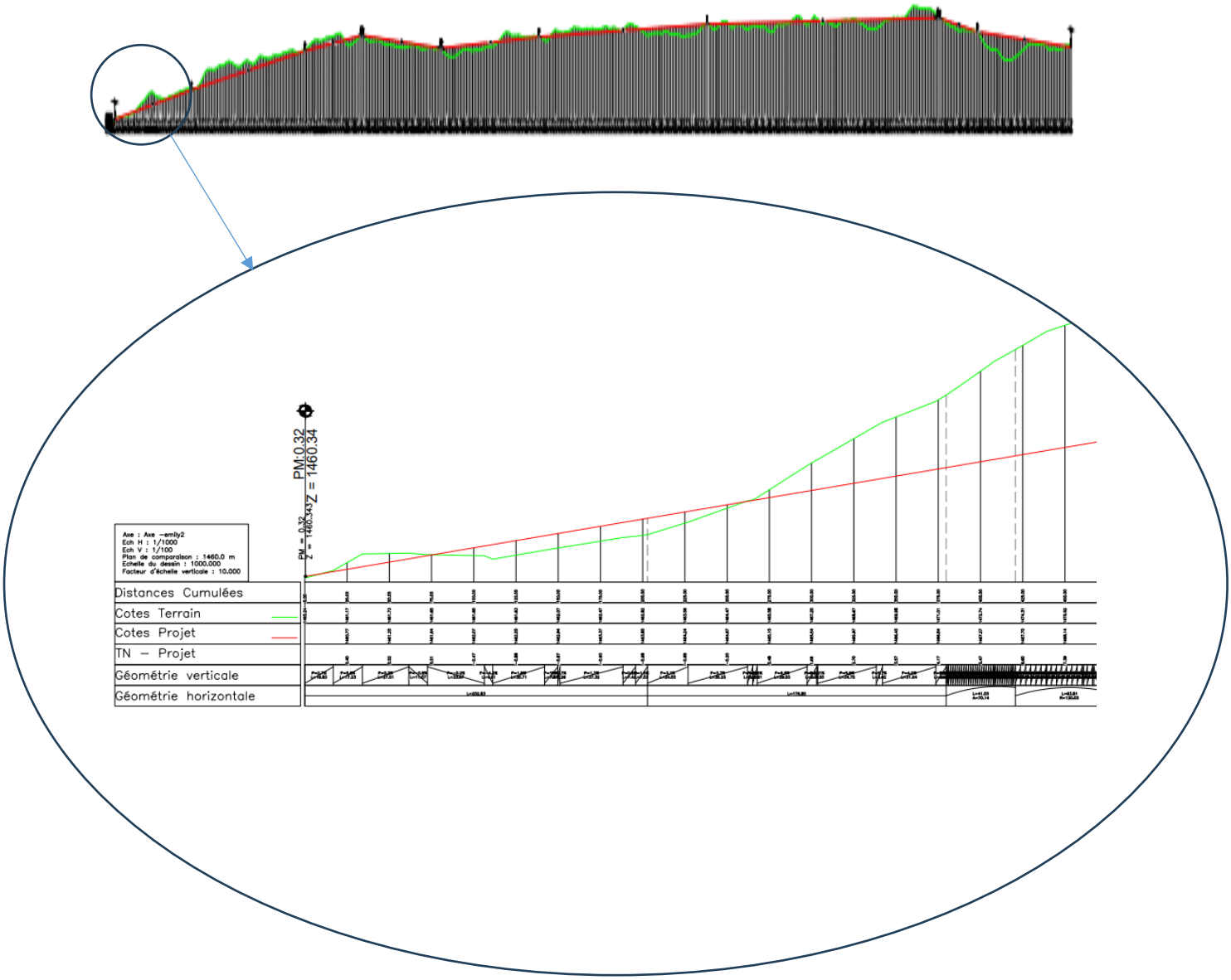
ANNEXE 5 TRACE EN PLAN DU SECOND TRACE



ANNEXE 6 PROFIL EN LONG DU PREMIER TRACE



ANNEXE 7 PROFIL EN LONG DU SECOND TRACE



ANNEXE 4 : DEVIS ESTIMATIF DETAILLE

N°	Désignation	Unité	Coût unitaire en $	Quantité tracé1	Quantité tracé2	Coû
1	Longueur des rails	m	698	24856,34	23840,26	
2	Pierre de ballast	m3	13,5	8370,372497	8028,20755	
3	Pierre de sous ballast	m3	32	5580,24833	5352,13837	
4	Granulats couche de fondation	m3	15	5022,223497	4816,924533	
5	Granulats couche de forme	m3	10	9765,434578	9366,242148	
6	Joints+main d'œuvre	_	8	346	332	
7	Traverses en béton	m3	500	2325,1465	2230,07075	
	TOTAL COUT SUPERSTRUCTURE					
8	panneaux de signalisation	_	150	2000	2000	
9	Organisation du chantier(4%)					
10	Environnement(1%)					
	TOTAL COUT AUTRES					
	COUT TOTAL DE LA VOIE					