

UNIVERSITÉ DE YAOUNDÉ 1

.....
FACULTÉ DES SCIENCES

.....
CENTRE DE RECHERCHE ET
DE FORMATION DOCTORALE
EN SCIENCES, TECHNOLOGIE
ET GÉOSCIENCES (CRFD/STG)

.....
UNITÉ DE RECHERCHE ET DE
FORMATION DOCTORALE
PHYSIQUE ET APPLICATIONS

.....
BP : 812 YAOUNDÉ



UNIVERSITY OF YAOUNDE 1

.....
FACULTY OF SCIENCES

.....
POSTGRADUATE SCHOOL OF
SCIENCE, TECHNOLOGY AND
GEOSCIENCES (CRFD/STG)

.....
RESEARCH AND
POSTGRADUATE TRAINING
UNIT FOR PHYSICS AND
APPLICATIONS

.....
P.O.BOX : 812 YAOUNDE

LABORATOIRE DE PHYSIQUE DE L'ENVIRONNEMENT TERRESTRE

LABORATORY OF PHYSICS OF EARTH SYSTEM

CONTRIBUTION DE LA GÉOMATIQUE AUX RACCORDEMENTS GÉODÉSIQUES

Mémoire rédigé et présenté en vue de l'obtention du
Diplôme de Master of Science en PHYSIQUE
Option GÉOPHYSIQUE ET GÉO-EXPLORATION
Par

NGONGANG MAGNOU Eddy Gabin
Titulaire d'une licence en physique

Soutenu le 16 décembre 2024 devant le jury suivant :

Président : BEN-BOLIE, Professeur

Examineur : HONA Jacques, Professeur

Rapporteurs : NJANDJOCK NOUCK Philippe, Professeur

MELI'I Jorelle Larissa, Maître de Conférences



Année Académique 2024

TABLE DE MATIERES

DÉDICACE	iii
REMERCIEMENTS	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	v
INDEX DES FIGURES	vi
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET ACRONYMES	vii
RÉSUMÉ	viii
ABSTRACT	ix
INTRODUCTION GÉNÉRALE	x
CHAPITRE 1 : REVUE DE LA LITTÉRATURE	1
1.1. GÉNÉRALITÉ SUR LA GÉOMATIQUE	1
1.1.1. Historique de la géomatique	1
1.1.2. La notion de Géomatique	2
1.1.3. Des coordonnées géographiques	2
1.1.3.1. Latitude.....	3
1.1.3.2. Longitude.....	3
1.1.4. Le Géoréférencement.....	3
1.1.5. Des systèmes d'information géographique	4
1.2. LES RACCORDEMENTS ROUTIERS.....	5
1.2.1. Les catégories de route	5
1.2.2.1. Règles d'enchaînement du tracé	5
1.2.2.2. Variation du dévers « D ».....	6
1.2.2. Les types de raccordements	6
1.2.2.1. Raccordement en planimétrie	7
1.2.2.2. Raccordement en altimétrie.....	7
1.2.3. Les caractéristiques géométriques des courbes de raccordements	8
1.2.4. Cadres législatif et réglementaire	10
1.3. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE	12
1.3.1. Situation géographique.....	12
1.3.2. Conditions physiques et naturelles	12
1.3.3. Description du réseau routier de Yaoundé.....	13
1.3.4. Enjeux géographiques.....	13
1.3.5. Problématique spécifique	13
1.4. TRAVAUX ANTÉRIEURS	14
CHAPITRE 2 : MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	16
2.1. MATÉRIEL UTILISÉ	16
2.1.1. Ordinateur PC.....	16

2.1.2. Les logiciels utilisés	16
2.1.3. Le GPS Garmin MAP65s portable	16
2.2. MÉTHODES DE L'ÉTUDE	17
2.2.1. Méthode par le GPS	17
2.2.2. Méthode par l'image Satellite de Google Earth (MNT)	18
2.2.2.1. Procédé d'obtention du MNT du campus Universitaire.....	18
2.2.2.2. Obtention du tracé routier et du profil en long sur Google Earth Pro.....	20
2.2.3. Méthodes de calcul.....	22
CHAPITRE 3 : RÉSULTATS ET DISCUSSION	24
3.1. PRESENTATION DES RESULTATS	24
3.1.1. Coordonnées géographiques	24
3.1.2. Tracés routiers des voies du Campus Universitaire	26
3.1.3. Modèle Numérique du Terrain de la zone Campus de l'UY1	26
3.1.4. Profil en long de la nouvelle route proposée : évaluation des remblais et des déblais.....	28
3.2.1. Discussion sur le choix de la méthode des MTNs de GOOGLE EARTH	33
3.2.2. Discussion sur les résultats	34
CONCLUSION GÉNÉRALE	35
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	36
ANNEXES	37

DÉDICACE

A

DIEU, le Père de notre Seigneur Jésus-Christ

REMERCIEMENTS

Au moment où je m'achemine vers la fin de mon étude de Master, il m'est agréable d'exprimer ma gratitude envers des personnes qui ont diversement contribué à la rédaction de ce mémoire mais aussi à ma formation.

Ainsi donc, il m'est permis de remercier tout d'abord l'Éternel Dieu Tout Puissant sans qui rien n'est possible.

Je tiens à remercier :

- M. NJANDJOCK NOUCK, Professeur et Chef de laboratoire de Géophysique et Géoexploration à la Faculté des Sciences de l'UY1 pour son encadrement et sa supervision ;
- Mme MELI'I Jorelle Larissa, Maître des Conférences et Enseignante à la Faculté des Sciences de l'UY1, Département de Physique, pour son encadrement ;
- Mme TCHATO Sandra, Chargée de Recherche à l'INC, pour son aide dans la réalisation des Cartes.
- Mme NGONGANG Gaëlle mon épouse pour son soutien moral et ses encouragements ;
- M. KAMGA Guy Moclaire pour ses multiples conseils et soutiens spirituels ;
- Ma famille pour le soutien apporté ;
- Mes amis et mes promotionnaires pour les encouragements et les renseignements apportés.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Coordonnées Géographiques GPS des points de références.....	24
Tableau 2 : Coordonnées Géographiques GE des points de références.....	24
Tableau 3 : Comparaison des données Géographiques GE et GPS.....	25

INDEX DES FIGURES

Figure 1 : Eléments caractéristiques des courbes de raccordements.....	9
Figure 2 : Prise des données GPS sur le terrain.....	17
Figure 3 : Etape de la préparation du fichier KMZ de la zone Campus sur GE.....	18
Figure 4 : Etape de l'analyse Géostatistique sur ArcMap.....	19
Figure 5 : Etape de génération du MNT 2D de la zone campus.....	20
Figure 6 : Etape d'obtention du profil en long de la nouvelle route proposée.....	21
Figure 7 : Carte du tracé routier des voies pour véhicule du campus avec Google Earth.....	26
Figure 8 : MNT 2D du campus de l'UY1.....	27
Figure 9 : MNT 3D du campus de l'UY1.....	28
Figure 10 : Tracé de la nouvelle route (violet) sur Google Earth.....	29
Figure 11 : Profil en long de la nouvelle route proposée et visualisation des remblais.....	30

SETRA : **S**ervice d'**E**tudes sur les **T**ransports, les **R**outes et leurs **A**ménagements

Rdm : Rayon de courbure minimal

Rnd : Rayon normal de dévers

GE : Google Earth

GPS : Global Positioning System

KML: Keyhole Markup Language

MNT: Modèle Numérique de Terrain

WGS 84: World Geographics System 1984

SIG: Système d'Informations Géographiques

RÉSUMÉ

Le présent travail explore la contribution de la géomatique aux raccordements géodésiques, avec pour objectif de démontrer qu'il est possible d'obtenir un tracé routier et un profil topographique en long d'une route pour évaluer les dénivelés et les remblais, le tout à moindre coût et en peu de temps grâce à des outils comme Google Earth et ArcGIS. Le constat met en lumière les délais prolongés et les coûts exorbitants associés aux études topographiques traditionnelles, qui freinent souvent les projets d'aménagement routier. La question de recherche posée est celle de savoir si la géomatique contribue-t-elle efficacement aux raccordements géodésiques ? Pour répondre à cette question, une méthodologie basée sur l'utilisation des données satellites dont le traitement est fondé sur la théorie des moindres carrés, ainsi que la loi des cosinus et sinus, a été adoptée, complétée par un test de Pearson. Les résultats révèlent un coefficient de Pearson de 0,9999993 entre les coordonnées géographiques de Google Earth et celles d'un GPS portable, illustrant une corrélation presque parfaite. En outre, des cartes du tracé routier des voies du campus de l'Université de Yaoundé 1, ainsi qu'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) et un profil topographique en long, ont été générés, démontrant ainsi l'efficacité des outils géomatiques pour visualiser le relief et planifier des infrastructures de manière rapide et économique.

Mots clés: Géomatique, raccordements géodésiques, Modèle Numérique de Terrain, profil en long, tracé routier

ABSTRACT

This work explores the contribution of geomatics to geodetic connections, with the aim of demonstrating that it is possible to obtain a road layout and a topographical profile along a road to evaluate the height differences and embankments, all at lower cost and in a short time thanks to tools like Google Earth and ArcGIS. The finding highlights the prolonged delays and exorbitant costs associated with traditional topographical studies, which often hamper road development projects. The research question posed is whether geomatics contributes effectively to geodetic connections? To answer this question, a methodology based on the use of satellite data whose processing is based on the theory of least squares, as well as the law of cosines and sines, was adopted, supplemented by a Pearson test. The results reveal a Pearson coefficient of 0.9999993 between geographic coordinates from Google Earth and those from a handheld GPS, illustrating an almost perfect correlation. In addition, maps of the road layout of the University of Yaoundé 1 campus, as well as a Digital Terrain Model (DTM) and a long topographical profile, were generated, thus demonstrating the effectiveness of geomatics tools to visualize the relief and plan infrastructure quickly and economically.

Keywords: Geomatics, geodetic connections, Digital Terrain Model, elevation profile, road layout

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La géomatique, en tant que discipline intégrant les technologies de l'information géographique, joue un rôle crucial dans l'optimisation des processus de planification et de gestion des infrastructures. L'intérêt de ce sujet réside dans la nécessité croissante d'améliorer l'efficacité des études topographiques, particulièrement dans le contexte des projets d'aménagement routier au Cameroun. En effet, le pays fait face à des défis majeurs liés à l'enclavement de certaines régions, ce qui entrave le développement économique et social. La contribution de la géomatique pourrait donc s'avérer déterminante pour surmonter ces obstacles.

D'un point de vue institutionnel, l'État camerounais a reconnu l'importance de la géomatique dans le développement des infrastructures. Des initiatives ont été mises en place pour intégrer ces technologies dans les projets d'aménagement, notamment à travers des partenariats avec des institutions académiques et des organisations internationales. Ces efforts visent à moderniser les méthodes de collecte et d'analyse des données géographiques, permettant ainsi une meilleure planification des infrastructures routières.

Cependant, les études topographiques traditionnelles, souvent longues et coûteuses, ralentissent considérablement le lancement des projets routiers. Selon plusieurs auteurs, notamment Bessas, M. et al (2015), ces méthodes engendrent des délais qui peuvent aller jusqu'à plusieurs mois, voire des années, avant que les travaux ne commencent. Cette situation est particulièrement problématique dans un pays où les besoins en infrastructures sont pressants. Un auteur, Pérez et al. (2020), souligne que l'utilisation de la géomatique pourrait réduire ces délais et coûts, en offrant des solutions plus rapides et moins onéreuses pour la collecte de données géographiques. Cette approche permet d'optimiser les processus de collecte et d'analyse des données, rendant ainsi les projets géographiques plus efficaces et accessibles.

L'objectif de cette recherche est de démontrer qu'il est possible d'obtenir un tracé routier et un profil topographique en long d'une route, permettant d'évaluer les dénivelés et les remblais, grâce à des outils tels que Google Earth et ArcGIS. En outre, l'étude vise à montrer comment ces technologies peuvent être utilisées pour générer un Modèle Numérique de Terrain (MNT) d'une zone d'étude, facilitant ainsi la visualisation du relief à moindre coût et en peu de temps.

L'interrogation selon laquelle la géomatique contribue-t-elle efficacement aux raccordements géodésiques ? constitue le socle de notre travail. Pour répondre à cette question, une méthodologie a été adoptée, reposant sur l'analyse des données satellites via Google Earth, l'application des moindres carrés, ainsi que l'utilisation de la loi des cosinus et sinus. Un test de Pearson a également été réalisé pour évaluer la corrélation entre les données obtenues par ces applications.

Ce mémoire sera structuré en trois chapitres. Le premier chapitre sera consacré à la revue de la littérature, le deuxième aux matériel et méthodes utilisés, et le troisième présentera les résultats et la discussion des données obtenues.

CHAPITRE 1 : REVUE DE LA LITTÉRATURE

Cette section constitue une étape cruciale dans la construction de tout mémoire, car elle permet de situer la recherche dans le champ des connaissances existantes.

1.1. GÉNÉRALITÉ SUR LA GÉOMATIQUE

1.1.1. Historique de la géomatique

L'origine du mot « géomatique » est attribuée au géomètre et photogrammètre français Bernard Dubuisson qui a introduit ce terme à la fin des années 1960, « afin de refléter ce que devenait la réalité de cette profession à cette époque »¹. Mais, les auteurs du site du Génie Civil et Habitat de l'Académie de Paris (2003) insistent en disant que « c'est principalement au Québec au sein de l'université Laval que la géomatique s'est développée au début des années 1980, où elle devient une discipline à part entière ». L'encyclopédie électronique Hypergéo (2004) retrace notamment l'essor canadien du terme « géomatique » en révélant que « C'est au Canada que le mot fait son apparition. Ainsi, en 1993, l'Office de la langue française du Québec adopte le terme géomatique comme la discipline ayant pour objet la gestion des données à référence spatiale et qui fait appel aux sciences et aux technologies reliées à leur acquisition, leur stockage, leur traitement et leur diffusion ». Par ailleurs, la géomatique apparaît comme une des quatre composantes du secteur des sciences de la terre au Ministère des Ressources Naturelles du Canada. L'université Laval au Québec a en son sein une Faculté de Foresterie et Géomatique, où se trouve le Département des Sciences Géomatiques qui dispose d'un Centre de Recherche en Géomatique. Selon l'Office de la langue française du Québec (1993), la percée du terme et la généralisation du concept de la géomatique ont été retardées à cause de l'existence du terme sciences géographiques qui est fortement associé à l'IGN et son École Nationale des Sciences Géographiques (ENSG). Ce qui montre que la géomatique n'est pas une discipline universitaire officiellement reconnue comme dans certains pays autres que le Canada. Néanmoins, cette situation évolue un peu. Quelques universités s'intéressent à ce domaine, des formations apparaissent et quelques programmes de recherche sont menés depuis plusieurs années. » Laurini et Thompson (1992) et Laurini et Milleret-Raffort (1993) fournissent une explication davantage systémique de la géomatique en insistant sur les synergies se créant dans ce champ transdisciplinaire. Selon eux la géomatique se nourrit, sur le plan intellectuel, de plusieurs disciplines et est au croisement de plusieurs champs d'application. Ceci repose sur le fait que la composante spatiale joue un rôle de plus en plus important dans

¹ Selon l'Université de Laval, (2003)

beaucoup de disciplines allant de l'aménagement du territoire jusqu'à l'optimisation des points de vente.

1.1.2. La notion de Géomatique

Au sens lexical, d'après le dictionnaire en ligne tout-savoir (2003), la géomatique est l' « application de l'informatique à la géographie sous la forme de SIG par exemple » ou encore, plus explicitement selon un autre dictionnaire online (dir.ansme.com, 2004), « La géomatique est un champ d'activités qui intègre, selon une approche systémique, l'ensemble des moyens d'acquisition et de gestion des données à référence spatiale requis pour effectuer les opérations scientifiques, administratives, légales et techniques dans le cadre du processus de production et de gestion de l'information sur le territoire ². D'une manière générale et générique, la géomatique se résume à l'acquisition, la production, la gestion et la diffusion d'informations géoréférencées. Elle couvre un ensemble de techniques telles que les levés cadastraux, la géodésie, la cartographie topographique et thématique, l'hydrographie, la télédétection, le traitement d'images et les systèmes d'information géographique (SIG) ». Dans le Journal Officiel du 14 février 1994, il est mentionné que la géomatique est « l'ensemble des techniques de traitement informatique des données géographiques ». Cependant, Hy Dao (2002) évoque, en comparant SIG et géomatique, que « d'un point de vue élargi, les SIG englobent également les techniques de collecte de données comme les levés cadastraux (géomètres), la télédétection aérienne ou satellitaire, les mesures de terrain, etc. ; on parle alors plutôt de géomatique ». Hy Dao (2002) pense qu'il est important de relever que les SIG sont à la croisée de nombreuses technologies telles que l'informatique, les bases de données, la cartographie, les réseaux informatiques, les levés topographiques et les tracés routiers.

1.1.3. Des coordonnées géographiques

Pour situer un point de façon précise les géographes ont créé un système de coordonnées géographiques qui sert à déterminer la localisation d'un lieu sur la terre. Ils ont créé des lignes imaginaires pour découper la terre. La première ligne imaginaire est l'équateur qui divise la terre en deux hémisphères. Le système de coordonnées constitue un système de trois coordonnées qui sont : la latitude, la longitude et l'altitude ou l'élévation par rapport au niveau moyen de la mer ou géoïde, qui détermine l'emplacement d'un lieu sur la terre.

² Définition parue dans GEOMATICA, vol 53, No. 1, 1999

1.1.3.1. Latitude

D'autres lignes (ou parallèles) ont été tracées à partir de l'équateur pour indiquer la latitude. Selon Zhang, Y., et al. (2020), la latitude est donc l'angle formé entre un parallèle et le plan de l'équateur. Autrement dit, c'est l'angle au centre de la terre qui sépare l'équateur et le parallèle d'un lieu. Ce qui implique que l'équateur a une latitude de 0° . Étant donné que l'angle entre le plan de l'équateur et le pôle nord est un angle de 90° , donc il est de latitude de 90° , et la même chose pour le pôle sud. Pour résumer, l'ensemble de points sur un même parallèle ont une même latitude. Donc il y a des milliers de points à la surface de la terre avec une même latitude, c'est la raison pour laquelle d'autres lignes imaginaires ont été créées, qui sont les méridiens. C'est-à-dire la ligne qui rejoint les pôles et qui coupe perpendiculairement l'équateur en faisant un angle droit. Les parallèles comptent de 0 à 90° (0 à 100° G) au sud et au nord.

1.1.3.2. Longitude

Le méridien-origine qui passe par Greenwich en Angleterre est le méridien à partir duquel est calculé la longitude c'est-à-dire l'angle formé entre le méridien-origine et le point où on en situe (l'angle au centre de la terre qui sépare le méridien origine et le méridien d'un lieu dont on cherche à définir la position) soulignent Zhang, Y., et al. (2020). Les méridiens comptent de 0 à 180° (0 à 200° G) à l'Est et à l'Ouest.

En termes de coordonnées géographiques, l'université de Yaoundé 1, notre zone d'étude, se trouve approximativement à une latitude de 3.8481° N et une longitude de 11.5021° E. Concernant l'altitude, l'université est située à environ 740 mètres au-dessus du niveau de la mer. Cette élévation contribue à un climat tropical caractérisé par des températures modérées et des précipitations saisonnières, favorisant ainsi un environnement propice à la recherche. En considérant ces données géographiques précises, il est possible d'analyser des modèles numériques de terrain, d'effectuer des relevés GPS et concevoir des tracés optimisés, contribuant ainsi au développement d'infrastructures routières durables et efficaces.

1.1.4. Le Géoréférencement

Le géoréférencement s'applique à des images raster dont le but est d'effectuer une référence spatiale dans une projection géographique donnée à une image qui n'en a pas. Selon Longley et al. (2015), il consiste à utiliser des coordonnées cartographiques pour affecter un emplacement spatial à des entités cartographiques. Tous les éléments d'une couche de carte ont une position et une étendue géographiques spécifiques qui leur permettent d'être repérés sur la surface de la terre,

ou près de celle-ci. La capacité de localiser avec précision des entités géographiques est essentielle pour la cartographie et le SIG.

Tous les éléments d'une couche de carte ont une localisation et une étendue géographiques spécifiques qui leur permettent d'être repérés sur la surface de la terre, ou près de celle-ci. La capacité de décrire avec précision des localisations géographiques est essentielle pour la cartographie et le SIG. Ce processus s'appelle le géoréférencement. Pour être adéquate, la description de l'emplacement et de la forme des entités nécessite une structure de coordonnées permettant de définir les emplacements réels. Un système de coordonnées géographiques permet d'associer des emplacements géographiques à des objets. Un système de coordonnées longitude/latitude global est un exemple de ce type de procédure.

1.1.5. Des systèmes d'information géographique

Denègre et Salgé (2006) résument parfaitement la vocation principale des Systèmes d'Information Géographique : « rassembler, au sein d'un outil unique, des données diverses mais localisées dans le même espace géographique, relatives à la fois à la Terre et à l'homme, à leurs interactions et à leurs évolutions respectives, quels que soient les domaines concernés : physiques, sociaux, économiques, écologiques, culturels, etc. Ce rassemblement permet d'élaborer les synthèses indispensables à la prise de décision dans tous ces domaines, aussi bien dans les situations de crise que dans les évolutions à long terme ».

A l'instar de tout système d'information, un SIG est, selon Longley et al. (2015), un système permettant de communiquer et de traiter l'information, en l'occurrence de l'information géographique, c'est-à-dire, au sens étymologique du terme, de l'information décrivant le monde terrestre. Dans ce cadre, Denègre et Salgé (2006) pensent que le but ultime d'un SIG est l'aide à la décision, appuyée sur des connaissances géographiques et des moyens de traitement, de représentation et de communication de celles-ci. De ce fait, le SIG est donc présent dans l'ensemble des phases consistant à acquérir, représenter, analyser et diffuser de l'information géographique. Un SIG possède alors deux originalités essentielles :

- la capacité de gérer et de traiter les relations spatiales entre objets ou phénomènes dans l'espace terrestre, ce qui implique des fonctions d'analyse spatiale (non courantes dans les traitements d'information classiques) et de synthèse pour l'aide à la décision ;
- la représentation visuelle de cet espace sous la forme d'une carte ou d'un plan, ce qui implique des fonctions de conception et de production cartographiques, constituant en elles-mêmes un langage différent du langage ordinaire (textuel ou numérique).

Cependant, Le Berre et Brocard (1997) soulignent que les capacités des SIG sont largement sous-utilisées. La géomatique ouvre la voie à des recherches riches.

1.2. LES RACCORDEMENTS ROUTIERS

1.2.1. Les catégories de route

A l'intérieur de chaque type de route on distingue quelques catégories (ou sous types) entre les quelles existent des différences qui concernent essentiellement les caractéristiques techniques minimales du tracé en plan et du profil en long. Ces différences concernent essentiellement les aspects de confort dynamique en section courante.

Pour les routes de type T (Transit), on distingue les catégories suivantes :

- la catégorie T80 (Route de transit avec une vitesse maximale autorisée de 80 km/h) qui, en relief vallonné, est généralement bien adapté compte tenu des objectifs de confort attachés à ce type de route et des contraintes de coût ;
- la catégorie T100 qui est généralement bien adaptée lorsque les contraintes de relief sont faibles.

Pour les routes de type R (Régional), on distingue les catégories suivantes :

- la catégorie R60 qui, en relief vallonné, permet un bon compromis entre le coût et la sécurité ;
- la catégorie R80 (Route régionale avec une vitesse maximale autorisée de 80 km/h) qui est généralement bien adaptée lorsque les contraintes de relief sont faibles.

Les règles de dimensionnement du tracé en plan et du profil en long visent à assurer des conditions de confort homogènes adaptées à chaque catégorie de route, et à garantir de bonnes conditions de sécurité. Ces objectifs de confort et de sécurité se traduisent essentiellement par les caractéristiques géométriques minimales à respecter et par des principes d'enchaînement des éléments du tracé et des conditions de visibilité.

1.2.2.1. Règles d'enchaînement du tracé

Pour l'aménagement de routes existantes comme c'est le cas du présent projet, et en plus des valeurs et conditions limites du tracé qui traduisent les conditions de confort et de sécurité, il convient de vérifier certaines conditions supplémentaires d'enchaînement du tracé et de procéder quand il est nécessaire à des dérogations réglementées. Cependant l'utilisation fréquente de grands rayons de courbure peut se révéler néfaste en encourageant les usagers à pratiquer des vitesses

continuellement élevées défavorables à la sécurité notamment au niveau des points particuliers. Catégories R60 et R80. Il convient dans le cas d'aménagement de routes existantes, de :

- Règle n°1 : Éviter en extrémité d'alignements droits importants ($L > 1$ km) et quelle que soit la catégorie, les courbes de rayon < 300 m.
- Règle n°2 : De respecter lorsque 2 courbes se succèdent, la condition suivante concernant leurs rayons R1 et R2. $R1/R2$ est compris entre $2/3$ et $3/2$ sauf si R1 et R2 sont supérieurs à 500 m.
- Règle n°3 : Exclure les courbes en ove, en C et à sommet, en revanche les courbes dites en " S " peuvent être utilisées.
- Règle n°4 : Dans le cas où l'on ne tient pas compte des valeurs minimales des rayons, les conditions d'enchaînement 1 et 2 s'appliquent mais doivent être complétées par une indication : si un virage de faible rayon fait suite à un alignement droit de moins de 500 m de longueur L, il est recommandé dans la mesure du possible de vérifier que : $R > L/4$

1.2.2.2. Variation du dévers « D »

Dans le guide ou document technique publié par le SETRA (2006) portant sur les normes et recommandations en matière de conception des routes, notamment concernant les dévers D et les rayons de courbure R, il est écrit que, pour une route bidirectionnelle, comme c'est le cas de la présente étude, le basculement de la chaussée s'effectue autour de son axe. La variation du dévers est linéaire le long du raccordement progressif. Les courbes de rayon supérieur ou égal à Rnd8 ne sont généralement pas déversées vers l'intérieur du virage et conservent un profil en toit. Les courbes de rayon compris entre Rnd et Rdm9 sont déversées vers l'intérieur du virage avec une pente de 2,5%. Les courbes de rayon R inférieur à Rdm sont déversées vers l'intérieur du virage avec une pente transversale dont la valeur est fixée par interpolation linéaire en fonction de $1/R$ entre 2,5% pour Rdm et 7% à 10% pour le rayon minimal Rm. Les valeurs des dévers en fonction des rayons en plan pour les différentes catégories de routes sont données par les formules suivantes:

- Catégorie R60 $D = 0,86 + 736,4 / R$
- Catégorie R80 $D = - 0,13 + 1712,2 / R$
- Catégorie T100 $D = -1,53 + 3623,7 / R$

1.2.2. Les types de raccordements

Il y a lieu de distinguer deux types de raccordements ; le raccordement en planimétrie utilisé pour le tracé en plan décrit par les coordonnées (x, y) avec une altitude nulle ($z=0$) et le raccordement en altimétrie utilisé pour le profil en long décrit par les coordonnées (x, z) et le profil en travers avec les coordonnées (y, z) .

1.2.2.1. Raccordement en planimétrie

Le raccordement en planimétrie est un élément essentiel dans la conception et la construction des infrastructures de transport, telles que les routes, les voies ferrées et les pistes d'aéroport. Ce procédé permet d'assurer une transition fluide entre les alignements droits et les courbes circulaires, tout en respectant les contraintes géométriques et de sécurité.

Selon Béguery et Labbé (2012), le raccordement en planimétrie peut prendre différentes formes, les plus courantes étant le raccordement en arc de cercle, en clotoïde et en courbes composées. Le raccordement en arc de cercle est le plus simple, où la transition se fait par un arc de cercle de rayon constant. La clotoïde, quant à elle, est une courbe à courbure variable, permettant une transition progressive entre l'alignement droit et la courbe circulaire (Bonnafox, 2015). Les raccordements en courbes composées combinent plusieurs arcs de cercle de rayons différents pour s'adapter à des contraintes spatiales plus importantes (Caquot, 1934).

D'un point de vue mathématique, le dimensionnement des raccordements circulaires s'appuie sur des formules établies par des théoriciens comme Cornu (1874) et Serruys (1924). Ces formules permettent de calculer les paramètres clés, tels que le rayon de courbure, la longueur de transition et la surélévation nécessaire pour compenser l'effet de la force centrifuge (Nouël, 1993).

L'importance des raccordements en planimétrie est soulignée par de nombreux auteurs. Selon Chaussée (2010), ils permettent d'assurer la fluidité et la sécurité de la circulation, en limitant les effets indésirables de la courbure sur le comportement des véhicules. De plus, ils contribuent à l'esthétique et à l'intégration paysagère des infrastructures (Dupont, 2020).

Cependant, les raccordements en planimétrie comportent également certaines limites. Leur dimensionnement doit tenir compte de contraintes techniques, comme les rayons de courbure minimaux, la longueur de transition et la surélévation maximale admissible (Coutant, 2018). De plus, leur conception doit s'adapter aux spécificités du site, comme la topographie, les obstacles naturels ou bâtis, et les exigences d'accessibilité (Villavicencio, 2021).

1.2.2.2. Raccordement en altimétrie

Le raccordement en altimétrie, également appelé raccordement vertical, est un élément essentiel dans la conception géométrique des infrastructures de transport, telles que les routes, les

voies ferrées et les pistes d'aéroport. Ce procédé permet d'assurer une transition fluide entre les pentes longitudinales et les courbes de raccordement verticales, tout en respectant les contraintes géométriques et de sécurité.

Selon Nouël (1993), le raccordement en altimétrie peut prendre différentes formes, les plus courantes étant le raccordement parabolique et le raccordement en accolade. Le raccordement parabolique, où la transition se fait par une courbe parabolique, est le plus utilisé en raison de sa simplicité de calcul et de sa continuité en pente et en courbure (Béguery et Labbé, 2012). Le raccordement en accolade, quant à lui, est composé de deux arcs de cercle tangents, permettant de s'adapter à des contraintes plus importantes (Caquot, 1934).

D'un point de vue mathématique, le dimensionnement des raccordements altimétriques s'appuie sur des formules établies par des théoriciens comme Cornu (1874) et Serruys (1924). Ces formules permettent de calculer les paramètres clés, tels que la longueur de transition, la courbure et le dénivelé (Nouël, 1993).

L'importance des raccordements en altimétrie est soulignée par de nombreux auteurs. Selon Chaussée (2010), ils permettent d'assurer la fluidité et la sécurité de la circulation, en limitant les effets indésirables des pentes et des courbes sur le comportement des véhicules. De plus, ils contribuent à l'esthétique et à l'intégration paysagère des infrastructures (Dupont, 2020).

Cependant, les raccordements en altimétrie comportent également certaines limites. Leur dimensionnement doit tenir compte de contraintes techniques, comme les pentes maximales admissibles, la longueur de transition et les rayons de courbure minimaux (Coutant, 2018). De plus, leur conception tout comme en planimétrie, doit s'adapter aux spécificités du site, comme la topographie, les obstacles naturels ou bâtis, et les exigences d'accessibilité (Villavicencio, 2021).

En conclusion, les raccordements en planimétrie et en altimétrie sont un aspect fondamental de la conception des routes, qui fait appel à des principes théoriques et à des pratiques éprouvées. Leur dimensionnement et leur mise en œuvre doivent prendre en compte de multiples facteurs pour assurer la sécurité, le confort et l'esthétique des ouvrages.

1.2.3. Les caractéristiques géométriques des courbes de raccordements

Les caractéristiques géométriques des courbes de raccordement en planimétrie, également appelées courbes de transition, sont essentielles dans la conception des infrastructures de transport.

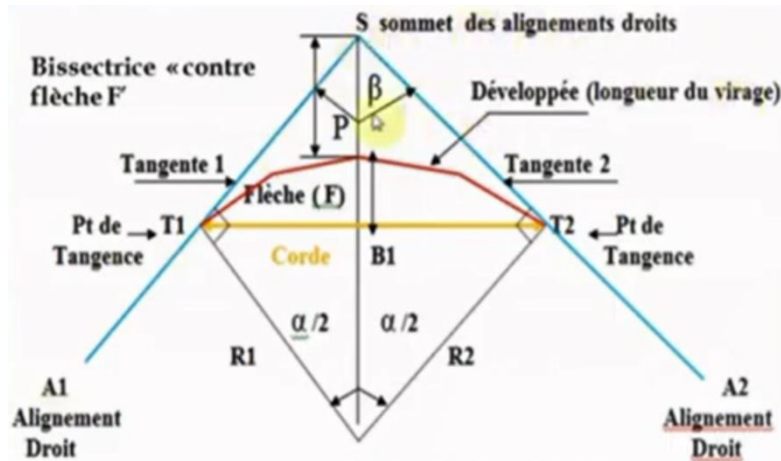


Figure 1: Les éléments caractéristiques des courbes de raccordements

Source : Nouël, 1993

Plusieurs auteurs ont étudié et formalisé ces éléments géométriques.

- **Longueur de transition (L)**

La longueur de transition est la distance sur laquelle s'effectue le raccordement entre un alignement rectiligne et une courbe circulaire. Selon Cornu (1874) et Serruys (1924), la longueur de transition dépend du rayon de la courbe circulaire et de la vitesse de circulation. Nouël (1993) indique que la longueur de transition doit être suffisante pour assurer un changement de direction progressif et le confort des usagers.

$$L = k \times \sqrt{(R \times V)}$$

Où :

L=Longueur de transition (m)

R = Rayon de courbure (m)

V = Vitesse de circulation (km/h)

k = Coefficient dépendant du type d'infrastructure

- **Rayon de courbure (R)**

Le rayon de courbure définit la courbure de la courbe de transition. Selon Chaussée (2010), le rayon de courbure doit être choisi pour limiter les effets dynamiques sur les véhicules et assurer la sécurité.

$$R = (V^2) / (127 \times e)$$

Où :

R = Rayon de courbure (m)

V = Vitesse de conception (km/h)

e = Dévers (%)

- **Dévers (e)**

Le dévers est l'inclinaison transversale de la chaussée sur une courbe de transition. Dupont (2020) souligne que le dévers doit être maîtrisé pour assurer la stabilité des véhicules et l'évacuation des eaux de ruissellement.

- **Vitesse de conception (V)**

La vitesse de conception est la vitesse de référence utilisée pour dimensionner les courbes de transition. C'est alors que Coutant (2018) précise que la vitesse de conception doit être adaptée au type d'infrastructure et aux contraintes d'exploitation.

- **Angle au centre**

Les triangles OT₁S et OST₂ étant rectangles, on a

$$\alpha/2 + \beta/2 + 100 = 200 \quad (1)$$

$$\alpha/2 + \beta/2 + 100 = 200 \quad (2)$$

(1) + (2) devient : $\alpha + \beta = 200$ donc $\alpha = 200 - \beta$ (grade)

Avec α , l'angle au centre et β l'angle au sommet.

- **Tangente (T)**

Les triangles OT₁S et OST₂ étant rectangles, on a :

$$\tan(\alpha/2) = T/R \quad \text{ce qui permet d'écrire que} \quad T = R \times \tan(\alpha/2) \quad (3)$$

$$\tan(\beta/2) = R/T \quad \text{obtient également la relation} \quad T = R/\tan(\beta/2) \quad (4)$$

- **Développée (D) ou longueur du virage**

La développée est déterminée à partir de la relation

$$D = \frac{\pi R \alpha}{200} \quad (\text{m})$$

1.2.4. Cadres législatif et réglementaire

Le cadre législatif et réglementaire du tracé routier et des raccordements géodésiques au Cameroun est structuré autour de plusieurs textes de lois, décrets et réglementations qui visent à encadrer la planification, la conception et la mise en œuvre des infrastructures de transport.

1.2.4.1. Code de la Route (1994)

Ce code régit l'ensemble des aspects liés à la circulation routière, y compris la conception des routes et des infrastructures associées. Il établit des normes minimales pour la sécurité routière, y compris des recommandations sur les dévers, les rayons de courbure et les panneaux de signalisation.

1.2.4.2. Loi n° 2010/002 du 13 avril 2010 sur la gestion des infrastructures routières

Cette loi définit les principes de gestion, d'entretien et de sécurité des infrastructures routières au Cameroun. Elle stipule les responsabilités des différentes autorités dans la planification et la mise en œuvre des projets routiers, et encourage l'utilisation de normes techniques appropriées.

1.2.4.3. Décret n° 2001/078 du 24 janvier 2001 fixant les conditions de réalisation des études d'impact environnemental

Ce décret impose des études d'impact environnemental pour tout projet d'infrastructure, y compris les routes. Il vise à minimiser les effets négatifs des projets sur l'environnement et à intégrer des considérations écologiques dans le tracé routier.

1.2.4.4. Normes Techniques de l'Agence des Travaux Publics (ATP)

L'ATP a établi des normes techniques pour la conception et la construction des routes, y compris des recommandations sur les raccordements géodésiques. Ces normes guident les ingénieurs et les concepteurs dans le respect des meilleures pratiques en matière de sécurité et d'efficacité.

1.2.4.5. Loi n° 2016/007 du 12 juillet 2016 relative à la propriété foncière

Cette loi régit l'acquisition et l'utilisation des terrains pour les projets d'infrastructure. Elle garantit que les projets de tracé routier respectent les droits des propriétaires fonciers et prévoient des compensations appropriées.

1.2.4.6. Loi N° 2004-003 du 21 avril. 2004 régissant l'urbanisme au Cameroun

Cette loi encadre et régit toute démolition d'infrastructure. Elle stipule en son article 114

alinéas (1) et (2) que le Permis de Démolir est un acte administratif qui autorise la destruction partielle ou totale d'un immeuble bâti. Quiconque désire démolir tout ou une partie d'un bâtiment, quel que soit son usage, doit au préalable obtenir un Permis de Démolir. Cette obligation s'impose à l'Etat, aux collectivités territoriales décentralisées, aux établissements publics, aux concessionnaires de services publics et aux personnes privées. C'est sur la base de cette loi que nous avons proposé le tracé de la nouvelle route qui rattache le campus de l'Université de Yaoundé 1 et celui de ENS Polytechnique de Yaoundé.

Ce cadre vise à garantir la sécurité, l'efficacité et la durabilité des infrastructures routières, tout en respectant les considérations environnementales et les droits fonciers. Il est crucial pour les ingénieurs et les décideurs de bien comprendre ces réglementations pour mener à bien leurs projets.

1.3. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

1.3.1. Situation géographique

Ngoa-Ékélé est une localité située à l'Est de la ville de Yaoundé, la capitale politique du Cameroun. Ce secteur est partiellement urbanisé, caractérisé par un mélange d'infrastructures résidentielles, éducatives et commerciales. Avec sa proximité à l'Université de Yaoundé I, la zone bénéficie d'un accès facile à diverses ressources et à une population estudiantine dynamique. L'emplacement de Ngoa-Ékélé, à environ 10 km du centre-ville, permet aussi une connexion pratique avec les autres quartiers de Yaoundé. Dans le cadre de notre étude, notre zone est le campus de l'Université de Yaoundé 1. Nous avons choisi cette zone d'étude à cause de ses enjeux géographiques et de notre accès facile.

1.3.2. Conditions physiques et naturelles

La région est caractérisée par un relief varié, comprenant des collines et des vallées, ce qui influence le tracé des routes et des infrastructures. Le climat de Ngoa-Ékélé est tropical, avec une saison des pluies s'étendant généralement de mai à octobre, et une saison sèche de novembre à avril. Les précipitations annuelles sont élevées, ce qui contribue à une végétation dense et variée, typique de la région forestière de la ceinture équatoriale.

Sur le plan géologique, la zone du campus de l'Université de Yaoundé 1 est dominée par des sols ferrallitiques généralement de couleur rougeâtre ou brunâtre, due à la présence élevée d'oxydes de fer, notamment l'hématite et sont argileux, avec une texture fine, souvent bien drainés, mais susceptibles à l'érosion, surtout pendant la saison des pluies. Cela nécessite une attention particulière lors des travaux d'infrastructure, pour assurer la durabilité des raccordements géodésiques.

1.3.3. Description du réseau routier de Yaoundé

Le réseau routier de Yaoundé, capitale politique du Cameroun, est un élément essentiel de l'infrastructure de transport du pays. Il se distingue par sa complexité, reflétant non seulement l'urbanisation croissante de la ville, mais aussi les enjeux géographiques et économiques qui la caractérisent. La ville de Yaoundé est traversée par un ensemble de routes principales et secondaires, qui relient les différents quartiers et facilitent l'accès aux zones rurales environnantes. Les principales voies, telles que l'axe Yaoundé-Douala et la route menant à l'aéroport international de Nsimalen, sont cruciales pour le transit commercial et les déplacements quotidiens.

Le réseau routier est marqué par une diversité de types de chaussées, allant des voies bitumées aux axes en terre, souvent en mauvais état en période de pluie. Cette situation peut entraîner des problèmes d'accessibilité, soulignant l'importance d'une planification efficace pour le développement de nouvelles routes et l'amélioration des existantes. Notre étude permettra d'explorer un moyen moins onéreux et rapide pour l'analyse topographique d'une route dont on souhaite aménager.

1.3.4. Enjeux géographiques

Le relief de Yaoundé, constitué de collines et de vallées, engendre des défis spécifiques pour l'aménagement du réseau routier. Les pentes abruptes et les zones sujettes à l'érosion nécessitent des études géotechniques approfondies et des interventions adaptées. De plus, la forte pluviométrie de la région accentue les risques d'inondations, mettant ainsi en lumière le rôle central de la géomatique dans l'analyse et la planification des infrastructures routières.

Grâce à ces outils, il est possible de cartographier les routes existantes, d'évaluer leur état, et d'identifier les zones nécessitant des améliorations ou de nouvelles constructions. De plus, la géomatique facilite la planification de l'extension du réseau routier, en tenant compte des contraintes géographiques et des besoins de la population.

1.3.5. Problématique spécifique

La ville de Yaoundé, confrontée à une urbanisation rapide et à des défis géospatiaux complexes, fait face à plusieurs problématiques spécifiques en matière de raccordements géodésiques. Le constat qui est fait, est celui de l'inadéquation du réseau routier. Le réseau routier de Yaoundé est souvent jugé inadapté face à la croissance démographique et aux exigences économiques. De nombreuses routes sont en mauvais état, ou insuffisantes pour gérer le volume de trafic en augmentation constante. Les conditions climatiques, associées au relief accidenté de la ville, exacerbent les problèmes d'érosion et d'inondations, impactant la durabilité des routes

existantes. L'absence de données précises et actualisées sur l'état du réseau routier et les infrastructures connexes complique la planification des projets d'amélioration et d'extension. Ainsi, en quoi l'utilisation de la géomatique pour obtenir des tracés routiers et des profils topographiques contribue-t-elle à une meilleure planification et gestion des infrastructures dans les zones urbaines et rurales ? Au regard des fortes exigences financières et de la longue durée des campagnes topographiques, notre travail a pour objectif de montrer qu'il est possible d'obtenir avec efficacité, les tracés routiers, les profils topographiques en long et une MNT visualisant les dénivelés ou relief d'un terrain via les nouvelles approches géomatiques.

1.4. TRAVAUX ANTÉRIEURS

Dans le cadre de notre étude, plusieurs études antérieures ont exploré le processus de tracé routier, de l'acquisition des données jusqu'à leur traitement dans des logiciels tels qu'ArcGIS ou COVADIS

Faivre et al. (2010) ont utilisé des données topographiques et géologiques collectées sur le terrain, intégrées dans ArcGIS pour créer des modèles numériques de terrain (MNT). Les résultats ont montré que l'utilisation d'ArcGIS permettait de visualiser les contraintes géographiques et de proposer des tracés optimisés, réduisant ainsi les coûts de construction et l'impact environnemental.

Dupont (2015) a examiné la contribution de la géomatique à la planification des infrastructures routières. L'étude a utilisé des techniques de télédétection et des relevés GNSS pour collecter des données précises sur la topographie et l'utilisation des sols. Les résultats ont montré que l'intégration de ces données dans COVADIS permettait de concevoir des tracés routiers plus efficaces, en tenant compte des caractéristiques du terrain et des exigences de sécurité.

Martin et Boucher (2018) ont mené une étude qui s'est concentrée sur l'optimisation des raccordements géodésiques à l'aide de la géomatique. Martin et Boucher (2018) ont utilisé des logiciels de modélisation et de simulation, y compris COVADIS, pour évaluer différents scénarios de tracé routier basés sur des données géodésiques. Les résultats ont indiqué que l'utilisation de ces outils permettait de réduire les erreurs de raccordement et d'améliorer la précision des tracés, ce qui est essentiel pour les projets d'infrastructure.

Labbé (2020) a étudié l'impact des données géomatiques sur la conception des routes en milieu urbain. L'auteur a réalisé des enquêtes de terrain combinées à des analyses spatiales dans ArcGIS pour évaluer les effets des tracés sur la circulation. Les résultats ont révélé que l'intégration des données géomatiques permettait d'anticiper les problèmes de congestion et d'optimiser les tracés en fonction des flux de circulation.

Ces travaux antérieurs mettent en lumière l'importance de la géomatique dans le processus de tracé routier. Ils démontrent que l'intégration de techniques avancées de collecte et d'analyse de données permet d'améliorer la précision, l'efficacité et la durabilité des infrastructures routières, tout en contribuant à des raccordements géodésiques optimisés.

CHAPITRE 2 : MATÉRIEL ET MÉTHODES

Cette section de notre étude explore les matériels nécessaires et la méthode déployée pour obtenir les résultats.

2.1. MATÉRIEL UTILISÉ

Dans le cadre de notre étude, nous avons utilisé plusieurs matériels essentiels pour l'acquisition, le traitement des données et le rendu final du tracé routier ainsi que le MNT.

2.1.1. Ordinateur PC

L'ordinateur personnel est la pierre angulaire de tout projet de géomatique. Équipé d'un processeur puissant et d'une mémoire vive suffisante, il permet d'exécuter des logiciels de SIG. La capacité graphique puissante de notre ordinateur de marque DELL, nous a également permis de traiter et de visualiser les données en 2D et 3D, facilitant ainsi la prise de décisions éclairées.

2.1.2. Les logiciels utilisés

Pour mener à bien notre travail, nous nous sommes servi de plusieurs logiciels parmi lesquels :

- **Google Earth Pro.** Nous avons utilisé ce logiciel pour concevoir la carte des tracés routiers des voies du campus Ainsi que le profil topographique en long et obtenir une image satellite de la zone campus avec les tracés routiers qui a servi ensuite à concevoir le MNT, essentiel pour analyser la topographie du terrain et déterminer les contraintes géographiques affectant le tracé routier.
- **ArcGIS** a permis à l'élaboration du MNT de la zone Campus à partir de l'image satellite obtenue dans **Google Earth Pro**.
- **Excel 2016** a servi à importer les coordonnées géographiques de près de 3000 points géodésiques de la zone campus en un clic à partir de Google Earth Pro et du logiciel GPS Visualizer.
- **Paint 3D** nous a aidé à ajouter la ligne projet en rouge et les points d'intérêt sur le profil en long de la nouvelle route proposée permettant une meilleure évaluation des déblais et des remblais.

2.1.3. Le GPS Garmin MAP65s portable

Le GPS (Global Positioning System) est un outil fondamental pour la collecte de données géodésiques sur le terrain. Il nous a permis de déterminer précisément les coordonnées

géographiques de 10 points d'intérêt ou points de contrôle que nous avons importé sur Excel 2016 pour confronter à celles de Google Earth et en évaluer la dispersion ou la précision.

L'utilisation de ces matériels constitue un processus intégré allant de l'acquisition des données jusqu'à leur traitement et permet de garantir la précision et la fiabilité des raccordements géodésiques, contribuant ainsi à des projets d'infrastructure routière de qualité.

2.2. MÉTHODES DE L'ÉTUDE

Notre travail s'est appesanti sur des méthodes et principes de base dans le domaine de la géomatique pour nous faire comprendre.

2.2.1. Méthode par le GPS

Dans la perspective de vérifier la conformité et validité des données satellites de Google Earth Pro, nous avons pris les coordonnées géographiques de 10 points de contrôle sur le terrain avec un GPS portable. Cette campagne de collecte de données GPS nous a pris toute la journée du mercredi 23 octobre 2024. Concernant l'acquisition nous avons commencé par le choix des points de référence déjà géoréférencés sur Google Earth. Nous avons parcouru ensuite la zone de projet avec notre récepteur GPS portable. À chaque point d'intérêt choisi, nous avons pris les coordonnées géographiques (latitude, longitude et altitude) tel que nous pouvons voir à la figure 2.



Figure 2: Prise des données GPS sur le terrain, Source : Ngongang, 2024

Après la collecte des données, les informations brutes sont transférées vers notre ordinateur PC en important sur Excel 2016 à l'aide de **GPS Visualizer**. Dans ce cadre, le logiciel de traitement statistique Excel, est utilisé pour gérer, analyser les données géographiques du GPS et de Google Earth Pro. Ce traitement nous a permis d'obtenir le **coefficient de PEARSON** (noté r), outil statistique très utile pour analyser la relation entre nos deux variables quantitatives. Plus la valeur absolue de r est proche de 1, plus la relation linéaire entre les variables est forte.

Cette collecte de données GPS sur le terrain est nécessaire pour vérifier la conformité du tracé routier et du profil topographique de la nouvelle route que nous proposons, avec les exigences opérationnelles et environnementales garantissant une planification efficace.

2.2.2. Méthode par l'image Satellite de Google Earth (MNT)

La détermination du tracé routier et du MNT à l'aide de l'image satellite Google Earth Pro est une approche efficace intégrant différentes étapes, de l'acquisition des données à leur traitement dans les logiciels ArcMap et ArcScene.

2.2.2.1. Procédé d'obtention du MNT du campus Universitaire

L'acquisition des données commence par la collecte de données satellites, via le logiciel GOOGLE EARTH. Ces données satellites permettent de générer un MNT visualisant les dénivelés et le relief de la zone campus de l'université de Yaoundé 1.



Figure 3: Etape de la préparation du fichier KMZ de la zone campus sur Google Earth, Source : Ngongang, 2024

Pour cela nous avons préparé le fichier KMZ (un format de fichier utilisé pour stocker des données géographiques, spécialement dans des applications comme Google Earth, il s'agit du

fichier Keyhole Markup Language Zipped) de la zone en ajoutant des trajets et en y mettant le maximum de points. Après l'avoir enregistré, nous avons ouvert ce fichier KMZ avec GPS Visualizer et enregistré au format Text. Par la suite ce fichier Text a été importé sur Excel et enregistré au format Excel 97-2003. Ce fichier Excel est ouvert sur ArcMap suivant la projection WGS 84 32N pour la création du MNT. Ce modèle numérique est une représentation raster du terrain, où chaque cellule (pixel) correspond à une élévation spécifique.

Nous nous sommes servi du logiciel de traitement de données géographiques ArcGIS pour interpoler ces données de Google Earth par une analyse géostatistique intégrée (krigéage) telle que le montrent la figure 4. Nous avons choisi une méthode d'interpolation adaptée, comme l'interpolation par krigéage, en fonction de la densité et de la qualité des données d'entrée (environ 3000 points). Par la suite nous avons ajusté les paramètres d'interpolation pour optimiser la précision et la résolution du MNT final.

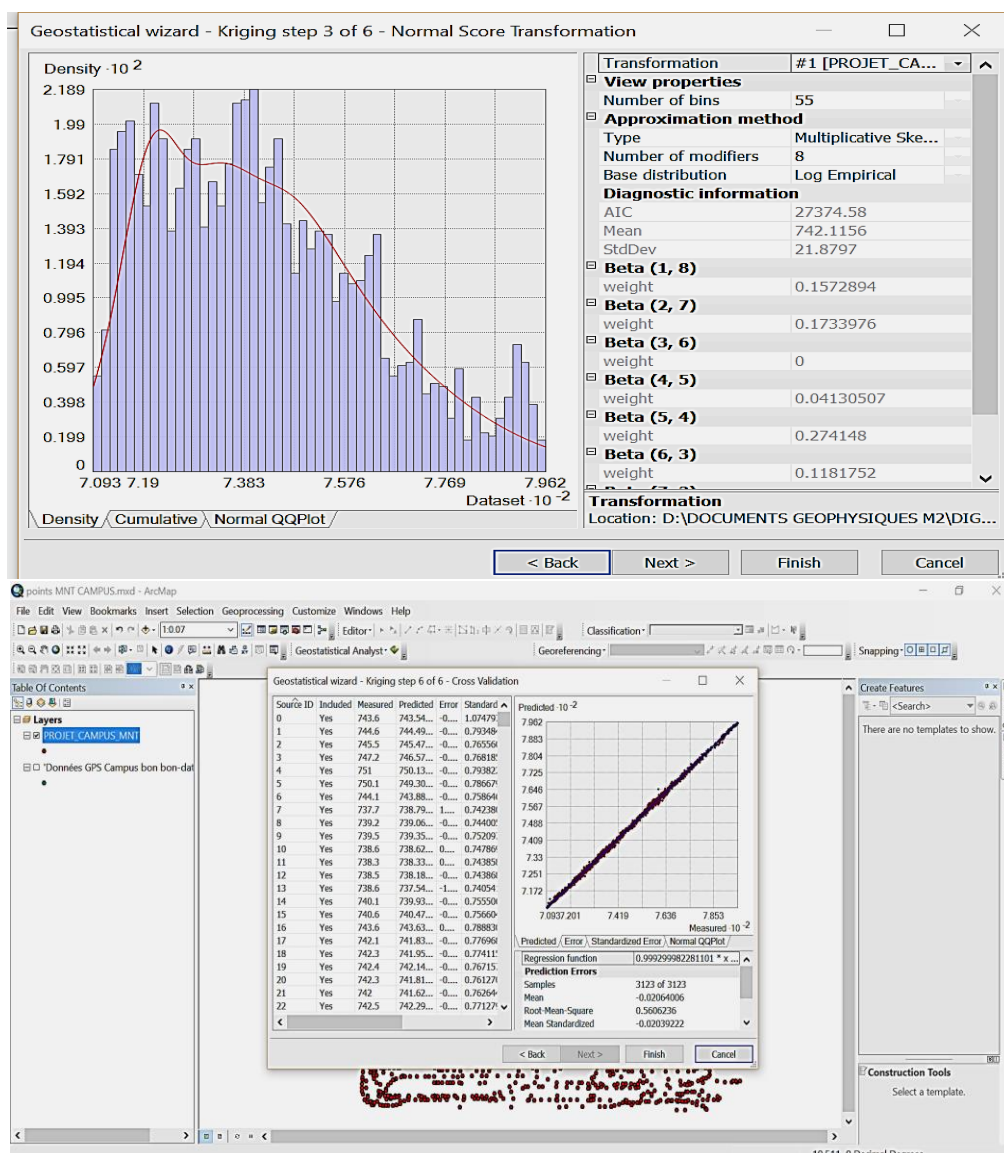


Figure 4: Etapes de l'analyse géostatistique sur ArcMap, Source : Ngongang, 2024

Ce qui nous a permis d'obtenir le MNT 2D de la toute la zone campus selon la figure 5.

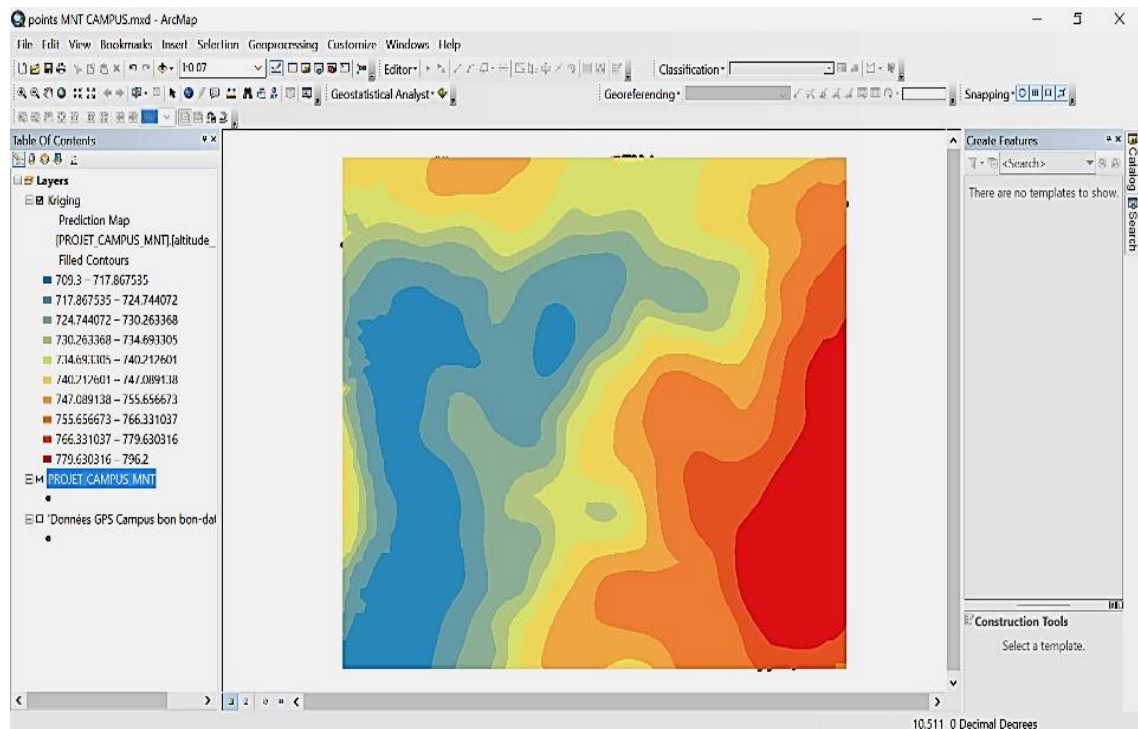


Figure 5: Etape de génération du MNT 2D de la zone campus, Source : Ngongang, 2024

Pour obtenir le modèle 3D, nous avons importé le MNT 2D dans le logiciel ArcScene de ArcGis.

Sur la base de l'analyse du MNT, des scénarios de tracé routier sont proposés. Google Earth nous a permis de dessiner différentes variantes de tracés en tenant compte des contraintes topographiques. Des outils d'analyse de surface aident à visualiser l'impact de chaque option sur le terrain, facilitant la prise de décision.

2.2.2.2. Obtention du tracé routier et du profil en long sur Google Earth Pro

Pour avoir le tracé routier de toutes les routes existantes du campus de l'Université de Yaoundé 1, nous avons suivi les étapes suivantes :

- Rechercher l'Université de Yaoundé 1 ;

Utilisez la barre de recherche pour trouver le campus en entrant "*Université de Yaoundé 1*".

- Activer les couches de données routières

Dans le panneau de gauche, nous avons cliqué sur l'icône "Couches" (Layers) et nous avons vérifié que les options "Routes et chemins" sont activées.

- Utiliser l'outil de mesure

Nous avons cliqué sur l'outil de mesure (règle) dans la barre d'outils pour tracer les routes et choisi l'option « Chemin » pour dessiner un tracé le long des routes existantes du campus. Nous avons par la suite cliqué pour ajouter des points le long du chemin que vous souhaitez tracer et double-cliqué sur le dernier point pour terminer le tracé.

- Enregistrer le tracé

Une fois le tracé terminé, nous avons fait un clic droit sur le chemin dans le panneau de gauche et sélectionné "Enregistrer le lieu sous". Puis nous avons choisis le format souhaité (KML ou KMZ) pour sauvegarder notre tracé.

Pour obtenir le profil en long sur Google Earth, nous avons tout d'abord sélectionné le tracé de notre nouvelle route proposée en suite cliqué sur « Show elevation profil » dans l'onglet « Edit » selon que nous pouvons voir sur la figure 6.

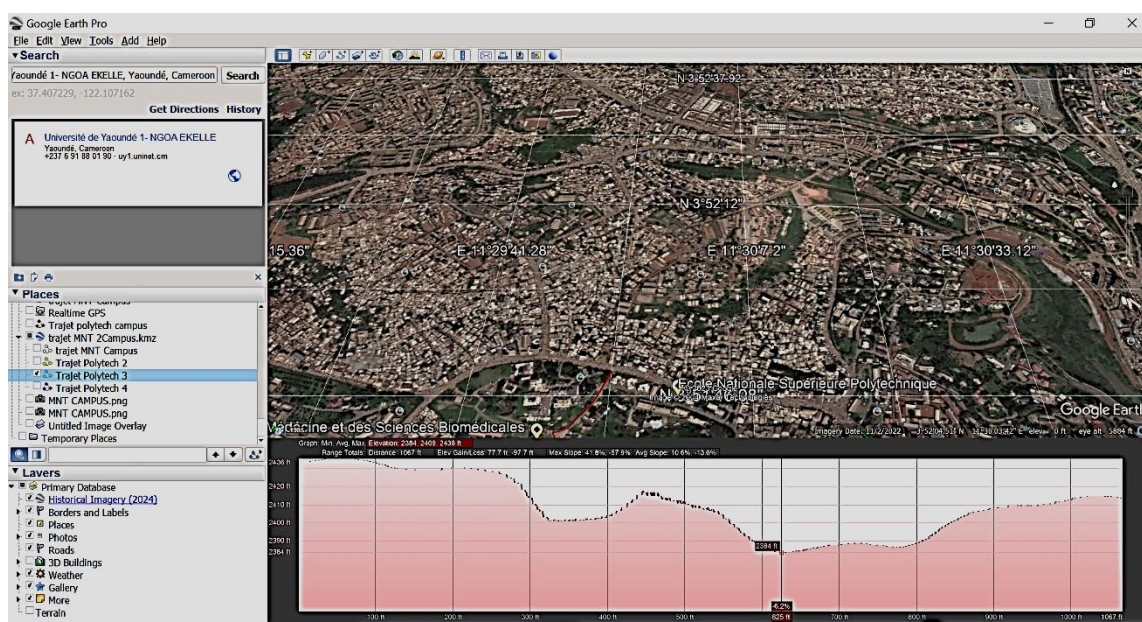


Figure 6: Etape d'obtention du profil en long de la nouvelle route proposée, source : Ngongang, 2024

La figure 6 montre une vue satellite de la zone campus de l'Université de Yaoundé 1, au Cameroun, capturée à l'aide de Google Earth Pro. Cette plateforme permet d'explorer des données géographiques avec une grande précision, offrant des vues en 3D et des outils d'analyse topographique. La section inférieure de la figure 6 indique le profil d'élévation ou profil en long, essentiel pour étudier les variations de terrain de la nouvelle route proposée dans cette région montagneuse. L'accès à ces données facilite la planification urbaine et l'analyse environnementale, en fournissant des informations sur la topographie, les infrastructures et l'urbanisation. Ce qui peut également aider à identifier des zones sensibles aux risques naturels pour une action publique conséquente.

2.2.3. Méthodes de calcul

Les raccordements géodésiques consistent à relier entre eux plusieurs points de mesure pour établir un réseau cohérent. Cela permet de déterminer avec précision les positions relatives et absolues de ces points sur la surface terrestre. Ils sont basés mathématiquement sur la méthode des moindres carrés et la méthode d'Alkashi ou loi des cosinus et sinus

2.2.3.1. Méthode des moindres carrés

Utilisée pour ajuster les mesures et minimiser les erreurs, elle permet de trouver une solution optimale pour les coordonnées des points. Pour un ensemble de données avec des observations (x_i, y_i) pour $i=1, 2, \dots, n$, la méthode des moindres carrés cherche à ajuster une droite de la forme

$$y = ax + b \quad \text{où } a \text{ est la pente et } b \text{ est l'ordonnée à l'origine.}$$

L'objectif de cette méthode est de minimiser la somme des carrés des résidus.

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))^2$$

Ce qui permet de déterminer la valeur des coefficients a et b par les formules suivantes :

$$a = \frac{n \sum(x_i y_i) - \sum x_i \sum y_i}{n \sum(x_i^2) - (\sum x_i)^2}$$

et

$$b = \frac{\sum y_i - a \sum x_i}{n}$$

2.2.3.2. Utilisation de la loi des cosinus et des sinus

Pour calculer les longueurs des côtés et les angles dans les triangles formés par les points de mesure (méthode de triangulation). La loi des cosinus et sinus relie les longueurs des côtés d'un triangle à ses angles. Pour un triangle avec des côtés a , b , et c , opposés respectivement aux angles A , B , et C , la loi des cosinus s'exprime comme suit :

$$\text{Pour l'angle } C \text{ on a : } c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cdot \cos(C)$$

$$\text{Pour l'angle } A \text{ on a : } a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cdot \cos(A)$$

$$\text{Pour l'angle } B \text{ on a : } b^2 = a^2 + c^2 - 2ac \cdot \cos(B)$$

De plus nous avons la relation suivante avec le sinus :

$$\sin(A)/a = \sin(B)/b = \sin(C)/c$$

Cette étude a mis en place une méthodologie rigoureuse pour la création d'un Modèle Numérique de Terrain du campus de l'Université de Yaoundé 1, en combinant l'utilisation de l'imagerie satellite Google Earth et du logiciel de système d'information géographique ArcMap et des tracés routiers. Elle fournit une méthodologie éprouvée pour la création d'un MNT à l'échelle du campus, pouvant servir de référence pour des applications ultérieures dans le domaine de la gestion et de l'aménagement du territoire.

CHAPITRE 3 : RÉSULTATS ET DISCUSSION

Cette partie se concentre sur la présentation des résultats obtenus au cours de l'étude. Les données sont présentées sous forme de tableaux, de figures, de carte ou de descriptions textuelles. Cette section permet également d'interpréter les résultats. Il s'agit d'expliquer ce que signifient les données, comment elles se rapportent à l'objectif de la recherche.

3.1. PRESENTATION DES RESULTATS

Dans cette section nous présentons les résultats obtenus à savoir les coordonnées géographiques de 10 points d'intérêt du campus, les cartes des tracés routiers de toutes les routes existantes et de celle proposée et le MNT de la zone campus.

3.1.1. Coordonnées géographiques

Le tableau 1 donne les coordonnées géographiques prises sur le terrain à l'aide du GPS MAP 65s pour confronter et comparer à celles obtenues sur GOOGLE EARTH Pro.

Tableau 1 : Coordonnées Géographiques Google Earth des points de références

Source : Google Earth Pro, données de 2022

COORDONNEES GEOGRAPHIQUES DE POINTS GENEREES AVEC GOOGLE EARTH		
Points	Latitude GE	Longitude GE
Entrée UY1	3.85646	11.50361
Escalier Département français	3.8562	11.50306
Décanat Faculté des Sciences	3.85859	11.5006
Rectorat	3.85735	11.50227
DAAF	3.85656	11.5022
AMPHI 1001	3.85969	11.50079
Fenêtre bureau Pr NJANDJOCK	3.85902	11.49928
Portail ENS Polytech	3.86232	11.50206
Carrefour FMSB	3.86173	11.49525
Portail Canal Olympia	3.85892	11.49667

Cependant, les valeurs des coordonnées géographiques des mêmes points générés par GOOGLE EARTH Pro sont consignées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Coordonnées Géographiques GPS des points de références

Sousce : Ngongang 2024

Points	Latitude GPS	Longitude GPS
Entrée UY1	3.85651	11.50359

Escalier Département français	3.85622	11.50304
Décanat Faculté des Sciences	3.8586	11.50059
Rectorat	3.8574	11.5023
DAAF	3.85656	11.50221
AMPHI 1001	3.85963	11.50082
Fenêtre bureau Pr NJANDJOCK	3.85912	11.49921
Portail ENS Polytech	3.86245	11.50144
Carrefour FMSB	3.86176	11.49721
Portail Canal Olympia	3.85899	11.49669

Le tableau 3 est une combinaison des tableaux 1 et 2, à base duquel la dispersion entre les valeurs du GPS et celles de GOOGLE EARTH est évaluée.

Tableau 3 : Comparaison des données géographiques GE et GPS

Source : Ngongang, 2024

Latitude GE/Longitude GE	Latitude GPS/Longitude GPS
3.85646	3.85651
3.85620	3.85622
3.85859	3.85860
3.85735	3.85740
3.85656	3.85656
3.85969	3.85963
3.85902	3.85912
3.86232	3.86245
3.86173	3.86176
3.85892	3.85899
11.50361	11.50359
11.50306	11.50304
11.50060	11.50059
11.50227	11.50230
11.50220	11.50221
11.50079	11.50082
11.49928	11.49921
11.50206	11.50144
11.49525	11.49721
11.49667	11.49669
Coefficient de corrélation ou de PEARSON	0.999999993

Lorsque le coefficient de corrélation ou de Pearson entre les coordonnées GPS et les coordonnées GE (Google Earth) est extrêmement élevé, comme **0.999999993**, cela indique une très forte correspondance et une quasi-identité entre les deux jeux de coordonnées. Ce coefficient de corrélation étant très proche de 1, suggère que les coordonnées GPS sont d'une très grande précision et

qu'elles correspondent presque parfaitement aux coordonnées GE. Et peut signifier que les systèmes de coordonnées utilisés par le GPS et Google Earth sont parfaitement alignés, c'est-à-dire qu'ils utilisent les mêmes systèmes de projection et de référence géodésique. De plus, le fait que le coefficient soit si proche de 1, indique l'absence quasi-totale d'erreurs ou d'écart entre les deux jeux de données. En conséquence, la localisation d'un objet ou d'un point de référence est extrêmement précise, avec une différence négligeable entre les données GPS et GE.

3.1.2. Tracés routiers des voies du Campus Universitaire

Nous avons obtenu la carte présentant les principaux tracés routiers raccordés des voies et un plan du campus de l'Université de Yaoundé 1 avec le logiciel SIG GOOGLE EARTH. On peut y observer les routes principales (en rouge) qui constituent les principaux axes de circulation à travers le campus et la nouvelle voie proposée (en violet) qui permet d'accéder au campus ENS Polytechnique.



Figure 7: Carte du tracé routier des voies pour véhicule du Campus de l'UY1 avec Google Earth

Source : Ngongang, 2024

3.1.3. Modèle Numérique du Terrain de la zone Campus de l'UY1

Le MNT de la zone campus révèle un terrain très accidenté avec de fortes variations d'altitude, des vallées, des pentes abruptes et des zones plus planes. Par ailleurs, les différentes couleurs et motifs des figures 8 et 9 représentent les changements de relief et de pente. Les zones rougeâtres correspondent à des zones plus élevées et escarpées, tandis que les zones vertes indiquent des zones plus basses. Les nuances de vert et de brun suggèrent une diversité dans l'occupation des sols, avec possiblement des zones forestières, agricoles ou naturelles. Concernant le drainage et l'hydrographie, on peut deviner la présence de cours d'eau ou de zones humides grâce aux motifs ondulés et bleus, visibles dans certaines parties de l'image.

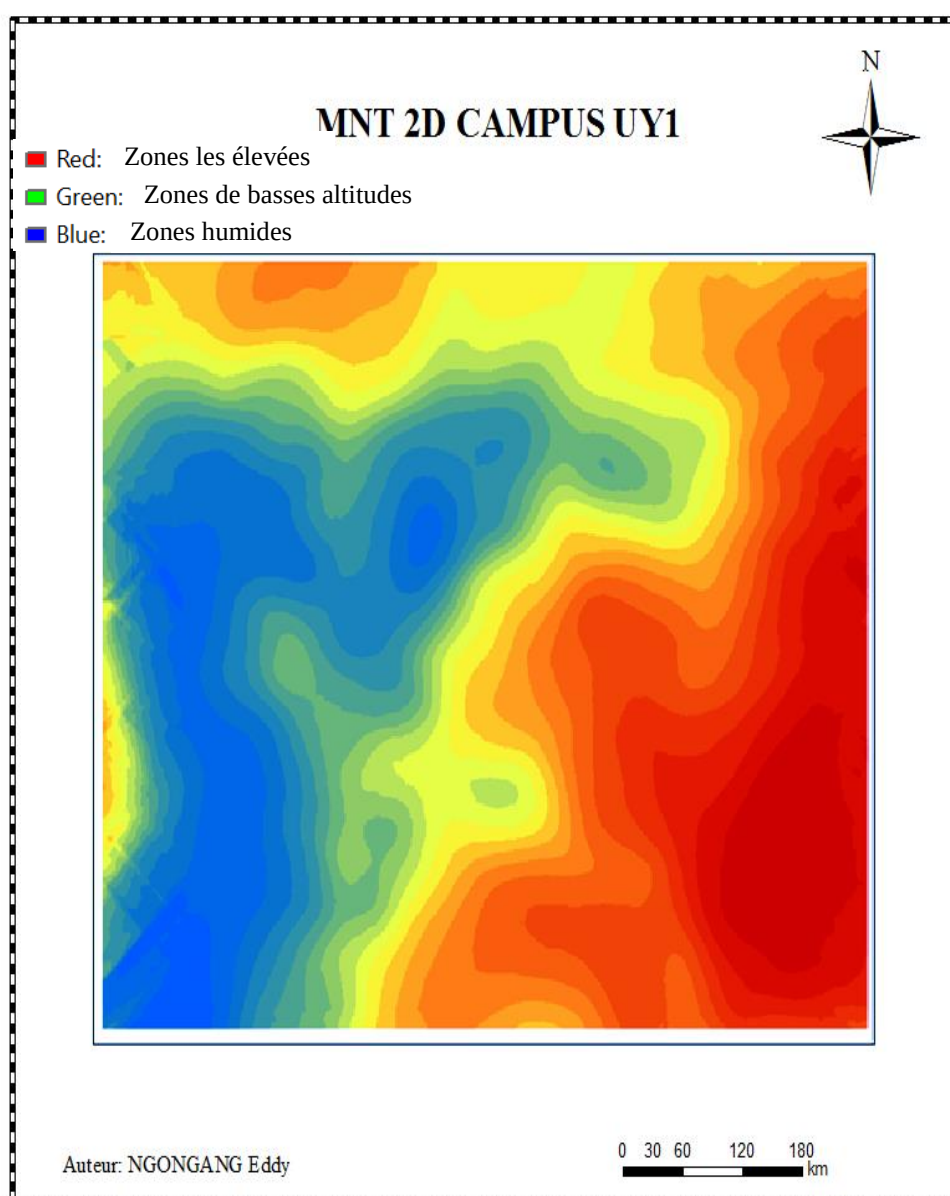


Figure 8: MNT 2D du campus de l'UY1, Source : Ngongang, 2024

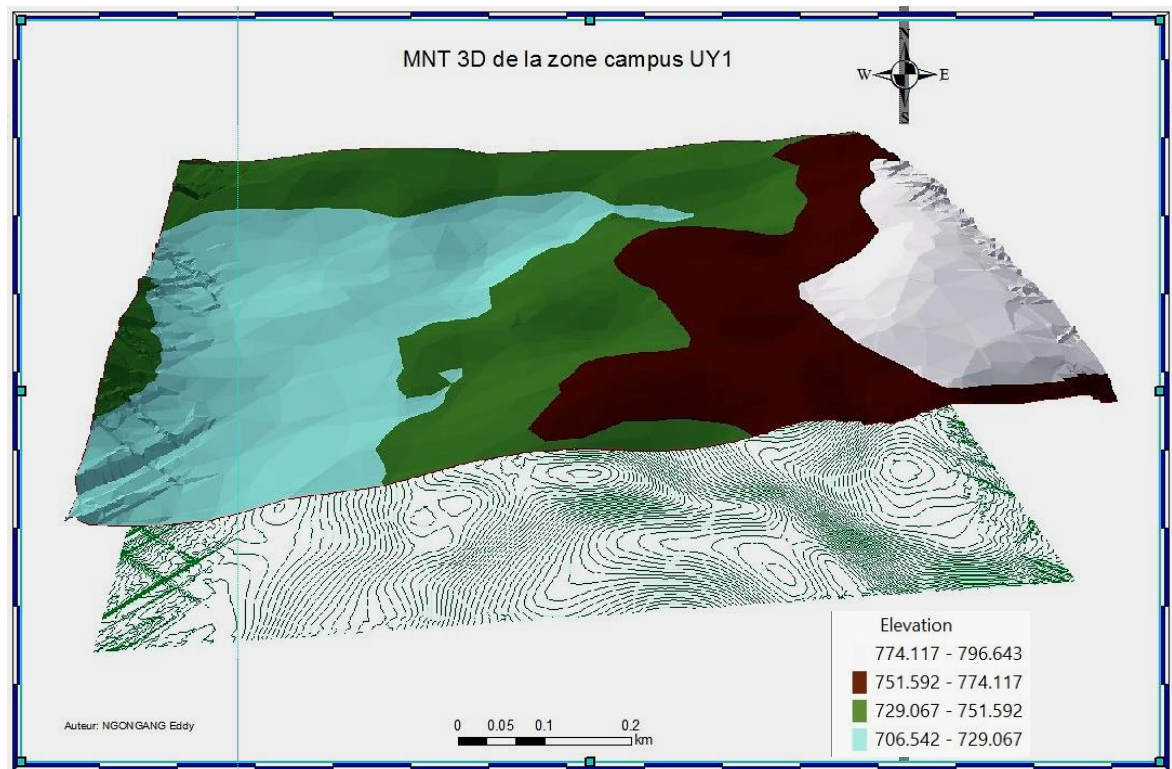


Figure 9: MNT 3D du campus de l'UY1, source : Ngongang, 2024

La figure 9 représente un Modèle Numérique de Terrain (MNT) de la zone du campus, illustrant les variations d'élévation avec des couleurs indiquant les reliefs. Cette représentation est cruciale pour l'analyse géomorphologique, permettant d'identifier les caractéristiques topographiques et les pentes. Les détails de ce MNT 3D peuvent aider à planifier des infrastructures, à évaluer les risques d'érosion, d'éboulement de terrain et à gérer les ressources naturelles. Ce MNT constitue un outil précieux dans la compréhension des dynamiques territoriales et offre une base solide pour des études environnementales approfondies.

3.1.4. Profil en long de la nouvelle route proposée : évaluation des remblais et des déblais

La figure 11 présente le profil en long de la nouvelle route proposée allant de l'AMPHI 1001 de l'Université de Yaoundé 1 à l'ENS Polytechnique, pour faciliter aux étudiants, enseignants et tout usager de rallier rapidement les deux campus. Le graphique montre l'élévation en fonction de la distance parcourue. Le tronçon routier A-F présente une élévation minimale d'environ 2365 pieds (720,852m) et une élévation maximale d'environ 2410 pieds (734,568m). Le terrain présente plusieurs variations d'élévation, avec des montées et des descentes. On a identifié 6 points clés le

long du parcours, indiqués par les lettres de A à F. Cependant, entre les points A et C, on observe un léger déblai. Entre C et D, E et F, on observe par contre un remblai. La section entre D et E présente un déblai plus important que le premier. Les statistiques obtenues indiquent une distance totale de la route de 980 pieds (298,704m), un dénivelé positif de 51,3 pieds (15,63624m) et un dénivelé négatif de 87,6 pieds (26,70048m), avec une pente moyenne de 7,6% et une pente maximale de 45,6%. Ce profil en long permet donc d'avoir une vision précise du terrain de la nouvelle route et de ses principales caractéristiques topographiques, ce qui peut être utile pour sa réalisation. A cet effet, nous avons tracé une ligne projet en rouge qui fait office de route, de manière à garantir la sécurité des usagers. Cette ligne imaginaire nous permet par la même occasion d'évaluer les remblais de la nouvelle route.



Figure 10: Tracé de la nouvelle route (violet) sur Google Earth Pro, Source : Ngongang, 2024



Figure 11: Profil en long de la nouvelle route proposée et visualisation des remblais et déblais, source : Ngongang, 2024

Les figures 10 et 11 permettent d'avoir une compréhension approfondie de la topographie non seulement de l'infrastructure du campus de l'Université de Yaoundé 1 mais surtout de la nouvelle route, en vue de faciliter sa mise en œuvre. En fait, nous avons évalué les remblais et les déblais que présente le profil topographique de cette route. En considérant que la largeur d'une voie routière standard est de $l = 8\text{m}$ et en déterminant les coordonnées des points C, O, D, O₁, E, E', E₁ et E₂ d'une part et A, C, D, G, H, I, J, K, L, M, N et O d'autres parts, tout ceci par rapport au repère de la figure 11, nous avons obtenu les résultats suivants.

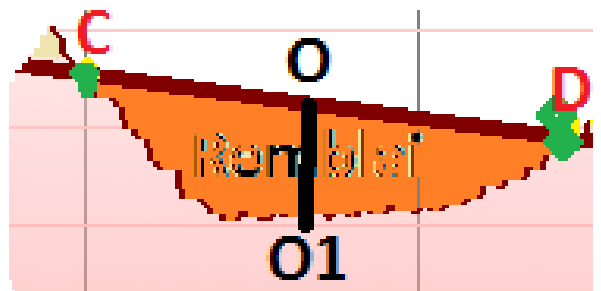
3.1.4.1. Evaluation des remblais

▪ Le volume du remblai C-O₁-D

En supposant cette cavité parfaitement semi-circulaire, on obtient :

$$S_1 = \int_0^{8.24} \pi r dr \text{ ainsi, } V_1 = S_1 \times l$$

Avec $r = OO_1 = 8.24\text{m}$



$V_1 = 853.23 \text{ m}^3$ par conséquent, il faudra environ un volume de 853 m^3 de terre pour remblayer la cavité C-O₁-D

- **Le volume du remblai E-E'-E₁-E₂**

En supposant que la cavité E-E'-E₁-E₂ est un trapèze régulier, on obtient :

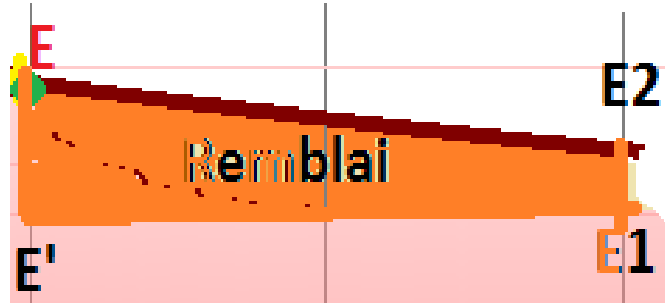
La surface est déterminée par la relation

$$S_2 = \frac{(E_2E_1 + EE') \times E'E_1}{2} \quad \text{ainsi, } V_2 = S_2 \times l$$

$$EE' = 3.962 \text{ m}$$

$$E_2E_1 = 2.442 \text{ m}$$

$$E'E_1 = 45.72 \text{ m}$$



Par application numérique, $V_2 = 1171.163 \text{ m}^3$. Donc, il faut un volume de terre d'environ 1171.163 m^3 pour remblayer la cavité E-E'-E₁-E₂.

3.1.4.2. Evaluation des déblais

- **Le volume V_1' du déblai A-K-N-C**

Considérons les figures géométriques suivantes : **AGC**, triangle rectangle en G de surface $\mathcal{A}$; **KLM**, triangle rectangle en L de surface $\mathcal{A}_1$; **LGOM**, rectangle de surface $\mathcal{A}_2$; **NOC** triangle rectangle en O de surface $\mathcal{A}_3$. Avec les coordonnées des points, nous avons calculé les longueurs de segments sachant que 1 pied (feet) = 0,305 m.

KL=23m ; LM=1,524m ; LG=68,6m ; NO=14m; OC=4,6m; HI=44,2m; IJ= 15,24m; JE=10m; HJ=59,44m; AG=91,44m; GC=6,1m et HD=6,5m.

La surface latérale du déblai AKNC est obtenue par la relation suivante :

$$S_1' = \mathcal{A} - (\mathcal{A}_1 + \mathcal{A}_2 + \mathcal{A}_3)$$

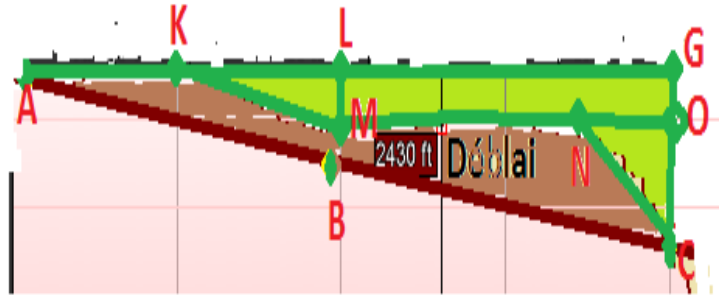
Où $\mathcal{A} = \frac{GC \times AG}{2} = 278,89 \text{ m}^2$

➤ $\mathcal{A}_1 = \frac{KL \times LM}{2} = 17,53 \text{ m}^2$

$$\triangleright A_2 = LG \times LM = 104,55 \text{ m}^2$$

$$\triangleright A_3 = \frac{NO \times OC}{2} = 32,2 \text{ m}^2$$

Par conséquent, $S_1' = 124,61 \text{ m}^2$



Ainsi, le volume V_1' du déblai A-K-N-C

pour une route standard est : $V_1' = 996,88 \text{ m}^3$; il s'agit du volume approximatif de terre à déblayer pour atteindre le niveau souhaité de la nouvelle voie routière.

▪ Le volume V_1' du déblai D-I-E

Considérons les figures géométriques suivantes : **HJED**, trapèze de surface S ; **HID**, triangle rectangle en H de surface S_1 ; **IJE** triangle rectangle en J de surface S_2 .

La surface latérale du déblai **DIE** est obtenue par la relation suivante :

$$S_2' = S - (S_1 + S_2)$$

Où

$$S = \frac{(JE + HD) \times HJ}{2} = 2229 \text{ m}^2$$

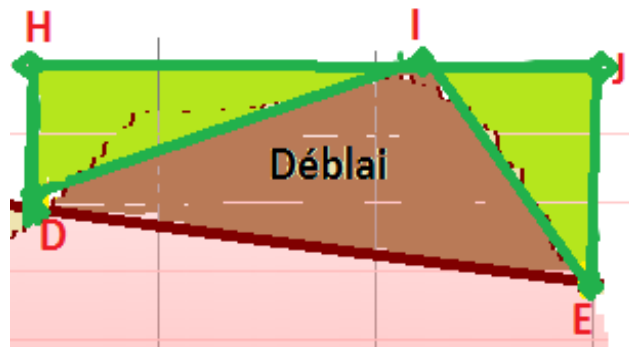
$$S_1 = \frac{HD \times HI}{2} = 1436,5 \text{ m}^2$$

$$S_2 = \frac{IJ \times JE}{2} = 76,2 \text{ m}^2$$

Par conséquent, $S_2' = 716,3 \text{ m}^2$

Le volume V_1' du déblai D-I-E pour une route standard est approximativement :

$$V_2' = 5730,4 \text{ m}^3$$



L'analyse des volumes de terre nécessaires pour le remblai et le déblai des cavités mentionnées met en évidence des exigences significatives en matière de gestion des matériaux. Pour remblayer la cavité C-O1-D, un volume de 853 m^3 de terre est requis, tandis que la cavité E-E'-E1-E2 nécessite un volume supérieur, d'environ 1171.163 m^3 . Il faudra un volume total moyen de terre de

2024,163 m³ pour les remblais. Ces chiffres soulignent l'importance de planifier adéquatement les ressources nécessaires pour l'exécution des travaux.

De plus, le déblai associé à la construction de la nouvelle voie routière révèle des volumes non négligeables. Pour le déblai A-K-N-C, le volume de déblai est estimé à 996.88 m³, tandis que la section D-I-E nécessite un déblai beaucoup plus important, évalué à 5730.4 m³. Ce qui nous donne un volume moyen de terre de 6727,28 m³ suffisant pour les remblais. Ainsi on n'aura plus besoin d'aller chercher de la terre ailleurs. Ces résultats témoignent des défis liés à l'équilibre entre le remblai et le déblai, essentiel pour garantir une infrastructure routière stable et durable. Ils permettront également d'optimiser les opérations de terrassement, en minimisant les déplacements de terre et à réduisant les coûts associés aux travaux. Une gestion efficace de ces données est cruciale pour le succès du projet.

3.2. DISCUSSION

Dans cette section nous discuterons du choix de la méthode et des résultats obtenus.

3.2.1. Discussion sur le choix de la méthode des MTNs de GOOGLE EARTH

Le choix d'utiliser les Modèles Numériques de Terrain (MNT) de Google Earth plutôt que les données GPS ou tachéométriques pour cartographier les tracés routiers et le relief du campus de l'Université de Yaoundé 1 peut se justifier par plusieurs avantages parmi lesquels :

- L'accessibilité et la disponibilité des données. Selon une étude récente de 2022, les MNT de Google Earth sont devenus une source de données de plus en plus accessible et fiable, notamment pour les régions où les données terrain sont limitées (Mancini et al., 2022). Ce qui justifie l'obtention rapide d'une vue d'ensemble du terrain de la zone campus sans avoir à mener des campagnes de mesures coûteuses ;
- La meilleure résolution et précision. Guo et al. (2023) montre que les dernières versions des MNTs Google Earth ont atteint des niveaux de résolution et de précision de plus en plus élevés, les rendant adaptés à des applications de cartographie et d'analyse du relief. Cela nous a permis d'avoir une représentation détaillée du profil topographique en long de la nouvelle route proposée du campus ;
- Le faible coût et mise à jour régulière. Comparé à l'acquisition de données GPS ou tachéométriques, l'utilisation des MNT Google Earth représente un coût nettement moindre (Mancini et al., 2022). De plus, ces données sont régulièrement mises à jour, assurant une représentation à jour du terrain.

Bref, la qualité et l'accessibilité des MNTs Google Earth en font une solution intéressante pour cartographier les raccordements de voies et analyser le relief d'un site pour permettre une prise de décisions adéquates, en complément des données GPS ou tachéométriques lorsqu'elles sont disponibles.

3.2.2. Discussion sur les résultats

Cette recherche portant sur la contribution de la géomatique aux raccordements géodésiques met en lumière l'importance des outils géomatiques dans l'amélioration de la précision des mesures géodésiques. Les résultats obtenus, avec un coefficient de Pearson de **0.999999993**, indiquent une corrélation presque parfaite, témoignant de l'efficacité des méthodes géomatiques pour assurer des raccordements précis. De plus, la capacité d'utiliser des outils tels que Google Earth et ArcGIS permet non seulement de générer des tracés routiers et des profils topographiques, mais également d'évaluer les dénivelés et les remblais, facilitant ainsi la planification des infrastructures. Comme le soulignent Bédard et Proulx (2011), la géomatique offre des solutions innovantes pour visualiser et analyser le relief d'une zone d'étude à travers la modélisation numérique du terrain (MNT). Labbé (2020) a étudié l'impact des données géomatiques sur la conception des routes en milieu urbain. L'auteur a réalisé des enquêtes de terrain combinées à des analyses spatiales dans ArcGIS pour évaluer les effets des tracés sur la circulation. Toutefois, bien que cette recherche révèle des avancées significatives, certaines limites subsistent. Par exemple, la dépendance à des données de qualité variable peut affecter la précision des modèles générés, et l'accessibilité aux outils géomatiques reste un défi dans certaines régions. Cependant, ces limites ne devraient pas être perçues comme des obstacles insurmontables, mais plutôt comme des opportunités d'amélioration et d'innovation dans le domaine, renforçant l'idée que la géomatique est un atout indispensable pour les projets géodésiques modernes.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le présent mémoire a examiné la contribution de la géomatique aux raccordements géodésiques, en mettant en évidence l'efficacité des outils géomatiques tels que Google Earth et ArcGIS pour produire des tracés routiers et des profils topographiques, permettant ainsi d'évaluer les dénivelés et les remblais à moindre coût et dans des délais réduits. Face aux constats préoccupants concernant la durée prolongée et les coûts élevés des études topographiques traditionnelles, souvent responsables du ralentissement, voire de l'abandon de projets d'aménagement routier, la question de recherche centrale était de savoir si la géomatique offre une solution efficace. À travers une méthodologie reposant sur l'utilisation de données satellites, l'application des moindres carrés, la loi des cosinus et sinus ou de triangulation, ainsi qu'un test de Pearson, les résultats ont montré une corrélation remarquable, avec un coefficient de **0.999999993** entre les coordonnées géographiques de Google Earth et celles d'un GPS portable. De plus, les cartes générées du tracé routier de toutes les voies du campus accessibles aux véhicules et du Modèle Numérique de Terrain (MNT) de toute la zone campus, ainsi que le profil topographique en long de la nouvelle route proposée qui rattache l'amphi 1002 à l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique de Yaoundé, illustrent la capacité de la géomatique à optimiser la planification des infrastructures. Cette recherche ouvre la voie à une adoption plus large des outils géomatiques dans les projets d'aménagement, suggérant que des approches innovantes pourraient transformer les pratiques traditionnelles et améliorer l'efficacité des études géodésiques dans le contexte du développement des infrastructures.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Béguery, P. Kissavos, A. et Sahlin, P. (2012). Tracé et géométrie des routes. Eyrolles.
- Bonnafox, P. (2015). Géométrie des voies de circulation. Dunod.
- Caquot, A. (1934). Éléments de calcul des routes. Eyrolles.
- Chaussée, J.-P. (2010). Conception et dimensionnement des infrastructures routières. Dunod.
- Cornu, A. (1874). Étude géométrique des propriétés générales des courbes à double courbure. Gauthier-Villars.
- Coutant, M. (2018). Normes et règles de conception des infrastructures de transport. Eyrolles.
- Dupont, G. (2020). Paysage et infrastructures de transport. Éditions du Moniteur.
- Longley, P., Goodchild, M., Maguire, D. et Rhind, W. (2015). Geographic Information Science and Systems (4th edition).
- Mancini, A. Cortés, E., Wendisch, F. et Sortino, L. (2022). Comparison of Digital Elevation Models from Different Sources for Archaeological Spatial Analysis. Remote Sensing, 14(8), 1932.
- Guo, H., He, S., Zhang, G., et Luo, M. (2023). Accuracy Assessment of Google Earth Digital Elevation Models and Their Applications in Landslide Susceptibility Mapping. Sustainability, 15(3), 2533.
- Xu, Y., Zhang, X., Li, J., Wang, B., et Ke, X. (2021). Integrated Geospatial Analysis of Road Networks and Digital Elevation Models. ISPRS International Journal of Geo-Information, 10(3), 147.
- Nouël, J.-F. (1993). Tracé et géométrie des voies. Presses de l'École nationale des ponts et chaussées.
- Serruys, M. (1924). Théorie générale des courbes de raccordement. Dunod.
- Villavicencio, G. (2021). Adaptation des infrastructures aux contraintes environnementales. Éditions Tec & Doc.

