

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Civil et Travaux Publics



Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
Filière : Génie civil
Spécialité : structure
Thème

Etude statique et dynamique d'un barrage en terre cas ain temouchent (sidi ben adda)

Présenté Par :

- 1) M.BELHADRA Zineb
- 2) M.BENAMEUR DJEBARI Maroua

Devant le jury composé de :

Mr AISSAOUI	M C B	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Mr CHALABI	M	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
M BELABBACI	M C A	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant
Mr BOURI	M C B	ENSH, Blida	Co_Encadrant

Année Universitaire 2023/2024

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH pour nous avoir guidés vers le bon chemin de la lumière et du savoir et pour nous avoir donné du courage, de la volonté afin de pouvoir réaliser ce modeste travail.

Nos remerciements à nos parents, pour leurs soutiens et leurs encouragements pendant toute la vie et qui continueront à nous aider dans tous les projets de l'avenir. Ainsi que tous les membres de nos familles qui ont participé de près ou de loin à nous encourager et nous aider dans notre projet.

Nous tenons également remercier Dr. belabbaci et Dr. bouri pour l'encadrement de ce mémoire Leur aide, leur patience et la confiance qu'ils nous ont accordée.

Nous tenons à remercier les membres de jury pour avoir accepté de juger notre travail.

Mes sincères remerciements vont également à tous les enseignants, du département de Génie Civil de l'université de Belhadj Bouchaib d'Ain Temouchent , qui ont participé à notre formation.

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

« MERCI »

Dédicaces

Après d'énormes efforts, nous remercions Dieu Tout-Puissant et le louons pour sa grande

Grâce qui nous a permis cet humble travail.

Du fond du cœur, nous dédions ce travail à toutes les personnes qui nous sont chères.

A nos chers parents. Aucune dédicace ne peut exprimer notre respect, notre amour éternel et Notre gratitude pour les sacrifices que vous avez consentis pour notre éducation et notre bien-Être. Nous vous remercions pour tout le soutien et l'amour que vous nous apportez depuis Notre enfance. Nous espérons que cet humble travail sera la réalisation de vos désirs et le fruit

De vos innombrables sacrifices. Que Dieu vous accorde santé, bonheur et longue vie.

À notre famille. Lorsque nous exprimons notre gratitude, nous devons nous rappeler que le

Plus haut niveau d'appréciation ne s'exprime pas en mots, mais en les mettant en action. Nous

Vous remercions du fond du cœur pour votre don continu.

Enfin, nous le dédions à tous nos amis et à toute la promotion du programme master2 génie civil.

À tous les professeurs qui nous ont conduit vers la porte de la réussite

Résumé :

La problématique de cette étude réside dans la nécessité de vérifier la stabilité d'un barrage en terre situé à proximité de Sidi Ben Adda (wilaya de Ain Temouchent) ayant subi une érosion qui a provoqué l'infiltration de l'eau vers le côté aval.

Les objectifs principaux de cette étude consistent à évaluer la stabilité actuelle du barrage, par le calcul de la stabilité du barrage vis-à-vis l'action statique et dynamique et par un essai d'érosion sur sol naturel prélevé du terrain de fondation.

Par la suite l'utilisation de la chaux et de la pouzzolane comme moyen de renforcement sera étudié en détail dans la partie expérimentale, en évaluant ses implications sur la stabilité globale du barrage.

Des modélisations par Plaxis seront utilisées pour simuler différentes conditions de charge, en considérant les variations hydrologiques et les possibles mouvements sismiques. Les résultats de cette étude permettront de formuler des recommandations pratiques pour le renforcement du barrage, visant à restaurer sa stabilité et à prévenir de futurs incidents.

Mots clés : Plaxis, Chaux, Pouzzolane, Barrage, Modélisation, Expérimentale

ملخص :

تكمن مشكلة هذه الدراسة في ضرورة إعادة استقرار السد الترابي الذي تعرض للتمزق، وذلك لضمان سلامة البنى التحتية المحيطة به. أدى فشل السد إلى خلق وضع حرج، يتطلب تحليلاً متعمقاً لاستقراره الثابت والديناميكي الأهداف الرئيسية لهذه الدراسة هي تقييم الاستقرار الحالي للسد، وتحديد أسباب الفشل، وتطوير حلول تعزيز فعالة من خلال دمج المنسوجات الأرضية. وسيتيح التحليل الثابت فهم العوامل الجيوتقنية والهيدروليكية المسؤولة عن التمزق، في حين أن التحليل الديناميكي سيجعل من الممكن مراعاة الأحمال الزلزالية المحتملة. سيتم دراسة استخدام الجير و البوزولان الأرضية كوسيلة للتعزيز بالتفصيل في الجزء التجريبي، وتقييم أثارها على الاستقرار العام للسد. سيتم استخدام نمذجة البلاكسيس لمحاكاة ظروف الأحمال المختلفة، مع الأخذ في الاعتبار الاختلافات الهيدرولوجية والحركات الزلزالية المحتملة. وستمكن نتائج هذه الدراسة من صياغة توصيات عملية لتعزيز السد، تهدف إلى استعادة استقراره ومنع وقوع حوادث مستقبلية.

الكلمات المفتاحية: البلاكسيس، الجير و البوزولان، السد، النمذجة، التجريبي

Abstract:

The issue addressed in this study lies in the need to verify the stability of an earth dam located near Sidi Ben Adda (Ain Temouchent province), which has suffered erosion leading to water infiltration towards the downstream side. The main objectives of this study are to assess the current stability of the dam by calculating its stability against static and dynamic actions and conducting erosion tests on natural soil samples taken from the foundation area.

Subsequently, the use of lime and pozzolana as reinforcement methods will be thoroughly examined in the experimental section, evaluating their implications on the overall stability of the dam. Plaxis modeling will be employed to simulate various loading conditions, considering hydrological variations and potential seismic movements. The outcomes of this study will provide practical recommendations for dam reinforcement, aimed at restoring its stability and preventing future incidents.

Keywords: Plaxis, Lime, Pozzolana, Dam, Modeling, Experimental

Table de Matière

Remerciement.....	
Dedicaces	
Résumé :.....	
Abstract:	
INTRODUCTION GENERAL.....	1
CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE	
I.1. Introduction :	5
I.2.Définition d'un barrage :	5
I.3.Les différents types de barrages :	6
I.3.1.Barrage en béton :	6
I.3.2.Barrage poids :	6
I.3.2.1Les Avantages et les inconvénients des barrages poids :	6
I.3.3.Barrage-voûte :.....	7
I.3.3.1Les Avantages et les inconvénients des barrages voûte :.....	8
I.3.4.Barrages à contreforts :	9
I.3.4.1Les avantages et les inconvénients des barrages à contreforts :.....	9
I.3.5.Barrage en remblai :.....	10
I.3.5.1Les avantages et l'inconvénient d'un barrage en remblai :.....	11
I.4.Les barrages en Algérie :	12
I.5.Les barrages en terre :.....	13
I.6.Les différents Types de barrage en terre :	13
I.6.1.Les barrages en terre homogènes :.....	14
I.6.2.Les barrages en terre à noyau étanche :.....	15
I.6.2.1Les avantages et l'inconvénient d'un barrage en terre à noyau étanche :	15
I.6.3.Les barrages en terre à masque amont :	16
I.6.3.1 Les avantages et l'inconvénient d'un barrage en terre à masque amont :	17
I.7.Modes de construction d'un barrage :	18
I.7.1.Étape 1 : Étude de faisabilité	18
I.7.2.Étape 2 : Conception du barrage	18
I.7.3.Étape 3 : Obtention des autorisations.....	18
I.7.4.Étape 4 : Préparation du site	18
I.7.5.Étape 5 : Construction des fondations	19
I.7.6.Étape 6 : Construction du corps du barrage	19
I.7.7.Étape 7 : Installation des systèmes de contrôle des eaux.....	19
I.8.Conclusion :	19

CHAPITRE II : PRESENTATION DE L'OUTIL NUMERIQUE PLAXIS

II.1. Introduction :	21
II.2.Présentation du code élément finis Plaxis :	21
II.2.1. Les sous-programmes de Plaxis :	21
II.2.2. Les modèles de comportement intégré dans Plaxis :	22
II.2.2.1. le modèle de Mohr Coulomb	22
II-2-2-2 Modèle de sol avec écouissage (Duncan et change (Hardening Soil Model, HSM)):	24
II.3 Conclusion :	26
CHAPITRE III : DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX ET ESSAIS REALISES	
III.1. introduction :	28
III.2. LES MATERIAUX :	28
III.2.1.le sols :	28
III.2.2.la chaux :	28
III.2.3 la pouzzolane :	29
III.2.4 les caractéristiques physique et chimique de la pouzzolane (Beni saf)	29
III.2.4.1 Caractéristiques Physiques	29
III.2.4.2Caractéristiques chimiques	30
III.3. Limites d'Atterberg :	31
III.3.1 Limite de liquidité WL :	31
III.3.2Limite de plasticité WP :	32
III.3.3 L'indice de plasticité IP :	32
III.4 Essai de bleu de méthylène :	34
III.4.1 Principe de l'essai :	34
III.4.2Matériel nécessaire :	34
III.4.3 Préparation de l'échantillon :	35
III.4.4Classification des sols après essai :	36
III.5.Analyse granulométrique par sédimentation NF P94-057 :	37
III.5.1Principe de l'essai:	37
III.5.2 But de l'essai :	37
III.5.3Calcul :	38
III.5.3.1Calcul du pourcentage des particules non décantées :	38
III.5.3.2Calcul du diamètre des particules non décantées :	38
III.5.4Les résultats sont donnés dans un tableau suivant :	40
III.6.Essai Proctor :	41
III.6.1Principe de l'essai de compactage :	41
III.6.2Mode opératoire :	41
III.7Essais de cisaillement :	43
III.7.1Principe de l'essai:	43
III.7.2Préparation de la boîte de Casa grande :	44
III.7.3Calcul de la force de cisaillement :	46
III.8Essai d'émiettage (Crumb test – ASTM D 657200):	47

III.8.1 La procédure donnée par la norme ASTM est basée sur deux méthodes :	47
III.8.2 Résultats des essais (sol sans ajout) :	48
III.8.3 Résultats cisaillement sans ajouts :	48
III.8.4 Résultats des essais de Cisaillement à la boîte De casa grande :	49
III.8.4.1 Introduction :	49
III.8.5 Résultats des essais de 7 jours :	50
III.8.5.1 Sol renforcé avec 2% de la chaux et 2% de la pouzzolane :	50
III.8.5.2 Sol renforcé avec 4% de la chaux et 4% de la pouzzolane :	52
III.8.5.3 Sol renforcé avec 6% de la chaux et 6% de la pouzzolane :	53
III.8.6 Résultats des essais de 28 jours :	54
III.8.6.1 Sol renforcé avec 2% de la chaux et 2% de la pouzzolane :	55
III.8.6.2 Sol renforcé avec 4% de la chaux et 4% de la pouzzolane :	56
III.8.6.3 Sol renforcé avec 6% de la chaux et 6% de la pouzzolane :	58
III.9. Conclusion :	59
CHAPITRE IV : ÉTUDE STATIQUE ET DYNAMIQUE DU BARRAGE	
IV.1 Introduction :	61
IV.2 Etude statique de la stabilité du barrage par Plaxis :	61
IV.3 Etude dynamique :	66
IV.4 Conclusion :	68
CONCLUSION GÉNÉRAL	69
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE	71

Liste des Figures

Figure 1 : Vue du barrage de Sidi Ben Adda et prélèvement des échantillons	3
Figure I .1 : Les différentes parties d'un barrage	5
Figure I .2 : Les différents types de barrage en béton	6
Figure I .3 : Barrage poids.....	7
Figure I .4 : Barrage-voûte	9
Figure I.5 : Barrages à contreforts.....	10
Figure I.6 : Les différents types de barrage en remblais	11
Figure. I.7: Barrage en remblai	12
Figure I.8 : Barrage de Beni Haroun	13
Figure I.9: Barrage en terre homogène.....	15
Figure I.10: Barrage à noyau étanche.....	16
Figure I.11: Barrage a masque amont	17
Figure II.1: Définition du module de young à 50% de la rupture	23
Figure II.2: Définition du module oedométrique tangent	26
Figure II.3: Définition de l'angle de dilatance	26
Figure III. 1 : les phases des sols.....	28
Figure III. 2 : la chaux utilisée	29
Figure III. 3 : la pouzzolane utilisée.....	29
Figure III. 4 : limites d'atterberg sont exprimées en pourcentage	30
Figure III. 5 : la limite de liquidité.....	30
Figure III. 6 : Les étapes de la limite de plasticité.	31
Figure III. 7 : courbe de la limite de liquidité	32
Figure III.8: Appareillage de l'essai de bleu	34
Figure III. 9 : Résultats de valeur au bleu.	35
Figure III. 10 : Appareillage sédimentation	37
Figure III. 11: L'abaque d'Analyses par sédimenteriez.....	38
Figure III.12 : courbe granulométrie et sédimentation.....	39

Figure III. 13: Courbe de Proctor.....	40
Figure III. 14 : L'essai de compactage	41
Figure III.15: La courbe Proctor normal	42
Figure III. 16: principe de l'essai de cisaillement direct	43
Figure III. 17 : Machine de cisaillement utilisé dans cette étude	44
Figure III.18 : Essais typiques de Crumb te	47
Figure III.19 : Essais de cisaillement sur sol naturel.....	47
Figure III.20 : Courbe intrinsèque de Mohr coulomb sur sol naturel	48
Figure III.21: essais de cisaillement sur sol naturel renforcé avec 2% de la chaux et 2% de la pouzzolane à 7 jours.....	49
Figure III.22 : Courbe intrinsèque de Mohr coulomb sur sol naturel renforcé avec 2% de la chaux et 2% de la pouzzolane à 7 jours	50
Figure III.23 : Essais de cisaillement sur sol naturel renforcé avec 4% de la chaux et 4% de la pouzzolane à 7 jours.....	51
Figure III.24 : Courbe intrinsèque de Mohr coulomb sur sol naturel renforcé avec 4% de la chaux et 4% de la pouzzolane à 7 jours	51
Figure III.25 : Essais de cisaillement sur sol naturel renforcé avec 6% de la chaux et 6% de la pouzzolane à 7 jours.....	52
Figure III.26 : Courbe intrinsèque de Mohr coulomb sur sol naturel renforcé avec 6% de la chaux et 6% de la pouzzolane à 7 jours	53
Figure III.27 : Essais de cisaillement sur sol naturel renforcé avec 2% de la chaux et 2% de la pouzzolane à 28 jours.....	54
Figure III.28 : Courbe intrinsèque de Mohr coulomb sur sol naturel renforcé avec 2% de la chaux et 2% de la pouzzolane à 28 jours	54
Figure III.29 : Essais de cisaillement sur sol naturel renforcé avec 4% de la chaux et 4% de la pouzzolane à 28 jours.....	55
Figure III.30 : Courbe intrinsèque de Mohr coulomb sur sol naturel renforcé avec 4% de la chaux et 4% de la pouzzolane à 28 jours	56
Figure III.31 : Essais de cisaillement sur sol naturel renforcé avec 6% de la chaux et 6% de la pouzzolane à 28 jours.....	57
Figure III.32 : Courbe intrinsèque de Mohr coulomb sur sol naturel renforcé avec 6% de la chaux et 6% de la pouzzolane à 28 jours	57
Figure IV.1 : Géométrie du modèle	61
Figure IV.2 : Déplacement de notre modèle	61
Figure IV.3 : Facteur de sécurité.....	62

FigureIV.4 : Déplacement de notre modèle	62
FigureIV.5 : Facteur de sécurité.....	63
Figure IV.6 : Déplacement de notre modèle	63
FigureIV.7 : Facteur de sécurité.....	64
FigureIV.8 : Déplacement de notre modèle	64
FigureIV.9 : Facteur de sécurité.....	65
FigureIV.10 : Déplacement du sol sous l'effet dynamique.....	66
FigureIV.11 : Comparaison des facteurs de sécurité.....	66

Liste des tableaux

Tableau III .1: Classification d'argile selon l'indice de plastic.....	31
Tableau III .2 : Calculs limite de liquidité	32
Tableau III. 3 : Calcul de limite de plasticité	32
Tableau III.4: classification des sols selon la valeur de VBS	35
Tableau III.5 :.Les calculs d'essais de sédimentation.....	39
Tableau III.6: Les résultats des paramètres de l'essai Proctor.....	41

INTRODUCTION

GENERAL

INTRODUCTION GENERAL

1. Contexte

L'étude d'un barrage, qu'elle soit dynamique ou statique, est essentielle pour garantir sa stabilité et sa sécurité. L'étude statique se concentre sur les charges permanentes et variables, tandis que l'étude dynamique évalue le comportement du barrage face à des forces dynamiques telles que les séismes. Les propriétés du matériau de fondation, la conception générale, le dimensionnement, l'infiltration, et l'influence des effets de site sur la réponse sismique sont des éléments clés abordés dans ces études. Par exemple, l'étude dynamique d'un barrage poids-voûte vise à évaluer son comportement sous un chargement sismique. Ces études sont cruciales pour assurer la fiabilité des barrages et leur résistance aux différentes contraintes auxquelles ils peuvent être soumis.

Cette étude permet de déterminer les forces et les contraintes qui agissent sur le barrage, ainsi que sa capacité à résister à ces forces.

L'étude statique consiste à évaluer les forces qui agissent sur le barrage lorsqu'il est en équilibre, c'est-à-dire lorsqu'il ne subit pas de mouvement. Cette étude permet de déterminer les contraintes maximales que le barrage peut supporter sans se rompre.

L'étude dynamique, quant à elle, prend en compte les forces qui agissent sur le barrage lorsqu'il est soumis à des mouvements, tels que les vibrations ou les secousses sismiques. Cette étude permet de déterminer la résistance du barrage à ces mouvements et de s'assurer qu'il ne se rompra pas en cas de tremblement de terre ou d'autres événements similaires.

En somme, l'étude dynamique et statique d'un barrage est essentielle pour garantir sa sécurité et sa durabilité. [1]

2. Problématique

Suite à notre investigation sur site des voies d'écoulement sont présentes clairement dans la surface du terrain de fondation, ce qui a entraîné une érosion interne, où les particules de sol sont emportées par l'eau et elle peut éventuellement conduire à des ruptures catastrophiques du barrage.

En plus de l'investigation réalisée sur site, un essai d'érosion a été réalisé au laboratoire, d'après les résultats de l'essai, notre sol présente une érosion interne.

INTRODUCTION GENERAL



Figure 1 : Vue du barrage de Sidi Ben Adda et prélèvement des échantillons

3. Objectif de la recherche

L'objectif principal de notre étude est de stabiliser le sol appartenant au sol de fondation du barrage avec ajouts de la chaux et de la pouzzolane. Notre choix s'est porté sur cette technique du fait qu'elle est moins coûteuse par rapport à la solution réalisée par l'ADE (Algérienne Des Eaux). Notant que l'ADE a réalisé une solution basée sur l'injection du ciment et de la bentonite.

Le but attendu de cette technique est l'amélioration des paramètres mécaniques (la cohésion et l'angle de frottement) du sol traité et minimiser les vides et la perméabilité du sol de fondation pour arrêter l'infiltration de l'eau vers le côté aval.

4. Organisation du mémoire

- Le premier chapitre présente une recherche bibliographique sur les différents types de barrages, ainsi que les modes de construction des barrages.
- Le deuxième chapitre consiste à présenter le code éléments finis PLAXIS
- Le troisième chapitre présente les appareils, la méthodologie et les démarches à suivre pour réaliser les essais au laboratoire ainsi que les résultats des essais mécaniques.
- Le quatrième chapitre présente les résultats des simulations numériques sous charge statique et dynamique.

CHAPITRE I :
RECHERCHE
BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Introduction :

Les barrages sont des ouvrages en terre ou en béton établis au travers d'un lit de cours d'eau entre l'amont et l'aval. Ils servent à l'alimentation en eau potable, à la production d'énergie électrique et à l'irrigation des cultures. Dans notre pays, la construction des barrages en terre est plus répandue vu la géologie et la topographie des sites. Ces digues sont construites essentiellement par un ensemble de matériaux de granulométrie diverse de l'argile très fine à des éléments très grossier. Les crues sont des phénomènes exceptionnels. Elles peuvent être décennales, centennales ou millénaires. Elles surviennent lorsque les affluents d'un cours d'eau grossissent en même temps à cause de fortes pluies. Ainsi le cours d'eau déborde de son lit pour inonder ce qu'on appelle le lit majeur. Ces crues peuvent provoquer des dégâts sur la digue et sur les régions avoisinantes d'où la nécessité d'installation d'un évacuateur des crues. Outre les déversoirs, des ouvrages d'évacuation sont nécessaires pour extraire l'eau du réservoir en continu. Les barrages sont généralement érigés avec des ouvrages annexes tels que :

Les ouvrages de prises et les ouvrages de vidange. Cependant, les petits et moyens barrages sont très souvent équipés d'une seule conduite, en acier ou en béton.

I.2. Définition d'un barrage :

Un barrage est un ouvrage d'Art placé en travers d'un cours d'eau, destiné à retenir et Stocker de l'eau ou à la dériver, Par leur complexités, ils sont considérés comme des Ouvrages hydrauliques qui barrent sur toute la largeur une section de vallée et créent ainsi Une cuvette artificielle géologiquement étanche, ils peuvent être considérés comme des Ouvrages particulier, ils ne présentent pas ailleurs la caractéristique de pouvoir être affectés A Différentes fonctions comme celui d'une part, de stocker les apports d'eau (eau potable, Irrigation, fourniture d'énergie, ainsi que la navigation), la protection contre les effets destructeurs de l'eau. [2]



Figure I.1 : Les différentes parties d'un barrage [2]

I.3. Les différents types de barrages :

Les barrages peuvent être classés en différentes catégories en fonction de leur structure et de leur utilisation. Voici quelques types de barrages de manière générale :

I.3.1. Barrage en béton :

Les barrages en béton se partagent en trois groupes

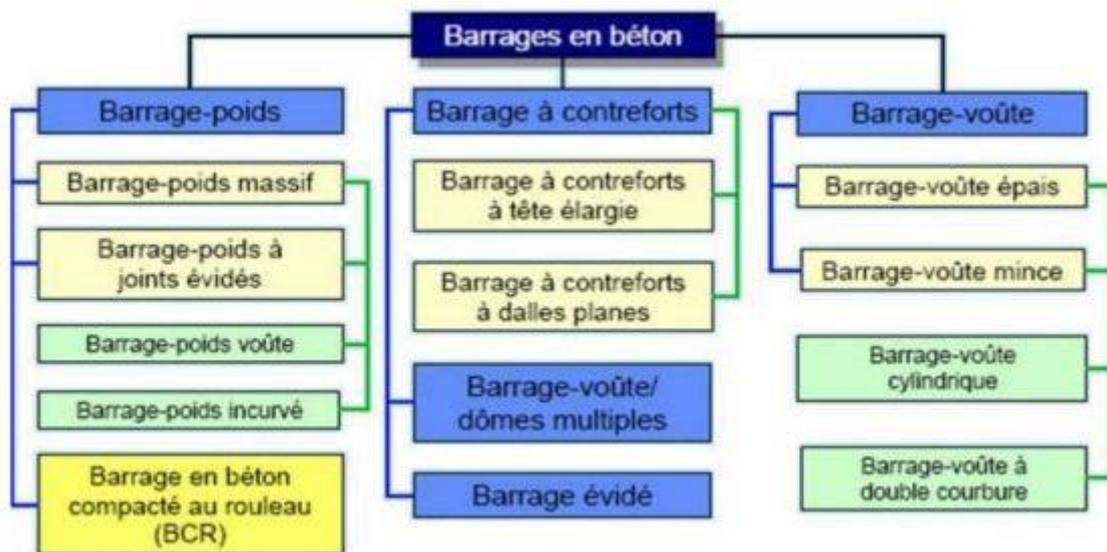


Figure I .2 : Les différents types de barrage en béton

I.3.2. Barrage poids :

Barrage-poids est un type de barrage construit en béton, en maçonnerie, en roche ou en terre, conçu pour retenir l'eau en utilisant uniquement le poids de la matière qui le compose. Sa forme est généralement triangulaire dans une coupe verticale, et son poids suffit seul à contenir la poussée de l'eau. Ce type de barrage est particulièrement adapté aux vallées très larges par rapport à la hauteur du barrage. Il s'appuie uniquement sur le sol et oppose toute sa masse à la pression de l'eau, ce qui le rend stable. Les barrages -poids sont souvent des ouvrages de basse chute et peuvent être construits en béton compacté au rouleau, en béton non armé, ou en maçonnerie.

I.3.2.1 Les Avantages et les inconvénients des barrages poids :

Les avantages des barrages poids sont les suivants :

- Faibles contraintes dans le béton.
- Faibles contraintes transmises par la fondation au rocher.

CHAPITRE I: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

- Les variations de températures ne produisent que de faibles variations de contraintes.
- L'évacuateur de crue peut facilement combiner avec le barrage (diriger les crues directement par dessous). Le gradient des sous-pressions à travers la fondation est faible.

Les inconvénients des barrages poids sont les suivants :

- Les sous-pressions sont importantes dans la fondation.
- Moyen risque de tassement. Le volume du béton est important (pour le barrage-poids évidé, il est plus faible).
- Le volume d'excavation de la fouille est important.
- Fragilité au séisme (si les joints entre les blocs ne sont pas faits par injections).
- L'échauffement du béton par la prise du ciment est assez problématique. [3]

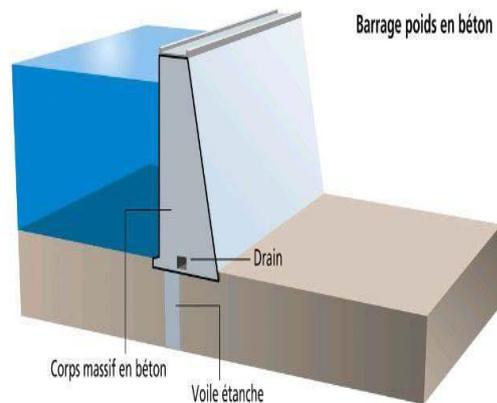


Figure I .3 : Barrage poids

I.3.3. Barrage-voûte :

Un barrage-voûte est un type de barrage en béton ou en maçonnerie, caractérisé par sa forme arquée convexe tournée vers l'amont. Cette forme courbe permet de reporter les efforts dus à la poussée de l'eau sur chaque côté du barrage, qui décrit donc un arc sur le plan horizontal. Ce type de barrage est utilisé dans des vallées étroites disposant de versants très rigides capables de supporter les charges du barrage. Le barrage-voûte fonctionne sur le principe des voûtes : la pression de l'eau est reportée vers les points d'appui sur les rives, ce qui le rend stable. Les barrages-voûtes sont des ouvrages remarquables par leurs dimensions et leur finesse, et leur conception est plus complexe que pour les autres types de barrages. Un barrage-voûte, qu'il soit en béton ou en maçonnerie, est caractérisé par sa forme arquée convexe tournée vers l'amont. Cette structure permet de reporter les efforts dus à la poussée de l'eau sur chaque côté du barrage, le rendant ainsi stable. Ce type de barrage est utilisé dans des vallées étroites disposant de versants très rigides capables de supporter les charges du barrage. Les barrages-voûtes sont des ouvrages remarquables par leurs dimensions et leur finesse, mais leur conception est plus complexe que pour les autres types de barrages. En termes de record, le barrage de Xiaowan en

CHAPITRE I: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Chine est actuellement le barrage-voûte le plus haut du monde avec 292 m de hauteur, tandis que le barrage de Tignes en France est le plus haut barrage-voûte de France avec 180 m de hauteur

I.3.3.1 Les Avantages et les inconvénients des barrages voûte :

Les avantages d'un barrage-voûte sont les suivants :

- La forme courbe permet de reporter les efforts dus à la poussée de l'eau sur chaque côté du barrage, ce qui le rend stable.
- Ce type de barrage est utilisé dans des vallées étroites disposant de versants très rigides capables de supporter les charges du barrage.
- Les barrages-voûtes sont des ouvrages remarquables par leurs dimensions et leur finesse.
- La conception de ces barrages tire au maximum partie de la capacité de résistance des matériaux et du rocher de fondation.

Les inconvénients d'un barrage-voûte sont les suivants :

- La conception est plus complexe que pour les autres types de barrages.
- Les sous-pressions sont importantes dans la fondation.
- Moyen risque de tassement.
- Le volume du béton est important (pour le barrage-voûte évidé, il est plus faible).
- Le gradient des sous-pressions au niveau de la fondation est localement très élevé.
- Les contraintes dues au gradient de température peuvent devenir importantes à la tête du barrage.
- La fouille est importante.
- Fragilité au séisme (si les joints entre les blocs ne sont pas faits par injections).
- L'échauffement du béton par la prise du ciment est assez problématique [4]

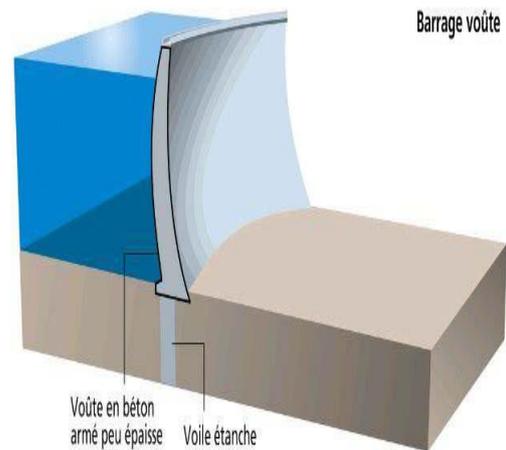


Figure I .4 : Barrage-voûte

I.3.4. Barrages à contreforts :

Les barrages à contreforts sont des ouvrages en béton constitués de murs triangulaires parallèles au lit du cours d'eau et liés entre eux à l'amont par une paroi,

Ces barrages sont caractérisés par la présence de contreforts, qui sont des murs généralement de forme triangulaire construits dans la vallée parallèlement à l'axe de la rivière

Les contreforts sont munis de bouchures pour maintenir l'eau de la retenue, et ces bouchures s'appuient sur les contreforts auxquelles elles transmettent la poussée de l'eau

Les barrages à contreforts sont adaptés aux vallées étroites et aux versants rigides, et leur conception est plus complexe que pour les autres types de barrages .Les barrages à contreforts peuvent être construits en plusieurs variantes, telles que les barrages à voûtes multiples, où une vallée trop large pour être barrée par une seule voûte est découpée par plusieurs contreforts Les contreforts peuvent également être munis de butons pour renforcer leur résistance aux effets sismiques de rive à rive

Les bouchures peuvent être de plusieurs types, comme un épaissement amont du contrefort, une dalle plate en béton armé ou une voûte de faible dimension.

I.3.4.1 Les avantages et les inconvénients des barrages à contreforts :

Les avantages des barrages à contreforts sont les suivants :

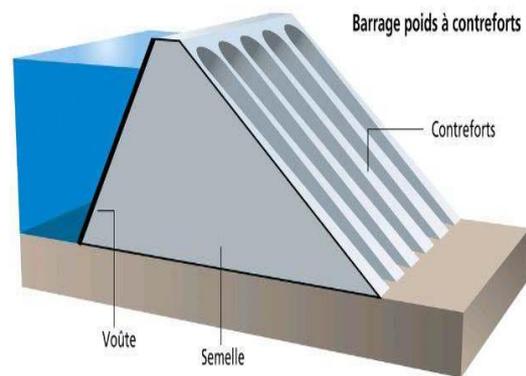
- Adaptation aux vallées étroites et aux versants rigides.
- Moins de béton nécessaire par rapport au barrage-poids (4 à 5 fois moins de béton).
- Stabilité accrue grâce à la forme triangulaire des contreforts.

CHAPITRE I: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

- Possibilité de construire des barrages à voûtes multiples dans des vallées trop large pour être barrée par une seule voûte.

Les inconvénients des barrages à contreforts sont les suivants :

- Conception complexe et sensibles aux effets thermiques et aux séismes.
- Nécessite une attention particulière pour les effets sismiques de rive à rive.
- les contreforts peuvent être sensibles aux variations de températures et à la corrosion. [5]



le fonctionnement d'un barrage

Figure I.5 : Barrages à contreforts

I.3.5. Barrage en remblai :

Un barrage en remblai est un type de barrage constitué d'un matériau meuble, qu'il soit très fin ou très grossier, tel que la terre ou les enrochements. Il existe plusieurs catégories de barrages en remblai, notamment les barrages homogènes, qui sont construits avec un matériau suffisamment étanche, et les barrages en enrochement, lesquels sont les plus fréquents dans le parc de barrages d'Hydro-Québec. Les barrages en remblai zoné, une conception plus récente, comprennent une zone centrale appelée noyau, qui assure l'étanchéité, et des recharges à l'amont et à l'aval du noyau en zone centrale, apportant la fonction de stabilité

Les barrages en remblai sont largement utilisés dans le monde, représentant 70% des barrages, en raison de leur capacité à être construits avec des matériaux locaux et de leur utilité dans la gestion de l'eau.

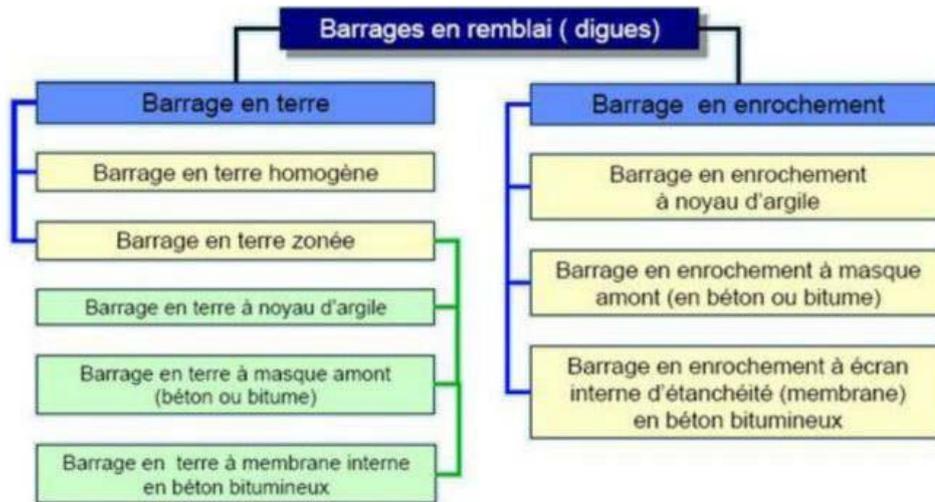


Figure I.6 : Les différents types de barrage en remblais

I.3.5.1 Les avantages et l'inconvénient d'un barrage en remblai :

Les avantages des barrages remblai sont les suivants :

- **Matériaux de recharge résistants :** Les matériaux de remblai sont généralement plus résistants que les matériaux argileux, permettant la construction de talus plus raides et meilleure contrôle des écoulements.
- **Faibles contraintes dans le béton :** Les barrages en remblai présentent des faibles contraintes dans le béton, ce qui facilite la construction.
- **Faibles contraintes transmises par la fondation au rocher :** Les barrages en remblai ont des faibles contraintes transmises par la fondation au rocher, ce qui est avantageux pour les zones géologiquement instables.
- **Stockage d'eau et production d'électricité :** Les barrages en remblai permettent de stocker de l'eau et de produire de l'électricité d'origine renouvelable.

Les inconvénients d'un barrage remblai sont les suivants :

- **Sous-pressions importantes dans la fondation :** Les barrages en remblai sont très susceptibles aux sous-pressions, ce qui peut entraîner des risques de tassements.
- **Faible résistance à l'accélération latérale :** Les barrages en remblai sont presque sans résistance à l'accélération latérale, ce qui les rend très vulnérables aux séismes.
- **Fouille importante :** La construction de barrages en remblai nécessite une fouille importante, ce qui peut entraîner des coûts élevés.
- **Concentration de polluants :** Les barrages piègent les sédiments, qui s'accumulent et concentrent les polluants dans le bassin de retenue des eaux.

CHAPITRE I: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

●Érosion et migration d'espèces : Les barrages peuvent bloquer les accès aux zones de reproduction et provoquer la mort de nombreux organismes, ce qui est négatif pour la biodiversité.

En résumé, les barrages en remblai sont essentiels pour la prospérité économique, la qualité de vie et la sécurité des populations, mais ils présentent également des inconvénients environnementaux et géologiques. Il est important de prendre en compte ces aspects lors de la conception et de la construction de barrages en remblai. [6]

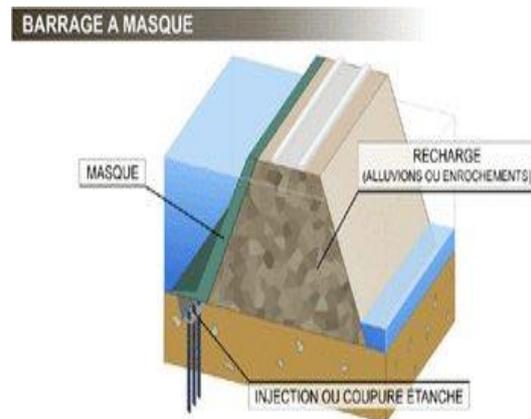


Figure. I.7: Barrage en remblai

I.4. Les barrages en Algérie :

Selon le ministère des Ressources en eau : Il existe en Algérie 80 barrages réalisés (dont 65 exploités) sur l'ensemble du territoire national, avec une capacité totale de stockage estimée à 8 milliards de m³.

Parmi les barrages en exploitation, nous citons El Hamiz à Alger ; Béni Haroun à Mila, Timgad, Taqsebt, Tichy-haf, Tilesdit , Koudiat Acerdoun, ... etc.

Le barrage de Béni Haroun est considéré comme le plus grand barrage en Algérie avec une Capacité de stockage de 960 millions de mètres cube. Le barrage est équipé par une grande station de pompage d'eau brute, dont sa puissance est de 180 MW. Le barrage alimente en eau potable plusieurs régions limitrophes de la wilaya de Mila, notamment les wilayas de Jijel, Constantine, Oum el Bouaghi, Batna et Khenchela. Le barrage fournit également une quantité importante d'eau D'irrigation pour quelques centaines d'hectares d'exploitations agricoles dans les régions voisines.

L'Algérie entend faire passer à 139 le nombre total de barrages d'ici 2030, et, ce faisant, atteindre une capacité de stockage de près de 12 milliards de mètres cubes sur l'ensemble du pays [7]



Figure I.8 : Barrage de Beni Haroun

I.5. Les barrages en terre :

Dans notre pays la proportion des barrages en terre sont plus élevée ; cette proportion deviendra encore plus importante à l'avenir notamment lors d'achèvement du programme 2030.

Un barrage en terre est un type de barrage constitué d'un remblai de terre ou d'enrochements, qui peut être étanche grâce à un noyau imperméable ou un masque. Les barrages en terre homogènes sont les plus simples et les plus anciens, et sont construits en travers du lit de la rivière avec un massif en terre dont les pentes sont assez douces pour assurer la stabilité. Les barrages en remblai zoné, une conception plus récente, comprennent une zone centrale appelée noyau, qui assure l'étanchéité, et des recharges à l'amont et à l'aval du noyau en zone centrale, apportant la fonction de stabilité. Les barrages en terre sont largement utilisés dans le monde, représentant 70% des barrages, en raison de leur capacité à être construits avec des matériaux locaux et de leur utilité dans la gestion de l'eau.

I.6. Les différents Types de barrage en terre :

Les barrages en terre classifiés et divisés en trois principaux types :

- le barrage homogène
- le barrage à noyau étanche (zoné)
- le barrage à masque amont (écran étanche)

I.6.1. Les barrages en terre homogènes :

Un barrage homogène est un type de barrage en terre constitué d'un massif en terre compactée, construit avec un seul type de sol. C'est le type de barrage le plus simple et le plus ancien, représentant près de 70% du parc mondial des barrages. Les barrages homogènes sont des barrages de taille limitée, de moins de 10 mètres de hauteur, mais ils peuvent atteindre une hauteur de 36 mètres. Ils sont construits en travers du lit de la rivière et peuvent comprendre des banquettes intermédiaires appelées risbermes pour améliorer la stabilité et faciliter la surveillance et l'entretien. Comme pour tous les barrages en remblai, ce type de barrage s'accommode de fondations moins performantes que pour les barrages en béton. La conception de ces ouvrages est fortement dépendante de la quantité de remblai de qualité disponible sur le site

Les barrages en terre homogènes sont parmi les plus simples et anciens types de barrages. Ils consistent à construire un massif en terre à travers le lit d'une rivière. Voici quelques -- caractéristiques importantes de ces barrages :

- **Conception simple** : Les barrages en terre homogènes sont relativement simples à concevoir et à construire.
- **Matériau unique** : Ils sont constitués d'un seul matériau, généralement de l'argile, qui assure à la fois l'étanchéité et la stabilité.
- **Pentes douces** : Les pentes du barrage sont assez douces pour garantir la stabilité.
- **Terre imperméable** : La terre utilisée est généralement imperméable (typiquement de l'argile) pour éviter les fuites à travers le barrage.
- **Risbermes** : Les parements peuvent inclure des banquettes intermédiaires appelées risbermes, améliorant ainsi la stabilité et facilitant la surveillance et l'entretien.
- **Mise en place du matériau** : La terre est corroyée et mise en place en couches successives compactées.
- **Évolution technologique** : Au XXe siècle, le développement de la mécanique des sols et d'engins de terrassement puissants a permis la construction de volumes importants de remblais.

Ces barrages sont souvent de taille limitée, mais ils constituent la majorité des petits barrages (moins de 10 mètres de hauteur) dans le monde. Parmi les barrages français les plus hauts de ce type, on peut citer le barrage de Matemale (34 mètres) ou celui de Montbel (36 mètres) [8]

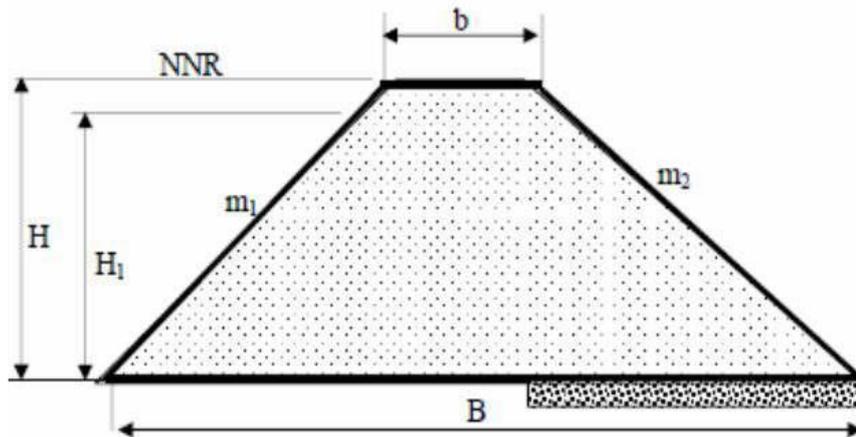


Figure I.9: Barrage en terre homogène

I.6.2. Les barrages en terre à noyau étanche :

Un barrage à noyau étanche est un type de barrage en remblai qui comporte un noyau central en argile, assurant l'étanchéité, et est épaulé par des recharges constituées de matériaux plus perméables. Cette technique présente au moins deux avantages par rapport aux barrages homogènes : les matériaux de recharge sont plus résistants, ce qui permet de construire des talus plus raides, et on contrôle mieux les écoulements qui percolent dans le corps du barrage

Ce type de barrage est utilisé pour assurer l'étanchéité, surtout en cas d'insuffisance des matériaux imperméables disponibles sur le site

Les barrages à noyau étanche font partie des barrages en remblai zoné, une conception moderne qui sépare les fonctions principales dans des matériaux distincts, avec une zone centrale assurant l'étanchéité

Les barrages en terre à noyau étanche présentent des avantages et des inconvénients spécifiques. Voici un aperçu :

I.6.2.1 Les avantages et l'inconvénient d'un barrage en terre à noyau étanche :

Les avantages des barrages en terre à noyau étanche sont les suivants :

- **Étanchéité** : Le noyau imperméable assure une barrière contre l'infiltration de l'eau à travers le barrage.
- **Stabilité** : Les zones de matériaux plus grossiers (recharges) garantissent la stabilité de l'ouvrage.
- **Adaptabilité** : Ces barrages peuvent être construits avec des matériaux locaux et s'adaptent aux mouvements du sol de fondation.
- **Mécanisation** : La construction peut être mécanisée à haut niveau.
- **Coûts comparables** : Le coût global est similaire à celui des barrages en béton.

CHAPITRE I: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Les inconvénients des barrages en terre à noyau étanche sont les suivants :

- Fuites fréquentes : Bien que l'étanchéité soit assurée par le noyau, des fuites peuvent survenir.
- Vulnérabilité à la submersion : En cas de déversement, ces barrages sont vulnérables, tout comme les barrages en terre.
- Volume de matériaux : Ils nécessitent un grand volume de matériaux (3 à 4 fois celui d'un barrage en béton de même volume).
- Fondation perméable : Si le sol de fondation est perméable, l'écoulement souterrain peut provoquer la déformation du barrage.

En résumé, les barrages en terre à noyau étanche sont des solutions flexibles, adaptées aux matériaux locaux, mais nécessitent une attention particulière à l'étanchéité et à la stabilité. [9]

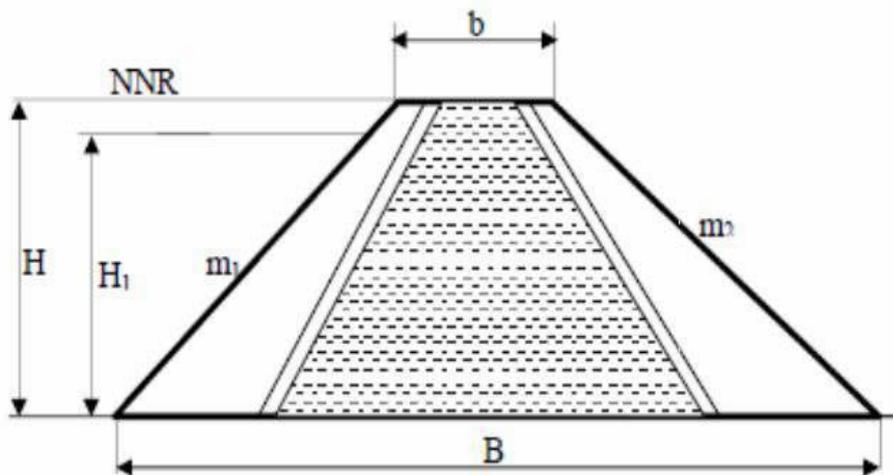


Figure I.10: Barrage à noyau étanche

I.6.3. Les barrages en terre à masque amont :

Un barrage à masque amont est un type de barrage en remblai qui comporte un masque d'étanchéité construit sur le parement amont du barrage. Ce masque peut être en béton armé, en béton bitumineux ou constitué d'une membrane mince, telle qu'une membrane PVC ou bitumineuse. Les barrages à masque amont sont une évolution des barrages en enrochement, qui sont les plus fréquents dans le parc de barrages d'Hydro-Québec. Ils sont utilisés pour stocker l'eau, réguler le débit, maintenir un niveau en amont, produire de l'électricité, etc. Les barrages en enrochement à masque amont sont souvent construits pour des hauteurs de plus de 50 mètres et sont utilisés dans le monde entier, notamment en Suisse, en France, en République tchèque et en Éthiopie

I.6.3.1 Les avantages et l'inconvénient d'un barrage en terre à masque amont :

Les avantages des barrages en terre à masque amont sont les suivants :

- Flexibilité du corps du barrage : Le remblai perméable offre une certaine flexibilité, ce qui permet au barrage de s'adapter aux conditions du terrain.
- Résistance aux tassements et aux séismes : Ces barrages sont moins sensibles aux tassements et aux secousses sismiques.
- Excavations limitées : Comparés à d'autres types de barrages, ils nécessitent moins d'excavations.
- Faibles contraintes sur le sol de fondation : Le poids du barrage est réparti sur une plus grande surface, ce qui réduit les contraintes sur le sol sous-jacent.

Les inconvénients des barrages en terre à masque amont sont les suivants :

- Volume de matériau nécessaire : La mise en place d'un grand volume de matériau est requise pour construire le remblai.
 - Dépendance à la disponibilité de matériau argileux : Ces barrages nécessitent de l'argile ou un matériau similaire à proximité du site de construction.
 - Pose du noyau argileux : La mise en place du noyau argileux peut être difficile par mauvais temps. En somme, les barrages en terre à masque amont sont des solutions ingénieuses pour la gestion des ressources en eau, mais ils ont leurs propres défis à relever.
- [10]

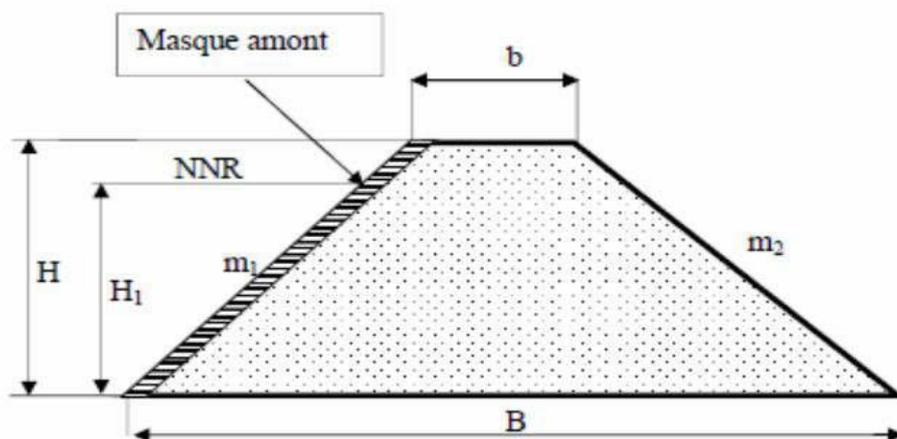


Figure I.11: Barrage a masque amont

I.7. Modes de construction d'un barrage :

La construction d'un barrage est un projet d'ingénierie complexe qui nécessite une planification minutieuse et une expertise technique. Que ce soit pour la gestion des ressources en eau, la production d'énergie hydroélectrique ou la prévention des inondations, la construction d'un barrage peut avoir de multiples bénéfices.

I.7.1. Étape 1 : Étude de faisabilité

Avant de commencer la construction d'un barrage, il est essentiel de réaliser une étude de faisabilité approfondie. Cette étude comprend l'évaluation de la topographie du site, l'analyse des ressources en eau disponibles, l'évaluation des impacts environnementaux et sociaux, ainsi que l'estimation des coûts et des avantages du projet. Il est recommandé de faire appel à des experts en génie civil et en hydrologie pour mener à bien cette étape.

I.7.2. Étape 2 : Conception du barrage

Une fois l'étude de faisabilité terminée, vient la phase de conception du barrage. Cela comprend la détermination de la taille et de la forme du barrage, le choix des matériaux de construction, ainsi que la conception des systèmes de contrôle des eaux et d'évacuation des crues. Il est important de se conformer aux normes de sécurité en vigueur et de faire appel à des ingénieurs spécialisés dans la conception de barrages.

I.7.3. Étape 3 : Obtention des autorisations

La construction d'un barrage nécessite souvent des autorisations légales et des permis spécifiques. Il est essentiel de se renseigner sur les réglementations en vigueur et de déposer les demandes nécessaires auprès des autorités compétentes. Il peut également être nécessaire d'effectuer des consultations publiques pour informer et impliquer les parties prenantes locales.

I.7.4. Étape 4 : Préparation du site

Avant de démarrer la construction proprement dite, il est nécessaire de préparer le site. Cela implique le défrichage de la végétation, le nivellement du terrain, ainsi que la construction des voies d'accès et des infrastructures temporaires. Il est important de prendre en compte les aspects environnementaux lors de cette étape et de mettre en place des mesures de protection des écosystèmes locaux.

I.7.5. Étape 5 : Construction des fondations

Les fondations du barrage sont cruciales pour assurer sa stabilité et sa durabilité. La construction des fondations peut nécessiter des travaux d'excavation, de forage et de consolidation du sol. Il est essentiel de suivre les plans de conception et de faire appel à des experts en génie géotechnique pour garantir la solidité des fondations.

I.7.6. Étape 6 : Construction du corps du barrage

Une fois les fondations terminées, vient la construction du corps du barrage. Cela peut impliquer l'utilisation de béton, de roches ou de matériaux composites spécifiques. Le choix des matériaux dépendra de la taille du barrage, des conditions géologiques et des contraintes environnementales. Il est essentiel de suivre les procédures des constructions recommandées et de s'assurer de la qualité des matériaux utilisés.

I.7.7. Étape 7 : Installation des systèmes de contrôle des eaux

L'installation de systèmes de contrôle des eaux dans les barrages est une étape cruciale dans la gestion efficace des ressources en eau et la prévention des catastrophes liées aux inondations. Ces systèmes sont conçus pour surveiller en temps réel les niveaux d'eau, les débits entrants et sortants, ainsi que d'autres paramètres hydrologiques et météorologiques pertinents. [11]

I.8. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exploré les différents types de barrages ainsi que leurs modes de construction. De la simplicité des barrages en remblai aux structures plus complexes des barrages en voûte et en arc, chaque type offre des avantages et des inconvénients uniques en fonction des conditions géographiques, hydrologiques et économiques.

Il est important de reconnaître que la construction de barrages comporte des défis techniques et environnementaux significatifs. Des considérations telles que la gestion des ressources en eau, les impacts sur les écosystèmes aquatiques et terrestres, ainsi que la sécurité des populations en aval doivent être soigneusement évaluées lors de la planification et de la construction de ces structures.

Les barrages en terre, également connus sous le nom de barrages en remblai, sont construits en utilisant principalement des matériaux terreux ou rocheux et peuvent varier en fonction de leur conception et de leur méthode de construction.

CHAPITRE II :
PRESENTATION
DE L'OUTIL
NUMERIQUE
PLAXIS

II.1. Introduction :

Les modèles à éléments finis sont largement utilisés par les ingénieurs géotechniciens du monde entier pour étudier différents paramètres permettant de résoudre de nombreux problèmes géotechniques avant de s'attaquer plus en détail aux étapes de la conception.

Dans ce chapitre, nous allons présenter le logiciel Plaxis et les modèles intégrés dans ce logiciel.

PLAXIS est un logiciel de modélisation et d'analyse par éléments finis largement utilisé par les ingénieurs géotechniciens. Il permet de résoudre de nombreux problèmes géotechniques avant de passer aux étapes de conception détaillée. Le logiciel offre des modèles intégrés pour la modélisation des essais géotechniques, la déformation, la stabilité, la mécanique des sols et des roches, ainsi que pour l'analyse des projets d'excavations, de remblais, de barrages, de fondations, de tunnels et d'autres ouvrages géotechniques. PLAXIS 2D est destiné à l'analyse géotechnique en 2D, tandis que PLAXIS 3D est conçu pour l'analyse en 3D. Ces logiciels sont utilisés pour modéliser, simuler, analyser et réaliser des projets géotechniques en utilisant la méthodologie des éléments finis. Ils offrent une interface conviviale, la possibilité de définir ses propres lois de comportement, et la prise en compte des éléments de structure et de l'interaction sol-structure. [12]

II.2. Présentation du code élément finis Plaxis :

PLAXIS est un logiciel d'analyse par éléments finis utilisé pour effectuer des analyses de déformation, de stabilité et d'écoulement pour divers types d'applications géotechniques. Les situations réelles peuvent être modélisées soit par une déformation plane, soit par un modèle axisymétrique. Le logiciel permet d'analyser des problèmes élastiques, élastoplastiques, élasto-viscoplastiques en 2D ou 3D et en grands déplacements. Les détails de chaque modèle peuvent être trouvés dans le guide d'utilisateurs de PLAXIS. Le logiciel comprend des lois de comportement à différents niveaux de complexité, depuis l'élasticité linéaire jusqu'à un modèle permettant de tenir compte de la raideur du sol sous de très petites déformations. Les modèles intégrés dans PLAXIS comprennent l'élasticité linéaire de Mohr-Coulomb et de Cam-Clay modifié. PLAXIS offre également la possibilité de modéliser les éléments de structures béton ou métal en interaction avec le sol, ainsi que certains problèmes de mécanique des roches. PLAXIS 2D est destiné à l'analyse géotechnique en 2D, tandis que PLAXIS 3D est conçu pour l'analyse en 3D. Le logiciel est utilisé pour modéliser, simuler, analyser et réaliser des projets géotechniques en utilisant la méthodologie des éléments finis. Il offre une interface conviviale et la possibilité de définir ses propres lois de comportement. [13]

II.2.1. Les sous-programmes de Plaxis :

L'interface d'utilisation de PLAXIS se compose de quatre sous-programmes (Input, Calculations, Output et Curves) :

CHAPITRE II : PRESENTATION DE L'OUTIL NUMERIQUE PLAXIS

a- Le programme d'entrée de données (Input) :

- Ce programme permet de créer et modifier un modèle géométrique.
- Il génère le maillage d'éléments finis correspondant et définit les conditions initiales.

b- Le programme de calcul (Calculations) :

- Ce programme est utilisé pour définir et lancer un calcul par la méthode des éléments finis.
- L'utilisateur doit choisir le projet pour lequel les calculs seront effectués.

c- Le programme de résultats (Output) :

- Ce programme affiche les résultats des données générées et des calculs d'éléments finis.
- L'utilisateur sélectionne le modèle, la phase de calcul appropriée ou le numéro du pas pour afficher les résultats.

d- Le programme courbe (Curves) :

- Ce programme génère des courbes charges-déplacements, des chemins de contrainte et des courbes contraintes-déformations.

La réalisation d'une modélisation avec Plaxis se traduit en général, par l'enchaînement des Étapes suivantes :

- Utilisation du préprocesseur « Plaxis Input », pour la génération des données (maillage, Jeu des données et contraintes initiales).
- Lancement du code de calcul éléments finis « Plaxis Calcúlate », pour effectuer la Résolution numérique du problème étudié.
- Utilisation de post-processeur « Plaxis Output », pour l'interprétation des résultats sur écran graphique.
 - Utilisation de post-processeur « Plaxis curve », pour l'interprétation des courbes (courbe De consolidation, chemin des contraintes,....etc.).

II.2.2. Les modèles de comportement intégré dans Plaxis :

II.2.2.1. le modèle de Mohr Coulomb

Mohr Coulomb a modélisé le comportement non linéaire du sol en deux lignes bilinéaires, comme le montre la figure ci-dessous.

Ce modèle bien connu est utilisé généralement comme une première approximation du comportement d'un sol. Le modèle de Mohr-Coulomb demande la détermination de cinq

CHAPITRE II : PRESENTATION DE L'OUTIL NUMERIQUE PLAXIS

Paramètres. Les deux premiers sont E et ν (paramètres d'élasticité). Les deux autres sont c et φ , respectivement, la cohésion et l'angle de frottement. Ce sont des paramètres classiques de la géotechnique, certes souvent fournis par des essais de laboratoire, et nécessaires à des calculs de déformation ou de stabilité. Enfin, ce modèle est non associé et Ψ est l'angle de dilatance.[14]

a)_Module de Young

Le choix d'un module de déformation est un des problèmes les plus difficiles en géotechnique. Le module de déformation varie en fonction de la déformation et en fonction de la contrainte moyenne. Dans le modèle de Mohr-Coulomb, le module est constant. Il paraît peu réaliste à considérer un module tangent à l'origine (ce qui correspondait au G_{max} mesuré dans des essais dynamiques ou en très faibles déformations). Ce module nécessite des essais spéciaux. Il est conseillé de prendre un module moyen, par exemple celui correspondant à un niveau de 50 % du déviateur de rupture figure Fig.II.1[15]

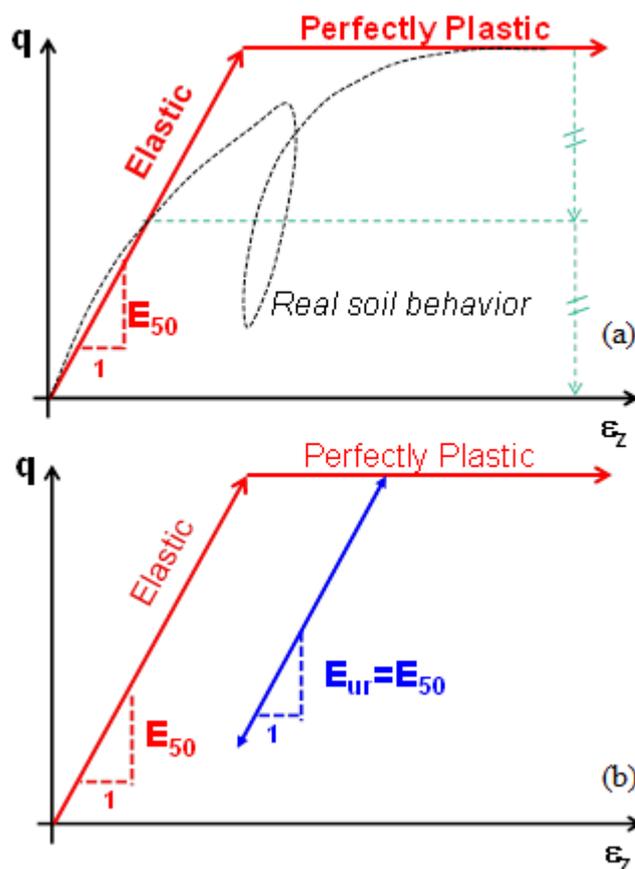


Figure II.1: Définition du module de young à 50% de la rupture

b)_Coefficient de poisson :

Les valeurs du coefficient de Poisson se situent entre 0.2 et 0.4 pour la majorité des sols.

CHAPITRE II : PRESENTATION DE L'OUTIL NUMERIQUE PLAXIS

c)-L'angle de frottement :

L'angle de frottement est constant et dépend de la nature du sol, Plaxis ne prend pas en compte une variation d'angle de frottement avec la contrainte moyenne. L'angle de frottement à introduire est soit l'angle de frottement de pic soit l'angle de frottement de palier.

d)-La cohésion :

Il peut être utile d'attribuer, même à des matériaux purement frottant, une très faible Cohésion (0,2 à 1 kPa) pour des questions numériques.

e)-L'angle de dilatance :

Le dernier paramètre est l'angle de dilatance noté Ψ ; c'est le paramètre le moins courant. il peut cependant être facilement évalué par la règle (grossière) suivante :

$$\Psi = \varphi - 30^\circ \quad \text{pour } \varphi > 30^\circ$$

$$\Psi = 0^\circ \quad \text{pour } \varphi < 30^\circ$$

Le cas où $\psi < 0^\circ$ correspond à des sables très lâches (état souvent dit métastable, ou liquéfaction statique).

La valeur $\psi = 0^\circ$ correspond à un matériau élastique parfaitement plastique, ou il n'y a donc pas de dilatance lorsque le matériau atteint la plasticité. C'est souvent le cas pour les argiles ou pour les sables de densité faible ou moyenne sous contraintes assez fortes.

II-2-2-2 Modèle de sol avec écrouissage (Duncan et change (Hardening Soil Model, HSM)):

Ce type de modèle est bien adapté à la modélisation de creusement d'ouvrages souterrains où on est simultanément devant un phénomène de chargement et déchargement (ce phénomène est ainsi pris en charge par une rigidité en déchargement/rechargement réf Eur plus élevée que celle en chargement réf E50).

Le modèle a pour objet d'améliorer le modèle de Mohr-Coulomb sur différents points ; il s'agit essentiellement:

- de prendre en compte l'évolution du module de déformation lorsque la contrainte augmente : les courbes œdométriques tracées en contrainte-déformation ne sont pas des droites ;
- de prendre en compte l'évolution non linéaire du module lorsque le cisaillement augmente: le module E50 n'est pas réaliste car il y a une courbure des courbes effort-déformation avant d'atteindre la plasticité ;
- de distinguer entre une charge et une décharge ;
- de tenir compte de la dilatance qui n'est pas indéfinie.

CHAPITRE II : PRESENTATION DE L'OUTIL NUMERIQUE PLAXIS

*Les paramètres du HSM:

a) Paramètres de Mohr-Coulomb :

c : cohésion (effective) [kN/m²]

φ : angle de frottement effectif [°]

Ψ : angle de dilatance [°]

b)- Paramètres de rigidité :

E_{50ref} : module sécant dans un essai triaxial [kN/m²]

E_{oedref} : module tangent dans un essai œdométrique [kN/m²]

m : puissance (de type Janbu (1963) environ 0,5 pour les sables, Alors que Von Soos (1990) introduit différentes valeurs de m : $0,5 < m < 1,0$) [-]

c) Paramètres avancés :

E_{urref} : module en décharge (par défaut $E_{urref} = 3 E_{50ref}$) [kN/m²]

ν_{ur} : coefficient de poisson en décharge-recharge (par défaut $\nu_{ur} = 0.2$) [-]

p_{ref} : contrainte de référence (par défaut $p_{ref} = 100$) [kN/m²]

k_{0nc} : coefficient des terres au repos pour un sol normalement consolidé (Jaky, 1944)

R_f : coefficient à la rupture q_f / q_a (par défaut $R_f = 0.9$) [-]

$\sigma_{tension}$: résistance à la traction (par défaut $\sigma_{tension} = 0$) [kN/m²]

cincrement: comme dans le modèle de Mohr-Coulomb (par défaut cincrement = 0) [kN/m³]

La définition du module œdométrique tangent est donnée sur la figure II.2 et celle de la dilatance (éventuellement tronquée) figure II.3

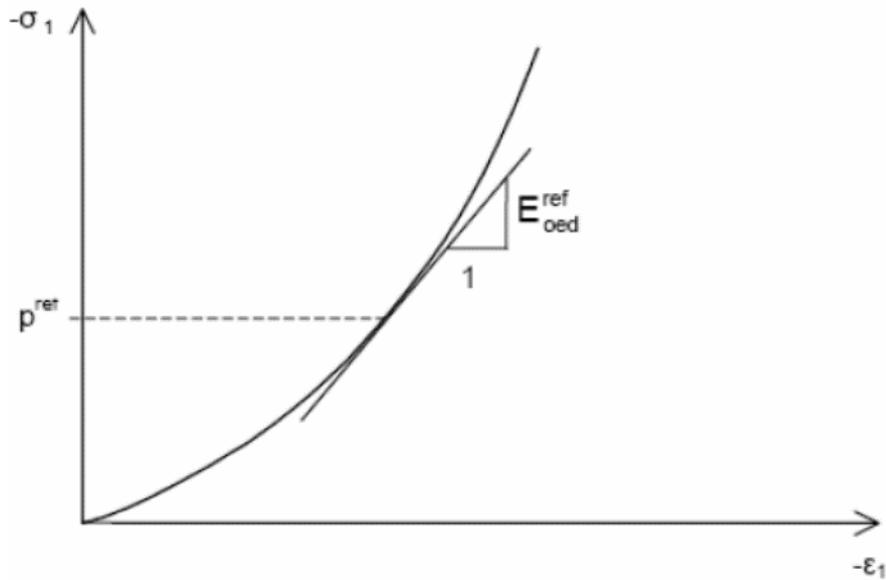


Figure II.2: Définition du module œdométrique tangent

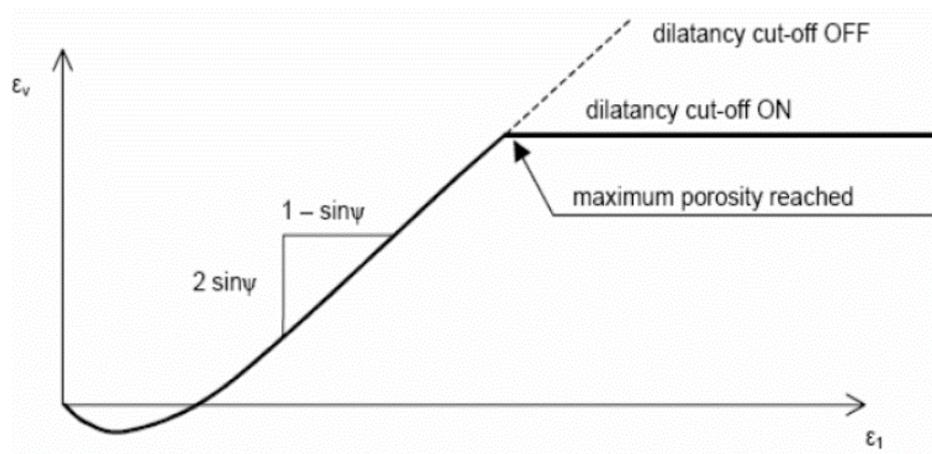


Figure II.3: Définition de l'angle de dilatance

II.3 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exploré la présentation du code élément finis PLAXIS, en mettant particulièrement l'accent sur les paramètres des modèles de Mohr-Coulomb et du modèle de sol durcissant (Hardening Soil Model). PLAXIS est un logiciel puissant largement utilisé dans l'analyse géotechnique pour simuler le comportement des sols et des structures dans des conditions variées.

La compréhension des paramètres du modèle de Mohr-Coulomb et du modèle de sol durcissant dans PLAXIS constitue une étape cruciale dans la modélisation géotechnique. Cette connaissance permet aux ingénieurs de mieux évaluer les risques géotechniques, de concevoir des structures robustes et de prendre des décisions éclairées dans la planification et la gestion des projets géotechniques.

**CHAPITRE III :
DISPOSITIFS
EXPERIMENT
AUX ET ESSAIS
REALISES**

III.1. Introduction :

Nous allons présenter dans ce chapitre les essais réalisés, ainsi que leur mode d'utilisation et les différents modes de préparation des échantillons.

Il vise à évaluer les propriétés mécaniques du sol et à s'assurer de sa capacité à résister aux pressions et à maintenir sa stabilité. Ces expériences comprennent des mesures de densité, de stabilité et de structure granulaire du sol, ainsi que la détermination de propriétés mécaniques telles que la résistance ultime et la déformation. Les résultats de ces expériences sont soigneusement documentés pour garantir la sécurité et le succès de la construction des barrages en terre. Ces expériences incluent également l'étude du comportement des saletés dans les barrages en terre et de leurs effets sur les déformations.

Dans ce chapitre nous allons présenter les démarches à suivre pour chaque essai.

III.2. LES MATERIAUX :

III.2.1.le sols :

Un sol est un mélange de 3 éléments : solide (squelette), eau (libre ou non), et gaz (air).

Nous schématiserons les sols comme étant composé de trois phases. Une phase solide composée de particules minérales solides et organiques. Une phase liquide sous différentes formes appelées : eau libre, eau interstitielle et pour finir une phase gazeuse

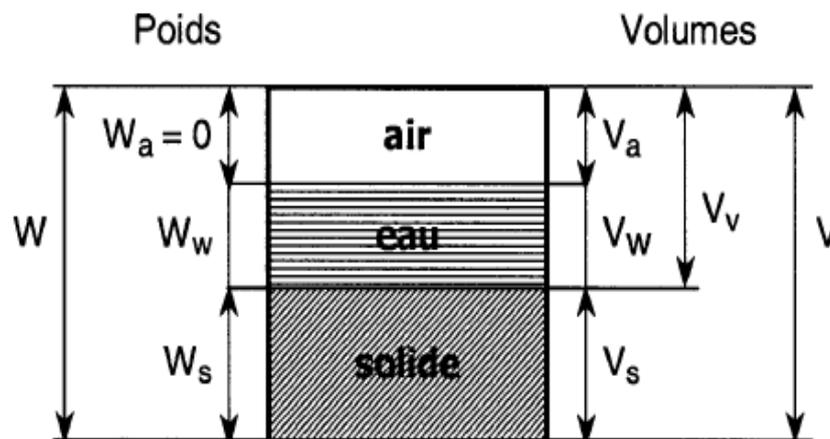


Figure III. 1 : les phases des sols.

III.2.2.la chaux :

Le terme « chaux » désigne les produits dérivés du calcaire, notamment la chaux vive et la chaux éteinte. Le calcaire est une pierre d'origine naturelle comportant des niveaux élevés de carbonates de calcium et/ou de magnésium. On extrait le calcaire dans des carrières et des mines à travers le monde.



Figure III. 2 : la chaux utilisée

III.2.3 la pouzzolane :

La pouzzolane fait référence à des matériaux à base de silicium qui ont peu de valeur en ciment et sont utilisés comme matériaux alternatifs au ciment. Ces matériaux peuvent être tels que des cendres volcaniques, de la silice et des cendres volantes. La pouzzolane agit pour améliorer les propriétés du béton, telles que le développement de la résistance et de la durabilité, et est utilisée dans diverses applications telles que les structures en béton et la construction de barrages.



Figure III. 3 : la pouzzolane utilisée

III.2.4 les caractéristiques physique et chimique de la pouzzolane (Beni saf)

La pouzzolane de Béni Saf, une roche volcanique utilisée depuis longtemps dans la construction, notamment pour la fabrication de ciments et de bétons, possède des caractéristiques physiques et chimiques spécifiques qui la rendent particulièrement intéressante.

III.2.4.1 Caractéristiques Physiques

- **Apparence :** La pouzzolane est généralement de couleur noire, brune, ou rougeâtre en fonction de sa composition minérale.
- **Densité :** Elle a une faible densité, typiquement comprise entre 0.9 et 1.2 g/cm³, ce qui la rend légère et facile à manipuler.

●**Porosité** : La pouzzolane est hautement poreuse, avec une porosité pouvant atteindre 50%. Cette porosité favorise une bonne absorption d'eau, utile pour certains types de bétons.

●**Taille des grains** : Elle se présente sous forme de grains de différentes tailles, allant de quelques micromètres à plusieurs centimètres. La granulométrie peut être ajustée selon l'application souhaitée.

III.2.4.2 Caractéristiques Chimiques

●**Silice (SiO₂)** : La pouzzolane est riche en silice, généralement entre 45% et 60%. La silice réactive contribue aux propriétés pouzzolaniques, réagissant avec l'hydroxyde de calcium pour former des silicates de calcium hydratés (C-S-H).

●**Alumine (Al₂O₃)** : Elle contient également de l'alumine, souvent entre 10% et 20%, participant aussi aux réactions pouzzolaniques.

●**Oxyde de fer (Fe₂O₃)** : La teneur en oxyde de fer varie, typiquement entre 5% et 15%, influençant la couleur et certaines propriétés physiques.

●**Oxyde de calcium (CaO)** : Présente en moindre quantité (2% à 10%), cette composante peut légèrement modifier la réactivité chimique.

●**Oxyde de magnésium (MgO)** : En général, la teneur en MgO est faible, autour de 1% à 5%.

●**Autres oxydes** : Des traces d'oxydes de sodium (Na₂O) et de potassium (K₂O) peuvent être présentes, mais en faibles proportions.

III.3. Limites d'Atterberg :

Les limites d'atterberg, qui comprennent la limite de plastique, la limite de liquide et la limite de retrait, constituent une mesure de base de la teneur importante en humidité (eau) des matériaux à grains fins. Sols. Lorsque la teneur en humidité du sol argileux augmente, des changements clairs et importants se produisent dans sa texture et son comportement. Le sol est classé en 4 états différents en fonction de sa teneur en humidité (eau) :

1. Solide : lorsqu'il est sec et solide.

2. Semi-solide : Lorsque sa teneur en humidité augmente, il devient cassant et friable.

CHAPITRE III: DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX ET ESSAIS REALISES

3. Plastique : Il reste dans cet état jusqu'à ce qu'il dépasse la limite de liquidité, qui à son tour se transformera en un liquide visqueux.

4. Liquide : Lorsqu'il devient plastique, malléable et élastique, ce qui entraînera un gonflement indésirable.

Les limites de l'atterberg jouent un rôle majeur dans la distinction entre les sols argileux et limoneux et leurs différents types. Ces limites ont été établies par le scientifique et expert agricole suédois Albert Atte berg, puis vérifiées par le scientifique Arthur Casa grande. Ces différentes limites liées au sol ont été utilisées pour évaluer le sol et vérifier s'il est possible ou non de construire dessus. Il est également important de connaître les changements de volume qui se produisent dans le sol, car l'augmentation de volume est due à la capacité du sol à absorber l'eau (ses propriétés atomiques).

Ces tests sont généralement réalisés sur des sols argileux et limoneux ; Parce que leurs tailles augmentent en raison des différences de teneur en humidité. Les sols argileux et limoneux interagissent avec l'eau, provoquant des modifications de leurs volumes et de leurs forces de cisaillement. Par conséquent, ces tests sont en grande partie effectués dans les premières étapes de la conception de toute structure sur des types de sol.

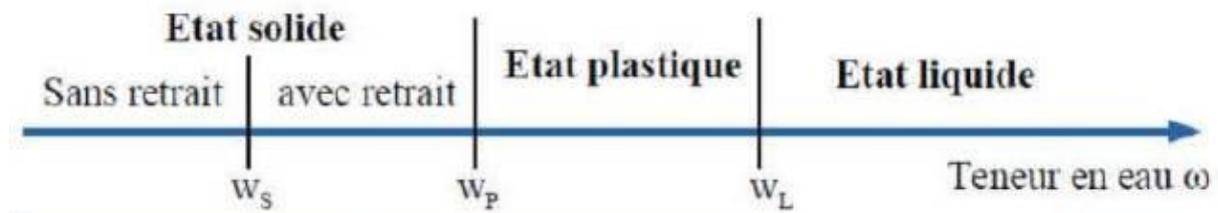


Figure III. 4 : limites d'atterberg sont exprimées en pourcentage

III.3.1 Limite de liquidité WL :

La limite de liquidité (w_l) caractérise la transition entre un état plastique et un état liquide. C'est la teneur en eau pondérale, exprimée en pourcentage, au-dessus de laquelle le sol s'écoule comme un liquide visqueux sous l'influence de son propre poids.

Formule de la teneur en eau pondérale : $\frac{\text{masse(eau)}}{\text{masse(sol.s)}}$ en gramme



Figure III. 5 : la limite de liquidité

III.3.2 Limite de plasticité WP :

La limite de plasticité (wp) caractérise la transition entre un état solide et un état plastique. Cette limite indique la teneur en eau pondérale, en pourcentage, optimale pour travailler un sol et favoriser le compactage¹. En dessous de cette limite, le sol est friable ou facilement travaillable d'un point de vue agronomique. La limite de plasticité est déterminée par le modelage d'un petit fil avec la partie fine d'un sol sur une surface plane, non poreuse. La procédure est définie dans la norme ASTM D 4318. Si le sol est plastique, ce petit fil conserve sa forme jusqu'à un diamètre très étroit. L'échantillon peut alors être reformulé et l'essai est répété. Comme la teneur en humidité diminue à cause de l'évaporation, le fil commence à se briser à grands diamètres. La limite de plasticité est définie comme étant la teneur en eau, où le fil se casse à un diamètre de 3 mm . Un sol est considéré comme non-plastique, si un fil ne peut pas rouler jusqu'à 3 mm, quel que soit le taux d'humidité de la partie fine du sol.



Figure III. 6 : Les étapes de la limite de plasticité.

III.3.3 L'indice de plasticité IP :

Il donne l'étendue du domaine plastique $IP = WL - WP$. 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 (WL, IP) 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.

$<1\%$	Pulvérulent
$1\% < IP < 7\%$	Sable argileux
$7\% < IP < 17\%$	Argile sableuse
$IP > 17\%$	Argile

Tableau III .1: Classification d'argile selon l'indice de plastic

CHAPITRE III: DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX ET ESSAIS REALISES

N coup	P total	P sec	P tare	P sol H	P sol S	P eau	W	W*100
30	32.5	30.7	24.9	7.6	5.8	1.8	0.31034483	31.034483
25	29.6	28.4	24.81	4.79	3.59	1.2	0.33426184	33.426184
15	32.3	30.6	25.9	6.4	3.59	2.81	0.45238095	45.238095

Tableau III .2 : Calculs limite de liquidité

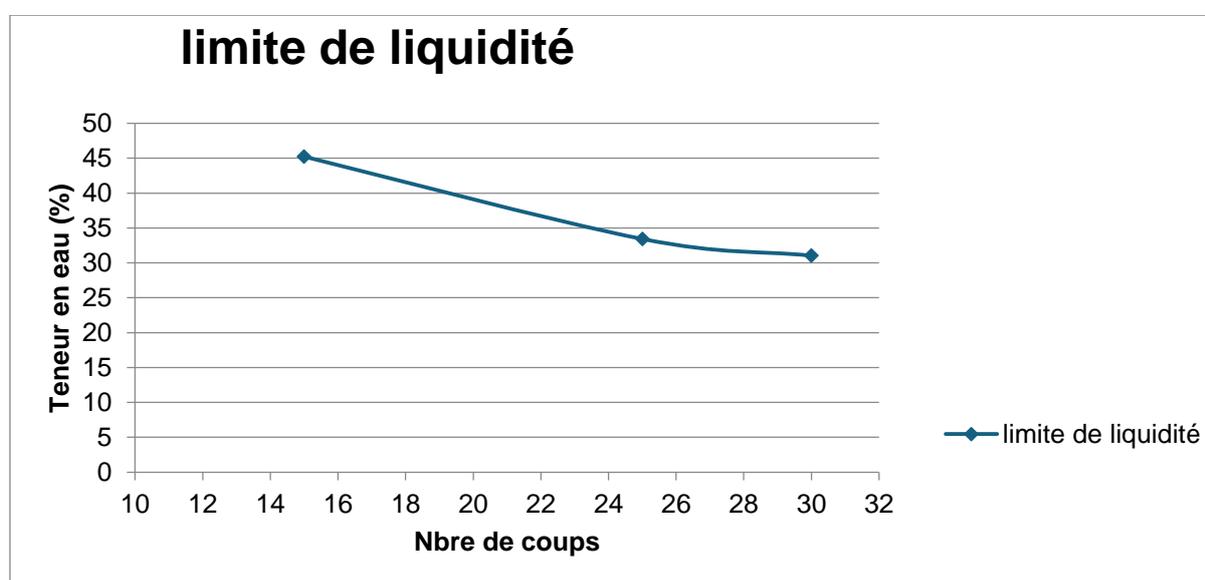


Figure III. 7 : courbe de la limite de liquidité

- **Calcul Limite de plasticité**

P total	P sec	P tare	P sol H	P sol S	P eau	W	W*100	Moyen
27.1	27	26.05	1.05	0.95	0.1	0.10526316	10.526316	14.6971202
26.6	26.4	25.34	1.26	1.06	0.2	0.18867925	18.867925	

Tableau III. 3 : Calcul de limite de plasticité

CHAPITRE III: DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX ET ESSAIS REALISES

On obtient :

Limite de liquidité WL	36.5662
Limite de plasticité WP	14.69
L'indice de plasticité IP	21.86

- D'après le résultat on trouve que le sol est une argile peu plastique.

III.4 Essai de bleu de méthylène :

III.4.1 Principe de l'essai :

Le principe de l'essai au bleu de méthylène VBS consiste à évaluer la richesse en argile d'un sol en mesurant sa capacité d'absorption de molécules de bleu de méthylène. Plus précisément, cet essai permet de déterminer la quantité de colorant (bleu de méthylène) fixée par une certaine quantité de la fraction granulaire analysée, ce qui aide à évaluer la présence et la concentration d'argile dans le sol. En pratique, des réactifs spécifiques, tels qu'une solution colorée de bleu de méthylène, sont utilisés pour mesurer cette absorption et déterminer la valeur de bleu du sol, exprimée en grammes de colorant adsorbé par une unité de masse de la fraction granulaire du sol. L'essai au bleu de méthylène VBS est donc un outil essentiel pour évaluer la composition des sols en termes d'argile.

III.4.2 Matériel nécessaire :

- Une balance permettant de faire toutes les pesées.
- Un chronomètre, un papier filtre, une baguette de verre.
- Un agitateur à ailettes
- Un bécher de 1 ou 2 litres en matière plastique.
- Une étuve ventilée ou autre moyen de séchage Bleu de méthylène à 10g /l avec doseur permettant des injections de 2, 5ml et 10ml Un chronomètre.



Figure III.8: Appareillage de l'essai de bleu

III.4.3 Préparation de l'échantillon :

L'essai est effectué sur la fraction granulométrique 0/5mm du matériau, car ce sont Principalement les éléments les plus fins (inférieurs à 2mm) qui contiennent la fraction argileuse.

Celle-ci donne l'essentiel de la réaction au bleu de méthylène et exprime donc de manière quantifiée la Sensibilité du sol à l'eau.

On prépare 30g de fraction 0/5 mm sèche que l'on met à tremper dans 200 ml d'eau déminéralisée. Le tout est maintenu en agitation permanente au moyen de l'agitateur à ailettes.

Le dosage consiste à injecter successivement des doses bien déterminées de bleu de méthylène dans la suspension de sol, jusqu' à atteindre la saturation des particules d'argile. Le test de la tache permet de repérer l'instant de cette saturation.

On prélève une goutte de liquide dans le bêcher contenant le sol imbibé de bleu, et on dépose

Celle-ci sur le papier filtre (diamètre du dépôt compris entre 8 et 12 mm). Deux cas sont possibles :

- la goutte centrale bleue est entourée d'une zone humide incolore : le test est négatif,
- la goutte centrale bleue est entourée d'une zone humide teintée de bleu; le test est positif [17]

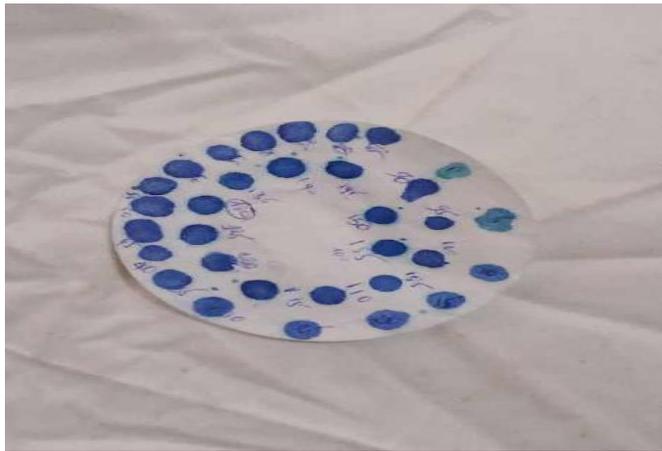


Figure III. 9 : Résultats de valeur au bleu.

III.4 .4Classification des sols après essai :

<0.2	Sols sableux
0.2-2.5	Sols limoneux
2.5-6	Sols limoneux-argileux
6-8	Sols argileux
>8	Sols très argileux

Tableau III.4: classification des sols selon la valeur de VBS

La valeur du bleu du sol est :

$$VBS = v/m$$

D'après le calcul de valeur de bleu :

Valeur de bleu	
VBS	6.19
S sst	130

- Donc on a : un sol argileux.

III.5. Analyse granulométrique par sédimentation NF P94-057 :

III.5.1 Principe de l'essai:

Cette méthode est basée sur le fait que les grains de diamètre différent sédimentent dans un milieu liquide au repos à vitesses différentes. L'essai consiste à laisser une suspension de sol se déposer au fond d'une éprouvette pleine d'eau. Plus les grains sont fins, plus la vitesse de décantation est lente. La mesure de la densité de suspension à des intervalles de temps variables permet de calculer la proportion des grains de chaque diamètre. La relation entre diamètre des grains et vitesse de sédimentation est donnée par la loi de Stokes :

$$V = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1.8\mu} d^2$$

V: vitesse de décantation de la particule (cm/s)

d: diamètre de la particule (cm)

γ_s : Poids spécifique de la particule

γ_w : Poids volumique du liquide utilisé (KN/m³)

μ : viscosité dynamique du liquide (pa/s)

III.5.2 But de l'essai :

- Prendre deux d'éprouvettes à essais de 1 litre de contenance.
- Prendre l'une des deux éprouvettes et compléter avec de l'eau distillée jusqu'à 1 litre. Cette éprouvette sera appelée l'éprouvette témoin l'éprouvette B Prendre 60cm³ de dé flocculant et 80g du sol tamisé 80 μ et compléter avec 440cm³ l'eau distillée pour obtenir une solution 500cm³. Agiter avec un agitateur mécanique pendant 0 3 min.
- Verser la suspension dans la deuxième éprouvette A
- Compléter l'éprouvette avec l'eau distillée jusqu'à 1 litre.
- Procéder à une homogénéisation de la suspension à l'aide de l'agitateur manuel.
- Introduire le densimètre dans la suspension et procéder aux lectures (O les appeler). Les temps de lecteur sont 30s, 1min ,2min, 5min ,10min ,30min, 60min, 120min, 240min, 1440min. A la fin des lecteurs, le densimètre est retiré de l'éprouvette A, l'éprouvette B. procéder à la lecture de la densité de la solution de l'éprouvette B (On L'appellera Rb).
- A l'aide du thermomètre, procéder au lecteur de la température de la solution de l'éprouvette B.
- Pour les 5 premières lectures, le densimètre est introduit dans la suspension environ 30s avant le lecteur.



Figure III. 10 : Appareillage sédimentation

III.5.3 Calcul :

III.5.3.1 Calcul du pourcentage des particules non décantées :

Le pourcentage des particules qui sont en suspension est donné par :

$$P = \left[100 \times \frac{v_s}{m} \times \frac{p_s}{p_s - p_w} p_w \right] (R_t - 1)$$

V_s : Volume de la suspension (1 litre)

m : Masse de la prise d'essai (40 grammes)

P_s : Masse volumique des grains solides (2650 kg/m^3)

p_w : Masse volumique de l'eau.

R_t : lecture de l'éprouvette A au temps t .

R_b : lecteur de l'éprouvette B (éprouvette témoin).

III.5.3.2 Calcul du diamètre des particules non décantées :

Le diamètre des particules qui sont en suspension est donné par :

$$D = F \sqrt{\frac{Ht}{t}}$$

F est un facteur donné par l'abaque suivant :

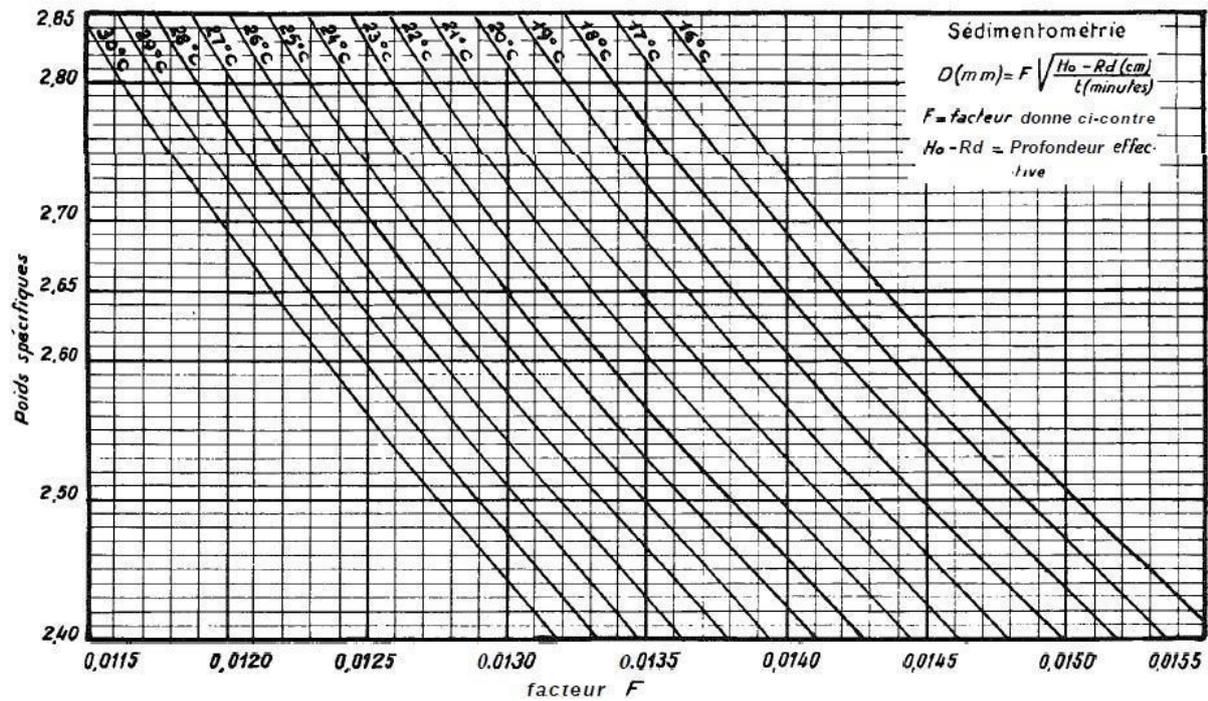


Figure III. 11: L'abaque d'Analyses par sédimenteriez

t est le temps de lecteur en minute.

Ht est la profondeur effective du centre de poussée du densimètre en Centimètre.

Elle donnée par :

$$H_t = 22.2 - 100 \times 3.8(R_t - R_b) - H_c$$

Avec :

Hc est le déplacement de la suspension du à l'introduction du densimètre

Elle est prise (par convention) égale à 0 pour les 3 premiers lecteurs et égale à 1.4 cm pour la suite.

CHAPITRE III: DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX ET ESSAIS REALISES

III.5.4 Les résultats sont donnés dans un tableau suivant :

Les temps (min)	WP	RT	Rb	T (c°)	H t (cm)	D (mm)
0.5	1.98	1.025	0.98	20	11.33	0.0643
1	1.90	1.024	0.98	20	11.61	0.0460
2	1.82	1.023	0.99	20	11.89	0.0330
5	1.66	1.021	0.99	20	11.06	0.0201
10	1.50	1.019	0.99	20	11.62	0.0146
30	1.50	1.019	0.99	21	11.62	0.0083
60	1.34	1.017	0.99	21	12.19	0.0060
120	1.18	1.015	0.99	21	12.76	0.0044
240	1.03	1.013	0.99	21	12.32	0.0031
1440	0.79	1.010	0.99	21	14.17	0.0013

Tableau III.5 : Les calculs d'essais de sédimentation

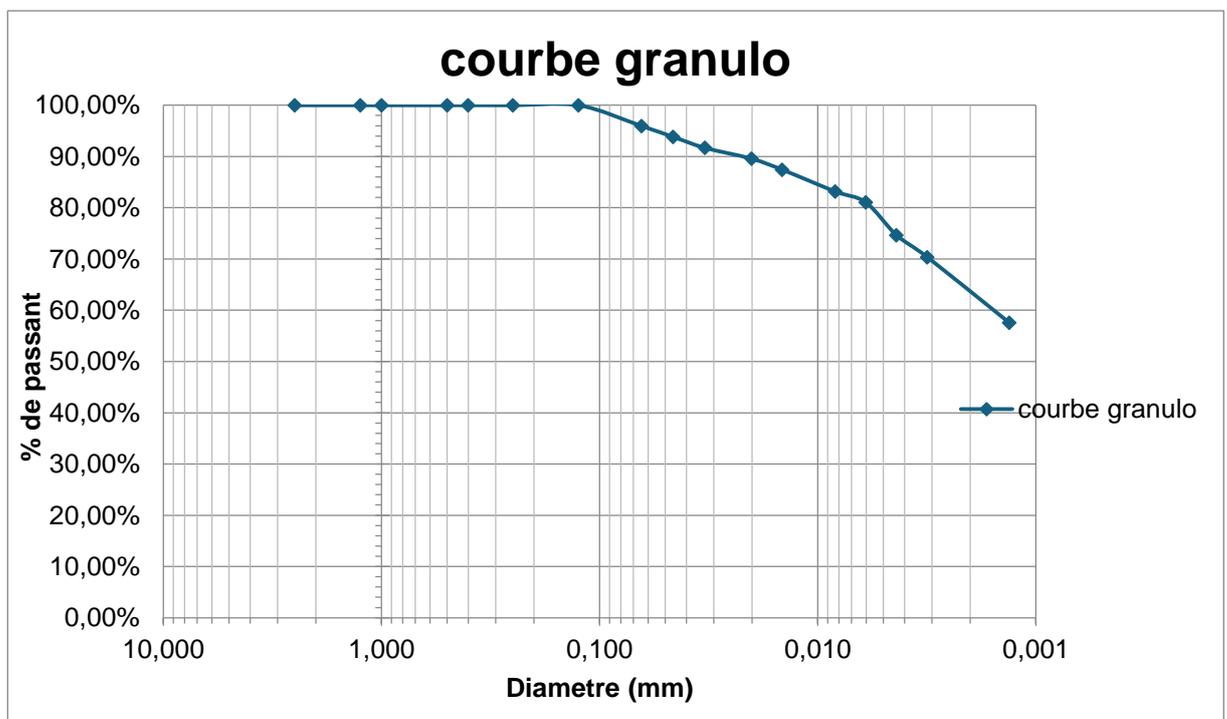


Figure III.12 : courbe granulométrie et sédimentation

III.6.Essai Proctor :

III.6.1Principe de l'essai de compactage :

Le principe de cet essai 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 chacune des valeurs de la 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.

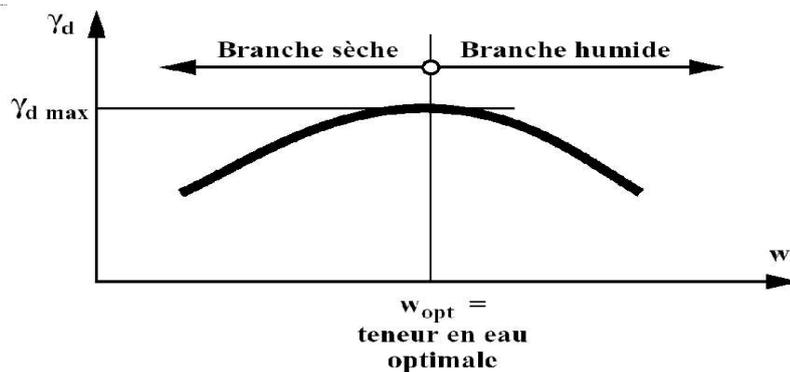


Figure III. 13: Courbe de Proctor.

III.6.2Mode opératoire :

- Pour réaliser l'essai il faut 5 point, encadrant le maximum.
 - Peser 3kg du sol passé au tamis 5 mm
 - Assembler le moule et l'embase, peser l'ensemble (soit m_1) et mettre en place la hausse.
 - Introduire la première couche de sol et le compacter
 - Procéder de manière identique pour les couches suivantes
 - Après compactage de la dernière couche, agrafer soigneusement le moule et le nettoyer puis le peser (soit m_2).
 - Oter l'embase et prélever deux prises sur l'échantillon, l'une en haut et l'autre en bas, et en détermine la teneur en eau on prendra la moyenne des deux valeurs obtenues.
 - On obtient ainsi le premier point de la courbe dont les coordonnées sont :
 - En abscisse: w , teneur en eau
 - En ordonnée : γ_d , poids volumique sec.
- Pour les points suivants, augmenter à chaque fois la teneur en eau de 5% et recommencer les mêmes opérations.

CHAPITRE III: DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX ET ESSAIS REALISES



Figure III. 14 : L'essai de compactage

-D'après l'avoir de résultat suivant :

-Poids de moule vide = 5,733

-Volume de moule = 0,000948075

W%	P moule (kg)	P sol (Kg)	V moule (m^3)		γ_h (KN/m^3)	1+W (%)	W (%)	γ_d (KN/m^3)
10	7.356	1.623	0.00094808	1711.8447	1.7118447	1.11929825	11.929825	1.5294314
15	7.583	1.85	0.00094808	1951.2709	1.9512709	1.16323529	16.3235294	1.67749589
20	7.741	2.008	0.00094808	2117.92	2.11792	1.17633285	17.6328502	1.80049697
22	7.655	1.922	0.00094808	2027.25508	2.02725508	1.2	20	1.68937924
24	7.647	1.914	0.00094808	2018.77439	2.0187744	1.32417582	32.4175824	1.52459182

Tableau III.6: Les résultats des paramètres de l'essai Proctor

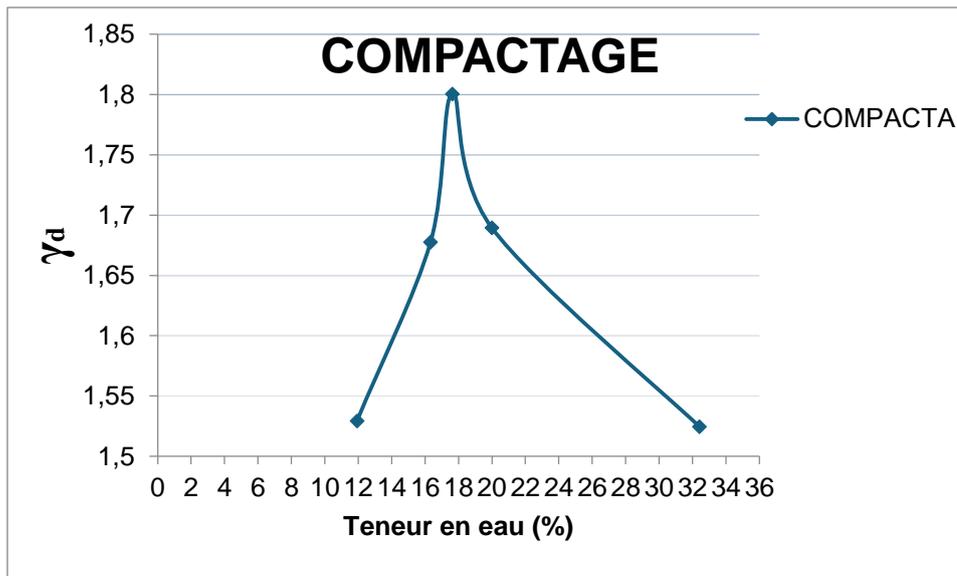


Figure III.15: La courbe Proctor normal

$W_{opt} = 17.63\%$ $\gamma_{dmax} = 1,8$

- La courbe de compactage qu'on a obtenue, il est constaté que le poids volumique sec maximal a une valeur de 1,8 et un teneur en eau optimum de 17.63%.

III.7 Essais de cisaillement :

III.7.1 Principe de l'essai:

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans une boîte de cisaillement constituée de 2 demi-boîtes indépendantes. Le plan de séparation des 2 demi-boîtes constitue un plan de glissement correspondant au plan de cisaillement de l'éprouvette.

Cet essai consiste à:

- Appliquer sur la face supérieure de l'éprouvette un effort vertical (N) maintenu constant pendant toute la durée de l'essai.
- Produire après consolidation de l'éprouvette sous l'effort N un cisaillement dans l'éprouvette selon le plan de séparation des 2 demi-boîtes en imposant un déplacement relatif de ces demi-boîtes à vitesse constante.
- Mesurer l'effort I de cisaillement correspondant. [17]

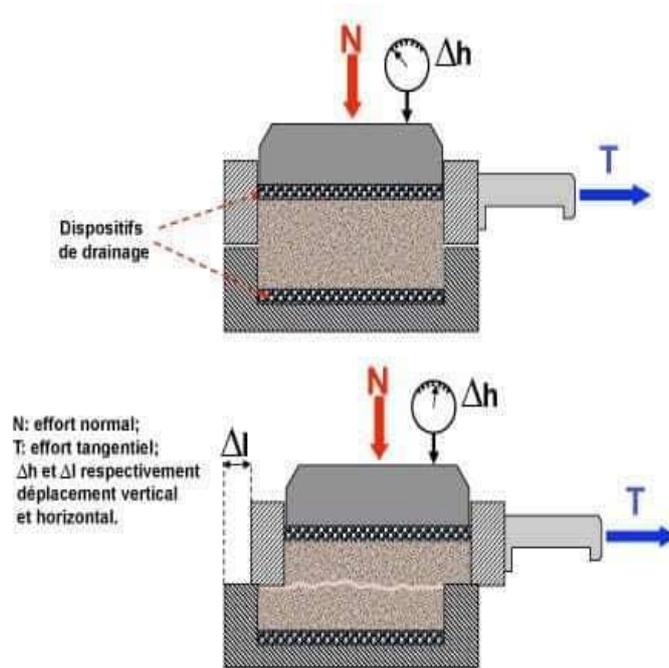


Figure III. 16: principe de l'essai de cisaillement direct

III.7.2 Préparation de la boîte de Casa grande :

1. Avant de remplir la boîte, placez correctement les deux demi-boîtes l'une par rapport à l'autre et solidariser les à aide des goupilles en aluminium.
2. Vissez ensuite les deux vis métalliques sur la demi-boîte supérieure. A partir du moment où elles arrivent en contact avec la boîte inférieure, vissez les vis d'un demi de tour supplémentaire. De cette manière, vous surélevez très légèrement la boîte supérieure, et vous évitez alors que le frottement des demi-boîtes l'une sur l'autre altère la mesure.
3. Refermez la boîte avec le piston, celui-ci doit venir affleurer la partie supérieure de la demi-boîte supérieure. Préparation de la machine
4. La vitesse de cisaillement est conditionnée par le type essai qu'on veut réaliser. Pour un Essai non drainé, ou sur sol sec, nous pouvons travailler avec une vitesse relativement élevée de 1 mm/min. Le réglage de cette vitesse se fait à l'aide des pignons présents sur le bâti de la machine
5. Contraintes vertical es : On a réalisé quatre essais pour les valeurs de contraintes normales suivantes:

Essai n°1 : $\sigma = 50$ kPa (masse = 2 kg)

Essai n°2 : $\sigma = 100$ kPa (masse = 4kg);

Essai n°3 : $\sigma = 200$ kPa (masse = 8 kg).

Essai n°4 : $\sigma = 300$ kPa (masse = 12 kg).

CHAPITRE III: DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX ET ESSAIS REALISES

6. Préparation des échantillons : on dispose notre sol directement dans la boîte et avant de remplir une boîte, on place correctement les deux demi-boîtes l'une par rapport à l'autre et solidarisez-les à l'aide des goupilles en aluminium on vise ensuite les quatre vis métalliques sur la demi-boîte supérieure

7. On divise notre échantillon sur 2 couches pour assurer une bonne distribution des grains

8. Refermez la boîte avec le piston, celui-ci doit venir affleurer la partie supérieure de la demi-boîte supérieure

9. Montage de la boîte de cisaillement sur le bâti de chargement et l'exécution de l'essai

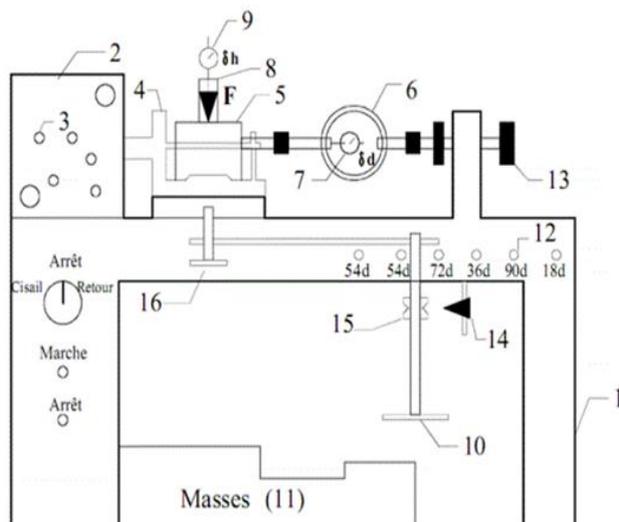


Figure III. 17 : Machine de cisaillement utilisé dans cette étude

- 1 : Bâti de la machine
- 2 : Bloc moteur
- 3 : Axes supports de pignons ;
- 4 : Partie mobile du bâti, support de la boîte ;
- 5 : Boîte de cisaillement ;
- 6 : Anneau dynamométrique
- 7 : Compateur de déformé d'anneau
- 8 : Étrier de chargement
- 9 : Mesure de $\delta \cdot h$
- 10 : Plateau supportant les masses
- 11 : Masses

CHAPITRE III: DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX ET ESSAIS REALISES

12 : Pignons en attente

13 : Volant d'approche de l'anneau

14 : Pointeau

15 : Bague de contrôle

16 : Volant de réglage.

III.7.3 Calcul de la force de cisaillement :

$$T = K \cdot |\Delta d|$$

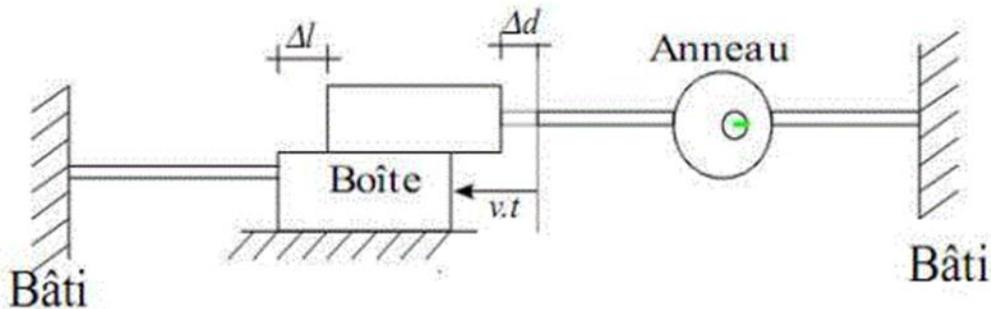
Avec:

T: force de cisaillement,

K: Constante de l'anneau dynamométrique $K = 0.0797 \text{KN/mm}$,

Δd : Déplacement correspondant à l'allongement de l'anneau.

III.7.4 Calcul les valeurs des contraintes normales et tangentielles :



A un temps donné t on définit A_c comme la surface corrigée de l'éprouvette (surface de contact entre les deux demi-boîtes):

$$A_c = l \times (1 - \Delta l)$$

Avec:

l : longueur initiale de l'échantillon $l = 6 \text{ cm}$.

Δl : variation de la longueur de l'échantillon à un instant donné (on prend en compte

Le déplacement de la demi-boîte inférieure et l'allongement de l'anneau dynamométrique):

$$\Delta l = v \cdot t - |\Delta d|$$

v est de vitesse de déplacement de la demi-boîte inférieure, t le temps et Δd l'allongement de l'anneau dynamométrique.

CHAPITRE III: DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX ET ESSAIS REALISES

A partir de la surface corrigée A_c on peut calculer à tout instant les valeurs des contraintes normale et tangentielle:

$$\sigma = \frac{N}{A_c}$$

$$\tau = \frac{T}{A_c}$$

III.8 Essai d'émiettage (Crumb test – ASTM D 657200):

Le test est considéré comme le moyen le plus simple d'identifier le sol

Dispersion, qui repose uniquement sur des observations qualitatives directes.

Ces tests estiment la susceptibilité de l'argile par rapport à d'autres tests

Dispersion, le procédé de dispersion est valable dans le cas du Crumb Test.

Ce test ne s'applique pas aux sols avec un pourcentage de fines (<0,005 mm) moins de 12 %, donc pour des sols dont l'indice de plasticité est inférieur à 8 %.

Les tests de miettes sont souvent utilisés comme aide à d'autres tests

Identification des argiles dispersées (Holmgren et Flanagan, 1977).

III.8.1 La procédure donnée par la norme ASTM est basée sur deux méthodes :

● **Méthode A** : à cause les sols non remaniés : Un modèle de sol en deçà forme Approximative, d'un cube de grandeur de 15 mm de quelque côté et caparaçonné à sa teneur en eau naturelle, si ces échantillons ne sont pas disponibles, des échantillons cubiques de encore aérienne dimension peuvent convenir utilisés, exclusivement ils ne doivent pas convenir inférieur a 7 mm de côté.

● **Méthode B** : Placez soigneusement l'échantillon de sol dans un bécher avec de l'eau Distillé (250 ml). L'échantillon doit être retiré et placé au fond du bécher.

Ces Les particules de sol ont tendance à se disperser en une suspension colloïdale En observant la formation des nuages après 2 minutes, 1 heure et 24 heures.

Selon Turbidité des nuages, le sol est classé dans l'un des quatre niveaux

Le nuage de points suivant :

● **Classe 1 (Non-dispersif, figure .a)** : aucun nuage n'est apparu .

● **Classe 2 (moyennement dispersif, figure.b)** : formation d'un nuage limité autour de l'échantillon.

● **Classe 3 (dispersif, figure .c)** : formation d'un nuage appréciable qui ne couvre pas toute la bordure du fond du récipient.

● **Classe 4 (fortement dispersif, figure .d)** : formation d'un nuage qui recouvre toute la bordure du fond du récipient, éventuellement toute l'eau devient trouble.

III.8.2 Résultats des essais (sol sans ajout) :



(a) Après 0s

(b) après 2min

(c) après 1h

(d) après 24h

Figure III.18 : Essais typiques de Crumb te

Commentaire :

On remarque sur les figures (b) et (c) qu'aucune interaction ne se produit entre le sol et l'eau, mais sur la figure d le sol se désintègre, formant un nuage qui recouvre tout le bord du fond du récipient.

III.8.3 Résultats cisaillement sans ajouts :

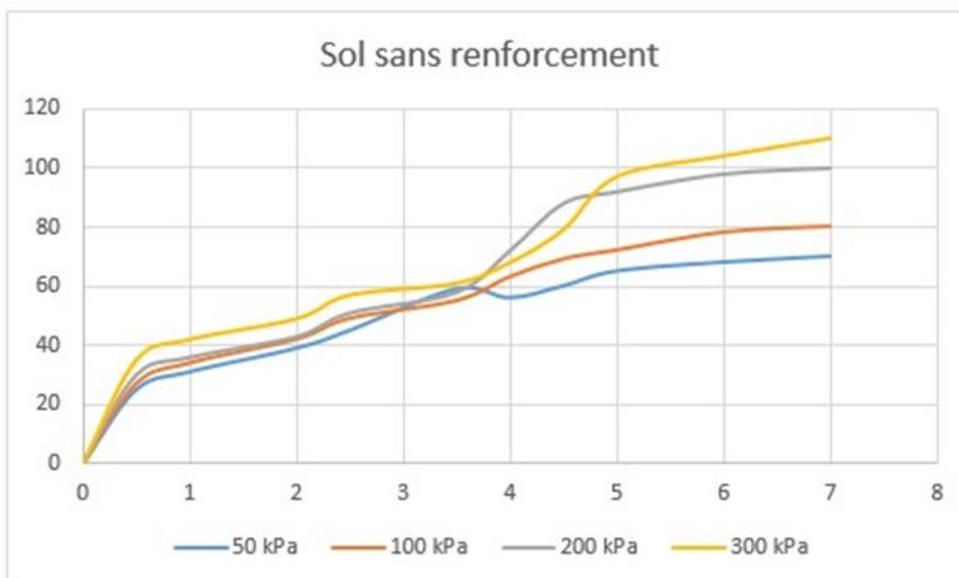


Figure III.19 : Essais de cisaillement sur sol naturel

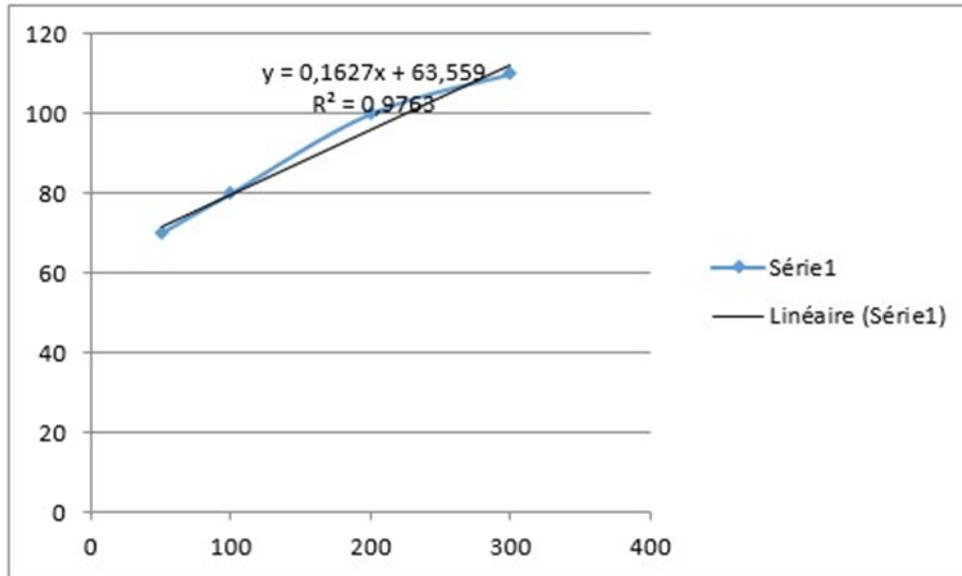


Figure III.20 : Courbe intrinsèque de Mohr coulomb sur sol naturel

Commentaire :

Des essais de cisaillement direct ont été effectués sur un échantillon de sol prélevé du barrage, soumis à différentes contraintes normales de 50, 100, 200 et 300 kPa. Les résultats ont révélé une augmentation de la résistance du sol avec l'élévation de la contrainte normale (Figure III .19). Les caractéristiques mécaniques du sol à l'état naturel ont été déterminées, avec une cohésion mesurée à 63,56 kPa et un angle de frottement de 9,16 degrés (Figure III .20). Cette analyse souligne l'importance de comprendre les propriétés mécaniques du sol pour évaluer sa stabilité et son comportement sous différentes conditions de contrainte.

III.8.4 Résultats des essais de Cisaillement à la boîte De casa grande :

III.8.4.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons voir les résultats de tous les essais de cisaillement à la boîte de Casa grande que nous avons réalisés avec les différents pourcentages de la chaux et de la pouzzolane (4%, 8% et 12%). Les résultats des essais de cisaillement direct vérifier la stabilité du barrage.

III.8.5 Résultats des essais de 7 jours :

Après l'ajout de la chaux et de la pouzzolane avec le pourcentage suivant 4% ; 8% ; 12 %

• Crumb test après l'ajout de 2% de la chaux et 2% de la pouzzolane :

4% :



(a) Après 0 S

(b) après 2min

(c) après 1h

(d) après 24h

Commentaire :

En ajoutant 2% de chaux et 2% de pouzzolane, après 7 jours, on remarque une légère dispersion dans le sol sur la figure (c), alors que sur la figure (d) elle est complètement dispersée.

III.8.5.1 Sol renforcé avec 2% de la chaux et 2% de la pouzzolane :

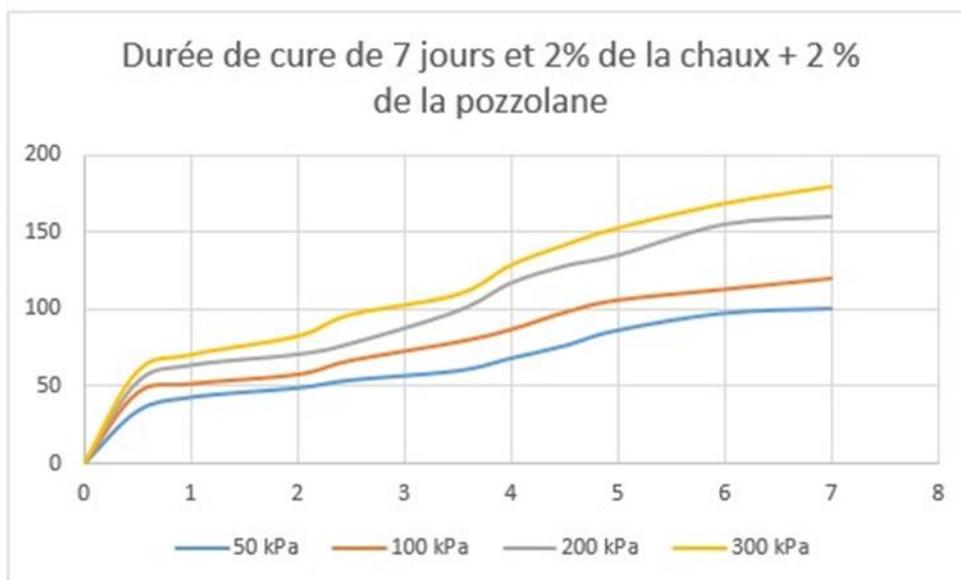


Figure III.21: essais de cisaillement sur sol naturel renforcé avec 2% de la chaux et 2% de la pouzzolane à 7 jours

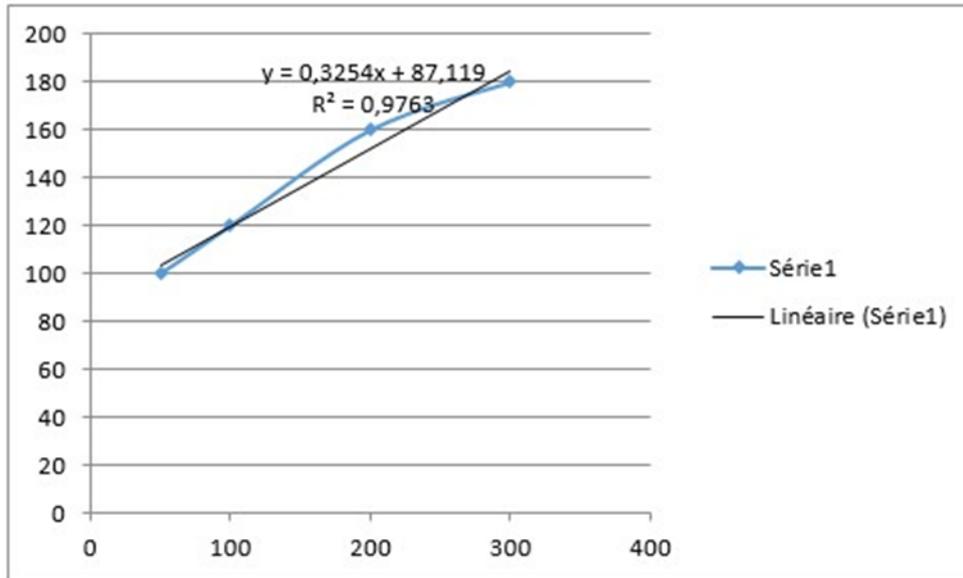


Figure III.22 : Courbe intrinsèque de Mohr coulomb sur sol naturel renforcé avec 2% de la chaux et 2% de la pouzzolane à 7 jours

Commentaire :

Les caractéristiques mécaniques du sol avec ajout de 2% de la chaux et 2% de la pouzzolane ont été déterminées, avec une cohésion mesurée à 87.12 kPa et un angle de frottement de 18.33 degrés

L'amélioration des paramètres mécaniques du sol, notamment de la cohésion et de l'angle de frottement, suite à l'addition de 2% de chaux et de 2% de pouzzolane est due à l'effet de la pouzzolane et de la chaux comme des matériaux de renforcement et aussi à la durée de cure attribuée aux mélanges.

•Crumb test après l'ajout de 4% de la chaux et 4% de la pouzzolane :

8% :



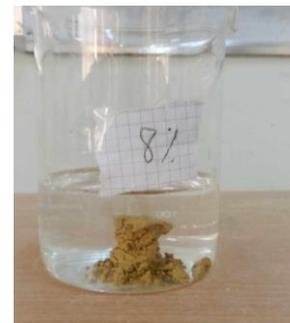
(e) Après 0s



(f) après 2min



(j) après 1h



(h) après 24h

Commentaire :

En ajoutant 4% de chaux et 4% de pouzzolane, on remarque qu'elle ne se désagrège pas sous toutes les formes

III.8.5.2 Sol renforcé avec 4% de la chaux et 4% de la pouzzolane :

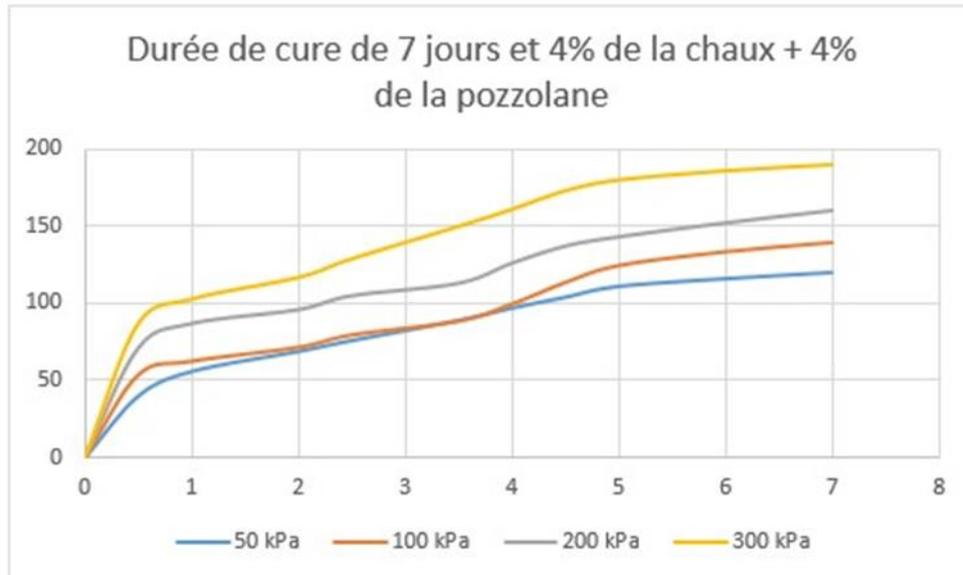


Figure III.23 : Essais de cisaillement sur sol naturel renforcé avec 4% de la chaux et 4% de la pouzzolane à 7 jours

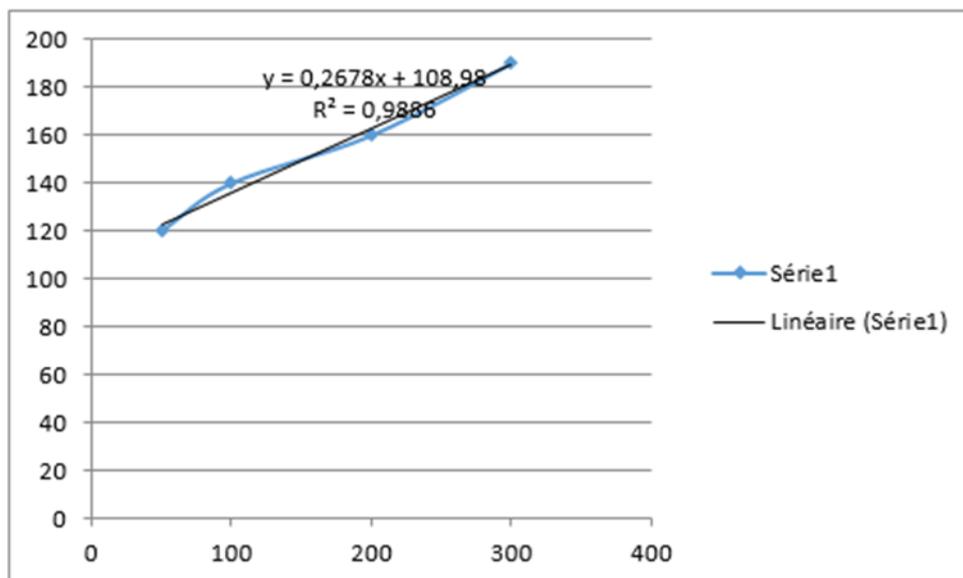


Figure III.24 : Courbe intrinsèque de Mohr coulomb sur sol naturel renforcé avec 4% de la chaux et 4% de la pouzzolane à 7 jours

Commentaire :

Pour les échantillons de 4% de la chaux et 4% de la pouzzolane on note une cohésion de 108.98kPa et un angle de frottement de 16.04 degrés.

•Crumb test après l'ajout de 6% de la chaux et 6% de la pouzzolane :

12% :



(i) Après 0s



(g) après 2min



(k) après 1h



(l) après 24h

Commentaire :

En ajoutant 6% de chaux et 6% de pouzzolane, nous avons remarqué une légère désintégration sur la figure (k), mais sur la figure (l) nous avons remarqué une dispersion partielle

III.8.5.3 Sol renforcé avec 6% de la chaux et 6% de la pouzzolane :

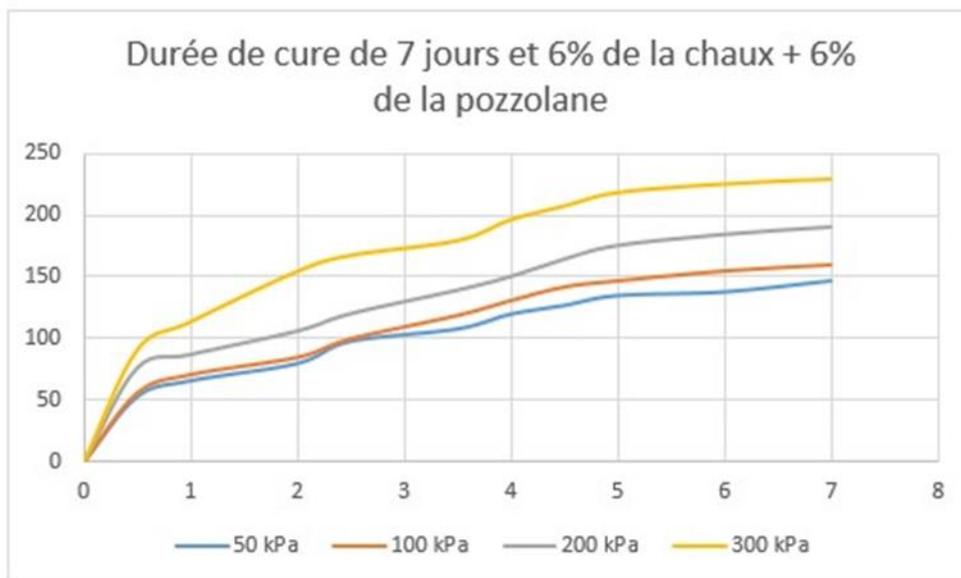


Figure III.25 : Essais de cisaillement sur sol naturel renforcé avec 6% de la chaux et 6% de la pouzzolane à 7 jours

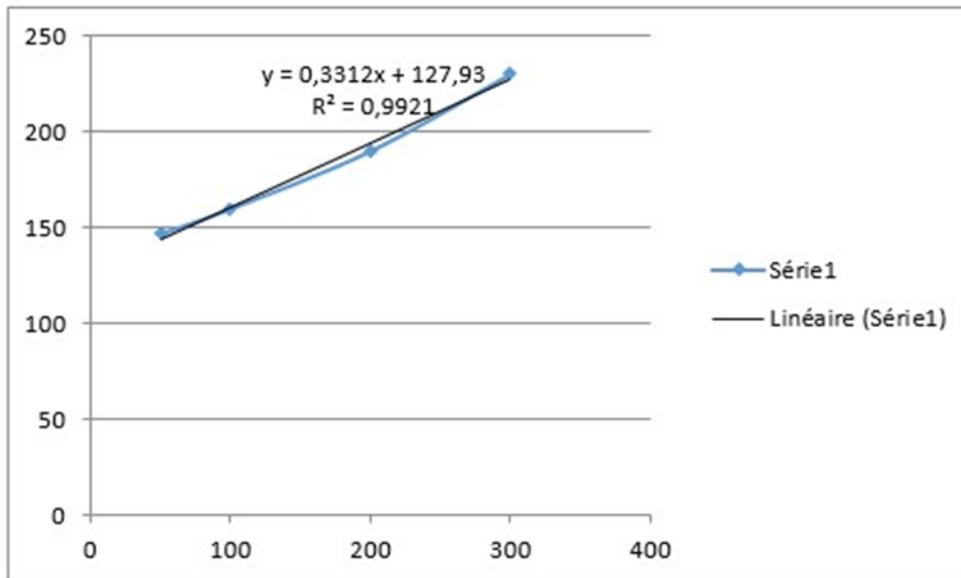


Figure III.26 : Courbe intrinsèque de Mohr coulomb sur sol naturel renforcé avec 6% de la chaux et 6% de la pouzzolane à 7 jours

Commentaire :

Pour les échantillons de 6% de la chaux et 6% de la pouzzolane on note une cohésion de 127.93 et un angle de frottement de 19 degré.

III.8.6 Résultats des essais de 28 jours :

Après l'ajout de la chaux et de la pouzzolane avec le pourcentage suivant 4% ; 8% ; 12 %

• Crumb test après l'ajout de 2% de la chaux et 2% de la pouzzolane :

4% :



(a) Après 0s



(b) après 2min



(c) après 1h



(d) après 24h

Commentaire :

En ajoutant 2% de chaux et 2% de pouzzolane, après 28 jours, nous n'avons constaté aucune dispersion, et même après 24 heures, la désintégration a commencé.

III.8.6.1 Sol renforcé avec 2% de la chaux et 2% de la pouzzolane :

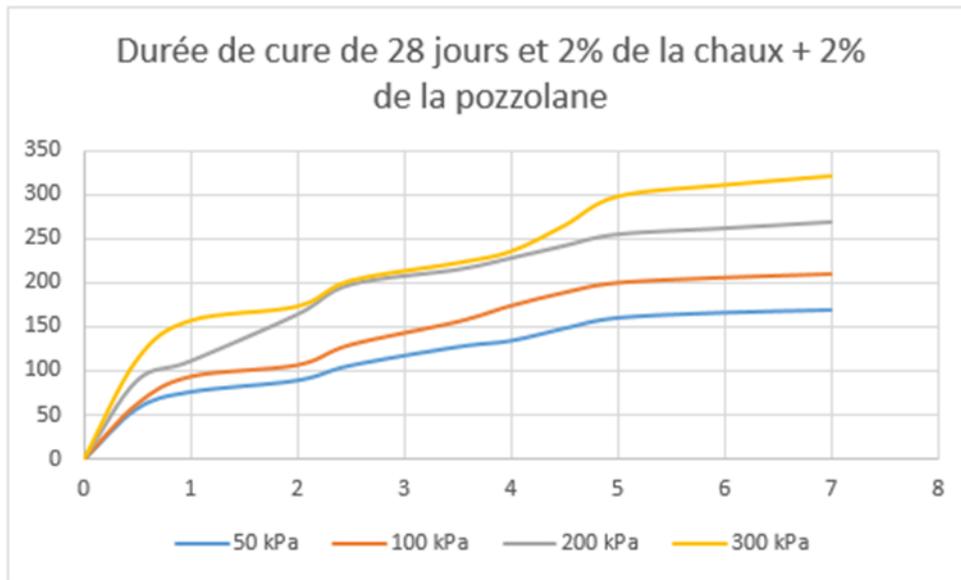


Figure III.27 : Essais de cisaillement sur sol naturel renforcé avec 2% de la chaux et 2% de la pouzzolane à 28 jours

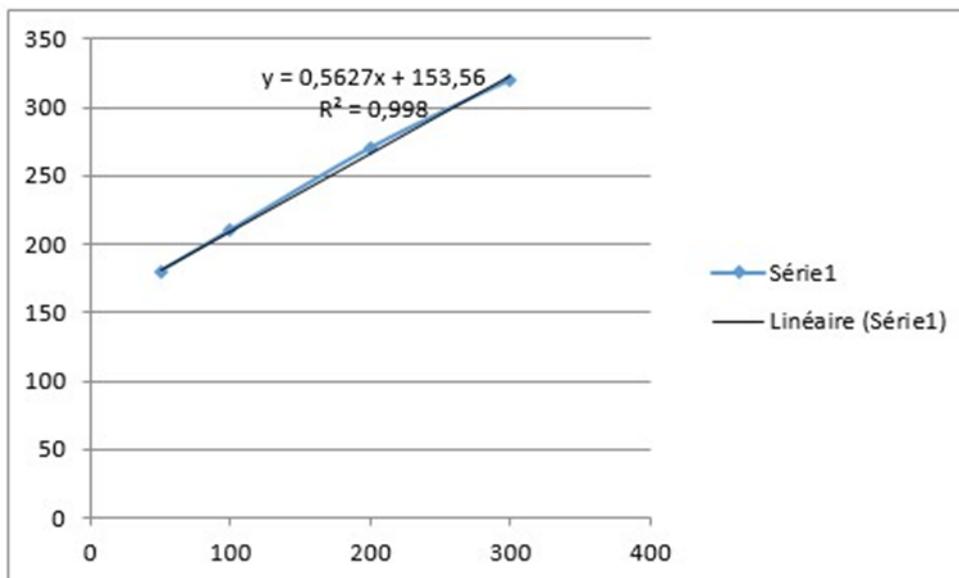


Figure III.28 : Courbe intrinsèque de Mohr coulomb sur sol naturel renforcé avec 2% de la chaux et 2% de la pouzzolane à 28 jours

Commentaire :

Pour les échantillons à 28 jours de la durée de cure et avec 2% de la chaux et 2% de la pouzzolane on note une cohésion de 153.56kPa et un angle de frottement de 32 degré.

CHAPITRE III: DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX ET ESSAIS REALISES

- Crumb test après l'ajout de 4% de la chaux et 4% de la pouzzolane :

8% :



(e) après 0s



(f) après 2min



(j) après 1h



(h) après 24h

Commentaire :

En ajoutant 4% de chaux et 4% de pouzzolane, nous n'avons constaté aucune dispersion. De là, nous concluons que le sol atteint sa résistance maximale à la dose de 8%.

III.8.6.2 Sol renforcé avec 4% de la chaux et 4% de la pouzzolane :

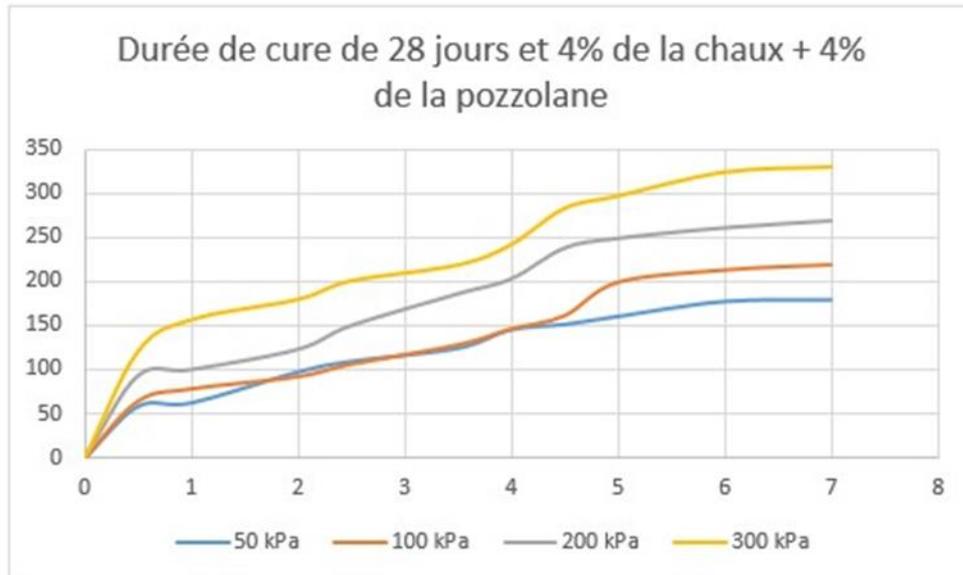


Figure III.29 : Essais de cisaillement sur sol naturel renforcé avec 4% de la chaux et 4% de la pouzzolane à 28 jours

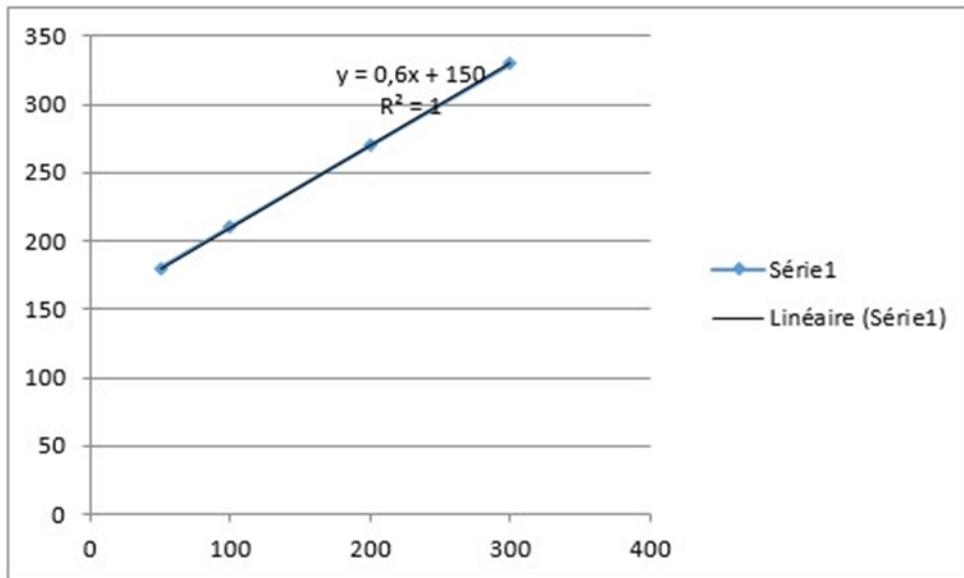


Figure III.30 : Courbe intrinsèque de Mohr coulomb sur sol naturel renforcé avec 4% de la chaux et 4% de la pouzzolane à 28 jours

Commentaire :

Pour les échantillons à 28 jours de la durée de cure et avec 4% de la chaux et 4% de la pouzzolane on note une cohésion de 150kPa et un angle de frottement de 34.37 degrés.

•Crumb test après l'ajout de 6% de la chaux et 6% de la pouzzolane :

12% :



(i)Après 0s



(g) après 2min



(k) après 1h



(l) après 24h

Commentaire :

En ajoutant 6% de chaux et 6% de pouzzolane, nous n'avons remarqué aucune dispersion sur les figures (g) et (k), mais sur la figure (l), il y avait une dispersion partielle.

III.8.6.3 Sol renforcé avec 6% de la chaux et 6% de la pouzzolane :

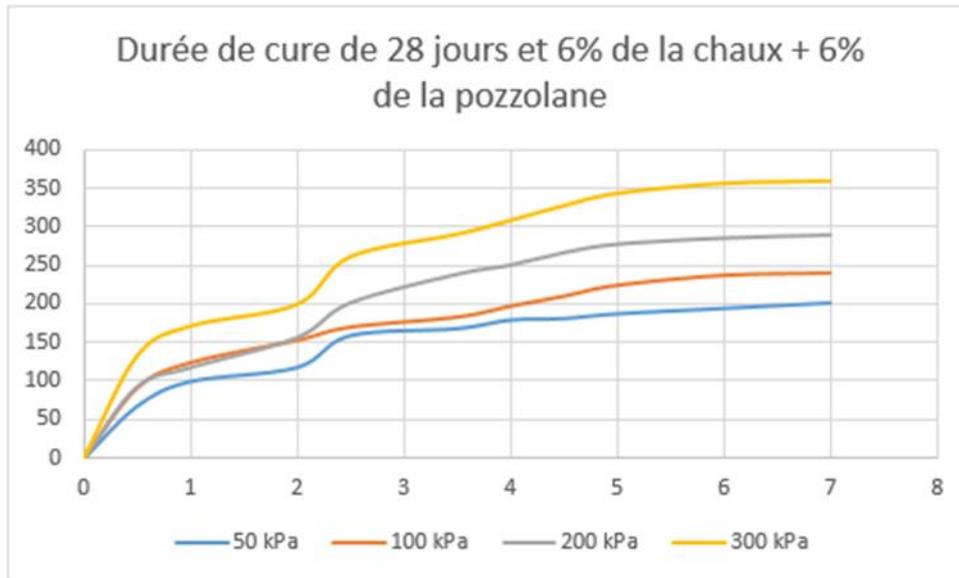


Figure III.31 : Essais de cisaillement sur sol naturel renforcé avec 6% de la chaux et 6% de la pouzzolane à 28 jours

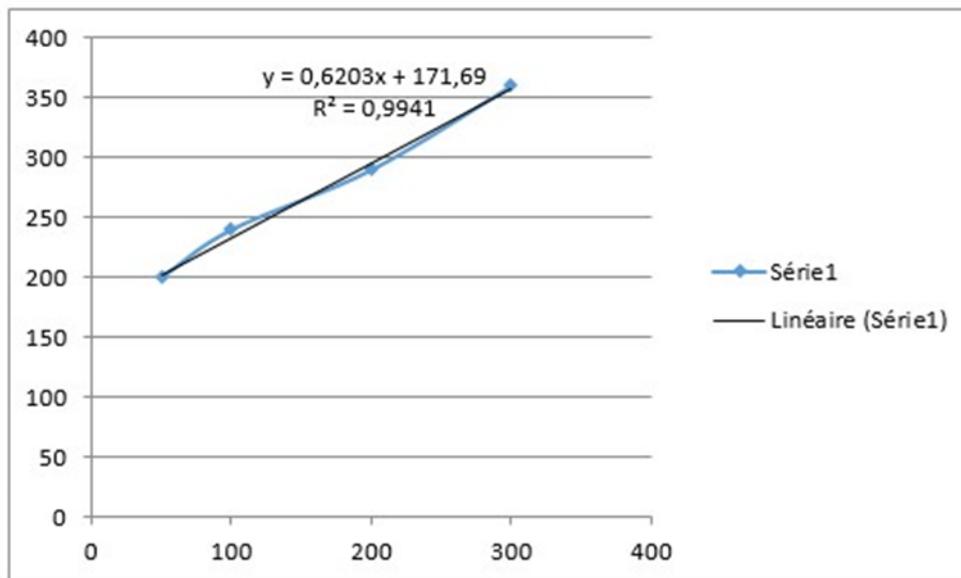


Figure III.32 : Courbe intrinsèque de Mohr coulomb sur sol naturel renforcé avec 6% de la chaux et 6% de la pouzzolane à 28 jours

Commentaire :

Pour les échantillons à 28 jours de la durée de cure et avec 6% de la chaux et 6% de la pouzzolane on note une cohésion de 171.69kPa et un angle de frottement de 35.52 degrés.

III.9. Conclusion :

Après l'analyse et l'interprétation des résultats des essais de cisaillements, l'ajout de la chaux et de la pouzzolane améliore la résistance au cisaillement et les paramètres mécaniques c et ϕ .

La combinaison de la chaux et de la pouzzolane peut considérablement améliorer les propriétés mécaniques du sol, le rendant plus résistant et plus stable, ce qui est crucial dans le contexte de la construction et de la gestion des barrages.

CHAPITRE IV :
ÉTUDE
STATIQUE ET
DYNAMIQUE DU
BARRAGE

IV.1 Introduction :

L'étude de la stabilité des barrages en terre est essentielle pour garantir la sécurité des infrastructures et des zones environnantes. Dans cette étude, nous avons utilisé une approche numérique à l'aide du logiciel PLAXIS pour évaluer la stabilité d'un barrage en terre. Notre objectif principal était d'analyser le facteur de sécurité du barrage des différents mélanges, en utilisant le modèle de Mohr-Coulomb.

Le modèle de Mohr-Coulomb est largement utilisé dans l'analyse géotechnique pour caractériser le comportement des sols sous contrainte. Il repose sur deux paramètres clés : l'angle de frottement interne (ϕ) et la cohésion (c), qui décrivent la résistance au cisaillement d'un matériau. En utilisant les données des essais de cisaillement direct sur les mélanges de sol comprenant de la pouzzolane et de la chaux, nous avons pu déterminer les propriétés spécifiques de ces matériaux et les intégrer dans notre modèle.

Cette étude vise à fournir des informations précieuses sur la stabilité du barrage en tenant compte de la composition du sol et des conditions géotechniques spécifiques du site. En combinant les données expérimentales avec une analyse numérique avancée, nous cherchons à identifier les éventuels points faibles du barrage et à proposer des mesures d'atténuation pour renforcer sa stabilité.

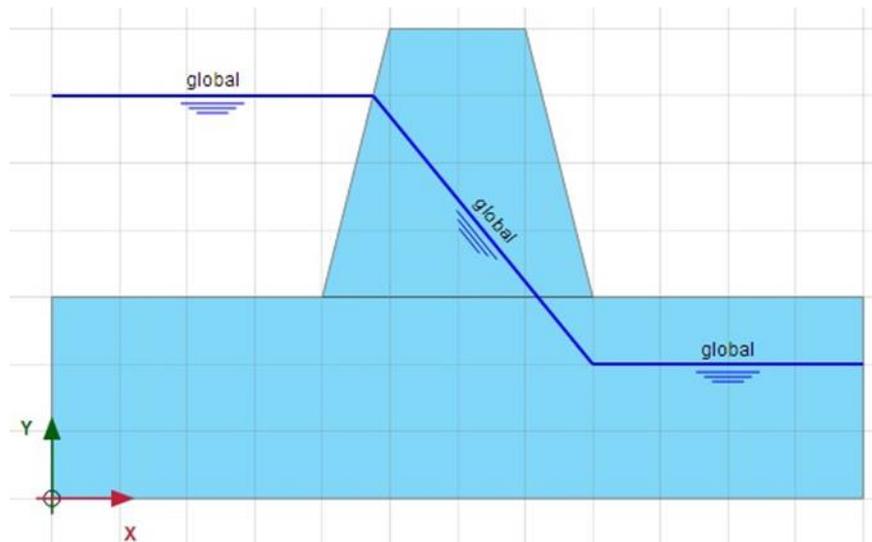
L'introduction de ce chapitre mettra en lumière l'importance de l'étude, les méthodes utilisées et les objectifs visés, posant ainsi les bases pour une analyse approfondie de la stabilité du barrage en terre sous différentes conditions de chargement et de composition du sol.

IV.2 Etude statique de la stabilité du barrage par Plaxis :

Tout d'abord, nous avons minutieusement reproduit les dimensions et les caractéristiques géométriques du barrage (Figure IV.1) y compris sa hauteur, sa longueur et ses pentes. Ces données sont essentielles pour évaluer la répartition des contraintes et des déformations à travers la structure du barrage.

Ensuite, nous avons intégré la nappe phréatique dans notre modèle, tenant compte de son niveau et de sa fluctuation potentielle au fil du temps. La présence de la nappe phréatique est un facteur critique dans l'analyse de la stabilité des barrages, car elle peut exercer des pressions hydrostatiques significatives sur la base et les parois du barrage, pouvant influencer sa stabilité globale.

De plus, nous avons pris en considération les conditions géotechniques du site, telles que la nature du sol et les paramètres d'entrés (c , ϕ , E et ν).

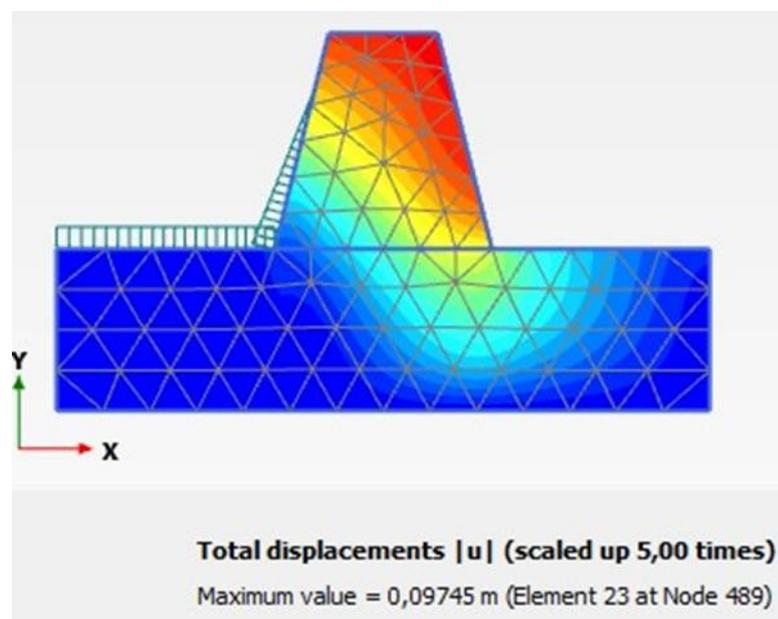


FigureIV.1 : Géométrie du modèle

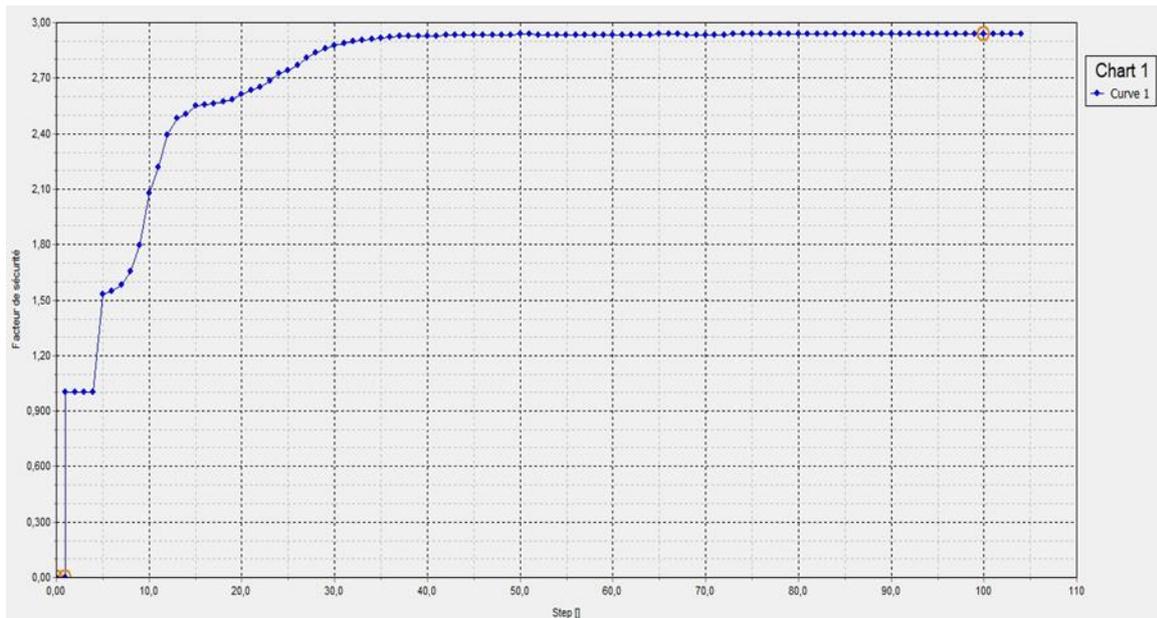
a) Résultats sur sol naturel :

Les déplacements enregistrés dans le modèle PLAXIS reflètent les déformations et les mouvements du barrage sous l'effet des charges appliquées, y compris les contraintes hydrostatiques de la nappe phréatique.

On note un déplacement de 0.09745 et un facteur de sécurité de 2.9



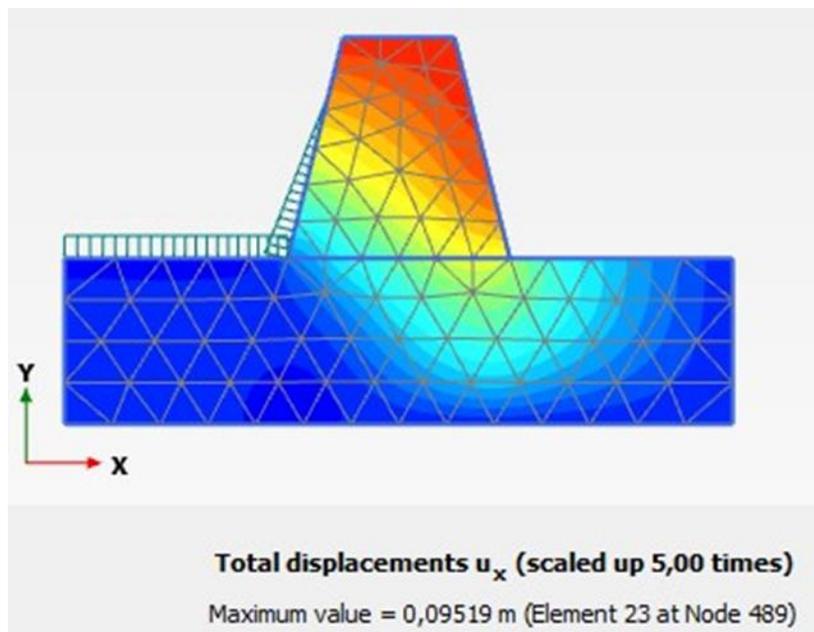
FigureIV.2 : Déplacement de notre modèle



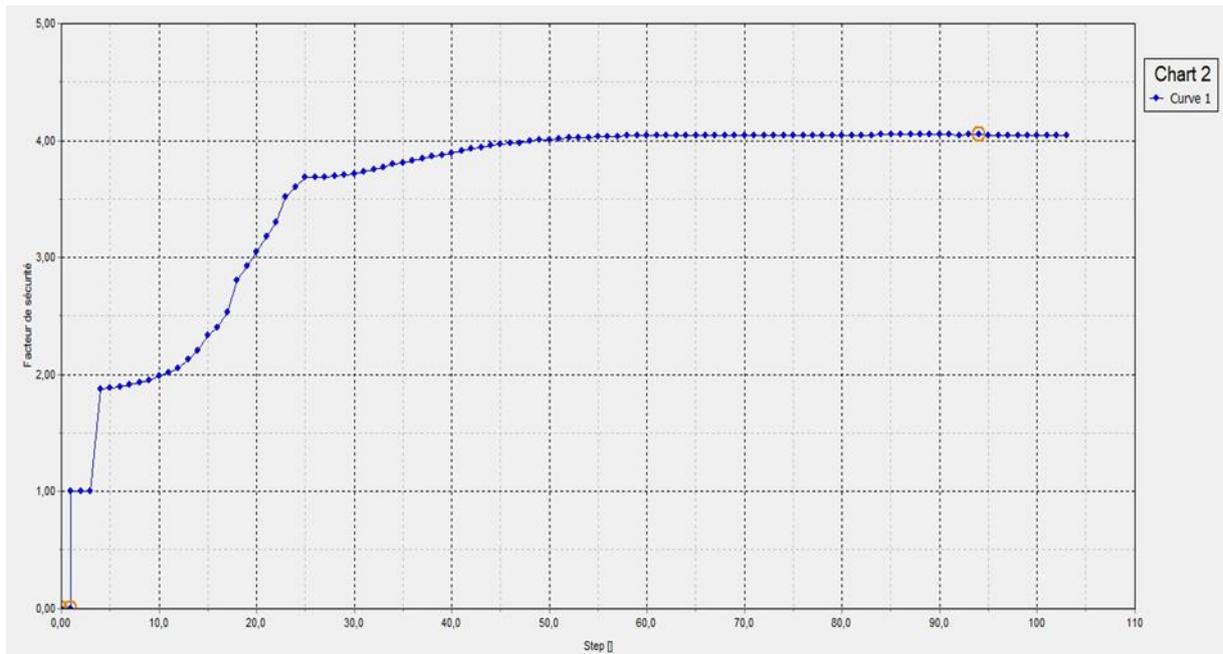
FigureIV.3 : Facteur de sécurité

b) Résultats su sol renforcé avec 2% de la chaux et 2% de la pouzzolane

On note un facteur de sécurité de 4.1



FigureIV.4 : Déplacement de notre modèle



FigureIV.5 : Facteur de sécurité

c) Résultats sur sol renforcé avec 4% de la chaux et 4% de la pouzzolane

On note un facteur de sécurité de 4.9

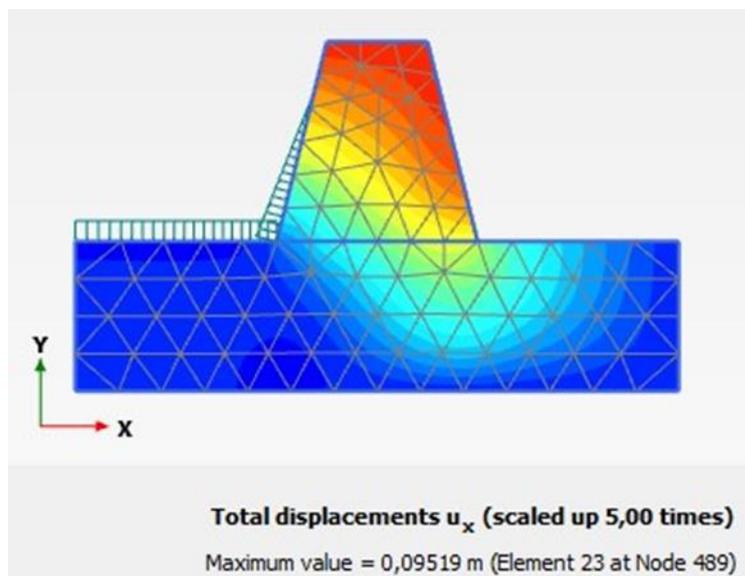
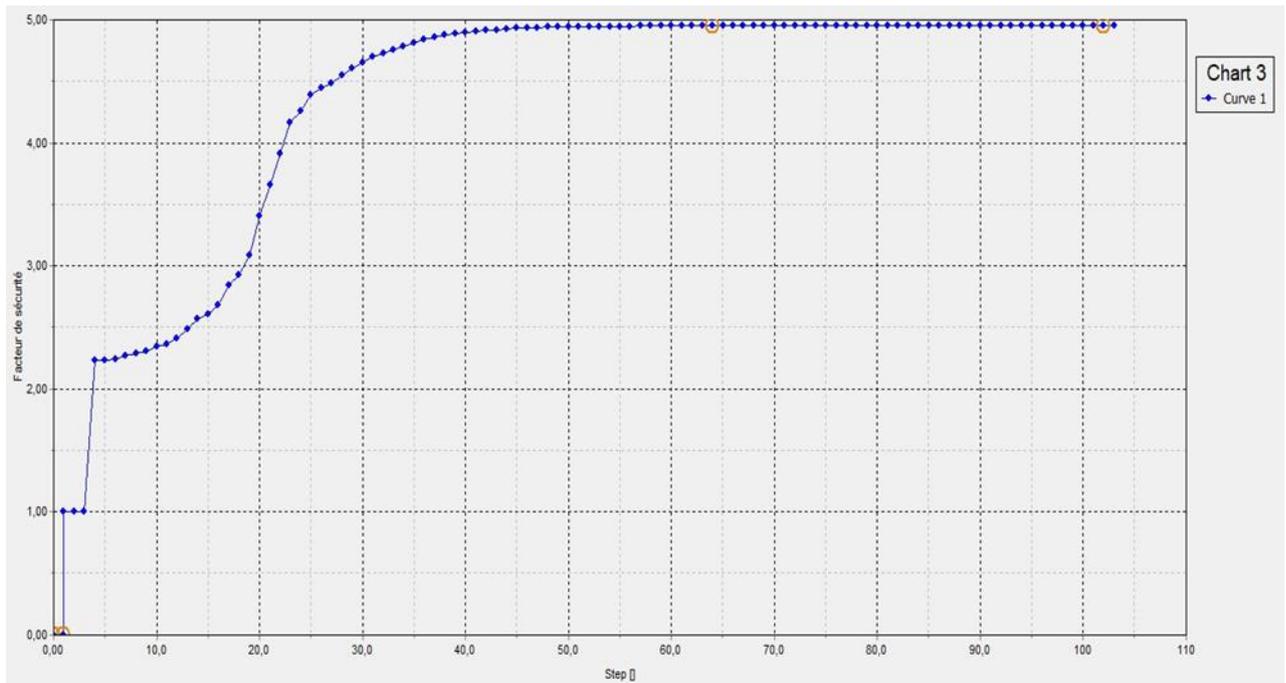


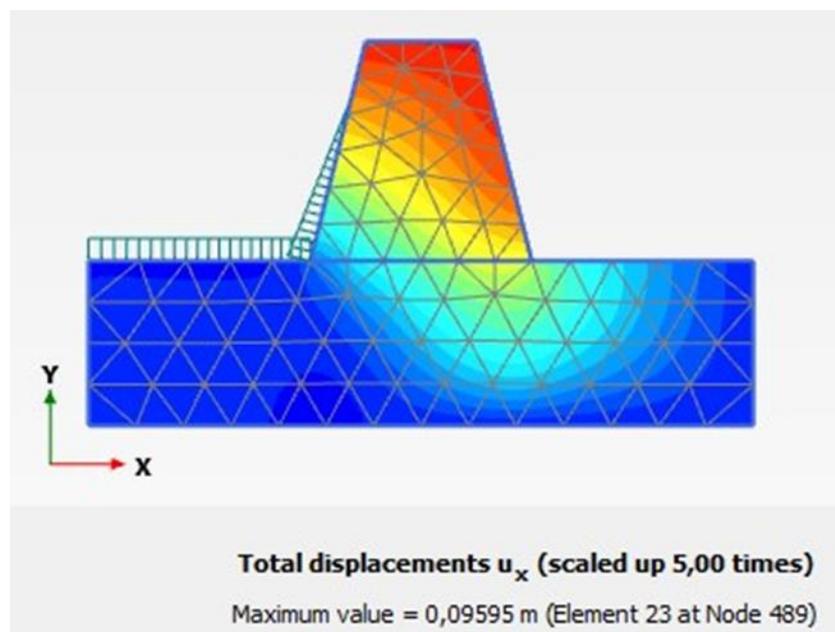
Figure IV.6 : Déplacement de notre modèle



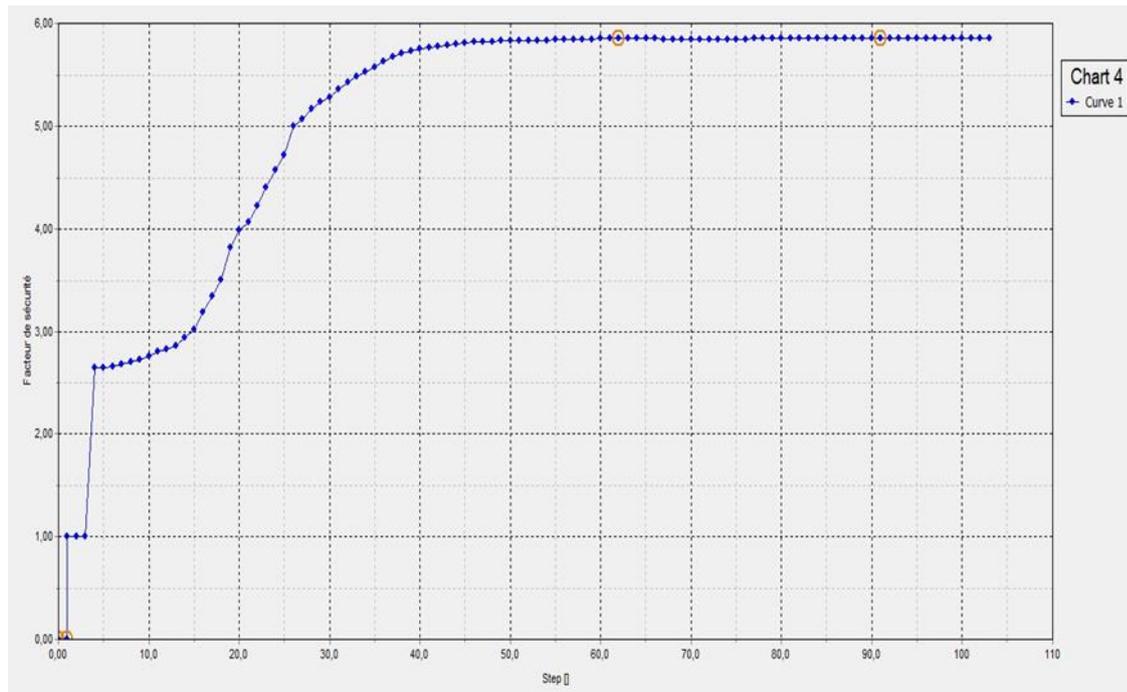
FigureIV.7 : Facteur de sécurité

d) Résultats su sol renforcé avec 6% de la chaux et 6% de la pouzzolane

On note un facteur de sécurité de 5.8



FigureIV.8 : Déplacement de notre modèle



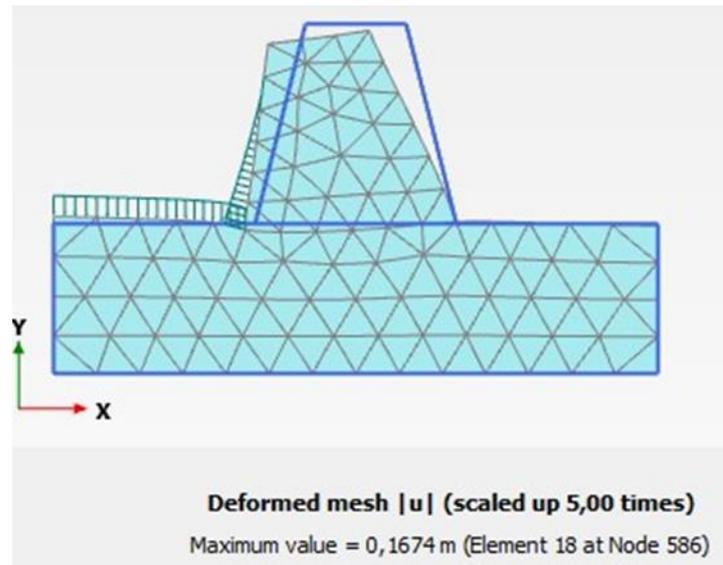
FigureIV.9 : Facteur de sécurité

IV.3 Etude dynamique :

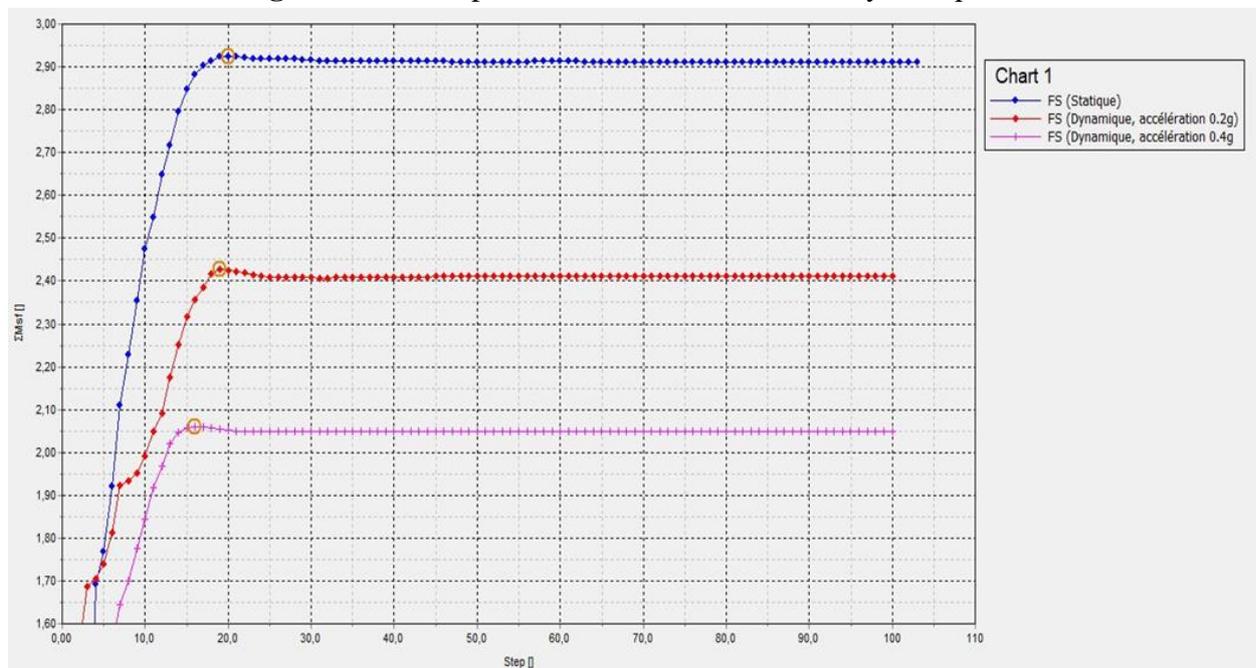
Les résultats de l'étude sous l'action dynamique, avec une variation de l'accélération représentée par des valeurs de 0.2g et 0.4g, mettent en lumière des aspects importants de la réponse du barrage en terre à des forces sismiques simulées.

On remarque une diminution du facteur de sécurité de 2.9 à 2.4 pour une accélération de 0.2g ensuite de 2.4 à 2.05 pour une accélération de 0.4g

Cette diminution du facteur de sécurité pourrait être attribuée à plusieurs facteurs, notamment une augmentation des contraintes induites par les forces sismiques, une réduction de la cohésion effective du sol en raison des déformations dynamiques



FigureIV.10 : Déplacement du sol sous l'effet dynamique



FigureIV.11 : Comparaison des facteurs de sécurité

IV.4 Conclusion :

La conclusion de notre étude met en évidence plusieurs résultats significatifs quant à l'effet de l'augmentation de la cohésion et de l'angle de frottement, correspondant à une augmentation du pourcentage de chaux et de pouzzolane dans le sol, sur la stabilité et la déformation du barrage en terre :

Augmentation du facteur de sécurité : Nous avons observé une tendance claire où le facteur de sécurité du barrage en terre augmente proportionnellement à l'augmentation de la cohésion et de l'angle de frottement du sol. Cela signifie que l'ajout de chaux et de pouzzolane renforce la capacité du sol à résister aux contraintes, améliorant ainsi la stabilité globale du barrage.

Réduction de la déformation : En parallèle avec l'augmentation du facteur de sécurité, nous avons constaté une diminution significative de la déformation du barrage en terre. Cette réduction de la déformation est cruciale pour garantir l'intégrité structurelle du barrage et minimiser les risques de glissement ou de rupture, ce qui contribue à assurer sa durabilité à long terme.

Impact positif de la chaux et de la pouzzolane : Nos résultats confirment l'efficacité de l'incorporation de la chaux et de la pouzzolane dans le sol pour renforcer la stabilité du barrage en terre. Ces matériaux semblent jouer un rôle crucial dans l'amélioration des propriétés mécaniques du sol, ce qui peut avoir des implications positives sur la performance du barrage dans diverses conditions de chargement et d'environnement.

Le facteur de sécurité diminue avec l'augmentation des forces sismique. Ces résultats soulignent l'importance cruciale d'évaluer la réponse du barrage à des charges dynamiques et de prendre en compte les effets sismiques lors de sa conception et de sa mise en œuvre.

En conclusion, notre étude démontre que l'augmentation de la cohésion et de l'angle de frottement, grâce à l'ajout de chaux et de pouzzolane dans le sol, entraîne une amélioration significative de la stabilité et une réduction de la déformation du barrage en terre. Ces résultats fournissent des informations précieuses pour la conception et la gestion des barrages, mettant en évidence l'importance des techniques d'amélioration du sol dans la construction d'infrastructures sûres et durables.

CONCLUSION GÉNÉRAL

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GÉNÉRALE :

L'objectif de cette étude était d'évaluer et d'améliorer la stabilité du barrage en terre situé à proximité de Sidi Ben Adda (wilaya d'Ain Temouchent) en utilisant des essais en laboratoire sur le matériau du sol traité par ajout de chaux et de pouzzolane. Les résultats des essais de cisaillement direct ont démontré que l'incorporation de ces additifs, à des proportions de 4%, 8%, et 12%, améliore significativement la résistance au cisaillement du sol ainsi que ses paramètres mécaniques C et phi.

Les analyses ont révélé que l'ajout de chaux et de pouzzolane renforce la capacité du sol à résister aux contraintes mécaniques, ce qui contribue directement à l'amélioration de la stabilité globale du barrage. Cette augmentation de la résistance au cisaillement est un indicateur clé de l'efficacité du traitement, suggérant que le sol traité est mieux équipé pour supporter les charges statiques et dynamiques.

En complément des essais de laboratoire, des simulations numériques effectuées à l'aide du logiciel Plaxis ont permis de calculer les coefficients de sécurité du barrage, tant en conditions statiques que sismiques. Les résultats de ces simulations ont corroboré les données expérimentales, confirmant une amélioration notable de la stabilité du barrage après traitement du sol.

En conclusion, cette étude a démontré l'efficacité du traitement du sol par chaux et pouzzolane pour améliorer les propriétés mécaniques du sol et, par conséquent, la stabilité du barrage. Les résultats obtenus suggèrent que cette approche est viable et bénéfique pour la réhabilitation et la sécurisation des barrages en terre. L'utilisation de ces additifs constitue donc une stratégie prometteuse pour renforcer les structures géotechniques dans des contextes similaires. Les méthodes et résultats de cette étude peuvent servir de référence pour des projets futurs visant à améliorer la stabilité des infrastructures en terre.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Djafour, Mustapha, et al. "Étude du comportement dynamique d'un barrage poids-voûte face au mouvement sismique différentiel." 18ème Congrès Français de Mécanique (2007).
- [2] Mémoire fin d'étude "étude une digue d'un barrage" université de Jijel 2012.
- [3] DELUZARCHE, Rémi. Modélisation discrète des enrochements: Application aux barrages. 2004. Thèse de doctorat. Ecully, Ecole centrale de Lyon.
- [4] Marnezy, Alain. "Les barrages alpins. De l'énergie hydraulique à la neige de culture." *Journal of Alpine Research* | *Revue de géographie alpine* 96-1 (2008): 92-102.
- [5] SCHLEISS, Anton J. et POUGATSCH, Henri. Les barrages: du projet à la mise en service. PPUR Presses polytechniques, 2011.
- [6] Smith, M. (2000). Analyse thermique et géostatistique d'un noyau de barrage en remblai. Master's thesis, Laval University, Quebec.
- [7] Bessaoud, Omar, et al. Rapport de synthèse sur l'agriculture en Algérie. Diss. CIHEAM-IAMM, 2019.
- [8] Alonso, E., Bernede, T., & Morlier, P. (1993). Effet sur la stabilité des barrages en terre homogènes d'une variation des principaux paramètres. *Revue Française de Géotechnique*, (63), 23-37.
- [9] Curt, C. (2008). Evaluation de la performance des barrages en service basée sur une formalisation et une agrégation des connaissances. Application aux barrages en remblai (Doctoral dissertation, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II).
- [10] Belbachir, K., B. Montel, and L. Chervier. "COMPORTEMENT DES MASQUES D'ETANCHEITE EN BETON BITUMINEUX DES BARRAGES DU SECRETARIAT D'ETAT A L'HYDRAULIQUE ALGERIEN." *ONZIEME CONGRES INTERNATIONAL DES GRANDS BARRAGES*. Vol. 3. 1973.
- [11] Soulie, Michel, Marc Favre, and Jean-Marie Konrad. "Analyse géostatistique d'un noyau de barrage tel que construit." *Canadian Geotechnical Journal* 20.3 (1983): 453-467.
- [12] LAHMADI, A., ABBECHE, K., & ZEGHICHI, L. Étude de l'effet des paramètres géotechniques et de calcul sur l'interaction sol-structures.
- [13] Senouci, S. M., & Monnet, J. (1999). Modélisation numérique du Géomécamètre®. *Revue française de géotechnique*, (88), 21-35.
- [14] Senouci, S. M., & Monnet, J. (1999). Modélisation numérique du Géomécamètre®. *Revue française de géotechnique*, (88), 21-35.

] Bucur, V., & Perrin, A. (1981). Détermination du module d'Young du bois par une méthode dynamique sur carottes de sondage. In Annales des sciences forestieres (Vol. 38, No. 2, pp. 283-298). EDP Sciences.

[16] Frank, R. (1975). ETUDE THEORIQUE DU COMPORTEMENT DES PIEUX SOUS CHARGE VERTICALE ; INTRODUCTION DE LA DILATANCE.

[17] Mémoire2018 traitement, d'un sol affaissable par un ajout mixte de fibre de verre et de ciment université Mohamed Boudiaf m'sila M.hanane