



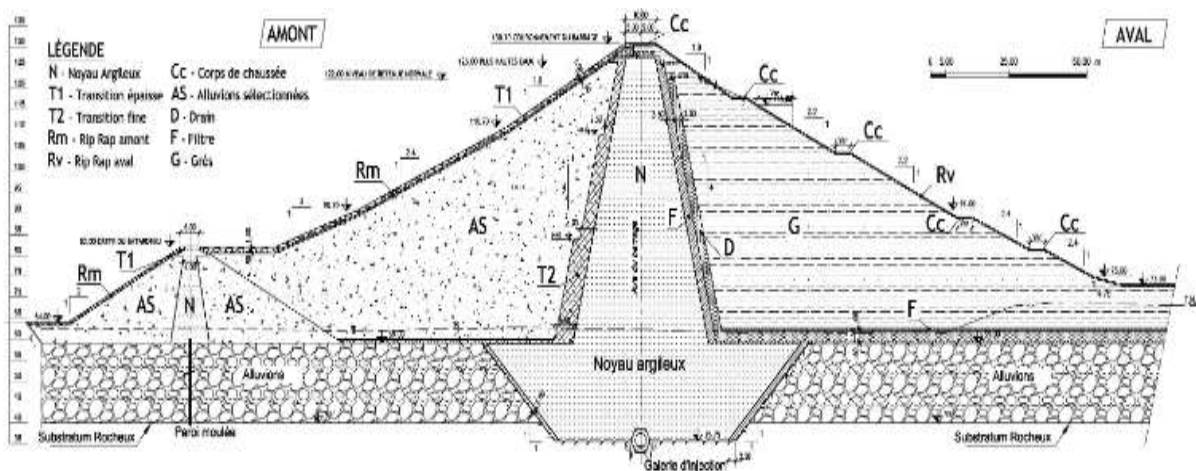
Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention d'un diplôme master en génie civil

Option : *Géotechnique*

Thème

**COMPORTEMENT AU FLUAGE DES MASQUES D'ÉTANCHÉITÉ ARGILEUX DANS
LES BARRAGES EN ENROCHEMENT CAS DU BARRAGE DE Souk n'Tleta**



Réalisé par : YESLI Salma

Dirigé par : Mr. GHOUILEM Kamel

Jury: Mr. BOUDLAL Omar

Jury: Mme. KAHIL Faroudja

2020/2021

Remerciement

En préambule à ce mémoire je remercie ALLAH qui m'aide et me donne la patience et le courage dans ma vie et durant ces longues années d'étude.

Je remercie mes chers parents pour leurs soutiens, financiers qu'il soit ou moral

Je tiens à remercier sincèrement mon encadreur Monsieur GHOUILEM Kamel pour ces précieux conseils et son aide durant toute la période de la réalisation de ce mémoire.

Je remercie également les membres du jury qui m'ont honoré et ont accepté de corriger mon travail.

Résumé

Les déformations du noyau ne dépendent pas seulement des caractéristiques de ses matériaux ou critères généraux liés à la conception globale du barrage mais également au phénomène de fluage qui conduit à l'apparition de déformations quelques temps après la mise en œuvre de l'ouvrage.

C'est ainsi qu'en fonction des critères de conception et des matériaux utilisés, et en se basant sur la modélisation numérique (code de calcul Ansys), une analyse paramétrée guidée par l'étude du comportement au fluage du noyau argileux du barrage en enrochement de la wilaya de Tizi-Ouzou situé dans l'Oued Bougdoura constitue l'objectif principal du présent travail.

Mot clef : noyau, barrage en enrochement, fluage, masque d'étanchéité.

SOMMAIRE

Remerciement	
Résumé	
Sommaire	I
Liste des tableaux	IV
Liste des figures	V
Liste des notations	VII
Liste des abréviations	X
Introduction générale.....	1

CHAPITRE I :

Construction des barrages en enrochement avec différents masques d'étanchéités

I.1 introduction	4
I.2 Définition d'un barrage	4
I.3 Barrages en enrochement	4
I.3.1 Définition et historique.....	4
I.3.2 Structure	5
I.3.3 Types des barrages en enrochement	7
I.4 Construction d'un barrage en enrochement	8
I.4.1 Etapes de construction.....	8
I.4.2 Comportement statique des barrages.....	10
I.5 Matériaux utilisés.....	12
I.5.1 Matériaux utilisés pour le noyau	12
I.5.2 Matériaux utilisés pour les recharges	13
I.5.3 Matériaux utilisés pour les filtres	13
I.5.4 Matériaux utilisés pour la protection de surface	13
I.6 Mise en place des enrochements.....	14
I.7 Fissuration et rupture des roches.....	14
I.8 Les différents masques d'étanchéités des barrages à masque amont.....	15
I.8.1 Masque en béton.....	16
I.8.2 Masque en béton bitumineux	17
I.8.3 Dispositifs d'étanchéité par géomembrane	18
I.8.4 Masque en tôle d'acier	19
I.9 Etanchéité des fondations des barrages en enrochement	19

I.9.1 Paroi moulée.....	19
I.9.2 Traitement des fondations par injection	20
I.9.3 Tapis d'étanchéité amont	20
I.10 Conclusion	22

CHAPITRE II :

Etudes des géo matériaux de carrière pour les digues du barrage de Souk n'Tleta (Tizi-Ouzou)

II.1 Introduction	24
II.2 Présentation du barrage Souk n'Telta.....	24
II.2.1 Situation géographique du site du barrage de Souk n'Tleta	25
II.2.2. Description du barrage et ses différents ouvrages annexes	26
II.3 Etude géologique du site.....	29
II.3.1 Positions et données géologiques.....	30
II.3.2 Paramètres géotechniques des matériaux utilisés pour la construction du barrage Souk n'Tleta.....	36
II.4 Conclusion	38

CHAPITRE III :

Comportement au fluage des sols argileux

III.1 Introduction	40
III.2 Le fluage par définition	40
III.3 Mécanismes de fluage. Effet de la température sur la microstructure du matériau	41
III.3.1 Mécanismes à basses températures.....	41
III.3.2 Mécanismes à hautes températures.....	42
III.3.3 Cas particulier du micro fluage	43
III.3.4 Cavitation lors du fluage tertiaire et rupture.....	43
III.4 Généralité sur le fluage des sols	44
III.5 Equations et processus du fluage dans les sols fins	45
III.5.1 Interaction et liaisons de particules dans les sols argileux	51
III.5.2 Modèle constitutif de fluage des sols argileux	51
III.6 Réseau « des lignes de temps » de Bjerrum	53
III.7 Conclusion.....	56

CHAPITRE IV :

Modélisation du comportement au fluage du noyau argileux du barrage de Souk n'Tleta

IV.1 Introduction.....	58
IV.2 But de cette modélisation.....	58
IV.3 Procédure de modélisation du fluage par Ansys.....	59
IV.4 Modélisation de la structure et présentation des résultats.....	61
IV.4.1 Modélisation par ANSYS.....	63
IV.4.2. Paramètres de fluage du model appliqué.....	65
IV.4.3. Discrétisation de la structure.....	65
IV.4.4. Résultats et discussions.....	66
IV.6 Conclusion.....	75
Conclusion générale.....	76

Liste des tableaux

Chapitre III

Tableau III.1 : Généralités sur le comportement au fluage des sols47

Chapitre IV

Tableau IV.1 : Caractéristiques Géotechniques des matériaux utilisé pour la construction de la digue62

Tableau IV.2 : Paramètres élastiques et constants du fluage des matériaux65

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Barrage en enrochement	5
Figure I.2 : Barrage en remblais avec diaphragme interne	6
Figure I.3 : Mécanisme causant le tassement d'un barrage en enrochement	12
Figure I.4 : Barrage à masque	16
Figure I.5 : Masque en béton armé.....	17
Figure I.6 : Masque amont en béton bitumineux	18
Figure I.7 : Pose d'une géomembrane	18
Figure I.8 : paroi moulé	19
Figure I.9 : voile d'injection	20
Figure I.10 : tapis d'étanchéité amont	21

Chapitre II

Figure II.1 : Générale sur le site Vue du barrage	25
Figure II.2 : Digue principale du barrage Souk-Tleta	27
Figure II.3 : Structure annexe du barrage Souk N'Tleta	27
Figure II.4 : Carte géologique et structurale du site du barrage principal	30
Figure II.5 : Alluvion graveleuse	31
Figure II.6 : Photo montrant une colluvion argileuse	32
Figure II.7 : Grés burdigaliens	33
Figure II.8 : Image illustrant des pélites	34
Figure II.9 : Image des poudingues pliocènes	35
Figure II.10 : Roche calcaire	36

Chapitre III

Figure III.1 : Courbe de fluage	41
Figure III.2 : Variation de la vitesse de déformation	41
Figure III.3 : Schéma d'une structure cellulaire	42
Figure III.4 : Cavitation entre grains	44
Figure III.5 : Coalescence des cavités le long des joints de grain	44
Figure III.6 : Interprétation traditionnelle des courbes de fluage des sols	45
Figure III.7 : Courbe de fluage. a) courbe à faible contrainte, b) courbe à forte contrainte	50
Figure III.8 : Courbe de fluage (réelle et primitive) et de variation de vitesse de déformation des sols argileux	52
Figure III.9 : Réseau des « lignes de temps » pour différentes durées de changement	54

Chapitre IV

Figure IV.1 : Procédure d'introduction de la loi de fluage dans une structure	60
Figure IV.2 : Procédure introduction des températures et les constantes de fluage	61
Figure IV.3 : Coupe transversale du corps du barrage Souk N'TLETA	62
Figure IV.4 : Maillage de la structure et application du chargement hydrostatique	63
Figure IV.5 : Élément PLANE 182	64
Figure IV.6 : Fixation du temps du chargement (200j)	66
Figure IV.7 : Illustration des déplacements UX	67
Figure IV.8 : Illustration des déplacements UY	67
Figure IV.9 : Contours des déformations élastiques ε_x^{el} dans la structure	68
Figure IV.10 : Contours des déformations élastiques ε_y^{el} dans la structure	68

Figure IV.11 : Contours des déformations élastiques au cisaillement γ_{xy}	69
Figure IV.12 : Contours des contraintes (σ_x)	69
Figure IV.13 : Contours des contraintes (σ_y)	70
Figure IV.14 : Intensité des contraintes	70
Figure IV.15 : Illustration des contraintes de cisaillement τ_{xy} dans la structure	71
Figure IV.16 : Illustration des Déformation au fluage ϵ_x^{cr} dans la structure	71
Figure IV.17 : Courbe de fluage d'un Nœud du noyau argileux	72
Figure IV.18 : Illustration des Déformation au fluage ϵ_y^{cr} dans la structure	72
Figure IV.19 : Illustration des Déformation de cisaillement au fluage γ_{xy}^{cr} dans la structure	73
Figure IV.20 : Illustration des Déformation de Von Mises au fluage ϵ_{VM}^{cr} dans la structure...	74
Figure IV.21 Illustration des contraintes de Von Mises au fluage σ_{VM} dans la structure	74

Liste des notations

Lettres grecques

ε : Déformation.

$\dot{\varepsilon}$: Vitesse de déformation.

$\dot{\gamma}$: Taux de déformation au cisaillement.

ΔH * : Energie d'activation enthalpie.

$\beta = \frac{\beta'}{KT}$: Facteur de contrainte.

τ : Contrainte de cisaillement.

ε_x^{cr} : Déformation au fluage horizontale

ε_y^{cr} : Déformation au fluage verticale

γ_{xy}^{cr} : Déformation de cisaillement au fluage

ε_{cr} : Déformations de fluage

ε_x^{el} : Déformation élastique suivant l'axe X

ε_y^{el} : Déformation élastique suivant l'axe Y

γ_{xy} : Déformation élastique au cisaillement

β : Fluage parabolique.

σ : Contrainte équivalente.

σ_x : Contrainte suivant l'axe X.

σ_y : Contrainte suivant l'axe Y.

τ_{xy} : Contrainte au cisaillement.

ν : Coefficient de poisson.

γ_c : Déformation au fluage.

γ_m : Modèle de déformation primitive.

$\dot{\gamma}_f$: vitesse de déformation au point d'inflexion.

$\gamma * i$: Ajustement de la déformation initiale.

γ_c et γ_m : Déformation au fluage et modèle de déformation primitive obtenus pour un temps t.

Lettres latines

A : Constante de fluage du matériau indiquant le facteur de proportionnalité.

C₁, C₂, C₃, C₄ : Paramètres de fluage.

E : Module de Young.

K: Constante de Boltzman.

M et R : Coefficient de mobilisation et de rupture.

S_i : Structure initiale du sol.

S_f : Structure du sol à l'écoulement.

S_A : Structure du sol au point A.

S_r : Structure du sol à la rupture.

t_f : Temps de fusion.

T : Température du milieu.

U_x : Déplacement suivant l'axe X.

U_y : Déplacement suivant l'axe Y.

Liste des abréviations

ANBT : Agence National des Barrages et Transfert

NNR : Niveau normal de la retenue

NGA : Nivellement Général d'Algérie

DP1 : Dérivation provisoire 1

DP2 : Dérivation provisoire 2

LCPC : Laboratoire Central des Ponts et des Chaussées

Introduction générale

Les barrages existent probablement depuis la préhistoire, notamment en Égypte (réserve d'eau potable, d'irrigation, viviers, piscicultures...), mais leurs conceptions a connue de nombreux changements au fils des années.

Les avancés de la connaissance et des techniques ont donné naissance à différents types de barrage. Dans le même temps, l'accroissement des besoins a entraîné leurs multiplications partout dans le monde : on compte aujourd'hui 800 000 barrages dans le monde dont 94 en Algérie.

Mais pour en arriver là, beaucoup de progrès ont été nécessaires. Il a fallu comprendre comment s'exerçait la pression de l'eau, utiliser au mieux les propriétés des matériaux de construction ou en inventer de nouveau, savoir évaluer les caractéristiques sur lequel repose l'ouvrage...Tous cela, dans le but d'assurer une meilleure stabilité et de garantir une sécurité toujours plus grande.

Ces ouvrages présentent des enjeux importants, sur le plan de la sécurité publique, car leur rupture aurait des conséquences catastrophiques, mais également sur le plan de l'économie des installations, en raison de l'importance des coûts des travaux de maintien en état.

C'est pourquoi la réalisation de chaque aménagement se révèle une aventure unique, apportant sa contribution à une grande histoire qui continu de projet en projet.

Dans cette présente étude nous nous intéressons particulièrement au noyau argileux d'un barrage type enrochement, situé dans l'oued Bougdoura de la wilaya de Tizi-Ouzou.

Ce noyau pouvant devenir fragile face aux pressions hydrostatique engendrées par la retenue et ainsi perdre en sa fonction principale qui est l'étanchéisation a du engagé notre recherche dans la compréhension et l'interprétation du phénomène de fluage, en effet les sols argileux présentent toutes les propriétés rhéologiques où ce phénomène est le plus typique, prononcé et facilement observé.

Ce projet de fin d'études constitue une contribution dans ce sens. Il s'agit d'une étude numérique se basant sur les résultats théoriques de la littérature. Modéliser le phénomène de fluage dans le noyau argileux du barrage de Souk n'Tleta à l'aide du code des éléments finis

ANSYS, dans l'ultime but de comprendre comment ce phénomène agit-il sur le noyau de cet ouvrage.

Ce mémoire a été élaboré avec l'aide de l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (ANBT) dans le cadre de la préparation de mon diplôme de Master en Géotechnique.

Objectif de ce mémoire

La recherche exposée dans ce mémoire a pour objet l'étude du comportement des masques d'étanchéité argileux face au fluage par la modélisation numérique.

Le but de ce travail est donc de valider ce modèle numérique en montrant qu'il permet de prédire avec une fiabilité acceptable le comportement au fluage des noyaux argileux des barrages en enrochement, mais en particulier, le noyau du barrage de Souk n'Tleta. Cela suppose une connaissance préalable de la structure fine des matériaux étudiés (composition minéralogique, microstructure...) qui aide à interpréter les résultats d'essais de simulation.

Cette méthodologie conduit naturellement à l'organisation de notre recherche dont le résumé est donné ci-après.

Le chapitre I : il sera consacré à l'exposé des principales recherches et définitions menées sur les barrages type enrochement et leurs différents masques d'étanchéité. Nous donnerons un aperçu historique sur ces barrages, leurs structures ainsi que les étapes de leurs constructions ; par la suite nous aborderons les problèmes de tassement que ces ouvrages peuvent rencontrer durant la construction et lors du remplissage de la retenue, enfin nous présenterons les différents masques d'étanchéités que ses barrages peuvent avoir.

Le chapitre II : il comporte une présentation générale du barrage de Souk n'Tleta et donne une description globale de l'ouvrage et ses différents ouvrages annexes.

Les matériaux utilisés pour la construction de ce barrage présentent des paramètres géotechniques distincts que nous allons détailler dans ce chapitre.

Le chapitre III : il se penchera sur l'interprétation du fluage en exposant les quelques modèles de bases permettant de décrire ce phénomène dans les sols argileux.

Le chapitre IV : il sera consacré aux résultats de la modélisation du comportement au fluage du noyau argileux du barrage de Souk n'Tleta de Tizi-Ouzou.

Enfin, une conclusion générale.

Chapitre I

*Construction des barrages en enrochement avec différents masques
d'étanchéités*

I.1 Introduction

Pour bien entamer notre travail et par la suite mieux être orienter, il est important de revoir quelques définitions et notions de base, chose que nous traitons dans ce premier chapitre.

Ce chapitre, présente donc une analyse bibliographique sur la conception et le comportement des barrages en enrochements avec différents masques d'étanchéités.

I.2 Définition d'un barrage

Un barrage est une barrière empêchant l'écoulement naturel de l'eau. Il sert à retenir l'eau d'un fleuve ou d'une rivière qui s'écoule jusqu'à lui et à contrôler la quantité qui se déverse, après lui.

Les barrages peuvent être classés selon deux groupes :

- Les barrages rigides, en béton ou en maçonnerie ;
- Les barrages souples, en enrochement ou en terre (feront l'objet de notre étude dans ce chapitre) ;

I.3 Barrages en enrochement

I.3.1 Définition et historique

Un barrage en enrochement est un tas de grosses pierres maçonnées ou non, dont la fonction de résistance à la poussée de l'eau est assurée par le poids du massif. Les massifs d'enrochement n'étant pas étanches par eux-mêmes, un organe d'étanchéité doit être mis en place soit en parement amont soit en noyau. Aujourd'hui on compte plus de 36 000 barrage de ce type dans le monde.

Les barrages en enrochement ont été construits surtout depuis une quarantaine d'années. On peut cependant citer les premiers barrages de ce type au XVIIIème siècle en Allemagne dans le Oberharz et à la fin du XIXème siècle aux USA en Californie. Et c'est que vers les années 1939 que le premier barrage de ce genre a vu le jour en Algérie, il est spécialement constitué d'enrochement et d'un masque amont en béton bitumineux.

Haut de 65m et d'un volume de 700 000 m³, le barrage de Ghrib situé sur l'oued Chélif fut à l'époque un ouvrage exceptionnel par le parti adopté et les solutions apportées aux problèmes de fondation.

I.3.2 Structure

Un barrage en enrochement est principalement constitué d'un noyau imperméable qui assure le rôle de l'étanchéité, d'un corps en enrochement appelé recharge qui apporte la fonction de stabilité, et enfin d'un dispositif de drainage connu sous le nom de filtre ou drain pour empêcher les infiltrations de déboucher sur le parement aval et ainsi protéger la structure des phénomènes d'érosion¹ interne. Mais dans le cas où l'on ne dispose pas de matériaux assez étanche pour constituer le noyau, un masque est alors construit à l'amont du barrage (**figure I.1**).

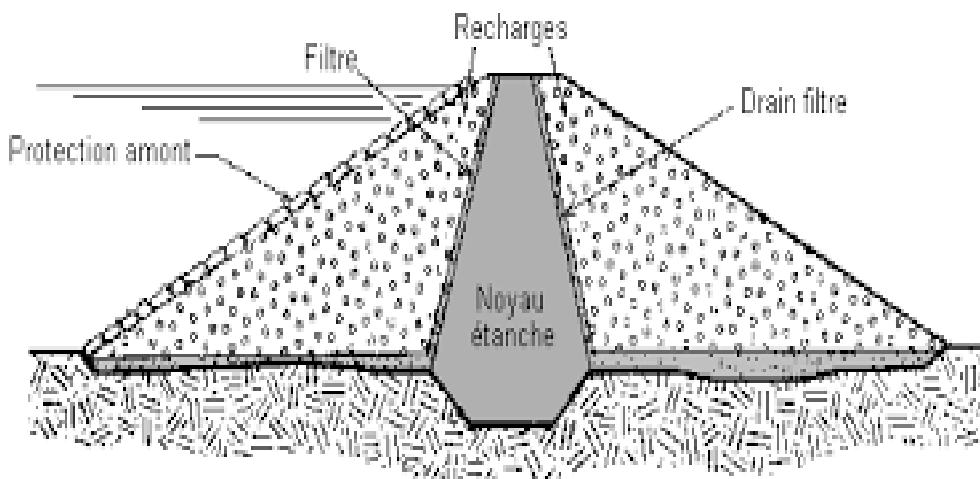


Figure I.1 Barrage en enrochement (Carrère A. 1994).

➤ Le noyau

On sait que la fonction d'étanchéité est assurée par un noyau étanche. Ce dernier est réalisé en matériaux argileux compactés, placés soit en position inclinée en amont de l'ouvrage soit en position verticale en son centre. L'épaisseur du noyau doit être d'autant plus importante que le barrage est haut. On choisit en général une épaisseur de 1 /6 de la hauteur de l'ouvrage.

¹ Erosion : l'érosion désigne le déplacement de sol ou de roches sous l'action combinée de la gravité et des éléments naturels tels que le vent, la pluie, le ruissellement de l'eau ou les vagues. Ce phénomène naturel entraîne le transfert progressif de grands volumes de matière depuis l'amont des bassins versants vers l'aval

Le sommet du noyau doit être au-dessus du niveau des plus hautes eaux et pratiquement compte-tenu des remontées capillaires jusqu'à la crête de l'ouvrage. Il doit être protégé de la dessiccation à sa partie supérieure pour éviter toute fissure de retrait. Cette protection peut être assurée par une couche de sable ou en traitant la crête en chemin avec une chaussée en enrobé bitumineux (Degoutte G., Mercklé S., 2014).

Le noyau étanche est maintenu par une ou plusieurs zones constituées de matériaux plus grossiers et relativement perméables assurant la stabilité mécanique de l'ouvrage. Le noyau interne a l'avantage d'être peu sensible aux agressions extérieures : il constitue une solution robuste de durée de vie longue et relativement peu coûteuse. L'inconvénient est qu'il est difficilement réparable en cas de fuite.

Il faut assurer la continuité de l'étanchéité en raccordant celle-ci à la fondation imperméable ou au dispositif d'étanchéité des fondations.

Si l'on ne dispose pas de matériaux argileux pour réaliser un noyau assurant l'étanchéité, on peut recourir à la solution de diaphragme central (**figure I.2**).

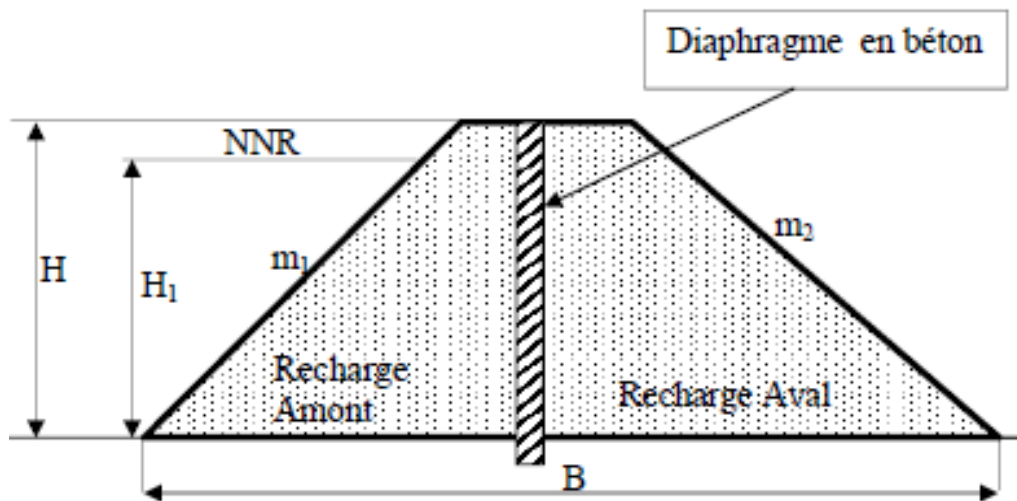


Figure I.2 : Barrage en remblais avec diaphragme interne (MESSAID, 2009)

➤ Les recharges

Ces massifs plus perméables que le noyau sont réalisés en enrochements, ou en terre plus grossière, ils sont placés à l'amont et à l'aval du noyau en zone centrale, et ils apportent en effet la fonction de stabilité.

➤ La protection amont

C'est un dispositif (écran) d'étanchéité artificielle placé à l'amont du barrage, dans le cas où l'on ne dispose pas sur le site du barrage de matériau suffisamment étanche pour constituer une étanchéité interne (noyau).

L'étanchéité doit être assurée sur toute la périphérie du masque aussi bien en pied du barrage et dans la fondation qu'en rive pour éviter tout contournement du masque.

On notera que quelle que soit l'inclinaison adoptée, l'écran a tendance à glisser sur son talus, sous l'effet de son propre poids ou de variations de température. Par conséquent, l'écran doit être soit accroché en tête du barrage, soit appuyé sur un mur de pied, s'il ne risque pas de flamber, soit collé sur le talus amont.

➤ Les filtres et drains

Le dispositif filtre/drain est un élément particulièrement important d'un barrage en remblai. Plusieurs accidents et rupture sont imputables à l'absence de filtres ou/et de drains, ou encore à une mauvaise conception ou réalisation du système filtre/drain pouvant conduire à une érosion interne ou un drainage insuffisant. La sécurité des barrages en remblai dépend donc d'une conception et d'une construction adéquate des systèmes de filtres et de filtres/drains.

I.3.3 Types des barrages en enrochement

La position de l'organe d'étanchéité définit essentiellement deux types de barrages en enrochements ;

➤ Barrage en enrochements avec noyau central

Le barrage a noyau central est un barrage qui vient assurer son étanchéité grâce à son noyau. Ce dernier peut être constitué d'argile qui répond parfaitement à la fonction d'imperméabilité recherchée ou de moraine qui est souvent utilisé dans les régions marquées par le retrait des glaciers. La moraine utilisée dans ces ouvrages est généralement récupérée à proximité du site.

La coupe type d'un barrage en enrochement comprend également une zone de transition située entre le filtre et la recharge (CFGB, 2002).

➤ Barrage en enrochements avec masque amont

Les barrages à masque amont sont des ouvrages plus récents (CFGB, 2002). Une couche d'étanchéité appelée masque est posée à l'amont du massif en enrochement, ce masque est étanche sur toute sa surface, et il peut être en béton armé (on construit actuellement de nombreux et très grands barrages en enrochements à masque en béton armé, en béton bitumineux, ou constitué d'une membrane mince ; les plus fréquentes : membrane PVC, membrane bitumineuse).

I.4 Construction d'un barrage en enrochement

Avant les années 60, les constructeurs pensaient que les recharges en enrochement devaient être composées de bloc de taille uniforme, en éliminant les fines, alors d'important tassements ont été observés, cela a permis de comprendre le phénomène, revoir les définitions de base et les techniques de construction.

Il a été constaté que les contacts : « bloc-bloc » ne réduisent pas spécialement les tassements des granulométries étalées ont ainsi été préconisées. De plus, le placement des enrochements par couches de 1 à 2 m puis leur compactage a été recommandés pour diminuer les tassements. L'arrosage des enrochements avant compactage est aussi conseillé ; car comme la résistance des blocs rocheux peut diminuer en présence de l'eau, l'arrosage des enrochements favorise la fissuration des blocs de plus mauvaise qualité et écrasement des arêtes. Ainsi, le risque de tassement durant la vie de l'ouvrage est réduit (Guenoun. O, Kelali. N, (Etudiants 2002-2003).

I.4.1 Etapes de construction

Un barrage va modifier en profondeur le milieu qui l'accueille. C'est pourquoi sa conception, puis sa construction, requièrent des études bien détaillées. Par ailleurs, sa construction passe par différentes étapes que voici ;

➤ Le choix du site

Le choix du site est d'une importance capitale dans l'implantation de l'ouvrage car c'est lui qui décide des caractéristiques de ce dernier.

Le site étant choisi, on repère l'axe avec des bornes en béton installées à chaque extrémité. C'est, ces bornes qui serviront de repères pendant les travaux, elles ne doivent donc pas être déplacés. Dans l'alignement des repères, on plante des piquets avec des intervalles réguliers. Sur la base de ce relevé, on peut déterminer :

- la hauteur des remblais en chaque point.
- la largeur de la digue à la base.
- Le volume des remblais.

➤ La mise hors d'eau et excavation

Elle consiste à isoler tout ou une partie du barrage, grâce à des ouvrages de dérivation qui seront réutilisés plus tard comme structures annexes de l'aménagement.

Pour construire un barrage, la mise à sec est une étape primordiale. Un barrage provisoire appelé batardeau sera alors réalisé pour assurer l'assèchement du lit du barrage, il est construit à l'amont du site pour protéger la zone des travaux contre les inondations. Il détourne la rivière pendant la construction au moyen de conduites (plus de 10 m de diamètre), de galeries ou de canaux de dérivation. Si les travaux se réalisent entièrement pendant une saison sèche, les batardeaux ne sont donc pas nécessaires.

L'eau stockée par les batardeaux peut être utilisée pour les travaux (compactage) et éventuellement pour le gâchage des bétons.

L'eau qui retourne à la rivière en aval du barrage ne doit pas avoir la possibilité de creuser ou d'éroder ni le lit de la rivière, ni d'affecter la fondation du barrage, c'est pour cela qu'un deuxième batardeau est recommandable.

➤ La préparation des fondations

La préparation des fondations est une étape essentielle du chantier. Car en effet, pour les barrages en enrochement, le principal problème est celui de l'étanchéité, particulièrement dans

le cas d'alluvions : il est alors nécessaire d'améliorer cette étanchéité en procédant à des injections qui sont généralement composée d'eau et de ciment (CFGB, 2002).

Ces injections peuvent s'opérer :

- Soit au moment de l'ouverture des fouilles ;
- Soit (éventuellement en complément) à la fin de la construction de l'ouvrage, à partir d'une galerie spécialement aménagée.

On peut également être amené à dresser, dans les fondations mêmes, un mur destiné à stopper totalement ou partiellement les infiltrations. C'est une variante des injections, appelée la technique des parois moulées.

➤ Construction de l'ouvrage

Une fois que toutes les étapes précédentes sont accomplies, on peut alors entamer les travaux c'est à dire la construction du barrage.

Les matériaux sont transportés, déposés et répandus pour atteindre l'épaisseur requise. Si le matériau naturel n'a pas la teneur en eau requise pour un bon compactage, on procède à son humidification. Le compactage se fait à l'aide d'engins de compactage.

L'épaisseur des couches et le nombre de passes de l'engin sont déterminés par une planche d'essais réalisée sur le chantier.

La digue est construite sur une largeur de 20 à 40 cm qui permet un bon compactage des talus qui sont ensuite découpés à la pente requise (CFGB, 2002).

I.4.2 Comportement statique des barrages

La prévention des tassements dans les barrages est capitale pour certifier l'étanchéité du masque ; des tassements trop importants en crête risqueraient d'abaisser le niveau de la retenue. On peut alors distinguer trois types de tassements, dus au changement de contraintes totales ou effectives durant la vie de l'ouvrage

- Les tassements durant la construction ;
- Les tassements lors du remplissage de la retenue ;
- Les tassements différés.

Ces tassements sont principalement dus au vieillissement de l'ouvrage mais peuvent être également provoqués par les changements climatiques. Pour que le masque ne subisse pas des fortes déformations, il faut que la majeure partie des tassements se produisent lors de la construction (**figure I.3**).

➤ Tassements durant la construction

L'importance des tassements dépend de la qualité des matériaux utilisés lors de la construction. Ainsi, le barrage de Foz do Areia, au Brésil, construits en basaltes altérés d'une hauteur de 160 m, a tassé de 3.58 m au cours de sa construction, tandis que le barrage d'Alto Anchicaya, en Colombie, construit en roches de bonne qualité d'une hauteur de 140 m n'a tassé que de 0.63 m.

➤ Tassements lors du remplissage de la retenue

Le remplissage de la retenue correspond à une phase importante dans la vie de l'ouvrage. Les tassements sont d'autant plus importants quand la hauteur de l'ouvrage est élevée et les enrochements ont une faible résistance en compression. Les barrages avec des enrochements déversés présentent plus de déformations que les barrages avec des enrochements compactés.

Les déplacements du masque dus aux tassements du remblai se font quasiment perpendiculairement au masque. Il y a donc peu de contraintes de cisaillement dans le masque ; en revanche, si les déplacements sont trop importants, ou s'il y a des tassements différentiels entre deux dalles, les joints peuvent s'ouvrir. Outre les déformations du masque, on constate une déformation globale de l'ouvrage, notamment en crête lors de la mise en eau ; ces déplacements ont une composante horizontale qui n'est pas négligeable (BETCGB, 2013).

➤ Tassements différés

Les propriétés des roches évoluent généralement dans le temps : elles se déforment sous charge constante, c'est-à-dire qu'elles fluent. Même si le fluage évolue très lentement, il peut devenir non négligeable étant donné la durée de vie des ouvrages. La vitesse de fluage dépend de bon nombre de facteurs comme la température, les contraintes appliquées, le rapport entre les contraintes appliquées et les contraintes de rupture des roches, le temps d'application des chargements, la présence d'eau, de gel, etc. Ce fluage, couplé à la fatigue de la roche (due aux changements de contraintes liées aux cycles de remplissage et de vidange) va générer des

Tassements de l'ouvrage, qui dans certains cas, ne semblent pas se stabiliser dans le temps. Au cours du temps, certains blocs instables vont se réorganiser par glissement ou rotation et d'autres vont se casser ce qui va induire des réarrangements à l'intérieur de la structure : c'est ce couplage de réarrangements et de ruptures successives qui est à l'origine des tassements évoluant dans le temps (BETCGB, 2013).

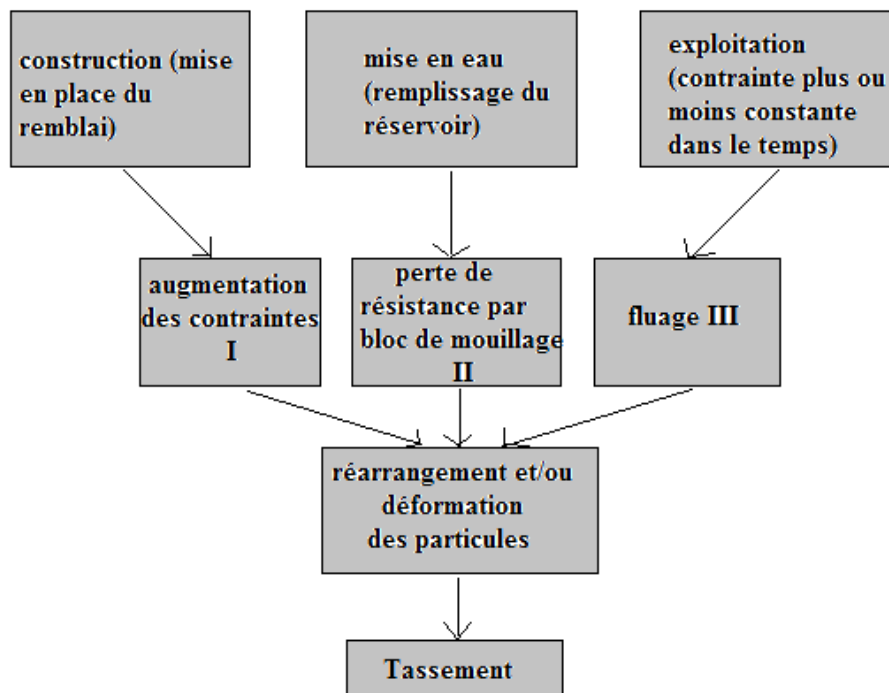


Figure I.3 Mécanisme causant le tassement d'un barrage en enrochement (BOUCHARD, 2016)

I.5 Matériaux utilisés

I.5.1 Matériaux utilisés pour le noyau

Sachant que les propriétés recherchées pour le noyau sont : étanchéité – déformabilité – compactibilité. Il s'agit donc des sols qui contiennent une forte proportion en particules fines.

L'étude des caractéristiques du matériau se fera en laboratoire selon une procédure de compactage normalisée « Proctor normal ».

Une propriété importante des matériaux utilisés pour réaliser le noyau est l'indice de plasticité qui caractérise la susceptibilité des matériaux à leur teneur en eau. Il est idéalement compris, pour les terres à noyau, entre 15 et 25 %. Les matériaux fins dont l'indice de plasticité est supérieur à 35 % posent non seulement des problèmes de stabilité mais également de tassement, de gonflement et de mise en œuvre.

I.5.2 Matériaux utilisés pour les recharges

Les propriétés recherchées sont : résistance mécanique – perméabilité – facilité de mise en place.

Ce type de barrage utilise en grande partie des matériaux naturels ; il s'agit donc de les choisir, en tenant compte des frais d'extraction et de transport, donc en raison économique en a recours aux matériaux naturels disponibles à proximité du chantier (3 kilomètres environ).

Les pierres utilisées dans la construction de ces barrages doivent présenter une résistance considérable à des contraintes élevées. En général, elles sont de nature magmatiques, granitiques ou basaltiques.

Les roches sédimentaires (grès, quartz, calcaires, dolomites) quant à elles peuvent être utilisées dans la construction de petits barrages.

I.5.3 Matériaux utilisés pour les filtres

Pour ces matériaux, on recherche une composition granulométrique bien définie qu'on trouve rarement dans la nature ; ils sont donc fabriqués en quantité juste nécessaire à partir d'alluvions ou d'enrochement de carrière.

I.5.4 Matériaux utilisés pour la protection de surface

La surface des remblais doit en général être protégée des actions extérieures, notamment du côté amont où les vagues de la retenue exercent une agression active.

La taille des blocs, qui dépend de la hauteur des vagues et de la pente du talus, peut dépasser 1 m. Quand il n'existe pas d'enrochements disponibles, on peut constituer un assemblage de blocs artificiels en béton.

À l'aval, des blocs de 10 à 30 cm suffisent.

I.6 Mise en place des enrochements

➤ Enrochements arrimés

Sur la face du talus amont et sur une épaisseur de quelques mètres, les blocs de pierres sont arrimés, c'est-à-dire ils sont mis en place à l'aide d'engins mécaniques et les espaces entre les gros blocs sont bouchés par des petites pierres placées à la main.

➤ Enrochements en vrac

Les pierres sont déversées depuis des camions et arrosées par des jets d'eau à grandes pressions avant d'être compactées par de gros rouleaux vibrants ou des vibrateurs puissants (CFGB, 2002).

I.7 Fissuration et rupture des roches

C'est que vers les années 1950 qu'une étude sérieuse du comportement mécanique des enrochements a commencé. En effet, la connaissance du comportement de l'enrochement est d'une grande importance car les charges existantes dans les recharges en enrochements dues à de fortes hauteurs de matériau et d'eau sont souvent très importantes et induisent des tassements dans la structure.

Les principaux mécanismes menant à la rupture fragile des roches sous compression sont décrits ci-dessous ;

On distingue plusieurs phases dans le processus de rupture tout au long des courbes contrainte-déformations axiale, transversale et volumique.

➤ Phase 1 : phase de serrage

Cette phase est présente dans l'essai uni-axial, elle existe pour de faible niveau de contrainte. L'application de la charge provoque une fermeture progressive des pores et microfissures préexistantes du matériau, ce qui provoque une augmentation de la raideur quand les lèvres de fissures se mettent en contact entre elles.

➤ Phase 2 : phase linéaire

Cette phase correspond généralement à la phase élastique, linéaire et réversible de la courbe contrainte- déformation. La déformation volumique est contractante.

➤ Phase 3, 4, 5 : phase de microfissuration

Dans la phase 3, nous allons noter le début d'amorçage et de propagation stable de la microfissuration. Ensuite, le phénomène de dilatance prend de l'ampleur, à mesure que la contrainte augmente dans la phase 4. Arrivé à un certain niveau de contrainte, l'augmentation de volume compense la diminution du volume due à la contraction élastique (phase 5).

➤ Phase 6 : propagation instable de microfissuration

Dans cette phase les déformations axiales ne sont plus linéaires. Ce qui induit un endommagement croissant de la roche. Ce seuil correspond au seuil de localisation, qui constitue le véritable point de départ de la rupture.

➤ Phase 7 : comportement post-pic

Il est principalement géré par les frottements mutuels de fragments de roches.

I.8 Les différents masques d'étanchéités des barrages à masque amont

On sait que dans les barrages en enrochement, les enrochements ne sont pas imperméables et, à eux seuls, ils sont incapables de retenir l'eau. C'est pour cela, qu'une couche d'étanchéité appelée masque qui est posée à l'amont du massif en enrochement vient garantir une meilleure imperméabilité à ce dernier (**figure I.4**).

Le masque amont doit être souple de manière à s'adapter sans détérioration aux mouvements du massif qui se tasse sous son propre poids, sous l'effet de la poussée de l'eau, notamment lors du premier remplissage, et sous les effets des mouvements de la fondation. L'épaisseur de l'écran sert à éviter que les détériorations d'une face se propagent à l'autre face. Le masque amont présente l'avantage de pouvoir être réalisé après l'édification du remblai et de pouvoir être réparé aisément. Exposé aux agressions extérieures (mécaniques, thermiques...), il est plus fragile que le noyau interne et doit recevoir une protection adaptée (Ministère de l'agriculture, direction de l'aménagement, 1977).

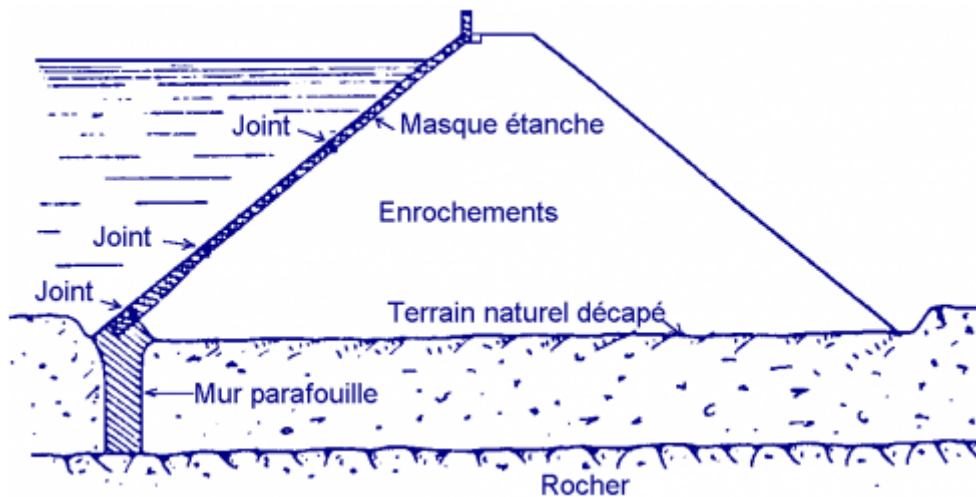


Figure I.4 Barrage à masque (CFBR)

I.8.1 Masque en béton

L'étanchéité est obtenue par la mise en œuvre d'une granulométrie convenable ainsi que l'utilisation d'adjuvants (Ministère de l'agriculture, Direction de l'aménagement, 1977). L'épaisseur de la dalle en béton est généralement de 20cm. Les caractéristiques chimiques de notre béton doivent être prises en compte car notre masque est exposé aux agressions extérieures notamment à celles de l'eau. Le béton peut être armé ou non.

Un masque en béton non armé, est nécessairement plus rigide car plus épais, il devra comporter des éléments séparés (dalles, plaques) avec joints horizontaux et verticaux jouant le rôle de charnières pour permettre l'adaptation de l'écran à son support. L'étanchéité au niveau des joints est obtenue à l'aide de lames métalliques pliées, généralement en acier inoxydable ou de bandes de caoutchouc Waterstop. Le joint est ensuite rempli par un produit plastique assurant la protection de l'étanchéité proprement dite. (Voir **figure I.5**)



Figure I.5 Masque en béton armé (photo Irstea-G2DR)

I.8.2 Masque en béton bitumineux

Ce type de masque en béton bitumineux est en général très efficace pour les barrages en enrochements du point de vue de sa qualité hydraulique.

Il est plus souple qu'un masque en béton de ciment et présente donc une meilleure faculté d'adaptation aux déformations du barrage et de la fondation. Il est néanmoins sujet au fluage et doit être protégé contre le vieillissement. Il est facilement réparable en cas de déchirure.

Du fait de ses propriétés élastiques sous des sollicitations de courte durée, il présente une bonne tenue aux séismes. Récemment, certains écrans en béton bitumineux ont été armés par des treillis en polyester, dans les zones sensibles, comme la partie périmétrale immergée (site du CFBR).

Ces couches en béton bitumineux sont mises en place par des engins conforme à ce qu'on trouve dans les chantiers routiers, qui sont adapté pour tenir sur la pente. (Voir **figure I.6**)

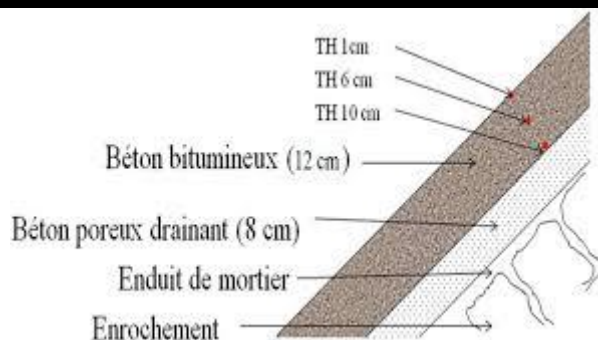


Figure I.6 Masque amont en béton bitumineux (TH : thermocouple)

I.8.3 Dispositifs d'étanchéité par géomembrane

Les géomembranes sont des produits étanches, minces, souples, continus dont l'épaisseur est d'un mm au minimum. Ce type de masque est très utilisé pour les petits ouvrages. La géomembrane doit généralement être maintenue en crête et au pied du barrage (site du CFBR).

Il peut s'avérer intéressant de placer la géomembrane à l'intérieur du talus amont dans le cas où les matériaux disponibles sont semi-perméables à peu perméables; La mise en place de la recharge amont, d'une épaisseur suffisante vis-à-vis des sous pressions, sur la géomembrane doit se faire de façon délicate, les deux faces doivent avoir un frottement suffisamment élevé ; les fuites éventuelles sont alors contrôlées à l'aide d'un drain cheminée classique et la géomembrane a finalement un rôle d'étanchéité complémentaire. (Voir **figure I.7**)



Figure I.7 Pose d'une géomembrane (photo Irstea Bordeaux)

I.8.4 Masque en tôle d'acier

Il est placé par soudure sur toute la surface, son épaisseur est de 6mm. Mais pour ce type de masque les problèmes liés à la corrosion peuvent survenir, c'est pour cela que l'application d'une peinture anti rouille et une dernière couche de peinture en bitume est favorable.

I.9 Etanchéité des fondations des barrages en enrochement

Lorsque les fondations du barrage sont imperméables, il suffit d'assurer la liaison entre le massif du barrage et sa fondation en réalisant un ancrage du dispositif d'étanchéité pour empêcher les infiltrations suivant la ligne de contact entre le barrage et sa fondation. Dans le cas où les fondations sont perméables, leur traitement est indispensable pour les rendre étanches. Ce traitement est en fonction de la nature des matériaux les constituant et de leurs profondeurs.

I.9.1 Paroi moulée

On appelle paroi moulée un écran vertical construit à partir de la surface des fondations par excavation sans blindage et rechargé de coulis auto-durcissable de bentonite avec ciment ou en béton plastique. (**Figure I.8**).

Cette technique est aperçue dans les terrains meubles et dans les fondations rocheuses grâce à de nouvelles techniques nommées hydro fraise. Elle peut engendrer des désordres s'il se produit des déplacements sérieux, comme le poinçonnement inverse du remblai dans le cas d'un fort tassement de la fondation meuble (Le Delliou, 2003).

Si cette paroi est située au pied amont du remblai, elle peut endurer un cisaillement important dans sa partie supérieure.

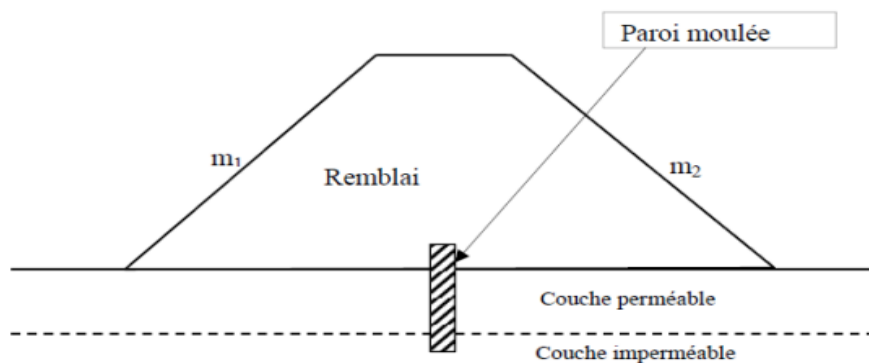


Figure I.8 Paroi moulée (Le Delliou,2003)

I.9.2 Traitement des fondations par injection

L'injection consiste à faire pénétrer dans un milieu plus ou moins perméable un matériau pompable nommé coulis d'injection (Le Delliou,2003). Elle s'effectue couramment par des forages réalisés dans le milieu à traiter et a pour but le plus souvent d'en améliorer la résistance mécanique et de réduire sa perméabilité (voir **Figure I.9**). Les injections sont utilisables beaucoup plus dans le cas d'une fondation meuble que dans celui de massifs rocheux plus ou moins fissurés. Les produits d'injection étant adaptés au matériau traité (coulis de bentonite et ciment, coulis spéciaux). La coupure comporte le plus souvent, trois lignes de forages, comme l'injection qui ne peuvent être efficace en surface, soit on recoupe les premiers mètres injectés par une clé d'étanchéité, soit on traite à partir d'une certaine hauteur de remblai.

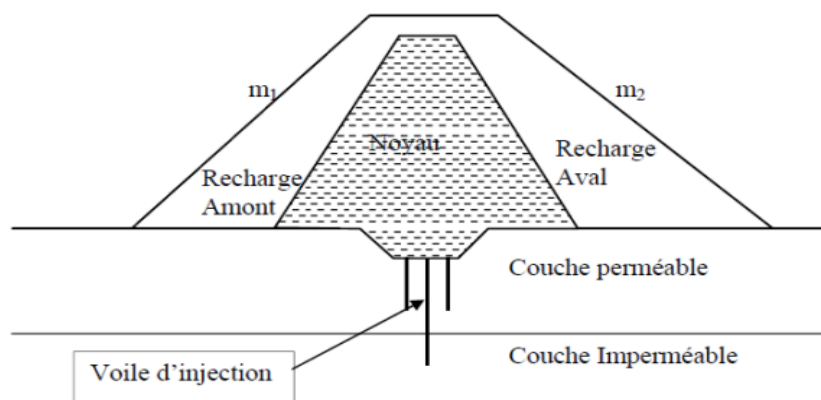


Figure I.9 Voile d'injection (Le Delliou,2003)

I.9.3 Tapis d'étanchéité amont

Lorsque l'étanchéité de la retenue ne peut pas être réalisée par une coupure au droit du barrage, la solution consiste à étancher la cuvette totalement ou partiellement à l'aide d'un tapis en matériaux argileux compactés. On peut adjoindre aux matériaux argileux des produits d'étanchéité, des polymères synthétiques et de la bentonite pour améliorer son efficacité. (voir **Figure I.10**).

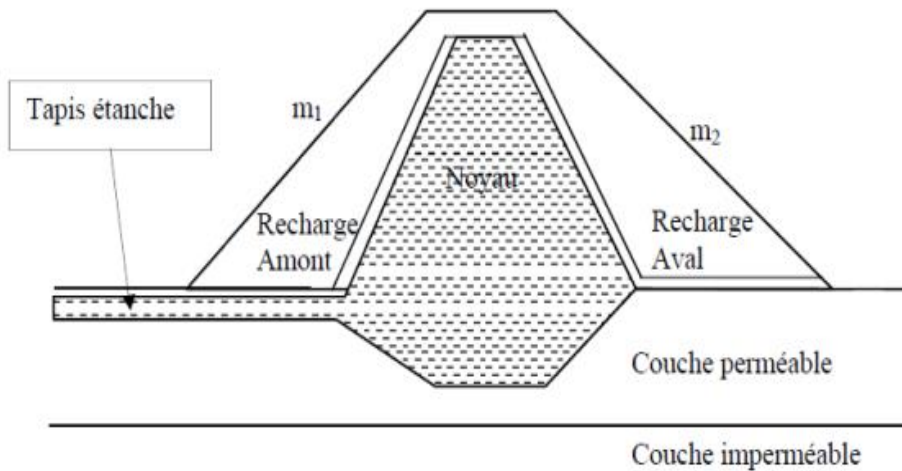


Figure I.10 Tapis d'étanchéité amont (Le Delliou,2003)

La présence d'une charge hydraulique à l'amont du remblai génère une infiltration d'eau dans le barrage et ses fondations. Malgré l'attention accordée au dispositif d'étanchéité prévu, ces infiltrations peuvent être nuisibles à la stabilité tant hydraulique que mécanique de l'ouvrage. Pour y remédier on entrevoit un dispositif de drainage souvent associé à des filtres. Le contrôle des infiltrations constitue l'un des principaux éléments de conception des barrages en terre lorsque sous la charge hydraulique créée par le réservoir, l'eau qui va tendre à s'infiltrer vers le potentiel inférieur à l'aval engendrant plusieurs problèmes comme l'entraînement des particules de sol, la diminution de la stabilité due aux pressions interstitielles d'écoulement de l'eau dans le corps du barrage qui fragilise ce dernier, et pour maintenir l'état du barrage et le protéger il faut prévoir des solutions fiables telles que :

- Implantation des filtres pour se prémunir contre l'érosion interne dans le mur du barrage ainsi que la fondation ;
- L'allongement du chemin d'écoulement pour réduire les infiltrations (débit et pression) par des éléments de conception ;
- Mise en place de drains ou de puits de drainage, a pour but la dissipation des pressions d'eau.

I.10 Conclusion

Ce chapitre est une ouverture au travail élaboré dans ce mémoire, il donne une idée générale sur les barrages en enrochements ainsi que leur construction qui requière des études et des techniques bien définie, leur stabilité dépend essentiellement de leurs différents masques d'étanchéités, de la qualité des matériaux employés, ainsi que les enrochements utilisés. Ces derniers présentent des caractéristiques apparentes qui garantissent une meilleure sécurité, mais dans le cas contraire, ils conduisent à la ruine de l'ouvrage.

L'utilisation des matériaux locaux généralement bon marché et leurs disponibilités à proximité du site fait que la solution barrage en remblais ou enrochement est intuitivement choisis par rapport aux autres types de barrages considérés rigides.

Cependant deux types de barrages en enrochement existe : les barrages à noyau central qui assurent leurs étanchéité grâce à leurs noyaux et les barrages à masque amont qui, quant à eux affirment leurs perméabilités grâce au différents masques placés à l'amont du massif.

Le principal problème lié à ce type d'ouvrages est la prévention des fuites à travers le masque. La conception du masque et des dispositifs d'étanchéité doit donc être très soignée. De même la plus grande attention doit être apportée au compactage des enrochements.

Chapitre II

*Etudes des géo matériaux de carrière pour les digues du barrage de Souk
n'Tleta (Tizi-Ouzou)*

II.1 Introduction

La présence d'un court d'eau qui découle de l'oued Bougdoura et l'existence des matériaux conformes et carrière dans le même site à inciter à la réalisation d'un barrage de type enrochement à noyau argileux dans la région de Souk n'Tleta de la wilaya de Tizi-Ouzou.

Une fois achevé, ce barrage retiendra une capacité de 98million de mètres cubes d'eau, il sera alors considéré comme le deuxième plus grand barrage de la wilaya de Tizi-Ouzou, c'est pour cela que la conception puis la construction de sa digue relève d'un savoir technique bien défini et de matériaux de très bonne caractéristiques.

Ce chapitre a pour but, de présenter l'étude des géo matériaux de carrière constituant le support du barrage de Souk n'Tleta (Tizi-Ouzou) utilisés pour la construction des digues et ouvrages annexes.

II.2 Présentation du barrage Souk n'Telta

Ce barrage est situé dans le bassin versant de l'oued Bougdoura, affluent du Sébaou, (**figure II.1**), avec une capacité de 98 million de m³ et 95 m de hauteur. Le niveau de la retenue normal NNR (niveau normal de la retenue) est fixée à 122m NGA (Nivellement Général d'Algérie), le niveau de la retenue maximale quant à lui est de 125 m NGA. Une fois réceptionné, il alimentera plusieurs communes de Tizi-Ouzou ainsi que celles de Boumerdes. Ce barrage est constitué d'un noyau en argile étanche, d'une digue en matériaux meubles ainsi qu'une digue de col, d'une hauteur de 20 m environ qui viendra barrer la dorsale gauche du barrage (Afiri R. 2011-2012).

En outre, la mise en eau du barrage est conditionnée par la réalisation de la déviation définitive des routes RN25 et CW128.

Les géo matériaux étudiés sont utilisés dans les différentes parties des digues et ouvrages du projet, comme indiqué dans les figures (**Figure II.2** et **Figure II.3**). Leurs volumes totaux sont de plus de deux millions de mètres cubes (2 056 900m³). Ils sont constitués de :

- Argiles pour noyaux : 314 600,00 m³
- Recharge amont en alluvions : 728 000,00 m³
- Recharge aval en tout-venant de carrière (TVC) grès : 684 000,00 m³
- Filtre et drain en alluvions après lavage et criblage : 119 760,00 m³

- Couches de Transitions en matériaux alluvionnaire et grès: 60 580,00 m³
- Enrochements en blocs calcaires : 65 880,00 m³
- Agrégats (0,8-25 mm) pour bétons: 80 000,00 m³
- Bentonite pour béton plastique pour la paroi moulée: 80,60 m³
- Terre végétale pour les talus en aval : 4 000,00 m³.

Les géo matériaux de terrassements excavés en provenance d'alluvions d'oueds, de colluvions des zones d'argiles, des rives gauche et droite du barrage, des galeries et du noyau et autres ouvrages sont réutilisés en recharge des digues ou mis en dépôts.

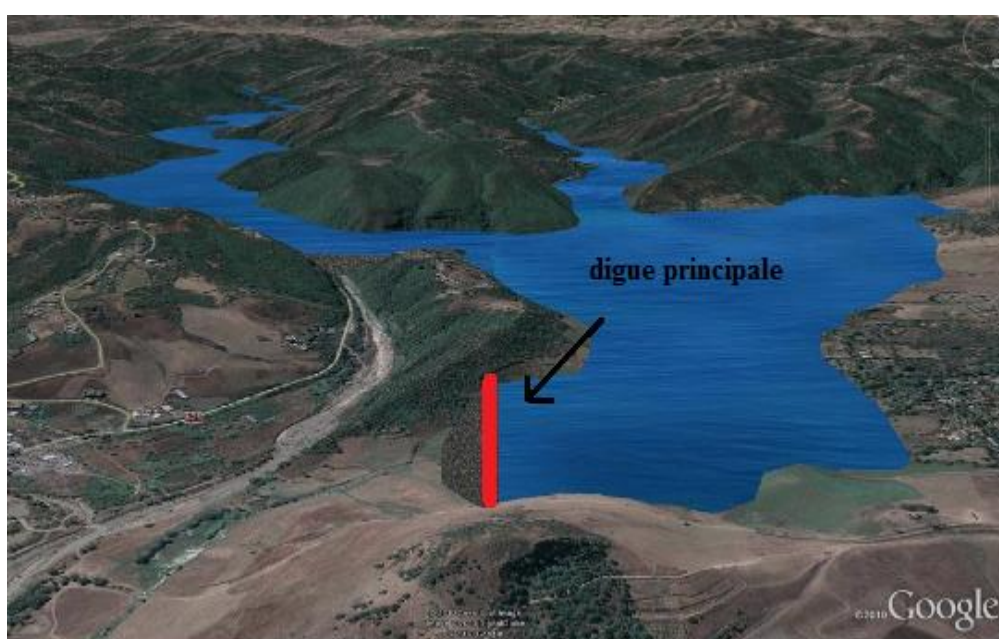


Figure II.1 Vue générale sur le site du barrage (Google earth)

II.2.1 Situation géographique du site du barrage de Souk n'Tleta

Le site du barrage Souk n'Tleta se situe sur l'Oued Bougdoura, immédiatement en aval de la confluence des oueds de l'Acif Souk n'Tleta et Tala Imedrane. Ce Site est accessible en empruntant la Route Nationale (RN 25) en partant de Draa Ben Khedda vers Draa El-Mizan et le chemin de wilaya (CW 128) à partir de la Ville de Tizi Ouzou vers Boghni (Guenoun O, Kelali N, 2002-2003).

II.2.2. Description du barrage et ses différents ouvrages annexes

Le barrage de Souk n'Tleta est de type barrage en remblai zonés de 95m de hauteur sur la fondation et une longueur au couronnement de 156 m environ. Le niveau de la crête est à la cote 130.70m NGA et la largeur de 10m. Il est composé : (voir les **figures II.2** et **II.3**)

- D'une digue principale en remblais ou barrage proprement dit ;
- D'une digue de col en remblais également ;
- Un évacuateur de crue ;
- Des galeries de dérivations ;
- Des galeries d'injections et de prospection ;
- Un écran d'étanchéité souterrain sous forme d'une paroi moulée ;
- Un écran d'étanchéité souterrain par injection ;
- De forages de drainage ;
- De voies d'accès, logements et bureaux pour les gestionnaires du barrage ;
- Déviations des routes nationales (RN12) et de wilaya (CW 128).

➤ La digue ou barrage principal

Des géo matériaux meubles vont constituer la digue principale avec :

- Noyau central en colluvions argileuses.
- Recharge à l'amont en alluvions graveleuses-sableuses (0/200).
- Recharge à l'aval en blocs de grès (0/200).
- Parement amont constitué d'enrochement en calcaire dont les blocs varient entre 150 et 750 cm.
- La protection aval sera réalisée en terre végétale provenant du décapage des zones d'emprunts.

Elle est caractérisée principalement par :

- Une hauteur de 95m.
- Une cote de la crête : 130.70NGA.
- Une longueur en crête : 156 m.
- Une largeur de la crête : 10 m.

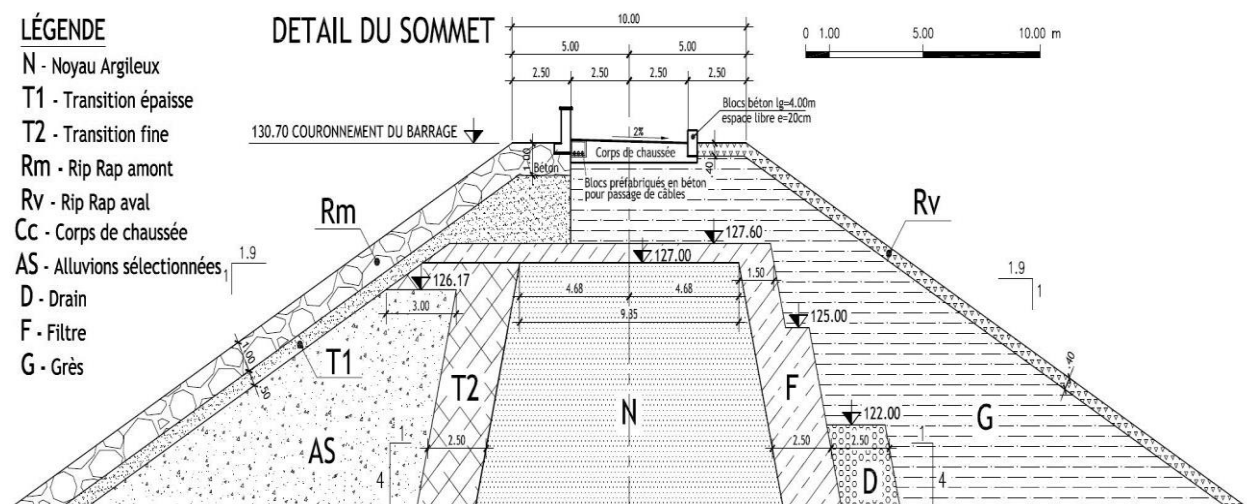


Figure II.2 Digue principale du barrage Souk n'Tleta (ANBT)

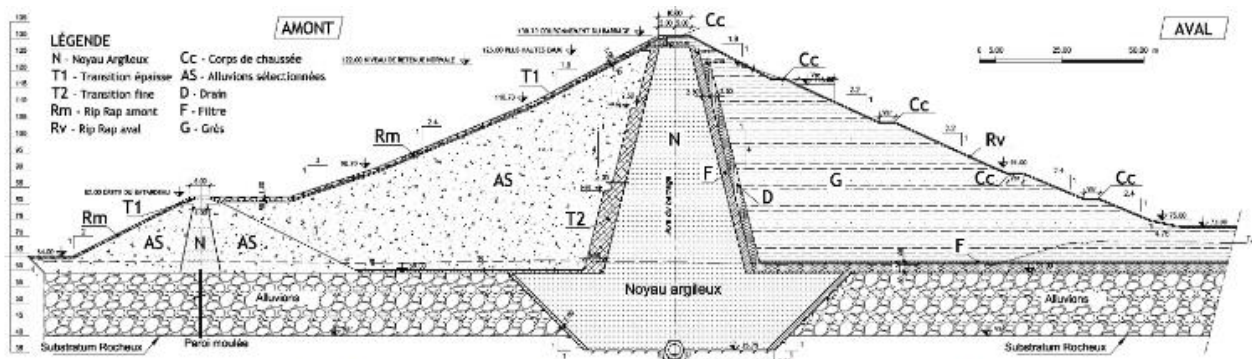


Figure 3: Barrage du Souk N'Tleta avec ses digues et plan d'eau et coupe type montrant la position et la nature des matériaux utilisés

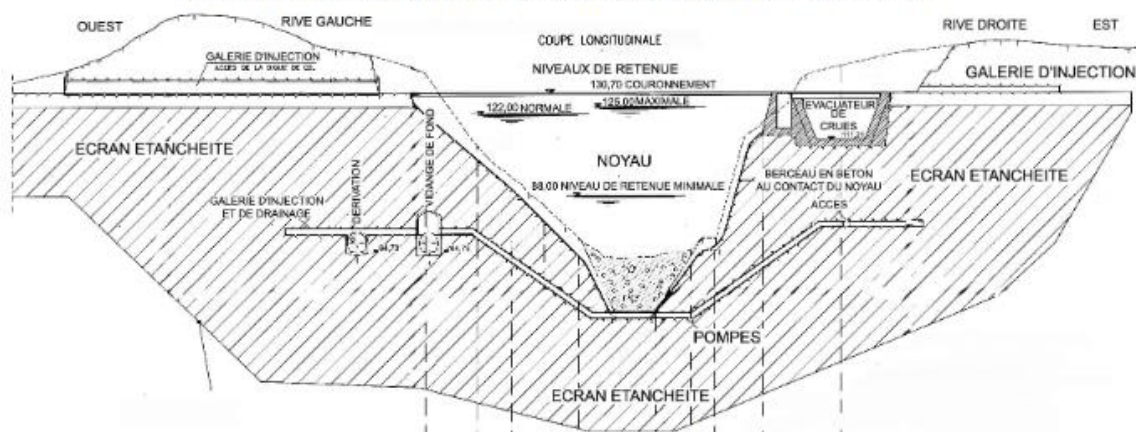


Figure 4 : Coupe Longitudinale Est-Ouest du barrage Souk N'Tleta et ses annexes (APD)

Figure II.3 Structure annexe du barrage Souk n'Tleta (ANBT)

➤ La digue de col

Cette digue repose sur des marnes (grise) compactes du Miocène. Elle est réalisée en remblais zonés comme pour la digue principale, sa hauteur est de 25m permettant de fermer la

retenue dans son extension en rive gauche, là où l'altitude est plus basse que la hauteur de la digue principale.

- Un déversoir latéral de 126m de longueur à la cote 122 m NGA

➤ Evacuateur de crue

Cet ouvrage est dimensionné pour une crue maximale de 1 840m³/s. réalisé en rive droite.

Il comprend :

- Un coursier dont le profil en long de forme parabolique, commence à la cote 111.5 m NGA avec une largeur de 20m et se termine après 258.5m de longueur à la cote 58m NGA avec une largeur de 40m.
 - Un bassin d'amortissement constitué par double bassin à la cote 58 - 60 m NGA pourvu d'une série de redans pour favoriser le ressaut de l'eau et la dissipation d'énergie (Afiri R, 2011-2012).
- Galeries de dérivation

La dérivation des écoulements du cours d'eau pendant la phase des travaux sera assurée par les deux ouvrages de dérivation provisoire (DP1 et DP2) ayant une forme intérieure polycentrique de 8m de diamètre creusées en rive gauche pour évacuer la crue du chantier dont le débit est estimé à 1090 m³/s :

- Dérivation provisoire 1 (DP1) : Cet ouvrage adossé à la rive gauche, en amont du barrage, entre la DP2 et le lit de l'Oued Bougdoura. Elle est constituée d'une galerie souterraine de 338.26m, d'une galerie à l'air libre de 26.26 m de long et d'un canal de 71.45m de long.
- Dérivation provisoire 2 (DP2) : Située du côté du talus de la rive gauche, elle est constituée d'une galerie souterraine de 348.1 m de long, d'une galerie à l'air libre de 26.29 m et un canal de 10.31 m de long.

A la fin des travaux, ces deux dérivation seront transformées en galerie de vidange de fond (DP1) et galeries de restitution (DP2).

➤ Galeries d'injections et de prospection

Un système de galeries d'injection et de drainage, pour l'écran d'étanchéité du barrage, de 1.75m de rayon, sera implanté sous le berceau (centre de la digue). Il traverse la digue et les deux galeries de dérivation en rive gauche et sous le déversoir en rive droite.

Deux autres galeries d'injection sont implantées, à la hauteur du niveau maximum d'eau, en rive droite et en rive gauche. Cette dernière servira d'accès à la digue de col.

➤ Ecrans d'étanchéité, forages et galeries de drainage (**Figure II.3**)

1. Ecran d'étanchéité par injection

Il est conçu dans le but de prolonger latéralement et en profondeur la retenue constituée par le noyau du barrage afin de limiter les infiltrations vers l'aval. L'écran d'étanchéité est réalisé par injections de coulis de béton à partir du berceau à la base du noyau du barrage et des galeries d'injection.

2. Ecran d'étanchéité sous forme de paroi moulée

La paroi moulée est située sous le batardeau amont, elle sert à étanchéifier la base du lit de l'oued, qui est constitué d'alluvions, pour limiter les venues d'eau lors des excavations pour l'implantation du noyau argileux constituant le cœur de la digue principale qui sera ancré dans les schistes imperméables.

3. Forages et galeries de drainage

Les galeries d'injections serviront pour le drainage des eaux de la digue avec les forages qui permettront de faire un suivi de la piézométrie (Afiri R, 2011-2012).

II.3 Etude géologique du site

Le site de souk n'Tlata se trouve sur le bord méridional du bassin sédimentaire du miocène inférieur terminal de Tizi Ouzou (voir **figure II.4**). Ce bassin est formé d'une série épaisse de dépôts gréseux, et marneux, il appartient à l'ancien golf miocène de la basse Kabylie, qui est la terminaison orientale du grand bassin sédimentaire de la Mitidja (Guenoun O, Kelali N, 2002-2003).

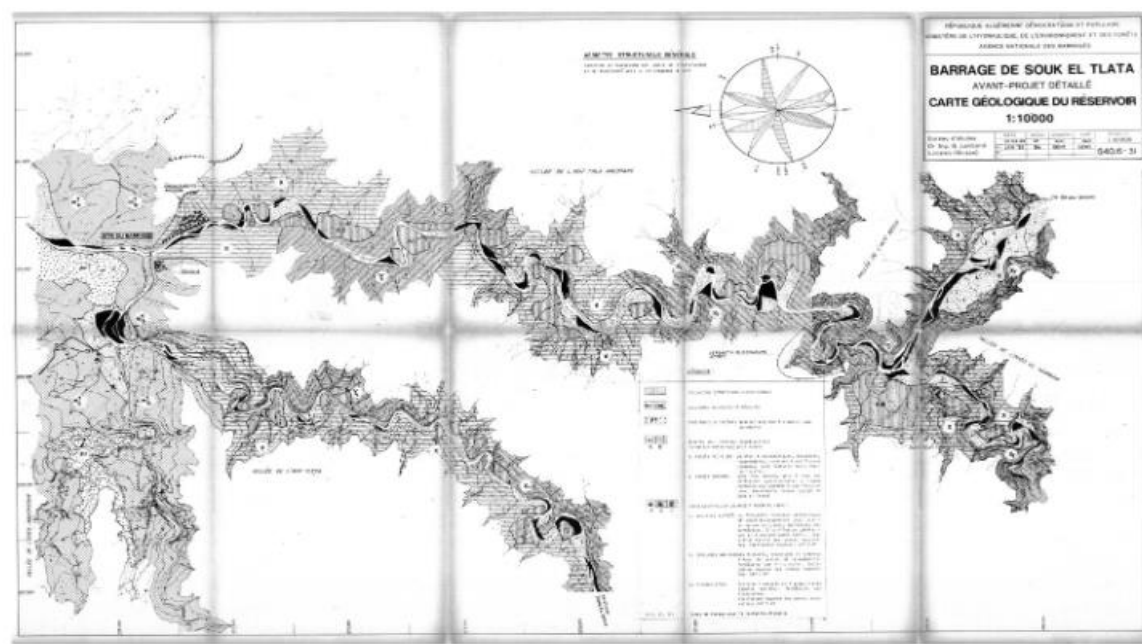


Figure II.4 Carte géologique et structurale du site du barrage principal (ANBT)

II.3.1 Positions et données géologiques

Dans la zone du barrage, les sédiments burdigaliens recouvrent la plus grande partie du terrain anté-miocènes du socle cristallin métamorphique primaire.

Le burdigalien présente deux faciès qui passent latéralement de l'un à l'autre.

-Grès plus au moins fins, tendre, à ciment carbonatique.

-Pélites plus au moins carbonatique.

En dessous on rencontre les terrains qui appartiennent à la série cristallophyllienne terminale du socle gressique et magmatique de la grande Kabylie. Ces terrains sont représentés immédiatement sous le burdigalien par des phyllades et ceci dans la zone du barrage. La plus grande partie des versants est couverte de sol alluvionnaire et colluvionnaire.

Cependant, six zones repérées sont citées ci-dessous ;

➤ Alluvion graveleuse

Il s'agit de matériaux détritiques provenant des massifs montagneux d'aspect frais, à teinte grisâtre. C'est un mélange très grossier et hétérogène, de sables, graviers, galets et blocs.



Figure II.5 Alluvion graveleuse (researchgate)

Un possible dépôts est situé en aval du site du barrage, à 0.5 km environ de distance et intéresse les alluvions du lit mineur et majeur de l'Oued Bougdoura.

Du point de vue pétrographique, les éléments, généralement arrondis ; sont constitués par :

- Gneiss et Q-pegmatiques 43% ;
- Calcaire 26% ;
- Micaschistes 22% ;
- Grés 6%.

Ces matériaux peuvent être utilisés pour les recharges du barrage mais devront être exploités par dragline en dessous de la nappe phréatique ; ils ne sont pas recommandables comme agrégats à béton en raison de la présence de micaschiste et de phyllade ainsi que de quartz microfissure (pegmatites) ; par contre, ils sont utilisables pour les transitions et pour les filtres s'ils sont sélectionnés et encore mieux s'ils sont corrigés par l'adjonction d'éléments de quartz de carrière.

➤ Colluvion argileuse

Dépôt de bas du versant d'une colline ou d'une montagne, relativement fin et plutôt angulaire dont les éléments désagrégés, à la différence des alluvions, ont subi un faible transport.



Figure II.6 Colluvion argileuse (Jean-Michel, 2010)

Cinq zones possibles pour les carrières existent, à l'amont du site du barrage, à une distance de 3 à 9 km, sur les rives de l'Acif Tlata Imdrane, de l'Acif Tlata et de l'Oued Tlata.

Ces colluvions s'étendent sans discontinuité sur une surface d'une dizaine d'hectares près du village de Kantidja où des sols organiques ont été relevés à partir de 4 à 5 m de profondeur. De couleur beige à roux, ces colluvions passent localement de limon plus ou moins détritique à de l'argile plastique ; il s'agit donc d'un matériau hétérogène.

Ces colluvions peuvent être utilisées comme matériaux pour le noyau.

➤ Grés burdigaliens

Ce sont des roches sédimentaires détritiques, issues de l'agrégation de grains de taille majoritairement sableuse (0,063 mm à 2 mm) et consolidé lors de la diagenèse. C'est un matériau céramique caractérisé par une très grande dureté et une excellente résistance aux agressions chimiques.

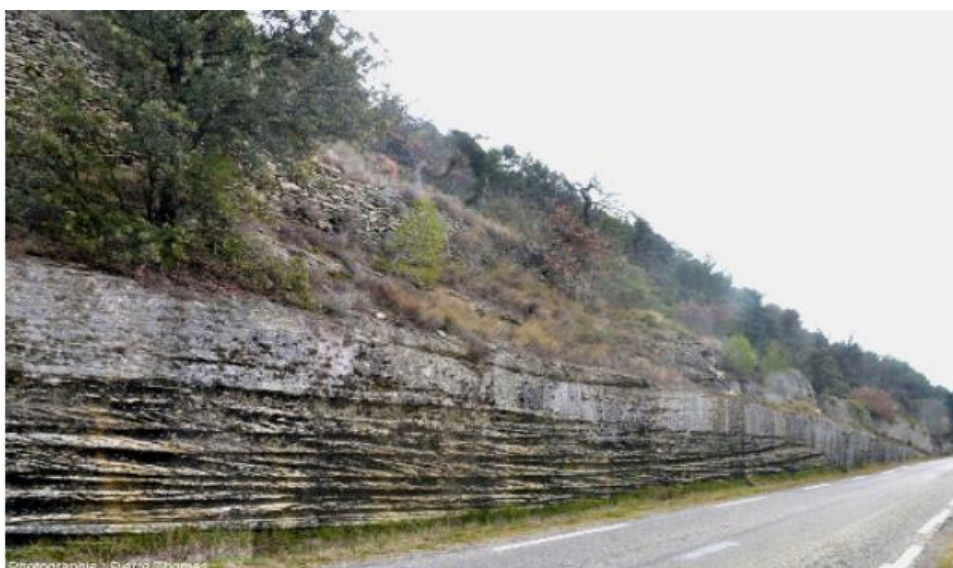


Figure II.7 Grès burdigaliens (Pierre Thomas 2019)

La zone à utiliser est située dans le versant de la rive droite de l'Oued Bougdoura, ces sédiments sont largement présentés dans la zone du barrage et constituent en fait la roche de fondation des appuis de l'ouvrage.

Les grès miocènes peuvent être exploités comme pierres de maçonnerie ; à cause de leurs faible densité et résistance à la compression ; ils pourraient aussi être employés sous forme de grés désagrégé comme recharge d'un barrage.

➤ Pélites altérés

Ce sont des roches finement détritiques, argileuses dont les éléments ont un diamètre inférieur à 1/16 mm (moins de 63 μ m).



Figure II.8 Image montrant des pélite (alamyimages)

Les minéraux argileux sont le produit de l'altération de roches sédimentaires, métamorphiques et ignées. Ces dernières ne contiennent pas de minéraux argileux préexistants, mais un de leurs constituants.

La zone de ces matériaux occupe une surface très étendue, entre les vallées de l'Oued Agergoun et de l'Oued- Bougdoura ; les matériaux y présentent des caractéristiques assez homogènes.

➤ Les Poudingues pliocènes

Un poudingue est une roche sédimentaire détritique consolidée, constituée de débris arrondis, qui sont d'anciens galets ayant subi un transport sur une certaine distance dans des rivières ou sur un littoral. C'est une roche qui fait partie des conglomérats.



Figure II.9 Image montrant des poudingues pliocènes (wikipedia.org)

La zone du site du barrage offre des gisements importants de poudingues. Sa présence occupe une surface d'une vingtaine d'hectares sur la colline du versant de rive gauche de L'Oued Bougdoura, et remplit une large vallée épigénétique, d'une centaine de mètre de profondeur.

Ces derniers pourraient être employés pour les recharges.

➤ Calcaire d'Assi Youcef

Ce sont des roches sédimentaires, tout comme les grès ou les gypses, composées majoritairement de carbonate de calcium CaCO_3 , mais aussi de carbonate de magnésium MgCO_3 . Ces roches carbonatées ont une grande importance du point de vue géologique et économique.



Figure II.10 Roche calcaire (benoit-gauthier)

Une grande carrière de calcaire se trouve cependant au sud de Boughni, à une distance de 35 km environ du chantier, elle est équipée d'une station de concassage en service.

Le gisement se trouve au pied septentrional de la chaîne de calcaire du Djurdjura. Ces matériaux, blocs sélectionnés, peuvent être exploités pour le perré de protection de la recharge amont du barrage.

II.3.2 Paramètres géotechniques des matériaux utilisés pour la construction du barrage Souk n'Tleta

➤ Pour le noyau

On peut utiliser des colluvions argileuses, cependant l'exploitation des zones d'emprunt devra faire preuve d'une vigilance particulière ; plus particulièrement, les couches détritiques ou organiques qui devront être éliminées et mises en dépôt.

➤ Pour la recharge amont

Les matériaux graveleux du site du barrage seront utilisés tel que les alluvions sélectionnées et les tous venant ; la différence entre les deux est la suivante ;

Les alluvions sélectionnées de la couche amont ne devront pas avoir un pourcentage passant au tamis 0.074 supérieur à 5% dans le but d'obtenir une zone drainante indispensable à la stabilité du barrage.

Cela est valable aussi pour les recharges graveleuses du batardeau.

Les alluvions tout-venant devront avoir un diamètre maximum de 30 mm, une fraction à 60 mm comprise entre 40 et 100%, les éléments inférieurs à 2 mm compris entre 10 et 50% tandis que la fraction inférieure à 0.075 mm ne devra pas dépasser 20%.

➤ Pour le batardeau

Les caractéristiques des matériaux du batardeau sont les mêmes avec les recharges amont du barrage se sont les alluvions sélectionnées.

➤ Pour les recharges aval du barrage

Pour le parement aval du barrage, deux types de grès qui sont extraits des fouilles de l'évacuateur de crue seront utilisés ; un type de grès sera placé à l'intérieur du côté aval et l'autre type sera placé à l'extérieur.

➤ Pour les drains et les filtres

Les alluvions de l'Oued Bougdoura peuvent être utilisées. Quel que soit le système de construction la densité relative après compactage ne devra en aucun cas être inférieure à 75%. Les filtres auront une granulométrie comprise entre 0.1 et 2 mm et le drainage entre 2 et 15 mm.

➤ Pour l'encrochement amont

Il s'agit d'une couche de blocs calcaires de la carrière d'Assi Youcef reposante sur un lit de tout-venant de la même carrière. Dans le but de bien serrer l'encrochement, les blocs les plus petits seront mis en place entre les plus gros.

II.4 Conclusion

Dans cette seconde partie du travail nous avons effectué une description générale du barrage de Souk n'Tleta, ses différentes caractéristiques y compris les matériaux utilisés dans sa construction.

Toutefois, l'étude géologique du site sur lequel repose le barrage a été d'une importance capitale. Elle a en effet permis de définir au mieux le type de matériaux se trouvant à proximité de l'ouvrage, leurs positions tel que leurs propriétés mécaniques ; en l'occurrence de les classés correctement dans les fractions qui forment les digues et les annexes structures du barrage.

La connaissance de toutes ces caractéristiques va contribuer favorablement à la réalisation des chapitres suivants.

Chapitre III

Comportement au fluage des sols argileux

III.1 Introduction

L'existence d'un fluage dans les sols argileux est connue depuis des temps immémoriaux. Néanmoins, la véritable enquête sur ce phénomène a commencé au milieu du siècle (Terzaghi 1931) en raison des activités de construction intensives. Avant de bâtir, l'homme s'est toujours préoccupé et interrogé sur les problèmes que le sol peut rencontrer.

Aujourd'hui, les mêmes préoccupations et les mêmes problèmes sont toujours d'actualité mais les méthodes et les moyens de travail ont évolué. Une base théorique pour comprendre et interpréter les résultats des expérimentations est établie et (vice-versa).

De ce fait le barrage de Souk n'Tleta étant formé d'un noyau argileux qui pourrait devenir précaire aux différentes contraintes rencontrées au cours du temps à motiver notre recherche pour mieux comprendre et interpréter le phénomène de fluage dans les sols argileux.

Ce chapitre sera donc consacré à l'exposé des principales recherches menées sur l'interprétation du fluage dans les sols fins (argileux), dans l'ultime but de comprendre et d'estimer au mieux les déformations différées que peut rencontrer le barrage de Souk n'Tleta.

III.2 Définition du fluage

Le fluage par définition est le phénomène physique qui provoque la déformation irréversible différée d'un matériau soumis à une contrainte constante et maintenu à une température donnée au cours du temps. Il s'agit d'une déformation lente qui peut conduire à la rupture du matériau. Ce dernier comprend les déformations visqueuses, déformations élastiques et plastiques.

L'étude du fluage consiste donc à établir la fonction : $\varepsilon = f(t)$ qui décrit la courbe expérimentale du fluage et de variation de la vitesse de déformation (voire **figures III.1** et **figure III.2**). Cette courbe illustre trois phases de déformation au fluage, à savoir :

- Fluage primaire, au cours duquel la vitesse de déformation diminue rapidement, ce qui correspond à une augmentation de la résistance du matériau, ou encore à une consolidation ;
- Fluage secondaire, au cours duquel la vitesse de déformation reste sensiblement constante ;
- Fluage tertiaire, dans lequel la vitesse de déformation augmente jusqu'à la rupture.

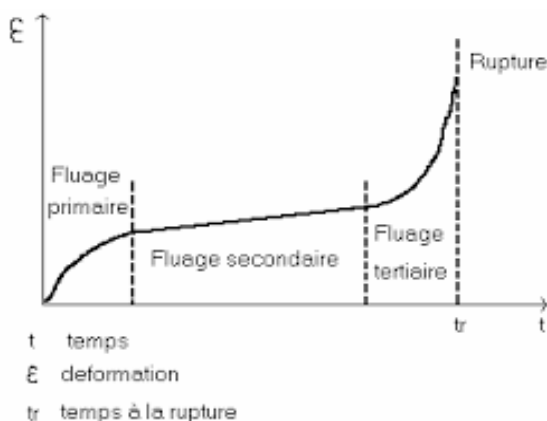


Figure III.1 : Courbe de fluage

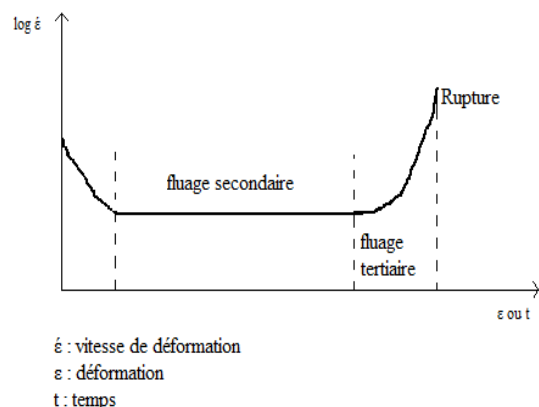


Figure III.2 : Variation de vitesse de déformation

III.3 Mécanismes de fluage. Effet de la température sur la microstructure du matériau

III.3.1 Mécanismes à basses températures

Aux basses températures ($T < 0,4$ à $0,5T_f$), il s'agit d'une déformation plastique, liée à des mécanismes de dislocations. Lors du chargement et du fluage primaire, il y a surtout création et propagation des dislocations. En général, ces dislocations ne forment pas de structures cellulaires particulières, elles sont enchevêtrées. On observe les structures formées par glissement des dislocations : bandes de déformation et lignes de glissement plus ou moins espacées suivant la contrainte appliquée et le temps de fluage. Lors du fluage secondaire, les dislocations s'assemblent pour former une structure cellulaire plus ou moins nette : cela correspond à une polygonisation du glissement. Les murs des cellules sont constitués de dislocations enchevêtrées (**figure III.3**).

Ces cellules sont d'autant moins formées que la température est basse. Elles présentent bien souvent un allongement suivant le type de glissement activé. La densité de dislocations reste stable au cours de ce stade. La sous-structure se forme et se détruit constamment : il y a équilibre entre les processus de formation et d'annihilation des dislocations. En revanche, la désorientation entre les sous-grains augmente avec le temps. Tout se passe comme si le processus de formation et d'annihilation des dislocations concourait uniquement à l'accroissement de la désorientation des sous-grains entre eux.

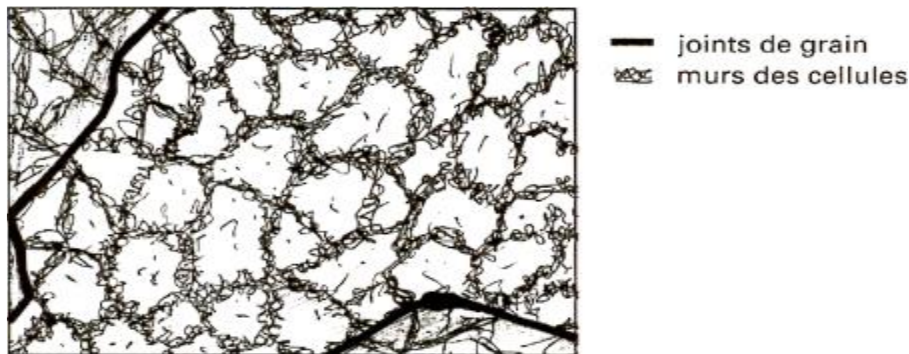


Figure III.3 : Schéma d'une structure cellulaire

III.3.2 Mécanismes à hautes températures

La différence entre le fluage à basses et à hautes températures ($T > 0,4$ à $0,5T_f$) est liée à la présence de mécanismes de montée des dislocations, phénomène qui est thermiquement activé. Comme précédemment, le chargement et le fluage primaire correspondent à la création et à la propagation des dislocations. Il y a néanmoins une nette tendance à la formation de cellules de dislocations lors du fluage primaire. La disparition de la structure de plastification en fin de chargement est réalisée par restauration (mise en jeu des mécanismes de montée et de glissement dévié des dislocations). Les lignes de glissement sont réparties de manière régulière. Les cellules de dislocations sont nettement équiaxes et divisent chaque grain en sous-grains désorientés les uns par rapport aux autres. La densité de dislocations mobiles décroît au cours de ce stade. L'établissement du fluage secondaire, ou stationnaire, correspond toujours à la présence d'une sous-structure de dislocation parfaitement formée (**figure III.3**). La taille des sous-grains n'est une fonction ni du temps, ni de la déformation. Elle dépend uniquement de la contrainte appliquée : la taille des sous-grains est inversement proportionnelle à la contrainte σ et n'évolue pas pendant le fluage secondaire

La densité de dislocation est stable. Il y a équilibre entre les processus de formation et d'annihilation des dislocations. Pour les très fortes contraintes, un phénomène de recristallisation, avec accélération de la vitesse de déformation, peut se produire en cours de fluage. Pour les très hautes températures ($T > 0,8T_f$), le transport de matière par autodiffusion est prépondérant. La déformation est alors de nature visqueuse. Le transport d'atomes par diffusion s'effectue avec un contre-courant de lacunes qui s'éliminent au niveau des surfaces libres : c'est le fluage Nabarro. Ce fluage est d'autant plus important que la taille de grain est petite. En effet, les joints de grain sont des chemins privilégiés pour la diffusion : entre deux

grains d'orientation différente, il existe de nombreux atomes interstitiels et des lacunes. D'une manière générale, la vitesse de fluage augmente avec la diminution de la taille de grain ou, autrement dit, avec l'augmentation de la longueur des joints de grain, il y a augmentation du glissement aux joints.

III.3.3 Cas particulier du micro fluage

Des alliages tels que les alliages base fer contiennent toujours une certaine quantité d'impuretés qui sont soit en position interstitielle dans le réseau, soit en substitution des atomes de la maille cristalline. Au niveau d'une dislocation, le réseau est déformé localement. Les dislocations, lors de leur propagation, captent les impuretés dans leur voisinage immédiat. Si la déformation a lieu à une certaine température, la diffusion permet à ces impuretés de se déplacer près des dislocations et de former ce qui est appelé un nuage d'impuretés ou une atmosphère d'impuretés qui opposent une certaine résistance à la propagation des dislocations. Si la contrainte de fluage est suffisante, les dislocations peuvent se déplacer indépendamment de ce nuage mais, pour une très faible contrainte (ou micro fluage), les dislocations ne peuvent s'échapper du nuage d'impuretés. La propagation des dislocations est une fonction de la diffusion du nuage accompagnant les dislocations. Il s'agit alors du mécanisme de traînage des impuretés par les dislocations.

III.3.4 Cavitation lors du fluage tertiaire et rupture

Le stade tertiaire correspond à l'apparition de cavités et de fissures dans tout le matériau, surtout au niveau des joints de grain. La cavitation est divisible en trois stades :

➤ L'amorçage

C'est la naissance des cavités bien souvent au niveau des lignes de glissement à l'intersection des joints de grain, des inclusions, des ségrégations, des joints triples ou, encore, à l'interface de deux phases de nature différente ; la naissance des cavités peut avoir lieu avant le stade tertiaire (**figure III.4**) ;

➤ La croissance

Elle est due à la diffusion de lacunes et à la présence d'un champ de contraintes autour des cavités ;

➤ La coalescence

Elle correspond à la fusion entre cavités entraînant la création des fissures, ce stade précédant la propagation de celles-ci (**figure III.5**).

La rupture se produit par augmentation de la contrainte, due à la diminution de section de l'éprouvette résultant de la formation des cavités. La rupture par fluage des alliages métalliques est en général inter granulaire à hautes températures, tandis qu'elle est intra granulaire à basses températures.

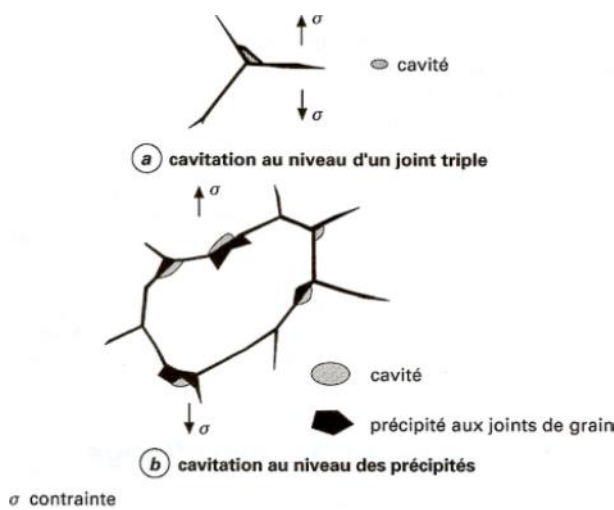


Figure III.4 : Cavitation entre grains

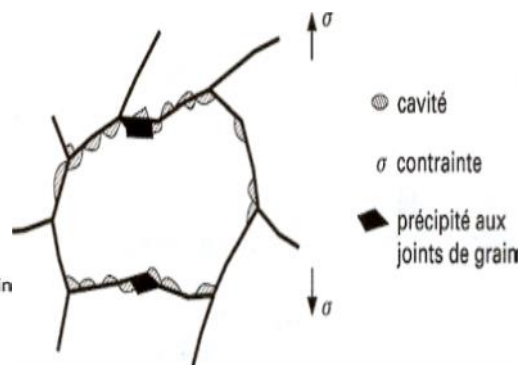


Figure III.5: Coalescence des cavités le long des joints de grain

III.4 Généralité sur le fluage des sols

Il s'agit d'un phénomène de déformation lente sous sollicitation permanente constante, qui affecte en générale certaine pentes naturelles argileuses.

D'après les principes de la mécanique des sols, le sol est considéré comme un corps quasi solide où les contraintes et les déformations sont des fonctions différentiables et continues des coordonnées de l'espace et du temps, ce qui signifie qu'elles obéissent aux conditions de continuité (Goldstein, 1979). Les déformations du sol au cours des variations de l'état de contrainte ou de temps sont des processus déterministes non – linéaires qui s'expriment par des courbes régulières.

Ces hypothèses rendent possible d'appliquer à la mécanique des sols les méthodes utilisées en mécanique des milieux continus : théorie de l'élasticité, de la plasticité, du fluage. Les résultats d'une telle approche sont les solutions déterministes bien connues ou les relations entre les contraintes, les déformations et le temps sont exprimés par des fonctions exponentielles ou puissances.

Une conséquence à cette approche est que les acquisitions dans le domaine de la science des sols qui ont trait à la texture et à la structure, obtenues par les méthodes modernes d'analyse comme la microscopie électronique, l'analyse aux rayons X, l'étude des liaisons magnétiques, l'analyse thermique des minéraux et autre, reste sans relation avec les conceptions considérées en mécanique des sols.

Le résultat de l'interprétation du comportement du sol comme celui d'un corps quasi solide est la présentation traditionnelle bien connue des phénomènes de fluage lorsque les contraintes dépassent le seuil de fluage composés des trois parties que nous avons cités précédemment et qui sont : le fluage primaire (à vitesse de déformation décroissante), le fluage secondaire ou stationnaire (à vitesse constante) et enfin le fluage tertiaire (à vitesse croissante). On suppose que le fluage secondaire peut se transformer en fluage décéléré ou en fluage accéléré. Si le fluage s'accélère cela se terminera tôt ou tard par une rupture. D'après le point de vue traditionnelle « la rupture peut être définie comme le point sur la courbe de fluage à partir duquel la vitesse de déformation commence à croître, c'est-à-dire où l'accélération de la déformation devient positive ($\gamma > 0$) » (Schmid, 1962). Ces points sont marqués par les cercles noirs sur la (figure III.6).

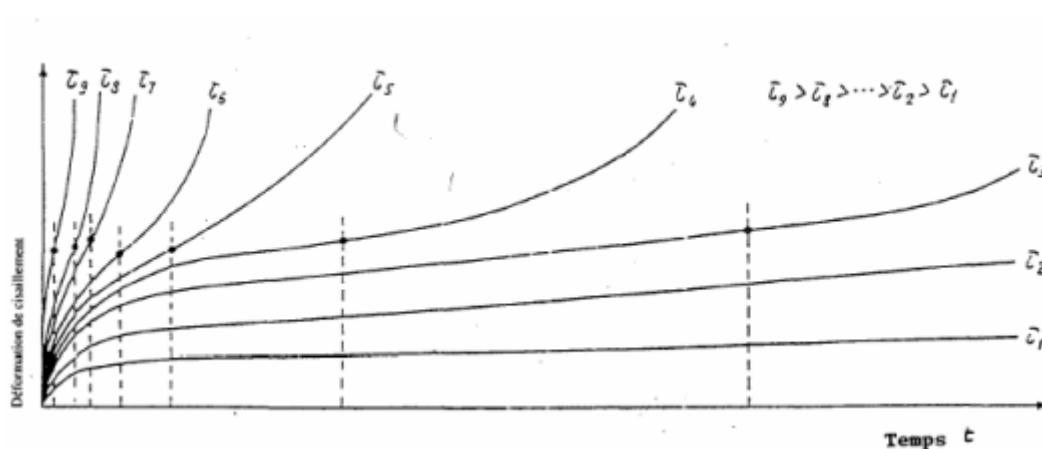


Figure III.6 Interprétation traditionnelle des courbes de fluage des sols (d'après Schmid, 1962)

Une conclusion importante peut être tirée de cette figure, les contraintes de cisaillement appliquées doivent être inférieures au point de transition entre fluage secondaire et tertiaire.

Si elles sont supérieures, il existe un risque que la vitesse de fluage se mette à croître et conduise le sol à la rupture.

Deux hypothèses sont faites dans une telle conclusion (Ter-Stepanian, 1996) :

- La durée des essais de fluage est suffisante pour être certain que le fluage secondaire se transforme en un fluage accéléré conduisant à la rupture ou au contraire en un fluage avec stabilisation. Ainsi, les résultats des essais à court terme sont surestimés puisque la transition de l'accélération ne peut pas être obtenue par des essais de courte durée.
- La transition vers l'accélération signifie que le processus de fluage va se terminer par une rupture ; ceci est faux car pour des contraintes de cisaillement moyennes, la phase d'accélération peut être suivie par une phase de stabilisation qui survient plusieurs centaines de jours après l'application des contraintes de cisaillement et ainsi l'utilisation du critère d'accélération conduit à sous-estimer les résultats des essais de fluage.

Ces deux hypothèses agissent en sens contraire et peuvent se compenser partiellement l'une et l'autre : la réponse globale peut alors être acceptable. Pour des combinaisons défavorables, les résultats peuvent s'écarter considérablement de la réalité et la force portante du sol peut aussi bien être sous-estimée : ceci conduit à des décisions peu économiques ou surestimer, ce qui va alors conduire à des projets qui ne sont pas en sécurité ou même à haut risque.

Tableau III.1 : Généralités sur le comportement au fluage des sols (Mitchell et Soga 2005 cité par Dahhaoui 2018)

Paramètres	Influence sur le fluage
Teneur en eau	Le taux de fluage augmente avec l'augmentation de la teneur en eau
Type d'argile	Les argiles les plus actives présentent généralement les plus grandes déformations de fluage (smectite, illite, kaolinite). En effet, plus la taille des particules est petite, plus la surface spécifique est grande et plus l'adsorption d'eau est importante.
Rapport de consolidation	Les sols normalement consolidés présentent une très grande amplitude de fluage que les sols sur-consolidés.
Niveau de contrainte	Une augmentation du niveau de contrainte déviatorique entraîne une augmentation du taux de fluage jusqu'à la rupture du sol.
La pression interstitielle	Les argiles molles saturées dans les conditions non drainées sont les plus sensibles à la perte de résistance pendant le fluage en raison de la réduction de la contrainte effective causé par l'augmentation de la pression de l'eau interstitielle avec le temps. Les argiles sur-consolidés dans des conditions drainées sont également sensibles à la rupture par fluage due au ramollissement associé à l'augmentation de la teneur en eau par dilatation et gonflement.
Type de test	Le fluage axial est à peu près le même pour les sols consolidés de manière isotrope et testé en compression secondaire dans des essais de type K_0 (à déformation latérale nulle).

III.5 Equations et processus du fluage dans les sols fins

La déformation du sol implique un réarrangement structurel dépendant du temps du matériau en raison de sa nature particulière. Les lois fondamentales décrivant le comportement idéal à long terme ne tiennent pas compte du réarrangement structurel du matériau et présente donc des difficultés lors de son application sur les sols. Des théories du processus de déformation reliant les caractéristiques du matériau et sa structure mécanique applicable au fluage des sols ont été citées par (Abdel-Hady et M. Herrin 1966), (Andersland et Douglas 1970), (Bazant et Ozaydin et Krizek 1975), (Mitchell 1964).

(Dorn, 1957) a développé une théorie de fluage des métaux (Equation III.1), que (Noble et Demirel, 1969) ont pu l'adopter à l'étude du comportement au fluage de l'argile

$$\dot{\gamma} = A e^{-\frac{\Delta H^*}{KT}} e^{\beta\tau} \quad (\text{III.1})$$

Avec :

- $\dot{\gamma}$: Taux de déformation au cisaillement.
- A : Constante de fluage du matériau indiquant le facteur de proportionnalité.
- ΔH^* : Energie d'activation enthalpie.
- $\beta = \frac{\beta'}{KT}$: Facteur de contrainte.
- τ : Contrainte de cisaillement.
- K : Constante de Boltzman.
- T : Température absolue.

Le terme pré exponentiel A , de l'équation III.1 indique le facteur de proportionnalité (facteur de fréquence) reliant le nombre de liaisons actives au taux de déformation ainsi que l'entropie d'activation inter particulaire lors de l'écoulement.

Le facteur de contrainte « β » est pris égal à $(\frac{\beta'}{KT})$ avec β' comme volume d'écoulement. Le produit « $\beta'\tau$ » correspond à l'énergie mécanique acquise par chaque unité de liaison lorsque la rupture d'une liaison est suivie d'un déplacement.

Le terme AH^* est lié aux énergies de liaison impliquées dans le processus de déformation et reflète la force de la nature de la liaison dans les sols argileux.

Plusieurs hypothèses ont été proposées par (Noble, 1968) émanant de La dérivation de l'équation III.1, on peut citer :

- Les particules d'argile sont liées entre elles par liaisons chimiques
- La résistance au cisaillement des sols argileux est due à l'existence d'une barrière énergétique (énergie d'activation) entre les grains fins.
- La valeur de l'énergie d'activation est égale à l'énergie de la liaison chimique moins l'énergie mécanique absorbée par l'unité de liaison inter particulaire lors de la déformation.
- L'énergie nécessaire pour surmonter la barrière est alimentée par le mouvement thermique de liaison inter particulaire.
- Le taux de déformation au cisaillement résultant « $\dot{\gamma}$ », est proportionnel au nombre d'unités de liaison qui ont l'énergie thermique égale ou supérieure à l'énergie d'activation.

Les courbes de fluage expérimentales à faible contraintes de cisaillement ne montrent qu'une région de fluage primaire qui suit une déformation initiale ; puis les déformations se terminent avec le temps.

Pour des contraintes élevées (dépassant une certaine valeur limite), la courbe de fluage est divisée en trois phases : phase primaire, secondaire et tertiaire où le taux de cisaillement diminue, reste constant et augmente avec le temps, respectivement comme indiqué dans la **figure III.7**.

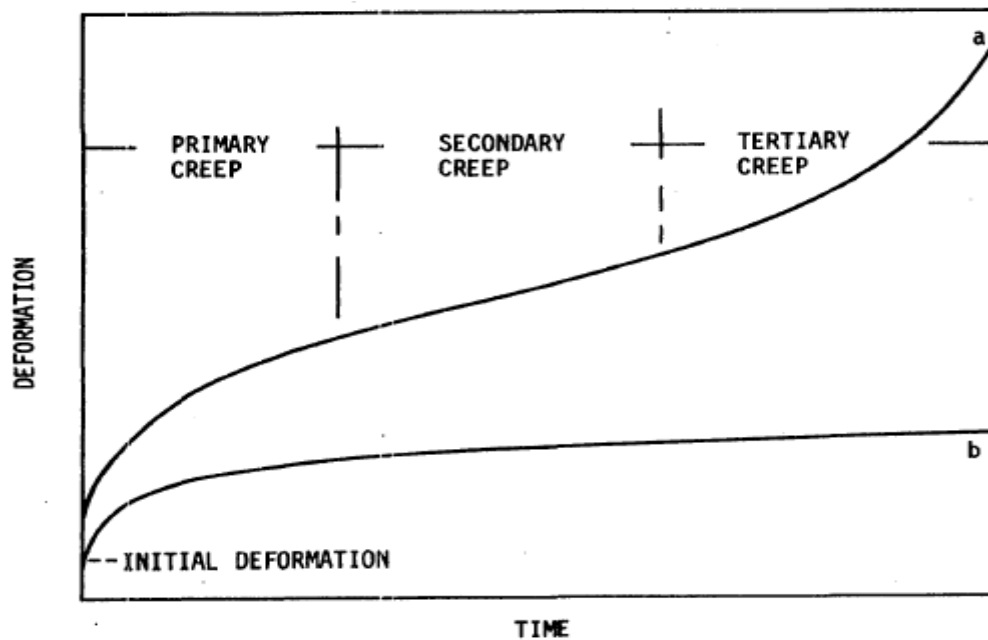


Figure III.7 Courbe de fluage. a) courbe à forte contrainte, b) courbe à faible contrainte

Au cours du fluage primaire, les défauts structurels sont réduits provoquant plus d'ordre dans l'orientation inter granulaire, ce qui réduit le facteur A et provoquerait l'augmentation AH^* et β' par la formation de liaisons plus fortes et unités structurelles plus grandes, respectivement.

Pendant le fluage secondaire, l'ordre d'orientation des particules inter granulaire est plus élevé, le facteur A atteint sa valeur minimale et AH^* et β' sont à leur valeur maximales.

Lors du fluage tertiaire des microfissures apparaissent et le processus de déformation augmente provoquant l'augmentation de la valeur du facteur A. La croissance de fissures et la déformation de nouvelles fissures détruisent l'ordre de l'orientation provoquant une diminution de AH^* et β' .

Pour tenir compte du taux de cisaillement en fonction du temps, (Dorn, 1957, Marley, 1969) propose une fonction de structure inclus dans l'équation III.1 de sorte que :

$$\dot{\gamma} = A e^{\frac{\Delta H^*}{KT}} e^{\beta\tau} s(\gamma, t) \quad (\text{III.2})$$

Avec :

γ et t sont respectivement la déformation et le temps et $s(\gamma, t)$ est une fonction représentant les changements dépendant du temps ou de la contrainte dans la structure.

III.5.1 Interaction et liaisons de particules dans les sols argileux

Il existe différentes énergies d'interaction contribuant aux forces de liaison parmi les particules d'argiles. Dans les argiles saturées, l'interaction entre les surfaces d'argile et les molécules d'eau à proximité des surfaces des particules (Low et J. L. White, 1970, Demirel, 1962, Low, 1961). Ces particules d'eau appelées (eau adsorbée) sont fortement retenues sur les particules d'argile. Lorsque deux faces de particules sont rapprochées, des forces électriques se développent appelées (forces de Van der Waal). En plus, des forces d'attraction de Coulomb se développent entre les bords chargés positivement et les surfaces chargées négativement de l'argile. Ces forces peuvent donner lieu à des forces de liaison entre les particules d'argile (Lambe, 1960 et Tan, 1958). Ainsi les énergies dans les sols argileux reflètent l'effet combiné de diverses interactions.

III.5.2 Modèle constitutif de fluage des sols argileux

Un modèle primitif sera décrit ici pour définir un état de référence pour le comportement contrainte-déformation-temps d'un véritable système d'argile. La **figure III.8**, illustre une courbe de fluage expérimentale. Le taux de cisaillement diminue au cours de la phase primaire du fluage expérimentale. Le taux de cisaillement diminue au cours de la phase primaire du fluage jusqu'au point d'inflexion I (Orhan Ero). Le modèle primitif à la figure 2 est caractérisé par trois états de référence à savoir : l'état initiale s_i , l'état d'écoulement structural S_f et la phase de rupture S_r .

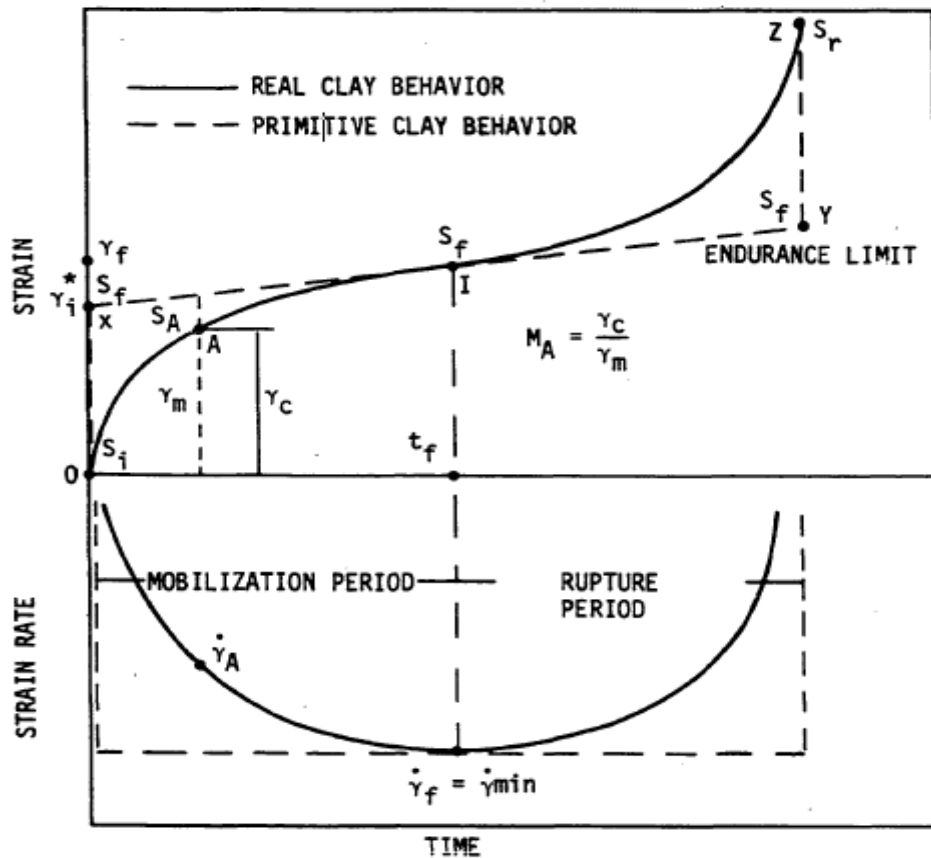


Figure III.8 Courbe de fluage (réelle et primitive) et de variation de vitesse de déformation des sols argileux (Orhan Erol)

Avec :

- γ_c : Déformation au fluage
- γ_m : Modèle de déformation primitive
- $\dot{\gamma}_f$: vitesse de déformation au point d'inflexion
- γ^*_i : Ajustement de la déformation initiale
- S_i : Structure initiale du sol
- S_f : Structure du sol à l'écoulement
- S_A : Structure du sol au point A
- S_r : Structure du sol à la rupture
- γ_f, t_f : Temps et déformation au point I

Deux paramètres de déformation sont définis pour quantifier le comportement réel du sol argileux à la rupture à savoir :

$$M = \frac{\gamma_c}{\gamma_m} \quad (\text{III.3})$$

$$R = \frac{\gamma_c}{\gamma_m} - 1,0 \quad (\text{III.4})$$

Avec :

- M et R : coefficient de mobilisation et de rupture.
- γ_c et γ_m sont respectivement : déformation au fluage et modèle de déformation primitive obtenus pour un temps t.

De la figure III.6, on constate deux intervalles de temps (période de mobilisation de $0 < t < I$) et phase de rupture ($I < t < Y$).

III.6 Réseau « des lignes de temps » de Bjerrum

C'est en raison de leur caractères visqueux que les sols argileux, notamment les argiles molles manifestent des comportements qui dépendent non seulement du type de sollicitations auxquelles ils sont soumis ou de leur intensité, mais aussi des vitesses de variation de ces sollicitations au cours du temps.

L'influence du temps sur le comportement des sols argileux s'exerce de manière plus ou moins importante selon la structure, la consistance et la compacité du sol considéré. Sur le plan pratique les effets du temps ont été analysés suivant deux aspects différents :

Les effets de l'âge ou du vieillissement (Taylor, 1942 puis Bjerrum, 1967 cité par Alhusein, 2001) ont montré que le vieillissement des argiles sous contraintes effectives constantes ou peu variables, se traduisant par l'apparition de nouvelles liaisons inter granulaires rigides qui renforce la structure du squelette solide, conduit à une réduction de leur indice des vides par suite des déformations de fluage qu'elles subissent. La réduction de l'indice des vides d'une argile donnée s'accompagne d'un accroissement de sa pression de pré-consolidation et donc de sa résistance structurale. Cet effet semble être très prononcé dans le cas des argiles plastiques, pour lesquelles l'accroissement de résistance dû au vieillissement est proportionnel à celui de leur pression de pré-consolidation. La (**figure III.9**) illustre schématiquement l'effet du temps sur les caractéristiques de compressibilité et de consolidation d'une argile naturelle à deux âges différents. On observe sur cette figure, que lorsque l'argile est jeune, c'est-à-dire au début de

sa formation, elle se trouve dans état normalement consolidé caractérisé, en chaque point du massif de sol, par une pression de pré-consolidation σ_p' égale à la pression effective σ_v' exercée par les terres sus-jacente. Par contre lorsqu'elle est âgée, c'est-à-dire quelques milliers d'années après sa formation, cette argile se trouve dans un état sur-consolidé caractérisé par une pression de pré-consolidation supérieure à la pression effective des terres sus-jacentes. Ainsi, plus l'argile est âgée, plus elle est résistante et plus sont rapport de sur-consolidation $R_{oc} = \sigma_p'/\sigma_v'$ est élevé, ce qui se traduit par un accroissement de sa surface d'état limite. Plus cette surface est grande, plus l'argile est capable de subir des déformations réversibles importantes sans que son état limite soit atteint.

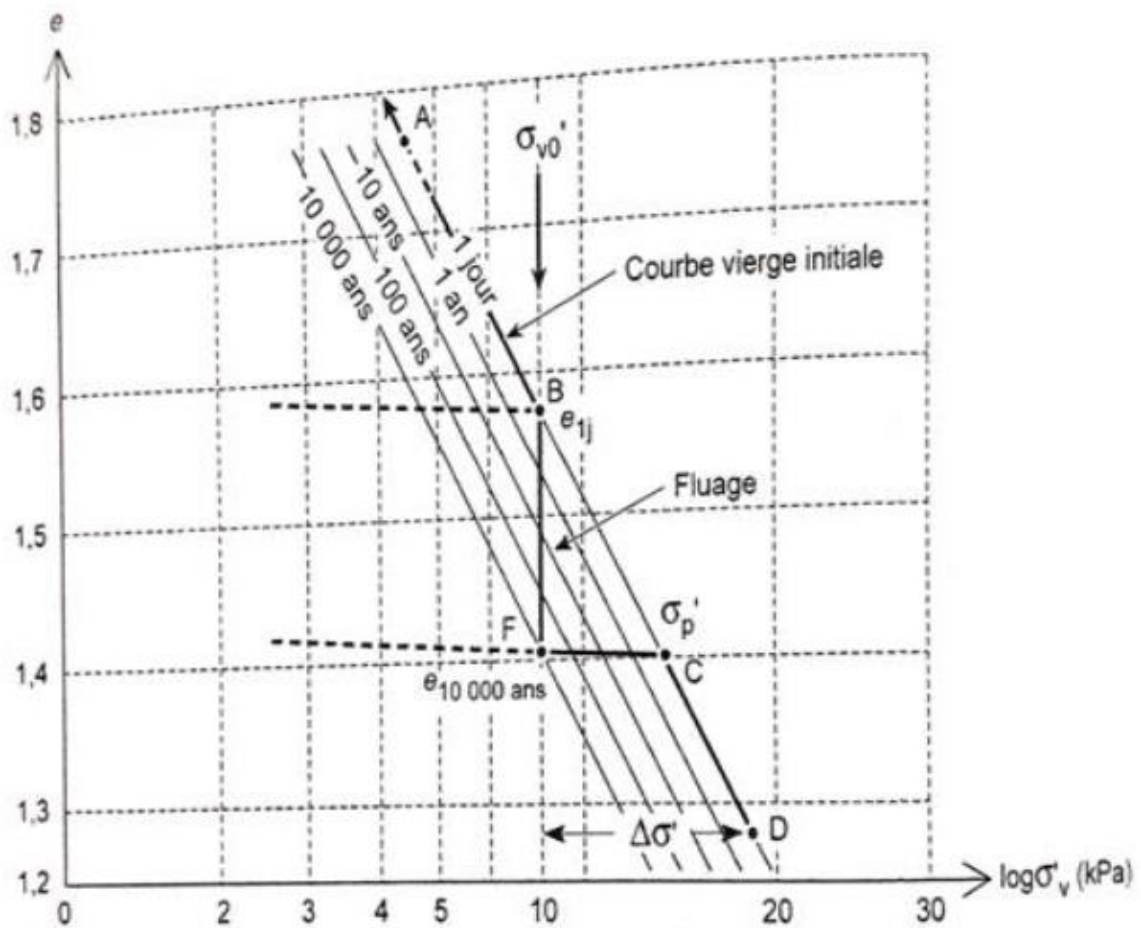


Figure III.9 Réseau des « lignes de temps » pour différentes durées de changement (Bjerrum, 1967 cité par Plumelle et al, 2017)

- Les effets de la vitesse ou de la durée de chargement Crawford (1965) et Bjerrum (1967) ont montré que la pression de pré-consolidation apparente (définie par la limite des petites déformations) d'une argile naturelle est réduite lorsque la durée d'application des charges est augmentée et inversement. Ceci est, semble-t-il, attribué à une autre matérialisation du phénomène de la consolidation secondaire qui est liée au vieillissement de l'argile. A l'inverse, une diminution de la vitesse de chargement, c'est-à-dire de la vitesse de déformation de l'argile, correspond à un accroissement de la durée d'application des charges qui aurait pour conséquence la diminution non seulement de la pression de pré-consolidation de l'argile, mais également de tous les seuils qui définissent sa courbe d'état limite.

III.7 Conclusion

Le fluage des sols fins est dû aux propriétés visqueuses de l'assemblage des particules minérales entourées d'eau adsorbée qui forme le squelette inter granulaire. Il apparaît avec évidence au cours de la consolidation secondaire : les contraintes effectives étant constantes, la déformation augmente au cours du temps. La première fonction d'un modèle mathématique du fluage est d'établir une relation entre cette déformation, la contrainte constante et le temps. Mais la viscosité du squelette intervient quel que soit le régime de chargement.

La transition vers l'accélération ne veut pas forcément dire que le processus de fluage va se terminer par une rupture.

Plus l'argile est âgée, plus sa résistance augmente et plus son rapport de sur-consolidation R_{oc} est élevé.

Ce chapitre donne donc une idée sur le comportement des sols argileux au fluage et les éléments de base pour une meilleure modélisation dans le prochain chapitre de cette contribution de ce projet de fin d'étude.

Chapitre IV

*Modélisation du comportement au fluage du noyau argileux du barrage
de Souk n'Tleta*

IV.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'essayer de donner les procédures de modélisation du fluage dans l'analyse structural. Pour ce faire, on discute sur les étapes de base de la modélisation, ensuite on formule les valeurs initiales des conditions aux limites décrivant le comportement au fluage d'une structure ou d'un solide dans les trois dimensions et donner ensuite le procédé de la solution numérique. Pour différents problèmes, nous développons des solutions numériques basées sur la méthode de Ritz.

IV.2 But de cette modélisation

Le but de la modélisation est de refléter les dispositifs de base du fluage dans une structure en incluant le développement des déformations inélastique, relaxation et la redistribution des contraintes. L'analyse d'une structure au fluage nécessite les étapes suivantes :

- Nécessité de regard sur la géométrie de la structure, type du chargement etc.
- Application d'un model mécanique approprié fondé sur les hypothèses concernant la cinématique des déformations, types des efforts intérieurs (moments) et les équations d'équilibre.
- Un modèle constitutif fiable peut être formulé pour refléter les déformations au fluage.
- Un modèle mathématique du comportement de la structure (conditions aux limites) peut être formulé impliquant les équations indépendantes du matériau.
- Une solution non linéaire du problème est entamée.
- Vérification des modèles appliqués.

Le modèle du fluage mathématique dans une structure consiste à l'initiation des conditions aux limites par l'intermédiaire des équations différentielles décrivant la cinétique des déformations et les forces d'équilibre. Pour des valeurs connues du tenseur de déformation au fluage et les états de variables internes à un temps fixé, le problème des conditions aux limites est résolu. Dans ce cas les méthodes variationnelles sont appliquées (méthode de Ritz, méthode de Galerkin et la MEF). Au cours de ces dernières années la MEF (Méthode des Eléments Finis) est la plus appliquée dans l'analyse structurale. Elle a l'avantage de s'adapter à des structures à géométrie complexe, et qui subissent une multitude de chargement.

ABAQUS, ADINA, ANSYS, COSMOS constituent une variété de logiciels développés afin de solutionner des problèmes de la mécanique. Par conséquent, des modèles spécifiques avec des variables internes, de types de contraintes et les fonctions de température ainsi que les constantes de matériau sont exposés sous forme de sous-routines à des fins expérimentales. Dans ce qui suit, ANSYS finite élément code est appliqué dans l'analyse numérique d'une structure au fluage.

IV.3 Procédure de modélisation du fluage par Ansys

Le fluage implicite (Implicit creep) est la méthode la plus utilisée dans le programme ANSYS pour des raisons d'efficacité et d'exactitude. Il est programmé par l'utilisation de la commande **TB** avec *Lab* = CREEP, et choisir l'équation du fluage correspondante en spécifiant le numéro du model qu'il lui correspond par la commande *TBOPT*, voir exemple si dessous :

```
TB, CREEP,1,1,4,2
```

```
TBTEMP,100
```

```
TBDATA,1,C1,C2,C3,C4
```

TBOPT = 2 : Spécifie l'équation de la loi de comportement du model 2 du fluage.

Elle est définie comme étant la loi de fluage dite de « durcissement temporel » ou (time hardening) dans Ansys. Elle décrit la variations de ϵ_{cr} en fonction de plusieurs paramètres. La commande **TBTEMP** implique l'introduction de la température et **TBDATA** est celle qui introduit les constantes du fluage associé à l'équation (C1, C2, C3, C4).

La commande **TB** peut être introduite autrement comme suit :

Menu Paths (TB commande)

- MainMenu>Preprocessor>Loads>LoadStep Opts>ChangeMat Props>Material Models
- Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models
- Main Menu>Solution>Load Step Opts>Other>Change Mat Props>Material Models

L'utilisation de cette commande est illustrée dans la figure IV.1 suivante.

Cette méthode utilise plusieurs éléments à sa savoir : PLANE42, SOLID45, PLANE82, SOLID92, SOLID95, LINK180, SHELL181, PLANE182, PLANE183, SOLID185, SOLID186, SOLID187, SOLSH190, BEAM188, BEAM189, SHELL208 et SHELL209

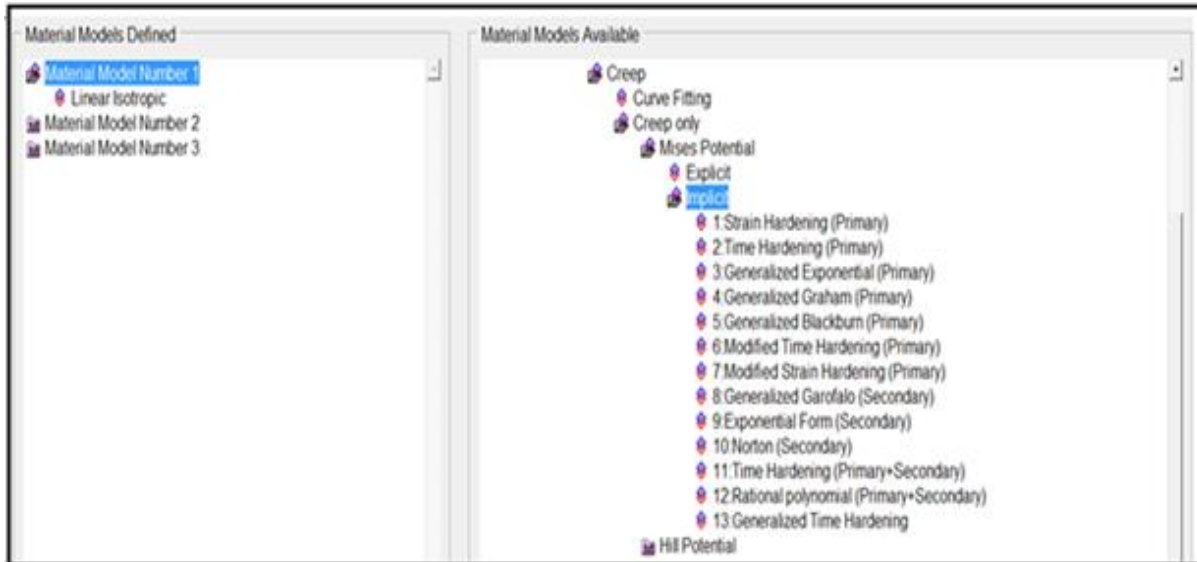


Figure IV.1 Procédure d'introduction de la loi de fluage dans une structure

D'autres expressions du fluage sont introduites par l'intermédiaire de la commande $TBOPT = 100$. La commande $L_{ab} = STATE$, nous permet de définir le nombre de variable d'état, l'exemple suivant montre l'introduction de cinq variables d'état : TB, STATE, 1,5

Des combinaisons de modèles de fluage avec d'autres options sont possible à utilisés par la commande [TB, CREEP] tels que: fluage isotropique, fluage cinématique bilinéaire et fluage Hill anisotropique.

L'exemple suivant montre une subroutine d'introduction de deux variables de température de 100 et 200 Kelvin en deux points de la structure.

```
TB, CREEP, 1,,1      ! Activate creep data table, specify creep model 1
TBTEMP,100         ! Define first temperature
TBDATA,1, c11, c12, c13, c14! Creep constants c11, c12, c13, c14 at first temp.
TBTEMP,200        ! Define second temperature
TBDATA,1, c21, c22, c23, c24 !Creep constants c21, c22, c23, c24 at second temp.
```

Cette procédure peut être faite d'une autre manière en procédant par la méthode suivante (voir **figure IV.2**)

Main Menu>Pre-processor>Material Props>Material Models

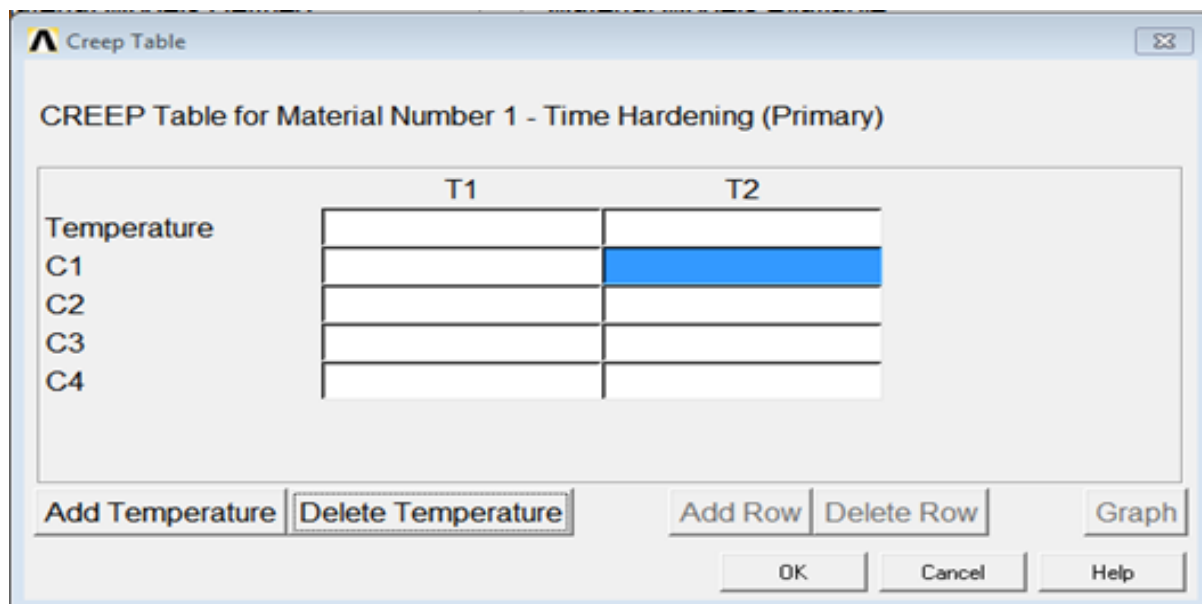


Figure IV.2 Procédure introduction des températures et les constantes de fluage

IV.4 Modélisation de la structure et présentation des résultats

Le fluage est une caractéristique majeure d'un comportement non linéaire des matériaux, dans laquelle le matériau continue de se déformer sous une charge constante. Les barrages en enrochement avec un noyau en argile sont de plus en plus utilisés à travers le monde. Dans ce mémoire, nous avons pris comme étude le barrage Souk n'Tleta d'Oued BOUGDOURA étanché par un noyau argileux soumis au chargement hydrostatique croissant. La structure présente des caractéristiques géométriques suivantes (**Figure IV.3**) :

- Une hauteur de 95m.
- Une cote de la crête : 130.70NGA.
- Une longueur en crête : 156 m.
- Une largeur de la crête : 10 m.
-

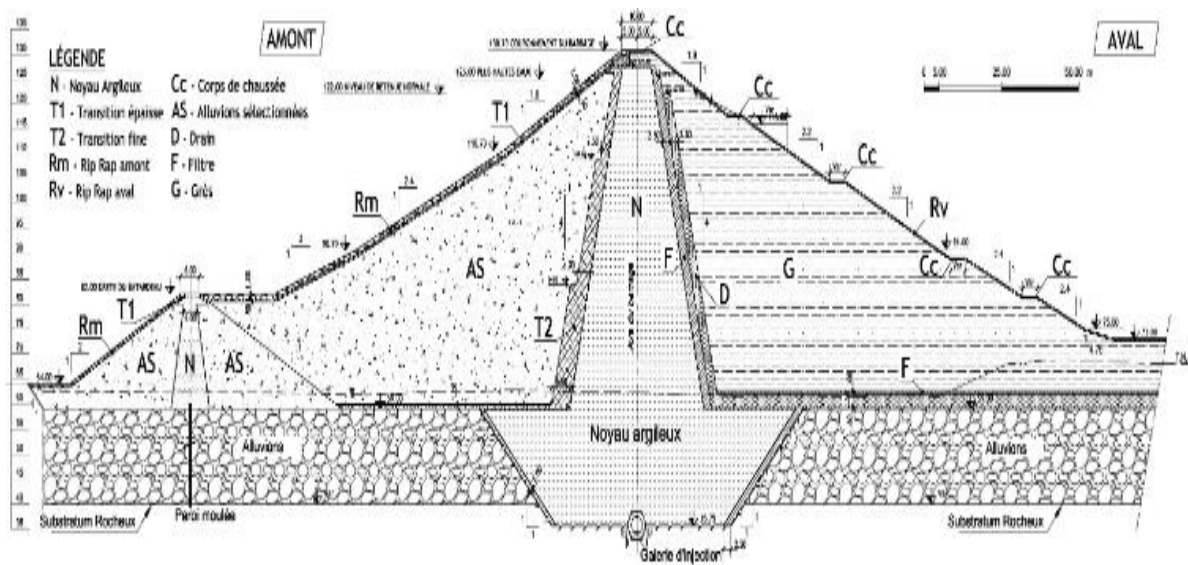


Figure IV.3 Coupe transversale du corps du barrage Souk N'TLETA (ANBT)

Les conditions aux limites et celle du chargement sont illustrées dans la figure.IV.4. L'ensemble des matériaux et leurs caractéristiques géotechniques constituant le corps de la digue du barrage sont donnés dans le tableau IV.1 suivant :

Tableau IV.1 : Caractéristiques Géotechniques des matériaux utilisé pour la construction de la digue

Type de matériaux	Poids volumique γ_d (KN/m ³)	Poids volumique saturé γ_{sat} (KN/m ³)	Angle de frottement interne ϕ (°)	Cohésion C (KPa)	Coefficient de poisson	Module de Young (MPa)	Perméabilité K (m/day)
Filtre	19	21	34	0	0.25	100	8.64
Noyau	18	19	18	10	0.3	25	0.864×10^{-3}
Grés type 1	19.5	20	30	0	0.23	90	0.0864
Grés type 2	21	21.5	34	0	0.23	90	0.0864
Recharge amont	16	191	10	0	0.3	90	0.0864
Rip Rap	21	22	30	0	0.3	55	0.0864
Alluvion	20	21.5	32	0	0.23	35	0.864
Substratum	21.3	21.8	28	20	0.3	150	8.6×10^{-3}

Il est noté que le phénomène du fluage dans le domaine plastique est extrêmement complexe. Plusieurs modèles mathématiques ont été proposés afin de représenter ce phénomène. Ceux-ci ont pu inclure en fonction du temps : la variation de la température, les déformations au fluage et les contraintes de déformation. Ce travail de mémoire se limite à l'illustration du fluage pour un temps de 200 jours de chargement hydrostatique constant sur le parement amont du barrage.

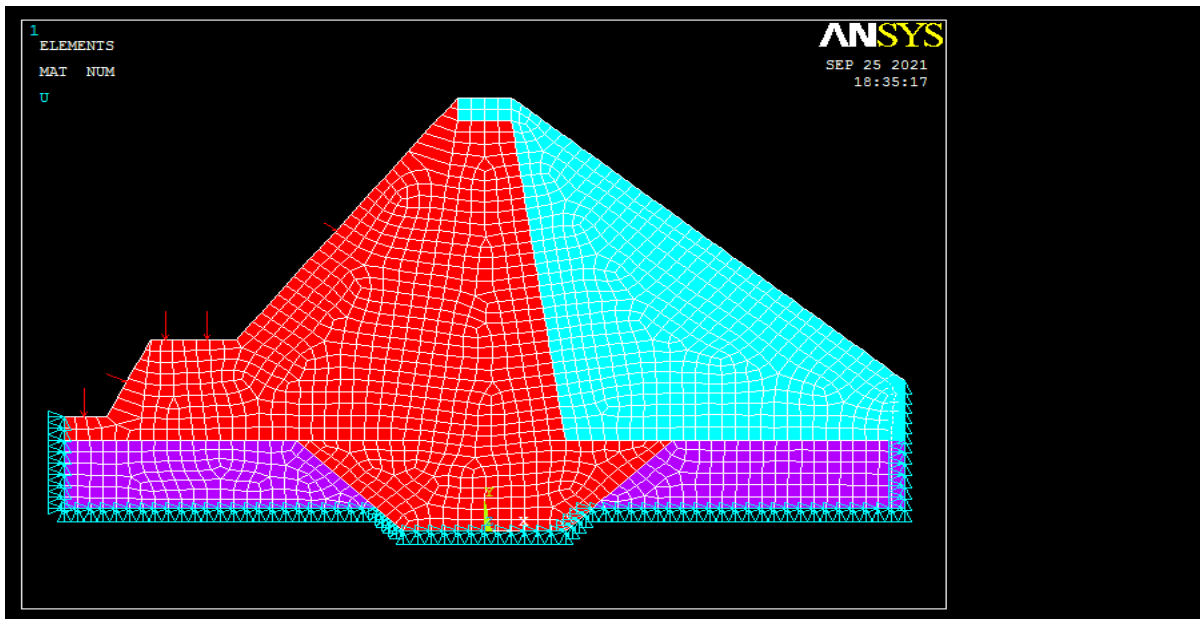


Figure IV.4 Maillage de la structure et application du chargement hydrostatique

IV.4.1 Modélisation par ANSYS

Le logiciel non commercial ANSYS, est l'un des simulateurs puissant d'analyse structural basé sur la méthode des éléments finis. Il est ainsi utilisé dans l'analyse et l'évaluation transitoire des transferts thermiques dans les matériaux et le calcul de champ de contraintes résiduelles pendant le chargement, etc. L'analyse effectuée par ANSYS inclue deux étapes, à savoir une étape de modélisation et l'autre de calcul, la 1ère étape consiste à modéliser la structure en élément finis en choisissant l'élément qui convient au type d'analyse à effectuer, comme par exemple : l'élément **PLANE 55** convient pour les problèmes thermiques et l'élément **PLANE 182** (Figure IV.5) pour l'analyse de structure. La 2eme étape, est subdivisée en trois à savoir :

- L'étape pré- processeur : qui consiste à introduire la géométrie du problème, les propriétés des matériaux tel que, les constantes du fluage, le module de rigidité, coefficient de poisson, densité, conductivité thermique, etc. Ainsi que les conditions au limite.
- Tandis que, dans l'étape solution, on a à choisir le type d'analyse qu'on doit effectuer.
- Finalement, les résultats de la solution effectuée sont observés dans l'étape post-processeur.

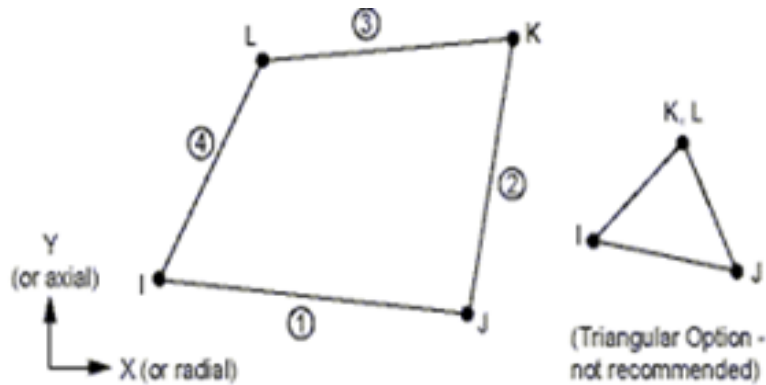


Figure IV.5 Elément PLANE 182

Afin de modéliser le fluage, le model utilisé dans cette étude est le model donné en équation IV.1. On considère que le matériau est isotropique, et la méthode de solution de base utilisée est celle de Newton-Raphson. Cette loi de comportement est définie dans ANSYS comme 'Time Hardening Model'.

$$\varepsilon_{cr} = C_1 \sigma^{C_2} t^{C_3} e^{-C_4/T} \quad (IV.1)$$

Avec :

- ε_{cr} : Déformations de fluage (creep strain)
- σ : Contrainte équivalente (equivalent stress)
- t : Temps du chargement (time at end of sub – steps)
- C_1, C_2, C_3, C_4 : Paramètres de fluage (voir tableau IV.2)
- T : Température du milieu

IV.4.2. Paramètres de fluage du model appliqué

Les paramètres de fluage C_1 , C_2 et C_3 , utilisés dans l'étude qu'on a effectuée, sont donnés en fonction du type du matériau employé, voir tableau IV.2. L'étude qu'on a menée, consiste à déterminer les déformations (ϵ_{cr}) localisées au niveau des deux noyaux argileux. La loi de comportement au fluage est donnée à l'équation IV.1.

Tableau IV.2 paramètres élastiques et constants du fluage des matériaux

	Paramètres élastiques et constants du fluage des matériaux					
	Paramètres élastiques			Paramètres de fluage		
	Module de Young (Pa)	ν	Densité	C_1 (S^{-1})	C_2	C_3 (Q/k)
Roche	$2,4 \times 10^8$	0,45	2000 Kg.m ⁻³	$7e^{-20}$	2,19	-0,54
Argile	25×10^6	0,3	18 KN.m ⁻³	$3,33e^{-6}$	1,18	-0,63

IV.4.3. Discrétisation de la structure

Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes limités à traiter le problème à deux dimensions. La discrétisation de la structure est faite à base des éléments en 2D, de type rectangulaire à quatre nœuds (PLANE182). La structure contient 1523 éléments rectangulaires (Voir **Figure IV.4**) précédente. L'étude se focalise sur :

- L'introduction de la géométrie du barrage,
- Choisir l'élément type (PLANE 182)
- Créer les surfaces représentant les différents matériaux,
- Introduction des caractéristiques physiques des matériaux (Module de Yong, coefficient de poisson, l'angle de frottement interne...)
- Application du chargement hydrostatique
- Fixer les conditions aux limites

- Introduction de la loi de comportement au fluage (Equation IV.1)
- Maillage de la structure
- Fixer le temps du chargement (voir **Figure IV.6**)
- Enfin lancer l'analyse

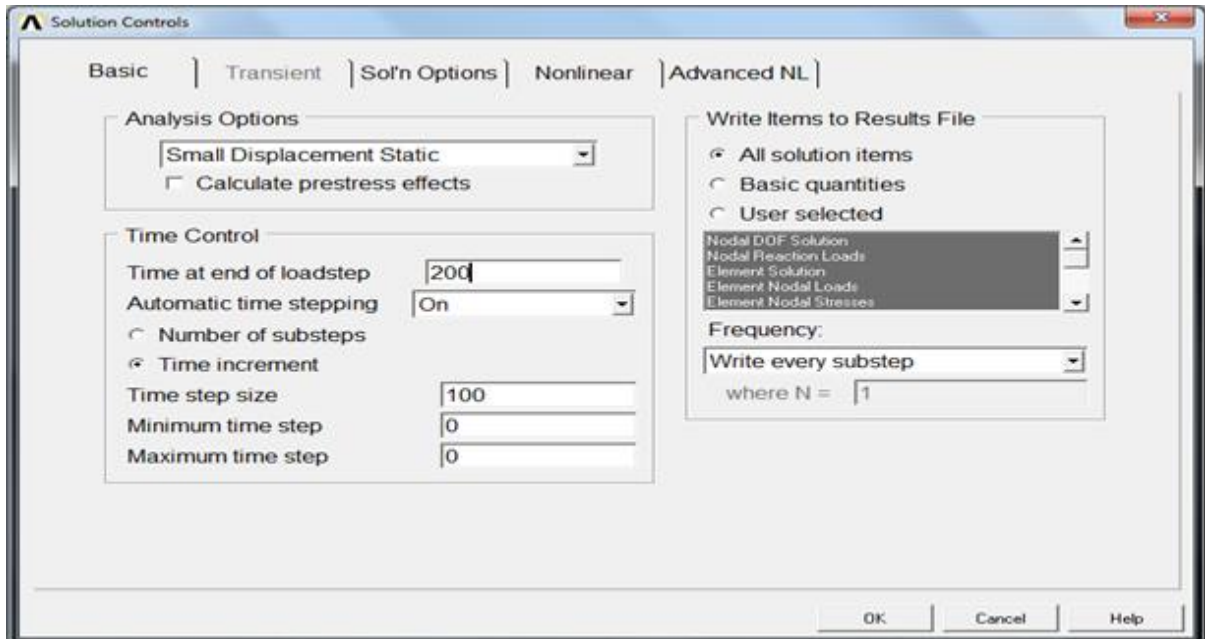


Figure IV.6. Fixation du temps du chargement (200j)

IV.4.4. Résultats et discussions

A travers les figures suivantes, nous allons illustrer et analyser les différents résultats obtenus dans l'analyse numérique effectuée sur la structure dans le plan XY.

➤ Déplacements de la structure (U_x et U_y)

Cette étude a été réalisée en utilisant les procédures d'analyse statique par élément finis du logiciel ANSYS 14. Les **figures IV.7** et **IV.8** suivantes illustrent les déplacements enregistrés au niveau de la digue ainsi qu'au niveau des deux noyaux argileux.

On constate que les valeurs maximales sont enregistrées au niveau de la zone de la digue contenant le 1^{er} noyau argileux. En termes de lecture, on peut conclure que cette zone freine tous déplacement engendré par les charges, et elle réduit aussi les gradients hydrauliques engendrés par les pressions hydrostatiques.

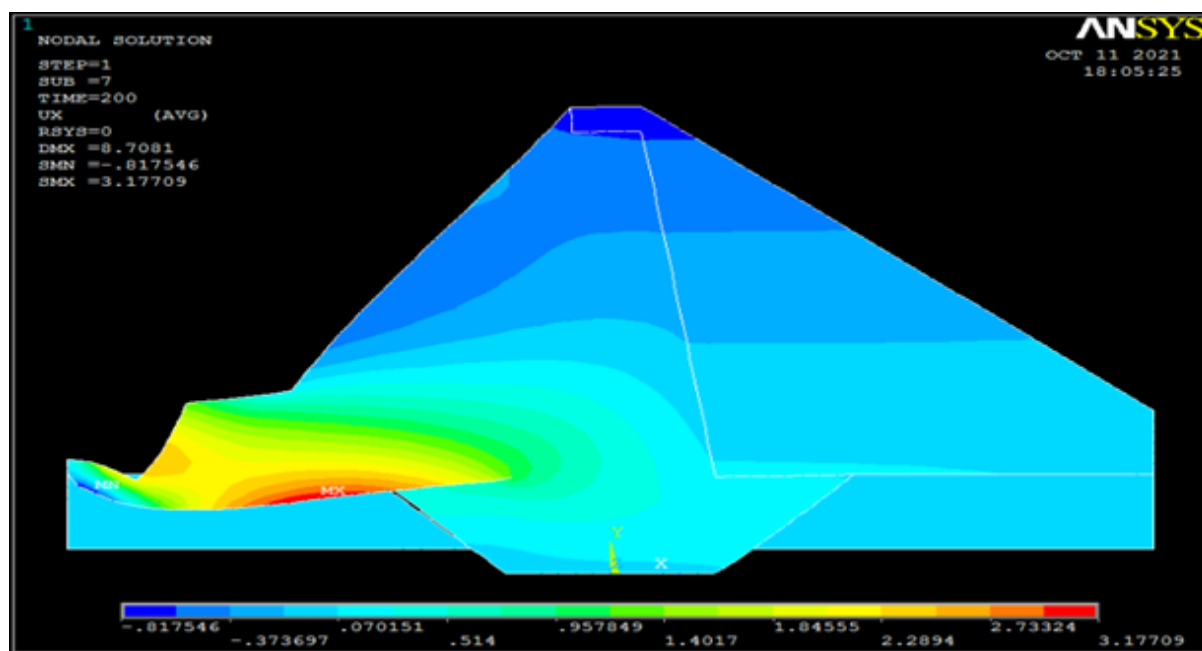


Figure IV.7 Illustration des déplacements Ux

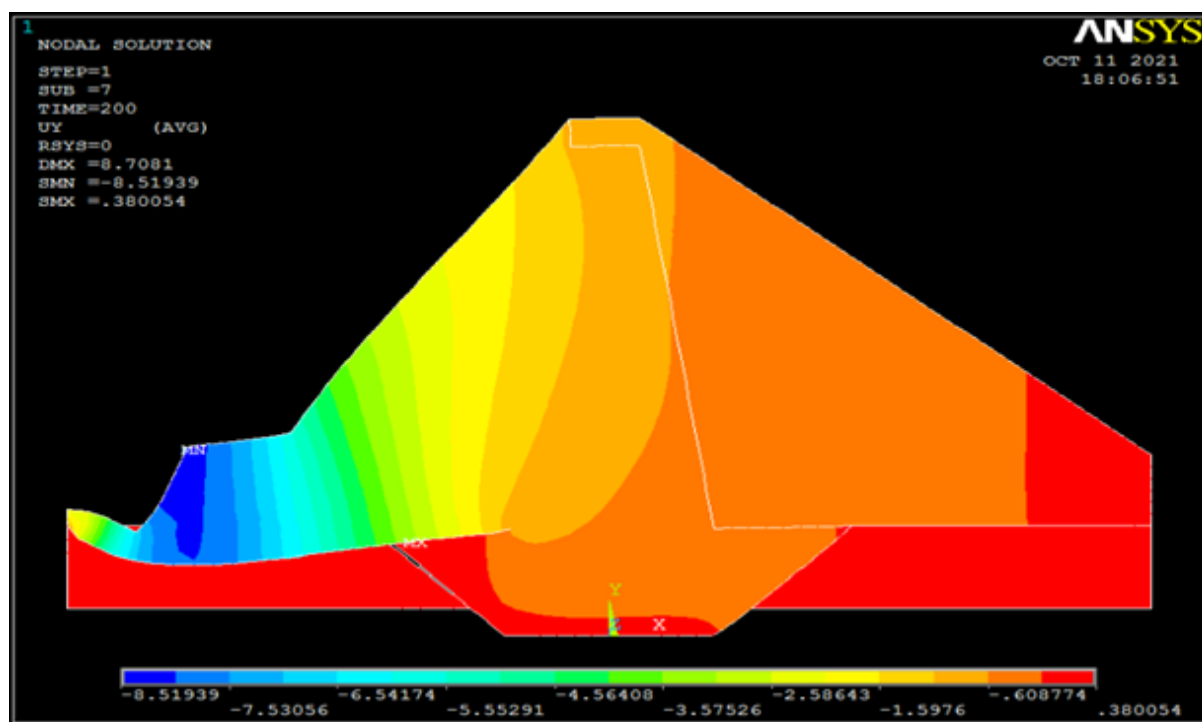


Figure IV.8 Illustration des déplacements Uy

➤ Illustrations des déformations élastiques $\varepsilon_x^{el}, \varepsilon_y^{el}, \gamma_{xy}$

Les figures IV.9, IV.10 et IV.11 suivantes illustrent, les déformations élastiques (ε_x^{el}) et (ε_y^{el}) ainsi que les déformations élastiques au cisaillement dans le plan (XY). D'après les

résultats obtenus, on constate que les valeurs maximales des déformations élastiques (ϵ_x^{el}) et (ϵ_y^{el}) et de cisaillement sont enregistrées au niveau de la zone contenant le premier noyau argileux.

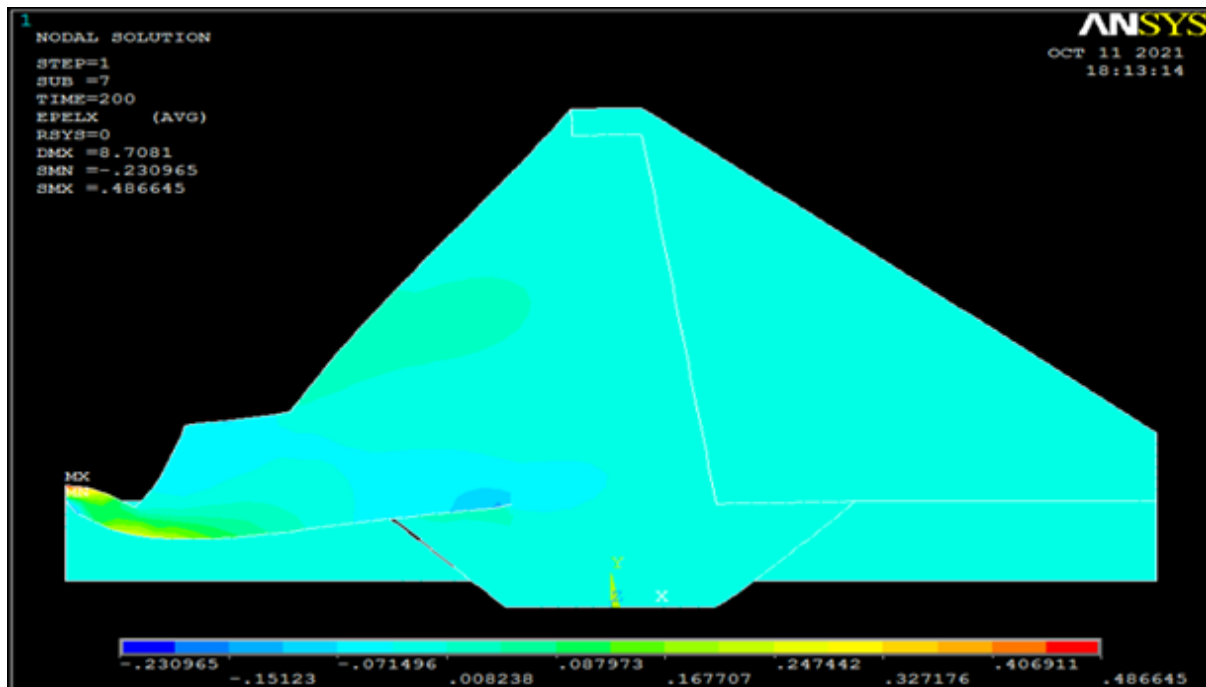


Figure IV.9. Contours des déformations élastiques ϵ_x^{el} dans la structure

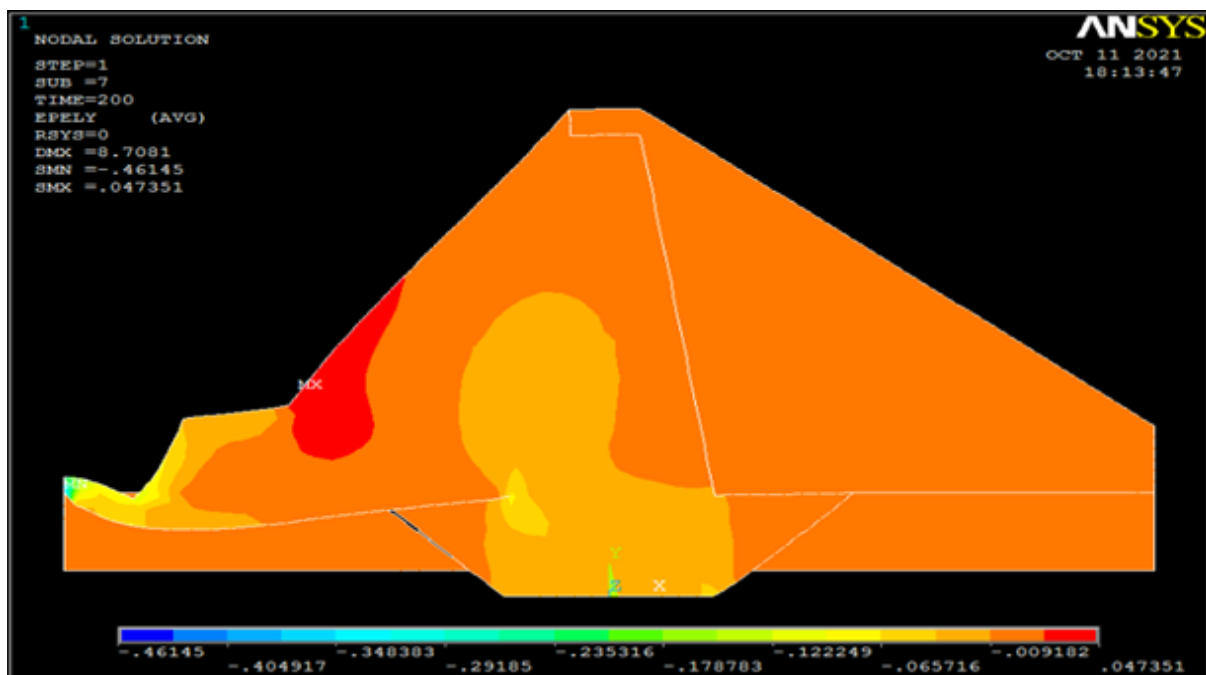


Figure IV.10. Contours des déformations élastiques ϵ_y^{el} dans la structure

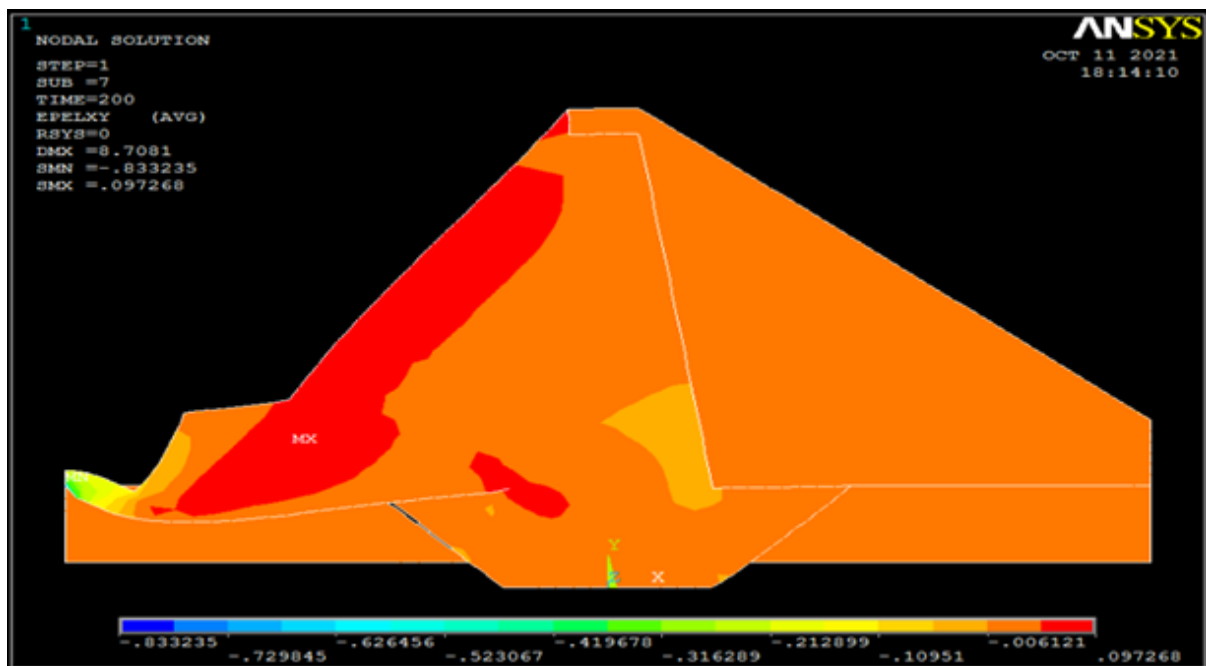


Figure IV.11. Contours des déformations élastiques au cisaillement γ_{xy}

Les Figures IV.12, IV.13, IV.14 illustrent le contour des contraintes (σ_x , σ_y), ainsi que l'intensité des contraintes au niveau du barrage et les noyaux argileux.

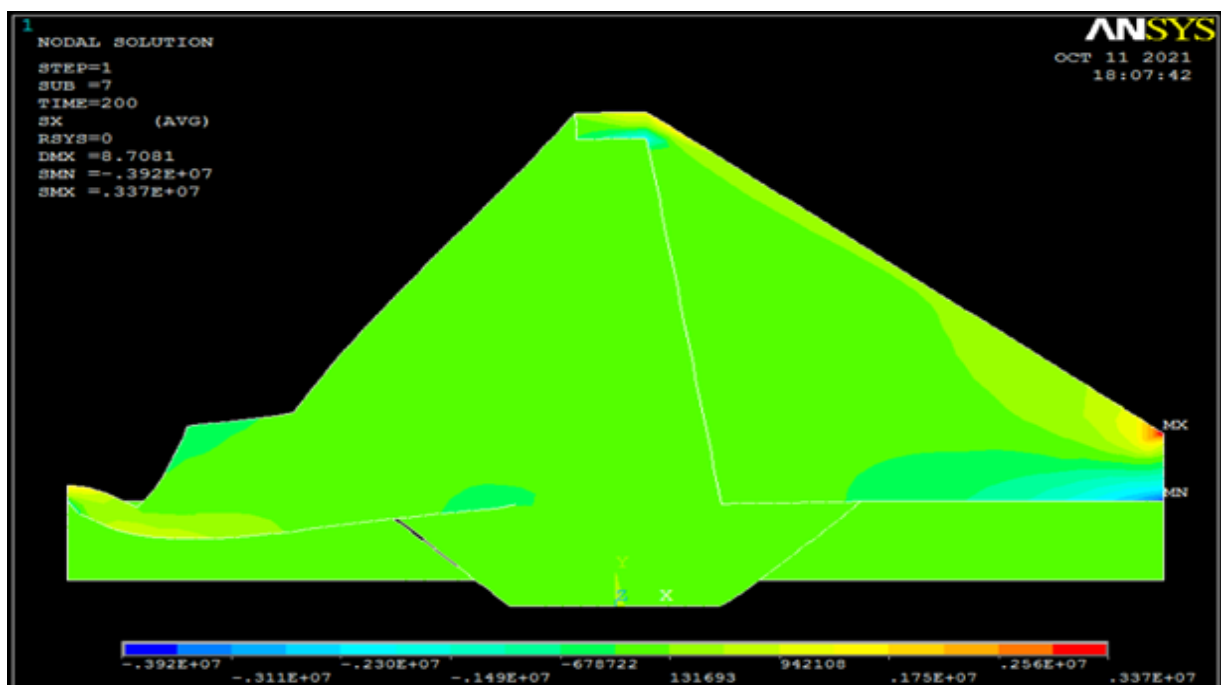


Figure IV.12. Contours des contraintes (σ_x)

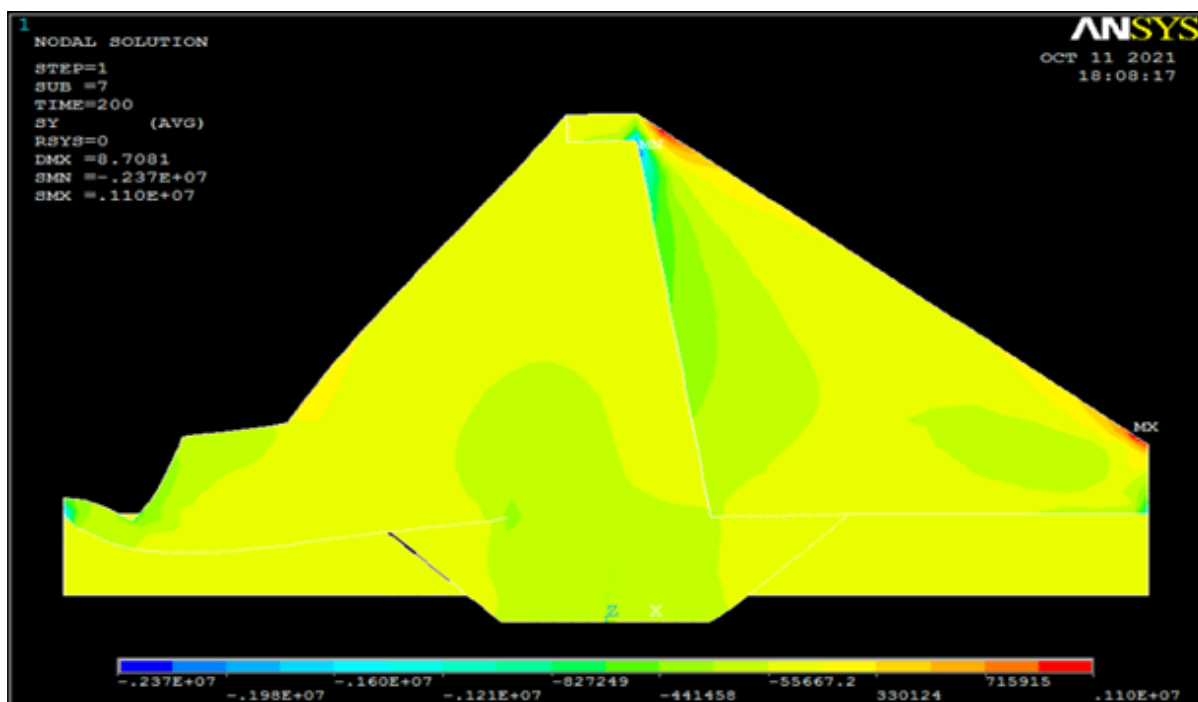


Figure IV.13. Contours des contraintes (σ_y)

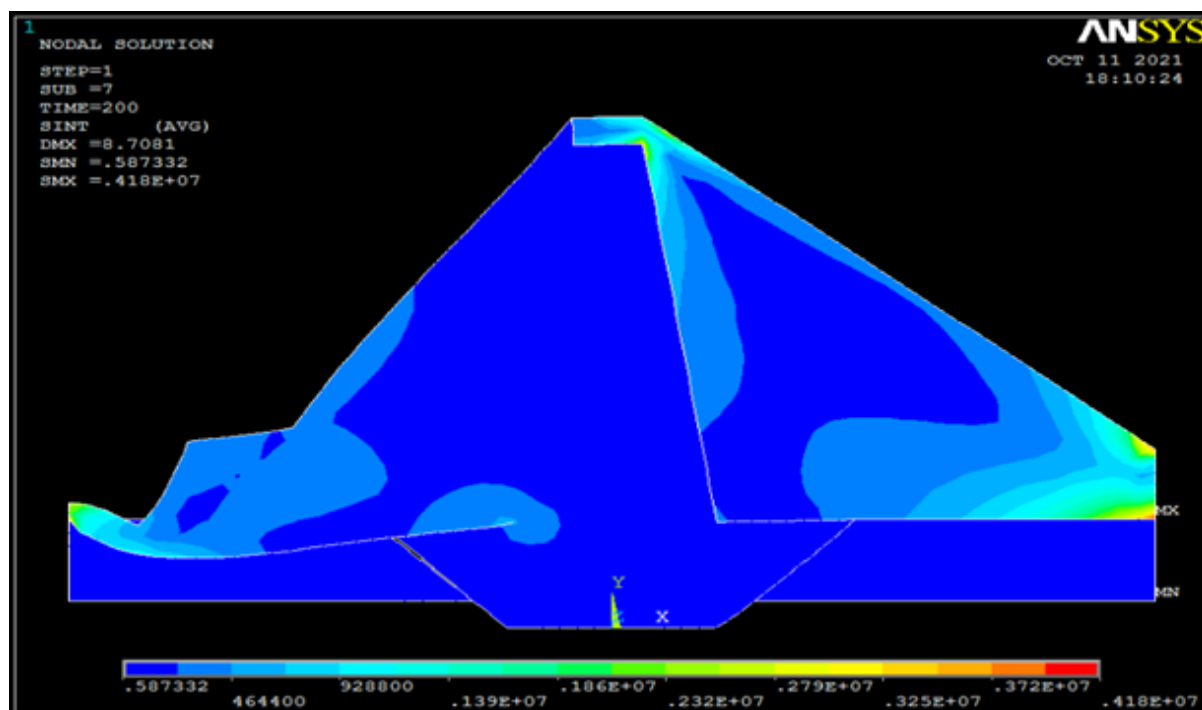


Figure IV.14. Intensité des contraintes

La figure IV.15 illustre les contraintes de cisaillement dans le corps du barrage. Les contraintes de cisaillement (τ_{xy}) enregistrées dans le noyau argileux varient de -127174 MN/cm² a -379484MN/cm².

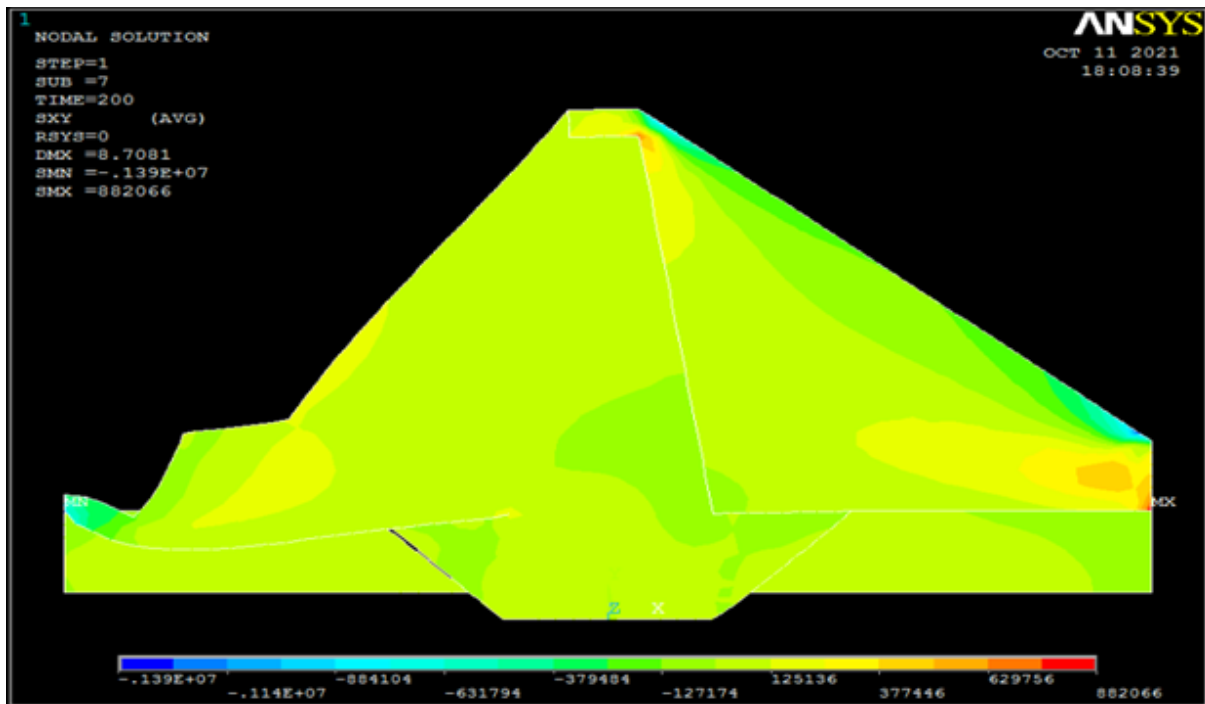


Figure IV.15. Illustration des contraintes de cisaillement τ_{xy} dans la structure

➤ Illustration des déformations au fluage (ϵ_x^{cr} , ϵ_y^{cr} , γ_{xy}^{cr})

Des figures suivantes, on obtient le comportement au fluage de la structure du barrage et du masque d'étanchéité en sol argileux. La loi du comportement intégrée est celle donnée en Equation.IV.1.

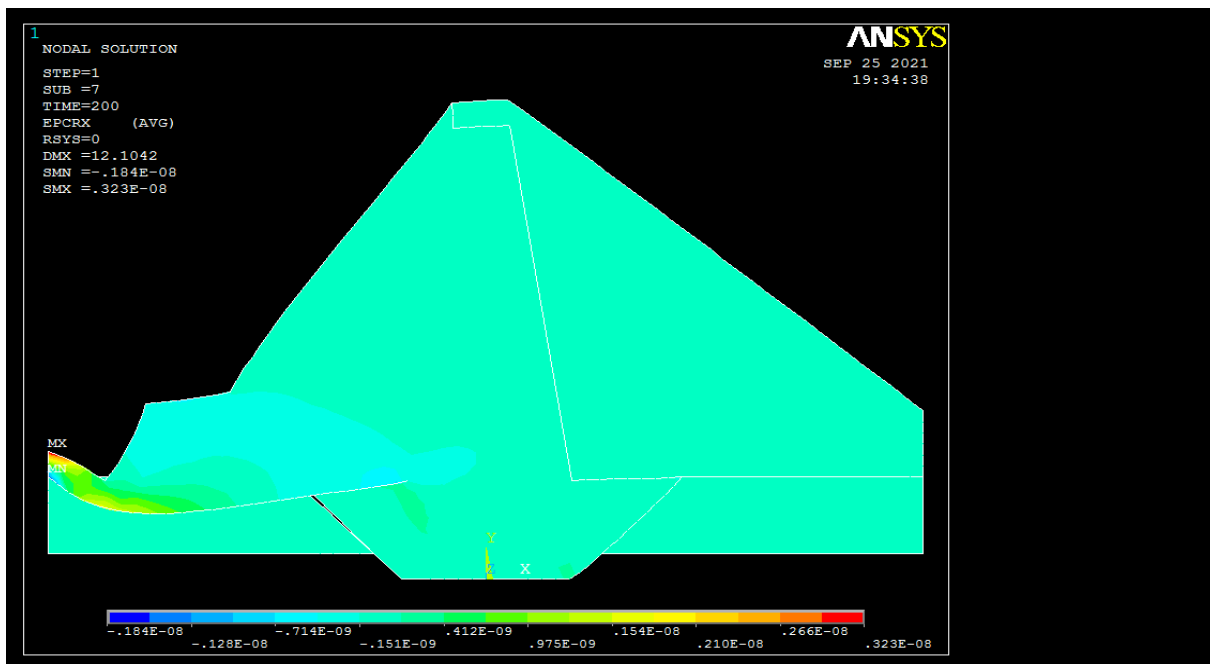


Figure IV.16. Illustration des déformation au fluage ϵ_x^{cr} dans la structure

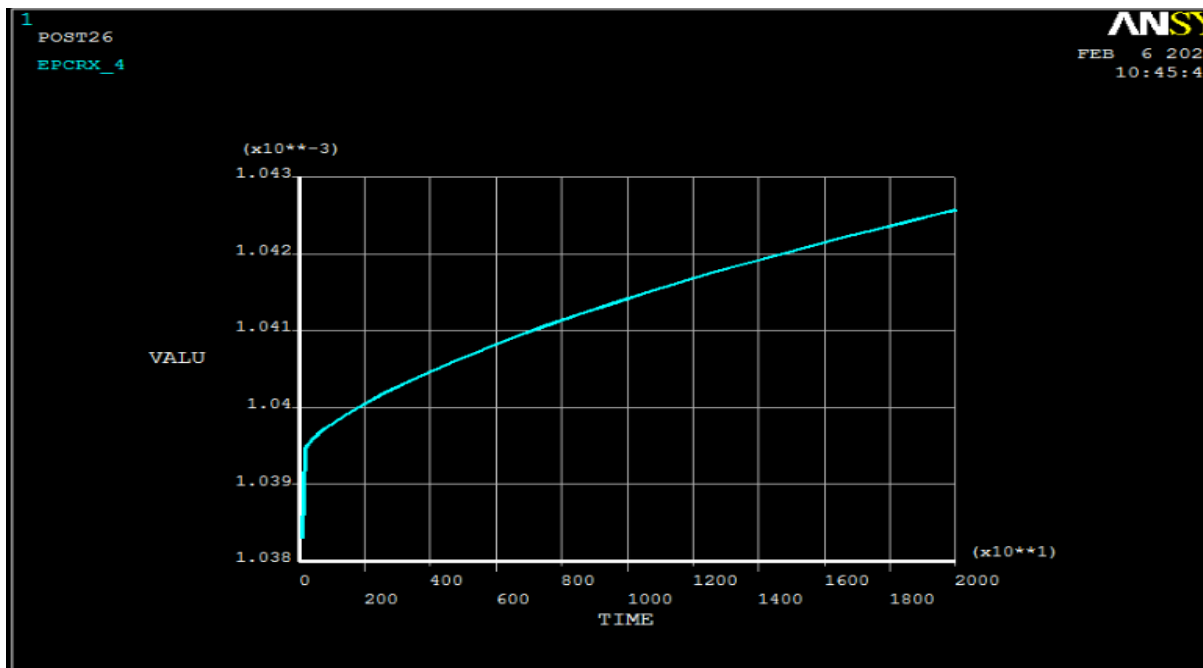


Figure IV.17 Courbe de fluage d'un Nœud du noyau argileux

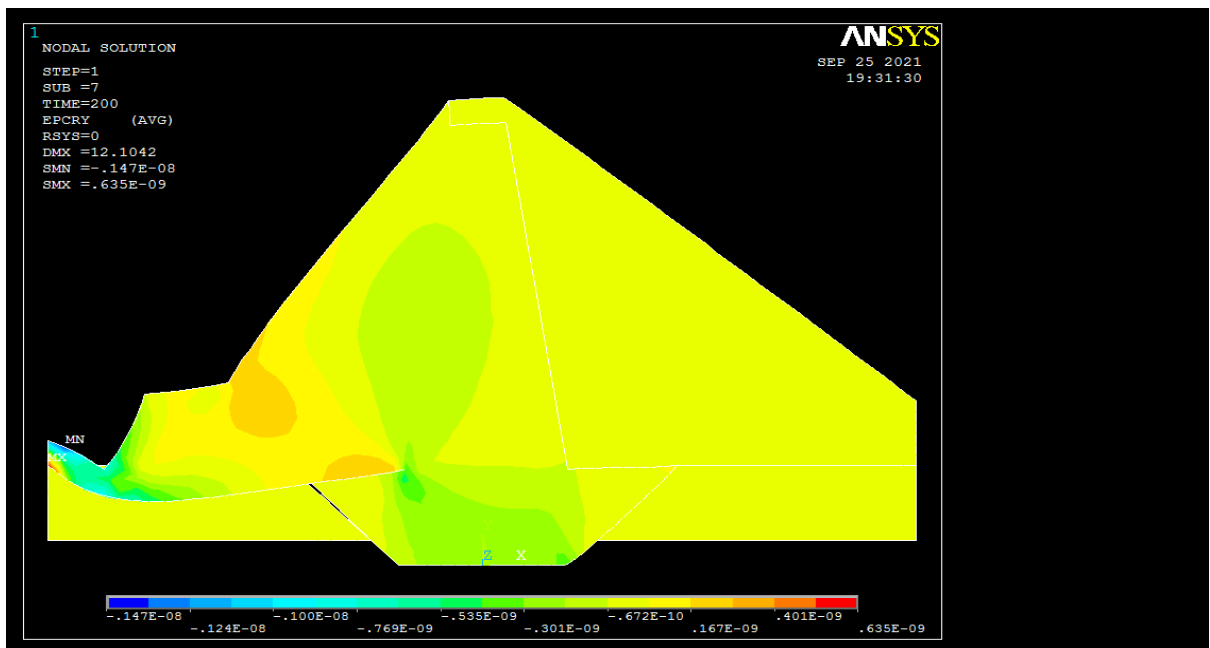


Figure IV.18 Illustration des déformation au fluage ϵ_y^{cr} dans la structure

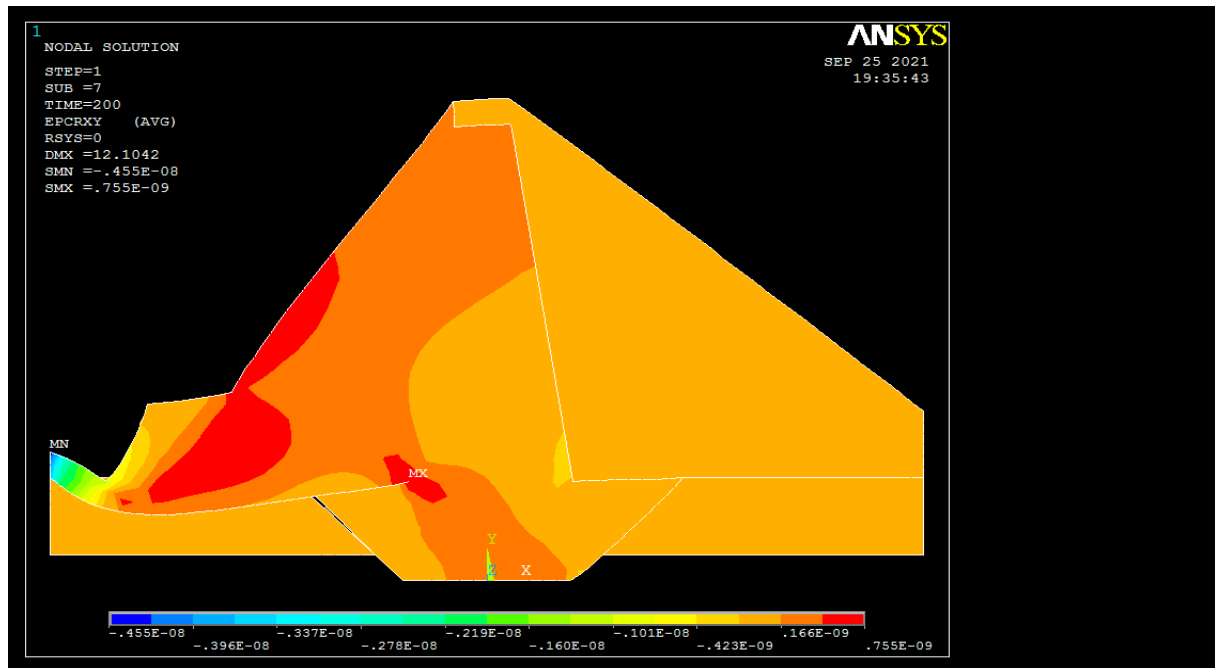


Figure IV.19 Illustration des Déformation de cisaillement au fluage γ_{xy}^{cr} dans la structure

➤ Illustration des déformations de Von Mises au fluage

Un critère de plasticité, ou critère d'écoulement plastique, est un critère permettant de savoir, sous des sollicitations données, si une structure se déforme plastiquement ou si elle reste dans le domaine élastique. De nombreux essais ont montré que l'on pouvait utiliser deux critères principaux : le critère de Tresca-Guest ou le critère de Von Mises. La contrainte de Von Mises est :

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma I - \sigma II)^2 + (\sigma II - \sigma III)^2 + (\sigma III - \sigma I)^2} \quad (VI.1)$$

Dans un cas de sollicitation planes, pour lequel on n'a que deux contraintes normale σ et de cisaillement ζ , les définitions deviennent :

- Contrainte de Tresca : $\sigma_c = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}$
- Contrainte de von Mises : $\sigma_c = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$

La frontière entre le domaine plastique et le domaine élastique est la surface $\sigma_e = R_e$

- $\sigma_e < R_e$: domaine élastique
- $\sigma_e > R_e$: domaine plastique

Critère de Von Mises (critère de l'énergie de distorsion élastique) Le critère dit de Von Mises fut formulé par Maxwell en 1865... Le critère de Von Mises est un critère énergétique :

- L'énergie de déformation élastique s'écrit dans les cas simples : $U = \frac{1}{2}\sigma\varepsilon$ en traction-compression.

Les figures suivantes illustrent les déformations et contraintes de Von mises :

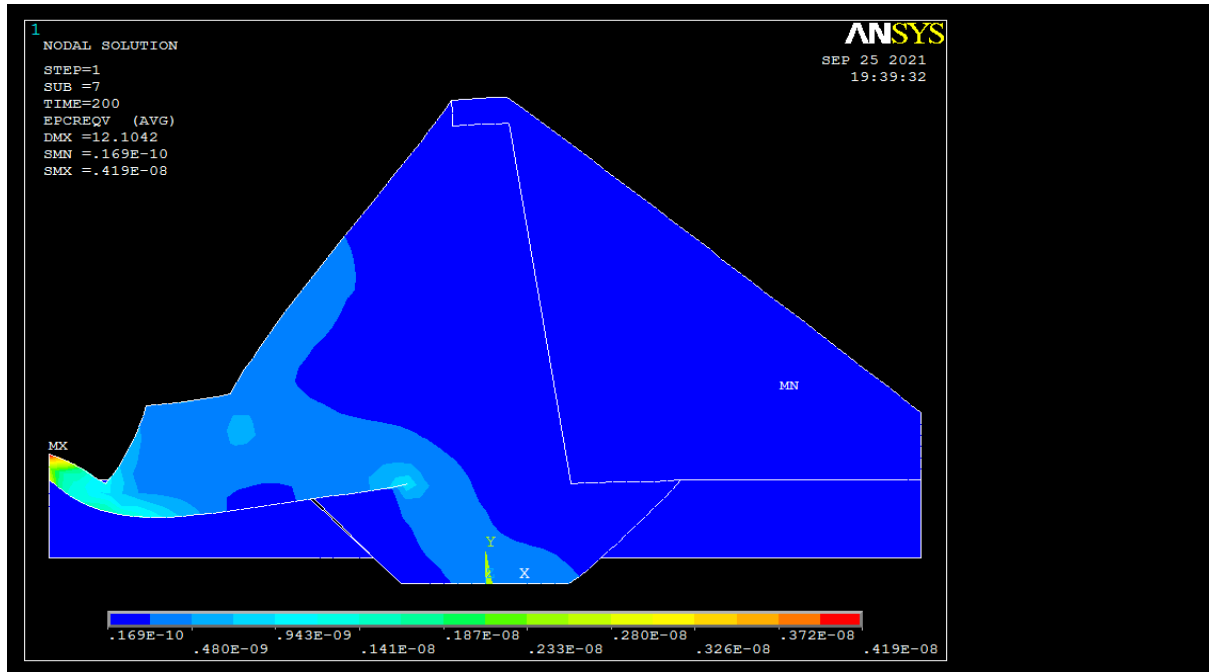


Figure IV.20 Illustration des Déformation de Von Mises au fluage ε_{VM}^{Cr} dans la structure

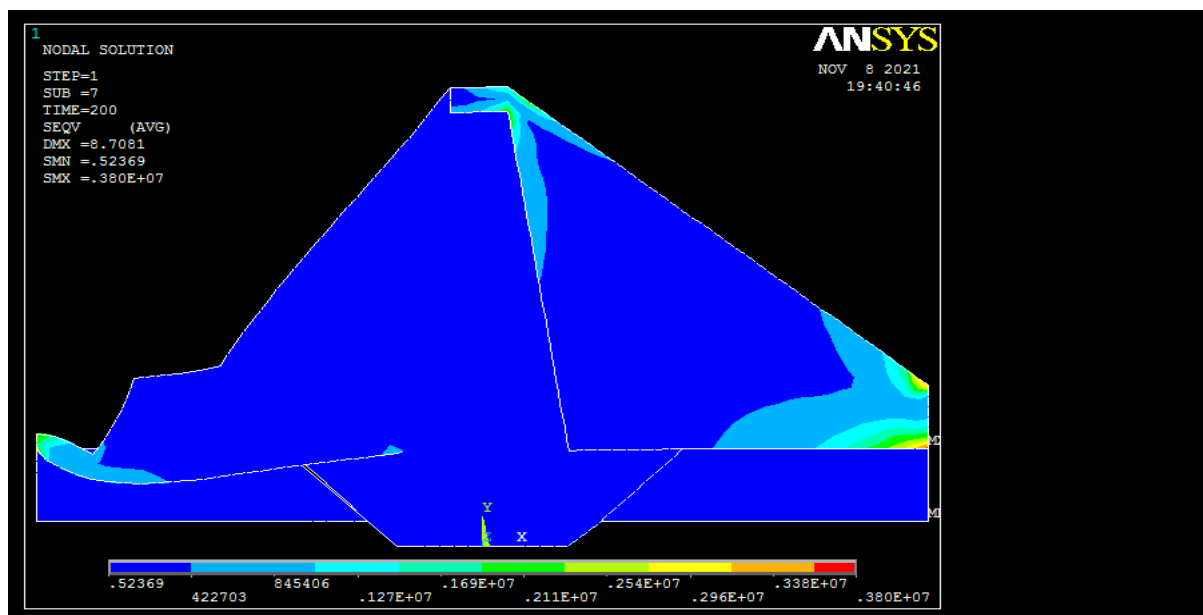


Figure IV.21 Illustration des contraintes de Von Mises au fluage σ_{VM}^{Cr} dans la structure

IV.5 Conclusion

L'objectif de ce chapitre est de donner les procédures de modélisation du fluage dans l'analyse structural en introduisant une loi de comportement. On a discuté des étapes de base de la modélisation, et les procédures de solution numérique. Une illustration des commandes utilisées dans le code de calcul Ansys ont été données telle que la commande TB qui introduit la loi de fluage.

Enfin, nous avons modélisés la structure et on a essayé d'évaluer la stabilité des noyaux en sol argileux dans les barrages en enrochement et de déterminer leur comportement à long terme.

Nous avons illustré à travers les figures précédentes, que les valeurs des déplacements U_y et U_x de la structure (digue en enrochement) sont insignifiantes par rapport à la hauteur du barrage (95m).

Compte tenu des résultats de la simulation numérique du comportement au fluage de la digue et du noyau argileux, on constate que ce type de construction résiste mieux à la pression hydrostatique.

Conclusion générale

Dans un barrage en enrochement, la fonction d'étanchéité est assurée par son noyau, dans le cas où des matériaux conformes sont disponibles à proximité du chantier, sinon dans le cas contraire, cette fonction peut être garantie à l'aide d'un écran d'étanchéité appelé masque placé à l'amont du barrage.

Le barrage de Souk n'Tleta construit sur l'oued Bougdoura situé dans la wilaya de Tizi-Ouzou, dispose de deux digues constituées en noyau argileux, et des ouvrages annexes réalisés avec des matériaux localisés au voisinage du site de l'implantation de l'ouvrage. Ces digues sont confrontées au phénomène de fluage.

Le phénomène de fluage est un phénomène de déformation différé au cours du temps sous une contrainte constante maintenue. Dans notre cas la pression hydrostatique représente cette contrainte, elle varie selon la hauteur de l'eau, c'est-à-dire qu'elle augmente en profondeur.

Pour connaître comment le noyau argileux du barrage de Souk n'Tleta se comporte face au fluage, on a modélisé la structure à l'aide du logiciel des éléments finis Ansys, où les déformations aperçues au niveau de la digue se sont avérées minimes et insignifiantes par rapport à la hauteur de la digue, néanmoins, les résultats de cette modélisation ont relevé que les plus importantes déformations sont repérées au rang de la zone contenant le premier noyau argileux c'est-à-dire de la digue de col. Cette digue joue un rôle significatif, c'est elle qui ralentit tous déplacements engendrés par les charges et réduit aussi les gradients hydrauliques générés par les pressions hydrostatiques.

Étant donné que les résultats de la simulation numérique du comportement au fluage de la digue et du noyau argileux sont appréciables, on conclut que ce type de construction résiste mieux à la pression hydrostatique.

Malgré la force colossale exercée sur la paroi du barrage de Souk n'Tleta, ce dernier répond aux déformations engendrées par les pressions hydrostatiques d'une manière acceptable, cela veut dire que les matériaux utilisés dans la construction du barrage sont favorables.

Références bibliographiques

- Abdel-Hady, M. and M. Herrin, 1966. Characteristics of soil-asphalt as a rate process. ASCE, Journal of Highway Div., Proc. 92(HW1) : 49-69.
- Afiri R, 2011-2012 : étude de faisabilité d'un barrage en terre : barrage de souk Tlata Mémoire de Master 2 (Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou).
- Alhusein, M, 2001 : Étude du comportement différé des sols et ouvrages géotechniques (Doctoral dissertation, Université Joseph-Fourier-Grenoble I).
- Andersland, O. B. and A. G. Douglas, 1970 : Soil deformation rates and activation energies. Geotechnique 20(1): 1-16.
- ANSYS,2004 : ANSYS User's Manual Revision 10. 1st Ed., ANSYS, Inc., USA.
- ANSYS Element Reference, General Element Features, 2.5. Data Tables-Implicit Analysis, 2.5.8 Creep Equations.
- Bazant, Z. P., K. Ozaydin and R. J. Krizek, 1975 : Micromechanics model for creep of anisotropic clay. ASCE, Journal of Engr. Mech.Div., Proc. 101(EMI): 57-78.
- BOUCHARD, J, 2016 : Caractérisation de l'enrochement du barrage Romaine-2. *Mémoire*. Université l'AVAL, Québec, Canada.
- BETCGB (Bureau d'Étude Technique et de Contrôle des Grands Barrages), 2013 - Jean-François VILLARD : Les barrages en remblai : Barrages en remblai à masque amont - Formation continue "CONTRÔLE DES BARRAGES" Lyon - 18 au 21 Mars 2013.
- Bjerrum, L, 1967: Engineering geology of Norwegian normally- consolidated marine clays as related to settlement of buildings. Seventh Rankine Lecture. Géotechnique, Vol. 17, pp. 81-118.
- Carrère A, 1994 : Barrages. Techniques de l'Ingénieur.
- Crawford, C. B, 1965 : Resistance of soil structure to consolidation. Can. Geotech. J., 2:2:90-115. See also National Research Council. Canada. Division of Building Research. Research paper 247.
- Comité Français des Grands Barrages 2002, Petits barrages : recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi. Coordination Gérard Degoutte. Cemagref Editions- 2° édition.
- Dahhaoui, H, 2018 : Influence de la Non Saturation et de la Température sur le Fluage des Sols Argileux. Thèse de doctorat, (Université de Tlemcen (Algérie)).

- Degoutte G., Mercklé S., 2014 : Cours ISBA (Institut Supérieur du Béton Armé) - Chapitre 4 – Barrages en remblai.
- Demirel, T, 1962 : Adsorption of water vapor by sodium and calcium montmorillonites. Ph.D. thesis, Iowa State University, Ames, Iowa.
- Dorn, J. E, 1957 : The spectrum of activation energies for creep. In Creep and recovery, pp. 255-283.
- Félix, B., Vuailat, P., Drave, F., et Flavigny, E, 1981 : Comportement visqueux et consolidation des argiles. BULL LIAISON LAB PONTS CHAUSS, (5SPEF XI F).
- Goldstein, M. N, 1979 : “Mechanics properties of soils (stress-strain and déformation characteristics)”. Strolizdat Moscow, 310 p. En Russe.
- Guenoun. O, Kelali. N, (Étudiants), 2002-2003 : hydrologie de bassin versant de l’Oued Bougdoura. Mémoire master 2 (Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou).
- Jean-Michel Gobat, Michel Aragno, Willy Matthey 2010 : *le sol vivant. Bases de pédologie, biologie des sols*, PPUR Presses polytechniques, p. 195-198.
- Lambe, T. W, 1960 : A mechanistic picture of shear strength in clay. Res. Conf. Shear Strength of Clay Soils, Colorado, pp. 555-580.
- [22] Le Delliou, P, 2003 : Les barrages: conception et maintenance. Presses Universitaires Lyon.
- Low, P. F, 1961 : Physical chemistry of clay-water interaction. Advances in Agronomy 13: 269-327.
- Low, P. F. and J. L. White, 1970 : Hydrogen bonding and polywater in clay water systems. Clays and Clay Mins. 18(1): 63-67.
- MAGNAN, J-P, 2000 : Déformabilité des sols. Tassements. Consolidation. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France.
- Marley, J. J, 1969 : Behavior of granular materials under triaxial compression with pulsating deviator stress. Ph.D. thesis, Iowa State University, Ames, Iowa.
- MESSAID, B, 2009 : Etude de la position efficace des drains dans les barrages en terre. *Thèse de doctorat*, Université Colonel Hadj-Lekhdar, Batna, Algérie.
- Ministère de l’agriculture, Direction de l’aménagement, 1977 : Techniques des barrages en aménagement rural. 325p.
- Mitchell, J. K, 1964 : Shearing resistance of soils as a rate process. ASCE, Journal of Soil Mech. Found. Engr. Div., Proc. 90 (SMI): 29-61.

- Mohammad. A, Flavigny. E, Boulon. M, 2002: The role of soil initial stress's in finite element simulations. 5th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering (NUMGE), Paris.
- Noble, J. J, 1968 : Effect of temperature on strength of soils. Ph.D. thesis, Iowa State University, Ames, Iowa.
- Noble, J. J. and T, Demirel, 1969 : Effect of temperature on strength behavior of cohesive soils. Highway Research Board, Spec.Report No. 103, pp. 204-219.
- Pierre Thomas, 2019 : Les stratifications obliques du Miocène provençal, région de Fontaine de Vaucluse (Vaucluse).
- Plumelle, C., Cui, Y. J., Fabre, D., Fouché-Grobla, O., Hirschauer, A., Tabbagh, A, 2017 : Théorie et pratique de la géotechnique : outils pour la conception des ouvrages. Éditions Le Moniteur.
- Schmid, W. E. 1962 : New cocept of shearing strength for saturated soils , pt. 2, Soil-Sols, n°2, pp. 19-28.
- Site du CFBR (Comité français des barrages et réservoirs) : <http://www.barrages-cfbr.eu/>
- Tan, T. K, 1958 : Discussion of soil properties and their measurements. Proc. 4th int. Conf. Soil Mech. 3: 87-89.
- Ter-Stepanian, G, 1996 : Concentration du fluage avec le temps. Revue Française de Géotechnique, N° 74, pp 31-43.
- Taylor, D. W, 1942 : Research on consolidation of clays". Massachusetts Institute of Technologiy. Departement of Civil and Sanitary Engineering. Serial, 82. 147 pp.
- Terzaghi, Ch. (1931). « The static rigidity of plastic clays ». Journal of Rheology, vol. 2, n°3, pp. 253-262.
- Orhan Erol : Clay structure and creep behavior of clays as a rate process. Iowa State University pp 16-17).
- <http://www.benoit-gauthier.com/produit/roche-calcaire>
- [https://fr.wikipedia.org/wiki/Conglom%C3%A9rat_\(g%C3%A9ologie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Conglom%C3%A9rat_(g%C3%A9ologie))
- <https://www.alamyimages.fr/photos-images/p%C3%A9lite.html>
- https://www.researchgate.net/figure/Isobathes-du-toit-des-alluvions-sablo-graveleuses-Fig-4-Contour-lines-of-the-top-of_fig2_298954236