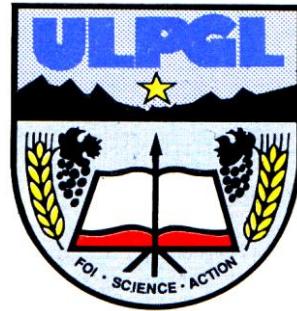


UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS



BP. 368 GOMA

FACULTE DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES APPLIQUEES

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

www.ulpgl.net

ÉTUDE DES FACTEURS CAUSANT LE GLISSEMENT DES TERRAINS A BUKAVU : Cas du versant de l'ITFM/Karhale

Mémoire de fin d'étude présenté et défendu en vue de
l'obtention du Diplôme d'Ingénieur Civil

Option : Structures et Ouvrages d'Art

Par : RAHA KASHINDI Alexandre

Directeur : Prof. Dr. Ir. FRANÇOIS NGAPGUE

Encadreur : CT. Ir. ALLY ALINABIWE

ANNEE ACADEMIQUE 2020-2021

EPIGRAPHE

Dans la nature, tout a toujours une raison.
Si tu connais cette raison, tu n'as plus besoin de l'expérience

Leonard de VINCI

IN MEMORIAM

« Ma mère, KITUMAINI NAKIHINGA Bibishe »

DEDICACE

« Aux sinistrés des catastrophes naturelles dans la ville de Bukavu »

REMERCIEMENTS

Nous ne pouvons pas affirmer que ce travail est un fruit de nos seuls propres efforts. Il a bénéficié des apports de plusieurs personnes ; animées d'une grande et bonne volonté. Ainsi, il est de notre devoir de remercier tous ceux qui de près ou de loin, nous ont soutenu d'une manière ou d'une autre.

De prime abord, nous adressons nos sincères remerciements à l'Eternel Dieu Tout Puissant pour le souffle de vie, la santé et sécurité qu'il n'a cessé de nous garantir au long de nos recherches pour ce travail, gloire et honneur lui soient rendus.

Nos sincères remerciements s'adressent ensuite à toutes les autorités académiques ainsi qu'à tout le corps enseignant de l'Université Libre des Pays des Grands Lacs, plus particulièrement à ceux qui sont intervenus à l'auditoire pour nous dispenser leurs savoirs.

Nous remercions le Professeur Docteur Ingénieur FRANÇOIS NGAPGUE et le Chef de Travaux Ingénieur ALLY ALINABIWE qui ont respectivement accepté de diriger et encadrer le présent travail et cela en dépit de leurs diverses occupations.

Nos plus majestueux remerciements s'adressent à nos chers parents KITUMAINI NAKIHINGA et KASHINDI MUBONE, SANVRA MAKWARUZO et SAFARI NAKIHINGA, à nos frères et sœurs JESSE KASHINDI, VICTORINE KASHINDI, Ir ISHARA RUMANYA, pour leurs apports, conseils et encouragements.

Enfin remercions tous nos amis et camarades pour leurs soutiens, affection et conseils. Que toute personne ayant d'une manière ou d'une autre contribué au présent travail trouve ici l'expression de notre gratitude.

RESUME

Le glissement de terrain est un phénomène naturel qui peut être de grande ampleur et provoquer des dégâts considérables. Dans certains cas ils peuvent causer des pertes en vies humaines. Avec son relief jeune et accentué, une pluviosité intense et une sismicité régionale, la ville Bukavu est en proie des glissements des terrains. Des nombreux versants en sont affectés et c'est le cas du versant de l'ITFM à Karhale situé dans la commune d'Ibanda. Ce glissement de terrain menace les bâtiments se trouvant en amont et en aval du versant ainsi que la circulation sur la Route Nationale n°5. Le présent travail de mémoire porte sur l'étude des facteurs causant le glissement des terrains à Bukavu prenant pour cas, celui du versant d'ITFM Karhale. Pour y arriver, il a été nécessaire de caractériser le sol du versant de l'ITFM Karhale et d'évaluer les facteurs causant le glissement de terrain selon les prescriptions de WP/WLI et enfin proposer des solutions. Les essais de caractérisation ont montré que le sol du versant de l'ITFM Karhale est argileux de plasticité élevée, d'une cohésion importante et d'indice de vide réduit. D'après WP/WLI, l'évaluation des facteurs causaux a montré que pour ce qui est des conditions du terrain, le sol en place présente une sensibilité à l'eau et plusieurs jointures ou fissures comme facteurs à la base de glissement de terrain. S'agissant de processus géomorphologique, l'enlèvement de la végétation par sécheresse est aussi un facteur à la base du glissement de terrain. En ce qui concerne les processus physiques, les précipitations profondes élevées est un facteur à la base du glissement de terrain. Enfin s'agissant des processus faits par l'homme, le chargement de la pente ou de sa crête, enlèvement de la végétation et les vibrations artificielles sont les facteurs à la base des glissements des terrains. Y égard à ces facteurs un profilage du glissement de terrain, un masque poids drainant et un canal d'évacuation des eaux de ruissellement ont été proposés comme solutions adéquates.

Mot clé : Etude, Facteur, Glissement de terrain, Processus.

ABSTRACT

The landslides are natural phenomena that can be in large scale and cause considerable damage. In some cases they can cause loss in human lives. With its fast and accentuated relief, intense rainfall and regional seismicity, the city of Bukavu is plagued by landslides. Many slopes are affected and this is the case of the slope of the ITFM in Karhale located in the commune of Ibanda. This landslide threatens the buildings located upstream and downstream of the slope as well as the traffic on the national road n°5. This work focuses on the study of the factors causing the landslide in Bukavu taking for the case, that of the ITFM Karhale slope. To achieve this, it was necessary to characterize the soil on the ITFM Karhale slope and assess the factors causing the landslide according to WP / WLI prescriptions and finally propose solutions. Characterization tests have shown that the soil on the ITFM Karhale slope is clayey with high plasticity, high cohesion and low void index. According to WP / WLI, the evaluation of the causal factors to show that with regard to the conditions of the ground, the ground in place presents a sensitivity to water and several joints or cracks as the factors at the base of the landslides. Being a geomorphological process, the removal of vegetation by drought is also a factor at the base of landslides. With regard to physical processes, high deep precipitation is the root cause of landslides. Finally, when it comes to man-made processes, slope or crest loading, vegetation removal and man-made vibrations are the factors at the root of landslides. In view of these factors, landslide profiling, a draining weight mask and a runoff drainage channel have been proposed as suitable solutions.

Keyword : Stydy, Factor, Landslide, Process.

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure 1.1. Illustration d'un glissement plan (SOUHIR, 2015) | 5 |
| Figure 1.2. Illustration d'un glissement circulaire (SOUHIR, 2015)..... | 6 |
| Figure 1.3. Illustration d'un glissement complexe (SOUHIR, 2015) | 7 |
| Figure 1.4. Illustration d'évolution du facteur de sécurité avec le temps (Popescu, 2002) | 9 |
| Figure 1.5. Courbe de distribution de probabilité de facteur de sécurité (Popescu, 2002) | 10 |
| Figure 1.6. Courbe de distribution de probabilité de facteur de sécurité (Popescu, 2002) | 10 |
| Figure 1.7 courbe de distribution de probabilité de facteur de sécurité | 10 |
| Figure 1.8. Schéma de la solution butée de pied (Hakima DAHMANI, 2013) | 21 |
| Figure 1.9. Schéma de la solution de l'allègement en tête (Hakima DAHMANI, 2013) | 22 |
| Figure 1.10. Schéma d'une bèche (Hakima DAHMANI, 2013)..... | 23 |
| Figure 1.11. Schéma de contrefort (bèche discontinue) (Hakima DAHMANI, 2013) | 23 |
| Figure 1.12. Schéma d'un masque drainant (Hakima DAHMANI, 2013) | 24 |
| Figure 1.13. Schéma d'un éperon drainant (Hakima DAHMANI, 2013)..... | 24 |
| Figure 1.14. Illustration de drains subhorizontaux (Hakima DAHMANI, 2013) | 25 |
| Figure 1.15. Illustration d'ouvrage souple (Hakima DAHMANI, 2013)..... | 26 |
| Figure 1.16. Illustration de tirants d'ancrage actif (Hakima DAHMANI, 2013)..... | 27 |
| Figure 1.17. Illustration du principe de cloutage (Clément DESODT, 2017)..... | 28 |
| Figure 1.18. Cartographie illustrative de glissement des terrains à Bukavu (Clarisse BALEGAMIRE, 2017) | 29 |
| Figure 1.19. Corps de glissement | 30 |
| Figure 1.20. Niche de glissement | 30 |
| Figure 2.1. Carte administrative de Bukavu (Sadiki Nyanabo, 2010) | 33 |
| Figure 2.2. Comparaison des moyennes mensuelles de précipitation (1930-1946, d'après Bulto,1950), (1988-2003,station de Bukavu) et (2015-2020, station d'UOB) | 33 |
| Figure 2.3. Hydrographie de la ville de Bukavu (Sadiki Nyanabo, 2010) | 34 |
| Figure 2.4. La géomorphologie de la ville de Bukavu (Sadiki Nyanabo, 2010)..... | 35 |
| Figure 2.5. Morpho-tectonique de région du Kivu (Sadiki Nyanabo, 2010) | 37 |
| Figure 2.6. Caractéristiques de la section du canal | 46 |
| Figure 2.7. Profil trapézoïdal..... | 47 |

LISTE DE TABLEAUX

| | |
|---|----|
| Tableau 1.1. Classification des glissement de terrain en fonction de leurs vitesses de déplacement V_d (Riad, 2009) | 7 |
| Tableau 1.2. Classification de terrain en fonction de leur surface (Wiley and Sons, 2005) | 8 |
| Tableau 1.3. Bref liste des facteurs causaux de glissement des terrains (WP/WLI, 1994)..... | 12 |
| Tableau 2.1. Les limites de liquidité d'un sol | 41 |
| Tableau 2.2. Les limites de plasticité d'un sol | 41 |
| Tableau 2.3. Relation entre les limite d'Atterberg d'un sol | 42 |
| Tableau 2.4. Procédure d'évaluation d'un facteur causal (WP/WLI, 1994) | 43 |
| Tableau 2.5. Procédure d'évaluation des processus géomorphologique (WP/WLI, 1994) | 43 |
| Tableau 2.6. Procédure d'évaluation des processus physique (WP/WLI, 1994) | 44 |
| Tableau 2.7. Procédure d'évaluation des processus faits par l'homme (WP/WLI, 1994) | 45 |
| Tableau 2.8. Paramètre section du profil..... | 48 |
| Tableau 3.1. Teneur en eau pour les couches de sol | 50 |
| Tableau 3.2. masse volumique absolu..... | 50 |
| Tableau 3.3. Limites d'Atterberg | 51 |
| Tableau 3.4. L'angle de frottement interne et la cohésion du sol de l'ITFM Karhale | 52 |
| Tableau 3.5. Analyse des conditions du terrain | 52 |
| Tableau 3.6. Analyses des processus morphologiques du terrain | 54 |
| Tableau 3.7. Analyses des processus physique par rapport au site | 56 |
| Tableau 3.8. Analyses des processus faits par l'homme | 58 |
| Tableau 3.9 Dimensions du canal trapézoïdal..... | 60 |

SOMMAIRE

| | |
|---|------|
| EPIGRAPHE..... | i |
| IN MEMORIAM..... | ii |
| DEDICACE..... | iii |
| REMERCIEMENTS | iv |
| RESUME..... | v |
| ABSTRACT | vi |
| LISTE DES FIGURES..... | vii |
| LISTE DE TABLEAUX | viii |
| SOMMAIRE | ix |
| SIGLES ET ABREVIATION | xii |
| INTRODUCTION..... | 1 |
| chapitre 1. GENERALITES SUR LES GLISSEMENTS DE TERRAIN | 4 |
| 1.1. DESCRIPTION DES GLISSEMENT DE TERRRAIN | 4 |
| 1.1.1. GLISSEMENT PLAN..... | 5 |
| 1.1.2. GLISSEMENT ROTATIONNEL OU CIRCULAIRE | 5 |
| 1.1.3. GLISSEMENT COMPLEXE | 6 |
| 1.2. LES FACTEURS CAUSANT LE GLISSEMENT DES TERRAINS (Popescu, 2002) | 8 |
| 1.2.1. VARIATION DE FACTEUR DE SECURITE..... | 8 |
| 1.2.2. LES STADES DE STABILITE DES PENTES..... | 9 |
| 1.2.3. LES FACTEURS CAUSAUX DE GLISSEMENT DES TERRAINS..... | 11 |
| 1.3. CAUSES DES GLISSEMENTS DE TERRAIN (Varnes, Adapted from July 2004) | 13 |
| 1.3.1. L’EAU..... | 13 |
| 1.3.2. LES ACTIVITES SISMIQUES ET VOLCANIQUES..... | 14 |
| 1.3.3. LES ACTIVITES HUMAINES | 14 |
| 1.4. INDICE ET PHENOMENES INDUITS PAR LES GLISSEMENTS DE TERRAIN | 14 |
| 1.4.1. GLISSEMENT DE TERRAINS ACTIFS | 15 |
| 1.4.2. GLISSEMENTS DE TERRAINS REACTIVES..... | 15 |

| | | |
|-------------|---|------------------------------------|
| 1.4.3. | GLISSEMENTS DE TERRAINS INACTIFS | 15 |
| 1.5. | ÉVALUATION ET SURVEILLANCE D'INSTABILITE DES PENTES | 15 |
| 1.5.1. | QUELQUES DEFINITIONS (Lynda, 2013) | 16 |
| 1.5.2. | EVALUATION DE LA STABILITE DES PENTES EN PRATIQUE (Picarelli, 2012) | 18 |
| 1.6. | TECHNIQUES ET MOYEN DE CONFORTEMENT | 20 |
| 1.6.1. | STABILITE PAR TERRASSEMENT | 20 |
| 1.6.2. | STABILITE PAR DRAINAGE | 24 |
| 1.6.3. | STABILITE PAR RENFORCEMENT | 25 |
| 1.7. | GLISSEMENT DE TERRAIN A Bukavu | 28 |
| 1.7.1. | LE GLISSEMENT DE TERRAIN d'ITFM Karhale | 29 |
| | CONCLUSION PARTIELLE | 31 |
| chapitre 2. | PRESENTATION DU MILIEU, MATERIELS ET METHODES | 32 |
| 2.1. | PRESENTATION DU MILIEU D'ETUDE | 32 |
| 2.1.1. | LOCALISATION | 32 |
| 2.1.2. | CLIMAT ET VEGETATION | 33 |
| 2.1.3. | HYDROGRAPHIE | 34 |
| 2.1.4. | LA GEOMORPHOLOGIE | 34 |
| 2.1.5. | APERÇU GEOLOGIQUE | 35 |
| 2.2. | CARACTERISATION DU SOL | 37 |
| 2.2.1. | DETERMINATION DE LA TENEUR EN EAU | 37 |
| 2.2.2. | DETERMINATION DE LA MASSE VOLUMIQUE DU SOL | 38 |
| 2.2.3. | DETERMINATION DES LIMITES D'ATTERBERG | 39 |
| 2.3. | EVALUATION APRES GLISSEMENT | 42 |
| 2.3.1. | OUTILS ET PROCEDURE DE CONTROLE DES FACTEURS CAUSAUX | 42 |
| 2.4. | PROPOSITION DES SOLUTIONS | 45 |
| 2.4.1. | CHOIX DE CONFORTEMENT | 45 |
| | CONCLUSION PARTIELLE | 49 |
| chapitre 3. | PRESENTATION, INTERPRETATION ET ANALYSE DES RESULTATS | 50 |
| 3.1. | PRESENTATION DES RESULTATS | Erreur ! Signet non défini. |
| 3.1.1. | CARACTERISTIQUE PHYSIQUES | 50 |
| 3.1.2. | CARACTERISTIQUES MECANIQUES | 51 |

| | |
|--|----|
| 3.2. ANALYSE DES FACTEURS CAUSANT LE GLISSEMENT DE TERRAIN D'ITFM KARHALE | 52 |
| 3.2.1. CONDITION DU TERRAIN..... | 52 |
| 3.2.2. LES PROCESSUS GEOMORPHOLOGIQUES | 54 |
| 3.2.3. PROCESSUS PHYSIQUES | 56 |
| 3.2.4. PROCESSUS FAITS PAR L'HOMME | 58 |
| 3.3. CONFORTEMENT PROPOSE | 59 |
| 3.3.1. LE PROFILAGE DU VERSANT D'ITFM KARHALE..... | 59 |
| 3.3.2. MASQUE POIDS DRAINANT..... | 60 |
| 3.3.3. CANAL D'EVACUATION DES EAUX | 60 |
| CONCLUSION PARTIELLE..... | 62 |
| CONCLUSION GENERALE | 63 |
| BIBLIOGRAPHIE | 65 |
| ANNEXES | 68 |

SIGLES ET ABBREVIATIONS

FSTA : Faculté de Sciences et Techniques Appliquées

Ir : ingénieur

ITFM : Institut Technique Fundi Maendeleo

N-F : Norme Française

RN : Route Nationale

ULPGL : Université Libre de Pays de Grands Lacs

WP /WLI : Working Party on World Landslide Inventory ;

INTRODUCTION

Sous la dénomination commune de « mouvement de masse », dont le meilleur équivalent anglo-saxons sont des termes « mass mouvement », on regroupe des phénomènes extrêmement divers et complexes qui impliquent une rupture et un déplacement simultané des matériaux (Flageollet, 1989). Ils correspondent à des mécanismes très variés, affectant des terrains aux propriétés mécaniques différentes, mettant en jeu des volumes allant de quelques m³ à plusieurs millions de m³ et créant des dommages de niveau très inégal (Aster, 1991).

Le glissement des terrains sont des phénomènes géomorphologiques présents dans plusieurs régions du globe. Ces phénomènes s'avèrent souvent meurtriers et le bilan socio-économique de sa répercussion le place dans la catégorie des phénomènes naturels les plus redoutés. Par ailleurs, les glissements des terrains sont plus fréquents dans les régions de montagnes tropicales (Vanacke, 2003) et leurs impacts entravent très fréquemment les activités humaines et portent atteinte à des vies humaines et/ou aux biens de ceux-ci. A titre illustratif, en République Démocratique du Congo, dans la province du Sud-Kivu, entre 2010 et 2015, le glissement des terrains observés après des fortes pluies ont causés la mort de 134 personnes et la destruction de 700 bâtiments. Le chef-lieu de la province, la ville de Bukavu n'en est pas épargnée, avec son relief jeune et accentué, une pluviosité intense et une sismicité régionale, les conditions naturelles pour l'occurrence de glissement des terrains y sont réunies. En outre cette région, qui connaît une croissance démographique importante, la ville de Bukavu ressort comme l'un des endroits les plus touchés par les glissements de terrain en RD Congo (plan ORSECRDC, 2012).

Des nombreux versants de la ville de Bukavu sont affectés par les glissements de terrain, c'est le cas du versant de l'ITFM à Karhale dans la commune d'Ibanda. Ce versant surplombe la route nationale numéro 5 de la RD Congo. Déjà à quelques dizaines de mètres des bâtiments de cette école technique, ces mouvements de terre menacent à la fois ces bâtiments, les maisons d'habitation en amont de la colline et la circulation sur la RN 5. Plusieurs solutions ont déjà été envisagées afin de stabiliser le versant de l'ITFM, site auquel le présent travail s'intéresse notamment la plantation des bambous.

En somme afin de faire face aux mouvements des terres, il est nécessaire d'étudier les différentes causes de ceux-ci. Ils peuvent être dû aux différents facteurs naturels, notamment de fortes précipitations, des séismes, des températures très élevées ou sous l'effet des activités humaines comme le déboisement, l'exploitation de matériaux ou travaux de terrassement.

L'étude de glissement des terrains dans la ville de Bukavu fait l'objet des plusieurs études dont celui de :

Clarisse BALEGAMIRE, Caroline MICHELLIER, Jean MUHIGWA, Damien DELVAUX, Gérard IMANI et Olivier DEWITTE (2017), qui dans l'étude de la vulnérabilité du bâti face aux glissement de terrain ; analyse spatio-temporelle à Bukavu démontrent que plus de 450 bâtiments sélectionnées dans différentes zones de contraintes géomorphologiques sont observés 55% des dégâts sur les ouvrages (fissures et autres déformations) et que la présence de différentes natures de contraintes géomorphologiques ne justifie pas à elle seule les dégâts aux bâtiments. La modification de l'utilisation des versants, les contraintes économiques et les politiques d'aménagement du territoire qui n'intègrent pas la gestion des risques naturels interviennent également.

Toussaint MUGARUKA, Sylvain KULIMUSHI, Walère MUHINDO et Olivier DEWITTE (2017), qui dans l'étude d'interaction entre facteurs naturels et anthropiques du glissement de terrain de Nyakavogo (Bukavu, RD Congo) démontrent que ce versant, était déjà affecté sur toute sa hauteur avant 1959 par une rivière qui lui est en contact. La réduction sensible du boisement à la faveur des aires cultivées et à végétation herbeuse, l'accroissement du nombre de bâtiment et de terrassements, une concentration des écoulements de surface au niveau de l'escarpement principal et l'activité sismique ont contribué aux instabilités de 1959 à 1997. En 1997, le mouvement rotationnel profond qui a affecté l'ensemble du glissement correspond à la réactivation la plus importante connue et enfin la réorganisation de la rivière après le barrage créé par ce mouvement et l'érosion accentuée par l'exploitation de matériaux de construction dans son lit ont joué un rôle important dans la réactivation de 2000 qui a affecté le pied du glissement jusqu'à maintenant malgré une tendance de stabilisation observée.

Le présent travail se propose d'étudier les facteurs causant le glissement des terrains à Bukavu, précisément pour le cas du versant de l'ITFM Karhale.

Pour atteindre cet objectif il sera nécessaire de :

- Caractériser le sol du versant de l'ITFM Karhale ;
- Analyser les facteurs causant le glissement de terrain de l'ITFM Karhale, selon l'approche opérationnelle de WP/WLI sur les facteurs causant le glissement des terrains ;
- Enfin, proposer une solution pratique adéquate pour stabiliser le versant d'ITFM Karhale.

La démarche méthodologique est articulée sur la méthode documentaire qui a permis de développer les connaissances relatives au sujet de recherche, la méthode expérimentale employée au laboratoire pour les différents essais et enfin la méthode analytique ont permis d'évaluer les différents facteurs causants lié aux glissement des terrains selon l'approche de WP/WLI.

Outre l'introduction générale et la conclusion générale, ce travail de recherche a été structuré en trois chapitres. Le premier chapitre présente les généralités sur les glissements de terrain, entre autres la description, les facteurs causants, les causes, phénomènes induits des glissements de terrain, l'évaluation et surveillance des pentes instables, les techniques et moyen de confortement et la présentation du glissement de terrain de l'ITFM Karhale. Dans le deuxième chapitre sont présentés le milieu de recherche et ses contexte climatiques, hydrographiques, géomorphologiques et géologiques, ce chapitre présente notamment les matériels et méthodes utilisés. Quant au troisième chapitre, il porte sur la présentation, l'analyse et l'interprétation des résultats.

chapitre 1. GENERALITES SUR LES GLISSEMENTS DE TERRAIN

INTRODUCTION

Le terme « Glissement de terrain » décrit une grande variété de processus qui entraîne les mouvements vers le bas et vers l'extérieur des matériaux formant des pentes, incluant la roche, le sol, le remblai artificiel ou une combinaison de ceux-ci. Il correspond à un déplacement généralement lent (de quelques millimètres par an à quelques mètres par jour) sur une pente, le long d'une surface de rupture dite surface de cisaillement. La grande variété de ce mouvement de pente reflète la diversité des conditions qui rendent la pente instable et les processus qui déclenchent le mouvement. Il est plus approprié de discuter des facteurs causaux (incluant à la fois les « condition » et les « processus ») que les « causes » en soi. Ainsi au sol les conditions (faible résistance, tissu sensible, degré d'altération et de fracturation) sont des critères influents et non des causes. Les facteurs causant le glissement de terrain font partie des conditions nécessaires au développement d'une pente instable, auxquelles il faut ajouter les critères environnementaux de stress, de pression interstitielle et de température car peu importe si le sol est faible en tant que tel l'échec ne se produira que s'il y a un processus causal qui agit aussi. Des tels processus causaux peuvent être naturels ou anthropiques, mais modifient efficacement les conditions statiques du sol suffisamment pour provoquer la défaillance du système de pente, c'est-à-dire pour modifier négativement l'état de stabilité (Popescu, 2002). Ce chapitre présente la description, les facteurs causants, les causes, phénomènes induits de glissement des terrains, il présente aussi l'évaluation et surveillance des pentes instables, les techniques et moyen de confortement et la présentation du glissement de terrain de l'ITFM Karhale.

1.1. DESCRIPTION DES GLISSEMENTS DE TERRAIN

De nombreuses classifications sont données dans la littérature technique, elles s'appuient toutes sur des notions de cinématique, de nature de sols, de stratigraphie, etc.

Selon la forme de la surface de rupture, on distingue trois types de glissements :

- Glissement plan, le long d'une surface plane ;
- Glissement circulaire ou rotationnel, le long d'une surface convexe ;
- Glissement quelconque ou composite lorsque la surface de rupture est en mélange des deux types (Reiffsteck, 1988).

1.1.1. GLISSEMENT PLAN

Il se manifeste lorsqu'il existe une surface topographique pouvant guider une rupture plane : telle qu'une couche mince de caractéristiques médiocres sur un substratum. Les volumes des masses en mouvement varient de quelques mètres cubes à plusieurs dizaines de millions de mètres cubes (Reiffsteck, 1988). Le glissement plan est illustré par la figure (1.1).

▪ Les principaux facteurs déclenchant

- Les modifications du régime hydraulique (saturation du matériau, augmentation de pressions interstitielles...);
- Les terrassements;
- L'érosion naturelle (ruissellements, érosions des berges)
- Les séismes.

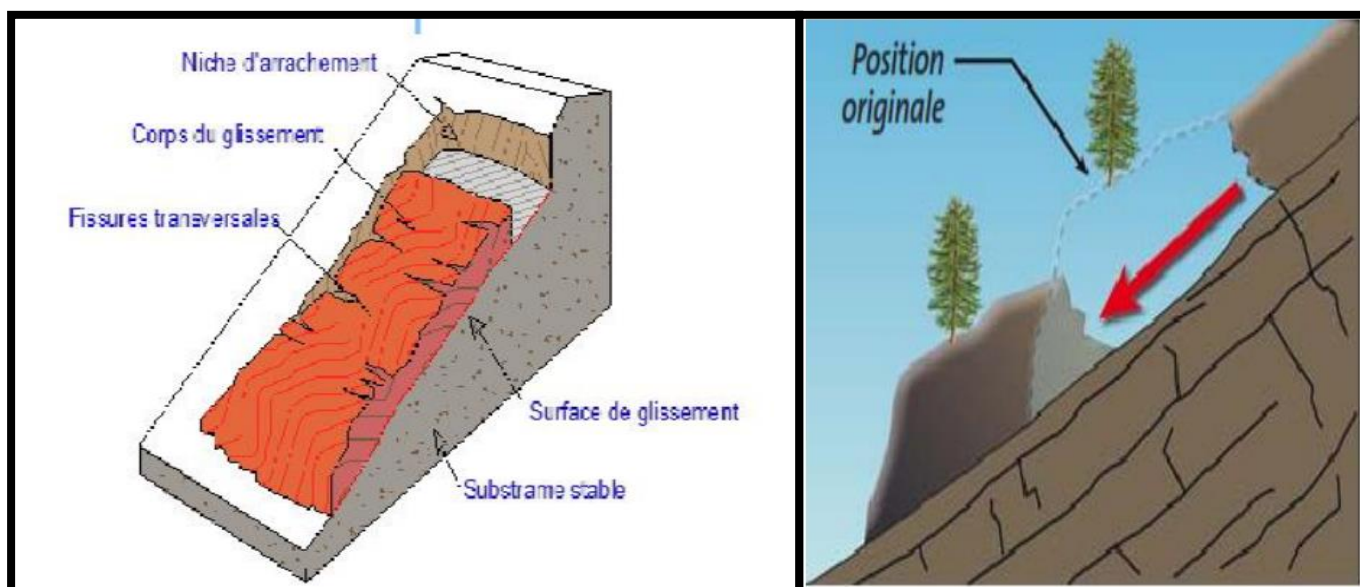


Figure 1.1. Illustration d'un glissement plan (SOUHIR, 2015)

1.1.2. GLISSEMENT ROTATIONNEL OU CIRCULAIRE

Il est caractérisé par un basculement de la masse glissée le long d'une "surface de rupture" dont la forme est parfois assimilable à un cylindre à directrice circulaire, c'est le cas en particulier des ruptures de remblai sur sols mous et de déblai en sols homogènes. Les volumes des masses en mouvement varient de quelques mètres cubes à plusieurs dizaines de millions de mètres cubes (Reiffsteck, 1988). Le glissement rotationnel ou circulaire est illustré par la figure (1.2).

▪ Les principaux facteurs déclenchant

- Les modifications du régime hydraulique (saturation du matériau, augmentation des pressions interstitielles...)
- Les terrassements
- L'érosion naturelle (ruissellements, érosion des berges)
- Les séismes.

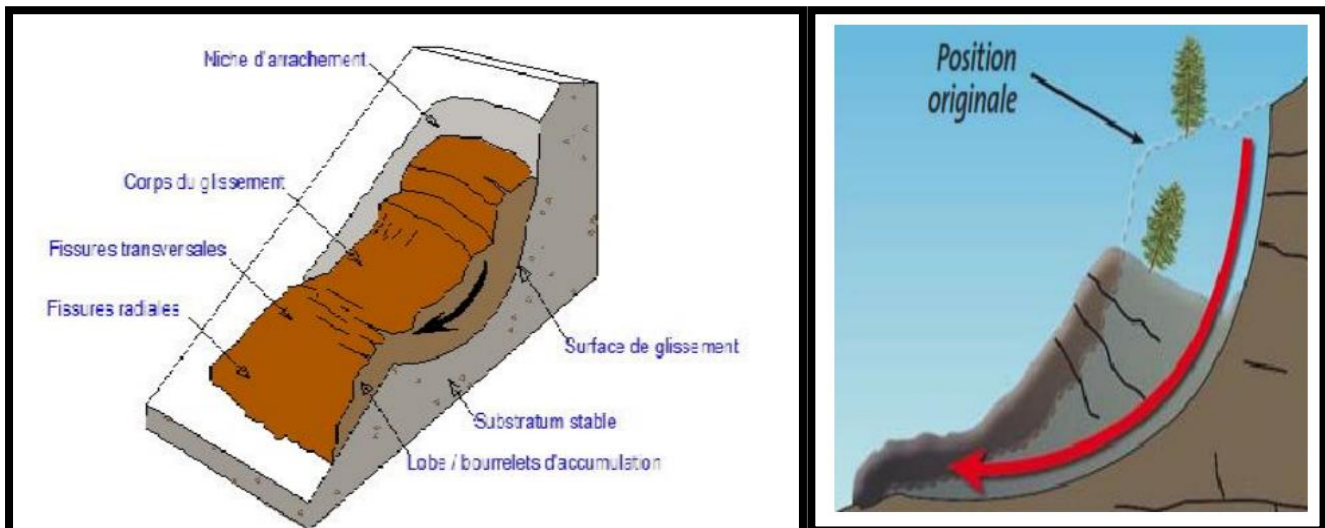


Figure 1.2. Illustration d'un glissement circulaire (SOUHIR, 2015)

1.1.3. GLISSEMENT COMPLEXE

Lorsque le sol est hétérogène ou anisotrope il peut y avoir formation de glissements "complexes" dont certaines parties correspondent à des mouvements rotationnels et d'autres à des mouvements plans. C'est le cas, en particulier, des remblais sur versants. Les volumes des masses en mouvement varient de quelques mètres cubes à plusieurs dizaines de millions de mètres cubes (Reiffsteck, 1988). Le glissement complexe est illustré par la figure (1.3).

Principaux facteurs déclenchant

- Les modifications du régime hydraulique (saturation du matériau, augmentation des pressions interstitielles...)
- Les terrassements
- L'érosion naturelle (ruissellements, érosion des berges)
- Les séismes

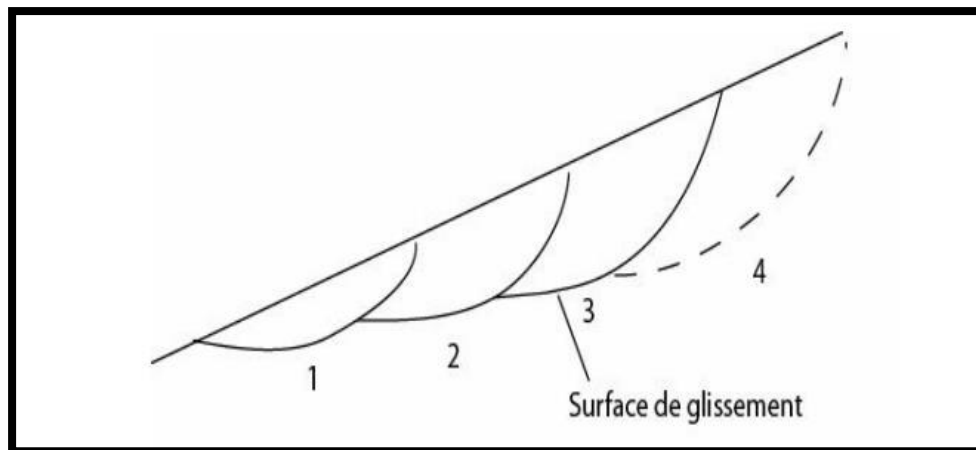


Figure 1.3. Illustration d'un glissement complexe (SOUHIR, 2015)

Dans le même contexte des classifications cinématique, le degré d'activité des différents mouvements peut également être classé à travers une échelle de vitesse de déplacement de la masse mise à contribution. L'intensité du glissement varie alors dans l'espace en allant de l'amont vers l'aval sur l'axe de déplacement du glissement de terrain. Ces paramètres peuvent être exprimés quantitativement, notamment en utilisant une fonction de distribution spatiale, ou en appliquant les classements d'intensité qualitatifs relatifs tels que lent, modéré et rapide, ou faible, modéré et élevé. Le tableau (1.1) établi par Gruden et Vanes en 1996, tente d'établir une échelle d'intensité des glissements de terrain en tenant compte de la vitesse de déplacement de la masse mise à contribution.

Tableau 1.1. Classification des glissement de terrain en fonction de leurs vitesses de déplacement V_d (Riad, 2009)

| Vitesse | Description |
|--|--------------------|
| $V_d < 16\text{mm/an}$ | Extrêmement lent |
| $16\text{mm/an} < V_d < 1.6\text{ m/mois}$ | Très lent |
| $1.6\text{mm/an} < V_d < 13\text{m/mois}$ | Lent |
| $13\text{m/mois} < V_d < 1.8\text{m/h}$ | Modéré |
| $1.8\text{m/an} < V_d < 3\text{m/mn}$ | Rapide |
| $3\text{m/mn} < V_d < 5\text{m/mois}$ | Très rapide |
| $V_d > 5\text{m/s}$ | Extrêmement rapide |

Les glissements sont des déplacements de matériaux (roches fines indurées ou meubles, sols naturels ou anthropiques) le long d'une surface basale de cisaillement.

Tableau 1.2. Classification de terrain en fonction de leur surface (Wiley and Sons, 2005)

| Surface (m ²) | Description |
|--|-------------|
| $s < 200$ | Très petit |
| $200 < s < 2000$ | Petit |
| $2000 < s < 20000$ | Moyen |
| $20000 < s < 200000$ | Grand |
| $200000 < s < 2000000$ | Très grand |
| $s > 2000000$ | Vaste |

1.2. LES FACTEURS CAUSANT LE GLISSEMENT DES TERRAINS

Dans chaque pente, il existe des forces qui ont tendance à favoriser le mouvement vers le bas et des forces opposées qui ont tendance à résister au mouvement. Une définition générale de facteur de sécurité, F , d'une pente résulte de la comparaison de la pente descendante contrainte de cisaillement avec la résistance au cisaillement du sol, le long d'une surface de rupture supposée ou connue. Départ de cette définition générale, Terzagli (1950) a divisé les causes des glissements de terrain en causes externes qui entraînent une augmentation de la contrainte de cisaillement (par exemple, changements géométriques, déchargement du pied de pente, chargement crête de talus, chocs et vibrations, rabattement, changements de régime des eaux) et les causes internes qui entraînent une diminution de la résistance au cisaillement (par exemple, rupture progressive, altération, érosion par infiltration) (Popescu, 2002).

1.2.1. VARIATION DE FACTEUR DE SECURITE

Afin de faciliter une meilleure compréhension des glissements des terrains, il est fait référence à la figure 1.4 qui montre un exemple de variation du facteur de sécurité en fonction du temps pour une pente donnée. Les précipitations et l'évaporation saisonnières se reflètent dans les variations saisonnières du facteur de sécurité. S'il y a une tendance à long terme des niveaux d'eau souterraine, ou des changements de force dus aux intempéries, ceux-ci apparaîtront comme une tendance imposée sur la variation saisonnière. Les changements soudains seront dus à des

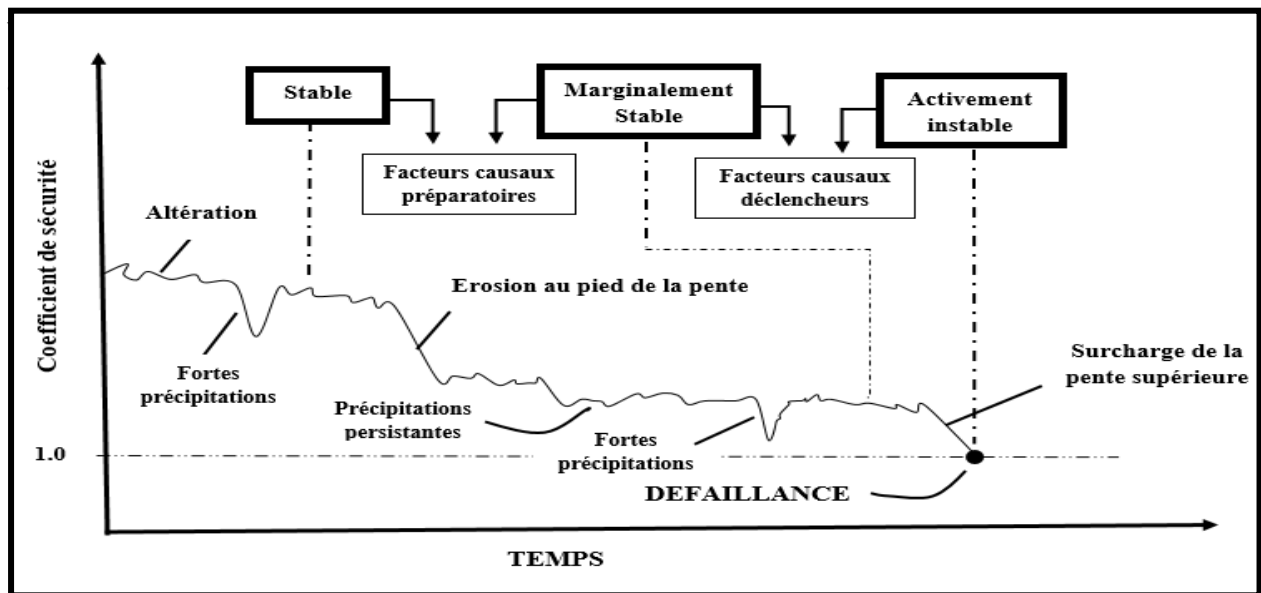


Figure 1.4. Illustration d'évolution du facteur de sécurité avec le temps (Popescu, 2002)

La figure 1.4 démontre que rarement, voire jamais, un glissement de terrain peut être attribué à un seul facteur causal. Le processus menant au développement du glissement a son début commence avec la formation de la roche elle-même, lorsque ses propriétés fondamentales sont déterminées et comprenant tous les événements ultérieurs de mouvement de la croûte, d'érosion et d'altération.

1.2.2. STADES DE STABILITE DES PENTES

La valeur calculée du facteur de sécurité est une distinction claire et simple entre les pentes stables et instables. Cependant, du point de vue physique, il est préférable de visualiser les pentes existant dans l'un des cas suivant que les stades sont stable, marginalement stable, activement instable (Crozier, 1986).

- ✚ Les pentes stables sont celles où la marge de stabilité est suffisamment élevée pour résister à toutes les forces déstabilisantes.
- ✚ Les pentes marginalement stables sont celles qui échoueront à un moment donné à la force déstabilisatrice atteignant un certain niveau d'activité.
- ✚ Enfin, les pentes activement instables sont celles dans lesquelles les forces de déstabilisation produisent un mouvement continu ou intermittent.

Les trois stades de stabilité doivent être considérés comme faisant partie d'un continuum. La probabilité de la défaillance étant infime à l'extrémité stable du spectre mais augmentant à travers le stade marginalement stable pour atteindre la certitude dans le stade activement instable.

Ceci est illustré schématiquement sur la figure 1.5 par la courbe de distribution de probabilité du facteur de sécurité pour tout ensemble des pentes dans un environnement spécifié (DOE, 1994).

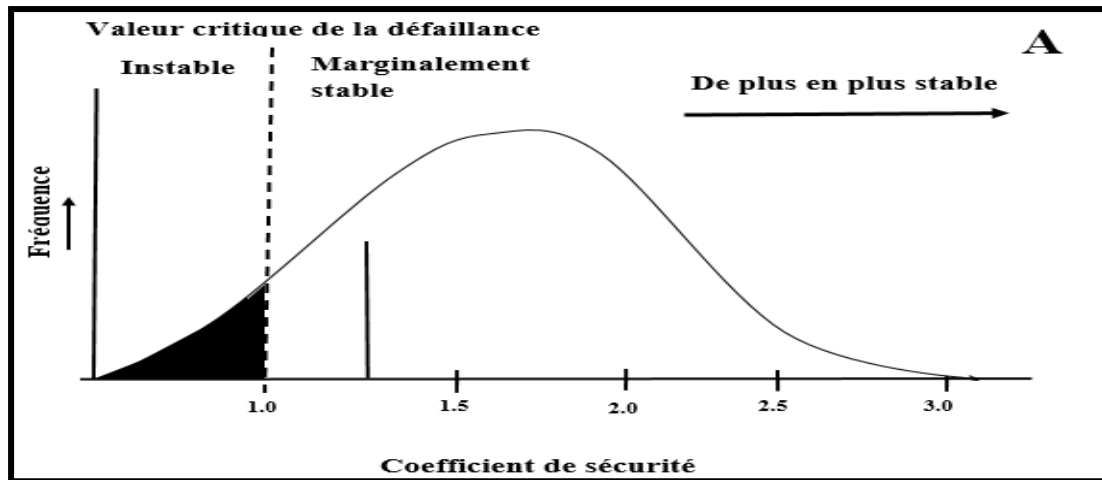


Figure 1.5. Courbe de distribution de probabilité de facteur de sécurité (Popescu, 2002)

La figure 1.6 montre que dans n'importe quelle zone, il est probable que plus des pentes seront soumises à des formes mineures de mouvement de masse, telles que le fluage, cas des déplacements à grande échelle tels que des ruptures profondes.

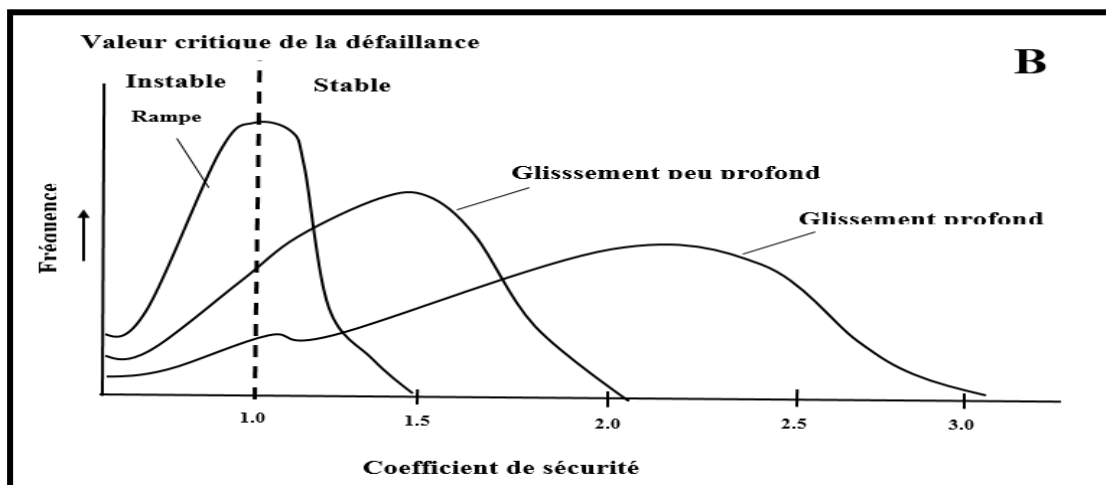


Figure 1.6. Courbe de distribution de probabilité de facteur de sécurité (Popescu, 2002)

Les trois étapes de stabilité fournissent un cadre utile pour comprendre les facteurs qui causent le glissement des terrains et en les classant en deux groupe sur base de leurs fonctions :

- ✚ Facteurs de causalité préparatoires qui rendent la pente sensible au mouvement sans réellement l'initier et tendant ainsi à placer la pente dans un état marginalement stable ;
- ✚ Déclenchement des facteurs causaux qui initient le mouvement ; les facteurs causaux déplacent la pente d'un état marginalement stable à un état activement instable.

1.2.3. FACTEURS CAUSAUX DE GLISSEMENT DES TERRAINS

Un facteur causal particulier peut remplir l'une ou les deux fonctions, selon son degré d'activité et la marge de stabilité. Bien qu'il soit possible d'identifier un seul processus de déclenchement, une explication des causes ultimes d'un glissement de terrain implique invariablement un certain nombre d'étapes préparatoires, condition et processus de déstabilisation qui peuvent être regroupés en processus à évolution lente (par exemple, altération, érosion) et processus à évolution rapide (par exemple, tremblement de terre, rabattement). Dans la recherche des causes des glissements de terrain, l'altération se concentre souvent sur les processus au sein du système de pente, qui provoquent le plus grand taux de changement. Bien que les changements lents agissent sur une longue période de temps pour réduire le rapport résistance/contrainte de cisaillement, un changement rapide peut souvent être identifié comme ayant déclenché le mouvement.

Cependant, l'évaluation des causes de glissement des terrains étant complexe et que le glissement des terrains sont complexes, le glissement de terrain ne sont pas toujours étudiés dans les moindres détails, il semble raisonnable d'adopter un système de classification simple des facteurs qui causent le glissement des terrains. L'approche opérationnelle de la classification de glissement des terrains proposée par le groupe de travail WP/WLI sur les causes des glissements de terrain (WP/WLI, 1994) est destinée à couvrir la majorité des glissements de terrain. Elle implique la prise en compte des données disponibles provenant d'une simple enquête de site et des informations fournies par d'autres observations de site. Les facteurs causaux des glissements de terrain sont divisés en fonction de leur effet (préparatoire ou déclencheur) et de leur origine (conditions du sol et processus géomorphologiques, physiques ou anthropiques). Les conditions du sol peuvent ne pas avoir de fonction de déclenchement, tandis que toute condition de sol ou processus peut avoir une fonction préparatoire.

Tableau 1.3. Bref liste des facteurs causaux de glissement des terrains (WP/WLI, 1994)

| Condition du terrain | Processus géomorphologique | Processus physique | Pro |
|---|---|--|------|
| (1) Matériau plastique faible | (1) Soulèvement tectonique | (1) Pluies intenses et de courte durée | (1) |
| (2) Matériau sensible | (2) Soulèvement volcanique | (2) Fonte rapide de la neige profonde | (2) |
| (3) Matériau pliable | (3) Rebond glaciaire | (3) Précipitations élevées prolongées | (3) |
| (4) Matériau patiné | (4) Erosion fluviale au pied de talus | (4) Rabattement rapide à la suite d'inondations, des hautes ou de rupture de barrages naturels | (4) |
| (5) Matériau cisailé | (5) Erosion par les vagues du pied de talus | (5) Tremblement de terre | (5) |
| (6) Matériau joint ou fissuré | (6) Erosion glaciaire du pied de talus | (6) Eruption volcanique | (6) |
| (7) Discontinuités de masses mal orientées (y compris la stratification, schistosité, clivage) | (7) Erosion des marges latérales | (7) Franchissement des lacs de cratère | (7) |
| (8) Discontinuités structurelles mal orientées (y compris les failles, discordances, cisaillements de flexion, contacts sédimentaires) | (8) Erosion souterraine (solution tuyauterie) | (8) Dégel du pergélisol | (8) |
| (9) Contraste de perméabilité et ses effets sur les eaux souterraines, contraste de rigidité (matériau rigide et dense sur matière plastique) | (9) Charge dépôt du talus ou de sa crête | (9) Intempéries au gel ou dégel | (9) |
| | (10) Enlèvement de la végétation (par érosion, incendie de forêt, sécheresse) | (10) Rétrécissement et gonflement des sols expansifs | (10) |

Le tableau (1.1) est une courte liste de contrôle des facteurs causaux des glissements de terrain classés en quatre groupes pratiques selon les outils et procédures à la documentation.

Les conditions du sol ou les caractéristiques des matériaux et de la masse du sol peuvent être cartographiées à la surface du glissement de terrain et du sol environnant et explorées dans le sous-sol par forage, creusement de tranchées et galeries. Les caractéristiques mécaniques peuvent être déterminées par des essais.

Les processus géomorphologiques ou les changements dans la morphologie du sol, peuvent être documentés par des cartes préexistantes, des photographies aériennes, des relevés du glissement de terrain ou une observation minutieuse au fil du temps par la population locale.

Les processus physiques concernent l'environnement et peuvent être documentés sur le site par instruments, tels que les pluviomètres, sismographes ou piézomètres. Les observations locales sur le temps des puits d'eau ou les dommages causés par les tremblements de terre peuvent être des substituts.

Les processus créés par l'homme peuvent être documentés par des observations de site et à partir de la construction ou registres de fouilles sur le site.

1.3. CAUSES DES GLISSEMENTS DE TERRAIN

Bien qu'il existe plusieurs types de causes de glissement des terrains, les trois qui causent la plupart des glissements de terrain dommageables dans le monde. (Varnes, Adapted from July 2004)

1.3.1. EAU

La saturation des pentes par l'eau est la principale cause des glissements de terrain. Cet effet peut se produire sous la forme de pluies intenses, de fonte des neiges, de changements dans les niveaux des eaux souterraines et de changements de niveau d'eau le long des côtes, des barrages en terre et des rives des lacs, des réservoirs, canaux et rivières.

Les glissements de terrain et les inondations sont étroitement liés car tous deux sont liés aux précipitations, aux ruissellement et à la saturation du sol par l'eau. De plus, les coulées de boue se produisent généralement dans de petits chenaux abrupts et sont souvent confondues avec des inondations ; en fait, ces deux événements se produisent souvent simultanément dans la même surface.

1.3.2. ACTIVITES SISMIQUES ET VOLCANIQUES

De nombreuses zones montagneuses vulnérables aux glissements de terrain ont également connu des taux de tremblements de terre au moins modérés à l'occurrence dans les temps enregistrés. L'occurrence de tremblements de terre dans des zones sujettes aux glissements de terrain escarpés augmente considérablement la probabilité que des glissements de terrain se produisent, en raison des secousses du sol seul ou de la dilatation causée par les secousses des matériaux du sol, ce qui permet une infiltration rapide de l'eau.

Les glissements de terrain dus à l'activité volcanique sont parmi les types les plus dévastateurs. La lave volcanique peut faire fondre la neige à un rythme rapide provoquant un déluge de roches, des sols, de cendres et d'eau qui accélère rapidement sur les pentes abruptes des volcans, dévastant tout sur son chemin. Ses coulées volcaniques (également appelées l'Avars) atteignent des grandes distances, une fois qu'elles quittent les flancs du volcan, et peuvent endommager les structures dans les zones plates entourant les volcans.

1.3.3. ACTIVITES HUMAINES

Il y a plusieurs facteurs Humains qui contribuent à la manifestation des glissements. Parce que la croissance de population et de plus en plus sur des nouvelles terres avec les créations des villes, cette urbanisation et développement grossissent le danger de nombreux types de catastrophes, l'une de ces catastrophes est la diapositive des pentes.

Les activités humaines peuvent résulter d'une modification de la morphologie de la pente ou la forme du sol : illustrations inclure pentification de la pente ou l'affaiblissement du pied ; et créer des fissures au cours de l'excavation ou la déforestation.

D'autres causes sont associées à une charge supplémentaire qui peut être à court terme, tels que le passage des véhicules, des vibrations des machines ou peuvent être permanentes, par exemple la construction d'un bâtiment. Des pentes instables peuvent également se produire par des causes dues à d'autres activités humaines liées à l'eau, tels que les fuites des tuyaux ; la création ou le drainage des réservoirs ; modèles de drainage inquiétants ou variables, et l'arrosage des pelouses.

1.4. INDICE ET PHENOMENES INDUITS PAR LES GLISSEMENTS DE TERRAIN

Les glissements de terrain se caractérisent par des phases d'activité variables : des périodes de vitesse de glissement plus élevée avec des phases de calme apparent.

1.4.1. GLISSEMENT DE TERRAINS ACTIFS

Un glissement de terrain est considéré comme actif si un mouvement peut être constaté. Le déplacement peut être minime, les déformations de moins d'un millimètre étant toutefois difficilement détectables. Les glissements actifs comprennent les glissements présentant des vitesses plus ou moins constantes à long terme tout comme les glissements avec des phases successives d'accélération.

1.4.2. GLISSEMENTS DE TERRAINS REACTIVES

Ils désignent les glissements de terrain qui quittent une phase inactive pour entrer dans une phase active. Habituellement, les glissements de terrain réactivés se déplacent le long d'une surface de glissement existante.

1.4.3. GLISSEMENTS DE TERRAINS INACTIFS

Désignent les glissements de terrain restés immobiles pendant plusieurs années. Ceux-ci se subdivisent en quatre catégories :

- Glissements bloqués.
- Glissements latents.
- Glissements abandonnés.
- Glissements stabilisés.

1.5. ÉVALUATION ET SURVEILLANCE D'INSTABILITE DES PENTES

Dernièrement les méthodes de surveillance et les méthodes de contrôle ont reçu une attention mondiale par rapport aux techniques anciennes. Il existe des méthodes et des techniques nombreuses attribuées sur les manières des surveillances des glissements de terrain. Les méthodes courantes sont la méthode macro géologique de surveillance, la méthode GPS, etc. L'ensemble de ces nouvelles techniques interviennent pour gagner du temps et pour réaliser la surveillance automatique à long terme dans une large gamme. Cependant certaines techniques sont justes au démarrage ou phase de test, ont également de nombreuses lacunes. Il est clair que la condition première et essentielle pour évaluer la stabilité des pentes c'est la compréhension des transformations mécaniques qui conduisent ou peuvent conduire à des mouvements ou rupture. Il y a des développements récents importants, en particulier sur les méthodes des surveillances et des techniques d'enquête sur les pentes et des technologies pour améliorer la sécurité des pentes ; entre autres je cite (Lynda, 2013) :

- L'émission acoustique
- L'extensométrie
- L'inclinométrie
- L'interférométrie
- Laser
- La météorologie
- La photogrammétrie
- La piézométrie
- Le Radar
- La topographie

1.5.1. QUELQUES DEFINITIONS (Lynda, 2013)

Le mot « surveillance » est souvent pris au sens large et recouvre différentes notions. Celles-ci diffèrent par leurs objectifs et leurs implications (tels que l'observation, le suivi, l'auscultation, la surveillance, la détection...). Afin d'éviter toutes ambiguïtés et confusions, nous définissons en détails ces différents concepts :

1.5.1.1. Auscultation

L'auscultation représente l'ensemble des investigations, des méthodes et des moyens mis en œuvre sur un site visant à étudier et caractériser le phénomène et les mécanismes mis en jeu. L'objectif principal de cette investigation est l'étude phénoménologique du mouvement. Les moyens mis en œuvre doivent être adaptés à la recherche des données nécessaires à la définition et à l'analyse des mécanismes de déformation du site. L'exploitation (traitement) des données récupérées est faite à temps différé.

1.5.1.2. Observations

La mise en observation constitue souvent une étape préparatoire permettant de confirmer l'instabilité des versants étudiés ou l'intensité du risque à prendre en considération. Elle repose sur la définition de témoins s'appuyant sur des indices naturels visibles sur des photographies multi dates ou reconnus sur le site (fissures, affaissements, arbres inclinés ou tordus, ...) ou artificiels (pilonnes électriques inclinés, suivi topo-métrique de repères implantés dans le site instable, ...) permettant la mise en évidence de l'évolution, de l'activité et de la cinématique du mouvement au cours du temps.

1.5.1.3. Suivi

Il s'agit d'un examen périodique du site avec recueil de données quantitatives et qualitatives caractérisant son évolution. Les témoins ou les variables d'évolution peuvent être de même nature que pour la mise en observation. Cependant, les moyens mis en œuvre sont à la fois plus importants, plus complexes et mieux ciblés car la situation de risque confirmé justifie une prise en compte effective. Techniquement, les méthodes et les moyens mis en œuvre peuvent être proches de ceux correspondant à la surveillance. Ils en diffèrent essentiellement par l'absence de contrainte directe de gestion de la sécurité. Cette technique impose une fréquence de mesure régulière et une exploitation régulière des informations permettant d'actualiser la situation du site dans les délais compatibles.

1.5.1.4. Surveillance

La surveillance consiste à recueillir, exploiter et interpréter périodiquement des données quantitatives et qualitatives caractérisant l'état d'un site ou son évolution (évolution des fissures, les déplacements en surface, les déplacements en profondeur, les types de désordres dans les ouvrages, ...), ayant comme objectif la gestion de la sécurité. Vue l'importance du facteur temps dans la gestion de ces mouvements et tenant compte de l'évolution du mouvement (évolution vers la stabilité ou vers des mouvements accélérés), de l'étendue et l'importance du mouvement ainsi que de ses enjeux, des caractéristiques du site et du degré de sécurité recherché. Plusieurs types de surveillance peuvent être définis (surveillance périodique pour des mouvements évoluant lentement, surveillance permanente discontinue, surveillance continue, surveillance à temps réel).

La surveillance doit prendre en compte les alertes techniques (elles concernent l'état de fonctionnement du dispositif de surveillance) et les alertes opérationnelles (correspondant à un ou plusieurs dépassements de seuils fixés pour les variables de surveillance).

1.5.1.5. La détection

Il s'agit d'un recueil et traitement des variables liées à l'aléa étudié (déplacements, ouverture des fissures, effet de la pluviométrie, affaissements, ...) caractérisant un état de risque. L'objectif principal de cette technique est la reconnaissance immédiate d'une situation typique à un danger particulier (dépassement d'un seuil critique) pris en compte dans un système d'alerte permettant ainsi l'activation de l'alerte et du plan d'action définis pour cet état de risque.

1.5.2. EVALUATION DE LA STABILITE DES PENTES EN PRATIQUE

L'évaluation de la stabilité des pentes est difficile et nécessite d'ingénieur en géotechnique expérimenté. Les étapes principales sont les suivantes : travail de bureau préliminaire, visite de site, l'évaluation qualitative de la stabilité, l'enquête, l'évaluation quantitative de la stabilité, caractérisation après la rupture, et gestion des options (Picarelli, 2012).

1.5.2.1. Travail de bureau préliminaire

L'évaluation de la stabilité de pente commence généralement par un travail préliminaire de bureau. À cette étape, nous recherchons :

- Une idée générale de la géologie du site ainsi que les caractéristiques géologiques et géomorphologiques.
- La géométrie de la pente (hauteur, l'inclinaison de profil) et, éventuellement, des modifications de la géométrie dues à l'activité humaine et / ou l'érosion.
- Les eaux de surface (mares, drainage, etc.)
- Données préliminaires régionales et locales des modèles hydrogéologiques.
- Types de glissements de terrain qui se sont produits ou se produisent sur le site et dans le voisinage, et, si l'information est disponible, de leurs caractéristiques (type et l'étape de mouvement, la géométrie, la régression ; la distance d'arrêt).
- Les hypothèses sur les causes possibles de mouvements.
- Indicateurs et les preuves de mouvement, preuve de glissements de terrain, des preuves antérieures de l'érosion au pied, la présence de fissures, de la végétation, la présence de débris, etc.
- Les conditions climatiques locales et sismiques.

1.5.2.2. Les documents qui peuvent être pris en compte

Sont :

- Si disponible, cartes de zonage ;
- Données historiques : les rapports de témoins, les archives, les journaux, etc.
- Les photographies aériennes du site et de ses environs à différents moments d'observations stéréographiques. Leur comparaison peut montrer l'évolution de la pente (érosion au niveau des orteils, surcharge dans la partie supérieure, les changements de la végétation, etc.) ;

- Les cartes géologiques et géomorphologiques.
- Les conditions climatiques (précipitations notamment).
- Des études antérieures dans la région (forages existants et des sondages ; laboratoire et des essais in situ, observations de la pression interstitielle dans les puits, des tubes ou des piézomètres ; modélisation hydrogéologique ; précédentes évaluations de la stabilité de pente.

1.5.2.3. Visite du site

L'étude préliminaire de bureau en cours d'achèvement, une visite des sites est obligatoire. Il existe un certain nombre d'aspects à rechercher ou à examiner :

- Localisation du site dans son géomorphologique et son environnement climatique.
- Les caractéristiques géomorphologiques du site.
- L'histoire récente du site, y compris les changements dans le drainage de surface et de la géométrie. Les discussions avec les voisins et les propriétaires sont souvent utiles.
- Preuves de processus géologiques tels que les glissements de terrain ou d'érosion sur le site et dans le voisinage. Les caractéristiques des glissements de terrain dans le voisinage de la pente (distance type, régression et le voile des débris) doivent être documentés. Les caractéristiques de l'érosion, le cas échéant, (lieu, brutalité et la hauteur de la zone érodée) doivent être également documentés.
- Les preuves de stabilité précaire et mouvements : fissures ouvertes, des fissures et cisailles, des déplacements verticaux éventuellement ; preuves de déplacements ;
- Type de végétation ; s'il y a des arbres, décrire le type, l'âge approximatif (possibilité d'utiliser la dendrochronologie).
- Accéder au site pour une investigation in situ.
- Emplacements pour les sondages, forages et les instruments tels que les piézomètres, inclinomètres, etc.
- Identification des problèmes potentiels qui pourraient survenir au cours de l'étude.
- La visite du site doit être documentée dans sous-rapport préliminaire.

1.5.2.4. *Evaluation de la stabilité qualitative*

D'enquête et d'instrumentation : Cette enquête et/ou investigation doit viser à définir les caractéristiques de la pente (en particulier les facteurs potentiels de prédisposition), les caractéristiques des géo-matériaux et les conditions hydrogéologiques impliquées. Elle peut également aider avec certains instruments, à spécifier les caractéristiques du mouvement (par exemple l'existence d'une défailance de surface ; la vitesse de déplacement) et les variations dans les conditions de l'eau interstitielle.

1.6. TECHNIQUES ET MOYEN DE CONFORTEMENT

Dans la majorité des cas, l'étude d'un glissement de terrain conduit à définir une solution confortative et à exécuter des travaux de stabilisation. Cette solution doit tenir compte de la faisabilité des travaux liée à :

- L'investissement consenti
- L'accessibilité du site
- La période de l'année choisie pour l'exécution des travaux
- La cinématique du glissement

Les techniques de stabilisation peuvent être regroupées en quatre grandes familles :

- Les terrassements : actions sur la géométrie et l'équilibre des masses
- Les drainages : actions sur le régime hydraulique et les pressions interstitielles
- Les renforcements : renforcements mécaniques
- Les protections superficielles (végétalisation, plantation, etc.).

1.6.1. STABILITE PAR TERRASSEMENT

Les conditions de stabilité étant directement liées à la pente du terrain, le terrassement reste le moyen d'action le plus naturel. On peut distinguer trois groupes de méthodes de stabilisation par terrassement :

- Les conditions sur l'équilibre des masses (allègement en tête et butée en pied)
- Les actions sur la géométrie de la pente (purge et reprofilage)
- Les substitutions partielles ou totales de la masse glissée (bêches, contreforts, masques, éperons).

1.6.1.1. Butée de pied et allègement en tête

Le chargement en pied ou le déchargement en tête d'un glissement sont des techniques généralement efficaces, qui sont très fréquemment utilisées

a) Butée de pied

Le chargement en pied (ouvrage de butée, également appelé banquette dans certaines configurations) agit de deux manières : d'une part, il équilibre les forces motrices et d'autre part, il permet de contenir les déplacements de la masse instable.

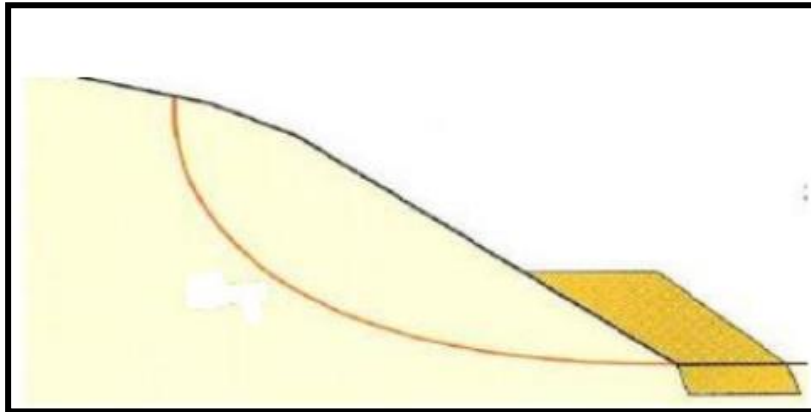


Figure 1.8. Schéma de la solution butée de pied (Hakima DAHMANI, 2013)

La stabilité au grand glissement suppose deux vérifications :

- L'ouvrage de butée doit limiter les risques de reprise du glissement en amont
- L'ouvrage de butée ne doit pas déclencher d'autres glissements, par exemple à l'aval.

b) Allègement en tête

L'allègement en tête de glissement consiste à venir terrasser le matériau dans la partie supérieure. Il en résulte une diminution du poids moteur et par conséquent, une augmentation du coefficient de sécurité. La méthode de dimensionnement consiste en un calcul de stabilité long de la surface de rupture déclarée en prenant en compte la modification de géométrie en tête. (Gilles. S, Pierre.P.1998).

Le déchargement par terrassement du sommet de la masse glissée, telle qu'il apparaît dans la figure, peut créer des risques de régression des désordres vers l'amont à court ou long terme.

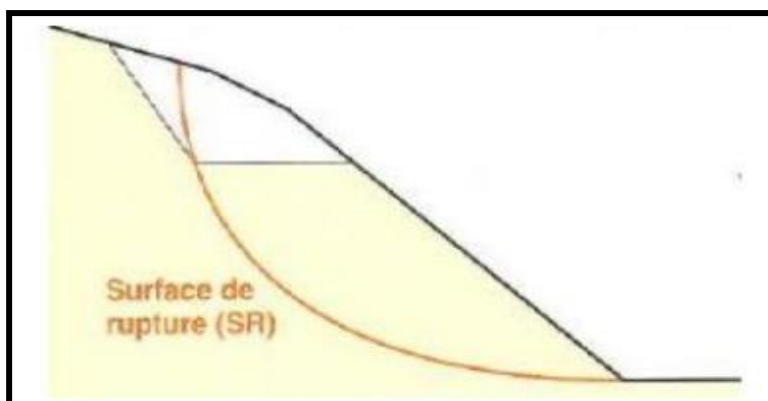


Figure 1.9. Schéma de la solution de l'allègement en tête (Hakima DAHMANI, 2013)

1.6.1.2. Substitutions (bêches, contreforts, masques et éperons)

La solution a priori la plus simple pour traiter un glissement est d'éliminer la masse glissée en tout ou partie, est de reconstituer le talus à l'aide d'un matériau frottant de bonne qualité, qui assure, le plus souvent, un drainage en plus de son action mécanique.

a) Substitution totale des matériaux glissés

La substitution totale consiste à venir purger l'ensemble des matériaux glissés et à les remplacer par un matériau de meilleure qualité.

Cela permet de reconstituer le profil du talus initial. La substitution de matériaux glissés suppose que l'on prenne un certain nombre de précautions :

- Reconnaître à l'avance le volume de matériaux concernés.
- Excaver plus profondément la surface de rupture sous peine d'inefficacité totale.
- Assurer un bon accrochage entre le substratum et le massif de sol d'apport ; une purge parfaite des matériaux glissés et la réalisation de redans donnent généralement satisfaction.
- Prévoir un drainage correct du massif de substitution et un exutoire.
- Vérifier que les phases dangereuses des travaux sont prises en compte dans le processus d'exécution et que l'on ne risque pas d'engendrer une régression des désordres.

b) Substitution partielle des matériaux glissés

- **Bèche**

Une bèche est une fouille réalisée en partie basse du glissement et sur toute sa largeur, remblayée par des matériaux frottant et drainant. Elle permet de reporter une partie de la charge sur un

horizon plus compact (substratum). L'ancrage de la bêche ne doit pas être inférieur à 1 m. Les dimensions courantes d'une bêche sont :

- 4 à 10 m de largeur et 2 à 5 m de profondeur.

Elle permet de transmettre la surcharge du remblai au substratum et si un exutoire peut être trouvé, elle peut constituer un drainage à l'aval du glissement.

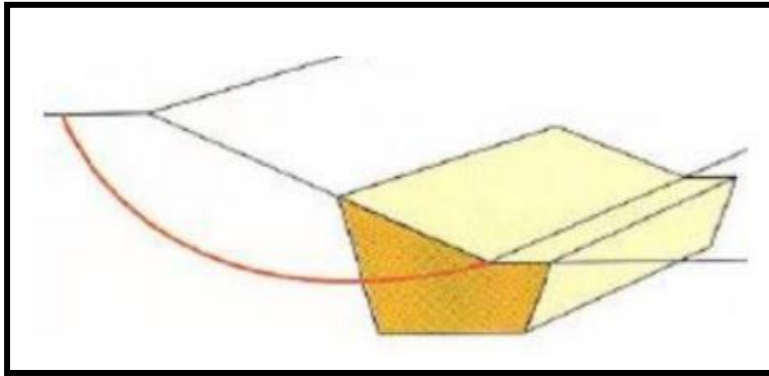


Figure 1.10. Schéma d'une bêche (Hakima DAHMANI,

- **Contreforts**

On appelle contrefort, une bêche discontinue. Les contreforts sont souvent reliés par des tranchées drainantes. Elles-mêmes reliées vers un exutoire. Les dimensions d'un ensemble de contreforts doivent être optimisées sur la base d'un calcul de stabilité le long de la surface de glissement existante. (Gilles. S, Pierre.P.1998).

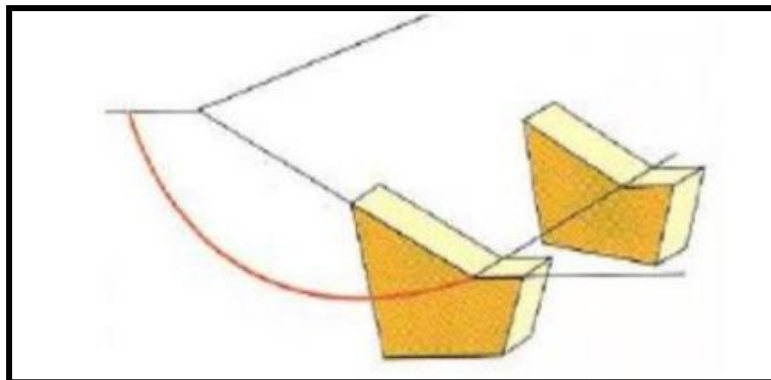


Figure 1.11. Schéma de contrefort (bêche discontinue) (Hakima DAHMANI, 2013)

- **Masque drainant**

Les masques drainants sont des ouvrages en matériaux granulaires frottant, très perméables mis en œuvre en parement de talus. Le masque drainant remplit deux fonctions,

Il permet d'annuler la pression interstitielle dans la portion correspondante de terrain et de rabattre la nappe et apporter un gain de stabilité.

Généralement, pour une meilleure efficacité, la largeur moyenne L , du masque doit être supérieure à la moitié de la hauteur H , du talus. Généralement, on limite la hauteur à environ 5 ou 6 m. (Gilles. S, Pierre.P.1998).

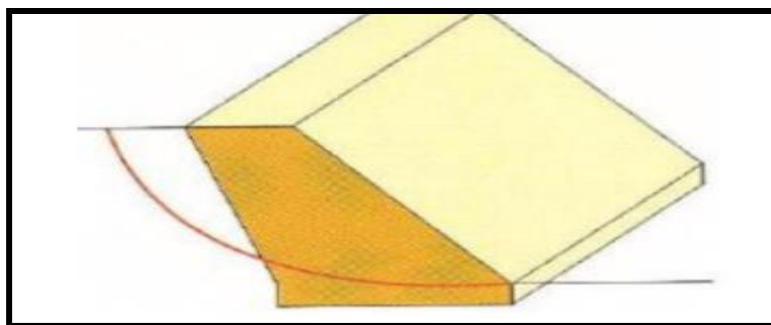


Figure 1.12. Schéma d'un masque drainant (Hakima DAHMANI, 2013)

- **Eperons drainants**

Les éperons drainants (masque discontinu) sont des saignées perpendiculaires au talus, assez profondes, régulièrement espacées et remplies de matériaux drainants et frottant. Les éperons drainants remplissent les mêmes fonctions qu'un masque drainant. Pour être efficaces, les éperons doivent entamer très profondément le talus (plusieurs mètres) et ne pas être trop espacés ($d = H$). Dans le cas de sols peu perméables ($k < 10$ m/s), la solution éperons drainants devient moins économique car il faut réduire l'espacement des éperons. (Gilles. S, Pierre.P.1998).

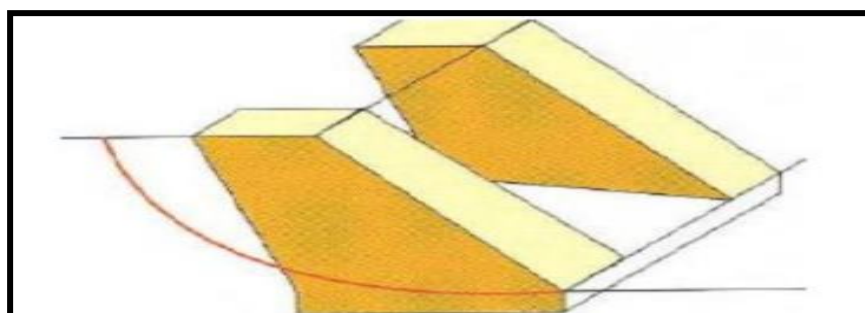


Figure 1.13. Schéma d'un éperon drainant (Hakima DAHMANI, 2013)

1.6.2. STABILITE PAR DRAINAGE

1.6.2.1. Drainage de surface

Le drainage de surface n'est rien d'autre que l'assainissement qui consiste en la mise en œuvre des moyens adaptés pour limiter les infiltrations dans le massif en mouvement et/ou de la zone sensible. Le drainage de surface est le moyen actif pour limiter le ruissellement et les

infiltrations d'eau dans le massif. Les ouvrages de collecte des eaux de surface sont principalement les cunettes, les fossés et les caniveaux. Leur dimensionnement relève de l'hydraulique de surface et leur implantation dépend des conditions géométriques du site. Ce sont des ouvrages fragiles et leur implantation doit se faire dans les zones de très faibles déformations.

1.6.2.2. *Tranches drainantes*

Les tranchées drainantes, sont des ouvrages couramment employés pour rabattre le niveau de la nappe. Elles sont implantées sur le site de façon à venir recouper les filets d'eau (linges de courant dans un horizon homogène, couche aquifère, venue d'eau ponctuelle... etc. Le choix de l'implantation (dans le sens de la plus grande pente ou dans un sens parallèle aux linges de niveau) dépend des résultats de l'étude et conditionne l'efficacité de la tranchée.

1.6.2.3. *Drains subhorizontaux*

Les drains subhorizontaux sont une technique utilisée dans de nombreuses configurations de glissement et dans de nombreuses formations géologiques. Cependant, dans les formations très peu perméables (sols fins), c'est une technique qui s'y prête mal car le rayon d'action des drains est très faible. Les drains subhorizontaux peuvent drainer des versants instables dans les cas suivants : Nappe de versant, Couches et poches aquifères, Circulations d'eau localisées (dans des fractures, dans des couches de faible épaisseur). La définition du système de drains est très empirique. Elle repose sur l'observation des débits d'exhaure, les diminutions des pressions interstitielles et des temps de réponse aux apports d'eau.

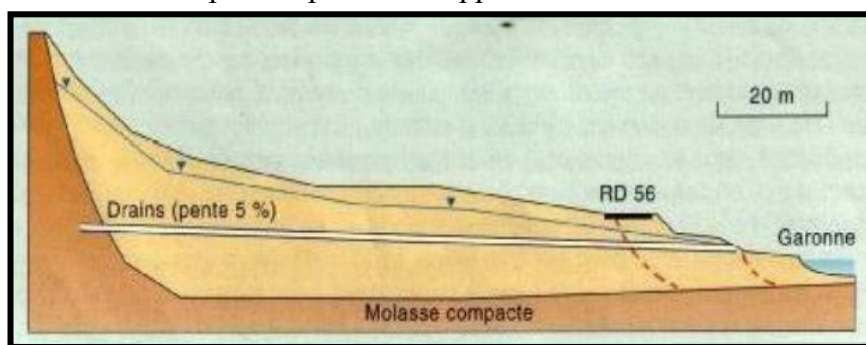


Figure 1.14. Illustration de drains subhorizontaux (Hakima DAHMANI, 2013)

1.6.3. STABILITE PAR RENFORCEMENT

Ce principe de renforcement des sols repose sur l'introduction dans le sol des inclusions, destinées à améliorer les caractéristiques mécaniques du sol. (Hubert.1979) Les renforcements par des éléments résistants sont classés en deux catégories :

- Les renforcements rigides : dans ce cas il s'agit d'un traitement homogène du sol qui se traduit par une augmentation de la densité. De la rigidité et de la cohésion ce genre de renforcement peut travailler suivant les types : en traction, en compression et en flexion. Il résulte une amélioration du taux de travail possible au niveau des fondations et une diminution des tassements.
- Les renforcements souples : il s'agit d'ajouter au sol des éléments de matière souple destinés pour permettre à l'ouvrage de résister à des sollicitations qu'il n'était pas en mesure de les supporter auparavant, ces renforcements travaillent généralement en traction comme les produits géo-synthétiques (les géotextiles, les géo-grilles, etc...).

1.6.3.1. Ouvrage de soutènement

Ces ouvrages fonctionnent comme des massifs poids. On les dimensionne en vérifiant la sécurité vis-à-vis de deux mécanismes de rupture : la rupture interne (la méthode de calcul dépend du type d'ouvrage et de la modélisation de l'interaction sol-structure) et de la rupture externe. L'ouvrage a une fonction locale, il protégé une route par exemple, mais il suit le mouvement et sa déformabilité lui permet de le faire sans grand dommage. Ces techniques, qui supportent des déformations du sol, sont couramment utilisées pour traverser des zones à évolution lente, impossible à arrêter au vu de leurs dimensions. Les calculs sont menés pour vérifier la stabilité interne et on vérifie que la stabilité générale n'est pas trop perturbée par la présence de l'ouvrage. La stabilité locale est en générale assurée par le caractère monolithique de l'ouvrage.



Figure 1.15. Illustration d'ouvrage souple (Hakima DAHMANI, 2013)

1.6.3.2. Tirants d'encrage actifs

Le principe consiste à réduire les forces actives du glissement et à accroître les contraintes normales effectives sur la surface de rupture. Pour ce faire, on ancre des tirants constitués de câbles d'acier multi torons dans le terrain stable situé sous la surface de rupture, et on applique

en tête un effort de traction. Cet effort peut être réparti sur la surface du terrain par l'intermédiaire de plaques ou de petits massifs en béton armé. Dans de nombreux cas, les tirants sont combinés à un mur ou à des longrines. Les ancrages sont efficaces dans :

- Des terrains naturellement cohésifs (argiles et silts à basse plasticité et donc peu déformables).
- Des terrains naturellement cimentés ou des sables et des graviers présentant une cohésion réelle (due à la fraction fine) ou apparente (fournie par l'humidité).
- Des roches disloquées.
- Des terrains situés au-dessus de roches de mauvaise qualité.

L'utilisation des ancrages n'est pas recommandée pour les interventions qui concernent la stabilisation des terrains meubles présentant un comportement cohésif. Technique réservée aux sites de faible extension et qui n'ont pas encore glissé. Elle est mal adaptée à la configuration des glissements de versants naturels lorsqu'elle est associée à des rideaux (palplanches, parois moulé) à cause des modifications apportées au champ des écoulements hydrauliques.



Figure 1.16. Illustration de tirants d'ancrage actif (Hakima DAHMANI, 2013)

1.6.3.3. Le clouage

C'est une technique qui consiste à renforcer des sols in situ par des barres passives. Ces barres peuvent être battues ou scellées dans des trous de forages. Elle est principalement développée dans deux domaines :

- Soutènement des excavations
- Stabilisation des pentes

Ces inclusions métalliques peuvent travailler aussi bien en traction, en flexion ou en cisaillement, suivant le type d'ouvrage.

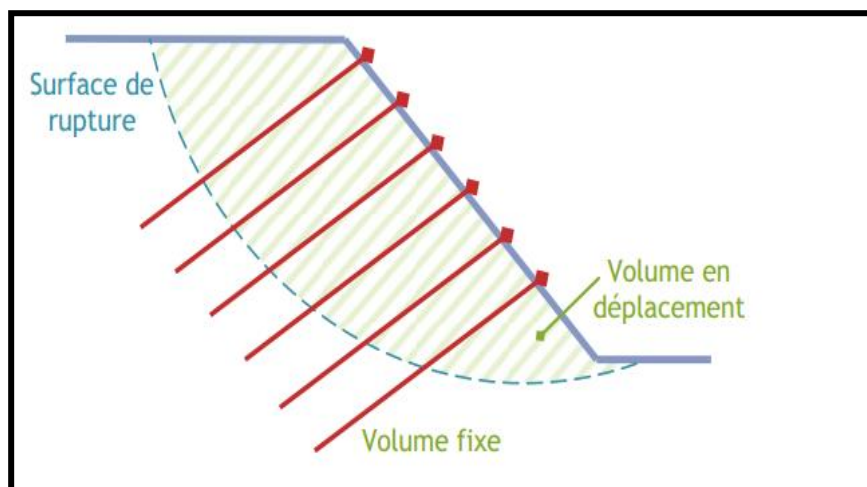


Figure 1.17. Illustration du principe de cloutage (Clément DESODT, 2017)

1.7. GLISSEMENT DE TERRAIN A Bukavu

La ville de Bukavu se trouve dans la branche Ouest de Rift est-africain sur les rives du lac Kivu en RD Congo. Cette région est naturellement disposée aux glissements de terrain. Le relief accidenté, le sol volcanique facilement altérable en argile, le climat, la sismicité la rend favorable aux mouvement de masse. Le peu d'études qui ont été récemment faites sur le sujet dans la région montrent que les conséquences de ces glissements s'expriment en pertes en vies humaines, des dommages ou pertes des bâtiments et pertes de terres agricole notamment.

La ville de Bukavu est traversée par une vallée probablement d'origine tectonique (micrograbens) orientée N-S qui s'étire dans la lithologie de compositions chimique différentes. Les roches précambriennes sont couvertes d'épaisses coulées de laves du tertiaire et du quaternaire. Le climat est pluvieux et tempéré par l'altitude avec une saison sèche du juin à août. (MOEYERSON, 2004) Montre que plus de 15% de la surface totale de la ville est couverte par des glissement de terrain, illustre sur la figure (1.18). L'occurrence des plus grands glissements pourrait être liée à l'activité sismo-tectonique comme le suggère leur distribution par rapport à la structure de failles. La morphologie (relief accidenté), la géologie (failles, formation argileuses), le climat (humidité) et la localisation (dans le rift) la rendent favorable aux glissements de terrain.

Aucune date n'existe quant à l'occurrence des glissements dans la ville, mais leur présence est antérieure au développement colonial comme le révèle l'analyse de photographies aériennes prises dans les années 50 (Clarisse BALEGAMIRE, 2017).



Figure 1.18. Cartographie illustrative de glissement des terrains à Bukavu (Clarisse BALEGAMIRE, 2017)

La ville de Bukavu regorge plusieurs glissements de terrain comme illustré sur la figure (1.18), le plus connus grâce à leurs ampleurs sont :

- Le glissement de terrain de FUNU
- Le glissement de terrain de NYKAVOGO
- Le glissement de terrain d'ITFM

1.7.1. LE GLISSEMENT DE TERRAIN d'ITFM Karhale

Les observations et descriptions de terrain ont été essentiellement faites sur les phénomènes observés à l'ITFM sur la forte pente observée à l'Est des bâtiments de cette institution. Ces phénomènes sont situés à $2^{\circ} 30' 18''$ de latitude Sud et $28^{\circ} 50' 43''$ de longitude Est à une altitude de 1665m. Deux phénomènes d'instabilité sont observés dans la zone d'étude : le ravinement et le glissement de terrain.

Les instabilités de l'ITFM sont traduites par une ravine active développant depuis octobre 2017 à sa tête un glissement de terrain de type rotationnel. Un sol argileux rouge et par endroit

blanchâtre sont à observer dans cette ravine. Il s'agit d'une ravine en V qui déstabilise tout ce qui se trouve sur ses berges. Les sources d'alimentation de cette ravine sont des eaux de ruissellement provenant de camp Mweze et de la concession de l'ITFM. De part et d'autre de cette ravine, se développent des constructions exposées à la fois à l'activité de la ravine et à l'action de la pente.

Le glissement de terrain observé à la tête de cette ravine est du type rotationnel dont l'escarpement principal (corps du glissement) est d'une hauteur comprise entre 15 et 20 m et est composé des nitisols et régolithes provenant de l'altération des formations volcano-sédimentaires. On y observe également quelques coulées des débris qui ne laissent pas à la végétation l'occasion de s'y développer : c'est l'une des preuves de son état actif.

En amont de cet escarpement quelques fractures marquant des prochains mouvements sont observées.

Dans la masse déplacée (niche de glissement), un replat à contre-pente est observé après l'escarpement principal : ce qui témoigne du caractère rotationnel du glissement de terrain. La végétation dans ce replat est du type herbacé. On y observe également des troncs d'arbres découpés inclinés vers l'escarpement principal à la suite du mouvement rotationnel. Ces troncs d'arbres sont des vestiges du mouvement principal dans ce glissement. Ce replat est la zone de contact entre le glissement de terrain et la nouvelle tracée de la ravine.



Figure 1.19. Corps de glissement



Figure 1.20. Niche de glissement

CONCLUSION

Tout au long de ce chapitre nous sommes attelés à regrouper les différentes théories développées qui traitent de phénomène de glissements de terrain et tout ce qui en découle dans un cadre bien défini. Ont été présentés la définition de glissement de terrain, leurs descriptions en identifiant et différenciant les types de glissements de terrain avec recensement des causes et des facteurs causaux ; les types et quelques techniques d'évaluation de la stabilité des pentes en pratique. Nous avons présenté les techniques et moyen de confortement de glissement de terrain et enfin la description de l'instabilité sur le versant de l'ITFM Karhale.

chapitre 2. MATERIELS ET METHODES

INTRODUCTION

L'étude de glissement de terrain implique la reconnaissance du site et l'identification des caractéristiques mécaniques et physiques du sol et enfin l'analyse de facteur causant le mouvement. Elle consistera par la suite à choisir le moyen le plus adéquat pour résoudre le problème posé. Ce chapitre présente le milieu d'étude, entre autres ses contextes géographique et climatique, il présente par la suite les essais qui seront effectués sur les matériaux et quelques techniques d'évaluation des pentes instables.

2.1. PRESENTATION DU MILIEU D'ETUDE

Cette partie présente le milieu d'étude, sa localisation, son climat et sa végétation, son hydrographie, sa géomorphologie et en fin sa géologique.

2.1.1. LOCALISATION

La ville de Bukavu, chef-lieu de la province du Sud-Kivu, est située à l'Est de la République Démocratique du Congo, entre 2° 31' de latitude Sud et à 28° 50' de longitude Est et est séparée du Rwanda par le lac Kivu (1460 m d'altitude) et la rivière Ruzizi.

Administrativement, elle est subdivisée en trois communes : Banda, Kadutu et Agira (Figure 2.1). La zone d'étude est localisée dans la commune de Kadutu, quartier Nkafu.

Elle est limitée :

- Au Nord par la bifurcation de la route menant vers le site universitaire de Karhale et celle menant vers l'hôpital de Cirier à quelques mètres du centre SOSAM ;
- Au Sud par les escaliers reliant l'ITFM et le lycée Wima ;
- À l'Est par la route lycée Wima – Centre SOZAM
- Et à l'Ouest par la route ISTM – ITFM.

D'une superficie de 45 km², la ville de Bukavu a évolué assez rapidement du point de vue densité démographique sans que la planification urbaine ne suive son évolution. Tel que signalé dans la problématique. Ces dernières décennies il Ya eu une augmentation des catastrophes naturelles (risques hydro-climatiques et géomorphologiques) dans la région des grands lacs en général, en particulier dans la ville de Bukavu.



Figure 2.1. Carte administrative de Bukavu (Sadiki Nyanabo, 2010)

2.1.2. CLIMAT ET VEGETATION

La ville de Bukavu est dotée, de par son altitude variant entre 1500 et 2000m, d'un climat tropical humide avec une alternance de deux saisons : la saison sèche et la saison de pluies. La saison des pluies dure 9 mois, soit de septembre à mai. La saison sèche ne dure que trois mois, soit de juin à août alors. Les précipitations sont des paramètres qui agissent sur la formation tendre tel que les argiles. Ces derniers, très sensible à l'eau notamment lors de la période humide (septembre à mai) risquent de créer l'instabilité de la pente. La moyenne mensuelle maximale est de 206 mm/h tel que présenté sur la figure (2.2). On constate également que la ville de Bukavu et ses environs présentent à certains endroits des vestiges des forêts, et ces dernières ont été détruites par la pression démographique.

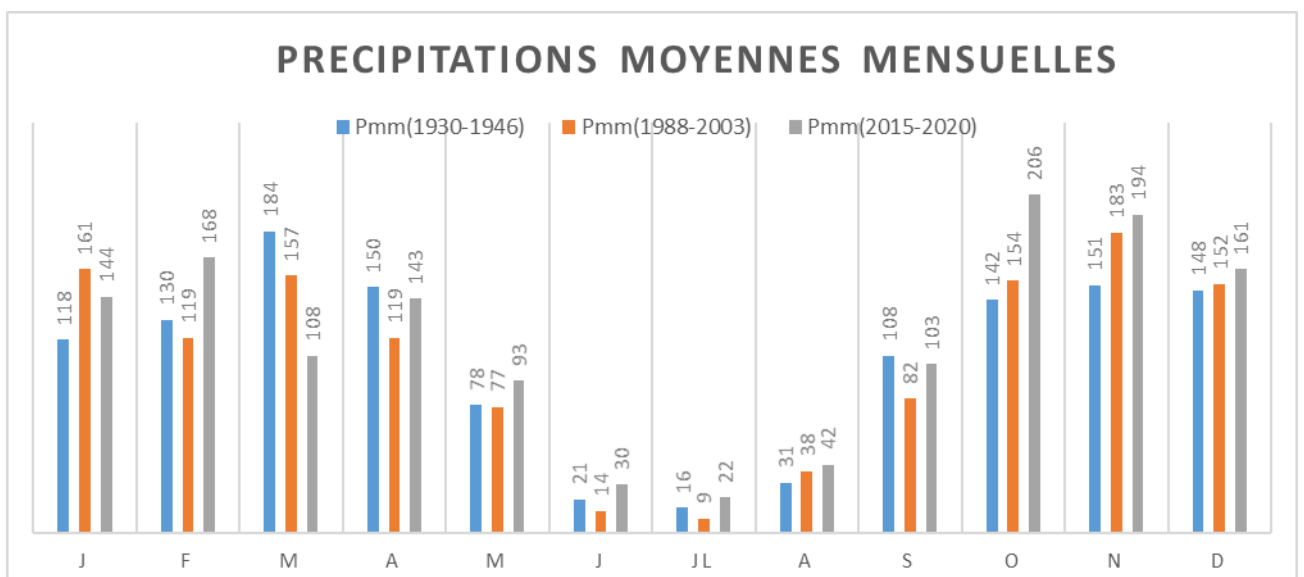


Figure 2.2. Comparaison des moyennes mensuelles de précipitation (1930-1946, d'après Buluto,1950), (1988-2003,station de Bukavu) et (2015-2020, station d'UOB)

2.1.3. HYDROGRAPHIE

D'orientation générale NESW, presque la totalité des cours d'eaux drainant la ville de Bukavu se concentrent dans la partie Ouest et sont la plupart des affluents du lac Kivu (Kawa, Bini, Nyamuhinga, Tchuma, Weshu,) (Ilunga, 1991) ; d'autres se jettent dans la rivière Ruzizi (Kamagama, Luganda, Mukukwe, ...) (Figure 2.3). Les rivières qui se jettent dans le lac Kivu connaissent des débits forts variables qui charrient d'importantes masses de terre provenant de l'érosion et des immondices. La rivière Kawa traverse la ville dans toute sa longueur avec un débit d'étiage de 1 à 2.2m³ /s tandis qu'elle atteint 14m³ cas de crue (Ndyababo, 2009).

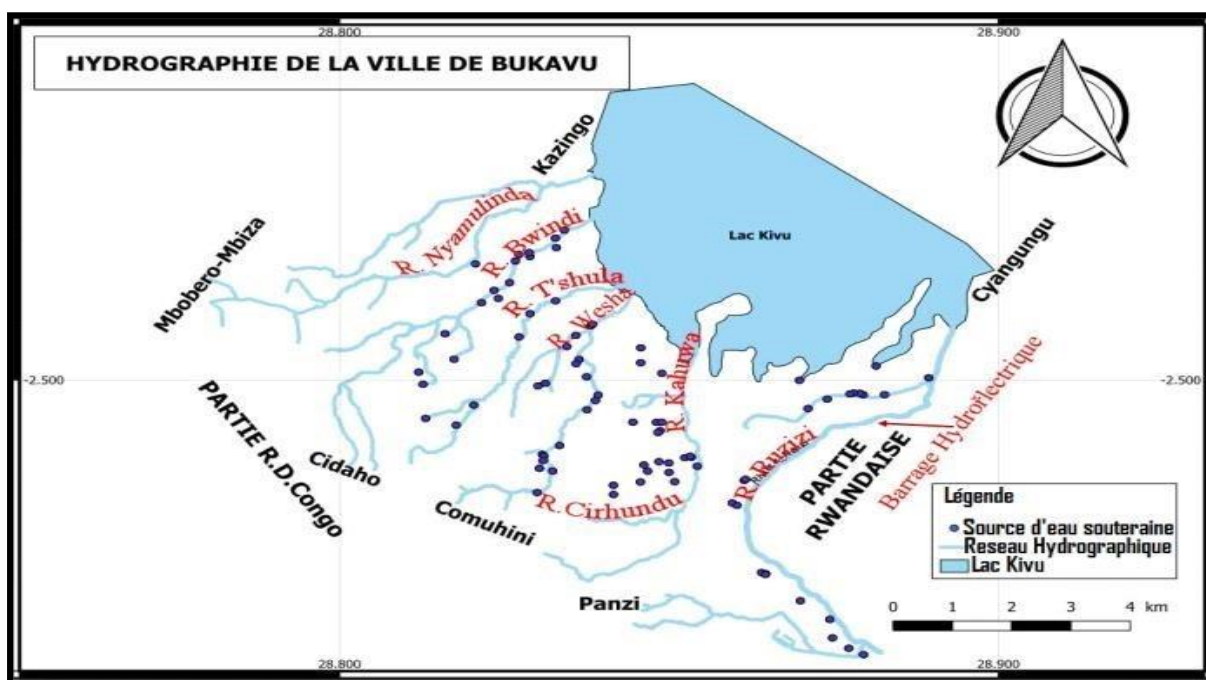


Figure 2.3. Hydrographie de la ville de Bukavu (Sadiki Nyanabo, 2010)

Du point de vue géomorphologique, quatre escarpements sont nettement visibles et dominant à l'échelle de la ville (Figure 2.4), à savoir :

- Le versant droit de la Ruzizi
- La colline de Karhale
- Le palier de Funu ;
- Le palier de Cimpunda ; mais aussi deux dépressions, le quartier industriel et la vallée sèche de Mukukwe.

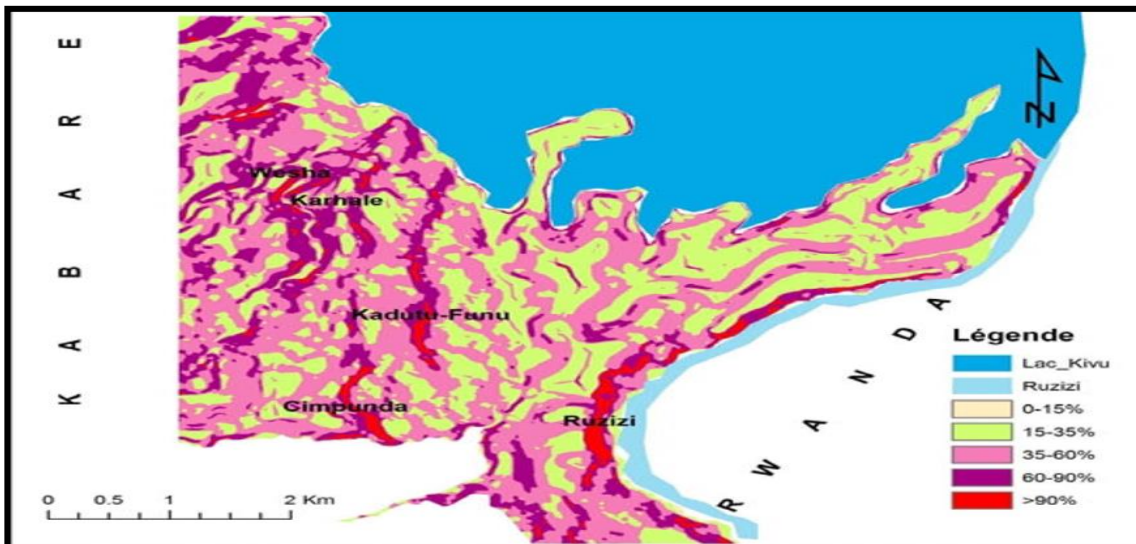


Figure 2.4. La géomorphologie de la ville de Bukavu (Sadiki Nyanabo, 2010)

2.1.5. APERÇU GEOLOGIQUE

2.1.5.1. La lithologie (MIRINDI, 2017)

Les type de formations géologiques affleurant à Bukavu et ses environs sont ceux précambriens et d'autres cénozoïques.

- ✚ Les formations précambriennes sont représentées dans la région de Bukavu par les roches magmatiques de la famille du granite (granite et pegmatites). Ces roches sont riches en silice et renferment le quartz, les felds path, les micas et d'autres minéraux alimino-silicatés, ainsi que des minéraux ferriques.
- ✚ A Bukavu les roches précambriennes sont recouvertes par les roches cénozoïques dont l'épaisseur semble dépasser 300m (A. MEYER 1954). Ces roches sont représentées par :
 - Les roches volcaniques (Basalte, trachyte) et pyroclastiques. Ces basaltes sont présents sous diverses teintes variant de gris sombre à violet, ils sont moins riches en SiO_2 soit 45 à 50 %. Les trachytes quant eux sont gris, généralement plus claires que le Basalte, ils sont riches en SiO_2 (55-60 %) et Al_2O_3 (17-21 %) et moins riche en FeO et CaO ; on le retrouve à Panzi et à Kadutu dans la carrière de Buholo
 - Les altérites, principalement argileux issues de la décomposition des roches volcaniques sont souvent remaniées par le ruissellement et par les mouvements de masse. Ces argiles sont les unes brunes et les autres rouges en fonction du degré d'altération (A. MEYER 1954). Dans notre secteur en étude, on constate la présence des argiles rouges.

2.1.5.2. *Stratigraphie (MIRINDI, 2017)*

De plus récente à plus anciennes, les roches cénozoïques de la ville de Bukavu peuvent être classées en six séries à savoir :

- La série d'alluvions récentes : elle est considérablement perturbée par les déformations tectoniques, notamment par les failles.
- La série d'altérites récentes : présentant principalement les argiles brunes.
- La série volcanique supérieure : constituée des basaltes de la hauteur du mont Bangwe et des autres plateaux.
- La série de volcanodétritique, qui est plus différenciée et dans laquelle on trouve les couches de panzi et la plupart de lits rouges :
- La série de graviers de terrasse
- La série volcanique inférieure caractérisée par la prédominance des roches saines (Basaltes, trachytes) et autres altérés en gris (parfois en jaune).

2.1.5.3. *La tectonique et la sismicité*

La ville de Bukavu est traversée par une vallée probablement d'origine tectonique (« micro graben ») orientée N-S qui s'étire dans des lithologies de compositions chimiques différentes. Les roches du Précambrien sont couvertes d'épaisses coulées de laves du Tertiaire et du Quaternaire. Les études démontrent que la région comporte des failles d'orientations différentes.

Ces failles dans la région ont contribué au modèle du relief typique de Bukavu avec des plateaux fortement disséqués et les effondrements des quartiers comme Mukukwe et Industriel. Ces failles dues aux mouvements tectoniques sont responsables des séismes.

Une simple observation du terrain montre que la zone de Kadutu est faite d'une série de blocs juxtaposés séparés par des parois à pentes raides, suggérant des escarpements de faille originelle. Trois grandes failles courbes normales de direction NE-SW y sont visibles. Il s'agit de l'Est vers l'Ouest, de la faille de la Kahwa, de la faille de Funu et de la faille de Cimpunda. Une coupe qu'Ilunga (1989) a établie et qui va de Karhale à la centrale hydroélectrique de la Ruzizi laisse voir, de l'Est vers l'Ouest, une morphologie en escalier des failles (N-S) faites de six (6) blocs (Figure 2.5). (Espoir mugisho, 2015)

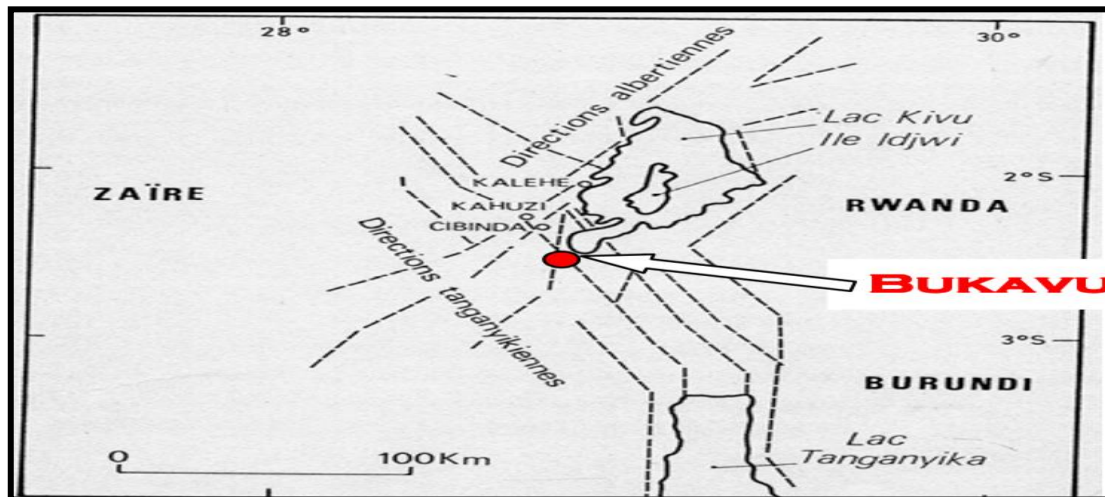


Figure 2.5. Morpho-tectonique de région du Kivu (Sadiki Nyanabo, 2010)

2.2. CARACTERISATION DU SOL

La caractérisation du sol de l'ITFM Karhale s'est effectuée premièrement dans le but de l'identifier afin d'évaluer dans la suite l'influence des différents paramètres notamment l'eau sur les propriétés du sol de l'ITFM Karhale et par la suite dans but de vérifier certains facteurs causaux liés au condition du terrain de l'ITFM Karhale.

2.2.1. DETERMINATION DE LA TENEUR EN EAU

La détermination de la teneur en eau s'est effectuée suivant l'essai normalisé.

2.2.1.1. But

La détermination de la teneur en eau a pour objectif d'évaluer l'eau que contient le sol en étude.

2.2.1.2. Principe

La détermination de la teneur en eau consiste à évaluer le rapport entre l'eau que contient le matériau et sa masse sèche.

2.2.1.3. Mode opératoire

La détermination de la teneur en eau s'effectue selon les prescriptions de la norme NF P94-050 et consiste à :

- Peser l'échantillon de sol humide, soit M_h
- Placer l'échantillon dans l'étuve à 105°C ou 60°C
- Après séchage à l'étuve, peser l'échantillon de sol sec, soit M_s
- En déterminer la teneur en eau W .

2.2.1.4. Matériels utilisés

Pour la détermination de la teneur en eau on a utilisé les matériels suivants :

- Les tares

- L'étuve
- Une balance de précision

2.2.1.5. Expression de résultats

La teneur en eau s'exprime en % et obtenu par la relation (2.1)

$$W = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100\% \quad (2.1)$$

Où

W : teneur en eau (%)

M_h : masse humide du sol (g)

M_s : masse sèche du sol (g)

2.2.2. DETERMINATION DE LA MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE DU SOL

2.2.2.1. But

La détermination de la masse volumique absolue du sol a pour objectif d'évaluer la masse du sol par unité de volume.

2.2.2.2. Principe

La détermination de la masse volumique absolue du sol consiste à évaluer le rapport de la masse du sol pour une unité de volume

2.2.2.3. Mode opératoire

La détermination de la masse volumique se fait par le pycnomètre suivant les prescriptions de la norme NF EN 1097-7 et consiste à :

- Introduire l'eau dans le pycnomètre jusqu'au trait de repère de jauge ;
- Peser l'ensemble (pycnomètre + eau) pour obtenir masse M1 ;
- Diminuer 2/3 d'eau dans le pycnomètre ;
- Peser 150g de sol (les passant du tamis de 2mm) correspondant à la masse M2 ;
- Introduire dans le pycnomètre l'échantillon du sol et après avoir rempli d'eau jusqu'au trait repère peser la masse de l'ensemble (pycnomètre + eau + échantillons du sol étudié) et masse corresponde à M3 ;

2.2.2.4. Matériels utilisés

Pour la détermination de la masse volumique absolue du sol on a utilisé les matériels suivant :

- Le pycnomètre
- Entonnoir

- La pissette
- Le plateau
- L'étuve
- Les tares

2.2.2.5. Expression des résultats

La masse volumique du sol s'exprime en g/cm³ et obtenu par la relation (2.2)

$$\rho = \frac{M_2}{M_1 + M_2 - M_3} \times \rho_{eau} \quad (2.2)$$

Où :

ρ : poids volumique

ρ_{eau} : poids volumique de l'eau

M_1 : masse du pycnomètre + eau ;

M_2 : masse de l'échantillon.

M_3 : masse du pycnomètre + eau + échantillon

2.2.3. DETERMINATION DES LIMITES D'ATTERBERG

2.2.3.1. But

La détermination des limites d'Atterberg a pour objectif d'identifier et prévoir les comportements des sols sous la variation de teneur en eau.

2.2.3.2. Principe

La détermination des limites d'Atterberg consiste à évaluer la teneur en eau sur un mortier de sol de fraction inférieure à 400µm

2.2.3.3. Mode opératoire

a. Limite de liquidité

La détermination de la limite de liquidité est faite à l'aide de l'appareil de Casagrande suivant la norme NF P94-051 et consiste à :

- Vérifier la hauteur de la chute de la coupelle avec la cale ;
- Remplir la coupelle propre et sèche par une masse d'environ 70g de pâte. Cette pâte développée en plusieurs couches enfin d'éviter les bulles d'air. La pâte recouvre le fond de la coupelle, sauf sur une partie d'environ 3 cm et son épaisseur f est, au centre de l'ordre de 15 à 20 cm ;

- Partager la pâte par l'outil à rainurer en le tenant perpendiculairement à la surface de coupelle ;
- Fixer la coupelle sur le support métallique de l'appareil de Casagrande ;
- Actionner la came telle que la coupelle sera soumise à une série de chocs de deux coups par seconde ;
- Noter le nombre de coups (N_c) pour que les lèvres de la rainure se rejoignent sur 1 cm environ ;
- Prélever dans la coupelle, à l'aide d'une spatule, la pâte au voisinage de l'endroit où la rainure s'est renfermée, afin d'en déterminer la teneur en eau ;
- Déterminer la teneur en eau (W_L).

b. Limite de plasticité

La détermination de la limite de plasticité carreau en verre épais suivant la norme NF P94-051 et consiste à :

- Former d'une boulette à partir de la pâte qui a servi pour la détermination de la limite de liquidité ;
- Rouler la boulette sur une plaque lisse de façon à obtenir un rouleau qui est aminci progressivement jusqu'à ce qu'il atteigne 3mm de diamètre. Le rouleau doit avoir environ 10cm de longueur et ne doit pas être creux. La limite de plasticité est obtenue lorsque, simultanément, le rouleau se fissure et que son diamètre atteint 3mm ;
- Si aucune fissure n'apparaît, le rouleau est réintégré à la boulette. La pâte est malaxée tout en étant séchée légèrement ;
- Placer le rouleau dans une tare qui sera ensuite pesé puis étuvé, afin de déterminer la teneur en eau ;
- Déterminer la teneur en eau (W_P).

2.2.3.4. Matériels utilisés

Pour la détermination des limites de liquidités on a utilisé les matériels suivants :

- Appareil de CASAGRANDE
- La balance de précision
- L'éprouvette graduée
- Le carreau de verre
- La pissette
- Le plateau

- L'étuve
- Les tares

2.2.3.5. Expression des résultats

La détermination de la limite de liquidité et de la limite plastique est déterminé par la teneur en eau pondérale, exprimée en pourcentage et obtenu par la relation (2.1). L'interprétation des résultats est faite suivant les tableaux (2.1), (2.2) et (2.3).

- Limite de liquidité (ATLAN, 1978)

Tableau 2.1. Les limites de liquidité d'un sol

| Matériau | W_L |
|--------------|---------------|
| Faible | 20 à 25 |
| Moyenne | 25 à 50 |
| Élevée | 50 à 70 |
| Très élevées | Au-delà de 70 |

- Limite de plasticité (ATLAN, 1978)

Tableau 2.2. Les limites de plasticité d'un sol

| IP | Degré de plasticité | Résistance du sol à l'état sec | Sol sur terrain à teneur en eau voisine de W_P |
|-------|----------------------|---|--|
| 0-5 | Non plastique | Non cohérent | Très déformable |
| 5-15 | Modérément plastique | Peut-être 'cassé' entre les mains mais pas entre pouce et index | Déformable |
| 16-35 | Plastique | Forte résistance (1 à 2bar) | Peu déformable sous la simple pression d'une pouce |
| >35 | Très plastique | Très forte résistance supérieur à 5bar | Haute cohésion-perd son humidité très lentement |

- Relation générales entre les limites d'Atterberg et les propriétés des sols (ATLAN, 1978)

Tableau 2.3. Relation entre les limite d'Atterberg d'un sol

| Caractéristiques | Sol à même W_L et IP croissant | Sols à même IP et W_L croissant |
|------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Compressibilité | Varie peu | Croit |
| Perméabilité | Décroit | Croit |
| Dureté quand $W = W_P$ | Croit | Croit |
| Résistance (à sec) | Croit | Croit |

2.3. EVALUATION APRES GLISSEMENT

L'évaluation après glissement de terrain du versant de l'ITFM Karhale s'est effectuée dans le but de quantifier et d'évaluer les différents facteurs liés aux mouvements de terrain et/ou les facteurs déclenchants au cours du temps afin d'affirmer l'implication des certains facteurs causaux dans les processus qui ont entrainer les mouvements de terre sur le versant de l'ITFM Karhale. Dans ce cas de figure, Il s'agit d'analyser le glissement de terrain notamment pour éviter qu'il ne se reproduise d'autres glissements dans les mêmes conditions et chercher à améliorer la situation de manière à avoir une sécurité.

2.3.1. OUTILS ET PROCEDURE DE CONTROLE DES FACTEURS CAUSAUX

Le contrôle de facteurs causaux du glissement de terrain du versant de l'ITFM Karhale s'est effectué suivant la classification de glissement des terrains proposée par WP/WLI et explicité dans tableau (1.3) afin d'analyse l'état effectif ou non effectif des certains facteurs causants le glissement de terrain de l'ITFM Karhale.

2.3.1.1. L'évaluation de la condition du terrain

Le contrôle des facteurs causaux liés à la condition terrain du versant de l'ITFM Karhale et donc de son sol ont été évalués suivant les cartographies (en images) à la surface du glissement de terrain et du sol environnant et par les essais de caractérisation du sol. La procédure d'évaluation d'un facteur causal est illustrée dans le tableau (2.1). (WP/WLI, 1994)

Tableau 2.4. Procédure d'évaluation d'un facteur causal (WP/WLI, 1994)

| Condition de terrain | | | |
|----------------------|---|---|---|
| Facteur causal | Outils d'évaluation | Critère d'évaluation | |
| | <ul style="list-style-type: none"> - Les essais de caractérisation du sol - Cartographies (en images) à la surface du glissement de terrain | Effectif | Non effectif |
| | | <ul style="list-style-type: none"> Les essais de caractérisation du sol et /ou cartographies (en images) à la surface du glissement de terrain vérifient l'existence du facteur causal | <ul style="list-style-type: none"> Les essais de caractérisation du sol et /ou cartographies (en images) à la surface du glissement de terrain vérifient l'existence du facteur causal |

2.3.1.2. L'évaluation des processus géomorphologique

Le contrôle des facteurs causaux liés aux processus géomorphologiques ou aux changements dans la morphologie du sol du versant de l'ITFM Karhale ont été évalués au travers les cartes préexistantes, les photographies aériennes et les observations minutieuses au fil du temps par la population locale. La procédure d'évaluation d'un facteur causal est illustrée dans le tableau (2.2) (WP/WLI, 1994).

Tableau 2.5. Procédure d'évaluation des processus géomorphologique (WP/WLI, 1994)

| Processus géomorphologique | | | |
|----------------------------|--|--|--|
| Facteur causal | Outils d'évaluation | Critère d'évaluation | |
| | <ul style="list-style-type: none"> - Les cartes préexistantes - Les photographies aériennes - Les observations minutieuses au fil du temps par la population locale | Effectif | Non effectif |
| | | <ul style="list-style-type: none"> Les cartes préexistantes, les photographies aériennes et les observations minutieuses au fil du temps par la population locale attestent l'implication du facteur causal | <ul style="list-style-type: none"> Les cartes préexistantes, les photographies aériennes et les observations minutieuses au fil du temps par la population locale n'attestent pas l'implication du facteur causal |

2.3.1.3. *L'évaluation des processus physique*

Le contrôle des facteurs causaux lié aux processus physiques sur le versant de l'ITFM Karhale concernent l'environnement et ont été évalué sur le site par des instruments (pluviomètres, sismographes) et les observations de la population locales sur les dommages causés par les tremblements de terre et par les saisons climatiques. La procédure d'évaluation d'un facteur causal est illustrée dans le tableau (2.3) (WP/WLI, 1994).

Tableau 2.6. Procédure d'évaluation des processus physique (WP/WLI, 1994)

| Processus physique | | | |
|---------------------------|--|---|---|
| Facteur causal | Outils d'évaluation | Critère d'évaluation | |
| | - Les des instruments (pluviomètres, sismographes) - Les observations de la population locales sur les dommages causés par les tremblements de terre et par les saisons climatiques | Effectif | Non effectif |
| | | Les des instruments (pluviomètres, sismographes) et les observations locales sur les dommages causés par les tremblements de terre et par les saisons climatiques attestent l'implication du facteur causal | Les des instruments (pluviomètres, sismographes) et les observations locales sur les dommages causés par les tremblements de terre et par les saisons climatiques n'attestent pas l'implication du facteur causal |

2.3.1.4. *L'évaluation des processus faits par l'Homme*

Le contrôle des facteurs causaux liés aux processus créés par l'homme sur le versant de l'ITFM Karhale ont été évalués au travers les observations de site et à partir des constructions ou registres de fouilles sur le site. La procédure d'évaluation d'un facteur causal est illustrée dans le tableau (2.4) (WP/WLI, 1994).

Tableau 2.7. Procédure d'évaluation des processus faits par l'homme (WP/WLI, 1994)

| Processus faits par l'homme | | | |
|-----------------------------|---|---|---|
| Facteur causal | Outils d'évaluation | Critère d'évaluation | |
| | - Les observations de site - À partir des constructions ou registres de fouilles sur le site | Effectif | Non effectif |
| | | Les observations de site et partir des constructions ou registres de fouilles sur le site attestent l'implication du facteur causal | Les observations de site et partir des constructions ou registres de fouilles sur le site attestent l'implication du facteur causal |

2.4. PROPOSITION DES SOLUTIONS

L'étude de glissement de terrain de l'ITFM Karhale a conduit à définir une ou plusieurs solutions confortatives et exécuter des travaux de stabilisation.

2.4.1. CHOIX DE CONFORTEMENT

Le choix de confortement se fait en fonction d'un compromis entre trois aspect qui sont :

- L'analyse des paramètres techniques du site ;
- La connaissance des techniques de confortement ;
- Les impératifs technico-économique ;

Le résultat de des analyses des paramètres techniques du site entre autre la géométrie, l'hydraulique, les caractéristiques mécaniques du terrain, permettront de classer les actions correspondantes (terrassment, drainage, substitution de sol, renforcement mécanique, protections superficielles)

2.4.1.1. Le profilage

Action mener sur le matériau et la géométrie de la pente. Le profilage permettra au terrain de recueillir de nouveau matériau de meilleure qualité.

Pour mener à bien l'opération on prendra un certain nombre de précautions :

- Excaver peu profondément la surface de rupture sous peine d'inefficacité totale ;
- Vérifier que les phases dangereuses des travaux sont prises en compte dans le processus d'exécution et que l'on ne risque pas d'engendrer une régression des désordres ;

2.4.1.2. Masque poids drainant

Le masque poids drainant est un ouvrage en matériaux granulaires frottant, très perméables mis en œuvre en parement de talus. Il agit aussi comme massif de retenue afin d'accroître la stabilité générale en faisant office d'un mur poids.

Quelques éléments nécessaires à la mise en œuvre et au dimensionnement :

- La géométrie du site après l'opération de terrassement
- Certains éléments particuliers à la technique :
 - o La blocométrie ou granulométrie des matériaux à mettre en place ; celle-ci intervient pour définir la masse volumique du masque et les conditions de mise en œuvre ;
 - o La qualité des sols supports pour l'appréciation de l'état du fond de fouille et de sa régularité lors du terrassement et la pose de drains ;
 - o Les caractéristiques géométriques des matériaux en talus (cohésion et angle de frottement interne des sols encaissant) ;

2.4.1.3. Canal d'évacuation d'eau

La détermination des caractéristiques de la section du canal trapézoïdal sera faite par la relation de MANNIG-STRICKLER.

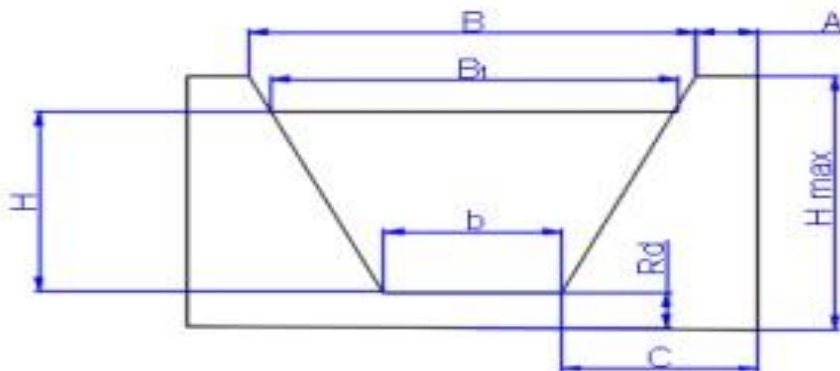


Figure 2.6. Caractéristiques de la section du canal

Cette relation s'écrit :

$$V = K \times R^{2/3} \times J^{1/2} \quad (2.3)$$

Où :

V : vitesse moyenne (en m/s)

K : coefficient de Strickler qui dépend de la nature de paroi

R : est le rayon hydraulique (en m)

J : pente

Partant de la formule du débit :

$$Q = V \times A \quad (2.4)$$

$$Q = K \times R^{2/3} \times J^{1/2} \times A \quad (2.5)$$

Q : Débit transitant dans la canalisation considérée (m³/s)

A : section mouillée de la canalisation (m²)

a. Méthode de prédétermination des crues

On utilisera la méthode rationnelle qui prédétermine directement la valeur du débit pour chaque sous bassin. La méthode conduit à la formule (2.6).

$$Q_{max} = 0,278 C_r \times I \times A \quad (2.6)$$

Avec : C_r : coefficient de ruissellement

I : intensité de la pluie en mm/h

A : superficie du bassin versant

b. Choix du type de canalisation

Dans le cas où l'on considère un régime uniforme, les caractéristiques géométriques du canal sont constantes tout au long du tronçon considéré : section mouillée S, pente i ainsi que la rugosité des parois. Le tirant d'eau est constant tout au long du tronçon (appelé tirant d'eau normal). Le choix porté au profil trapézoïdal en maçonnerie est du fait que :

- Une canalisation à profil trapézoïdale a une grande résistance aux sollicitations extérieures.
- Une canalisation à profil trapézoïdale facilite le curage de l'ouvrage.

Profil trapézoïdal

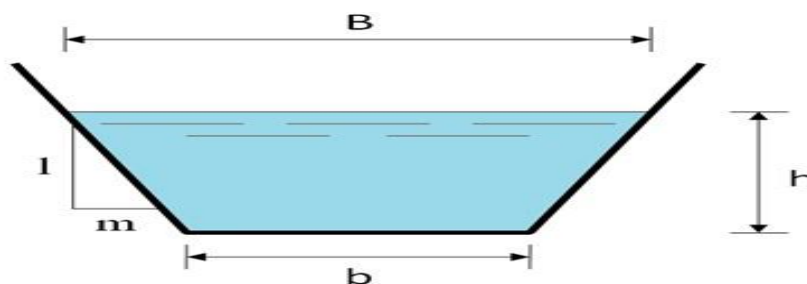


Figure 2.7. Profil trapézoïdal

Soit :

- Largeur en miroir

$$B = b + 2 \times mh \quad (2.7)$$

- Surface mouillée S

$$S = (b + mh) \times h \quad (2.8)$$

- Périmètre mouillé P

$$p = b + 2 \times h \times \sqrt{1 + m^2} \quad (2.9)$$

- Rayon hydraulique R

$$R = \frac{(b + mh) \times h}{b + 2 \times h \times \sqrt{1 + m^2}} \quad (2.10)$$

Les valeurs préconisées dans le dimensionnement sont données dans le tableau 2.2 en fonction de la valeur de H max et la hauteur d'écoulement H.

Tableau 2.8. Paramètre section du profil

| Paramètres | A | B | B1 | C | b | Rd |
|--------------|----------|------------|---------|----------|-------------|----------|
| Trapézoïdale | 0.17Hmax | 0.36Hmax+b | 0.36H+b | 0.35Hmax | λH | H max/12 |

La profondeur d'écoulement a été liée au débit de dimensionnement et a été déterminée par la relation :

$$H = K^{-3/8} \times I^{-3/16} \times Q^{3/8} \times (\lambda + p)^{-5/8} \times (\lambda + 2\sqrt{1 + p^2})^{1/4} \quad (2.11)$$

Le rapport λ qui détermine la section économique pour un débit donné a été choisi dans le tableau 2.6 ci-dessous déterminé par la relation :

$$\lambda = 2\sqrt{1 + p^2} - p \quad (2.12)$$

CONCLUSION

Tout au long de ce chapitre, ont été présentés le milieu d'étude en s'attardant sur le contexte climatique et végétation, sur l'hydrographie, la géomorphologie et la géologie de la région, ensuite ont été présentés les essais relatifs aux matériaux pour la reconnaissance et la caractérisation du sol. Nous avons aussi présenté quelques outils et procédure d'évaluation après glissement de facteurs causaux et enfin nous avons présenté les différentes propositions des solutions applicables sur le site.

chapitre 3. PRESENTATION, INTERPRETATION ET ANALYSE DES RESULTATS

INTRODUCTION

Cette partie présente les résultats issus des essais effectués au laboratoire dont les échantillons ont été prélevés le 14 octobre 2021 le long de la surface du glissement (niche d'arrachement et corps de glissement) du versant de l'ITFM Karhale à Bukavu. Il présente également les analyses de contrôle facteur causaux selon la classification de WP/WLI et enfin les proportions de confortement du glissement de terrain de l'ITFM Karhale.

3.1. CARACTERISTIQUE PHYSIQUES

3.1.1. TENEUR EN EAU

Les résultats de la teneur en eau pour chaque couche de sol conduisent aux valeurs portées en annexe 1. Le tableau 3.1 présente les résultats

Tableau 3.1. Teneur en eau pour les couches de sol

| Echantillon | W(%) |
|---------------------|-------|
| Niche du glissement | 14.96 |
| Corps du glissement | 30.78 |

Les échantillons prélevés à la niche du glissement et à son corps révèlent que la teneur en eau de la masse de terre déplacée est largement supérieure à celle de sol de l'escarpement principal qui est plus légèrement que la moitié du corps du glissement. On a donc affirmé que le sol de la niche du glissement présente une certaine cohésion que celui du corps de glissement du versant de l'ITFM Karhale.

3.1.2. MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE

La mesure de poids volumique absolu pour le sol du site conduit aux valeurs portées en annexe 2. Le tableau 3.2 présente les résultats.

Tableau 3.2. masse volumique absolu

| Couche de sol | Masse volumique (g/cm ³) |
|---------------------|--------------------------------------|
| Niche du glissement | 2 |

L'échantillon prélevé sur la niche du glissement révèle que la masse volumique est légèrement élevée pour un sol argileux qui varie entre 1.3 à 1.7 g/cm³ et par conséquent il a un indice de vide très réduit et donc à un arrangement granulaire compact.

3.1.2.1. Limites d'Atterberg

Les mesures de limites d'Atterberg déterminées conduisent aux valeurs portées en annexe 3. Les tableau 3.3 présente les résultats.

Tableau 3.3. Limites d'Atterberg

| Echantillons | W _L (%) | W _P (%) | I _P (%) |
|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Niche de glissement | 73 | 47.18 | 25.82 |
| Corps du glissement | 63.80 | 43.56 | 20.24 |

Les limites de liquidité ont été déterminées pour les échantillons de sol de la niche du glissement et de son corps. Le premier échantillon présente une limite de liquidité plus élevée que le deuxième. Dans l'ensemble, on peut affirmer que la niche de glissement présente une limite de liquidité élevée (73%) ; au-delà de cette teneur en eau le sol devient visqueux et peut s'écrouler sous son propre poids.

Les limites de plasticité ont été également déterminées pour les échantillons de sol de la niche de glissement et de son corps. Le premier échantillon présente une limite de plasticité plus élevée que le deuxième. On peut donc affirmer que le sol de la niche de glissement présente une grande cohésion pour une teneur en eau en descend de (47.18%), au-delà de cette teneur en eau le sol devient déformable.

Les indices de plasticité ont été également déterminées pour les échantillons de la niche de glissement et de son corps. Le premier présente un indice légèrement supérieur au second. On peut donc affirmer que le sol de la niche de glissement à une forte résistance à l'état sec et sera très sensibles à une teneur en eau très élevée. On peut aussi affirmer que ce sol présente une perméabilité décroissante étant donné que W_L et I_P sont croissants.

3.2. CARACTERISTIQUES MECANIKES

Un I_P élevé (25.82 %) du sol de l'ITFM Karhale correspond à un sol argileux selon le tableau porté en annexe 4. Les valeurs de la cohésion et l'angle de frottement interne du sol sont synthétisées dans le tableau (3.4)

Tableau 3.4. L'angle de frottement interne et la cohésion du sol de l'ITFM Karhale

| Angle de frottement Interne (ϕ) (°) | Cohésion du sol (C) (kPa) |
|--|---------------------------|
| 20 | 20 |

La cohésion du sol de l'ITFM Karhale étant élevée résiste au glissement des grains qui le composent et résiste à un certain point aussi à des efforts de cisaillement malgré son angle de frottement un peu plus faible. Néanmoins la saturation de ce sol par l'eau diminuera, voir annuler sa cohésion.

3.3. ANALYSE DES FACTEURS CAUSANT LE GLISSEMENT DE TERRAIN DE L'ITFM KARHALE

L'analyse des facteurs causant le glissement de terrain de l'ITFM Karhale s'est effectuée suivant le contrôle des facteurs causaux classer par WP/WLI

3.3.1. CONDITION DU TERRAIN

Les résultats des analyses facteurs lié au conditions du terrain sont résumés dans le tableau (3.5)

Tableau 3.5. Analyse des conditions du terrain

| Facteurs causaux | Critique et observation | Appréciation |
|---------------------------|--|--|
| Matériau plastique faible | D'après les essais effectués sur les échantillons de sol du glissement versant de l'ITFM , les matériaux présents sont plastiques | Matériau plastique faible est Non effectif |
| Matériau sensible à l'eau | Avec un I_p élevé, le matériau du site présente une certaine déformation sous une certaine teneur (au voisinage de W_p) ce qui fait que le matériau est sensible. | Matériau sensible à l'eau est Effectif |
| Matériau pliable | Le matériau du site n'est pas pliable car justifié par l'état du sol qui est plastique. | Matériau pliable est Non effectif |
| Matériau désagrégé | Le matériau présent sur site présente une grande cohésion (20 ± 10) qu'on peut lire dans le tableau présent en l'annexe 4. Ainsi, le matériau n'est pas désagrégé. | Matériau désagrégé est Non effectif |

| | | |
|---|--|--|
| Matériau cisailé | Le matériau du site identifié par les limites d'Atterberg étant de l'argile est un matériau cohérent (voir tableau en annexe 4) | Matériaux cisailé est Non effectif |
| Matériau joint ou fissuré | Ce facteur a été observé et cartographié sur le site au cours des investigations menées le 14 octobre 2021 (voir la figure en annexe 6). | Matériau joint ou fissuré est Effectif |
| Discontinuité de masses mal orientées | A part la ravine développée en 2017 qui comporte différentes couches de sol bien orientées, la partie du glissement est composée d'une seule masse de sol. | Discontinuité de masses mal orientées est Non effectif |
| Discontinuité structurelles mal orientées | La masse du sol du glissement en argile est composé du nitsol et régolithe qui sont mélangés et bien orientés sur le plan structurel. | Discontinuité structurelles mal orientées est Non effectif |
| Contraste de perméabilité et ses effets sur les eaux souterraine, contraste de rigidité | Il n'existe pas des eaux souterraines sur le site ; ce qui est confirmé par la figure 2.3 | Contraste de perméabilité et ses effets sur les eaux souterraine, contraste de rigidité est Non effectif |

Après contrôle des facteurs causaux évalués suivant les cartographies (en images) à la surface du glissement de terrain et du sol environnant et par les essais de caractérisation du sol versant de l'ITFM Karhale, on a montré qu'en rapport avec les conditions du terrain, la sensibilité à l'eau, la joncture ou fissures sont des facteurs a la base du glissement de terrain de l'ITFM Karhale.

3.3.2. LES PROCESSUS GEOMORPHOLOGIQUES

Les résultats des analyses des facteurs liés aux processus géomorphologiques sont résumés dans le tableau (3.6).

Tableau 3.6. Analyses des processus morphologiques du terrain

| Facteurs causaux | Critique et observation | Appréciation |
|---|--|--|
| Soulèvement tectonique | Cas rare qui désigne un mouvement d'élévation du sol lié à la tectonique de plaques. Ce phénomène n'est pas observable cette région (pas dans notre ère). | Soulèvement tectonique est Non effectif |
| Soulèvement volcanique | Malgré les failles qui traversent des extrémités de la ville de Bukavu, les phénomènes volcaniques n'y sont pas observés | Soulèvement volcanique est Non effectif |
| Erosion fluviale | Des eaux de ruissellement, de torrent, souterraines alimentées par les rivières et les fleuves. Ce facteur n'est pas observable sur le site (voir figure 2.3) | Erosion fluviale est Non effectif |
| Erosion par les vagues du pied de talus | Le phénomène de glissement de terrain observé sur le site (type rotationnel) exclut la possibilité d'avoir ce facteur | Erosion par les vagues du pied de talus est Non effectif |
| Erosion glaciaire du pieds de talus | L'érosion glaciaire provoquant l'arrachement de matériau (érosion mécanique) par abrasion et arrachement. Le glissement du type rotationnel exclut la possibilité d'avoir en cause ce facteur. | Erosion glaciaire du pieds de talus est Non effectif |
| Erosion des marges latérales | Ce facteur n'est pas observable sur le site | Erosion des marges latérales est Non effectif |
| Erosion souterraine | Il n'existe pas des eaux souterraines sur le site (voir la figure 2.3) | Erosion souterraine est Non effectif |
| Charge dépôt du talus ou de sa crête | Ce facteur n'est pas observable sur le site (témoignage de la population locale) | Charge dépôt du talus ou de sa crête est Non effectif |

| | | |
|--|--|---|
| Enlèvement de la végétation (par sécheresse) | L'enlèvement de la végétation par la sécheresse est très fréquent dans la région et cela durant les périodes sèches (témoignage de la population locale et observation). | Enlèvement de la végétation (par sécheresse) est Effectif |
|--|--|---|

Après contrôle des facteurs causaux évalués au travers les cartes préexistantes présentées en chapitre II, les photographies aériennes et les observations minutieuses au fil du temps par la population locale. On a pu montrer qu'en rapport avec les processus géomorphologiques, l'enlèvement de la végétation (par sécheresse) est un facteur a la base du glissement de terrain de l'ITFM Karhale.

3.3.3. PROCESSUS PHYSIQUES

Les résultats des analyses sont résumés dans le tableau (3.7)

Tableau 3.7. Analyses des processus physique par rapport au site

| Facteurs causaux | Critique et observation | Appréciation |
|---|--|--|
| Pluies intenses et courte durée | Le matériau n'étant pas désagrégé, les pluies intenses et de courte durée n'ont aucun impact sur le glissement du terrain de l'ITFM Karhale | Pluies intenses et courte durée est Non effectif |
| Fonte rapide de la neige profonde | La région possède un climat tropical de montagne, il ne peut donc en aucun cas observer des phénomènes liés à la neige. | Fonte rapide de la neige profonde est Non effectif |
| Précipitations élevées profondes | Avec la sensibilité du sol argileux du site à l'eau et sa faible perméabilité (décroissante), les précipitations élevées accentuent la teneur en eau du matériau, augmentant la pression interstitielle entre les particules fines du sol. Ce facteur est l'acteur majeur du glissement de terrain de l'ITFM Karhale | Précipitations élevées profondes est Effectif |
| Rabatement rapide à la suite d'inondation, des marées hautes ou de rupture de barrages naturels | Il n'existe pas de phénomène d'inondation ou de marée hautes sur le site ou approximative | Rabatement rapide à la suite d'inondation, des marées hautes ou de rupture de barrages naturels est Non effectif |
| Tremblement de terre | Les séismes enregistrés dans le secteur de Bukavu sont faibles (intensité <4) (Kampunzu et Al., 1983), ce qui exclut l'implication de ce facteur. | Tremblement de terre est Non effectif |
| Eruption volcanique | Les phénomènes volcaniques ne sont pas observés dans la région moins encore sur le site. | Eruption volcanique est Non effectif |
| Franchissement des lacs de cratère | Les phénomènes volcaniques ne sont pas observés dans la région | Franchissement des lacs de cratère est Non |

| | | |
|---|--|---|
| | | effectif |
| Dégel du pergélisol | Ce phénomène n'est observable que dans des régions froides | Dégel du pergélisol est Non effectif |
| Intempéries au gel ou dégel | Ce phénomène n'est observable que dans des régions froides et donc non observable dans notre région. | Intempéries au gel ou dégel est Non effectif |
| Rétrécissement et gonflement des sols expansifs | Le sol présent sur le site n'est pas expansif | Rétrécissement et gonflement des sols expansifs est Non effectif |

Après contrôle des facteurs causaux évalués sur le glissement du versant de l'ITFM par des instruments (pluviomètres, sismographes) et les observations de la population locales sur les dommages causés par les tremblements de terre et par les saisons climatiques, on a pu montrer qu'en rapport avec les processus physiques, les précipitations élevées profonde sont des facteurs à la base du glissement de terrain de l'ITFM Karhale.

3.3.4. PROCESSUS FAITS PAR L'HOMME

Les résultats des analyses sont résumés dans le tableau (3.8)

Tableau 3.8. Analyses des processus faits par l'homme

| Facteurs causaux | Critique et observation | Appréciation |
|---|---|--|
| Excavation du talus ou de son pied | Le glissement du type rotationnel exclut la possibilité d'avoir en cause ce facteur | Excavation du talus ou de son pied est Non effectif |
| Chargement de la pente ou de sa crête | Des bâtiments d'habitations sur toute l'étendue du versant et des bâtiments de l'ITFM Karhale constituent des charges sur la pente et de sa crête de la pente du glissement (voir figure 3.9) | Chargement de la pente ou de sa crête est Effectif |
| Rabattement (des réservoirs) | Aucun réservoir n'est présent sur le site ni sur son voisinage | Le Rabattement (des réservoirs) est Non effectif |
| Irrigation | Aucun système d'irrigation n'est observable sur le site ni sur son voisinage | L'Irrigation est Non effectif |
| Entretien défectueux des systèmes de drainage | Ce facteur n'est pas observable sur le site | L'Entretien défectueux des systèmes de drainage est Non effectif |
| Fuites d'eau des services (approvisionnement en eau, égouts, égouts pluviaux) | Ce facteur n'est pas observable sur le site | Fuites d'eau des services (approvisionnement en eau, égouts, égouts pluviaux) est Non effectif |
| Enlèvement de la végétation (par déforestation) | L'un de facteur le plus décisif qui se voit même à présent malgré l'instabilité qui se vit sur le site (voir figure 3.10) | Enlèvement de la végétation (par déforestation) est Effectif |
| Mines et carrières (puits à ciel ouvert ou galerie souterraine) | Aucune mine ou/et carrière n'est observable sur le site ni sur son voisinage | Mines et carrières (puits à ciel ouvert ou galerie souterraine) est Non effectif |
| Création de décharge des déchets très lâches | Aucune décharge des déchets n'a été observé au fil du temps sur le site | Création de décharge des déchets très lâches est Non effectif |

| | | |
|--|---|--|
| Vibrations artificielles (y compris la circulation, battages de pieux, machinerie lourde) | Ce facteur est vérifié avec les activités scolaires de l'ITFM, ISTM. UOB, des habitations au voisinage du site et quelques moulins installés sur la crête du site | Vibrations artificielles (y compris la circulation, machinerie lourde) est Effectif |
|--|---|--|

Après contrôle des facteurs causaux évalués au travers des observations de site et à partir des constructions ou registres de fouilles sur le site, on a pu montrer qu'en rapport avec les processus faits par l'homme, le chargement de la pente ou de sa crête, l'enlèvement de la végétation (déforestation) et la vibration artificielles (y compris la circulation, machinerie lourde) sont de facteurs à la base du glissement de terrain de l'ITFM Karhale.

3.4. CONFORTEMENT PROPOSÉ

Les résultats obtenus suite aux analyses des facteurs causant le glissement de terrain de l'ITFM montrent que l'instabilité du versant est dû à la sensibilité des matériaux à l'eau, à la jointure ou fissure des matériaux, à l'enlèvement de la végétation (par sécheresse), aux précipitations profonde élevées, au chargement de la pente ou de sa crête, à l'enlèvement de la végétation (déforestation) et à la vibration artificielle (y compris la circulation, machinerie lourde). On en déduit donc :

- L'opération de terrassement (le profilage)
- La substruction de matériau par de matériau drainant et
- L'aménagement d'une canalisation des eaux de ruissellement

3.4.1. LE PROFILAGE DU VERSANT DE L'ITFM KARHALE

Le profilage sera effectué sur le glissement de l'ITFM Karhale afin de permettre au terrain de recueillir le matériau de meilleure qualité.

L'opération consiste à avoir :

- Un angle de talus de l'escarpement principale de : 35° pour assurer la stabilité des matériaux en remblai (en terrain naturel), comme référé au tableau en annexe 8.
- Une profondeur d'ancrage de : 2m où seront ancrés les matériaux constitutifs du masque poids drainant, référé à la méthode de stabilisation par substitution partielle ou totale de la masse glissée (bêches, contreforts, maques, éperons) pour qui l'ancrage doit être comprise entre 2m et 5m. (Hakima DAHMANI, 2013)

3.4.2. MASQUE POIDS DRAINANT

Le masque poids drainant sera exécuté sur le glissement de terrain d'ITFM Karhale jouera le rôle de retenue de terre de l'escarpement principale et comblera la masse de terre glissée.

Le masque poids drainant aura comme caractéristique :

- Pierres de dimension : 90 mm à 640 mm, dimensions adoptées pour leurs grands poids qu'ils offrent et sont souvent utilisées pour conforter certain glissement de plus de 6m de hauteur.
- Gravillons de dimension : 4mm à 20mm, serviront comme matériaux filtre entre les sols et les pierres.
- Angle de talus : 35° pour assurer la stabilité des matériaux en remblai (en terrain naturel), comme référé au tableau en annexe 8.

3.4.3. CANAL D'EVACUATION DES EAUX

Le canal d'évacuation des eaux sera exécuté sur le versant de l'ITFM Karhale afin de permettre l'évacuation des eaux de ruissellement provenant de camp Mweze et de la concession de l'ITFM.

3.4.3.1. Dimensionnement de la section du canal

La détermination des caractéristiques de la section du canal trapézoïdal s'est faite par le formule de MANNING –STRICKLER pour un débit $Q = 5.335m^3/s$ dont la procédure de calcule est démontrer à l'annexe 5.

Après calcul, nous avons obtenu les résultats présentés dans le tableau (3.9)

Tableau 3.9 Dimensions du canal trapézoïdal

| Paramètres géométriques | Unités | valeurs |
|------------------------------------|--------|------------|
| Profondeur hydraulique (H) | m | 0,62686815 |
| Profondeur hydraulique max (H max) | m | 1,12686815 |
| Largeur du fond du canal (b) | m | 1,2537363 |
| Largeur du miroir (B) | m | 1,65940883 |
| Rayon hydraulique | m | 0,38948593 |
| Pente du canal (%) | - | 2 |
| λ | - | 2 |
| $m = \cotg(\alpha = 45^0)$ | - | 1 |
| Coefficient de Strickler (K) | - | 60 |
| Perimeter mouillé | m | 3,02678718 |

| | | |
|-------------------|----------------|------------|
| Surface mouillée | m ² | 1,17889103 |
| Rd | m | 0,09390568 |
| B ₁ | m | 1,47940883 |
| C | m | 0,40567253 |
| A | m | 0,19156759 |
| Longueur du canal | m | 124 |

Les procédures de calcul de ses caractéristiques sont démontées en annexe 5. Comme caractéristique géométrique du canal en trapèze, prenons la largeur en miroir $B = 1.7\text{m}$, la largeur du fond du canal $b = 1.3\text{m}$, la profondeur hydraulique $H = 0.7\text{m}$ et la profondeur hydraulique maximal $H_{\text{max}} = 1.2\text{m}$.

CONCLUSION PARTIELLE

Ce chapitre présente les résultats obtenus lors des différents essais des caractérisations mécaniques et physiques effectués sur deux échantillons de sol dont celui du le corps et de la niche de glissement. Il présente aussi les résultats des analyses des facteurs causants le glissement versant de l'ITFM Karhale selon les prescriptions de WP/WLI concernant les conditions du terrain, les processus géomorphologiques, les processus physiques et les processus faits par l'homme. Enfin il a été présenté les solutions adéquates entre autre le profilage, le masque poids drainant et un canal d'évacuation des eaux de ruissellement proposées afin de conforter le glissement de terrain de l'ITFM Karhale.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail portant sur « **l'étude des facteurs causant le glissement des terrains à Bukavu : cas du versant de l'ITFM Karhale** » Le versant de l'ITFM/Karhale situé dans la commune d'Ibanda, ville de Bukavu, au Sud-Kivu, présente une instabilité qui, déjà à quelques dizaines de mètres des bâtiments de l'école technique de l'ITFM Karhale, menace à la fois ses bâtiments, les maisons d'habitations en amont du versant et la circulation sur la RN5. Ce présent travail se propose d'étudier les facteurs causant le glissement de terrain du versant de l'ITFM Karhale.

Dans cette optique nous sommes attelés à étudier en premier lieu le glissement des terrains en général, après caractériser le sol du versant de l'ITFM Karhale dans la ville de Bukavu, ensuite analyser les facteurs causant le glissement de terrain de l'ITFM Karhale, selon l'approche opérationnelle de WP/WLI sur les facteurs causant le glissement des terrains et enfin faire une proposition adéquate pour stabiliser le versant de l'ITFM Karhale.

Pour de mener à bien cette étude nous avons poursuivis la démarche méthodologique articulée sur la méthode documentaire qui a permis de développer les connaissances relatives au sujet de recherche, la méthode expérimentale employée au laboratoire pour les différents essais et la méthode analytique nous ont permis d'évaluer et contrôler les différents facteurs causaux lié aux glissement des terrains selon l'approche de WP/WLI.

Les résultats des caractéristiques physiques, obtenus sur deux échantillons de sol prélevés au corps du glissement et à la niche de glissement du versant de l'ITFM Karhale, révèlent que la teneur en eau de la masse de terre déplacée est de 30.78%, ce qui est largement supérieure à celle de sol de l'escarpement principale qui est de 14.96%. On a pu montrer que le sol de la niche du glissement présente une certaine cohésion que celui du corps de glissement du versant de l'ITFM Karhale. Ils révèlent aussi que la niche de glissement présente une limite de liquidité élevée (73%) ainsi donc au-delà de cette teneur en eau le sol devient visqueux et peut s'écrouler sous son propre poids. Aussi le sol de la niche de glissement présente une limite de plasticité de (47.18%), au-delà de cette teneur en eau le sol devient déformable. L'indice de plasticité de la niche de glissement révèle que le terrain plastique et présente une forte résistance à l'état sec et sera très sensible à une teneur en eau très élevée. Les résultats des caractéristiques mécaniques, obtenues sur deux échantillons de sol prélevés au corps du glissement et à la niche de glissement du versant de l'ITFM Karhale révèlent que ce sol présente une cohésion de 20 kPa et un angle de frottement de 20°. On a pu montrer que ce sol

résiste au glissement des grains qui le compose néanmoins la saturation de ce sol par l'eau diminuera, voir annuler cette cohésion.

L'évaluation des facteurs causaux des glissements d'après WP/WLI a montré que pour ce qui est des conditions du terrain, la sensibilité des matériaux à l'eau, les joints ou fissures du sol en place sont les facteurs à la base du glissement de terrain. S'agissant de processus géomorphologique, l'enlèvement de la végétation par sécheresse est aussi un facteur à la base du glissement de terrain. En ce qui concerne les processus physiques, les précipitations profondes élevées sont les facteurs à la base du glissement de terrain. Enfin s'agissant des processus faits par l'homme, le chargement de la pente ou de sa crête, enlèvement de la végétation et les vibrations artificielles sont les facteurs à la base du glissement de terrain. D'après ces résultats on a déduit et proposer le profilage du glissement de terrain de l'ITFM Karhale qui sera fait selon une angle de talus de 35° afin d'assurer la stabilité des matériaux en remblai (en terrain naturel) et une profondeur d'ancrage de 2m pour les matériaux du masque poids drainant. Le masque poids drainant proposé sera exécuté par des pierres de 90 mm à 640 mm, de gravillons de dimension de 4mm à 20mm qui assurons le rôle de filtre sol-pierre et l'angle de talus de 35° pour assurer la stabilité des matériaux en remblai (en terrain naturel). Enfin nous avons proposé un canal d'évacuation des eaux de 124m avec 1,2 m de profondeur hydraulique max, de 1.3 m de largeur du fond de canal et 1.7 m de largeur du miroir.

Le présent travail est une œuvre humaine, il est donc loin d'être parfait et fini. Plusieurs autres approches peuvent en faire l'objet notamment en ce qui concerne la mise en application des solutions proposées et de différentes études techniques (topographie, métré, blocométrie) qui les sont liées. Cependant nous osons croire que ce travail pourra servir de référence aux étudiants, chercheurs et ingénieurs qui auront à approfondir la problématique sur le glissement de terrain dans la Ville de Bukavu.

BIBLIOGRAPHIE

1. AISSA, M. H., 2011. *Mémoire de Master : Analyse et modélisation d'un glissement de terrain. Cas de Sidi Youcef (Béni Messous, Alger)*. Béni Messous: centre universitaire Khemis miliana.
2. Anon., 2016. *le glissement de terrain : facteur provoquant et revision*. [En ligne] Available at: https://m.m-habitat.fr/preparer-son-projet/preparation-du-terrain/glissement-de-terrain-3206_A
3. ATLAN, Y., 1978. *catalogue des essais géotechniques exécutés au laboratoire géotechnique d'ORLEANS*, Orléans : département génie géologique B.P.6009-45018 Orléans Cédex.
4. Clarisse BALEGAMIRE, C. M. J. B. M. D. D. G. I. & O. D., 2017. Vulnérabilité du bâti face aux glissements de terrain: analyse spatio-temporelle à Bukavu (RD Congo). *Geo-Eco-Trop.* , 2(263-278), p. 41.
5. Clément DESODT, J. L. H. H. M., 2017. *Les glissements de terrain, modélisation et prévision* , paris : EDUSCOL-STI.
6. Espoir mugisho, B. F. M., 2015. Sensitiveness to landslides : case of the Ibanda urban district /Bukavu / Drc. *International journal of innovation and applied studies*, p. 22.
7. Hakima DAHMANI, A., 2013. *Etude de stabilité de versant naturel : Cas du glissement CW19, willaya de Guelma. Mémoire d'ingéniera*. s.l.:Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics.
8. Ilunga, 1991. Morphologie, volcanisme et sédimentation dans le rift du SudKivu.. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, Volume 27.
9. Lynda, D., 2013. *Thèse de Doctorat. THÈME : Analyse des mécanismes de déformation et de la rupture progressive du versant instable d'Ain El Hammam*. s.l.:Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
10. MIRINDI, A., 2017. *Etude de caractéristique de fin d'étude : érosion des sols de la ville de Bukavu, approche géomecanique cas du tronçon Ruzizi 1 -Ruzizi 2*. Bukavu : Université Francophone des Grands Lacs .
11. MOEYERSON, T. L. B. M. N., 2004. Geomorphological assessment of landslide origin at Bukavu, Democratic Republic of the Congo. *Engineering Geology*, pp. 72-87.
12. Musy, A., 2005. *Cours Hydrologie générale*. s.l.:secrétariat de l'HYDRAM.

13. Ndyanabo, S., 2009. *Gestion des risques naturels à Bukavu, Sud-Kivu / R. D. Congo. Inédit (mémoire de Master Complémentaire en Gestion des Risques Naturels, 2008-2009)*. Liège: Université de Liège.
14. NGAPGUE, F., 2017. *cours de mecanique des sols et des roches*. Goma: FSTA-ULPGL.
15. Picarelli, S. L. a. L., 2012. *Assessment of Slope Stability*, s.l.: American Society of Civil Engineers.
16. Popescu, M. E., 2002. *LANDSLIDE CAUSAL FACTORS AND LANDSLIDE REMEDIATION OPTIONS*. Chicago, USA: Illinois Institute of Technology.
17. Reiffsteck, P., 1988. *Mécanique des sols avancée: Stabilité des pente*. s.l.:Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
18. Riad, H.-C., 2009. *Mémoire Master en Génie Civil. Thème : Etude Des Mouvements De Pentes Par Le Code De Calcul "Pfc2d"*. Tlemcen: Université Abou-Bekr Belkaid.
19. Sadiki Nyanabo, I. V. J. M. A. O. , O. K. D. B. C., 2010. *developpement de la ville de Bukavu et vartographie des vulnérabilités, R.D. Congo*, Bukavu : Université Officielle de Bukavu, B.P 570 Bukavu.
20. SOUHIR, D., 2015. *Mémoire Master en Génie Civil. Thème : CONTRIBUTIONA LA SIMULATION AU GLISSEMENT DE TERRAIN CAS DE TALUSDE LACW02 ENTRE BAGHLIA ET NACIRIA W.BOUMERDES*. Baghlia: Departement aménagement et genie hydraulique.
21. A. DHOUB, 2003 « comportement des fondations sur sols traités par colonnes ballastées sous charge excentrée ». Paris, ENPC/LCPC, pp 179-184.
22. Varnes, D. J., Adapted from July 2004. *Landslide Types and Processes*. U.S. Geological Survey Landslide Program, Issue Denver, CO 80225.
23. Wiley and Sons, H., 2005. *Landslides in practice : investigation analysis, and remedial/ preventive option in soils*. D.H. Cornforth, Issue ISBN 0-471-67816-3.
24. WP/WLI, 1994. (International Geotechnical societies'UNESCO Working Party on World Landslide Inventory). A suggested method for describing the causes of a landslide. *Bulletin International Association of Engineering Geology*, Issue 50, pp. 71-74.
25. CT Cherif, B., 2020. *cours d'Engin et travaux public*. Goma: FSTA- ULPGL

Site web

[1] Lien : <http://www.georisques.gouv.fr/mouvements-de-terrain>

[2] Lien : <http://www.linternaute.com/dictionnaire/fr/definition/glisement-de-terrain/>

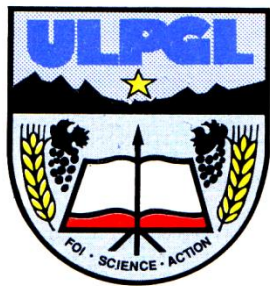
[3] Lien :

http://www.wikkydro.developpementdurable.gouv.fr/index.php/wikigeotech:masque_drainant/

[4] Lien : <https://www.u-picardie.fr/beauchamp/mst/eau-sol.htm>

[5] lien : <https://www.annuaire.ma/cours-pdf-hydraulique-des-sols/>

ANNEXES



UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES APPLIQUEES
LABORATOIRE DE GENIE CIVIL

Annexe 1

Provenance matériaux : Bukavu

TENEUR EN EAU

COUCHE DE SOL 1

| Echantillon | Corps du glissement | |
|----------------------------------|---------------------|--------|
| Masse net tare (g) | 14.68 | 14.57 |
| Masse humide matériau (g) + tare | 40.61 | 41.23 |
| Masse sec (g) + tare | 37.44 | 37.55 |
| Masse eau (g) | 3.17 | 3.68 |
| Masse sec (g) | 22.76 | 22.98 |
| W (%) | 13.92 | 16.013 |
| Moyenne | 14.96 | |

COUCHE DE SOL 2

| Echantillon | Niche du glissement | |
|----------------------------------|---------------------|-------|
| Masse net tare (g) | 13.82 | 15.87 |
| Masse humide matériau (g) + tare | 56.33 | 61.90 |
| Masse sec (g) + tare | 46.17 | 51.23 |
| Masse eau (g) | 10.16 | 10.67 |
| Masse sac (g) | 32.35 | 35.36 |
| W (%) | 31.41 | 30.17 |
| Moyenne | 30.78 | |



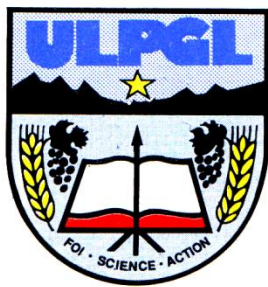
UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES APPLIQUEES
LABORATOIRE DE GENIE CIVIL

Annexe 2

Provenance matériaux : Bukavu

POIDS VOLUMIQUE ABSOLU

| Pycnomètre | | |
|---|---------------|---------------|
| Masse de pycnomètre + eau M1 (g) | 479.21 | 479.28 |
| Masse d'échantillon M2 (g) | 150 | 150 |
| Masse du pycnomètre + eau + échantillon M3 (g) | 554.49 | 553.94 |
| Poids volumique de l'eau (g/cm³) | 1 | 1 |
| Poids volumique absolu (g/cm³) | 2.007 | 1.990 |
| Moyenne | 1.9985 | |



UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES APPLIQUEES
LABORATOIRE DE GENIE CIVIL

Annexe 3

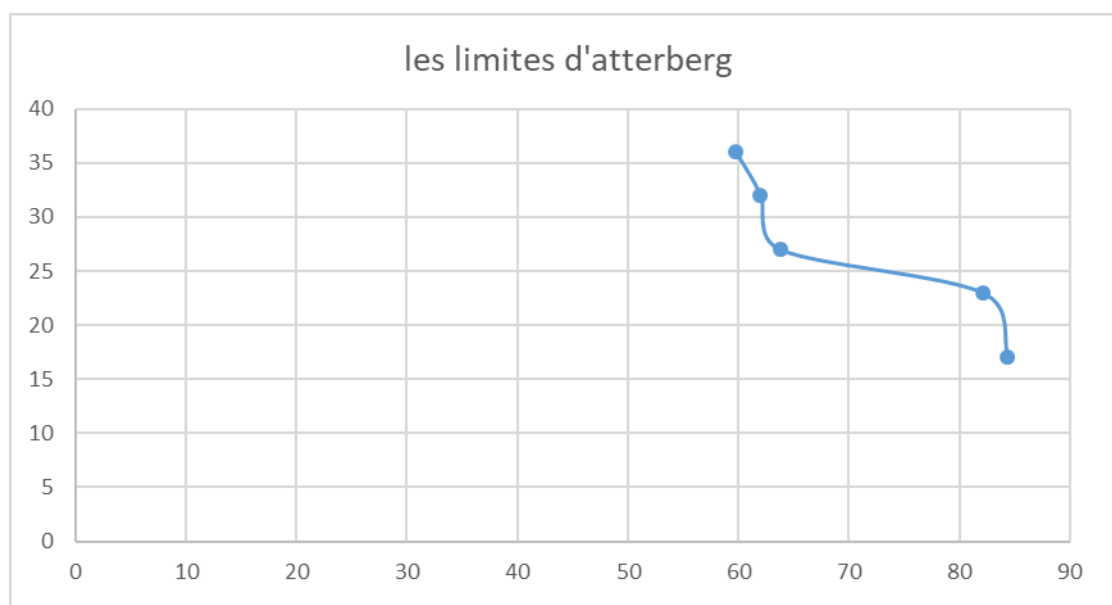
Provenance matériaux : Bukavu

LIMITES D'ATTERBERG

Limité de liquidité

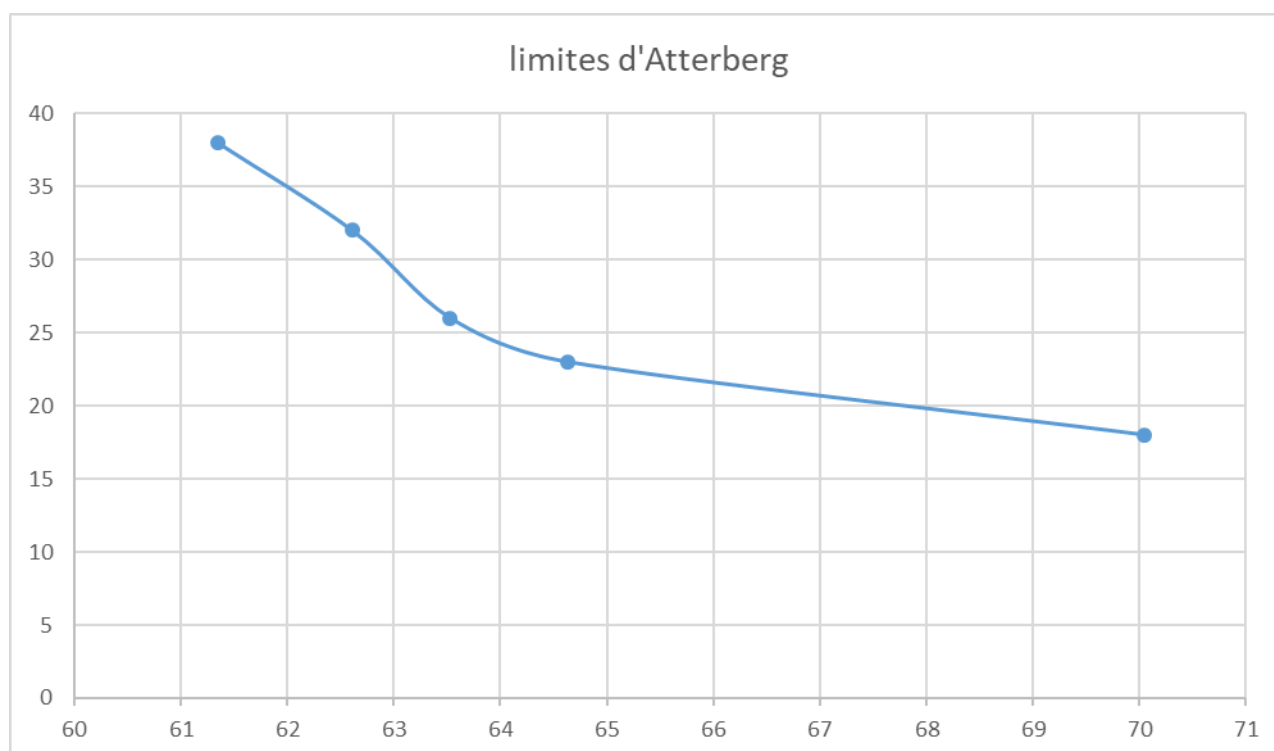
COUCHE DE SOL 1

| échantillon | Corps du glissement | | | | |
|-------------------------|---------------------|--------|-------|-------|-------|
| | 15- 20 | 20- 25 | 25-30 | 30-35 | 35-40 |
| Intervalles des coups | | | | | |
| Nombre de coups | 17 | 23 | 27 | 32 | 36 |
| Masse tare (g) | 13.83 | 14.35 | 12.90 | 14.50 | 14.53 |
| Masse humide + tare (g) | 19.30 | 19.61 | 16.84 | 18.08 | 19.13 |
| Masse sèche +tare (g) | 17.01 | 17.24 | 15.30 | 16.71 | 17.42 |
| Masse sèche | 2.27 | 2.37 | 1.53 | 1.37 | 1.71 |
| Masse d'eau | 3.2 | 2.37 | 2.4 | 2.21 | 2.89 |
| W (%) | 84.37 | 82.086 | 63.75 | 61.99 | 59.76 |
| W _L (%) | 73 | | | | |



COUCHE DE SOL 2

| échantillon | Corps du glissement | | | | |
|-------------------------|---------------------|--------|-------|-------|-------|
| | 15- 20 | 20- 25 | 25-30 | 30-35 | 35-40 |
| Intervalles des coups | | | | | |
| Nombre de coups | 18 | 23 | 26 | 32 | 38 |
| Masse tare (g) | 16.07 | 14.32 | 14.75 | 13.77 | 14.68 |
| Masse humide + tare (g) | 20.10 | 19.16 | 19.28 | 17.51 | 18.02 |
| Masse sèche +tare (g) | 18.44 | 17.26 | 17.52 | 16.09 | 16.75 |
| Masse sèche | 1.66 | 1.9 | 1.76 | 1.44 | 1.27 |
| Masse d'eau | 2.37 | 2.94 | 2.77 | 2.30 | 2.07 |
| W (%) | 70.04 | 64.63 | 63.53 | 62.64 | 61.35 |
| W _L (%) | 63.80 | | | | |



Limité de plasticité**COUCHE DE SOL 1**

| Echantillon | Corps du glissement | |
|---|----------------------------|---------------|
| Masse net tare (g) | 14.87 | 14.55 |
| Masse humide matériau (g) + tare | 15.59 | 15.70 |
| Masse sec (g) + tare | 15.36 | 15.33 |
| Masse eau (g) | 0.23 | 0.37 |
| Masse sec (g) | 0.49 | 0.78 |
| W (%) | 46.93 | 47.435 |
| Moyenne | 47.182 | |

COUCHE DE SOL

| Echantillon | Niche du glissement | |
|---|----------------------------|---------------|
| Masse net tare (g) | 13.19 | 13.56 |
| Masse humide matériau (g) + tare | 15.08 | 14.-61 |
| Masse sec (g) + tare | 14.50 | 14.28 |
| Masse eau (g) | 0.58 | 0.33 |
| Masse sec (g) | 1.31 | 0.77 |
| W (%) | 44.27 | 42.857 |
| Moyenne | 43.563 | |

Annexe 4

- Valeurs des propriétés mécaniques des sols sur l'essais de cisaillement (A. DHOUB, 2003)

| Nature de sol | I _p (%) | Angle de frottement Interne (ϕ) (°) | Cohésion du sol (C) (KPa) |
|---------------------------------------|--------------------|--|---------------------------|
| Roche concasse | n.d | 47±7 | 0 |
| Gravier propre | 0 | 40±5 | 0 |
| Gravier limoneux | 2-6 | 36±4 | ~0 |
| Gravier argileux | 7-12 | 34±4 | ~0 |
| Sable propre à granulométrie étendue | 0 | 40±4 | 0 |
| Sable propre à granulométrie uniforme | 0 | 36±6 | 0 |
| Sable moyennement limoneux | 2-6 | 34±3 | ~0 |
| Sable moyennement argileux | 6-12 | 32±3 | ~0 |
| Sable argileux | 9-15 | 27±3 | 5±5 |
| Limon | 2-6 | 33±4 | ~0 |
| Limon argileux | 4-10 | 30±4 | 15±10 |
| Argile limoneuse | 12-18 | 27±4 | 20±10 |
| Argile | ~20 | 20±4 | 20±10 |
| | ~40 | 15±4 | 25±10 |
| | ~60 | 11±4 | 2 |
| | >100 | < 8 | 2 |

n.d : non défini

Annexe 5

- Fissuration du sol de l'ITFM Karhale



- Chargement de la pente



- Enlèvement de la végétation



- Pied de la pente



Vue aérienne du site



Les caractéristiques du bassin versant

| Paramètre | Superficies (m ³) | Pente | Pente moy |
|--------------|-------------------------------|-------------|-----------|
| SBV1 | 39465 | 0.01 | |
| SBV2 | 77303 | 0.1 | |
| SBV3 | 42597 | 0.34 | |
| SBV4 | 8324 | 0.64 | |
| SBV5 | 27152 | 0.22 | |
| SBV6 | 18622 | 0.39 | |
| SBV7 | 46588 | 0.34 | |
| SBV8 | 9592 | 0.03 | |
| SBV9 | 38545 | 0.04 | |
| Total | 308188 | 2.16 | 24 |

Les caractéristiques pluviométriques

| Paramètres | Unités | SBV1 | SBV2 | SBV3 | SBV4 | SBV5 | SBV6 | SBV7 | SBV8 | SBV9 |
|-----------------------|--------|------|--------|-------|-------|--------|-------|--------|---------|-------|
| Temps de conc | Minute | 0.29 | 0.412 | 0.306 | 0.135 | 0.2439 | 0.202 | 0.3195 | 0.14497 | 0.25 |
| Temps de retour | Ans | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Intensité de la pluie | mm/h | 247 | 246.21 | 247.3 | 249.1 | 247.93 | 248.4 | 247.15 | 248.954 | 245.6 |

Le coefficient de ruissellement

| Matériaux | Coefficient de ruissellement |
|------------------------|------------------------------|
| Bois | 0.1 |
| Champs cultivé | 0.2 |
| Vignes, terrain nus | 0.5 |
| Rochers | 0.7 |
| Routes avec revêtement | 0.9 |
| Routes sans revêtement | 0.7 |
| Toiture | 0.9 |

Méthode rationnelle : $Q_{max} = 0,278 Cr \times I \times A$

$$Q_{max} = 0,278 \times 0,9 \times 0,2491/3600s \times 308188$$

$$Q_{max} = 5.335 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Cr = 0.9, I = 0.2491 \text{ mm/h}, A = 308188 \text{ m}^2$$

On a par la suite :

Où :

P : est la pente de la berge qui est égale à 1 pour le canal ouvert

- Paramètre de section du profil

| Paramètres | A | B | B1 | C | b | Rd |
|--------------|----------|------------|---------|----------|-------------|---------|
| Trapézoïdale | 0.17Hmax | 0.36Hmax+b | 0.36H+b | 0.35Hmax | λH | Hmax/12 |

$$H = 60^{-3/8} \times 0,02^{-3/16} \times 5.335^{3/8} \times (2 + 1)^{-5/8} \times (2 + 2\sqrt{1 + 1^2})^{1/4}$$

$$H = 0,62686815\text{m}$$

$$K = 60 ; I = 0,02, Q = 5,335 \text{ m}^3/\text{s}, \lambda = 2, p = 1$$

- Valeurs des pentes de talus en remblai (CT Cherif, B., 2020)

| Type de matériaux | Remblai (en terrain naturel) | | | |
|-------------------|------------------------------|-----|---------------|------|
| | Zone sèche | | Zone immergée | |
| | H/V | | H/V | |
| Roche compact | 45° | 1/1 | 45° | 1/1 |
| Roc friable | 45° | 1/1 | 45° | 1/1 |
| Débris rocheux | 45° | 1/1 | 45° | 1/1 |
| Terre et pierres | 35° | 3/2 | 30° | 2/1 |
| Terre argileuse | 35° | 3/2 | 20° | 3/1 |
| Gravier et sable | 35° | 3/2 | 30° | 2/1 |
| Sable fin | 30° | 2/1 | 20° | 3 /1 |