



UNIVERSITE
JEAN LOROUGNON GUEDE

UFR ENVIRONNEMENT

REPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union-Discipline-Travail

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

ANNEE ACADEMIQUE :
2018-2019

N° D'ORDRE : 0285/2020

N° CARTE D'ETUDIANT :
CI0414002336

LABORATOIRE :
SCIENCES ET
TECHNOLOGIES DE
L'ENVIRONNEMENT

MASTER

Géologie Appliquée

Option : Géomatériaux - Géotechniques

Etude de la stabilité et de l'étanchéité d'un barrage en terre de rétention d'eaux usées à la mine d'or d'Ity (Ouest de la Côte d'Ivoire)

Présenté par :

SAHAN Tanoh Jean-Fabrice

JURY

Président : M. KOUASSI Kouakou Lazare, Maître de Conférences,
Université Jean Lorougnon GUEDE

Directeur : M. KONAN-WAIDHET Arthur Brice, Maître de Conférences,
Université Jean Lorougnon GUEDE

Encadreur : M. KOUASSI Kouamé Alfred, Maître-Assistant,
Université Jean LOROUGNON GUEDE

Examineur : M. TOURE Née Yao Affoué Berthe, Maître-Assistant,
Université Jean LOROUGNON GUEDE

Soutenu publiquement
le : 12/06/2020

TABLE DES MATIERES	Pages
REMERCIEMENTS	iii
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	v
LISTE DES FIGURES	vi
INTRODUCTION.....	1
Partie 1 : GENERALITES	4
1.1 PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE	5
1.1.1 - Cadre géographique	5
1.1.2 Cadre géologique.....	6
1.1.3 Description du barrage d'Ity	6
1.2 DIFFERENTS TYPES DE BARRAGE.....	9
1.2.1 - Barrages en remblai	9
1.2.2 Barrages en terre.....	10
1.2.2.1 Barrages en terre homogène.....	10
1.2.2.2 Exigences de la conception d'un barrage en terre.....	11
1.2.3 Avantages et inconvénients des barrages en terres	11
1.2.3.1 Avantages	11
1.2.3.2 Inconvénients	12
1.3 Ruptures des barrages en terre.....	12
1.3.1 Causes des ruptures	12
1.3.1.1 Problèmes techniques.....	12
1.3.1.2 Causes naturelles	12
1.3.1.3 Causes humaines	13
1.3.2 Mécanisme de rupture	13
1.3.2.1 Erosion externe.....	13
1.3.2.2 Erosion interne	14
1.3.2.3 Instabilité externe	14
1.3.2.4 Glissement des talus	14
Partie 2 : MATERIEL ET METHODES.....	15
2.1 MATERIEL.....	16

2.1.1 Matériel pour recherche d'emprunt et échantillonnage de matériaux.....	16
2.1.2 Matériel pour essai d'identification.....	16
2.1.2.1 Essai d'analyse granulométrique.....	16
2.1.2.2 Limites d'Atterberg.....	17
2.1.3 Matériel pour essai Proctor.....	18
2.1.4 Matériel pour les essais de densité in situ	19
2.1.5 Matériel pour traitement de données	19
2.2 METHODES	20
2.2-1 Recherche de site d'emprunt.....	20
2.2-2 Essai d'identification	21
2.2-2-1 Analyse granulométrique.....	21
2.2-2-2 Limites d'Atterberg	21
2.2-2-2-1 Limite de liquidité W_L	22
2.2-2-2-2 Limite de plasticité W_P	22
2.2-2-2-3 Indice de plasticité (IP)	22
2.2-3 Essai de compactage (Essai Proctor)	23
2.2-4 Détermination de la masse volumique d'un matériau en place	26
Partie 3 : RESULTATS ET DISCUSSION	27
3.1 Résultats	28
3.1-1 Classification des sols	28
3.1-2 Caractéristiques mécaniques des matériaux.....	39
3.1-3 Récapitulatif des résultats	44
3-2 Discussion	47
CONCLUSION	49
REFERENCES.....	51

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier la Présidente de l'Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG), Professeur TIDOU Abiba Sanogo épouse KONE d'avoir autorisé mon inscription sur la liste des étudiants de l'institution dont elle a la lourde charge de diriger.

J'exprime ma profonde gratitude au Directeur de l'UFR Environnement, Docteur KOUASSI Kouakou Lazare, Maître de Conférences à l'Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG), de m'avoir accepté au sein de l'UFR qu'il dirige.

Je remercie sincèrement tout le personnel du Laboratoire d'Essai et de Contrôle, d'Analyse et d'Assistance Technique, en particulier Monsieur SORO Souleymane Directeur de l'entreprise LECAT et l'Ingénieur géologue, Monsieur OUATTARA Boliguibia notre maître de stage pour l'hospitalité et la formation de qualité qu'ils m'ont donnée.

Mes remerciements vont également à l'endroit de mon Directeur scientifique, Docteur KONAN-WAIDHET Arthur Brice, Maître de Conférences à l'Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG), pour ses conseils et ses remarques pertinents tout au long de ce travail.

Je remercie tout particulièrement mon encadreur, Docteur KOUASSI Kouamé Alfred, pour avoir accepté de diriger ce travail, pour sa confiance, sa disponibilité et ses remarques très pertinentes qui ont été très utiles dans la rédaction de ce mémoire. Je suis reconnaissant envers Docteur SOMBO Abé Parfait, Responsable du parcours géologie appliquée pour ses conseils avisés qui ont été indispensables tout au long de ce travail. Je remercie Docteur YAO Affoué Berthe pour ses remarques pertinentes vis-à-vis de ce travail qui tendent à le rendre plus parfait. J'exprime mes sincères gratitude à Docteur BIE Goha René, le Responsable de filière géomatériaux-géotechniques pour tout l'effort fourni afin que nous ayons de si bons stages. Je remercie également Docteur GBANGBOT Jean Michel Kouadio pour ses conseils depuis le début de cette formation.

Je profite de l'occasion pour adresser mes profondes gratitude à tout le corps enseignant de l'UFR Environnement pour la formation de qualité qu'il dispense à l'Université Jean Lorougnon Guédé UJLoG.

Du fond du cœur, je suis reconnaissant à toute la Famille Tanoh qui m'a apporté sans discontinuité son soutien moral et financier tout au long de ma formation.

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

BRGM	: Bureau de Recherche Géologique et Minière
CBR	: Californian Bearing Ratio
CIGB	: Comité Internationale des Grands Barrages
Dmax	: diamètre maximal
GPS	: Géolocalisation Par Satellite
GTR	: Guide de Terrassement Routier
IC	: Indice de Consistance
INS	: Institut Nationale de la Statistique
IP	: Indice de Plasticité
IPI	: Indice Portant Immédiat
LECAT	: Laboratoire d'Essais, de Contrôle et d'Assistance Technique
LL	: Limite de Liquidité
LP	: Limite de Plasticité
MEDD	: Ministère de l'Environnement et du Développement Durable
PSD	: Particules Sieves Distribution
TSF	: Tailing Storage Facility
UFR	: Unités de Formation et de Recherche

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Différents états hydriques selon le guide de terrassement routier	25
Tableau II : Limite de gradation de la zone A.....	28
Tableau III : Limite de gradation de la zone C.....	29
Tableau IV : Tableau granulométrique échantillon 1.....	30
Tableau V : Paramètres de nature échantillon 1	31
Tableau VI:Tableau granulométrique échantillon 2.....	32
Tableau VII : Paramètres de nature de l'échantillon 2.....	33
Tableau VIII : Tableau de granulométrie de l'échantillon 3	34
Tableau IX : Paramètres de nature de l'échantillon 3	35
Tableau X :Tableau granulométrique.....	36
Tableau XI : Paramètres de nature	37
Tableau XII : Tableau granulométrique échantillon 5	38
Tableau XIII : paramètre de nature de l'échantillon 5.....	39
Tableau XIV : Tableau de compactage de l'échantillon 1.....	39
Tableau XV : Tableau de compactage de l'échantillon 2	40
Tableau XVI : Tableau de compactage de l'échantillon 3.....	42
Tableau XVII : Tableau de compactage de l'échantillon 4	43
Tableau XVIII : Tableau de compactage de l'échantillon 5	44
Tableau XIX : Tableau récapitulatif des résultats d'identification	45

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation du village d'Ity.....	5
Figure 2 : Cartographie du barrage d'Ity	8
Figure 3 : Digue Ouest du barrage d'Ity.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 4 : Catégories des barrages en remblai (Anton & Pougatsch, 2011)	10
Figure 5 : Profil du barrage homogène.....	11
Figure 6 : Matériel de prélèvement de matériau.....	16
Figure 7: Matériel pour essais d'identification.....	17
Figure 8 : Matériel pour essai Proctor	18
Figure 9 : Matériel pour essai de densité in situ.....	19
Figure 10 : Réalisation de puits.....	20
Figure 11 : Limites d' Atterberg	22
Figure 12 : Pesée de l'éprouvette	24
Figure 13 : Essai de densité en cours	26
Figure 14 : Courbe granulométrique échantillon 1	30
Figure 15 : Courbe granulométrique échantillon 2	32
Figure 16 : Courbe granulométrique	34
Figure 17 : Courbe granulométrique échantillon 4	36
Figure 18 : Courbe granulométrique échantillon 5	38
Figure 19 : Courbe Proctor.....	40
Figure 20 : Courbe Proctor échantillon 2	41
Figure 21 : Courbe Proctor échantillon 3	42
Figure 22 : Courbe Proctor échantillon 4	43
Figure 23 : Courbe Proctor.....	44

INTRODUCTION

Un barrage est un ouvrage d'art construit en travers d'un cours d'eau et destiné à en réguler le débit et/ou à stocker de l'eau, notamment pour le contrôle des crues, l'irrigation, l'industrie, l'hydroélectricité, la pisciculture, une réserve d'eau potable etc. (Chethata, 2016)

Les barrages sont des constructions particulières du point de vue technique et économique, cela justifie certainement les hautes exigences imposées en ce qui concerne l'étude du projet, la conception et l'exploitation. En effet, le choix du type de barrage nécessite la prise en compte de plusieurs facteurs, dont la forme de la vallée (morphologie), la géologie, les conditions climatiques et la disponibilité des matériaux de construction, en vue de choisir la variante la plus économique tout en garantissant le plus haut degré de sécurité, et en minimisant le risque de rupture de l'ouvrage.

Il existe deux grandes familles de barrages, selon le matériau de construction utilisé : ceux construits en béton et ceux construits en remblai (terre ou enrochement). Les barrages en remblai sont constitués de matériaux locaux meubles, qu'ils soient très fins (argiles) ou très grossiers (enrochements) ; certains auteurs ont présenté les types possibles de barrages (dans le cas des petits barrages) qui sont réalisés suivant la granularité des matériaux en place (Alonso et al., 2002).

Les ingénieurs et chercheurs se sont toujours heurtés aux problèmes épineux de l'instabilité des talus tant naturels qu'artificiels et cela à cause de nombreux accidents survenus aux barrages et des innombrables catastrophes qu'ils engendrent causant des pertes en vies humaines considérables ainsi que des dégâts matériels ; le 5 juin 1976, aux Etats Unis la rupture d'un barrage en terre fait périr 11 personnes et 13 000 têtes de bétail (Comité Internationale des Grands Barrages, 1993). Le 25 avril 1998 en Espagne dans une mine à ciel ouvert, la digue d'un barrage cède et laisse passer une vague de boue et d'eaux acides polluant ainsi 7000 ha de pâturages et 3500 ha de cultures (Commission Européenne, 1998) ; en 2010, en Mozambique, la rupture d'une retenue de résidus minier pollue une vaste zone dans la région environnante (DIMENC, 2014). Vu les nombreux dégâts que provoque la rupture des barrages en terre, il est nécessaire de connaître les conditions requises et les caractéristiques des matériaux utilisables pour la construction de tels ouvrages en Côte d'Ivoire afin d'éviter que de telles catastrophes s'y produisent. C'est dans ce contexte que se situe cette étude.

Le barrage d'Ity est un barrage en terre meuble (remblai) construit dans le but de stocker l'eau cyanurée provenant de l'usine de traitement d'or et d'empêcher au maximum son infiltration afin d'éviter la pollution de la nature et les nappes souterraines. Les infiltrations dans le corps du barrage sont les principales causes des instabilités des digues en terre. La rupture du barrage n'aurait probablement aucune conséquence sur les personnes en absence d'habitations aux alentours. Cependant, l'impact sur l'environnement pourrait être très important. C'est donc pour résoudre ce problème épineux de l'instabilité de la digue afin de réduire au maximum le risque de rupture que ce travail a été initié.

Quelles sont donc les exigences de la conception d'un barrage en terre en vue de garantir sa stabilité à long terme ? En effet, la qualité de ces ouvrages et leur résistance à tous genres d'intempéries à travers l'histoire nécessite une certaine maîtrise et expérience dans les travaux de conception de l'ouvrage. En se référant au cas du barrage d'Ity, nous proposons les différentes techniques et méthodes à suivre pour garantir la stabilité de la digue d'un barrage en terre.

L'objectif principal de cette étude est de proposer les techniques de construction d'une digue dans le cas d'un barrage en terre afin d'assurer sa stabilité et son étanchéité.

Il s'agira de :

- Identifier les caractéristiques des matériaux utilisés
- Déterminer le compactage optimal des matériaux utilisés dans la construction et contrôler le compactage des couches de la digue.

Pour une bonne organisation de ce mémoire, notre travail se présentera en trois parties qui sont :

- Partie 1 : GENERALITES, qui abordera tous les aspects de ce sujet de façon générale
- Partie 2 : MATERIEL ET METHODES, qui présentera le matériel ainsi que les méthodes qui permis de réaliser ce travail
- Partie 3 : RESULTATS ET DISCUSSION, qui présentera les résultats obtenus qui seront par la suite discutés.

Enfin nous terminerons par une conclusion suivie de perspectives.

Partie 1 : GENERALITES

1.1 PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

1.1.1 - Cadre géographique

Le village d'Ity, de coordonnées 6°87' 00'' nord et 8°12' 00'' ouest est un village situé à l'Ouest de la Côte d'Ivoire dans le département de Danané (Figure 1). Le village d'Ity se trouve à 740 km de la ville d'Abidjan. On y accède en passant par la ville de Man. Quinze (15) kilomètres séparent Zouan-Hounien, le chef-lieu de Sous-préfecture de la localité d'Ity. Le secteur d'Ity est moyennement accidenté avec des altitudes variant entre 255 m au bord du fleuve Cavally et 450 mètres.

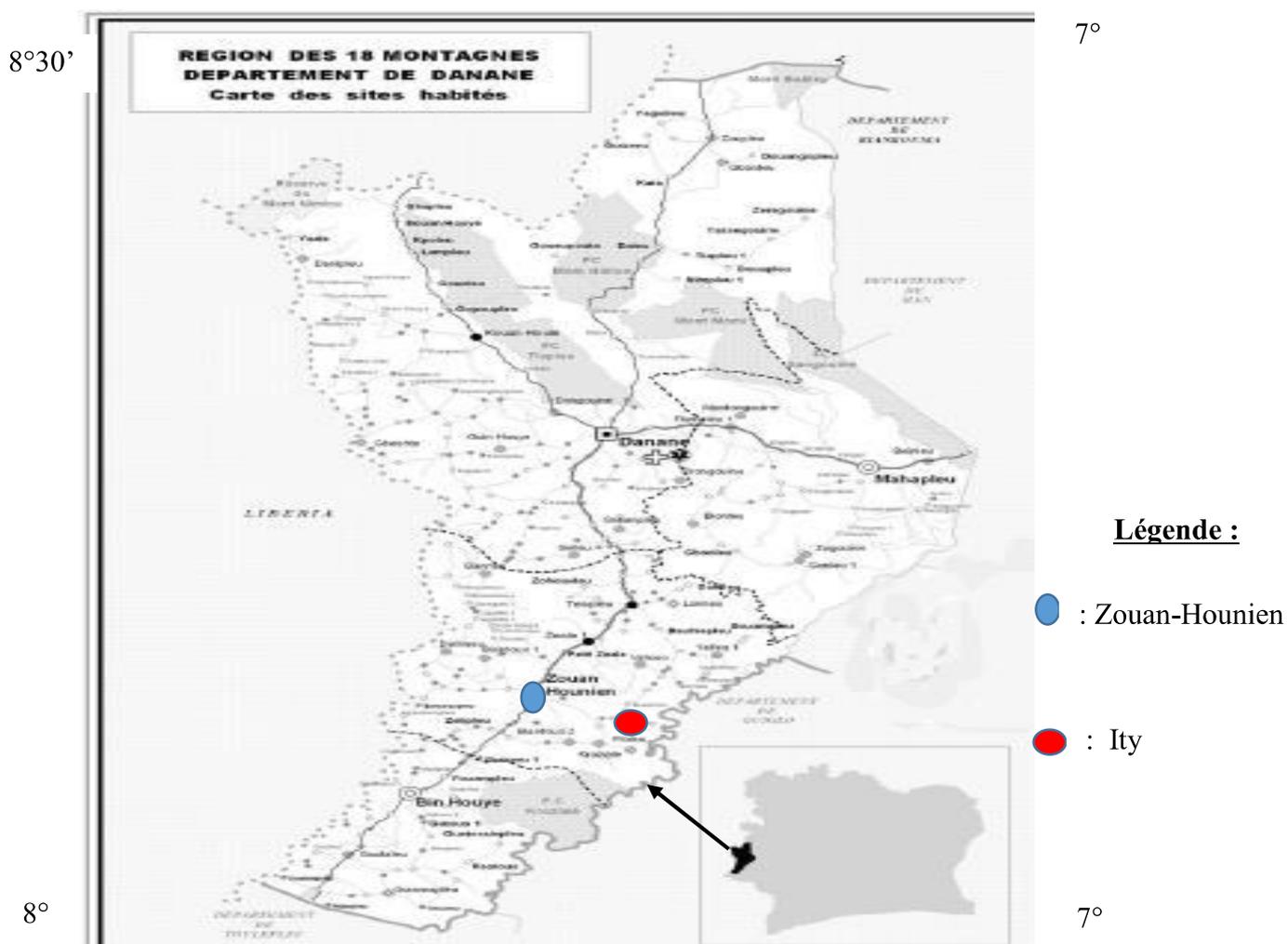


Figure 1 : Localisation du village d'Ity

La région appartient à une zone forestière qui couvre à la fois le Liberia, la Côte d'Ivoire et l'Ouest de la Guinée (Dian *et al.*, 1974). Cependant, celle-ci a été en partie défrichée, notamment pour permettre la culture du café ou du cacao. Le climat est intermédiaire entre le climat tropical humide de la basse côte et le climat à deux saisons des régions plus septentrionales. Le principal cours d'eau qui traverse le site est le Cavally.

Du point de vue socioéconomique, la population d'Ity est constituée en majorité d'autochtones Yacouba et d'allogènes composés de Malinké, de Bété, de Guéré ... et d'habitants des pays voisins (Maliens, Guinéens, Libériens et Burkinabè ...). L'agriculture est la principale activité de la région. Les produits de base sont essentiellement le café, le cacao, le manioc, le riz et la banane. L'orpaillage clandestin fait également partie des activités économiques de la région. Selon le dernier recensement de 2014, la population d'Ity est estimée à 1231 habitants (INS, 2014).

1.1.2 Cadre géologique

La région d'étude marquée par la présence d'une couverture végétale dense. Le gisement aurifère d'Ity est situé dans l'unité birimienne Toulépleu-Ity localisée à l'Ouest de la faille du Sassandra, dans le domaine Kénema-Man. Cet ensemble s'oriente selon une direction NE-SW (BRGM, 1980). D'un point de vue morphologique cette région est caractérisée par des reliefs forts accidentés et s'oppose au reste du pays qui présente des reliefs peu accidentés. Le contexte géologique et tectonique de cette région s'intègre dans l'histoire du craton Ouest africain en général et de la dorsale de Man en particulier. Au niveau hydrogéologique on y rencontre deux aquifères : les aquifères des altérites et les aquifères fissurés ou fracturés. D'un point de vue géotechnique le sol d'Ity est dominé par une épaisse couche d'argile et de limon.

1.1.3 Description du barrage d'Ity

Le barrage de la mine d'Ity est un barrage en remblai constitué de matériaux meubles. C'est un barrage en terre homogène conçu dans le but d'y déverser les déchets miniers. L'étanchéité du parement amont de la digue est assurée par une couche d'argile imperméable large de 2 mètres, compactée qui constitue la zone A de la digue et le reste constitue la zone C. Le parement amont

de la digue est recouvert d'une géomembrane permettant ainsi de renforcer son étanchéité. La figure 2 présente une cartographie de l'ensemble du barrage et la figure 3 montre les différentes zones de la digue.

La localité de Ity connaît des variations saisonnières extrêmes en ce qui concerne les précipitations de pluie mensuelles. La période pluvieuse de l'année dure 11 mois, du 25 janvier au 24 décembre, avec une chute de pluie d'au moins 13 millimètres une période glissante de 31 jours (METEOSAT, 2019).

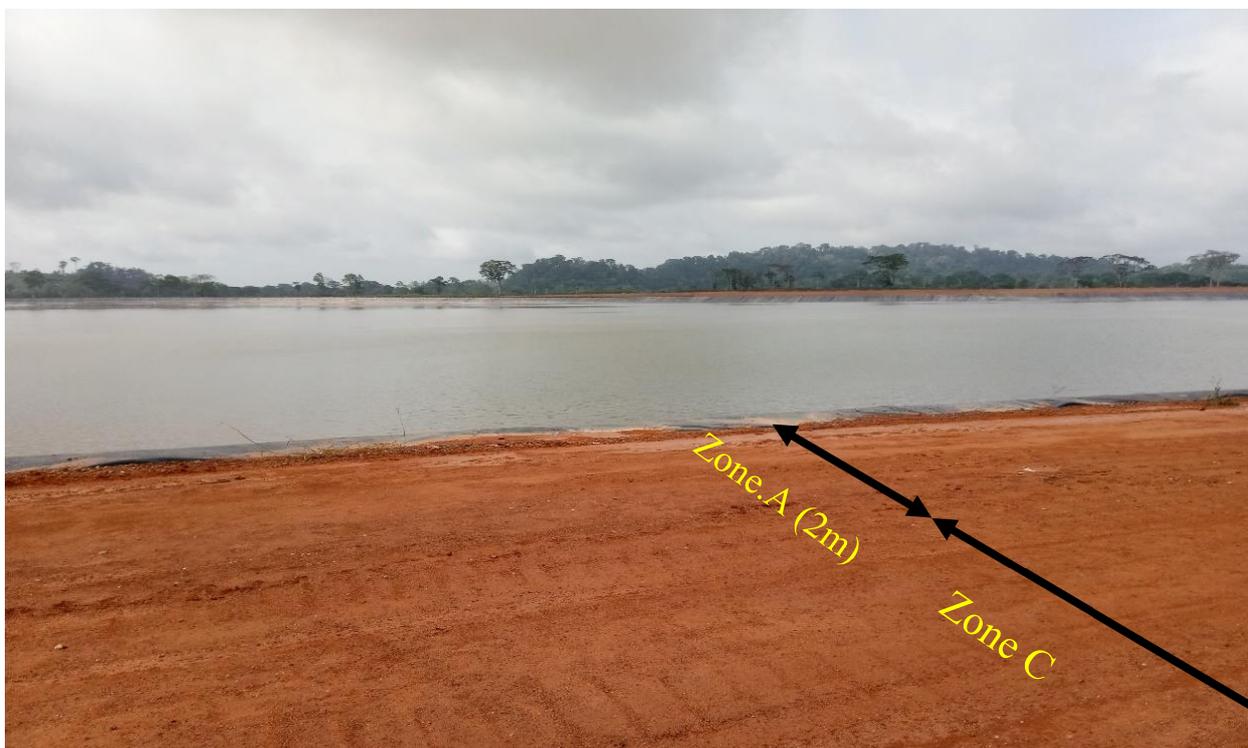


Figure 2 : Digue Ouest du barrage d'Ity

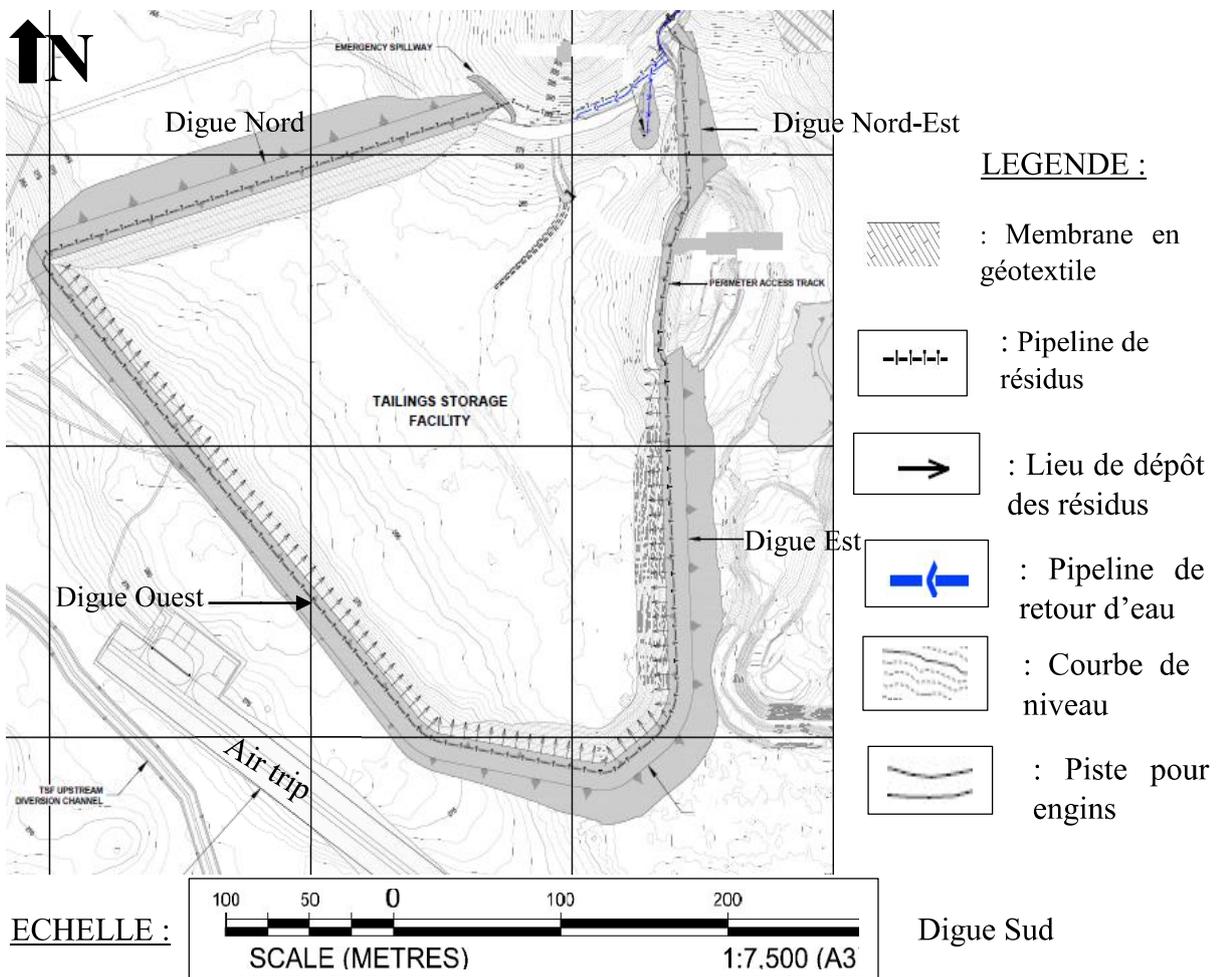


Figure 3 : Cartographie du barrage d'Ity

1.2 DIFFERENTS TYPES DE BARRAGE

Les barrages forment avec le terrain sur lequel ils sont construits un ensemble indissociable : à chaque site, un type de barrage, un dimensionnement adapté tant sur le plan technique qu'économique (Foster & Feli, 1999). Il n'existe alors pas de barrage type standard. En se contentant de définir quelques grandes catégories, on peut commencer par classer les barrages en fonction du matériau qui les constitue. En effet, selon ce critère, on classe les barrages selon deux grandes catégories :

- Les barrages en béton (la maçonnerie autrefois). Ce type de barrage autorise des formes qui tiennent compte de la qualité du sol de fondation et de la forme de la vallée. Ce sont :
 - les barrages poids
 - les barrages en voûte
 - les barrages en contrefort
- Les barrages en remblai (la terre, les enrochements), construits à partir des géomatériaux (Delliou, 2008).

1.2.1 - Barrages en remblai

On appelle barrage en remblai tous les barrages construits avec des matériaux terreux. Cette famille de barrage regroupe plusieurs catégories différentes par les types de matériaux utilisés et la méthode employée pour assurer l'étanchéité (Belokonev, 1981). On choisit ce type d'ouvrage lorsque la vallée est trop large et lorsqu'on trouve les matériaux sur place ou à faible distance. Ce type de barrage constitué de terre ou d'enrochements comporte généralement un noyau central d'argile qui assure l'étanchéité (Gerard, 1997). Dans certains ouvrages, l'étanchéité est assurée par un masque amont en béton ou une géomembrane interne.

On distingue deux catégories de barrage en remblai détaillées à la figure 4 :

- Les barrages en terre, réalisés à partir de sols naturels meubles prélevés à proximité du site de l'ouvrage, le cas du barrage d'Ity.
- Les barrages en enrochement, dont la majeure partie est constituée de matériau de carrières concassé

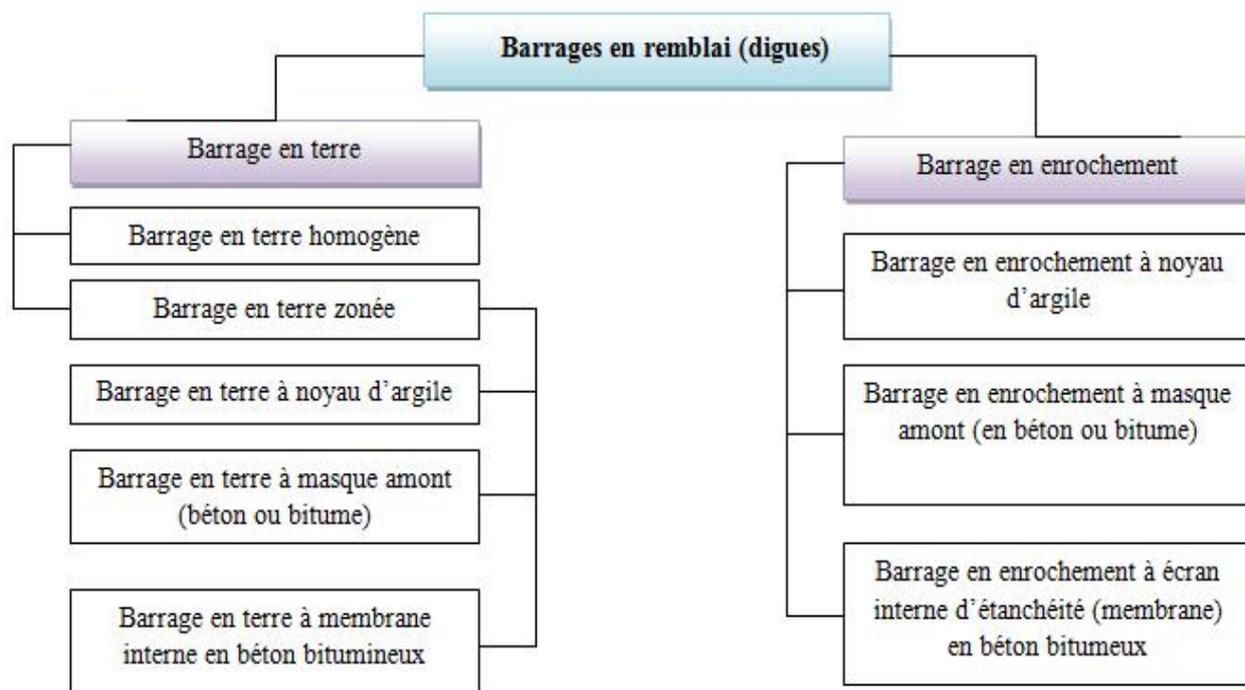


Figure 4 : Catégories des barrages en remblai (Anton & Pougatsch, 2011)

1.2.2 Barrages en terre

Il existe trois types de barrages en terre, (les ouvrages en terre homogènes, ceux à noyaux d'argile et ceux à masques amont) qui diffèrent en fonction des matériaux utilisés et de la méthode utilisée pour assurer l'étanchéité du barrage (Bonelli, 2011). Celui de Ity est en terre homogène.

1.2.2.1 Barrages en terre homogène

Le barrage réalisé à Ity est en terre homogène. A proximité du site, on trouve une grande quantité de sol pratiquement imperméable qui est le plus souvent argileux remplissant simultanément les deux fonctions d'écran et de masse (figure 5).

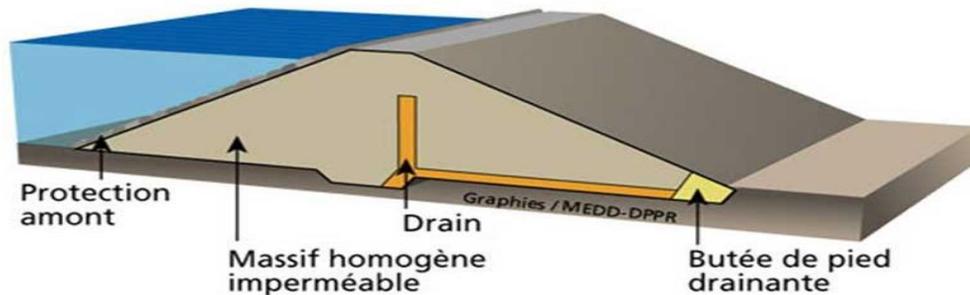


Figure 5 : Profil du barrage homogène

1.2.2.2 Exigences de la conception d'un barrage en terre

Sur le plan technique, la conception d'un barrage répond à deux exigences principales (Heragmi, 2009) :

- Stabilité pendant et après l'exploitation (résistance aux diverses sollicitations extérieures) ;
- Etanchéité, tant au niveau de la fondation qu'au niveau des digues.

Selon Delliou, (2003), si la première de ces conditions impose d'établir par le calcul une justification des ouvrages à construire, après reconnaissances géologique et géotechnique du site la seconde condition nécessite quant à elle une bonne connaissance des règles de l'art en termes d'exécution des travaux d'édification et de protection des digues (surveillance et maintenance).

De manière générale, pour mener à bien un projet de réalisation d'un bassin d'exploitation et satisfaire à *minima* ces deux conditions, l'intervention de spécialistes est impérative.

1.2.3 Avantages et inconvénients des barrages en terres

1.2.3.1 Avantages

Les barrages en terre ont plusieurs avantages :

- utilisation des matériaux locaux pour la construction du barrage
- ils s'adaptent à peu près à n'importe quelle fondation
- structure très peu sensible aux tassements et au séisme
- contraintes très faibles sur le sol de fondation
- excavations limitées.

1.2.3.2 Inconvénients

Ces barrages en terre ont également quelques inconvénients :

- impossibilité de conduire le débit de la crue à travers l'ouvrage
- gradient hydraulique important sous la fondation de la plinthe. (Cas barrage à masque)
- disponibilité de matériaux argileux en grande quantité à proximité du site.
- mise en place du noyau argileux impossible, lors de conditions météorologiques défavorables. (Cas du barrage à noyau).

1.3 Ruptures des barrages en terre

La Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB) formule la définition de la rupture comme suit : rupture d'une partie du barrage ou de sa fondation, tel que l'ouvrage ne puisse retenir l'eau. En général, le résultat sera une lâchure d'un volume d'eau important, entraînant des risques pour les personnes ou les biens en aval (Scheleiss et *al.*, 2011).

1.3.1 Causes des ruptures

Les causes de rupture d'ouvrage peuvent être de différents ordres.

1.3.1.1 Problèmes techniques

Les problèmes techniques peuvent entraîner la rupture d'un ouvrage. Il peut s'agir d'un défaut de fonctionnement des vannes permettant l'évacuation des crues ou bien d'un vice de conception, de construction ou de matériaux. Le type de barrage, les matériaux utilisés, la nature des fondations ainsi que l'âge de l'ouvrage vont avoir une influence sur l'apparition de ces problèmes (Calier, 1992). Cependant, l'évolution des techniques de construction rend les barrages modernes beaucoup plus sûrs.

1.3.1.2 Causes naturelles

Des causes naturelles peuvent également être à l'origine de rupture de barrage. Il en est ainsi des crues exceptionnelles, d'intensité supérieure à celle retenue pour le dimensionnement des ouvrages évacuateurs, appelée crue de projet. Les barrages en remblai ne supportent pas la submersion et sont donc plus vulnérables aux débordements. La phase de chantier pour les barrages en

construction est une période sensible aux risques de crue, car les ouvrages d'évacuation ne sont pas encore opérationnels (Romain, 2007).

Les glissements de terrains, soit de l'ouvrage lui-même dans le cas de barrages en remblai, soit des terrains entourant la retenue sont également une cause de rupture. L'ouvrage peut être déstabilisé par un glissement ou bien submergé par la vague engendrée par un glissement en amont de la retenue. Enfin les séismes peuvent causer des dommages mineurs à ne pas négliger (déformations, tassements, fissures, etc.). Les ruptures de barrages dues aux séismes sont d'ailleurs très rares.

1.3.1.3 Causes humaines

Des causes humaines peuvent enfin être à l'origine d'accidents : études préalables pas assez approfondies, contrôle d'exécution insuffisant, erreurs d'exploitation, défaut de surveillance et d'entretien ou encore actes de malveillance, sabotage, attentat, guerre (les barrages sont néanmoins protégés par la convention de Genève) (MEDD, 2004).

1.3.2 Mécanisme de rupture

Le risque de rupture brusque et inopinée est considéré comme très faible, voire nul. La situation de rupture paraît plutôt liée à une évolution plus ou moins rapide d'une dégradation de l'ouvrage susceptible d'être détectée par la surveillance et l'auscultation.

Pour les ouvrages hydrauliques en remblai, quatre mécanismes de rupture sont classiquement considérés : l'érosion externe, l'érosion interne, l'instabilité externe et le glissement des talus.

1.3.2.1 Erosion externe

L'érosion externe est engendrée par des circulations d'eau, même peu importantes, sur la crête des barrages. Le mécanisme d'érosion s'amorce à partir du bord aval de la crête et progresse jusqu'à ce qu'une brèche soit ouverte. Le phénomène peut durer quelques minutes à quelques heures selon la taille des matériaux, leur cohésion, le revêtement de la crête, la hauteur de l'eau qui s'écoule au-dessus du barrage.

Le mécanisme de rupture par érosion externe correspond à l'arrachement des particules constituant la digue par le courant de la rivière qui peut éroder la digue jusqu'à sa rupture. D'autres phénomènes, tel que le ruissellement des eaux de pluies, peut également être à l'origine de l'érosion

externe. Les talus des digues côté fleuve ainsi que ceux des berges, subissent en crue les effets des courants hydrauliques qui peuvent provoquer des érosions à la base des talus.

On distingue trois mécanismes d'érosion externe :

- Le mécanisme d'affouillement : érosion externe au pied de la berge
- Le mécanisme d'érosion externe lié au courant et aux chocs d'embâcles.
- Le mécanisme de surverse « du cours d'eau vers le val protégé ».

1.3.2.2 Erosion interne

Les travaux de Romain, (2007) ont montré que l'érosion interne se manifeste par une migration de particules à travers des chemins préférentiels dans le corps du barrage ou sa fondation. Aussi a-t-il indiqué que l'érosion interne est provoquée par une haute vitesse des percolations ou des filtres mal conçus. Le conduit de fuite s'agrandit jusqu'à engendrer la ruine de l'ouvrage.

1.3.2.3 Instabilité externe

Ce cas de rupture concerne un glissement en masse d'un volume important du corps du barrage et/ou de sa fondation qui se déplace le long d'une surface de rupture.

Les cas relatifs aux érosions interne et externe, ainsi que celui du glissement de masse ont des causes en rapport avec la géotechnique des barrages (Scheleiss et *al.*, 2011).

1.3.2.4 Glissement des talus

Il existe deux mécanismes de glissement :

- Le glissement du talus côté aval, se produisant le plus souvent durant la crue;
- Le glissement du talus côté fleuve, se produisant lors de la décrue.

Partie 2 : MATERIEL ET METHODES

2.1 MATERIEL

2.1.1 Matériel pour recherche d'emprunt et échantillonnage de matériaux

Un site d'emprunt est un lieu où l'on viendra prendre les matériaux de construction si les résultats des essais sont concluants. Il faut donc préalablement réaliser des essais sur certains échantillons de sol de ce site.

Pour la recherche des sites d'emprunt certains éléments ont été nécessaires (Figure 6). Ce sont :

- une pelle pour échantillonner (A)
- des sacs de prélèvement (B)
- un GPS pour prendre les coordonnées (C)
- une pelle hydraulique pour réaliser les puits (D)



Figure 6 : Matériel de prélèvement de matériau

2.1.2 Matériel pour essai d'identification

Au laboratoire de la mine d'Ity deux essais d'identification des matériaux ont été réalisés.

Il s'agit de :

- L'essai d'analyse granulométrique
- La détermination des limites d'Atterberg

2.1.2.1 Essai d'analyse granulométrique

L'essai d'analyse granulométrique permet de connaître la dimension des particules constituant un sol ainsi que sa classe. Il a été réalisé à l'aide du matériel suivant (Figure 7) :

- des gants (G), des tamis de 0,075 mm et 0,6 mm pour le lavage (A)
- une balance électronique pour peser le matériau (B)

- une étuve ventilée à $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ pour le séchage (C)
- une autre série de tamis de diamètre allant de 0,075 mm à 300 mm pour tamiser le matériau après séchage (A)

2.1.2.2 Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg permettent de déterminer la sous classe d'un matériau.

Pour cet essai le matériel est composé des éléments ci-dessous listés et illustrés en (Figure 7) :

- un tamis module 27 pour tamiser l'échantillon (A)
- appareil de Casagrande (D)
- une spatule pour malaxer le matériau (F)
- des tares pour limites de liquidité et de plasticité (E)
- une balance électronique pour peser les échantillons (B)
- une étuve (C)

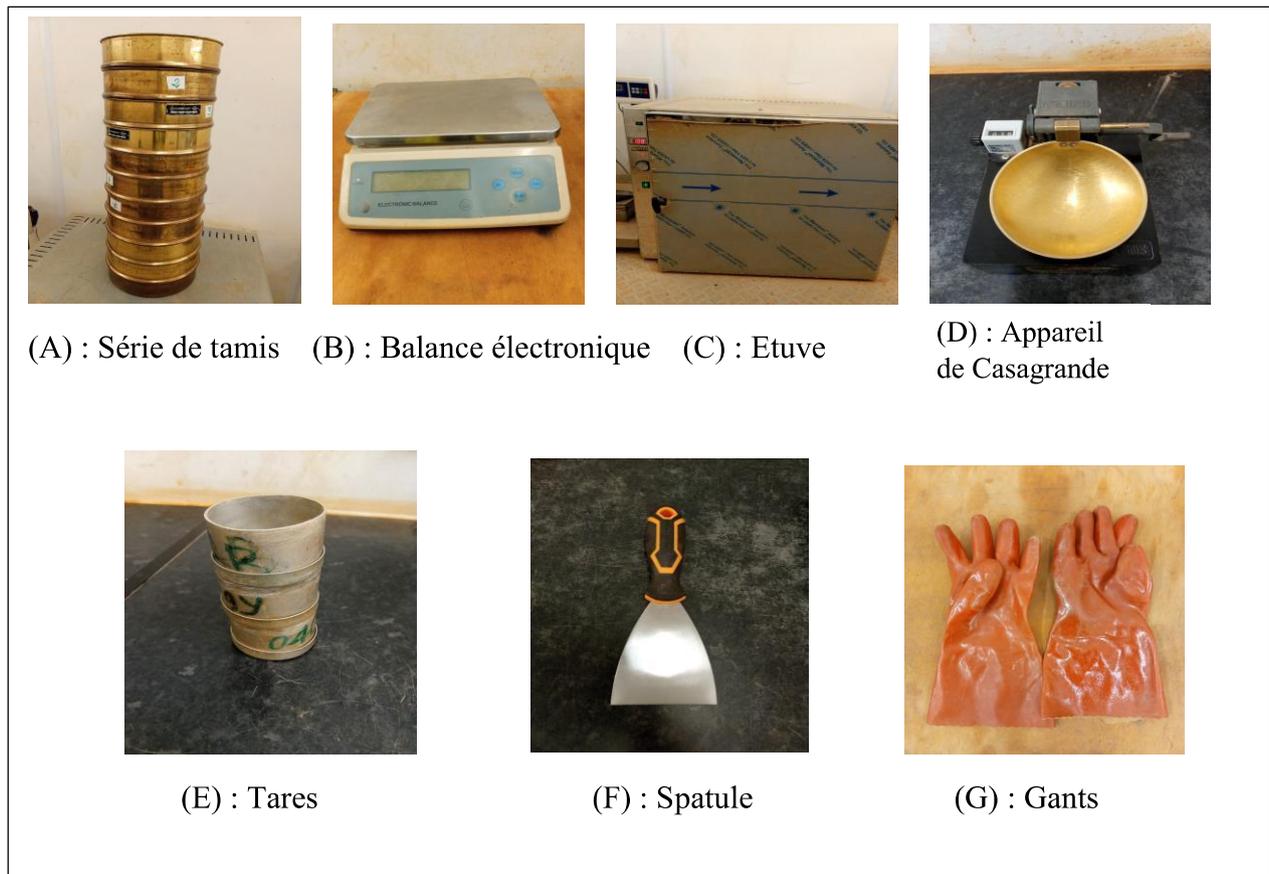


Figure 7: Matériel pour essais d'identification

2.1.3 Matériel pour essai Proctor

L'essai Proctor permet de connaître les caractéristiques physiques d'un sol ainsi que les conditions de sa mise en remblai.

Pour réaliser cet essai il a fallu le matériel suivant :

- un tamis module 44 pour tamiser le matériau (E)
- des sachets plastiques pour échantillonner le matériau
- une balance électronique pour peser le matériau (image B figure 7)
- une moule Proctor (A) dans laquelle le matériau est compacté
- une dame (B) de 2,492 kg pour compacter le matériau
- une lame pour araser (C)
- des tares pour les teneurs en eau (D)
- des pinces pour nettoyer l'éprouvette (F)

L'ensemble de ce matériel est illustré par les photos de la figure 8



Figure 8 : Matériel pour essai Proctor

2.1.4 Matériel pour les essais de densité in situ

La densité in situ permet de contrôler le compactage sur la digue par la détermination du degré de compactage des couches.

Cet essai est réalisé à l'aide de l'ensemble du matériel listé ci-dessous et en photos de la figure 9 :

- une plaque de densité qui est un instrument permettant de faire le trou (A)
- un marteau et un burin pour creuser (C)
- un mètre pour mesurer le trou
- un cône de densité contenant le sable de mer (S)
- sable de mer avec un $D_{\max} \leq 2$ mm et de densité apparente connue qui sera renversé dans le trou
- des tares pour la mesure de la teneur en eau (D figure 8)
- une balance électronique pour peser les matériaux (B figure 7)

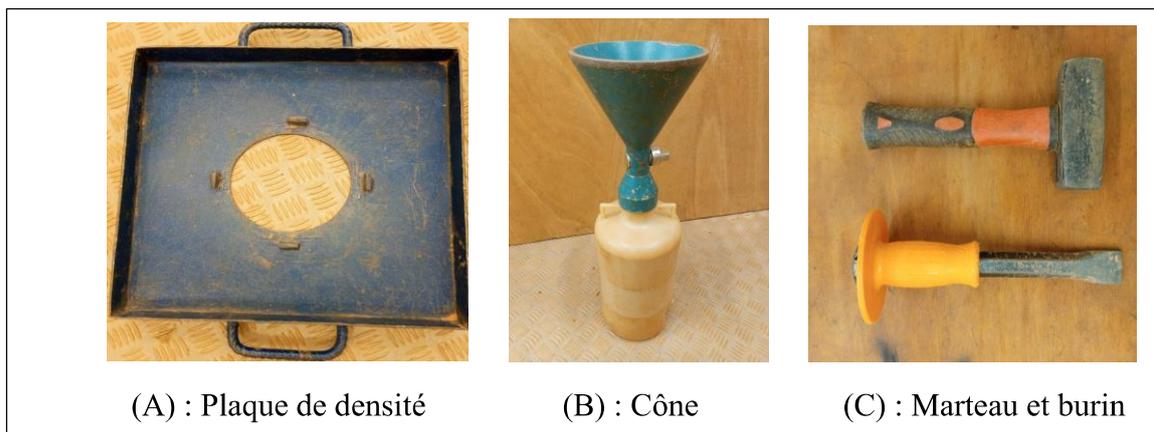


Figure 9 : Matériel pour essai de densité in situ

2.1.5 Matériel pour traitement de données

Ce sont des logiciels qui ont permis de traiter et d'interpréter les données numériques. Ce sont donc :

- le programme Excel qui a permis de tracer les différentes courbes et tableaux.
- Word qui a permis de rédiger les différents rapports.

2.2 METHODES

La méthodologie mise en œuvre est spécifique à chaque essai. Des essais d'identification des sols sont réalisés sur chaque échantillon (l'analyse granulométrique, la détermination des limites d'Atterberg et de la teneur en eau naturelle) et un essai de compactage (essai Proctor).

2.2-1 Recherche de site d'emprunt

Sur le terrain, une grille de prospection est d'abord réalisée en fonction de la dimension du terrain. Ensuite, à des endroits spécifiques des puits de reconnaissance sont effectués à l'aide d'une pelle mécanique à raison d'une profondeur allant de zéro à trois mètres (0-3 m) et de trois à cinq mètres (3-5 m) comme le présente la figure 10. Pour chaque puits, il y'a deux niveaux de profondeurs, donc deux échantillons de sable par puits. Une fois au laboratoire, les deux échantillons sont mélangés avant le séchage à l'étuve pendant 24h. Le 19 décembre 2019, Nous avons prélevé cinq (05) échantillons sur 05 différents sites à proximité du barrage.



Figure 10 : Réalisation de puits

2.2-2 Essai d'identification

Il est essentiel de connaître les caractéristiques des sols utilisés dans la construction des digues. L'utilisation des terres en remblai est d'abord directement liée à leur classification et à leur comportement lors de leur mise en place. Dans le laboratoire LECAT de la mine, la classe du matériau est définie à partir de l'essai d'analyse granulométrique et de l'essai de limite d'Atterberg.

2.2-2-1 Analyse granulométrique

C'est un ensemble d'opération aboutissant à la séparation des grains selon la taille des particules sédimentaires constituant un échantillon. Des tamis à maille carrée sont utilisés afin d'obtenir une représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension. L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Le mode opératoire est défini par la norme française (norme NF P 94-056). Les masses des différents refus ou celles des différents tamisats sont rapportées à la masse initiale de matériau, les pourcentages ainsi obtenus sont exploités, soit sous leur forme numérique, soit sous une forme graphique (courbe granulométrique).

2.2-2-2 Limites d'Atterberg

En 1905, Atterberg a défini des teneurs en eau fixant les limites entre les 3 états : solide, plastique, liquide (Faiza et al., 1930). Les limites d'Atterberg sont déterminées selon la norme française (norme NF P 94-051) et par la méthode à la coupelle avec l'appareil de Casagrande. Elle a pour but de déterminer la teneur en eau des différents sols prélevés à leur passage de l'état plastique à l'état liquide (figure 11). Cet essai se pratique sur la fraction de sol dont les particules ont une dimension inférieure à 0,42 mm. Si à un échantillon de sol préalablement desséché et pulvérisé, on fait croître la teneur en eau de façon homogène par malaxage, il passe progressivement de l'état solide, à l'état plastique puis à l'état liquide.

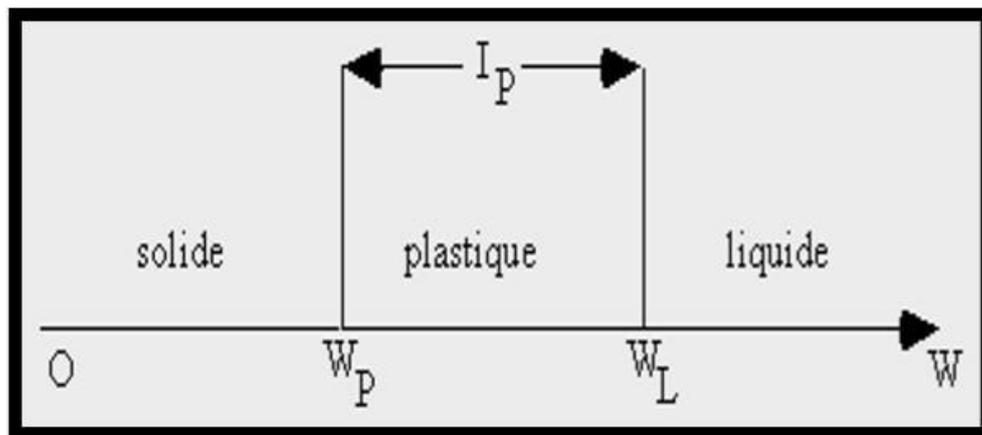


Figure 11 : Limites d' Atterberg

2.2-2-2-1 Limite de liquidité W_L

Le mortier est placé dans une coupelle et est séparé en 2 parties par une rainure. Des coups secs sont imprimés à la coupelle avec un appareillage spécial. Par définition, la limite de liquidité est la teneur en eau pour laquelle les deux lèvres de la saignée se rejoignent sur une longueur supérieure à 1 cm pour un nombre de coups donnés à la coupelle compris entre 15 - 35 (Norme NF P 94-051).

2.2-2-2-2 Limite de plasticité W_P

C'est la teneur en eau d'un sol remanié caractérisant le point de transition entre un état plastique et un état solide.

2.2-2-2-3 Indice de plasticité (IP)

Il donne l'étendue du domaine plastique du sol entre les limites de liquidité et de plasticité (équation 1) :

$$I_P = W_L - W_P \quad (1)$$

La plasticité d'un sol (c'est-à-dire sa faculté de devenir très déformable en absorbant de l'eau) est appréciée par le couple (W_L, I_P) qui dépendent de la nature des minéraux argileux contenus dans le sol et de leur quantité. C'est ainsi que Casagrande a défini un diagramme dit "Abaque de plasticité de Casagrande" qui permet de classer les sols fins.

Après avoir réalisé ces essais d'identification la classe du matériau est défini selon le système de classification GTR 92, qui est un guide rédigé (suivant la norme NF P 11300) pour spécifier les conditions de classification en fonction de plusieurs paramètres. Les matériaux sont répartis en 4 classes :

- **Classe A** : sols fins,
- **Classe B** : sols sableux et graveleux avec fines,
- **Classe C** : sols comportant des fines et des gros éléments,
- **Classe D** : sols insensibles à l'eau.

2.2-3 Essai de compactage (Essai Proctor)

Les caractéristiques de compactage Proctor d'un matériau sont déterminées à partir des essais dits : Essai Proctor normal ou Essai Proctor modifié.

Les deux essais sont identiques dans leur principe, seules diffèrent les valeurs des paramètres qui définissent l'énergie de compactage appliquée.

Le principe de ces essais consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et à le compacter, pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnelle. Pour chaque valeur de teneur en eau considérée, on détermine la masse volumique sèche du matériau et on trace la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau. D'une manière générale, cette courbe appelée courbe Proctor présente une valeur maximale de la masse volumique du matériau sec qui est obtenue pour une valeur particulière de la teneur en eau. Ce sont ces deux valeurs qui sont appelées caractéristiques optimales de compactage Proctor.

Pour les travaux de construction de digue, c'est le Proctor normal qui est recommandé. Il consiste à confectionner au minimum 5 moules compactés successivement selon la norme NF P 94-093. On prélève 5 échantillons de 3 kg chacun. Ces échantillons sont dosés à des teneurs en eau différentes puis compactés en 3 couches à raison de 25 coups de dame (2,5 kg) par couche (figure 12). On arrête l'essai lorsque la densité sèche du matériau chute.



Figure 12 : Pesée de l'éprouvette

- **Expression des résultats de l'essai Proctor**

Pour chaque éprouvette compactée, il convient de calculer :

- La teneur en eau (W)
- La masse volumique du matériau sec (ρ_s)

Ensuite on trace la courbe ajustée sur les points expérimentaux. Cette courbe présente un maximum dont les coordonnées sont la masse volumique sèche optimum (exprimée en t/m^3) et la teneur en eau optimum (exprimée en pourcentage) calculées suivant ces équations :

- $m_h = m_{th} - m_M$ (2)

- $\rho_h = \frac{m_h}{v_M}$ (3)

- $\rho_s = \frac{\rho_h}{100 + w\%} \times 100$ (4)

- avec $w\% = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100$ (5)

- ✓ m_{th} : masse totale humide
- ✓ m_h : masse humide
- ✓ m_s : masse sèche
- ✓ m_M : masse du moule
- ✓ V_M : volume du moule
- ✓ ρ_h : masse volumique humide
- ✓ ρ_s : masse volumique sèche

● **Différents états hydriques considérés :**

Le tableau I présente les différents états hydriques et leurs conditions hydriques.

Tableau I : Différents états hydriques selon le guide de terrassement routier

Etats	Réutilisations possibles (conditions technico-économiques « normales »)
Très sec (ts)	Non
Sec (s)	Oui avec dispositions particulières (arrosage, compactage intense ...)
Moyen (m)	Oui
Humide (h)	Oui avec disposition particulières (traitement, aération, remblai de faible hauteur..)
Très humide (th)	Non

● **Paramètres utilisés pour caractériser l'état hydrique**

On peut utiliser l'un ou l'autre des trois paramètres suivants :

- La position de la teneur en eau naturelle (w_n) de la fraction 0/20 du sol par rapport à la teneur en eau à l'optimum Proctor normal (w_{opn})
- La position de la teneur en eau naturelle (w_n) par rapport aux limites d'Atterberg (LL et LP) qui s'exprime par l'indice de consistance (I_c)

- L'indice portant immédiat (IPI) qui exprime la valeur du poinçonnement CBR mesurée sur une éprouvette de sol compacté à l'énergie Proctor normal.

2.2-4 Détermination de la masse volumique d'un matériau en place

Le but de cet essai est de vérifier le compactage des couches en se référant au compactage optimal déterminé par l'essai Proctor.

Pour réaliser cet essai, on prépare une surface plane sensiblement horizontale par arasement ou/et surfacage. Ensuite, on fixe la plaque avec les piquets d'ancrage (valets). On pratique l'excavation du trou à travers l'orifice de la plaque. La profondeur doit être égale au diamètre de l'orifice ou moins un demi-rayon. Sur la digue, nous allons à une profondeur de 15 cm. La cavité doit avoir une forme régulière. La totalité du matériau extrait de l'excavation est recueilli, sans perte, et mis dans un sac hermétique. On déterminera la masse humide (mh) du matériau et sa teneur en eau (w) (figure 13).



Figure 13 : Essai de densité en cours

Partie 3 : RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Résultats

Cette partie du travail présente le résultat de cinq (05) échantillons prélevés sur cinq différents sites d'emprunt à proximité du barrage. Des analyses en laboratoire ont été réalisées sur les échantillons pour déterminer leur classification ainsi que leur aptitude à la mise en œuvre en remblai. Ce sont donc les résultats des essais d'identification et de l'essai Proctor normal.

3.1-1 Classification des sols

3.1-1-1 Spécification des zones A et C

Dans le cahier de charge, sont renseignées les spécifications des matériaux admis sur chaque zone de la digue.

- **Zone A (partie amont)**

Les matériaux admissibles sur la zone A doivent avoir un indice de plasticité supérieur à 8% et une granulométrie conforme aux limites (Tableau II).

Tableau II : Limite de gradation de la zone A

Taille des tamis (mm)	Masse totale des agrégats passants (%)	
	Minimum	Maximum
200	100	100
19	60	100
9,5	50	100
2,36	40	100
0,425	35	100
0,075	30	70

Ces résultats ont servi à tracer le fuseau de la zone A qui est délimité par une courbe maximale (Max ZA) et une courbe minimale (Min ZA).

Tout matériau conforme à ces spécifications est admis en zone A.

- **Zone C (partie aval)**

Les matériaux recommandés pour la zone C quant à eux, doivent avoir un indice de plasticité d'au moins 5% et une granulométrie conforme aux limites données par le tableau III.

Tableau III : Limite de gradation de la zone C

Taille des tamis (mm)	Masse totale des agrégats passants (%)	
	Minimum	Maximum
300	100	100
37.5	40	100
19	30	100
4,75	10	100
0,425	0	70
0,075	0	30

Ces résultats ont également permis de tracer le fuseau de la zone C qui est délimité par une courbe maximale (Max ZC) et une courbe minimale (Min ZC).

Tout matériau conforme à ces spécifications est admis en zone C

3.1-1-2 Analyse granulométrique et limites d'Atterberg

Le but est de définir la classe de chaque matériau grâce aux résultats de l'analyse granulométrique, de déterminer les limites d'Atterberg et la teneur en eau naturelle.

- **Echantillon 1 (au sud de la fosse minière)**

Le tableau IV présente la granulométrie de l'échantillon 1

Tableau IV : Tableau granulométrique échantillon 1

Diamètre des tamis (mm)	Passants (%)
300	100
200	100
63	100
37,5	98,36
19	96,25
12,5	93,74
9,5	89,14
4,75	86,11
2,36	84,27
1,18	81,06
0,425	76,21
0,2	75
0,08	74
0,075	73,66

Le tableau granulométrique de l'échantillon 1 montre qu'à 63 mm, on a 100 % de passants avec un pourcentage de particules fines à 0,08 mm de 74 %.

Une courbe granulométrique est tracée à l'aide des pourcentages de passant (figure 14).

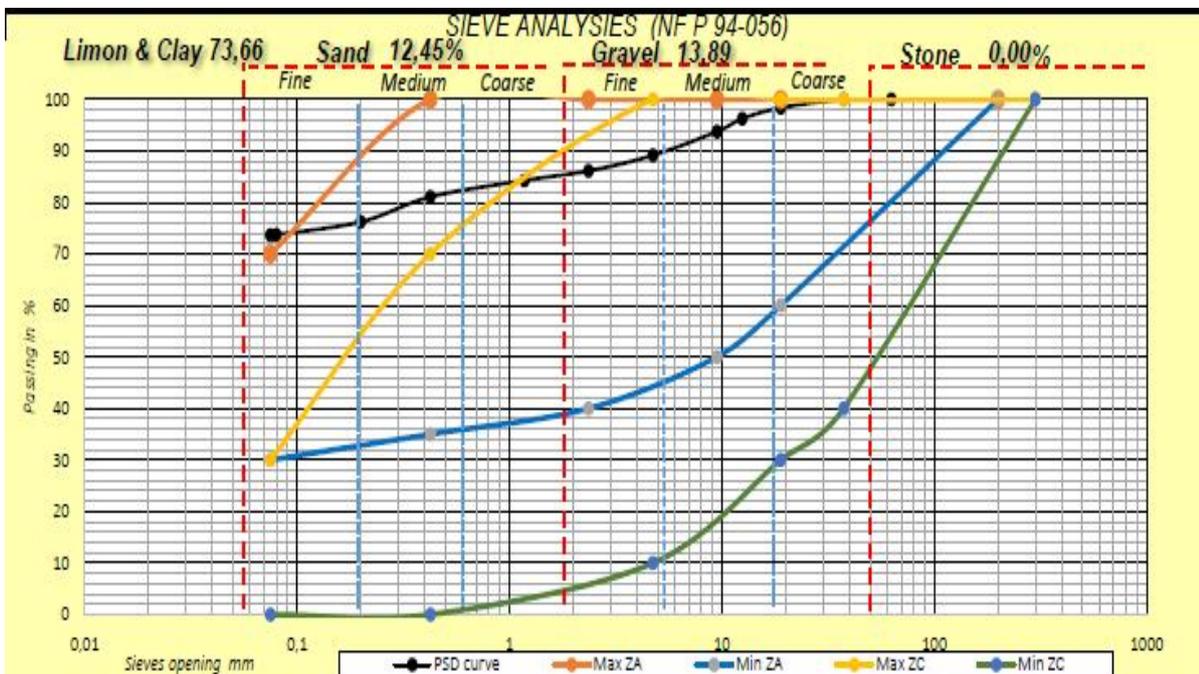


Figure 14 : Courbe granulométrique échantillon 1

Sur cette figure, la courbe granulométrique de l'échantillon 1 (courbe noire) est dans le fuseau de la zone A. Ce matériau est donc admissible en zone A de la digue.

Le tableau V présente le résultat des essais d'identification réalisés sur l'échantillon 1

Tableau V : Paramètres de nature échantillon 1

Critères	Résultats
Dmax (mm) :la dimension du plus gros élément	10
Passants au tamis 0.075 mm	73,70 (%)
Passants au tamis 0.08 mm	73,74 (%)
Passants au tamis 2 mm	85,55 (%)
Teneur en eau naturelle	29,25 (%)
Limites d'Atterberg	
Limite de liquidité LL	61 (%)
Limites de plasticité LP	34 (%)
Indice de plasticité IP	27 (%)
Indice de consistance IC	1,18 (%)

Ce tableau comportant les résultats des essais d'identification nous renseigne sur la nature de l'échantillon 1 analysé. En effet, selon le guide terrassement routier (GTR), pour $D_{max} \leq 50$ mm et tamisat à 0,08 mm supérieur à 35% caractérise un sol de classe A (sols fins).

L'indice de plasticité (IP) est compris entre 25% et 40% donc la sous classe fonction de la nature est A3 (argiles et argiles marneuses). Ce matériau qui est essentiellement constitué d'argile a une faible perméabilité. Il va donc constituer une couche imperméable au sein de notre digue.

- **Echantillon 2 (colline sud)**

La granulométrie de l'échantillon 2 est présentée par le tableau VI

Tableau VI : Tableau granulométrique échantillon 2

Diamètre des tamis (mm)	Passants (%)
300	100
200	100
63	100
37,5	100
19	89,10
12,5	78,71
9,5	72,93
4,75	56,92
2,36	49,02
1,18	45,86
0,425	42,16
0,2	35,04
0,08	31,35
0,075	31,23

Le tableau granulométrique de l'échantillon 2 montre qu'à 37,5 mm, on a 100 % de passants avec un pourcentage de particules fines à 0,08 mm de 31,35 %.

La courbe granulométrique est tracée à l'aide du pourcentage des passants (figure 15).

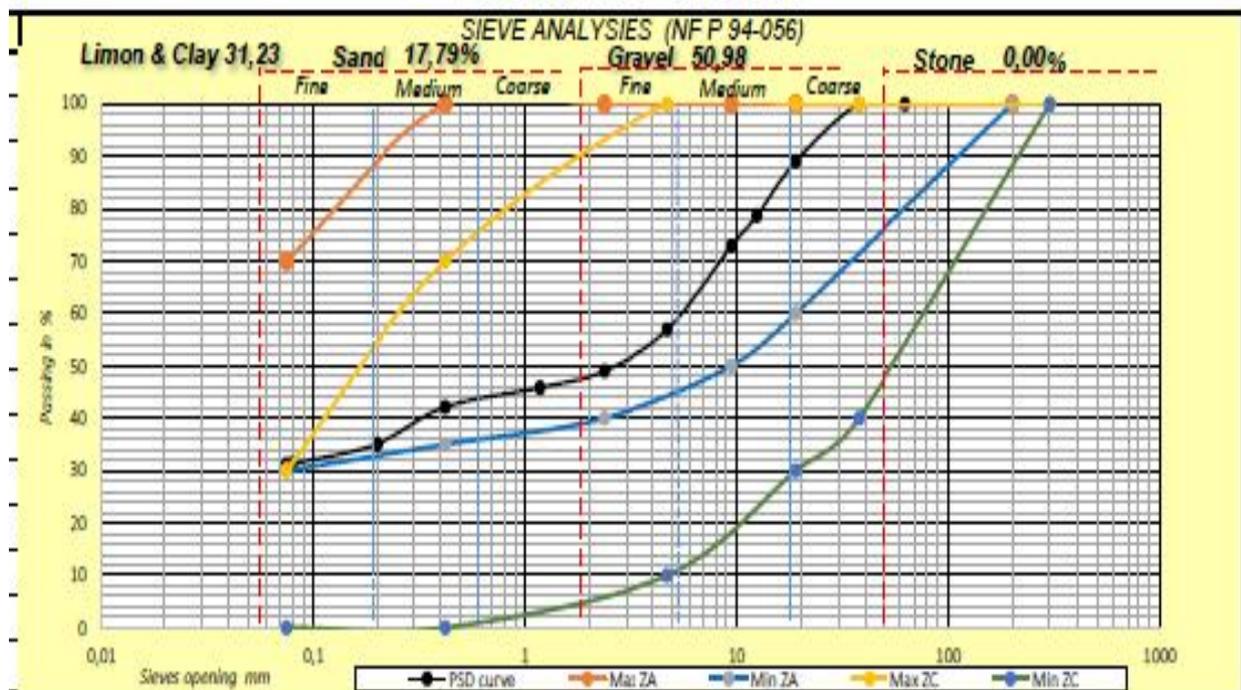


Figure 15 : Courbe granulométrique échantillon 2

Sur cette figure, la courbe d'analyse granulométrique de l'échantillon 2 (courbe noire) est à la fois comprise dans le fuseau A et dans le fuseau C. Ce matériau conforme aux spécifications des deux zones est admissible aussi bien sur la zone A que sur la zone C.

Le tableau VII présente les critères d'identification de l'échantillon 2

Tableau VII : Paramètres de nature de l'échantillon 2

Critères	Résultats
Dmax (mm) :la dimension du plus gros élément	26
Passants au tamis 0,075 mm	31,20 (%)
Passants au tamis 0,08 mm	31,35 (%)
Passants au tamis 2 mm	48,06 (%)
Teneur en eau naturelle	21,37 (%)
Limites d'Atterberg	
Limite de liquidité (LL)	51 (%)
Limites de plasticité (LP)	29 (%)
Indice de plasticité (IP)	22 (%)
Indice de consistance (IC)	1,35 (%)

Selon le GTR, $D_{max} \leq 50$ mm et tamisat $0,08$ mm $\leq 35\%$ la classe de ce matériau est B.

Le tamisat à 0,08 mm étant compris entre 12% et 35%, la sous classe de ce matériau est B6 (sable et grave argileux à très argileux). Cette classe de matériau a une perméabilité plus élevée que celle de la classe A du fait de son taux d'argile et du pourcentage en éléments fins. Il n'y a pas assez d'argile pour lier les grains de sable. Ce matériau est également sensible aux percolations qui pourraient arracher les grains de sable. C'est donc ce vide qui explique sa perméabilité élevée.

Ce matériau ne peut donc pas garantir une bonne étanchéité de la digue.

- **Echantillon 3 (Fosse minière nord)**

L'échantillon 3 a une granulométrie qui est présenté par le tableau VIII

Tableau VIII : Tableau de granulométrie de l'échantillon 3

Diamètre des tamis (mm)	Passants (%)
300	100
200	100
63	100
37,5	100
19	97,76
12,5	96,85
9,5	96,29
4,75	95,17
2,36	94,55
1,18	94,11
0,425	92,56
0,2	76,28
0,08	64,33
0,075	62,81

Le tableau granulométrique de l'échantillon 3 montre qu'à 37,5 mm, on a 100 % de passants avec un pourcentage de particules fines à 0,08 mm de 64,33 %.

Le pourcentage des passants a permis de tracer la courbe granulométrique de l'échantillon 3 (figure 16).

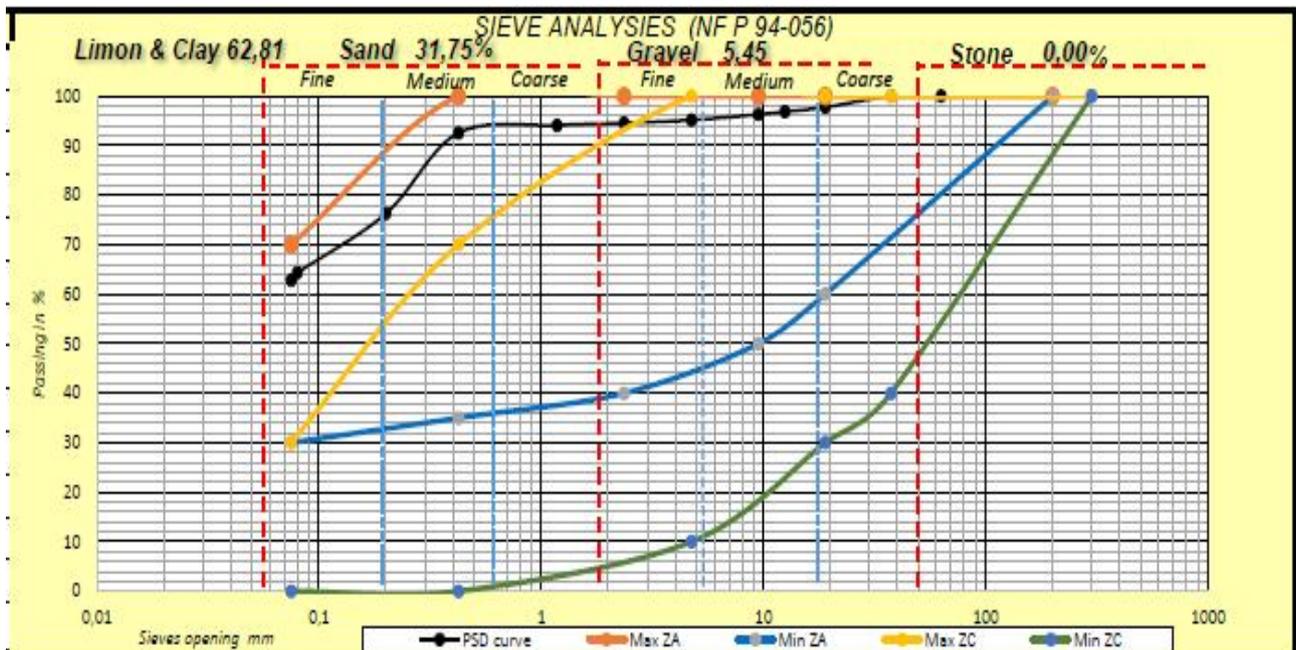


Figure 16 : Courbe granulométrique

La courbe d'analyse granulométrique de l'échantillon 3 (courbe noire), est dans le fuseau de la zone A. ce matériau est donc admissible en zone A de la digue.

Le tableau IX contient les résultats des critères utiles à l'identification de l'échantillon 3

Tableau IX : Paramètres de nature de l'échantillon 3

Critères	Résultats
Dmax (mm) :la dimension du plus gros élément	4
Passants au tamis 0,075 mm	62,80 %
Passants au tamis 0,08 mm	64,33 %
Passants au tamis 2 mm	94,42 %
Teneur en eau naturelle	17,74 %
Limites d'Atterberg	
Limite de liquidité (LL)	49 %
Limites de plasticité (LP)	34 %
Indice de plasticité (IP)	15 %
Indice de consistance (IC)	2,08 %

Dmax inférieur à 50 mm et tamisat à 0,08 mm supérieur à 35 % donc c'est un sol de classe A (sols fins) selon le GTR.

IP compris entre 12% et 25% la sous classe est A2 (sables fin argileux peu plastiques). Ce matériau, avec un pourcentage en particule fine qui est de 62,80 est propice en zone A. En effet, le taux d'argile de cette sous classe est suffisant pour lier les grains de sables fins constituant ainsi un frein à l'infiltration de l'eau dans le corps du barrage. Ce matériau peut donc assurer l'étanchéité de la digue.

- **Echantillon 4 (colline nord)**

La granulométrie de l'échantillon 4 est présenté par le tableau X dont les résultats ont servi à tracer la courbe granulométrique de la figure 17.

Tableau X :Tableau granulométrique

Diamètre des tamis (mm)	Passants (%)
300	100
200	100
63	100
37,5	100
19	96,79
12,5	96,17
9,5	95,88
4,75	94,73
2,36	94,03
1,18	93,60
0,425	92,46
0,2	77,74
0,08	67,23
0,075	66,04

Le tableau granulométrique de l'échantillon 4 montre qu'à 37,5 mm, on a également 100 % de passants avec un pourcentage de particules fines à 0,08 mm de 67,23 %.

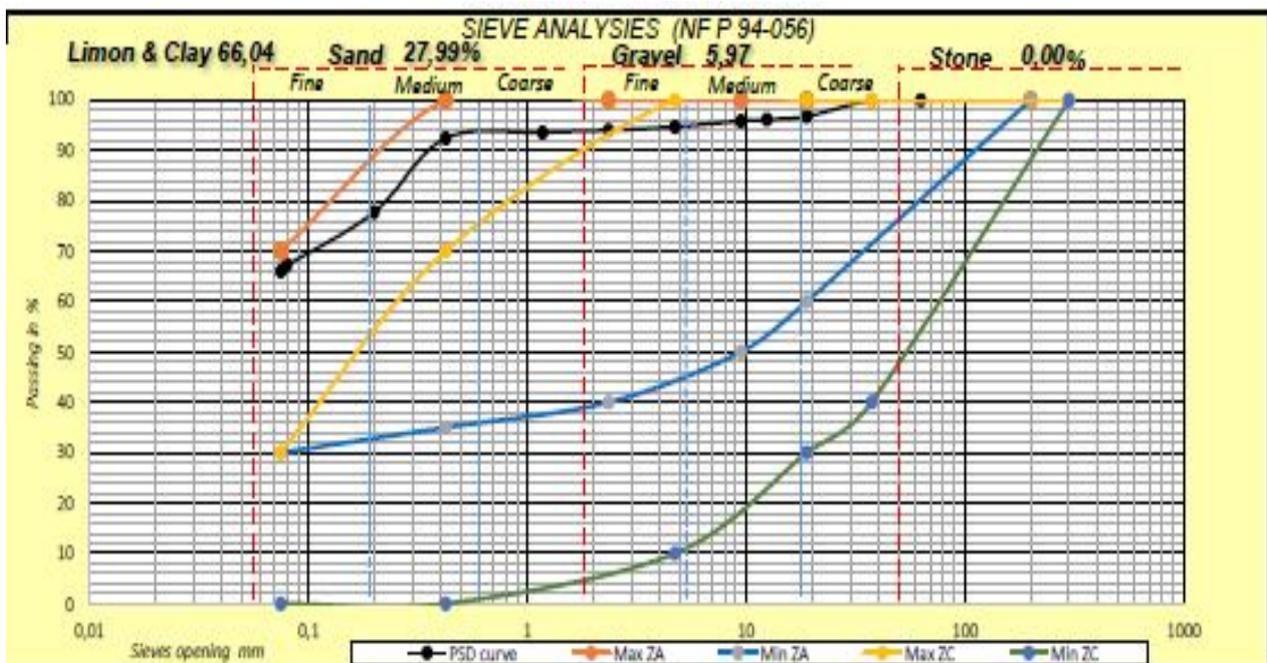


Figure 17 : Courbe granulométrique échantillon 4

La courbe d'analyse granulométrique de l'échantillon 4 (courbe noire) est dans le fuseau de la zone A. ce matériau conforme aux spécifications de la zone A, est donc admissible en zone A de la digue.

Les valeurs du tableau XI permettent d'identifier le matériau de l'échantillon 4

Tableau XI : Paramètres de nature

Critères	Résultats
Dmax (mm) :la dimension du plus gros élément	9,5
Passants au tamis 0,075 mm	66 %
Passants au tamis 0,08 mm	67,23 %
Passants au tamis 2 mm	93,90 %
Teneur en eau naturelle	20,27 %
Limites d'Atterberg	
Limite de liquidité (LL)	56 %
Limites de plasticité (LP)	35 %
Indice de plasticité (IP)	21 %
Indice de consistance (IC)	1,70 %

Dmax inférieur à 50 mm et tamisat à 0,08 mm supérieur à 35 %, selon le GTR nous avons un sol de classe A.

IP compris entre 12 % et 25 % alors la sous classe fonction de la nature est A2 (sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques).

Ce matériau de sous classe A2 est pratiquement identique au matériau de l'échantillon 3 avec un taux de particules fines plus élevé (66%).

Le matériau de l'échantillon 4 peut donc assurer une bonne étanchéité de la digue.

- **Echantillon 5 (Daapleu)**

Le tableau ci-dessous (Tableau XII) présente le pourcentage des tamisats en fonction des différents tamis. Ce sont les résultats de ce tableau qui ont servi à tracer la courbe de la figure 18.

Tableau XII : Tableau granulométrique échantillon 5

Diamètre des tamis (mm)	Passants (%)
300	100
200	100
63	100
37,5	100
19	100
12,5	99,49
9,5	98,00
4,75	94,87
2,36	92,65
1,18	91,69
0,425	89,11
0,2	77,09
0,08	69,88
0,075	69,15

Le tableau granulométrique de l'échantillon 5 montre qu'à 19 mm, on a 100 % de passants avec un pourcentage de particules fines à 0,08 mm de 69,88 %.

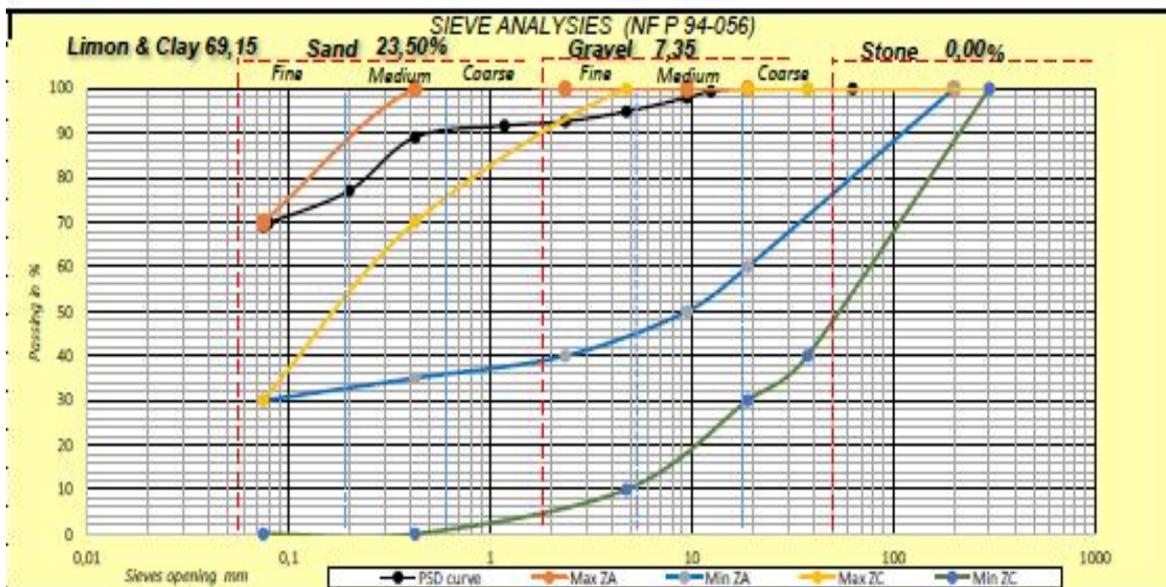


Figure 18 : Courbe granulométrique échantillon 5

Sur cette figure, la courbe granulométrique de l'échantillon 5 (courbe noire) est dans le fuseau de la zone A. ce matériau est donc admissible en zone A de la digue.

La nature de l'échantillon 5 est déterminée grâce aux résultats du tableau ci-dessous (Tableau XIII)

Tableau XIII : paramètre de nature de l'échantillon 5

Critères	Résultats
Dmax (mm) :la dimension du plus gros élément	5
Passants au tamis 0,075 mm	69,10 (%)
Passants au tamis 0,08 mm	69,88 (%)
Passants au tamis 2 mm	92,36 (%)
Teneur en eau naturelle	20,45 (%)
Limites d'Atterberg	
Limite de liquidité (LL)	51 (%)
Limites de plasticité (LP)	31 (%)
Indice de plasticité (IP)	20 (%)
Indice de consistance (IC)	1,53 (%)

Dmax inférieur à 50 mm et tamisat à 0,08 mm supérieur à 35 donc c'est un sol de classe A (sols fins) selon le GTR.

IP compris entre 12% et 25% la sous classe est A2 (sables fin argileux, limons, argiles peu plastiques).

Ce matériau a la même sous classe que l'échantillon 3 et 4 avec un pourcentage en éléments fins un peu plus élevé (69,10%).

Le matériau de l'échantillon 5 qui est très imperméable assure une bonne étanchéité au sein de la digue.

3.1-2 Caractéristiques mécaniques des matériaux

- **Echantillon 1**

Tableau XIV : Tableau de compactage de l'échantillon 1

Teneur en eau (%)	22,97	24,93	26,39	28,77	30,48
Densité sèche (t/m ³)	1,394	1,454	1,479	1,449	1,419

A l'aide des résultats de compactage ci-dessus une courbe Proctor a été tracée (figure 19).

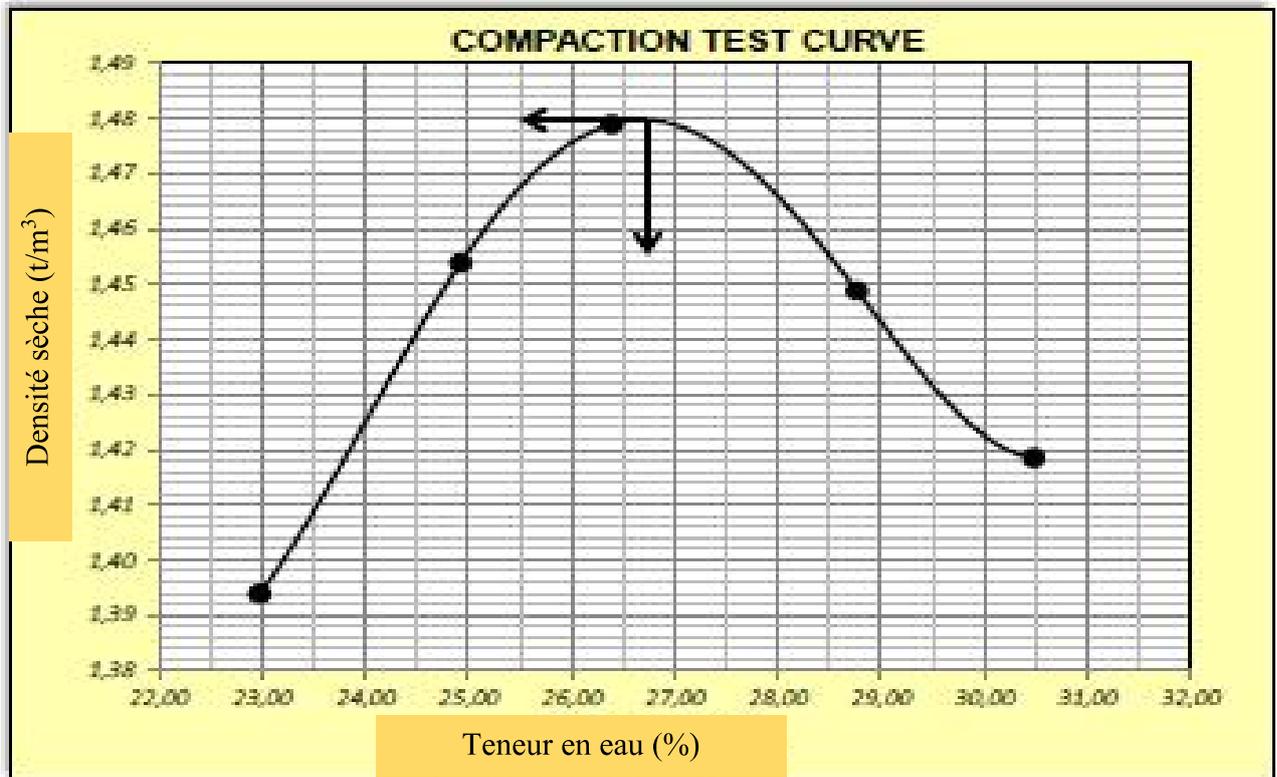


Figure 19 : Courbe Proctor

La courbe montre que pour une teneur en eau de 26,70 % nous avons la plus grande densité sèche qui est de 1,480 t/m³. Ces deux paramètres constituent les références Proctor de ce matériau.

La teneur en eau naturelle (W_n) qui est de 29,25 % est comprise entre 0,9 et 1,2 fois la teneur en eau optimale (w_{opn}). L'état hydrique de ce matériau de sous classe A3 est donc moyen (m).

- **Echantillon 2**

Tableau XV : Tableau de compactage de l'échantillon 2

Teneur en eau (%)	17,98	19,61	21,30	23,21	25,22
-------------------	-------	-------	-------	-------	-------

Densité sèche (t/m^3)	1,563	1,636	1,653	1,612	1,569
---------------------------	-------	-------	-------	-------	-------

La figure 20 présente une courbe Proctor qui a été tracée à l'aide des résultats du tableau XV.

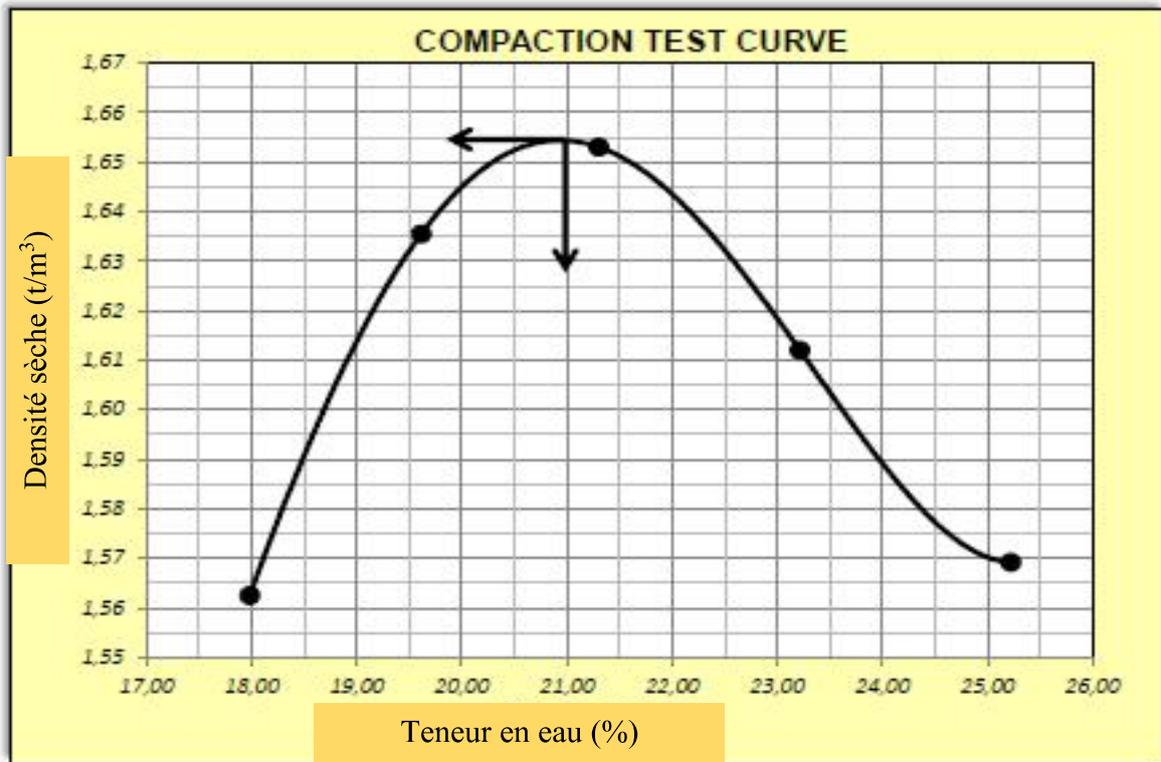


Figure 20 : Courbe Proctor échantillon 2

Cette courbe montre que pour une teneur en eau de 21 % nous avons la plus grande densité sèche qui est de $1,655 t/m^3$. Ces deux paramètres constituent les références Proctor de ce matériau.

La teneur en eau naturelle (W_n) qui est de 21,37 % est comprise entre 0,9 et 1,1 fois la teneur en eau optimale (w_{opn}). L'état hydrique de ce matériau de sous classe B6 est moyen (m). Ce matériau a été admise en zone C pour assurer la stabilité à cause de ses bonnes propriétés mécaniques caractérisées par sa grande densité sèche.

- **Echantillon 3**

Tableau XVI : Tableau de compactage de l'échantillon 3

Teneur en eau (%)	19,79	21,46	23,29	25,34	27,06
Densité sèche (t/m ³)	1,435	1,474	1,482	1,449	1,410

Les résultats du tableau XVI ont permis de tracer la courbe de la figure 21.

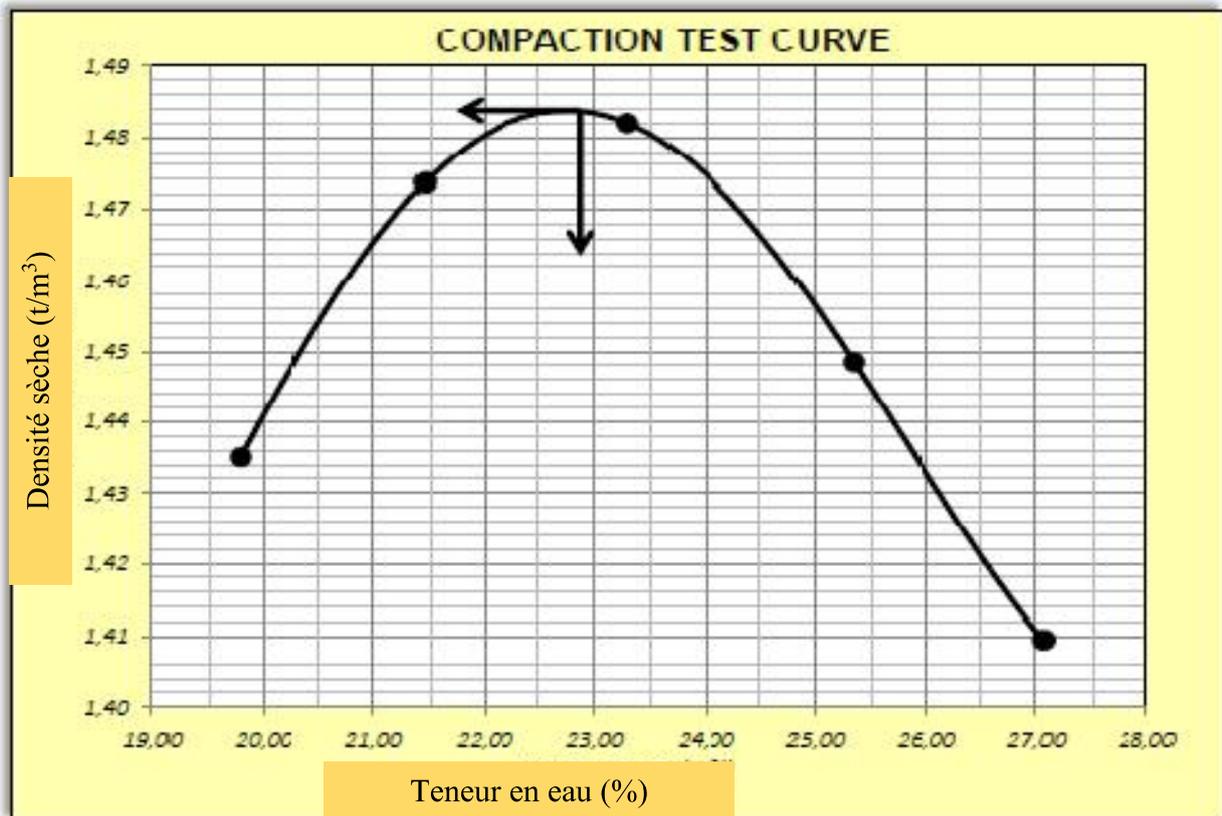


Figure 21 : Courbe Proctor échantillon 3

La courbe montre que pour une teneur en eau de 23,29 % nous avons la plus grande densité sèche qui est de 1,482 t/m³. Ces deux paramètres constituent les références Proctor de ce matériau.

La teneur en eau naturelle (W_n) qui est de 17,74 % est comprise entre 0,7 et 0,9 fois la teneur en eau optimale (w_{opt}). L'état hydrique de ce matériau de sous classe A2 est donc sec (s).

À cause de son état sec ce matériau ne peut être utilisé dans les conditions technico-économiques normales.

- **Echantillon 4**

Tableau XVII : Tableau de compactage de l'échantillon 4

Teneur en eau (%)	10,91	12,59	13,97	15,77	17,95
Densité sèche (t/m^3)	1,348	1,403	1,447	1,422	1,343

La courbe de la figure 22 a été tracée grâce aux résultats du tableau XVII.

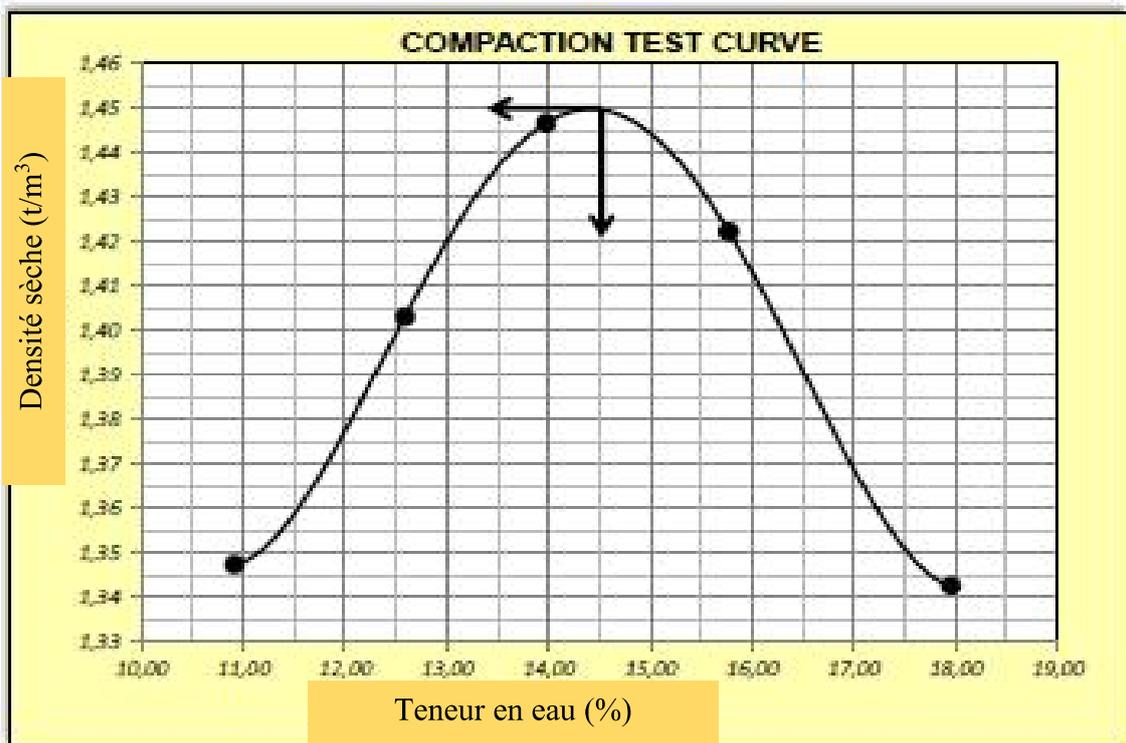


Figure 22 : Courbe Proctor échantillon 4

La courbe montre que pour une teneur en eau de 13,97 % nous avons la plus grande densité sèche qui est de $1,447 t/m^3$. Ces deux paramètres constituent les références Proctor de ce matériau.

La teneur en eau naturelle (W_n) qui est de 20,27 % est supérieure à plus de 1,3 fois la teneur en eau optimale (w_{opn}). L'état hydrique de ce matériau de sous classe A2 est donc très humide (th).

Dans les conditions technico-économiques normales, ce matériau ne peut être utilisé à cause de son état très humide.

- **Echantillon 5**

Tableau XVIII : Tableau de compactage de l'échantillon 5

Teneur en eau (%)	15,91	17,77	19,87	21,66	23,37
Densité sèche (t/m ³)	1,492	1,557	1,598	1,556	1,501

La courbe de la figure 23 a été tracée grâce aux résultats du tableau XVIII.

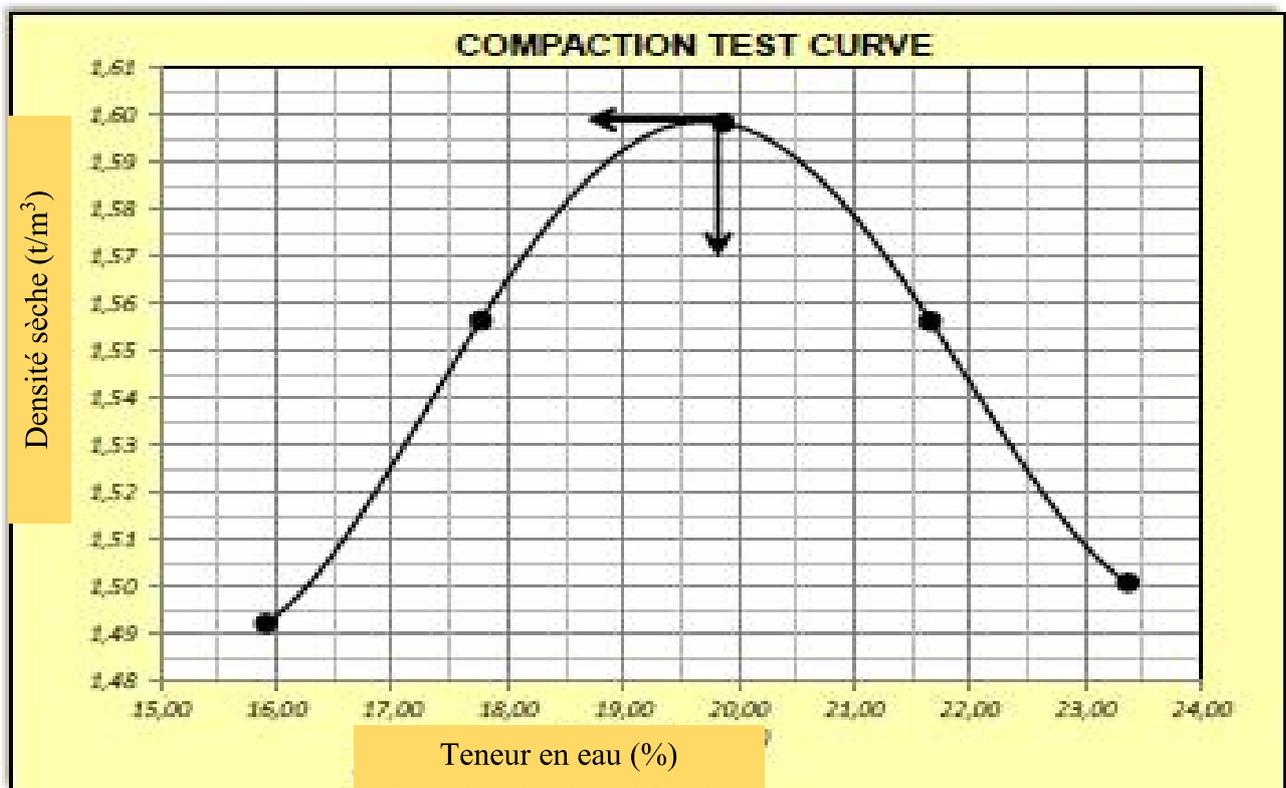


Figure 23 : Courbe Proctor

La courbe montre que pour une teneur en eau de 19,8 % nous avons la plus grande densité sèche qui est de 1,6 t/m³. Ces deux paramètres constituent les références Proctor de ce matériau.

La teneur en eau naturelle (W_n) qui est de 20,45 % est comprise entre 0,9 et 1,1 fois la teneur en eau optimale (w_{opt}). L'état hydrique de ce matériau de sous classe A2 est donc moyen (m).

3-1-3 Récapitulatif des résultats

Le tableau XIX présente le récapitulatif des résultats des différents essais réalisés sur les cinq (5) échantillons prélevés.

Tableau XIX : Tableau récapitulatif des résultats d'identification

Echantillons	Classes	Sous classes en fonction de la nature	Zone	Etat hydrique	Réutilisations possibles (conditions technico-économiques « normales »)
Echantillon 1	A Sols fins	A3 Argile et argiles marneuses, Limons très plastiques..	A	Moyen	Oui
Echantillon 2	B Sols sableux et graveleux avec fines	B6 Sables et graves argileux à très argileux	A et C	Moyen	Oui
Echantillon 3	A Sols fins	A2 Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques	A	Sec	Oui avec disposition particulières : humidification, compactage intense, remblai de faible hauteur...
Echantillon 4	A Sols fins	A2 Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques	A	Très humide	Non sauf disposition spécifique adaptées (traitement) permettant d'avoir au moins l'état humide
Echantillon 5	A Sols fins	A2 Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques	A	Moyen	Oui

L'analyse de ces 5 échantillons révèle que la majorité des sites est constituée de matériaux de classe A (sols fins) à caractère argileux et se trouvant dans un bon état hydrique (moyennement humide). Le compactage est jugé bon lorsque le pourcentage de compactage est supérieur ou égal à 98% sur la zone A (imperméable) et à 95% sur la zone C avec une teneur en eau de plus ou moins de 2% de la teneur en eau optimale.

Les matériaux de sous classe A2 et A3 riches en argile sont admis en Amont (zone A) de la digue tandis que les graves argileux de sous classe B6 sont admis en aval (zone C).

Ce procédé permet à la digue d'assurer à la fois une fonction d'étanchéité et une fonction de stabilité.

3-2 Discussion

Les matériaux utilisés pour la construction de notre barrage sont des matériaux de sous classes A2, A3 (argiles, argiles et limons) assurant l'étanchéité de la digue et B6 (graves argileux) assurant la stabilité de la digue.

Au regard des travaux réalisés par les services techniques des routes et autoroutes (SETRA, 2000) qui recommandent l'excavation des matériaux compressibles (classe A et B) par des matériaux insensibles à l'eau (classe D et C), nous pouvons affirmer que cette recommandation ne respecte pas les résultats de nos travaux quant aux matériaux utilisés. En effet, selon notre étude, les matériaux insensibles à l'eau sont très imperméables donc non utilisables dans la réalisation d'une digue homogène. La recommandation du SETRA est donc spécifique aux remblais des routes et autoroutes.

D'après nos travaux, le compactage des différentes couches est bon lorsque le degré de compactage est supérieur ou égal à 95% en zone C et supérieur ou égale à 98% en zone A. La zone C se doit d'assurer la stabilité de la digue tandis que la zone A doit assurer l'étanchéité de la digue. La teneur en eau sur la couche doit être égale à celle de l'optimum Proctor. Ces recommandations sont conformes à celles établies par Mathon (2012) dans la rédaction d'un guide de bonnes pratiques. En effet, pour un matériau trop sec, la cohésion des grains n'est pas assurée ceci pourrait provoquer l'instabilité d'un remblai. Un matériau trop humide provoque le matelassage des couches au passage des engins. Cette humidité pourrait provoquer la ruine de notre ouvrage.

Les matériaux étudiés au cours de ce travail sont essentiellement de sous classes A2, A3 et B6 qui sont des matériaux propices à la réalisation de remblais imperméables à cause de leur taux d'argile ($15 \leq I_p \leq 27$) donc utilisables dans la construction d'une digue homogène. Ces résultats concordent avec ceux de Bourbon (2012) qui a également trouvé lors de ses travaux sur une digue dans une mine d'exploitation minière en Guyane, que les matériaux de sous-classes A1, A2, A3 et B2 sont adéquats pour la construction de digue homogène.

Quant au compactage des matériaux utilisés, nous constatons que les graves argileux B6 ont un bon compactage à l'état hydrique moyen ($1,665 \text{ t/m}^3$) tandis que les argiles finement sableuses A2 et A3 ont un compactage plus faible $1,447$ à $1,482 \text{ t/m}^3$. Ces résultats sont conformes avec ceux de

Fondasol-géotechnique (2007) qui lors d'une étude réalisée sur les argiles a également trouvé que les matériaux de classe B6 ont une bonne portance à la teneur naturelle et que l'argile sableuse à une portance plus faible. En outre, les sols argileux changent brutalement de consistance pour de faibles variations de la teneur en eau. Le terrassement devra être fait par temps sec.

Lors de nos travaux à Ity, le compactage des matériaux de sous classes A2 a donné des valeurs comprises entre 1,447 et 1,482 t/m³. Lors d'une étude expérimentale menée au Québec sur l'argile Sainte-Rosalie qui est une argile de sous classe A2 (Ip= 21%), Robert – Medjo (1999) a obtenu une masse volumique plus faible (1,300 t/m³) que la nôtre. En effet, cette faible valeur est due au fait que l'argile Sainte-Rosalie comporte un taux non négligeable de matière organique. En tenant compte des renseignements fournis par les travaux de Diamond (1970), Ahmed et al. (1974) et Delage et al. (1996) sur les sols compactés en laboratoire, nous arrivons à la conclusion que ces échantillons d'argiles Sainte-Rosalie sont constitués d'agrégats entre lesquels il existe des pores intergranulaires.

CONCLUSION

Toutes les digues de protection doivent remplir au minimum les deux conditions que sont la stabilité à court et long terme et l'étanchéité tant au niveau de la fondation qu'au niveau du corps du barrage.

A cet effet, nous avons mené des études pour identifier les caractéristiques des matériaux utilisés car chaque classe de matériau a un rôle spécifique dans la construction de la digue. A l'issue, les essais d'identification ont révélé que les matériaux utilisés sont essentiellement de la classe A et B. Les matériaux argileux assurent l'étanchéité de la digue et sont placés en amont de la digue (zone A) tandis que les moins argileux remplissant une fonction de stabilité sont posés en aval (zone C).

L'approche méthodologique adoptée dans la construction de ce barrage respecte des pratiques d'exécution en suivant les règles de l'art ce qui garantit un niveau de sécurité acceptable pour cet ouvrage.

Outre l'aperçu des considérations réglementaires existantes relatives aux digues en remblai, le présent travail propose une méthodologie simple à suivre et fournit les principes généraux à respecter en termes de conception et de réalisation des digues en terre.

Il serait intéressant d'envisager l'étude de stabilité de la digue vis-à-vis des glissements à l'aide d'un logiciel adapté tel que CADAM 3D.

Au cours de cette prochaine étude, certains essais devront être réalisés tels que :

- Essai triaxial pour la détermination de l'angle de frottement interne, cohésion spécifique et éventuellement les contraintes normales et tangentielles admissibles. Ces paramètres permettront de faire les calculs de stabilité des talus (pente de la digue).
- Essai de perméabilité pour évaluer le comportement des sols en présence d'eau.
- Essai à l'œdomètre pour déterminer la résistance à la compression et au cisaillement

REFERENCES

- Ahmed, S., C.W. Lovell & Diamond S. (1974). Pore sizes and strength of compacted clay. Journal of the geotechnical engineering division pp 407- 425.
- Alonso E., Becue J.-P., Bolle G., Lautrin D. & Michel G. (2002). Petits barrages recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi.
- Anton S. & Pougatsch H. (2011). Les barrages - du projet à la mise en service. Romande (France), 714.
- Belokonev E. (1981). Barrages en matériaux locaux. Institut d'hydrotechnique et de bonification (TIPASA), 261.
- Bonelli S. (2011). Ouvrages hydrauliques en remblai : un regard transversal sur l'action de l'eau.
- BRGM (1980). *Projet de mise en valeur du gisement d'or d'Ity*.
- Calier M. (1992). Hydraulique générale et appliquée.
- Chethata N. (2016). Etude d'un barrage en terre (digue) barrage Oued Halib. Université Ziane Achour de Djelfa (Algérie), 63.
- Comité Internationale des Grands Barrages (1993). Barrage en remblai : protection du talus.
- Commission Européenne (1998). *Sécurité des activités minières: étude de suivi des récents accidents miniers*.
- Delliou p. L. (2003). Les barrages : conception et maintenance.
- Delliou p. L. (2008). Grands barrages petits barrages.
- Dian B., Monier Y., Hirschberger F., Cotten A., Berron H., Schmidt M., Hauhouot A., Filleron J.C., Koby A. & Anaud J.C. (1974). Découverte aérienne de la Côte d'Ivoire. : 217.
- Faiza B., Theng g & Lagaly g (1930). Handbook of clay science. Elsevier (new mexico), 420.
- Foster M.A. & Feli R. (1999). A method for assessing embankement dam filters witch do not satisfy modern design criteria.
- Gerard D. (1997). Pétits barrages, recommandation pour la conception, la réalisation et le suivi.
- Heragmi A. (2009). Choix et conception de l'organe de l'étanchéité des barrages en terre. barrage El-Agrem Jijel. (Annaba), 94.
- INS (2014). *Recensement général de la population et de l'habitat 1998. Données sociodémographique et économique des localités, résultats définitifs par localité, région des montagnes*.
- MEDD (2004). Les ruptures des barrages.

Romain R. (2007). Modélisation de l'érosion interne dans les barrage en remblai.

Scheleiss A.J., Pougatsch H. & Roussat B. (2011). *Les barrages: du projet à la mise en service*, pressespolytechniques et universitaires romandes, Lausanne.

RESUME

Les barrages en remblai qui sont de loin les plus économiques posent généralement des problèmes de stabilité et d'étanchéité aux ingénieurs et chercheurs. La résolution de ces problèmes épineux que sont la stabilité et l'étanchéité fait appel à de nombreuses compétences techniques. Cette étude propose donc les techniques de construction d'une digue afin d'assurer sa stabilité et son étanchéité dans le cas d'un barrage en terre. Les essais d'identification réalisés sur les matériaux ont montré que les matériaux de sous classe A2 et A3 riches en argile assurent une fonction d'étanchéité en amont de la digue tandis que la sous classe B6 qui est un mélange de matériaux argileux et graveleux ou de sables argileux, avec de très bonnes propriétés mécaniques ($1,655 \text{ t/m}^3$), a pour rôle d'assurer la stabilité de la digue. Ces différentes études et travaux qui mènent à la réalisation de ce type d'ouvrage sont envisagés dans le but de satisfaire ses exigences que sont la stabilité et l'étanchéité.

Mots-clés : barrage, remblai, stabilité, étanchéité, digue, matériaux, sables, argile.

ABSTRACT

Embankment dams, which are by far the most economical, generally pose stability and waterproofing problems for engineers and researchers. Solving the thorny problems of stability and waterproofing requires a great deal of technical skill. This study therefore presents the techniques for constructing a dike in order to ensure its stability and tightness in the case of an earthen dam. The identification tests carried out on the materials have shown that the clay-rich subclass A2 and A3 materials provide a sealing function upstream of the dike while the subclass B6 which is a mixture of clay and gravelly materials or of clayey sands, with very good mechanical properties (1.655 t / m^3), has the role of ensuring the stability of the dike. These various studies and works that lead to the realization of this type of structure are envisaged in order to meet its requirements of stability and tightness.

Key-words : dam, backfill, stability, waterproofing, dike, materials, sands, clay.