

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Université Abou Bakr Belkaid– Tlemcen  
Faculté de Technologie  
Département de Genie civil

**Mémoire de fin d'études**

**pour l'obtention du diplôme de Master en Génie civil**

**Option:** Infrastructure de Bases et Géotechnique  
-Travaux Publics-

*Thème*

**ETUDE DE CONCEPTION DU BARRAGE  
SUR L'OUED SIDI AISSA  
WILAYA DE TESSEMSSILT**

Présenté le 23 Juin 2013 par :

**BENAZZA Chahinez**

**BENARIBA Kheira**

Devant le jury composé de:

Mr N. HSSAIN  
Mr B.GHENANI  
Mr Z.DEBBAL  
Mme N. ROUISSAT  
Mr B. ROUISSAT

PRESIDENT  
EXAMINATEUR  
EXAMINATEUR  
ENCADREUR  
CO-ENCADREUR

## DEDICACES

*Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie du fond du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en exprimant La gratitude et la reconnaissance durant toute notre existence.*

*Je tiens à dédier ce travail aux personnes les plus chères à mon cœur, ma mère et mon père car c'est grâce à leurs soutiens que j'ai pu arriver à ce stade ; je souhaite que ce travail soit à la hauteur de tout ce qu'ils ont pu faire pour moi.  
A ma grand-mère AIDA que dieu la garde pour nous.*

*A mes chers frères : Mohammed et Abdeallah  
et mes sœurs : Samira, Nassima et Assia.*

*Sans exception ma nièce IBTIHAL AIDA, et mon nouveau MILOUD.*

*Toute la famille BENAZZA et MAHI*

*Une spéciale dédicace pour mes meilleurs amis : SALIHA, RABIHA, MANAL, RAFIKA, ZAHIA, SOUHILA et mon binôme KHEIRA.*

*Sans oublier mes amis, toutes personnes qui me connaissent de loin ou de près, en particulier : ABDESSAMAD, MOKHTAR, FARID, YASSINE, FETHI.*

*A toute la promotion Génie Civil 2012/ 2013.*

*BENZAZZA Chahinez*

## DÉDICACES

*Je tiens à dédier ce modeste travail aux personnes les plus chères à mon cœur : mon père et ma mère, qui ont été le guide affectueux et attentif, la source de confiance et sérénité. En reconnaissance pour leur soutien moral et pour toutes les charges assurées au cours de ces longues années*

*A mes chers frères : Abd el Enour, Jamel Eddine, Lahssen*

*Mes sœurs : Asma, Fatima Zohra*

*Toute la famille : Benariba*

*Une spéciale dédicace pour mes meilleurs amis : Hind, Asma, Soumia, Fatima, Souhila, Zahia, Cherifa et Ouadah Chemss Eddine mon binôme Chahinez.*

*Toutes les personnes qui me connaissent de loin ou de près.*

*A toute la promotion Génie Civil IBG TP 2012/2013.*

*BENARIBA Kheira*

## REMERCIEMENTS

*Nous remercions avant tout le Dieu de nous avoir gardés en bonne santé afin de mener à bien ce projet de fin d'études. Nous remercions également nos familles pour les sacrifices qu'elles ont faits pour que nous terminions nos études.*

*Nous souhaitons exprimer, tout particulièrement, nos vifs remerciements et notre profonde reconnaissance nos encadreur Mme N. ROUISSAT et Mr B. ROUISSAT pour leurs précieux conseils et motivations qui nous ont gardés sur le droit chemin afin de réaliser ce modeste travail et de nous avoir fait confiance et accepté de diriger ce mémoire et qui, malgré leurs multiples obligations, n'ont jamais ménagé aucun effort pour suivre cette étude de près pendant toute la durée du travail, nous les remercions chaleureusement.*

*Nos remerciements s'adressent Mr N.HSSAIN, d'avoir accepté de présider notre jury.*

*Nos vifs remerciements vont aux membres de jury Mr B.GHENANI et Mr Z.DEBBAL d'avoir accepté de lire et d'évaluer ce travail.*

*Enfin, Nos plus vifs remerciements s'adressent aussi à tous ceux qui nous ont aidés, encourager et nous ont soutenus.*

BENAZZA & BENARIBA

## RESUME

L'Algérie fait face actuellement à une demande en eau sans cesse croissante du fait de l'évolution démographique du pays ainsi que l'évolution de besoin en eau de la population, de l'agriculture et de l'industrie.

Les moyens de mobilisation classiques de la ressource en eau ont toujours été orientés vers la grande hydraulique notamment les grands barrages.

Toutefois, les délais de concrétisation de ces grands ouvrages sont trop longs (études, réalisation, transfert,...etc).

La mobilisation superficielle par les ouvrages classés au niveau de la petite et moyenne hydraulique est à la portée des compétences nationales et permet d'offrir aux périmètres d'irrigation de moyenne taille, dans des délais compétitifs, une ressource en eau s'adaptant convenablement au caractère éparse de ces périmètres.

C'est dans cette optique, que le présent mémoire s'intègre. il s'agit de l'étude de conception du barrage de l'Oued Sidi Aissa (wilaya de Tsemssilt) pour deux variantes de conception, l'une en digue homogène et l'autre en digue zoné à noyau central qui vient palier éventuellement à l'insuffisance quantitative des matériaux imperméables.

**Mots clés** : barrage en terre, barrage homogène, barrage à noyau central, modélisation, Plaxis

## ملخص

الجزائر تواجه حاليا زيادة الطلب على المياه نتيجة للتغيرات الديموغرافية في البلاد وتطورا لاحتياجات المائية للسكان والزراعة والصناعة.

إن الإمكانيات الاستغلالية الكلاسيكية للمصادر المائية دائما موجهة لهندسة الري وتحديد السدود الكبيرة.

توقيت تنفيذ هذه المنشآت العظيمة تدوم فترة طويلة جدا (دراسة, انجاز, نقل.....الخ)

تتم التعبئة السطحية عن طريق هذه المنشآت التي تصنف على مستوى هيدروليكية صغيرة و متوسطة في نطاق كفاءات وطنية التي تتيح لنا الري في أوقات تنافسية.

و في هذا السياق تم دمج هذه المذكرة من اجل دراسة و تصميم سد واد سيدي عيسى (ولاية تيسمسيلت) لنوعين مختلفين من التصميم: سد متجانس, سد محدد ذو نواة مركزية و قد نتطرق لهذا الأخير في حالة نقص او عدم كفاية المواد الغير النافذة للماء

الكلمات الرئيسية: السد الترابي, السد المتجانس, السد المحدد, النمذجة plaxis

## ABSTRACT

Algeria is currently facing a water demand increasing due to demographic changes the country and evolution of water requirement of the population, agriculture and industry.

The classic means of mobilization of water resources have always been geared toward large hydro including large dams.

However, the times of concretization of these great works are too long (studies, realization, transfer,....etc).

The superficial mobilization by the works classified on the level of small and average hydraulics is with the range of national competences and makes it possible to offer to the perimeters of irrigation of average cuts, within competitive times, a scattered water resource adapting suitably to the character of these perimeters.

It is accordingly, which the present report integre. The work began designed to study and make conception of the Oued Sidi Aissa (wilaya of Tessemssilte) for two alternatives of design, one in homogeneous dam and the other dam of its zone with core which possibly comes stage to the quantitative insufficiency from impervious materials.

**Key words:** earth dam, homogeneous dam, zoned dam, modeling, Plaxis.

# TABLE DES MATIERES

## INTRODUCTION GENERALE

### CHAPITRE I : SYNTHÈSE SUR LES ETUDES DES DIGUES DE PETITS BARRAGES

I.1	Introduction : .....	3
I.2	Etude climatique : .....	3
I.2.1	Introduction : .....	3
I.2.2	Les conditions climatiques : .....	4
I.2.3	Climatologie : .....	4
I.3	Etude topographique : .....	7
I.3.1	Introduction : .....	7
I.3.2	Importance : .....	7
I.3.3	Echelle du bassin versant : .....	8
I.3.4	Echelle de la vallée : .....	8
I.3.5	Echelle du site barrage : .....	8
I.4	Etude hydrologique : .....	8
I.4.1	Introduction : .....	8
I.4.2	Indice de compacité de GRAVELIUS : .....	9
I.4.3	La densité de drainage : .....	9
I.4.4	Courbe hypsométrique : .....	9
I.4.5	Indice de pente et relief : .....	10
I.5	Hydrologie du bassin versant : .....	12
I.5.1	Pluie de durée égale au Temps de concentration : .....	12
I.5.2	Pluie maximale journalière : .....	13
I.5.3	Temps de concentration : .....	13



I.5.4	Paramètres hydrologiques :.....	14
I.5.5	Etude de la crue : .....	17
I.5.6	Apport solide et volume mort :.....	18
I.5.7	Volume total du barrage : .....	19
I.6	Etude géologique et géotechnique :.....	19
I.6.1	Introduction :... ..	19
I.6.2	Phasage des études :.....	19
I.6.3	Caractéristique des matériaux :.....	20
I.7	Conclusion :.....	22

## CHAPITRE II : ETUDE DE CONCEPTION DE LA DIGUE DU BARRAGE OUED SIDI AISSA :

II.1	Principe de conception des digues de barrages : .....	23
II.2	Situation :.....	23
II.3	Localisation de site de barrage : .....	24
II.4	Caractéristiques du Bassin versant :.....	25
II.5	Estimation de l'apport moyen annuel $A_0$ : .....	25
II.6	Variabilité de l'apport : .....	26
II.7	Apport des solides : .....	27
II.8	Volume total:.....	29
II.9	Volume utile:.....	30
II.10	Détermination tranches des réservoirs au dessus de la retenue normale.....	30
II.10.1	Revanche :.....	30
II.10.2	La côte des plus hautes eaux PHE.....	31
II.10.3	La hauteur de la digue .....	31
II.10.4	Largeur de la crête.....	31
II.10.5	Pente des talus .....	32
II.10.6	Dispositifs de drainage .....	33
II.10.7	Protection du talus amont contre l'effet de batiage.....	34
II.10.8	Profil type de la digue .....	35

II.11 Conclusion .....	37
------------------------	----

## CHAPITRE III : ETUDE DES INFILTRATIONS A TRAVERS LE BARRAGE :

III.1 Introduction .....	38
III.2 Etude des infiltrations dans le barrage et ses fondations .....	39
III.2.1 Détermination de l'équation de la ligne de saturation .....	39
III.2.2 Présentation des profils .....	42
III.2.3 Etude des infiltrations à travers le barrage d'Oued Sidi Aissa .....	42
III.2.4 Objectif .....	43
III.2.5 Information générales sur le code de calcul utilisé .....	45
III.3 Profils utilisés au niveau de modélisation : .....	47
III.4 Résultats de la modélisation : .....	48
III.4.1 Variante barrage homogène .....	48
III.4.2 Variante barrage zoné, à noyau central .....	56
III.5 Interprétation des résultats : .....	61
III.5.1 Barrage homogène .....	61
III.5.2 Barrage zoné, à noyau central .....	62
III.6 Conclusion .....	62

## CONCLUSION GENERALE

## LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Abaque de l'indice d'aridité de DEMARTONNE.....	6
Figure I.2 : Abaque de l'indice et climagramme de L.EMBERGER.....	7
Figure I.3 : Modèle de courbe hypsométrique.....	10
Figure I.4 : Méthodologie des études géologique et géotechnique.....	20
Figure II.1 : Localisation du site sur l'Oued Sidi Issa (extrait de carte Taine N°161, 1/50 000°).....	24
Figure II.2 : Courbe caractéristique $V=f(H)$ .....	28
Figure II.3: Courbes caractéristiques $V=f(S)$ .....	29
Figure II.4 : Profil type du barrage .....	36
Figure II.5 : Profil type du barrage zoné.....	36
Figure III.1: Modèle du réseau découlement sur un massif de barrage.....	41
Figure III.2 : Modèle de génération du maillage « code de calcul PLAXIS ».....	45
Figure III.3 : Représentation du modèle géométrique du projet (cas N°1).....	47
Figure III.4: Représentation du modèle géométrique du projet (cas N°2).....	48
Figure III.5 : Schéma représentatif du maillage de barrage homogène .....	49
Figure III.6: Présentation de la condition initiale avec charge amont correspondante (Barrage homogène) .....	49
Figure III.7: Génération de la ligne de saturation (Barrage homogène).....	50
Figure III.8: Schéma représentatif de maillage déformé (Barrage homogène) .....	50
Figure III.9: Schéma représentatif des déplacements (Barrage homogène).....	51
Figure III.10 Schéma représentatif de la contrainte totale (Barrage homogène).....	52
Figure III.11: Schéma représentatif de la contrainte effective (Barrage homogène) .....	52
Figure III.12 : Schéma représentatif de la pression interstitielle (Barrage homogène).....	53
Figure III.13 : Schémas représentatifs des profils d'analyse (cas barrage homogène).....	54
Figure III.14: Schéma représentatif du maillage (variante barrage zoné) .....	56

---

Figure III.15: Présentation de la condition initiale avec charge amont correspondante (Barrage zoné) .....	56
Figure III.16: Génération de la ligne de saturation (Barrage zoné).....	57
Figure III.17: Schéma représentatif de maillage déformé (Barrage zoné) .....	57
Figure III.18: Schéma représentatif des déplacements (Barrage zoné).....	58
Figure III.19: Schéma représentatif de la contrainte totale (Barrage zoné).....	58
Figure III.20: Schéma représentatif de la contrainte effective (Barrage zoné) .....	59
Figure III.21: Schéma représentatif de la pression interstitielle (Barrage zoné).....	60
Figure III.22 : Schémas représentatifs des profils d'analyse (cas barrage zoné).....	60

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Classification de l'ORSTOM. ....	11
Tableau 1.2 : Classification du relief selon Ds. ....	11
Tableau I.3 : Variables réduites de GAUSS pour différentes fréquences .....	16
Tableau II.1 : Récapitulatif de l'estimation de l'apport moyen annuel $A_0$ :.....	26
Tableau II.2 : Estimation des apports fréquentielles .....	27
Tableau II.3 : Valeurs des pentes des talus en fonction de la hauteur et le type de la digue... .....	33
Tableau III.1 : Paramètres mécaniques et hydrauliques du barrage .....	43
Tableau III.2: Synthèse des résultats de la modélisation (barrage homogène) .....	55
Tableau III.3 : Les résultats de déplacements (barrage homogène).....	55
Tableau III.4: Synthèse des résultats de la modélisation (barrage zoné).....	60
Tableau III.5: Les résultats de déplacements (barrage zoné).....	61

## Nomoculture

- $P_0$  : Pluviométrie moyenne annuelle.
- $T_0$  : Température en moyenne annuelle.
- $Q_2$  : quotient pluvio-thermique d'EMBERGER.
- $M$  : température moyenne du mois plus chaud [kelvin].
- $m$  : température moyenne du mois plus froid [kelvin].
- $P$  : périmètre du bassin.
- $A$  : surface du bassin.
- $K_c$  : indice de compacité.
- $\sum L_e$  : Somme des longueurs des cours d'eau.
- $A$  : surface du bassin versant.
- $I_g$  : indice global de Roche
- $D$  : dénivelée [m].
- $I_g$  : Indice de pente global [m/Km].
- $A$  : aire du bassin [km<sup>2</sup>].
- $L$  : longueur de rectangle équivalent.
- $S_i$  : surface partielle entre courbes de niveau.
- $l$  : largeur du rectangle équivalent.
- $B_i$  : la fraction de la surface totale du bassin comprise entre  $a_{i-1}$  et  $a_i$  (courbe hypsométrique).
- $S$  : surface totale du bassin versant.
- $a_i$  : courbe de niveau de rang  $\ll i \gg$  compté à partir du sommet.
- $b$  : Exposant climatique régional, cartographier par BODY.
- $P_{j_{\max}}$  (%) : Pluie fréquentielle [mm].
- $t_c$  : Temps de concentration en heures.
- $C_v$  : Coefficient de variation.
- $P_{j_{\max}}$  : Pluie moyenne maximale journalière.
- $\mu$  : Variable réduite de GAUSS.
- $T_c$  : temps de concentration du bassin versant en heures.

A : surface du bassin	[Km <sup>2</sup> ].
L : longueur du talweg principal	[Km].
H : différence entre l'altitude moyenne et celle de l'exutoire.	
I : pente moyenne du talweg principal.	
M <sub>0</sub> : Le module spécifique moyen	[l/s.km <sup>2</sup> ].
P <sub>0</sub> : Pluviométrie moyenne annuelle	[m].
A <sub>0</sub> : Apport moyen annuel	[m <sup>3</sup> ].
A : Superficie du bassin versant	[km <sup>2</sup> ].
K : Constante (k=31,54.10 <sup>3</sup> )	
Y : Lane de ruisselée	[mm].
P <sub>0</sub> : Pluviométrie annuelle en mm.	
A% : L'apport annuel pour une fréquence 80 %.	
A <sub>0</sub> : Apport moyen annuel.	
C <sub>v</sub> : Coefficient de variation qui est déterminé en fonction du module moyen spécifique ou débit unitaire M <sub>0</sub>	
μ : Variable réduite de Gauss.	
P : Précipitation annuelle moyenne	[m].
M <sub>0</sub> : Débit unitaire en l/s.km <sup>2</sup>	
K <sub>s</sub> : Coefficient de réduction égal a 1 (K <sub>s</sub> =1) pour les cours d'eau temporaire.	
M <sub>0</sub> : Débit unitaire moyen	[ l/s.km <sup>2</sup> ].
C <sub>v</sub> : Coefficient de variation de l'apport.	
P <sub>Tc</sub> : Pluie de durée égale au temps de concentration.	
α: Coefficient de ruissellement.	
f : Coefficient de forme de l'hydrogramme égale à 1,2 pour les bassin de faible superficie.	
L : Longueur du talweg principal	[Km].
P : Précipitation moyennes annuelles	[m].
T : Période de retour, dans notre cas 100ans.	
A : Apport solide spécifique	[T/km <sup>2</sup> .an].
S : Superficie du bassin versant	[km <sup>2</sup> ].
ρ: Densité spécifique de dépôt solide (ρ=1.6 T/km <sup>3</sup> )	
n : Nombre d'année d'exploitation.	
A <sub>80%</sub> : Apport fréquentiel de 80%	
V <sub>m</sub> : Volume mort.	
V <sub>t</sub> : Volume total du réservoir.	

Ce : Coefficient d'écoulement tiré de la courbe  $C_e = F(P_0)$

Cv : Coefficient de variation calculé à partir du module spécifique de l'apport moyen annuel.

Hv : La hauteur des vagues [m].

V : Vitesse de propagation des vagues [m/s]

F: Fetch [Km].

Vv : Vitesse du vent [Km/h]

m<sub>1</sub> et m<sub>2</sub> : Pentes amont et aval du barrage

e : épaisseur de l'enrochement [m].

v : vitesse de propagation des vagues [m/s].

c : fonction de pente du talus et du poids spécifique de l'enrochement et des talus





## INTRODUCTION GENERALE :

Lorsque les conditions du site le permettent, le barrage en terre, s'avère, indiscutablement, l'ouvrage le plus économique à réaliser. Néanmoins, les difficultés majeurs résident dans le fait qu'une structure en matériaux fins combinée aux effets de la charge d'eau cumulée dans le réservoir peut engendrer des contraintes de conception faisant appel à de multiples compétences de profils différents. Si financièrement, pour les grands barrages, les moyens d'investigations et d'études sont importants, il n'en est pas de même pour les ouvrages de faible ou moyenne taille où les enveloppes financières sont souvent limitées. Une attention particulière est donc accordée aux seuils et critères de sécurité optimaux en fonction des budgets alloués.

Les investigations géologiques et géotechniques limitées pour ce type d'ouvrage font, que pour plusieurs sites, la disponibilité en quantités suffisantes de matériaux imperméables a posé de multiples surprises.

Le présent travail, s'intégrant dans cette vision précise, se veut d'élaborer une étude de conception du barrage sur l'Oued Sidi Aïssa (wilaya de Tissemsilt) pour deux variantes de conception (digue homogène et digue zonée à noyau central).

Ne s'intégrant pas au niveau de notre cursus de formation, la contribution bibliographique sur la conception des barrages en terre était d'une utilité majeure pour prétendre aborder, par le calcul, la conception du barrage, objet de notre mémoire.

La synthèse bibliographique élaborée a englobé l'ensemble des aspects relatifs à la définition du profil type du barrage en s'appuyant sur les études morphologiques, hydrologiques, de définition des tranches du réservoir, de détermination de la géométrie de la digue et de la conception des dispositifs de maîtrise des écoulements.

Les profils types retenus pour les deux variantes ont permis, par la suite, l'aborder dans le détail, l'étude des infiltrations au niveau du barrage. Cette étude constitue l'étape principale de conception et conditionne par conséquent tout le comportement hydraulique de l'ouvrage.

L'étude des infiltrations a été conduite, pour les deux variantes, par le code de calcul Plaxis, en régime permanent. Cette étape a permis également d'entreprendre une analyse paramétrée

en fonction des paramètres de comportement vis-à-vis des écoulements à savoir : contraintes s totales, pressions interstitielles, contraintes effectives et déplacements.

Pour répondre à tous ces objectifs, le mémoire a été structuré en trois chapitres en l'occurrence :

- Synthèse sur les études des digues de petits barrages,
- Etude de conception de la digue du barrage sur l'Oued Sidi Aissa,
- Etude des infiltrations à travers le barrage.

***CHAPITRE I :***  
***Synthèse sur l'étude des***  
***digues de petits barrages***

## **I. SYNTHÈSE SUR L'ÉTUDE DES DIGUES DE PETITS BARRAGES :**

### **I.1 Introduction :**

L'étude préliminaire consiste à réunir le maximum d'informations reliées à l'historique du barrage, ses caractéristiques topographiques, la connaissance de la géologie locale et l'hydrodynamique de la région. Ceci demanderait un compte-rendu des activités entreprises comme la description du site d'approvisionnement des matériaux de construction, la localisation de brèches antérieures s'il y a eu lieu, et les moyens mis en jeu pour y remédier.

En dehors de la planification et des aspects juridiques d'un projet de barrage, les principales études préliminaires à mener avant le choix de l'emplacement du barrage sont:

- Les études topographiques,
- Les études géologiques,
- Les études géotechniques,
- Les études hydrologiques.

Beaucoup d'autres points entrent dans les études préliminaires telles que les conditions relatives à la géographie humaine, les conditions sanitaires etc.

Pour les premières investigations, l'existence aux environs du site de zones d'activités humaines ou d'ouvrages d'art au-dessous du niveau projeté de la retenue, oblige à laisser ces sites, même s'ils sont favorables à la création de réservoirs importants.

Les études sanitaires sont faites pour savoir le degré de pollution au niveau du site et dans quelles mesures cette pollution pourra être un facteur limitant l'utilisation du projet.

### **I.2 Etude climatique :**

#### **I.2.1 Introduction :**

L'étude climatique a pour but de fournir les éléments nécessaires aux aménagements, pour dimensionner les ouvrages hydrauliques qui constituent un des facteurs principaux pour l'aménagement de barrages.[1]

### **I.2.2 Les conditions climatiques :**

Les conditions climatiques influencent de manière prépondérante les conditions d'exécution de l'ouvrage, le délai d'exécution. Il peut en être de même en ce qui concerne la durabilité de barrage. Quelques aspects particuliers sont décrits ci-dessous à titre d'exemple :

- Noyau argileux des barrages en remblai (condition pendant la construction).

La teneur en eau et le critère essentiel de la mise en place et de compactage optimal de noyau. Dans les régions où la saison des pluies est longue et intense (pluies tropicales), la mise en place est souvent interrompue à cause de degré de saturation trop élevé des matériaux.

- Barrage à contrefort (condition pendant l'exploitation).

La différence de température entre la tête du parement amont en contact avec l'eau froide de la retenue et la zone soumise au rayonnement solaire fait apparaître des gradients thermiques importants pouvant conduire à la fissuration du béton.

- Masque amont en béton asphaltique.

Ce matériau est particulièrement sensible aux effets des températures extrêmes :

- Déformation plastique sous température élevée,
- Vieillesse accéléré sous l'effet du gel et de l'exposition au rayonnement solaire.[2]

### **I.2.3 Climatologie :**

#### **a) Etude des précipitations :**

Les conditions climatiques jouent un rôle déterminant dans le régime des cours d'eau, en effet les précipitations agissent dans l'alimentation de l'écoulement du bassin versant.

La précipitation mesurée, soit en hauteur ou en intensité (l'étude des averses) intervient pratiquement dans l'évaluation des différents paramètres. En effet :

- L'évaluation des apports des oueds et les apports fréquents utilise la précipitation moyenne annuelle,
- Les précipitations mensuelles servent l'étude de régularisation du réservoir du barrage,
- Les précipitations de courtes durées (pluie maximale journalière, horaire ou pluie de durée égale au temps de concentration) sont souvent intégrées dans l'évaluation des débits de crues indispensables pour la conception des ouvrages annexes, notamment l'évacuateur des crues.

**b) Etude de température et de l'évaporation :**

L'analyse des séries de températures et des évaporations est insérée au niveau des aspects suivants :

- Caractérisation du climat de la région,
- Estimation des paramètres climatiques,
- Elaboration du calcul de régularisation du réservoir,
- Elaboration du bilan hydrique.[3]

**c) Etude climatologique :**

L'étude du climat de la région se fait par :

**i Tracé du diagramme embrothermique par la méthode de M.Bagnouls et Gaussen :**

Le tracé du diagramme embrothermique par la méthode de M.Bagnouls et Gaussen permet de mettre en évidence les périodes sèches et humides. Pour cela, on trace sur un même graphe les précipitations mensuelles moyennes et les températures mensuelles moyennes, seulement les températures seront sur une échelle en progression logarithmique tandis que les précipitations seront d'une échelle progression linéaire.

Lorsque la température passe au dessous de la précipitation alors la période est dite humide par contre lors que la température passe au dessus de la précipitation, la période est dite sèche.[4]

**ii Calcul de l'indice de Martonne :**

D'après DEMARTONNE: [5]

$$I = \frac{P_0}{T_0 + 10}$$

$P_0$  : Pluviométrie moyenne annuelle.

$T_0$  : Température en moyenne annuelle.

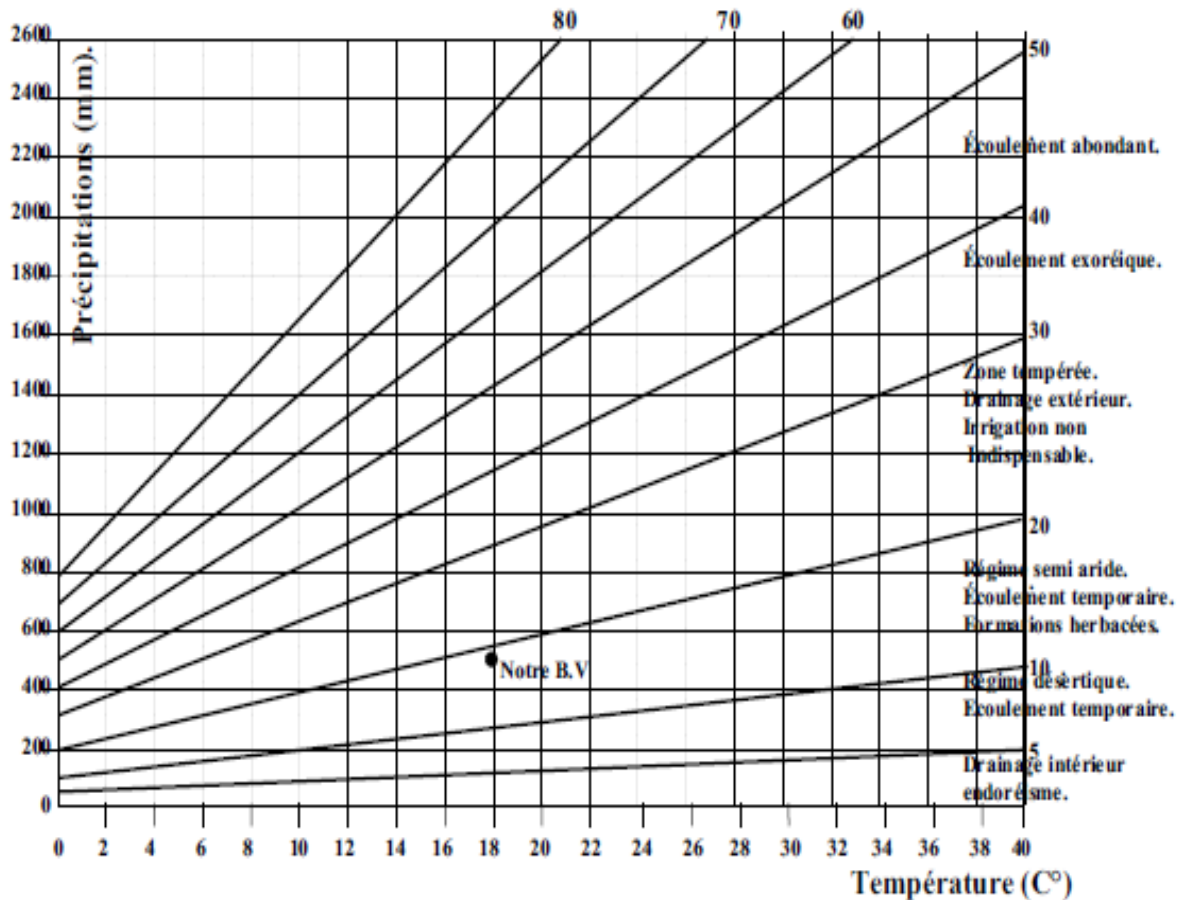


Figure I.1 : Abaque de l'indice d'aridité de DEMARTONNE

**iii Indice et climagramme de L.EMBERGER :**

Le quotient pluvio-thermique d'EMBERGER permet de placer la région étudiée sur le climagramme du même auteur.

$$Q_2 = 2000.P_0 / (M^2 - m^2)$$

$Q_2$  : quotient pluvio-thermique d'EMBERGER.

$M$  : température moyenne du mois plus chaud (kelvin).

$m$  : température moyenne du mois plus froid (kelvin). [4]



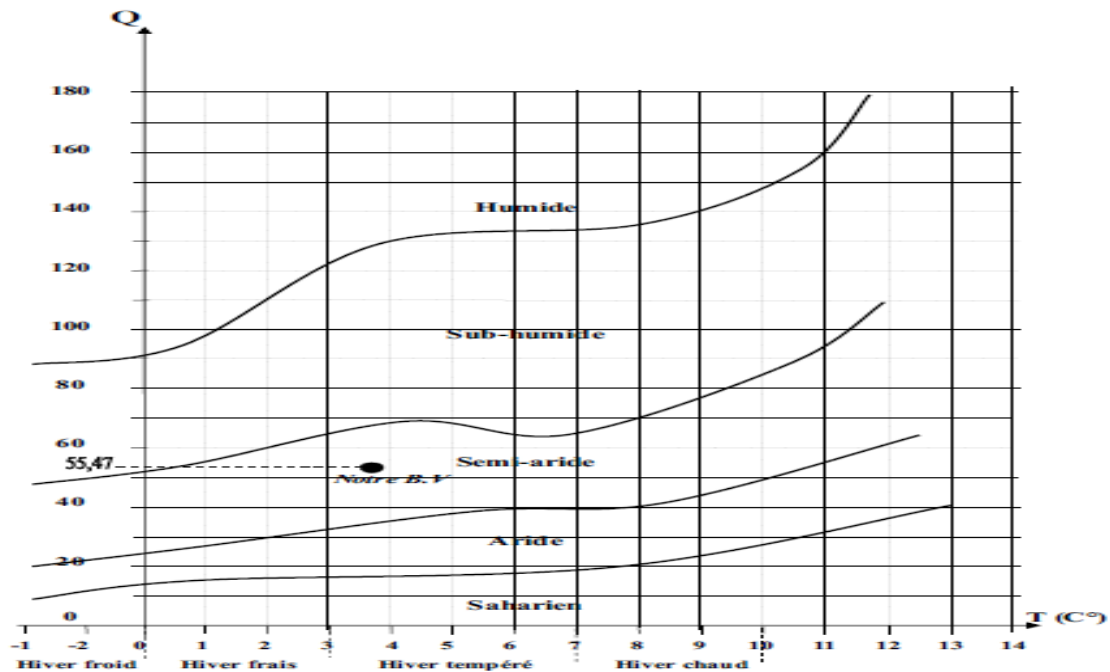


Figure 1.2 : Abaque de l'indice et climagramme de L.EMBERGER

## I.3 Etude topographique

### I.3.1 Introduction :

La topographie constitue le support essentiel du travail du géologue qui doit toujours situer plus ou moins précisément les observations qu'il réalise, tant en planimétrie qu'en altimétrie. Selon le degré d'avancement des études et l'importance des problèmes, on peut distinguer la topographie simplifiée ou la topographie régulière.[6]

### I.3.2 Importance :

L'étude topographique est engagée au stade de l'étude de faisabilité. Elle est basée sur la cartographie aérienne et les fonds de cartes à l'échelle 1/25 000 ou 1/50 000.

Elles permettront de choisir l'emplacement final du barrage qui doit remplir les conditions suivantes:

- La largeur de la gorge doit être la plus faible possible afin de réduire le volume des remblais,
- La capacité du réservoir doit être la plus grande possible pour une hauteur donnée du plan d'eau.[6]

### **I.3.3 Echelle du bassin versant :**

Elle est basée sur :

- Photographie aérienne,
- Cartes aux échelles appropriées,
- Situation de la retenue à l'échelle du bassin versant,
- Morphologie : études hydrologiques,
- Précision des cartes : définir les éléments caractéristiques du bassin, réseau hydrographique, définition du relief.[7]

### **I.3.4 Echelle de la vallée :**

Elle doit définir :

- Etendue de la carte à l'aval du barrage : propagation des ondes de la crue et leur incidence sur la sécurité,
- Les sections de contrôle et leurs dimensions,
- Pente de l'oued.[7]

### **I.3.5 Echelle du site barrage :**

Les objectifs de cette étude se résument en ce qui suit :

- Courbe caractéristique de remplissage,
- Estimer la capacité de la retenue et sa surface en fonction de la cote du plan d'eau,
- Evaluer le volume des divers ouvrages,
- Proposer leur implantation,
- Repérer les ballastières et les zones exploitables,
- Planter les aménagements annexes (voies, lignes électriques....ect),
- Fournir aux géologues et ingénieurs les fonds de plans pour les études et établissement de l'avant projet détaillé.[7]

## **I.4 Etude hydrologique :**

### **I.4.1 Introduction :**

L'étude hydrologique a pour but l'estimation de tous les paramètres hydrologiques nécessaires au dimensionnements définitifs des ouvrages : apports moyens et fréquents, distribution des apports, débits maximal fréquentiel, volumes et hydrogramme de crue, apport solide.[8]

#### I.4.2 Indice de compacité de GRAVELIUS :

Le coefficient de compacité de GRAVELIUS résulte de la comparaison de notre périmètre de bassin versant à celui d'un cercle ayant la même surface. Ce coefficient caractérise la forme du bassin versant en différenciant les bassins allongés des bassins plus ramassés pour cela nous le comparons avec le coefficient de compacité d'un cercle qui égal à 1. [4]

$$K_c = 0.28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Où :

P : périmètre du bassin.

A : surface du bassin.

K<sub>c</sub> : indice de compacité.

#### I.4.3 La densité de drainage :

Pour l'étude des crues, on calcule par fois la densité de drainage du bassin qui est définie comme la longueur moyenne du réseau hydrographique par kilomètre carré de la surface du bassin. Elle est donné par :

$$D_d = \frac{\sum Le}{A}$$

$\sum Le$  : Somme des longueurs des cours d'eau.

A : surface du bassin versant.[8]

#### I.4.4 Courbe hypsométrique :

Partant de la répartition par tranches d'altitudes du bassin, on pourra tracer la courbe qui donne la répartition des altitudes en fonction de la superficie du bassin.

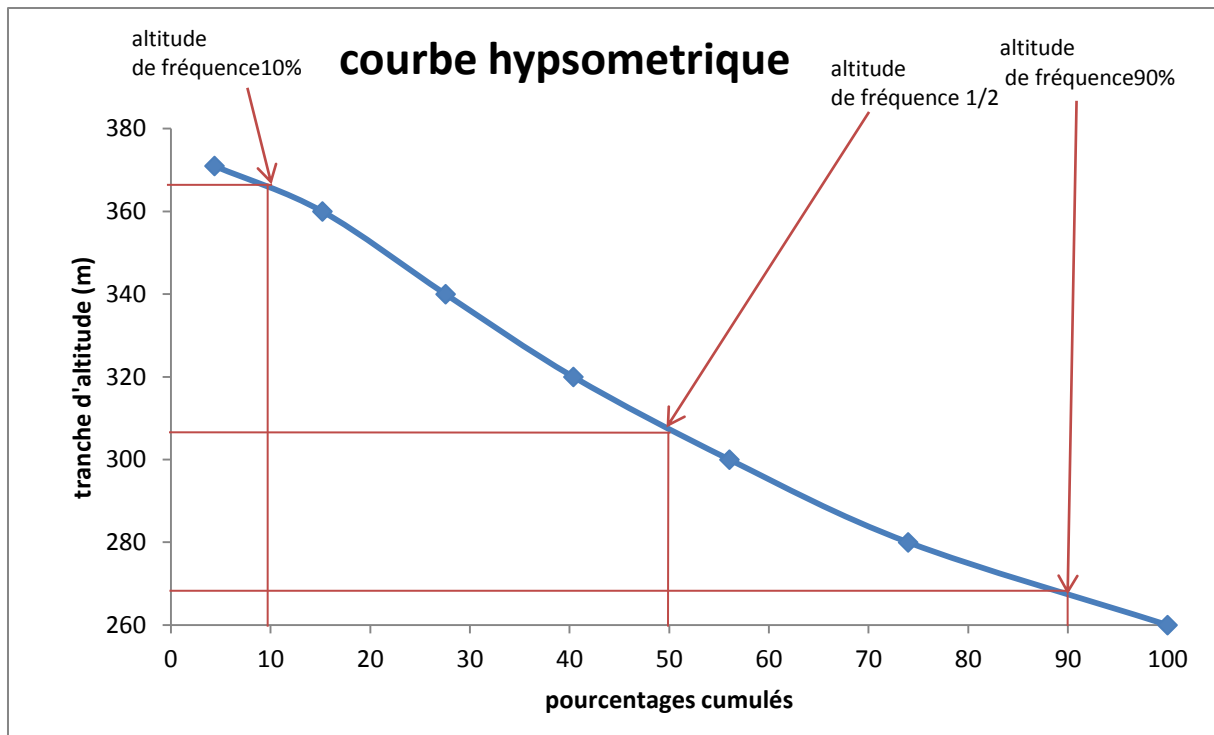


Figure 1.3: Modèle de courbe hypsométrique

Selon « STRALER » la courbe hypsométrique est le reflet de l'état d'équilibre, dynamique, potentiel du bassin. Selon la concavité de la courbe, il y a lieu de juger de l'état du bassin versant vis-à-vis de l'érosion. [3]

#### I.4.5 Indice de pente et relief :

##### a) Indice de pente globale (ROCHE):

Le relief joue un rôle important, car il commande en grande partie l'aptitude au ruissellement des terrains, Son appréhension peut être faite à l'aide de l'indice de pente global  $I_g$  donné par

la relation 
$$I_g = \frac{D}{L}$$

Où :

$I_g$  : indice global de Roche

D: dénivelée (m).

Sur la courbe hypsométrique déjà tracée, on prend les points tels que la surface supérieure ou inférieure soit égale à 5% de la surface totale.

$H_{5\%}$  et  $H_{95\%}$  sont les altitudes entre lesquelles s'inscrivent 90% de la surface du bassin. La dénivelée D est donc égale à  $H_{5\%} - H_{95\%}$ . [3]

Tableau I.1: classification de l'ORSTOM.

Type de relief	Indice de pente globale
Relief très faible	$Ig < 0.002 \text{ m/km}$
Relief faible	$0.002 < Ig < 0.005$
Relief assez faible	$0.005 < Ig < 0.01$
Relief modéré	$0.01 < Ig < 0.02$
Relief assez fort	$0.02 < Ig < 0.05$
Relief fort	$0.05 < Ig < 0.5$
Relief très fort	$0.5 \text{ m/km} < Ig$

**b) Dénivelée spécifique :**

$Ig$  est corrigé de l'effet de surface par utilisation de la dénivelée spécifique :

$$Ds = Ig \cdot A^{1/2}$$

$Ig$  : Indice de pente global (m/Km).

$A$  : aire du bassin (km<sup>2</sup>).

La dénivelée spécifique apparaît donc comme une correction de la dénivelée simple par application d'un coefficient qui dépend de la forme du bassin.

Tableau I.2 : Classification du relief selon  $Ds$ . [3]

Type de relief	Dénivelée spécifique
Relief très faible	$Ds < 10 \text{ m}$
Relief faible	$10 \text{ m} < Ds < 25 \text{ m}$
Relief assez faible	$25 \text{ m} < Ds < 50 \text{ m}$
m Relief modéré	$50 \text{ m} < Ds < 100 \text{ m}$
Relief assez fort	$100 \text{ m} < Ds < 250 \text{ m}$
Relief fort	$250 \text{ m} < Ds < 500 \text{ m}$
Relief très fort	$Ds > 500 \text{ m}$

Les valeurs de  $Ds$  (Tableau I.2), traduisent bien l'importance du volume montagneux et la forte incision du relief. [3]

### c) indice de pente de roche :

C'est indice qui rend compte de l'influence de la pente sur le régime hydraulique du bassin versant, il est également défini par Roche à partir du rectangle équivalent et est égal à :

$$I_p = \frac{1}{\sqrt{L}} \cdot \sum \sqrt{B_i \cdot (a_i - a_{i-1})}$$

L : longueur de rectangle équivalent.

$$X = \frac{S_i}{l}$$

$S_i$  : surface partielle entre courbes de niveau.

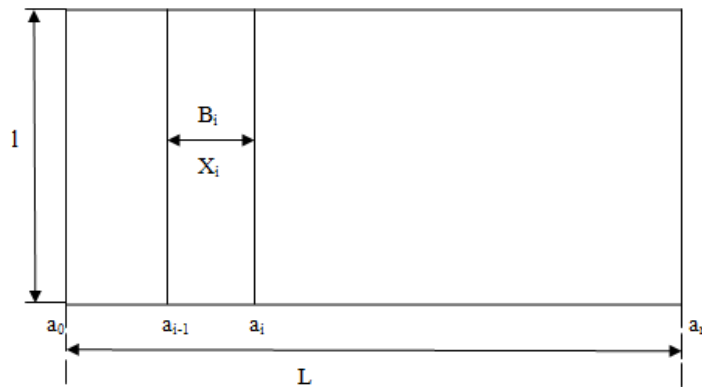
l : largeur du rectangle équivalent.

$$B_i = \frac{S_i}{S}$$

$B_i$  : la fraction de la surface totale du bassin comprise entre  $a_{i-1}$  et  $a_i$  (courbe hypsométrique).

S : surface totale du bassin versant.

$a_i$  : courbe de niveau de rang  $\ll i \gg$  compté à partir du sommet.



## I.5 Hydrologie du bassin versant :

### I.5.1 Pluie de durée égale au Temps de concentration :

Ce paramètre est obtenu par la relation de Montana :

$$P_{t_c} = P_{j_{\max}} (\%) \left( \frac{t_c}{24} \right)^b$$

b : Exposant climatique régional, cartographier par BODY.

$P_{j_{\max}}$  (%) : Pluie fréquentielle en mm.

$t_c$  : Temps de concentration en heures.

### I.5.2 Pluie maximale journalière :

Ce paramètre peut être estimé en supposant une distribution d'une loi log-Normale.

$$P_j(F) = \frac{P_{j_{\max}}}{\sqrt{1+C_v^2}} e^{u \sqrt{\ln(C_v^2+1)}}$$

Où :

$C_v$  : Coefficient de variation.

$P_{j_{\max}}$  : Pluie moyenne maximale journalière.

$\mu$  : Variable réduite de GAUSS.

### I.5.3 Temps de concentration :

Théoriquement le temps de concentration est le temps nécessaire à l'eau pour s'écouler depuis l'élément hydrauliquement le plus éloigné en amont du bassin jusqu'à l'exutoire.

Il existe plusieurs formules pour le calcul du temps de concentration, de ce fait et pour plus de précaution, il est préférable de ne pas se limiter à une seule valeur mais d'en calculer plusieurs et retenir la valeur de  $t_c$  la plus probable en fonction des caractéristiques du bassin versant.

Parmi les méthodes de calcul on cite:

- Formule de GIANDOTTI :

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1,5.L}{0,8\sqrt{h_{moy} - h_{min}}}$$

- Formules de KIRPICH :

$$T_c = 0,6615.L^{0,77} . I^{-0,385}$$

- Formule de PASSINI :

$$T_c = \left[ \frac{4 \sqrt[3]{A.L}}{\sqrt{I}} \right]^{0,75}$$

- Formule de S.C.S :

$$T_c = \left( 0,87 \cdot \frac{L^3}{H} \right)^{0,385}$$

Avec :

$T_c$  : temps de concentration du bassin versant en heures.

$A$  : surface du bassin en  $Km^2$ .

$L$  : longueur du talweg principal en  $Km$ .

$H$  : différence entre l'altitude moyenne et celle de l'exutoire.

$$H = h_{moy} - h_{min}$$

$I$  : pente moyenne du talweg principal.

D'après les quatre méthodes les résultats de temps concentration varient, pour cela on prendra la moyenne de ces trois résultats et on aura  $T_c$ .

#### **I.5.4 Paramètres hydrologiques :**

##### **a) Apport moyen annuel $A_0$ :**

Les potentialités en eau du site s'évaluent à l'aide de l'apport moyenne annuel  $A_0$ . D'après une étude faite par l'A.N.R.H en 1977, il peut être déterminé par la formule suivante :[4]

$$A_0 = m_0 \cdot A \cdot K$$

$$\text{Avec : } m_0 = 11.8 \cdot P_0^{2.82}$$

Où :

$M_0$  : Le module spécifique moyen en  $l/s.km^2$ .

$P_0$  : Pluviométrie moyenne annuelle en  $m$ .

$A_0$  : Apport moyen annuel en  $m^3$ .

$A$  : Superficie du bassin versant en  $km^2$ .

$K$  : Constante ( $k=31,54 \cdot 10^3$ )

##### **b) Lamme d'eau ruisselée ( $y$ ) :**

C'est la hauteur moyenne annuelle des précipitations uniformément répartie sur le bassin. [8]

$$Y = \frac{A_0}{A \cdot 1000}$$

Où :

$Y$  : Lamme de ruisselée en  $mm$ .



$A_0$  : Apport moyen annuel en  $m^3$ .

$A$  : Surface du bassin versant en  $m^2$ .

**c) Coefficient d'écoulement « Ce » :**

C'est le rapport de la valeur de la lame d'eau ruisselée par la pluviométrie annuelle moyenne.

[9]

$$Ce = \frac{Y}{P_0}$$

Où

$Y$  : Lame de ruisselée en mm.

$P_0$  : Pluviométrie annuelle en mm.

**d) L'apport fréquentiel  $A_{80\%}$  :**

Les barrages sont dimensionnés généralement pour une fréquence de 80 %.

C'est le volume d'eau qu'on pourra assurer huit (08) années sur dix (10), on le calcule à partir de la loi d'ajustement statistique de GALTON. En supposant une distribution d'une loi log-Normale des apports.[9]

$$A_{80\%} = \frac{A_0}{\sqrt{1+C_v^2}} e^{u \sqrt{\ln(C_v^2+1)}}$$

Avec :

$A_{80\%}$  : L'apport annuel pour une fréquence 80 %.

$A_0$  : Apport moyen annuel.

$C_v$  : Coefficient de variation qui est déterminé en fonction du module moyen spécifique ou débit unitaire  $M_0$

$\mu$  : Variable réduite de Gauss.

Tableau I.3: Variables réduites de GAUSS pour différentes fréquences[3]

Fréquence	Période de retour (an)	Variable de GAUSSE (u)
80	1,25	-0,8428
50	2	0,00
20	5	0,8428
10	10	1,2850
5	20	1,6449
2	50	2,0571
1	100	2,328
0,1	1000	3,10

e) **Débit unitaire  $M_0$  :**

- Formule de DERI :

$$M_0 = 11,8.P_0^{2.82}$$

- Formule d'UKRGI PROVODKUZ :

$$M_0 = \left(\frac{P}{340}\right)^{2.24}$$

Avec :

P : Précipitation annuelle moyenne en m.

$M_0$  : Débit unitaire en l/s.km<sup>2</sup>

f) **Coefficient de variation de l'apport :**

- formule de PADOUN :

$$Cv = [0.93 / (M_{0\text{moy}}^{0.23})] . K_s$$

- Formule d'YKRGUPODKHZ :

$$Cv = 0.7 / (M_{0\text{moy}}^{0.125})$$

Avec :

$K_s$  : Coefficient de réduction égal a 1 ( $K_s=1$ ) pour les cours d'eau temporaire.

$M_0$  : Débit unitaire moyen en l/s.km<sup>2</sup>.

$Cv$  : Coefficient de variation de l'apport.[5]

### I.5.5 Étude de la crue :

La crue dépend essentiellement de l'abondance et de l'intensité de la pluie : son évolution obéit principalement à la puissance et l'intensité de l'averse.

Les procédés dévaluation des probabilités de dépassement des crues maximales annuelles reposent en majorité sur le principe de l'ajustement d'une loi de probabilité de formes spécifiée à une série (plus au moins longue) de relevée de crue annuel. [8]

#### a) débit maximal :

➤ Model SOKOLOVSKY :

$$Q_{max} = \frac{0,28 \cdot P_{Tc} \cdot \alpha \cdot S}{T_c} \cdot f$$

$P_{Tc}$  : Pluie de durée égale au temps de concentration.

$\alpha$ : Coefficient de ruissellement.

$f$  : Coefficient de forme de l'hydrogramme égale à 1,2 pour les bassin de faible superficie.

➤ Modèle Rationnel :

$$Q_{max} = \frac{C \cdot P_{Tc} \cdot S}{3,6 \cdot T_c}$$

La méthode est recommandée pour les retenues collinaires puisqu'elle considère non seulement les paramètres du bassin versant mais également les paramètres liés à la forme de l'hydrogramme.[8]

➤ La méthode de MALLET-GAUTTIER a tendance à la surestimation des débits.

$$Q_{max} = 2 \cdot K \cdot \log(1 + A + P_0) \cdot \frac{S}{\sqrt{L}} \cdot \sqrt{1 + 4 \log T - \log S}$$

De multiples incertitude sont liées aux choix des coefficients topographiques A et K, ils varient comme suit :

$$2 \leq K \leq 3 \quad \text{et} \quad 22 \leq K \leq 30$$

L : Longueur du talweg principal en Km.

P : Précipitation moyennes annuelles (en m).

T : Période de retour, dans notre cas 100ans.

**b) volume de la crue :**

$$V_{\max} = \frac{Q_{\max} \cdot T_c}{f}$$

**I.5.6 Apport solide et volume mort :**

➤ Apport solide :

Les formules de SOGREAH inspirées des relations de TIXERONT, donnent les apports solides spécifiques  $A(T/Km^2/An)$  en fonction du ruissellement annuel de crue (mm) et de la perméabilité des bassins :[7]

Perméabilité élevée :  $A=8,5.y^{0,15}$

Perméabilité moyenne a élevée :  $A=75. y^{0,15}$

Perméabilité faible à moyenne :  $A=350. y^{0,15}$

Perméabilité faible :  $A=1400. y^{0,15}$

Imperméabilité :  $A=3200.y^{0,15}$

➤ Volume mort :

Le volume mort représente la capacité dite mort du barrage. Il est déterminé en fonction de l'envasement de la retenue par des apports solides, et les produits d'affouillement du bord de l'oued durent une période de fonction du barrage.[4]

$$V_m = \frac{S.A.n}{\rho}$$

Avec :

A : Apport solide spécifique en  $T/km^2.an$ .

S : Superficie du bassin versant en  $km^2$ .

$\rho$ : Densité spécifique de dépôt solide ( $\rho=1.6 T/km^3$ )

n : Nombre d'année d'exploitation.

### **I.5.7 Volume total du barrage :**

Le volume total du barrage sera donné par la somme de l'apport fréquentiel de 80% et du volume mort.[3]

$$V_t = V_{A80\%} + V_m$$

$A_{80\%}$  : Apport fréquentiel de 80%

$V_m$  : Volume mort.

$V_t$  : Volume total du réservoir.

## **I.6 Etude géologique et géotechnique :**

### **I.6.1 Introduction :**

Les études géologiques et géotechniques ont pour but de contrôler :

- L'étanchéité et la résistance des fondations,
- L'étanchéité et la cuvette et la stabilité des ses versants,
- La présence en quantité suffisante (1.5 à 2 fois le volume du remblai) de matériaux convenables pour la construction du barrage.

### **I.6.2 Phasage des études :**

Elles doivent être confiées à des organismes spécialisés :

**La première phase** de ces études consiste, après une éventuelle visite préliminaire du site, à reconnaître la nature géologique et géotechnique des terrains constituant la zone d'implantation du barrage et la cuvette.

**La deuxième phase** (éventuelle) peut comporter différents types de reconnaissances complémentaires parmi lesquels on peut citer :

- Les sondages carottés (coupe des terrains, mesures de perméabilité à l'aide d'essais LEFRANC et LUGEON, prélèvements intacts),
- Les mesures géophysiques (méthodes sismiques ou électriques) associées aux sondages,
- Les essais mécaniques en place (pénétromètre, scissomètre).

Les résultats de cette deuxième phase peuvent conduire à l'élimination du site.

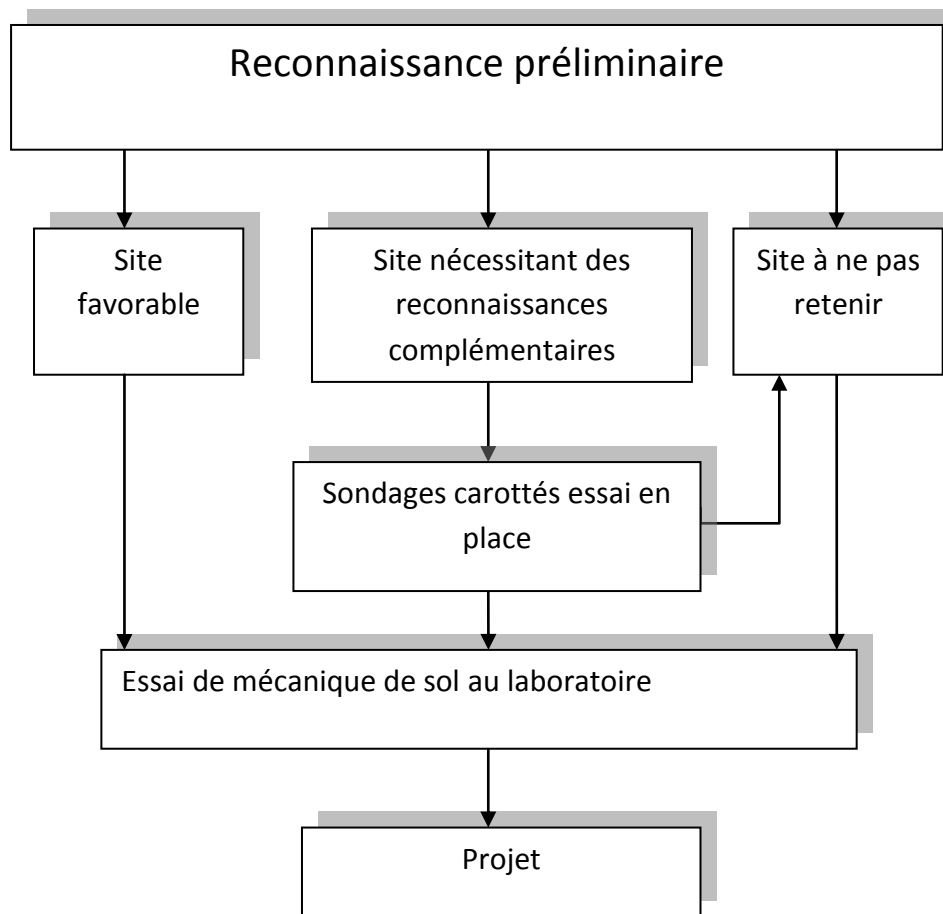


Figure I.4 : Méthodologie des études géologique et géotechnique

**La dernière phase** est constituée par des essais de mécanique des sols au laboratoire :

- Essai d'identification (teneur en eau, granulométrie, limite d'Atterberg),
- Essai de compactage (Proctor Normal) sur les matériaux destinés à la construction du barrage,
- Essais mécaniques et hydrauliques (résistance au cisaillement, essai triaxial, compressibilité à l'oedomètre, perméabilité) sur des échantillons intacts prélevés en fondation et sur des échantillons compactés.[10]

### I.6.3 Caractéristique des matériaux :

#### a) Matériaux et fondations meubles :

Pour ce type de matériaux, globalement qualifié de sol, les essais sont réalisés sur des échantillons prélevés sur le terrain (intacts ou remaniés dans les sondages carottés et dans les tranchées à la pelle). Ces essais se répartissent en :

- Essais d'identification : teneur en eau naturelle, granulométrie et sédimentométrie, limites D'Attemberg, essai au bleu de méthylène, poids spécifique des grains, poids volumique apparent...,
- Essais de compactage des matériaux des zones d'emprunt : essai Proctor Normal,
- Essais mécaniques et hydrauliques : mesure de la résistance à la compression simple, résistance au cisaillement, compressibilité à l'oedomètre, mesure de la perméabilité à l'oedomètre ou au perméamètre.

Le nombre d'essais de chaque type est à adapter au volume probable du remblai, à sa hauteur, au nombre de matériaux de différents types utilisés (cas des barrages zonés) et à la variabilité naturelle des matériaux étudiés.

À titre indicatif, le programme minimal d'essais recommandés pour les matériaux d'emprunt de barrages en terre ne présentant pas de difficulté particulière est déterminé en fonction du volume de matériau à reconnaître (Le volume à reconnaître doit être 1,5 à 2 fois supérieur au volume géométrique du barrage):

- Série d'essais d'identification (teneur en eau naturelle, granulométrie, sédimentométrie, Limites d'Attemberg) : un pour 5 000 à 10 000 m<sup>3</sup> de matériaux à mettre en œuvre avec un minimum de cinq essais ;
- Essais de compactage (Proctor Normal et mesure du poids spécifique des grains) : un pour 15 000 à 25 000 m<sup>3</sup> avec un minimum de cinq essais,
- Essais de comportement mécanique et hydraulique (cisaillement, triaxial, compressibilité à l'oedomètre, mesure de la perméabilité) : un pour 30 000 à 50 000 m<sup>3</sup> avec un minimum de trois essais.

Pour la fondation, le nombre d'essais à entreprendre peut être du même ordre de grandeur si l'épaisseur meuble est importante (les essais de compactage étant inutiles).[11]

#### **b) Enrochements :**

Pour les matériaux de type agrégats et enrochements, les essais à réaliser en laboratoire sont :

- Mesure des caractéristiques intrinsèques : densité apparente, étude minéralogique,
- Mesure des caractéristiques d'état : teneur en eau, granulométrie-blocométrie, coefficients de forme (allongement, aplatissement), porosité, degré de fissuration, indice de continuité.
- Mesure des caractéristiques de comportement : résistance aux chocs (essai Los Angeles ou L.A.), à l'abrasion (essai Micro-Deval en présence d'eau, ou MDE), à la

compression simple  $R_c$  (sur carottes cylindriques), à l'alternance de cycles gel-dégel (essai de gélivité). [12]

### **I.7 Conclusion :**

A travers cette synthèse succincte de diverses investigations à réaliser pour la conception des digues de barrages, il ressort la diversité et la complexité des tâches qui nécessitent des compétences pluridisciplinaires. Chaque paramètre évalué sert au dimensionnement d'une partie de l'aménagement ou d'un ouvrage annexe et la fiabilité du paramètre calculé ou mesuré conditionne la sécurité globale du projet d'aménagement.



***CHAPITRE II:***  
***Etude de conception de***  
***la digue sur barrage l'Oued***  
***Sidi Aissa***

## II. ETUDE DE CONCEPTION DE LA DIGUE DU BARRAGE OUED SIDI AISSA :

### II.1 Principe de conception des digues de barrages :

La conception des digues de barrage devra répondre aux 7 critères suivants :

- La digue devra être sécurisée contre les surverses vis à vis des crues par l'aménagement d'un évacuateur de capacité suffisante. A cet aspect devra s'ajouter celui de la possibilité de vidange,
- Les pentes des talus doivent être stables pendant la construction, pendant la mise en eau et la mise en exploitation de l'ouvrage, ainsi que dans les cas de vidange rapide,
- La digue devra être conçue de manière à ne pas imposer des pressions excessives sur la fondation,
- Les infiltrations à travers la digue et le sol de fondation doivent être limitées et contrôlées de façons à éviter des risques de renard,
- La digue doit être sécurisée vis à vis de l'effet des vagues,
- Le talus amont doit être protégé contre le batillage (batillage des matériaux par l'action des vagues). La crête et le talus aval seront protégés contre l'érosion due au vent et au ruissellement des eaux de pluies,
- Si le barrage est dans une région sujette à des séismes, sa conception sera telle que le séisme le plus sévère, raisonnablement prévisible, n'endommage pas la fonction de la structure. [12]

Portant de toutes ces considérations, et tenant compte de la disponibilité douteuse de la quantité des matériaux suffisante pour ériger la totalité des remblais,

Le présent travail vise :

- La conception de la digue du barrage selon deux variantes (barrage homogène et barrage zoné),
- La définition des profils types des deux variantes,
- Par le biais de la modélisation, l'étude des écoulements à travers le corps des digues et de leurs fondations,
- Définition des critères de stabilité globale.

### II.2 Situation :

Ce site se trouve situé sur Oued Issa (wilaya de Tissemsilt), un des plus importants affluents de l'Oued Nahr Ouassel, à quelques kilomètres en amont de la confluence avec ce dernier. Le

site se trouve en amont de quelques mètres de la confluence de l'oued Issa avec un de ses affluents l'oued Beun. [13]

### II.3 Localisation de site de barrage :

Le site est situé dans un étranglement de vallée, assurant un volume minimal de digue. La cuvette s'élargie plus en amont permettant la mobilisation d'une réserve d'eau importante, ceci en s'assurant que les conditions hydrologiques soient favorables. [13]

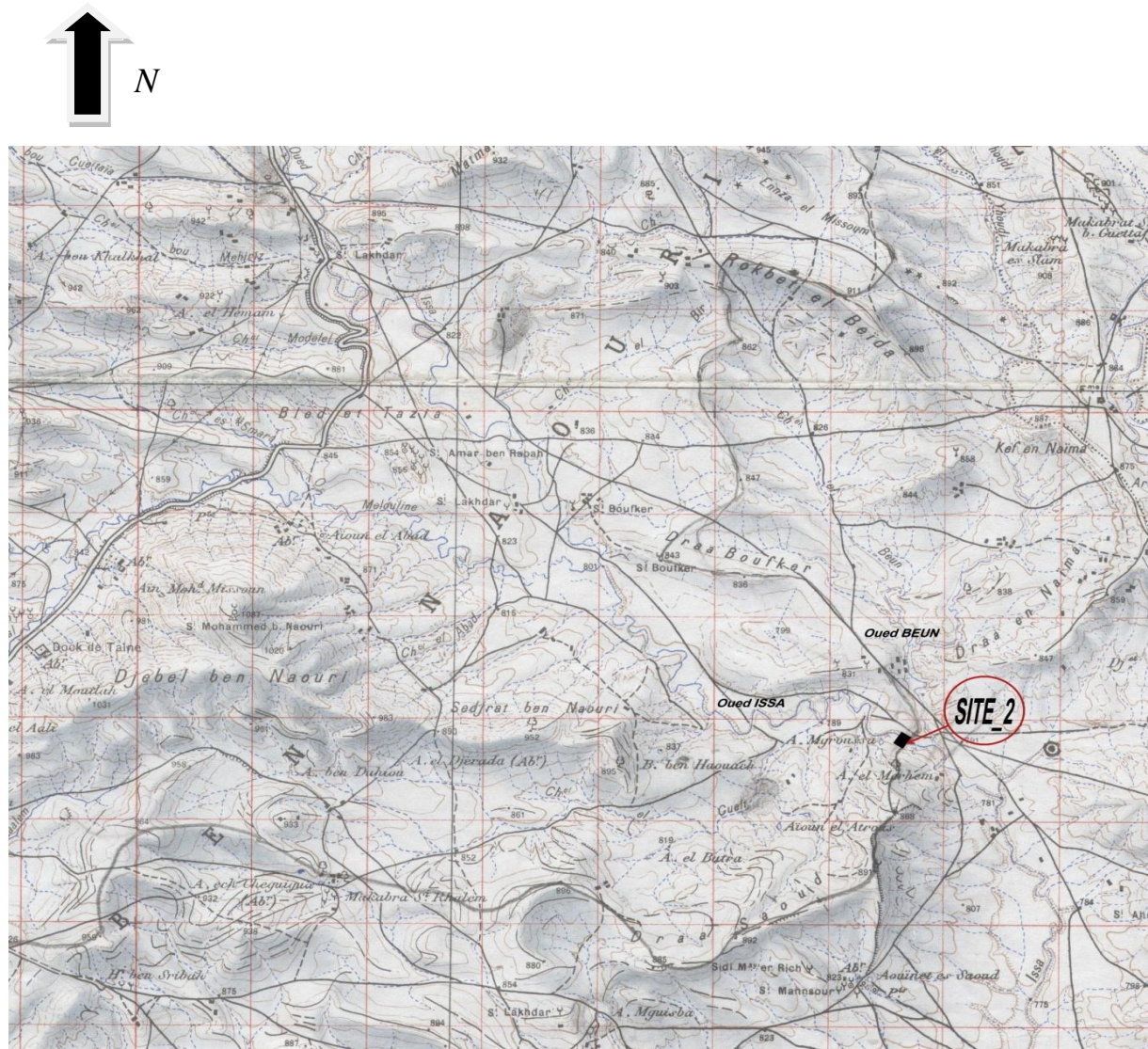


Figure II.1 : Localisation du site de l'Oued Sidi Issa (extrait de carte Taine N°161, 1/50 000<sup>e</sup>)

## II.4 Caractéristiques du Bassin versant :

- Les altitudes  $H_{\max}$  et  $H_{\min}$  du bassin versant sont respectivement de 1786m et 788m,
- La surface du bassin versant obtenue par planimétrie est de 241 km<sup>2</sup>,
- Le périmètre mesuré au curvimètre atteint 84km,
- La longueur du thalweg principal est de 32 km,
- Le coefficient de compacité de 1.52,
- L'altitude moyenne obtenue est de 1050m,
- La pente moyenne ( $I_{\text{moy}}$ ) de l'oued jusqu'au site est de 3.1%,
- La pente moyenne du Bassin versant est de 4.4%,
- L'indice de pente de 2.55%,
- La dénivelée maximale et la densité de drainage sont respectivement de 998m et 3.85km/km<sup>2</sup>,
- La dénivelée spécifique de 396m,
- Longueur et largeur du rectangle équivalent :  $L = 35.3$  km et  $l = 6.82$  km,
- Le coefficient de torrentialité est de 22.5.[13]

## II.5 Estimation de l'apport moyen annuel $A_0$ :

### II.5.1 Modèle SAMIE :

$$Le = P_0^2(293 - 2.5\sqrt{S}) = 49,88 \text{ mm.}$$

$$A_0 = S \cdot Le = 12\,021\,080 \text{ m}^3/\text{an.}$$

### II.5.2 Modèle de DERI I :

$$M_0 = 11,8 \cdot P_0^{2,27} = 1,859 \text{ l/s.Km}^2.$$

$$A_0 = M_0 \cdot S \cdot K = 14\,130\,519,26 \text{ m}^3/\text{an.}$$

### II.5.3 Modèle d'URGIPROVODKHAZ :

$$M_0 = \left(\frac{P}{340}\right)^{2,24} = 1,809 \text{ l/s.Km}^2.$$

$$A_0 = 13\,750\,462,26 \text{ m}^3/\text{an.}$$

Avec :

P : Pluviométrie moyenne annuelle en m.

### II.5.4 Modèle rationnel:

$$A_0 = C_e \cdot P_0 \cdot S = 12\,811\,560 \text{ m}^3/\text{an.}$$

Ce : Coefficient d'écoulement tiré de la courbe  $Ce=F(P_0)=12\%$ . [15]

Tableau II.1:Récapitulatif de l'estimation de l'apport moyen annuel  $A_0$ :

Modèle	SAMIE	DERI I	URGIPROVODKHAZ	Rationnel
Apport $A_0$ ( $m^3/an$ )	12 021 080	14 130 519,26	13 750 462,26	12 811 560

Tenant compte de la divergence relative des valeurs de l'apport, nous considérons la valeur calculée par le modèle DERI I adaptables pour les bassins versants de cette taille.

## II.6 Variabilité de l'apport :

Cette variabilité est envisagée par l'application de la loi log normale (GALTON) qui représente le mieux les apports fréquentiels : [16]

$$A(\%) = \frac{A_0}{\sqrt{1+C_v^2}} e^{u \sqrt{\ln(C_v^2+1)}}$$

$A_0$ : Apport moyen annuel=14 130 519,26 $m^3/an$ .

$C_v$  : Coefficient de variation calculé a partir du module spécifique de l'apport moyen annuel.

### ➤ Formule d'URGIPROVODKHAZ :

$$C_v=0,7/(M^{0,125})= 0,648$$

### ➤ Formule de PADOUN :

$$C_v=0,93/(M^{0,23}).K=0,806$$

$K=1$  pour les cours d'eau temporaires.

$M_0$  : Débit spécifique annuel ( $l/s.Km^2$ ).

On utilise la formule de PADOUN et en prend  $C_v= 0,806$ .

Tableau II.2 : Estimation des apports fréquentielles

Fréquence	Période de retour (an)	Variable de GAUSS ( $\mu$ )	Apports ( $m^3$ )
80	1,25	-0,8428	6 060 422,787
50	2	0,00	11 001 650,00
20	5	0,8428	19 971 899,98
10	10	1,2850	27 308 084,32
5	20	1,6449	35 226 970,93
2	50	2,0571	47 155 164,46
1	100	2,328	57 117 199,24
0,1	1000	3,10	98 623 160,00

## II.7 Apport des solides :

Les formules de SOGREAT inspirées des relations de TIXERONT, donnant les apports solides spécifiques  $T_a$  ( $t/km^2.an$ ) en fonctions du ruissellement de crue (mm) et de la perméabilité des bassins.[17]

- Perméabilité élevée  $T_a = 8,5. H^{0,15}$
- Perméabilité moyenne à élevé  $T_a = 75. H^{0,15}$
- Perméabilité faible a moyenne  $T_a = 350. H^{0,15}$
- Perméabilité faible  $T_a = 1400. H^{0,15}$
- imperméabilité  $T_a = 3200. H^{0,15}$

Notre bassin possède une perméabilité faible à moyenne donc :  $T_a = 350. H^{0,15}$

$$\text{Avec } H : \text{lame d'eau écoulée} = A_0/S.10^3 = 58,63\text{mm}$$

$$T_a = 644,594T/Km^2.an$$

Le volume mort serait donc égal à :

$$V_m = (T_a. S. N)/d$$

Avec :

$d = 1.6$  : densité de la vase

$n$  : nombre d'année d'exploitation. On fixe 20ans d'exploitation

$$V_m = (650,569.241.20)/1.6 = 1\,941\,839,425 \text{ m}^3$$

On projette la valeur du volume mort sur la courbe de remplissage, on obtient la cote du volume mort :  $CVM = 795,5\text{m}$

On projette cette valeur sur la courbe caractéristique  $S=f(h)$  :

La surface de volume mort est  $S_{vm} = 5.75 \text{ Ha}$

La figure II.2 et II.3 représentent les courbes caractéristiques de remplissage  $V=f(H)$  et  $S=f(H)$  obtenus par le levé topographique du réservoir à l'échelle 1/100, ainsi que la courbe donnant la relation entre le volume stocké et la surface inondée.[14]

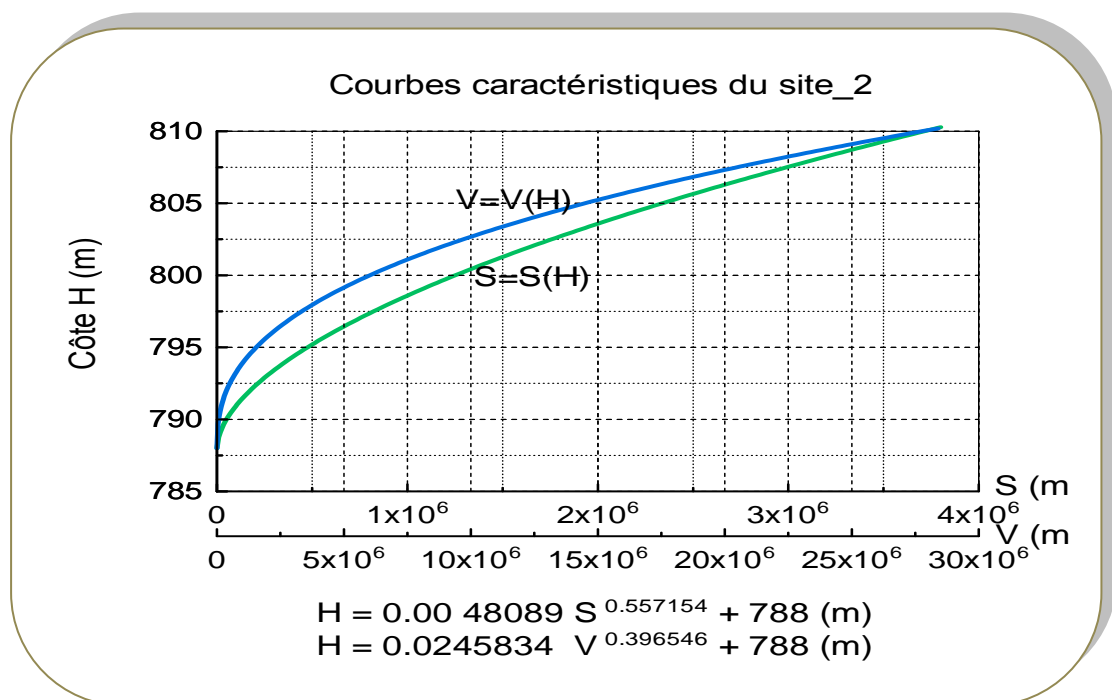


Figure II.2 : Courbe caractéristique  $V=f(H)$

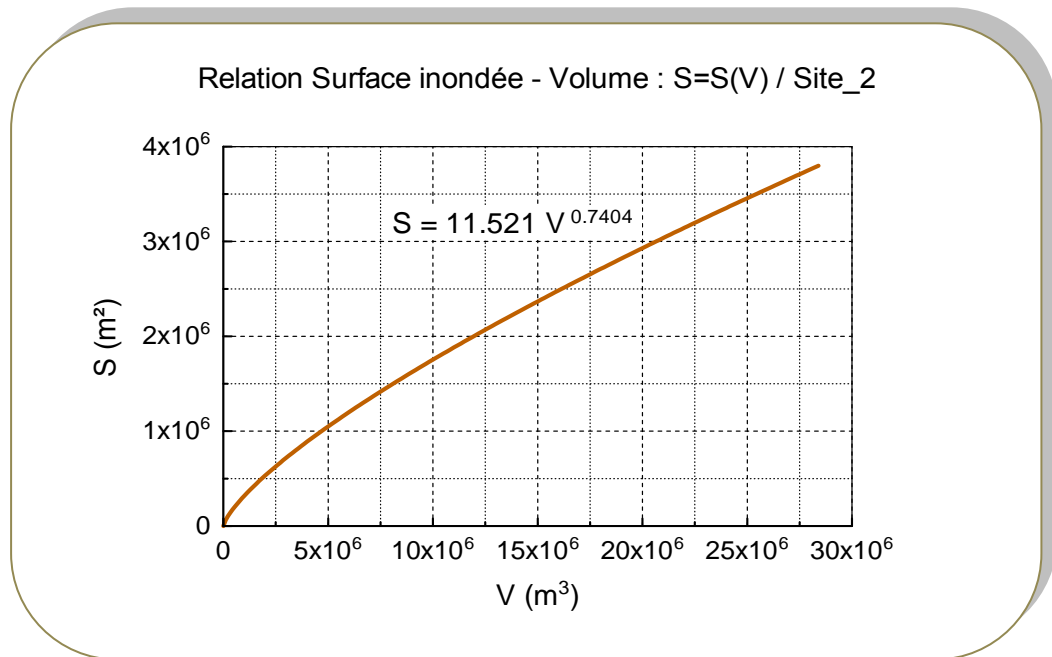


Figure II.3 : Courbe caractéristique  $V=f(S)$

## II.8 Volume total:

Le volume total du barrage sera donné par la somme de l'apport fréquentiel de 80% et le volume mort.

$$V_t = A_{80\%} + V_m$$

Pour calculer l'apport fréquentiel, on applique la formule de Galton qui garantit le remplissage de 8 années sur 10. [3]

Le coefficient de variation :  $C_v = 0,806$ .

Pour  $A_{80\%}$ , on a la variable de GAUSS  $\mu = -0,8428$ .

$$A(80\%) = \frac{A_0}{\sqrt{1+C_v^2}} e^{u \sqrt{\ln(C_v^2+1)}} = 6\,060\,422,787 \text{ m}^3$$

$$V_t = A_{80\%} + V_m = 6\,060\,422,787 + 1\,941\,839,425 = 8\,002\,262,212 \text{ m}^3.$$



## II.9 Volume utile:

Le volume est de la quantité d'eau utilisable c'est donc le volume totale au quel on soustraie toute les pertes (pertes par évaporation et pertes par infiltration).

Le volume utile sera calculé en fonction de volume évaporé et de la capacité utile estimée par l'apport moyen de fréquence 80%.

Les pertes par évaporation sont proportionnelles à la surface des eaux; elles dépendent du pouvoir évaporant de la nappe d'eau.[3]

On considère 90% de la surface moyenne du lac à la côte retenue normale.

$$\text{Evaporée} = 0,9 \cdot 555004,21 = 499\,503,786 \text{ m}^3$$

Les pertes dues aux infiltrations ne peuvent être évalué avec exactitudes, car elles sont dépendantes de l'étanchéité de la cuvette et du barrage. On pourra, cependant, considérer que les pertes par infiltration représentent au maximum 10% de la capacité totale de la retenue soit :

$$V_{\text{inf}} = 0,1 \cdot 8\,002\,262,212 = 800\,226,22 \text{ m}^3.$$

On pourra, ce pendant, considérer

Donc :  $V_u = \text{App}80\% + \text{Evaporée} + V_{\text{inf}}$

$$= 6\,060\,422,787 + 499\,503,786 + 800\,226,22 = 7\,360\,152,794 \text{ m}^3$$

De la courbe de remplissage, on déduit la côte de la retenue normale :  $\text{CRN} = 801 \text{ m}$

La projection de CRN sur la courbe caractéristique  $S=f(h)$  donne  $S_{\text{RN}} = 1,4 \cdot 10^6 \text{ m}^2$ .

## II.10 Détermination tranches des réservoirs au dessus de la retenue normale :

### II.10.1 Revanche :

C'est la tranche comprise entre la cote des plus hautes eaux et la crête du barrage, elle protège le barrage contre la submersion et compense le tassement du barrage après réalisation.

On applique la formule de GAILLARD : [18]

$$R = 0,75 \cdot H_v + \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

Avec :

$H_v$  : La hauteur des vagues en m.

$V$  : Vitesse de propagation des vagues m/s

$F$ : Fetch en Km. = 600 m

La hauteur des vagues est calculée selon la formule de STEVENSON :

$$H_v = 0,76 + 0,032 \sqrt{V_v \cdot F} - 0,26 \sqrt[4]{F} = 0,8 \text{ m.}$$

$V_v$  : Vitesse du vent en (Km/h) = 100 km/h

La vitesse de propagation des vagues peut être estimée par la formule de GAILLARD :

$$v = 1,5 + 2 H_v = 1,5 + 2 \cdot 0,779 = 3,058 \text{ m/s}$$

La revanche  $R$  est donc égale à  $R=1.06\text{m}$

### II.10.2 La côte des plus hautes eaux PHE :

Elle est calculée par la somme de la hauteur d'eau normale et la hauteur déversée.

$$CPHE = CRN + h = 801 + 01 = 802 \text{ m.}$$

La charge sur le déversoir  $H=1\text{m}$  a été considérée en tenant compte de la valeur relativement élevée du débit de crue.

### II.10.3 La hauteur de la digue :

- Côte CVM = 795,5m ( $H=7.5\text{m}$ )
- Côte CRN=801 ( $H=5.5\text{m}$ )
- Côte PHE=802 ( $H=1\text{m}$ )
- Côte revanche : 803m ( $H=1.06\text{m}$ )

En considérant une réserve de tassements =1m, la hauteur de la digue sera :

$$H_B = 804 - 788 = 16\text{m}$$

### II.10.4 largeur de la crête :

Il existe plusieurs modèles d'estimation de la largeur en crête du barrage.[3]

- Formule de KNAPEN :

$$B_c = 1,65(H_b)^{1/2} = 6.6 \text{ m}$$

- Formule de PREELE :

$$Bc = 1,1 (H_b)^{1/2} + 1 = 4,4m.$$

- Formule de l'USBR :

$$Bc = \frac{H}{5} + 3 = 6.2 \text{ m}$$

- Formule FRANCAISE :

$$Bc = 2,6 (H_b)^{1/3} = 6.55 \text{ m}$$

- Formule classique :

$$Bc = 1/3 H_b = 5.33 \text{ m}$$

La largeur en crête sera égale  $L=6m$

### II.10.5 Pentes des talus :

La pente des talus du barrage en terre est fixée par les conditions de stabilité mécanique du massif et de ses fondations.

La fondation de l'ouvrage doit également être stable du point de vue mécanique. On ne doit donc pas considérer seulement le massif du barrage, mais l'ensemble du massif et de la fondation. Lorsque les fondations sont de mauvaise qualité, argileuse par exemple, on est conduit parfois à diminuer la pente des talus en élargissant l'ensemble de l'ouvrage. [18]

Le tableau II.3 donne pour différentes hauteurs du barrage et différentes type des pentes correspondantes du talus amont et aval.

Tableau II.3: Valeurs des pentes des talus en fonction de la hauteur et le type de la digue [3]

Hauteur du barrage en (m)	Type du barrage	Pentes des talus	
		amont	aval
Inférieur à 5m	Homogène a zone	1/2,5	1/2
5 à 10m	Homogène, granularité étendu.	1/2	1/2
	Homogène à fort pourcentage d'argile.	1/2,5	1/2,5
	A zones.	1/2	1/2,5
10 à 20m	Homogène, granularité étendu.	1/2,5	1/2,5
	Homogène à fort pourcentage d'argile.	1/3	1/2,5
	A zones.	1/2	1/3

Suivant la disponibilité des matériaux, les pentes arrêtées pour les 2 variantes de conception se résumant ainsi :

- Le barrage Homogène à fort pourcentage d'argile :

Pente du talus amont: 1/3.

Pente du talus avale: 1/2,5.

- Le barrage à zones (noyau central):

Pente du talus amont: 1/2.

Pente du talus avale: 1/3.

### II.10.6 Dispositifs de drainage :

En fonction de la largeur en base du barrage B nous adaptons en terme de drainage les dispositions ci-dessous :

$$\text{Largeur en base } B = L + m_1 \cdot H + m_2 \cdot H$$

L : Largeur en crête du barrage

H : Hauteur totale du barrage

$m_1$  et  $m_2$  : Pentes amont et aval du barrage B=94m

- **Drain horizontal :**

Il est formé d'un tapis, de matériaux drainant d'une épaisseur constante. Ce tapis s'étend en sens transversal sur une largeur (à partir du pied aval), de l'ordre de 1/3 à 1/4 de la largeur de la digue de façon à maintenir la ligne de saturation à au moins 2m du parement aval. [4]

- La longueur = 0,25. B= 23.5m.
- La hauteur = 1m.

➤ **Drain prismatique :**

Il est formé des matériaux plus perméables (enrochement en général)

- Les talus :  $m1 = m2 = 1$ .
- La hauteur :  $h = 1/4.Hb = 4m$ .
- La crête :  $b = 1,65 (h)^{1/2} = 3,3m$ .
- La base :  $B = 4x2 + 3,3 = 11.3m$ .

Pour la variante du barrage zoné à noyau central un ensemble drain filtre est disposé dans la partie avale du noyau.

La largeur en crête du noyau est de 3m. Sa base est calculée en fonction de la valeur du gradient hydraulique calculé au pied aval du noyau

Charge d'eau a la côte CRN=13m

$H/B \leq i_{cr} (\text{Argile}) = 1/3$

$B \geq 39m$

### II.10.7. Protection du talus amont contre l'effet de batiage :

Le talus amont doit être protégé contre les effets des vagues ; l'épaisseur de l'enrochement est en fonction de la vitesse de propagation des vagues et du type des matériaux. Il faut que 50% des pierres présentent un diamètre supérieur a 20 cm, le reste doit être compris entre 10 et 20 cm. Les dimensions de l'enrochement peuvent être déterminé théorique en fonction de la hauteur des vagues et de leur vitesse de propagation par la formule suivante :[7]

$$e = c.v^2$$

e : épaisseur de l'enrochement en mètres [m].

v : vitesse de propagation des vagues [m/s].

c : fonction de pente du talus et du poids spécifique de l'enrochement et des talus

Pente des talus	$G_s=2.5 \text{ T/m}^3$	$G_s=2.65 \text{ T/m}^3$	$G_s=2.8 \text{ T/m}^3$
1-4	0.027	0.024	0.022
1-3	0.028	0.025	0.023
1-2	0.031	0.028	0.026
1-1.5	0.036	0.032	0.03
1-1	0.047	0.041	0.038

a) Variante digue homogène :

- Pente du talus amont  $m=1/3$ ,
- Poids spécifique de l'empierrement  $G_s=2.65 \text{ T/m}^3$ ,
- Coefficient  $C=0.025$ ,

$$e=C.v^2=0.23 \text{ m} \quad (v=3.05 \text{ m/s})$$

L'épaisseur de la couche de protection amont sera  $e=25 \text{ cm}$ .

b) Variante digue zoné à noyau central :

- Pente du talus amont  $m=1/2$ ,
- Poids spécifique de l'empierrement  $G_s=2.65 \text{ T/m}^3$ ,
- Coefficient  $C=0.028$ ,

$$e=C.v^2=0.26 \text{ m} \quad (v=3.05 \text{ m/s})$$

On retiendra une épaisseur de la couche de protection  $e=30 \text{ cm}$

### II.10.8.Profil type de la digue :

En se basant sur les calculs de conception élaborés, les figures II.4 et II.5 illustrent les profils types retenus pour les 2 variantes de conception en l'occurrence barrage homogène et barrage à noyau central.

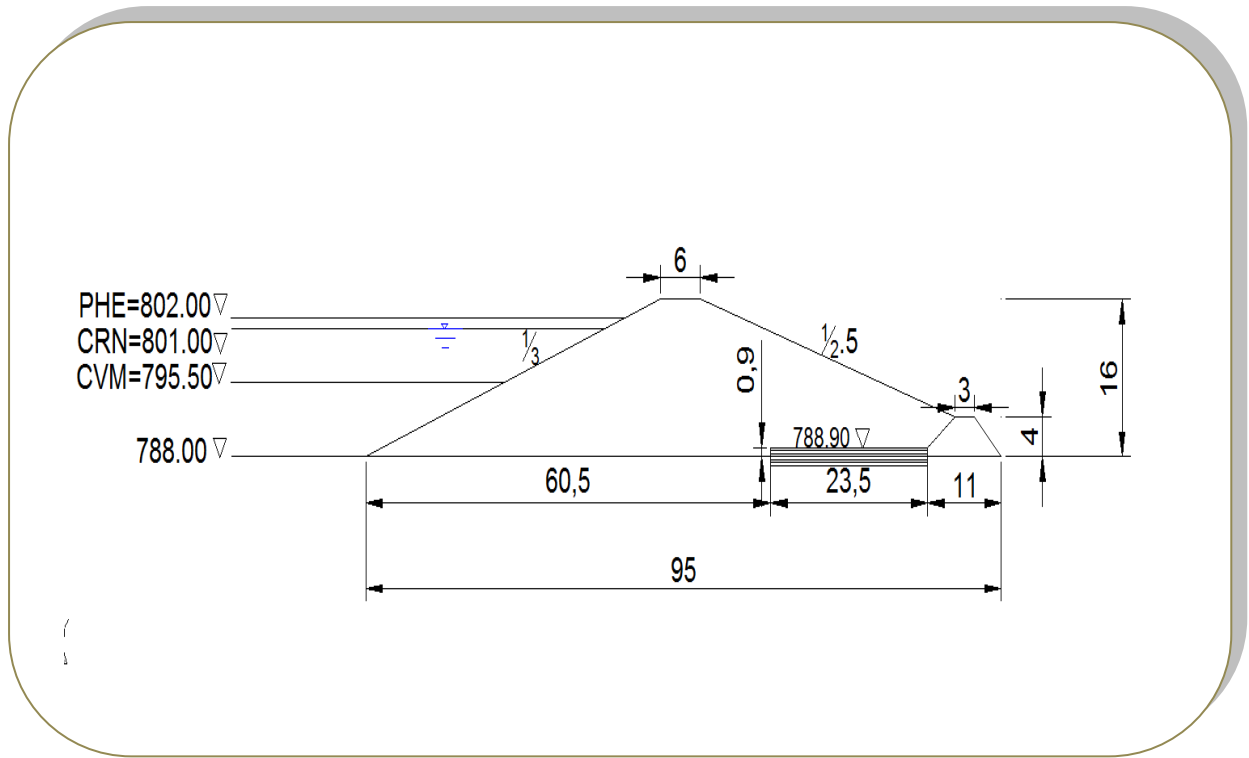


Figure II.4: profil type du barrage homogène

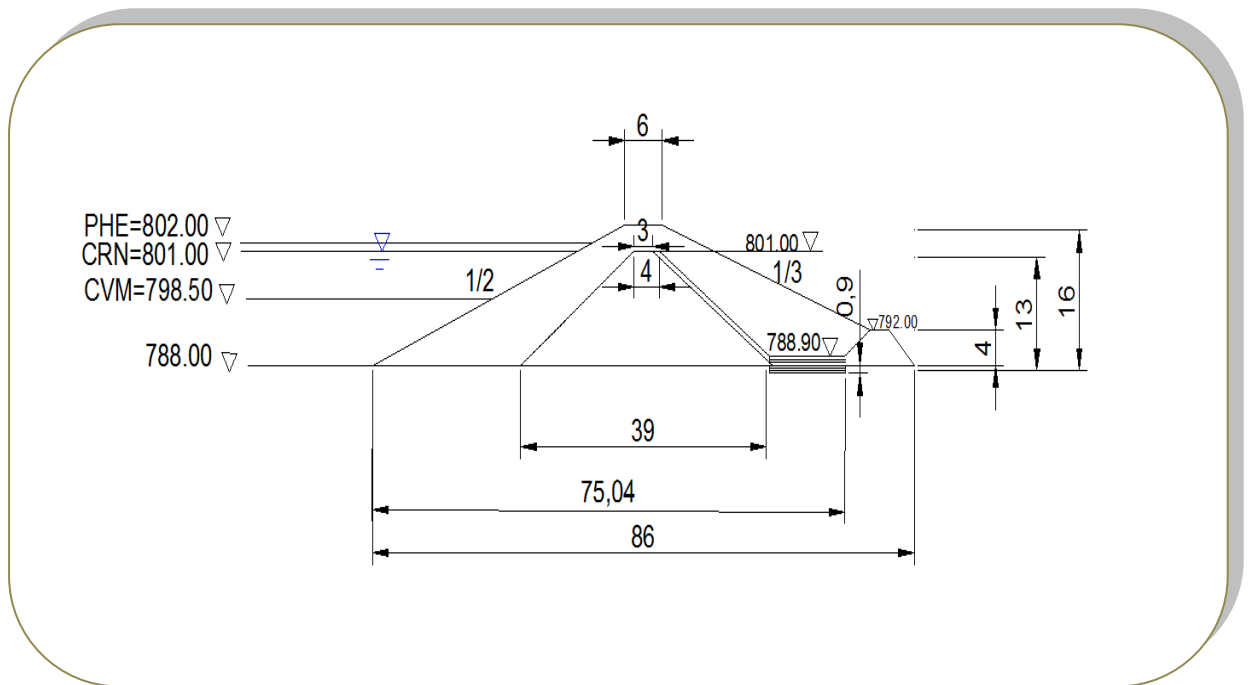


Figure II.5: profil type du barrage zoné, à noyau central.

## **II.11 Conclusion :**

La définition des profils types de la digue servira de base pour les différentes études à engager.

Ces études concernent les deux variantes retenues avec balance de comparaison afin d'orienter le choix définitif.

La conception des dispositifs de drainage et de protection du corps du barrage contre l'entraînement de ces grains mettra en évidence, à travers l'étude des infiltrations l'influence de chaque mesure arrêtée sur les manifestations des paramètres correspondant (débit de fuite, position de la ligne de saturation, valeurs du gradient hydraulique.....etc.).



***CHAPITRE III :***  
***Etude des infiltrations dans***  
***le barrage***

### III.ETUDE DES INFILTRATIONS A TRAVERS LE BARRAGE :

#### III.1 Introduction :

Dans le cas d'un barrage en terre, l'eau du bassin filtre à travers le remblai, en s'établissant graduellement de l'amont vers l'aval. Les infiltrations dans le corps de la digue peuvent induire des phénomènes pouvant nuire à la stabilité du barrage tels que :

- L'érosion régressive.
- Les débits de fuite excessifs.
- La stabilité des talus.

C'est pour cela qu'on s'intéresse à réduire à des valeurs acceptables les débits d'infiltration et de les contrôler pour garantir l'ouvrage contre les dangers d'instabilité. Il est nécessaire de connaître avant la construction, la position de la ligne de saturation et les valeurs des pertes par infiltration.

Le traitement des infiltrations doit permettre de déterminer les éléments indispensables suivant :

- Détermination de la ligne de saturation ou ligne phréatique qui est confondue avec la ligne le long de laquelle la pression hydrostatique est nulle (la pression atmosphérique étant prise comme niveau de référence).
- Tracé du réseau des lignes équipotentielles, c'est-à-dire des lignes reliant les points d'égal potentiel hydraulique au sein du corps de barrage et ses fondations.  
Ce réseau nous permet de connaître la valeur de la pression interstitielle en chaque point du champ de filtration ou la zone de saturation.
- Tracé des lignes de courant qui représentent la trajectoire de l'écoulement de l'eau à travers le corps du barrage. Ces lignes nous permettent de calculer le débit de fuite.

Il est important donc que les caractéristiques des matériaux du massif et de la fondation soient bien connues car elles influent considérablement sur les phénomènes d'infiltration à l'origine de divers désordres.

Les infiltrations qui se produisent à travers le corps du barrage et ses fondations, doivent être considérées sous deux aspects :

- Le premier : est la perte d'eau qui réduit le volume emmagasiné,

- le deuxième : est que ces pertes d'eau peuvent compromettre la stabilité de l'ouvrage sous l'influence du phénomène de renard et des pressions de l'infiltration.

### III.2 Etude des infiltrations dans le barrage et ses fondations :

La perméabilité dans un barrage en terre existe toujours, même si les pertes d'eau par infiltration sont faibles et pour déterminer ces infiltrations, il est impératif d'évaluer les éléments suivants :

- La ligne de saturation ou phréatique,
- Le débit de fuite de l'eau par infiltration,
- Les dimensions du système de drainage.

#### III.2.1.Détermination de l'équation de la ligne de saturation :

La ligne de saturation peut être déterminée par les différentes méthodes suivantes :

##### a)Le calcul numérique :

Le calcul numérique est réalisé sur l'ordinateur, il peut résoudre le problème des infiltrations par le biais des programmes mis au point, afin de déterminer la position de la ligne de saturation, le potentiel hydraulique et, le débit de fuite.

La résolution du problème consistera alors à rechercher un ensemble de valeurs du potentiel obéissant en tout point à la loi de Laplace et respectant les conditions aux limites (potentiel obligé de certains points : parement amont, existence d'une surface de suintement : parement aval, drain, etc., la résolution numérique s'appuie sur l'équation :[19]

$$\nabla H = \frac{\partial H^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = 0$$

##### b) Le modèle électrique

IL s'agit essentiellement de l'analogie électrique. Elle est fondée sur le fait que "l'écoulement" du courant électrique est régi par des lois similaires à celles qui concernent les mouvements de l'eau dans le sol :

Hydraulique	Electrique
Loi de Darcy $V=-K\text{grad}(h)$	Loi d'ohm $j=-\Delta\text{grad}(V)$
$\Delta h=0$	$\Delta V=0$
$Q=\iint V.ds$	$Q=\iint j.ds$
Charge hydraulique $h$	Charge électrique
Vitesse de filtration $V$	Tension électrique
Perméabilité $K$	Conductivité électrique
Débit de liquide $Q$	Intensité du courant $I$

Le principe expérimental est de représenter le massif poreux par un milieu conducteur où on provoque un champ électrique.

Les conditions aux limites à imposer sur le modèle sont les analogues des conditions hydrauliques aux limites de l'écoulement dans le milieu poreux.

La méthode du papier conducteur est utilisée pour l'étude des écoulements plans permanents dans des milieux homogènes ; le conducteur employé est du papier revêtu d'un composé graphite.

Le modèle est tracé avec distorsion par ce qu'il y a deux perméabilités  $K_h$  et  $K_v$ . Les électrodes à relier aux potentiels convenables sont réalisées à l'aide d'une peinture à l'argent.

Des méthodes géométriques (méthode Prasil ou de Casagrande) ou simplement graphique permettant d'esquisser les  $n-1$  lignes de courant formant les mailles carrées avec les  $m-1$  équipotentielles.[20]

Le rapport  $n/m$  permet de déterminer rapidement le débit de filtration. En effet, on a :

$$Q = n\Delta\psi$$

$$\Delta\psi = \Delta\phi = K.H/m$$

Ce qui donne :

$$Q = \frac{n}{m}.K.H$$

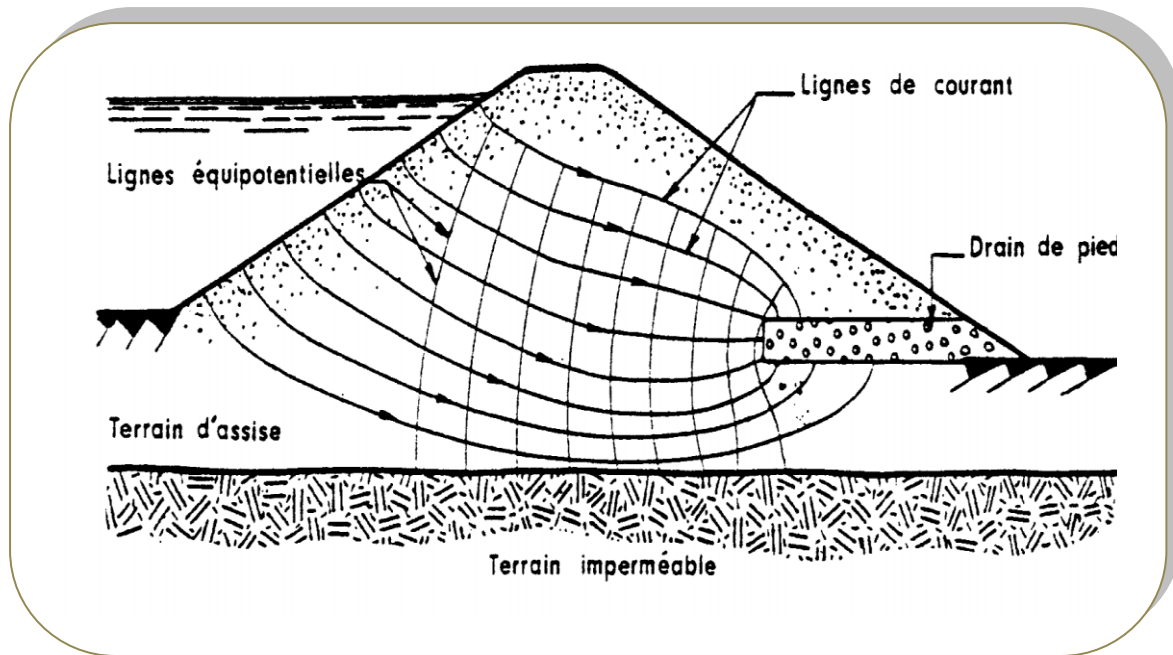


Figure III.1:Modèle du réseau d'écoulement sur un massif de barrage [15]

### c)Le modèle graphique

Cette méthode très simple fait appel aux propriétés géométriques des réseaux quadratiques et aux conditions auxquelles doivent satisfaire les lignes de courant et équipotentielles du réseau. On peut, en effet, en partant des conditions aux limites et en s'inspirant de cas théorique analogues, tracer un réseau vraisemblable de lignes de courant et de lignes équipotentielles qui, en chaque point, se rencontrent orthogonalement.

Supposant que parmi elles, nous sachions mettre en évidence  $m$  lignes équipotentielles se répartissant également la différence totale de charge  $h$  qui provoque l'écoulement, ainsi que  $n$  lignes de courant se partageant le débit total d'infiltration  $Q$ . [20]

Dans ce cas entre deux lignes équipotentielles consécutives, la variation du potentiel sera :

$$\Delta\phi = K \cdot h / m = \text{cte}$$

Et entre deux lignes de courant consécutives, le débit écoulé sera :

$$\Delta\psi = Q / n = \text{cte}$$

Ainsi nous auront formé un réseau de rectangles curvilignes qui, s'ils sont de dimensions suffisamment réduites, auront les propriétés de présenter des diagonales inclinées angle  $\alpha$ .

$$\text{Si } \operatorname{tg}\alpha = \Delta\psi / \Delta\sigma$$

$$\text{Alors } Q = (n/m).K.h.\operatorname{tg}\alpha$$

Si en particulier, on s'astreint à réaliser  $\alpha=45^\circ$ , les rectangles deviendront des carrés et :

$$\operatorname{Tg}\alpha=1$$

Le débit d'infiltration total est donné par :  $Q=(n/m).K.h$

### III.2.2 Présentation des profils :

Les caractéristiques des deux profils servant à la modélisation sont présentées ci-dessous :

a) Barrage homogène :

- Hauteur de la digue  $H=16\text{m}$ ,
- La charge d'eau à la retenue normale  $H=13\text{m}$ ,
- Pentes des talus : 1/3 amont, 1/2.5 aval,
- Largeur en crête  $L=6\text{m}$ ,
- Longueur drainage horizontal  $l=23.5$ ,
- Hauteur drain prismatique  $h=4\text{m}$ .

b) Barrage zoné, à noyau central :

- Hauteur de la digue  $H=16\text{m}$ ,
- La charge d'eau à la retenue normale  $H=13\text{m}$ ,
- Pentes des talus : 1/2 amont, 1/3 aval,
- Largeur en base du noyau  $L= 39\text{m}$

### III.2.3 Etude des infiltrations à travers le barrage d'Oued Sidi Aissa :

Après la conception des deux profils types du barrage représentant les variantes retenues de la digue, une étude des infiltrations est engagée en vue de définir les conditions d'écoulement et de comparer le comportement des deux conceptions de digues vis-à-vis des écoulements dans leur massifs. Le code de calcul plaxis a été utilisé pour ces fins.

### III.2.4 Objectif :

L'objectif de ce travail est l'étude d'infiltration dans le barrage. L'application est faite sur le barrage de l'Oued Sidi Aissa. Plusieurs cas de modélisation ont été considérés :

- Cas 1 : barrage homogène,
- Cas 2 : barrage zoné (à noyau central).

L'étude est menée en considérant les paramètres mécaniques et hydrauliques (Tableau III.1) concernant le corps du barrage.

Tableau III.1: Paramètres mécaniques et hydrauliques du barrage [13]

Matériaux	$\gamma_h$ [KN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_{sat}$ [KN/m <sup>3</sup> ]	$C'$ [KN/m <sup>2</sup> ]	$\phi'$ [°]	$k_h$ [m/s]
<b>Barrage homogène</b>					
<b>argile</b>	20,10	20,70	2,1	19,5	$10^{-8}$
<b>Gravie -sable</b>	20,10	21,60	0	33	$10^{-5}$
<b>Drain</b>	20,60	22,10	0	38	$10^{-4}$
<b>Barrage zoné</b>					
<b>Noyau argile</b>	20,10	20,70	2,1	19,5	$10^{-8}$
<b>Recharges</b>	20,10	21,60	0	33	$10^{-5}$
<b>Gravie -sable</b>	18,30	20,40	0	30	$10^{-5}$
<b>Draine prismatique</b>	20,60	22,10	0	38	$10^{-4}$

### III.2.5 Information générales sur le code de calcul utilisé :

PLAXIS est un programme d'éléments finis en deux dimensions spécialement conçu pour réaliser des analyses de déformation et de stabilité pour différents types d'applications géotechniques. Les situations réelles peuvent être représentées par un modèle plan ou axisymétrique. Le programme utilise une interface graphique pratique permettant aux utilisateurs de générer rapidement un modèle géométrique et un maillage d'éléments finis basés sur la coupe verticale de l'ouvrage à étudier. Les utilisateurs sont supposés être capables de travailler dans un environnement Windows. Pour se familiariser rapidement avec l'utilisation de cette interface et avec les caractéristiques principales du programme, l'utilisateur est invité à s'exercer grâce aux exemples de calculs décrits dans le *Tutorial Manual*. [21]

#### a) Modélisation du comportement d'un sol :

Les sols et les roches tendent à se comporter d'une manière fortement non linéaire sous l'effet d'un chargement. Ce comportement non linéaire en contraintes déformations peut être modélisé suivant différents niveaux de sophistication. Mais le nombre de paramètres à introduire dans les modèles augmente avec ce degré de sophistication. Le modèle bien connu de Mohr-Coulomb peut être considéré comme une approximation au premier ordre du comportement réel du sol. Ce modèle, élastique parfaitement plastique, nécessite cinq paramètres fondamentaux qui sont : le module d'Young,  $E$ , le coefficient de Poisson,  $\nu$ , la cohésion,  $c$ , l'angle de frottement,  $\alpha$ , et l'angle de dilatance,  $\beta$ . Comme les ingénieurs géotechniciens sont habitués à utiliser ces cinq paramètres, et qu'ils disposent rarement d'autres données, une attention particulière sera portée à ce modèle classique de comportement. PLAXIS contient également des modèles de sols plus avancés ; et propose différents modèles qui permettent de simuler le comportement d'un sol. PLAXIS distingue une perméabilité horizontale  $k_x$ , et une perméabilité verticale  $k_y$ . [22]

#### b) Les Propriété du PLAXIS :

##### ➤ Génération du maillage :

Lorsqu'un modèle géométrique est entièrement défini et que les propriétés des matériaux sont assignées à toutes les couches et à tous les éléments de structure, la géométrie doit être divisée en éléments finis afin de réaliser le calcul par éléments finis. Une composition d'éléments finis s'appelle un maillage d'éléments finis. Les éléments fondamentaux sont des éléments



triangulaires à 15 nœuds ou des éléments triangulaires à 6 nœuds ; La génération du maillage est basée sur une procédure robuste de triangulation, ce qui se traduit par des maillages non structurés. Ces maillages peuvent paraître désordonnés, mais les performances numériques de tels maillages sont généralement meilleures que celles de maillages (structurés) réguliers.[21]

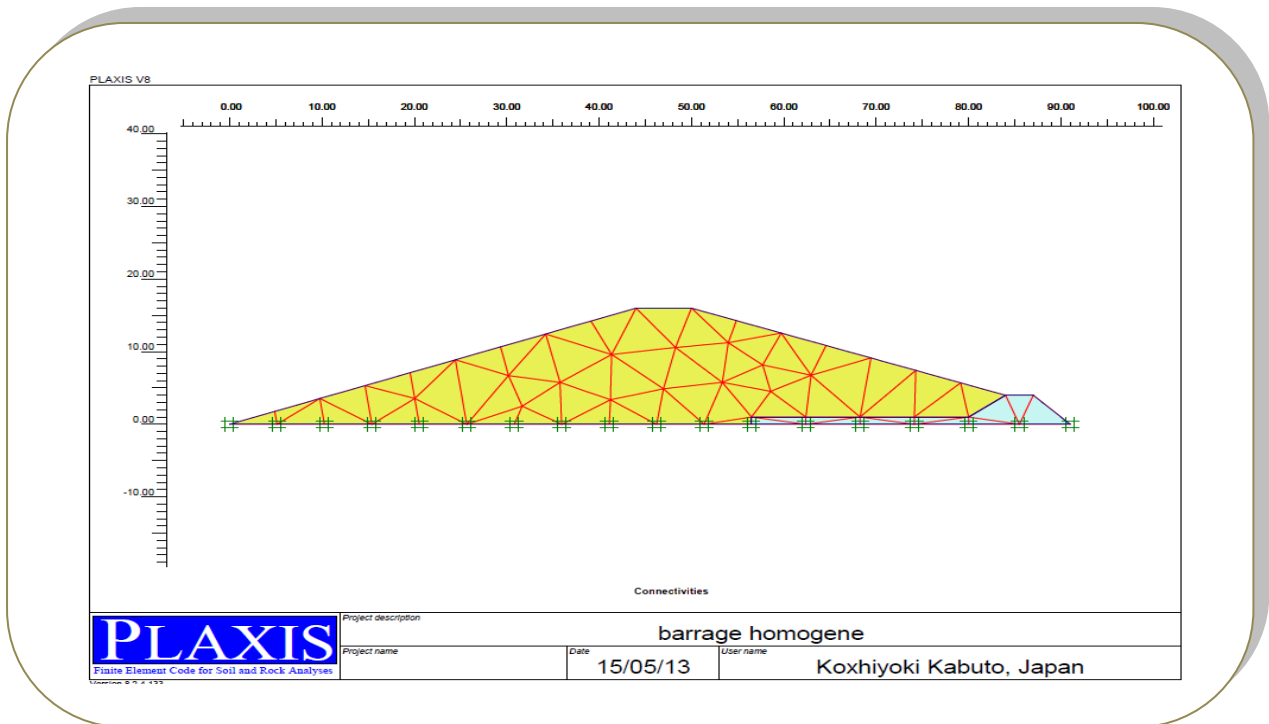


Figure III.2 : Modèle de génération du maillage « code de calcul PLAXIS »

### ➤ Condition hydrauliques :

PLAXIS est généralement utilisé pour des analyses en contraintes effectives dans lesquelles une distinction claire est faite entre les pressions interstitielles *pactive* et les contraintes effectives  $s'$ . Les pressions interstitielles sont elles-mêmes décomposées en deux parties: les pressions interstitielles permanentes *psteady* et les surpressions interstitielles *pexcess*:

$$pactive = psteady + pexcess$$

Les surpressions interstitielles apparaissent à cause du chargement de couches dont le matériau a été défini comme non drainé. Dans un calcul plastique, les surpressions interstitielles ne peuvent être créées que dans ces matériaux non drainés.

Une analyse en consolidation peut permettre de calculer la dissipation de ces surpressions en fonction du temps. Au cours de ces calculs, le développement des surpressions est déterminé par les paramètres de perméabilité plutôt que par le type de comportement du matériau.

Les pressions interstitielles permanentes proviennent d'une situation hydraulique en équilibre. Un tel état est obtenu quand les conditions hydrauliques extérieures restent constantes au cours d'une longue période. Afin d'obtenir un état d'équilibre, il n'est pas nécessaire que les pressions interstitielles soient par elles-mêmes en équilibre statique (une nappe phréatique horizontale) puisque des situations avec écoulement ou suintement peuvent conduire à un régime d'équilibre permanent. Les pressions hydrauliques extérieures sont calculées de manière à ce que l'équilibre des pressions hydrauliques soit respecté. PLAXIS comprend un module de calcul d'écoulement permanent.[21]

➤ **Écoulement transitoire**

En plus des écoulements permanents, PLAXIS permet le calcul en fonction du temps des pressions interstitielles en milieu saturé ou non-saturé, dans le cas d'évolution dans le temps des conditions limites hydrauliques. Les résultats d'un tel calcul d'écoulement transitoire, c'est-à-dire une distribution des pressions interstitielles dans le temps, peuvent être utilisés comme donnée d'entrée d'une analyse de déformation.[21]

➤ **Calcul d'écoulement permanent :**

Les ingénieurs géotechniciens ont régulièrement à résoudre des problèmes incluant des pressions interstitielles et des écoulements. De nombreuses situations impliquent des écoulements permanents ou des pompages. Les barrages et les digues sont soumis à des écoulements permanents. De même, des écoulements permanents apparaissent autour des rideaux de soutènement qui séparent des niveaux d'eau différents dans les sols. Ces écoulements sont régis par des pressions interstitielles plus ou moins indépendantes du temps. Ainsi, ces pressions interstitielles peuvent être considérées comme des pressions interstitielles en régime permanent. La version Professionnelle de PLAXIS Version 8 inclue un module de calcul des écoulements permanents pour analyser les situations de ce type. La distribution des pressions interstitielles permanentes dans les calculs d'écoulement est déterminée à partir des conditions aux limites, de la géométrie et des perméabilités des différentes couches de sol. Pour une description détaillée des équations différentielles qui régissent les problèmes d'écoulement permanent.[23]

**c) Les points forts de PLAXIS:**

- La convivialité de l'interface pour la saisie des données et pour l'interprétation des résultats,
- Générateur automatique de maillage,

- Jeu complet de lois de comportement du sol et la possibilité de définir ses propres lois de comportements,
- Couplages avec les calculs d'écoulements et de consolidation,
- Prise en compte des éléments de structure et l'interaction sol-structure,
- Calcul de coefficient de sécurité et l'étude de stabilité.[22]

### III.3 Profils utilisés au niveau de modélisation :

Les profils types utilisés au niveau de la modélisation sont consignés sur les figures III.3 et III.4 :

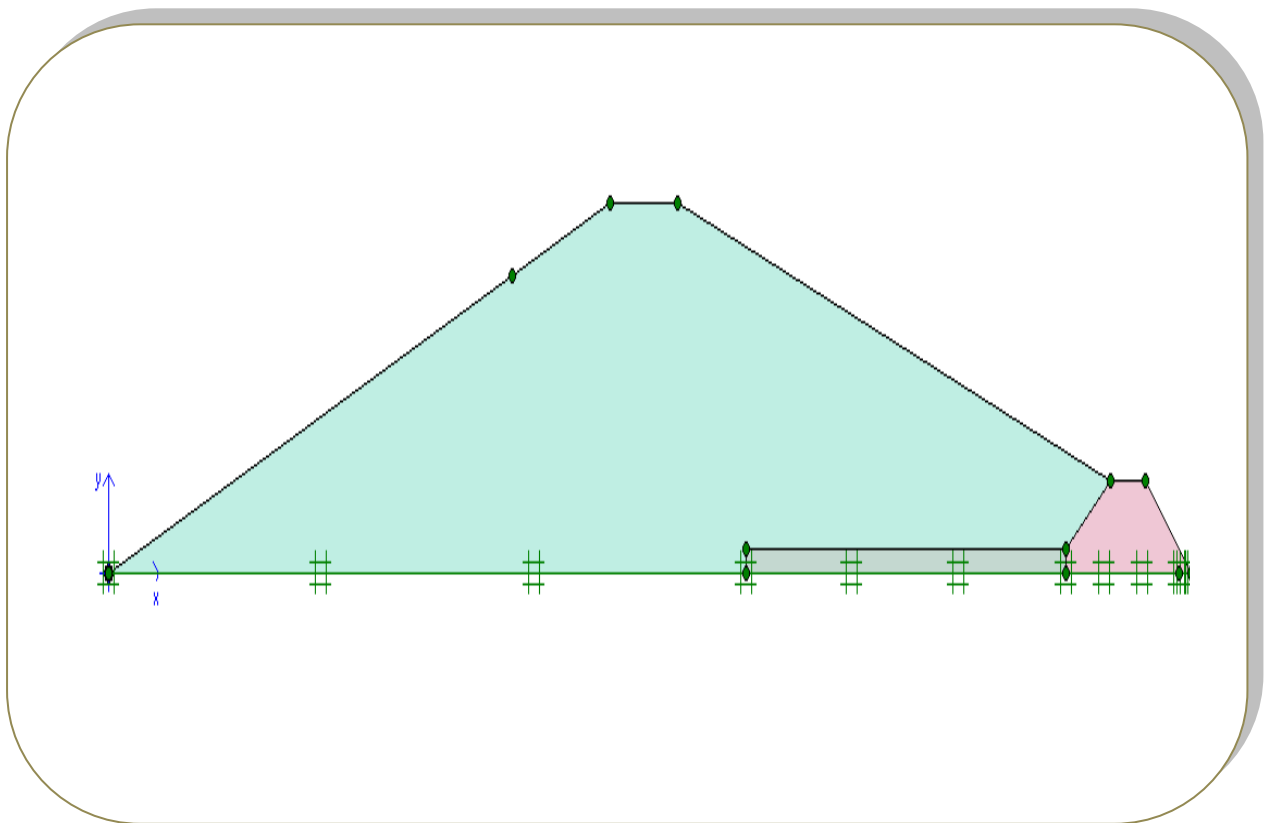


Figure III.3: Représentation du modèle géométrique du projet (cas N°1).

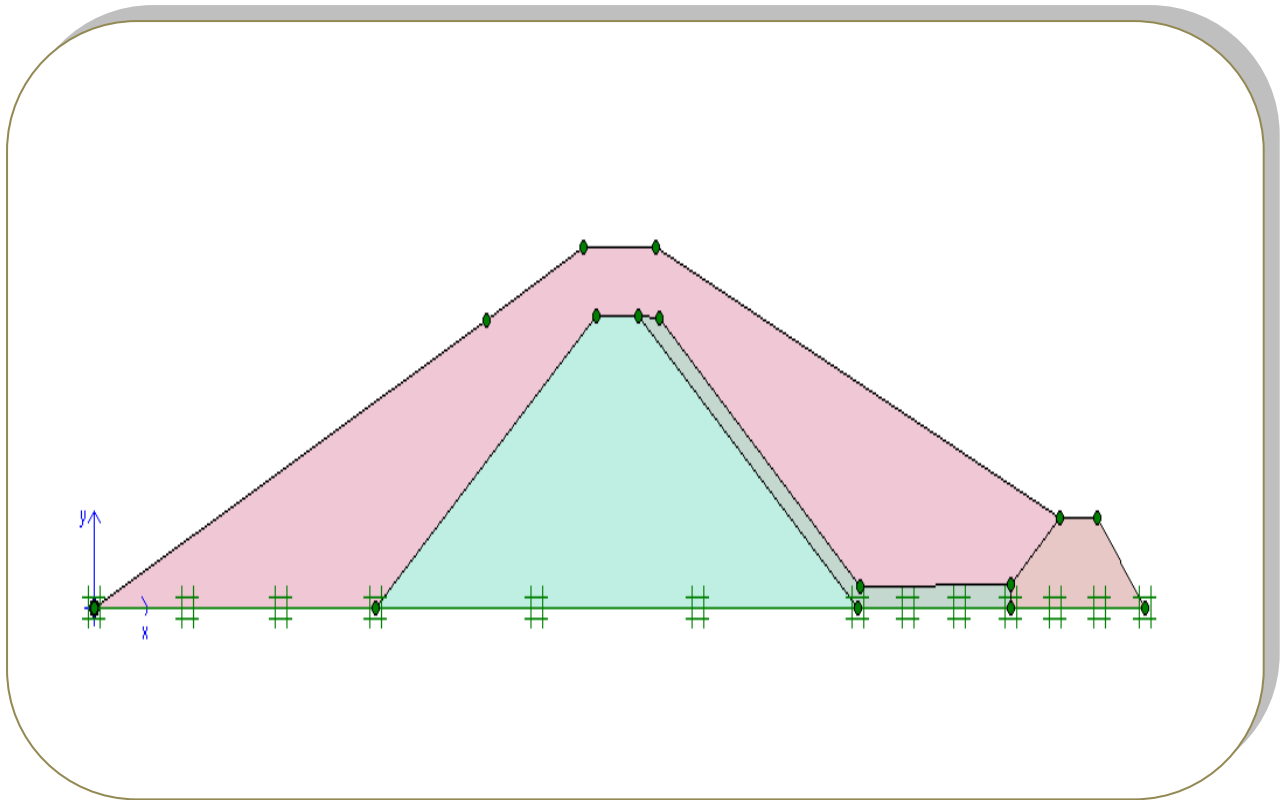


Figure III.4 : Représentation du modèle géométrique du projet (cas N°2).

### III.4 Résultats de la modélisation :

Les résultats de chaque cas étudié sont présentés sous la forme des variations de contraintes totales, effectives et pressions interstitielles. Il est également présenté, pour chaque cas, le maillage et la déformation.

#### III.4.1 Variante barrage homogène :

Le maillage est représenté sur la figure III.5

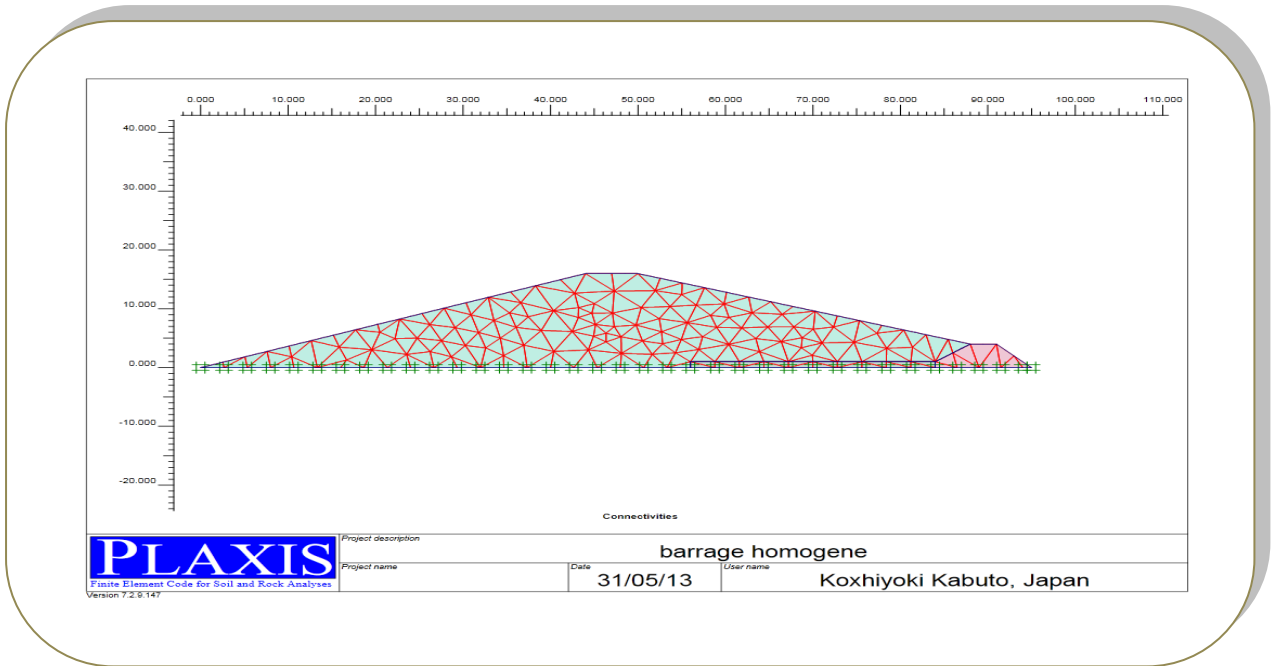


Figure III.5 : Schéma représentatif du maillage de barrage homogène

La charge utilisée au niveau de la modélisation est celle correspond à la côte PHE soit  $H= 14$  m.

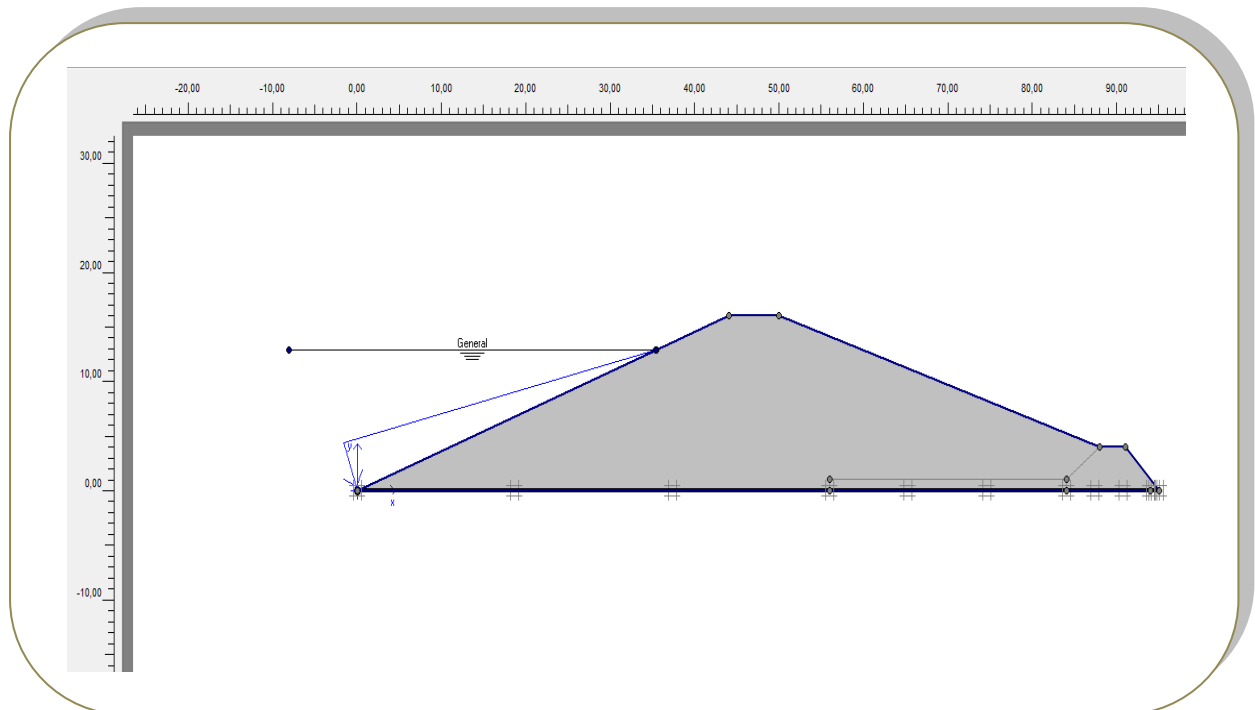


Figure III.6 : Présentation de la condition initiale avec charge amont correspondante

(Barrage homogène)

La figure III.7, sur la base de la génération du maillage et des conditions aux limites relatives à la charge d'eau, donne la configuration de la ligne de saturation.

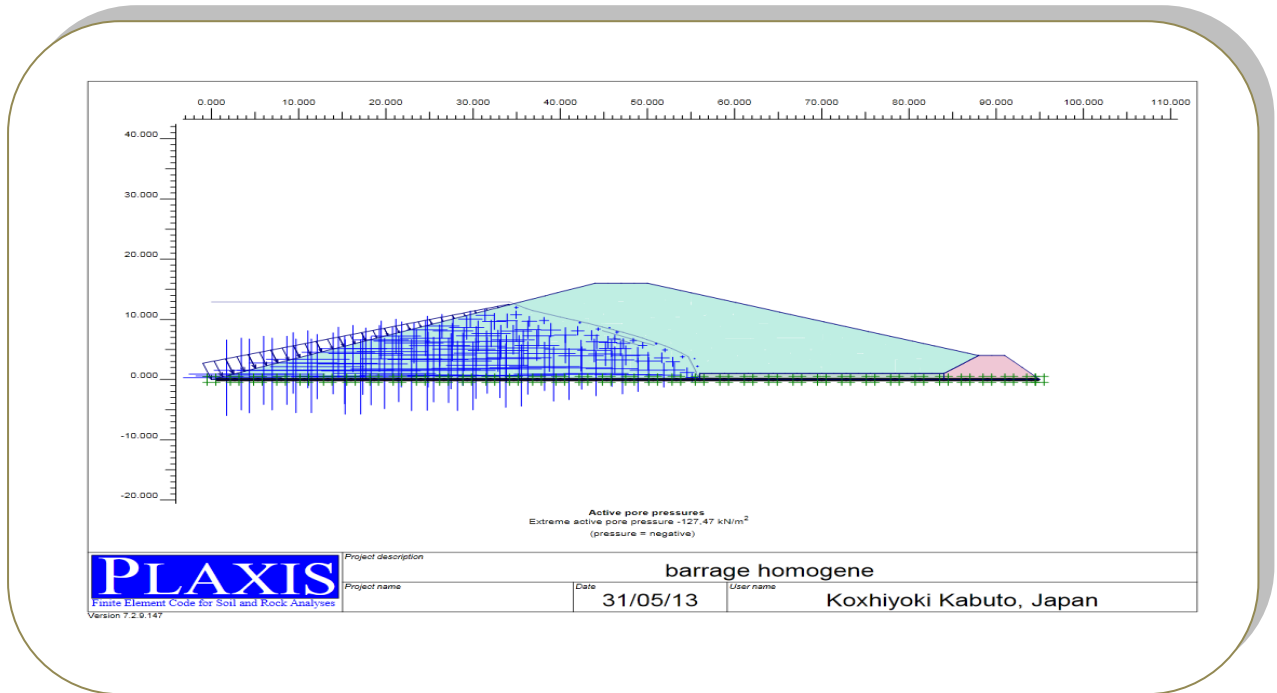


Figure III.7: Génération de la ligne de saturation (Barrage homogène)

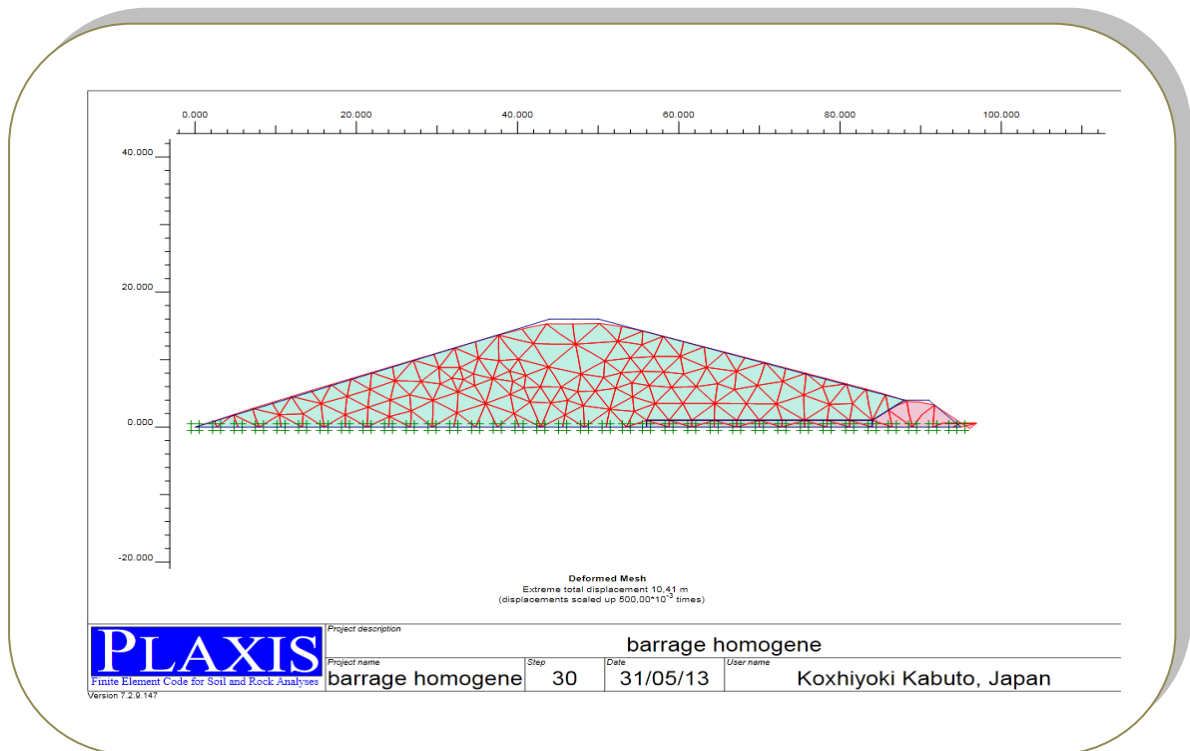


Figure III.8: Schéma représentatif de maillage déformé (Barrage homogène)

Les résultats de la modélisation servant de critères d'analyse sont présentés sous forme de :

- Déplacements,
- Contraintes totales,
- Contraintes effectives,
- Pression interstitielles.

Les figures de III.9 à III.12 donnent respectivement ces paramètres d'analyses.

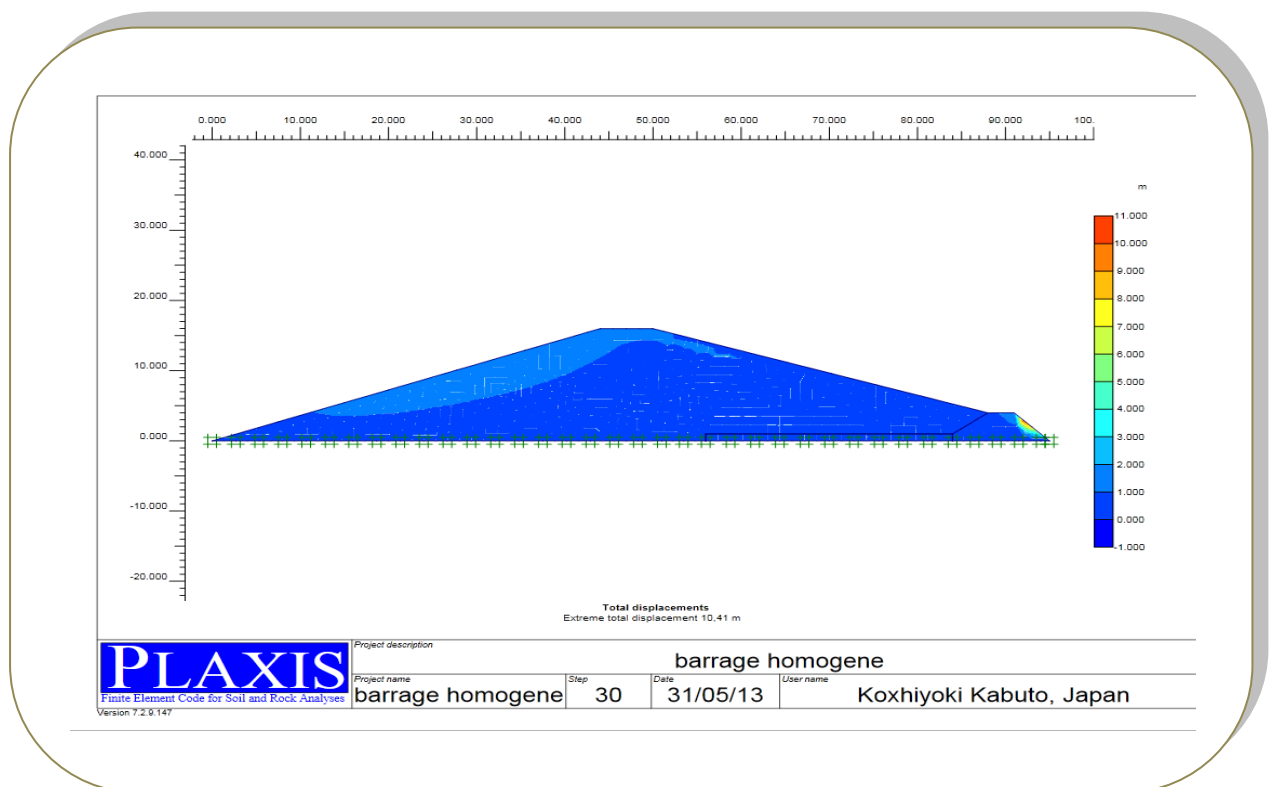


Figure III.9: Schéma représentatif des déplacements (Barrage homogène)

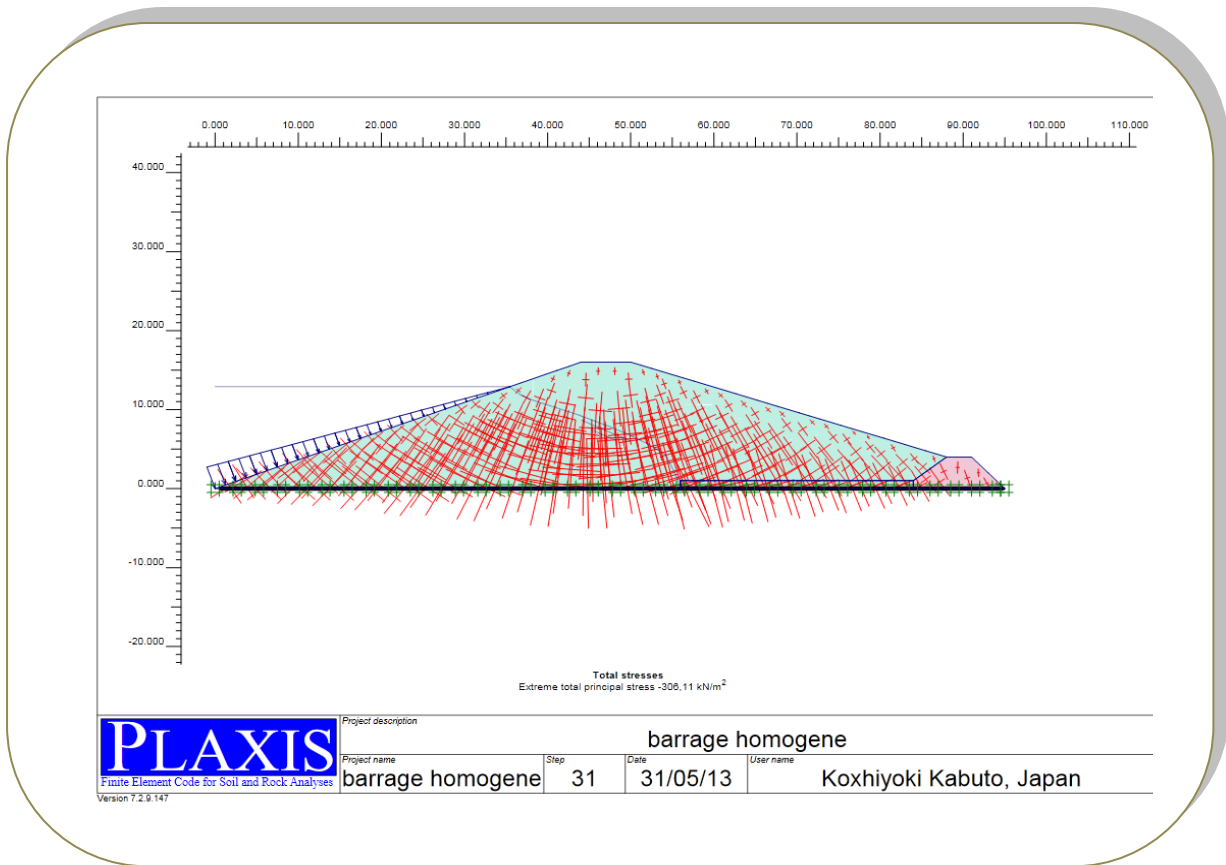


Figure III.10: Schéma représentatif de la contrainte totale ( Barrage homogène)

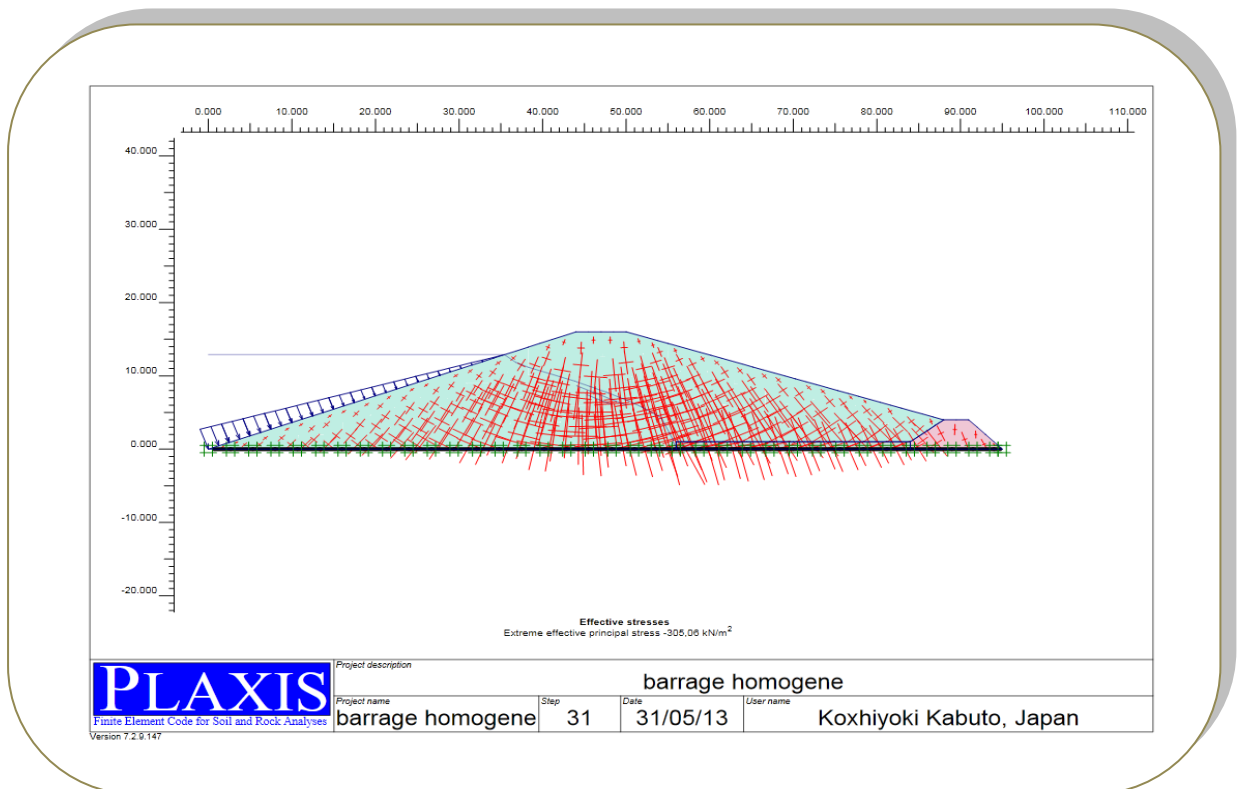


Figure III.11 : Schéma représentatif de la contrainte effective (Barrage homogène)



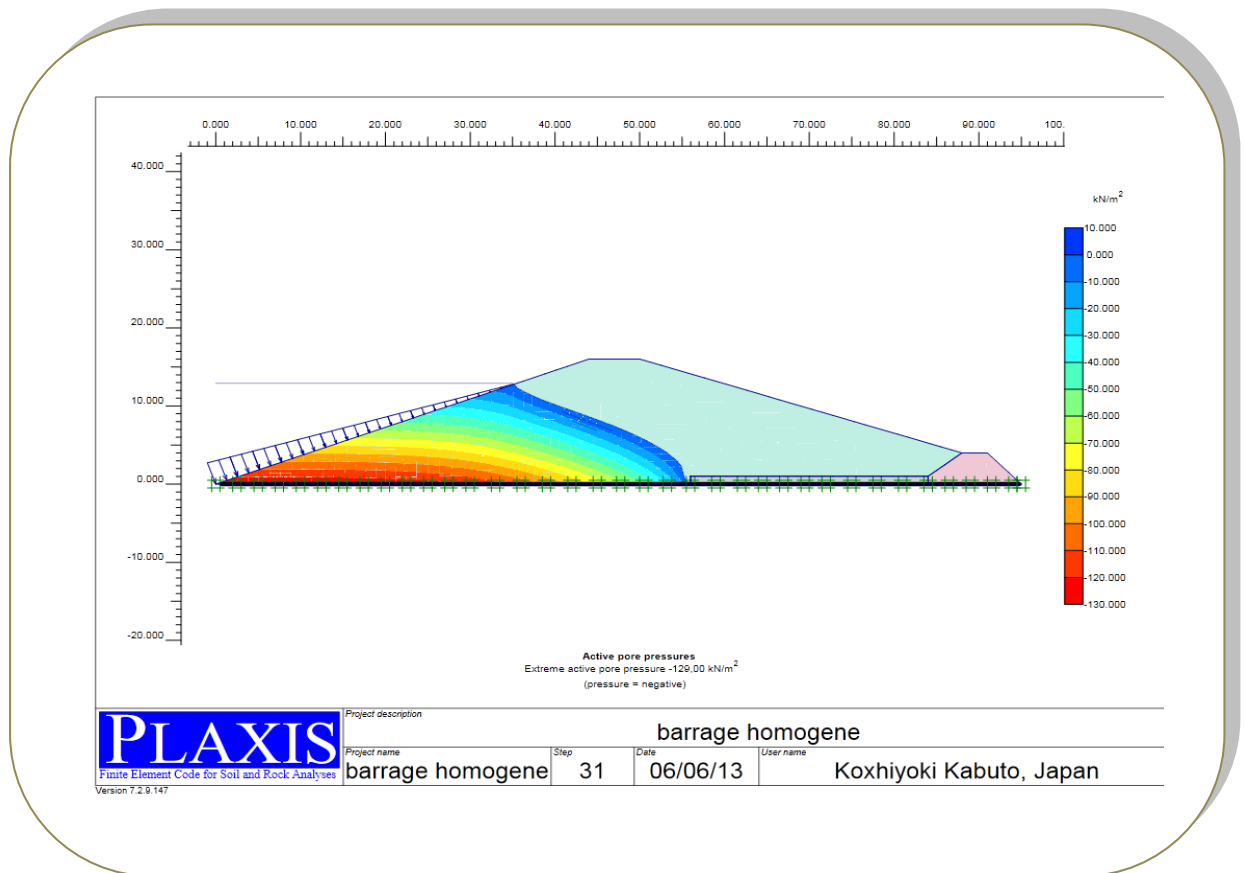


Figure III.12 : Schéma représentatif de la pression interstitielle (Barrage homogène)

Pour des raisons liées à l'étude des paramètres découlant des écoulements dans le corps du barrage, il a été choisit plusieurs zones au niveau des quelles seront analysés les différents paramètres.

La figure III.13 montre les profils d'analyses arrêtées.

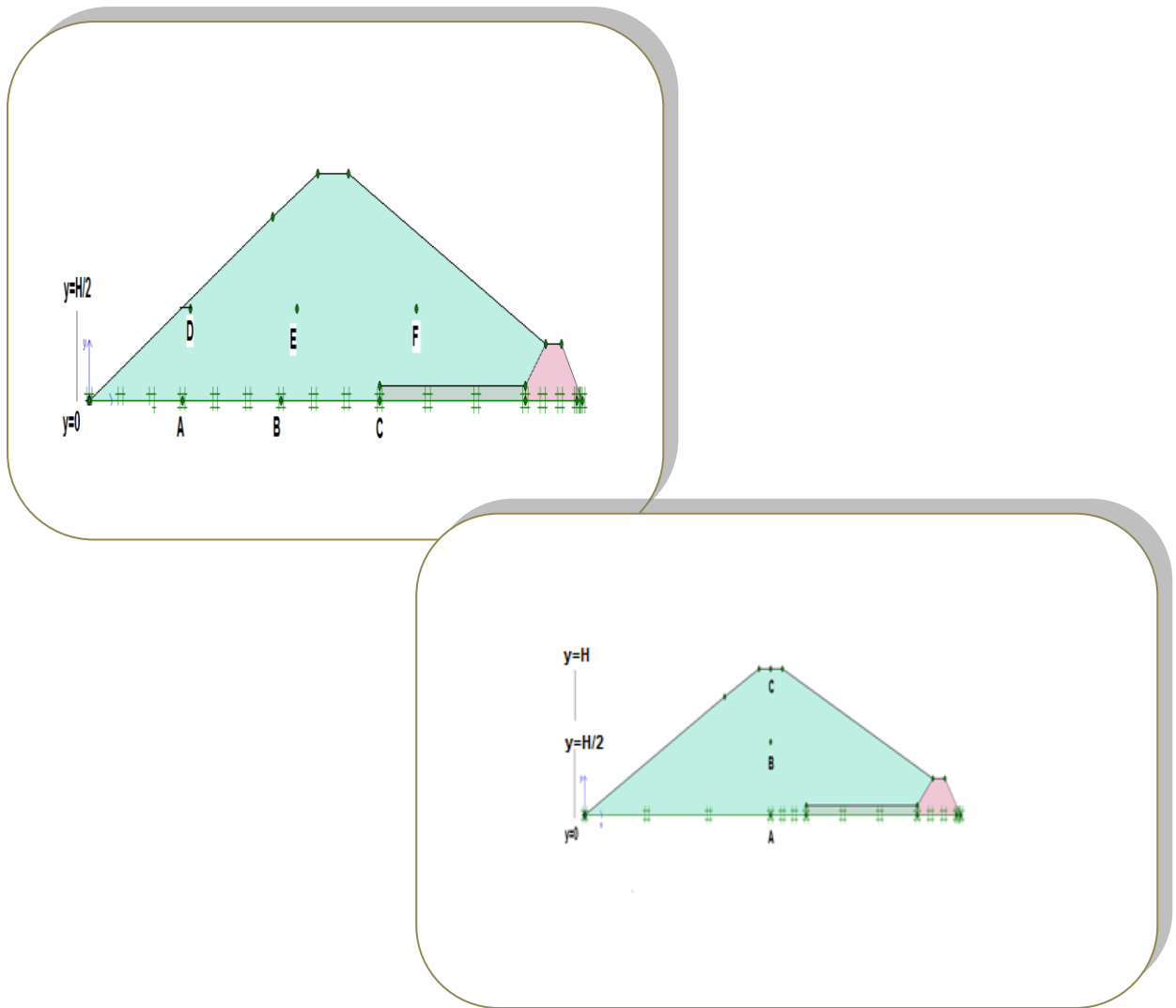


Figure III.13 : Schémas représentatifs des profils d'analyse (cas barrage homogène)

Le tableau III.2 donne l'évolution des contraintes totales, effectives et pressions interstitielles dans différents profils d'analyse.

Tableau III.2 : Synthèse des résultats de la modélisation (barrage homogène)

<i>Profil</i>	<i>Point</i>	<i>coordonnées</i>	<b>contraintes totales [KN/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Contraintes effectives [KN/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Pressions interstitielles [KN/m<sup>2</sup>]</b>
Y=0	A	18	194,58972	66,407879	121,63298
	B	37	215,41236	112,11989	103,29247
	C	56	181,39042	181,39042	0
Y=6,5	D	18	73,673416	7,9371977	65,736218
	E	40	114,51101	80,944266	33,566747
	F	60	127,15043	122,37243	0,24362768

Les déplacements pour différents hauteurs au niveau du corps du barrage sont consignés sur le tableau III.3

Tableau III.3 : Les résultats de déplacements (barrage homogène)

Hauteur [m]	Déplacements [m]
0	0
8	0,00077339
16	0,00131693

III.4.2 Variante barrage zoné, à noyau central :

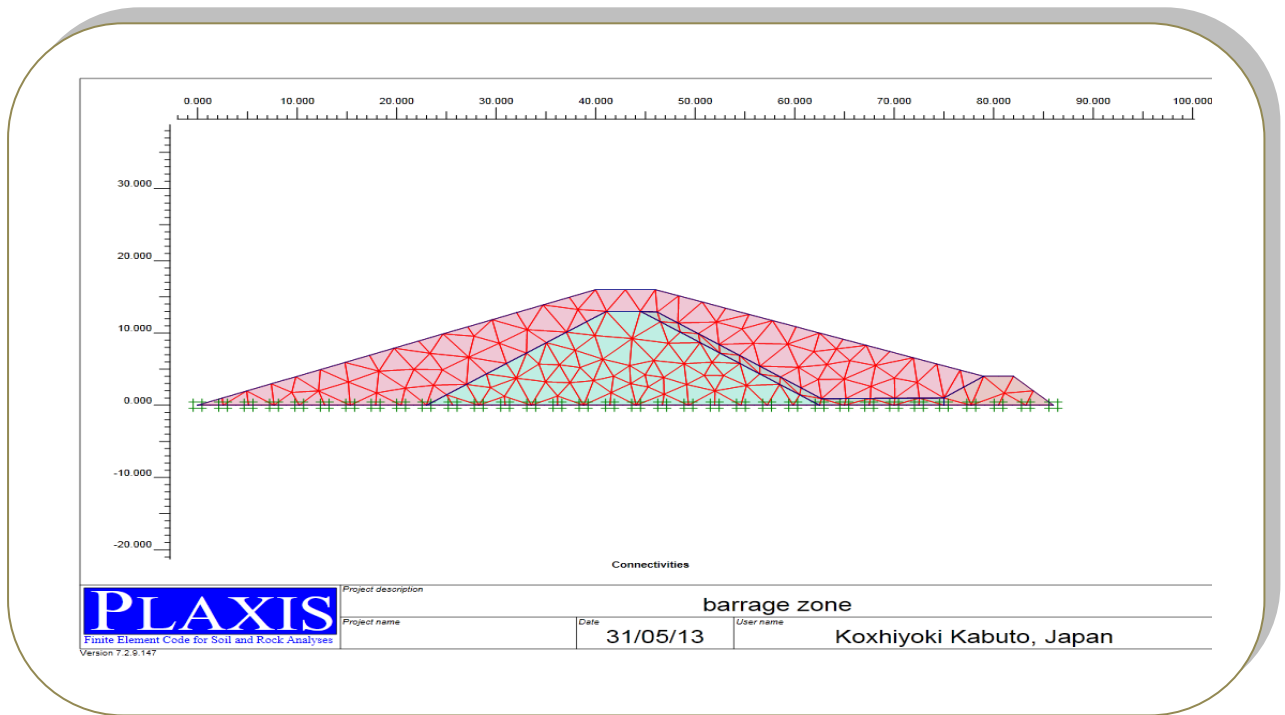


Figure III.14: Schéma représentatif du maillage (variante barrage zoné)

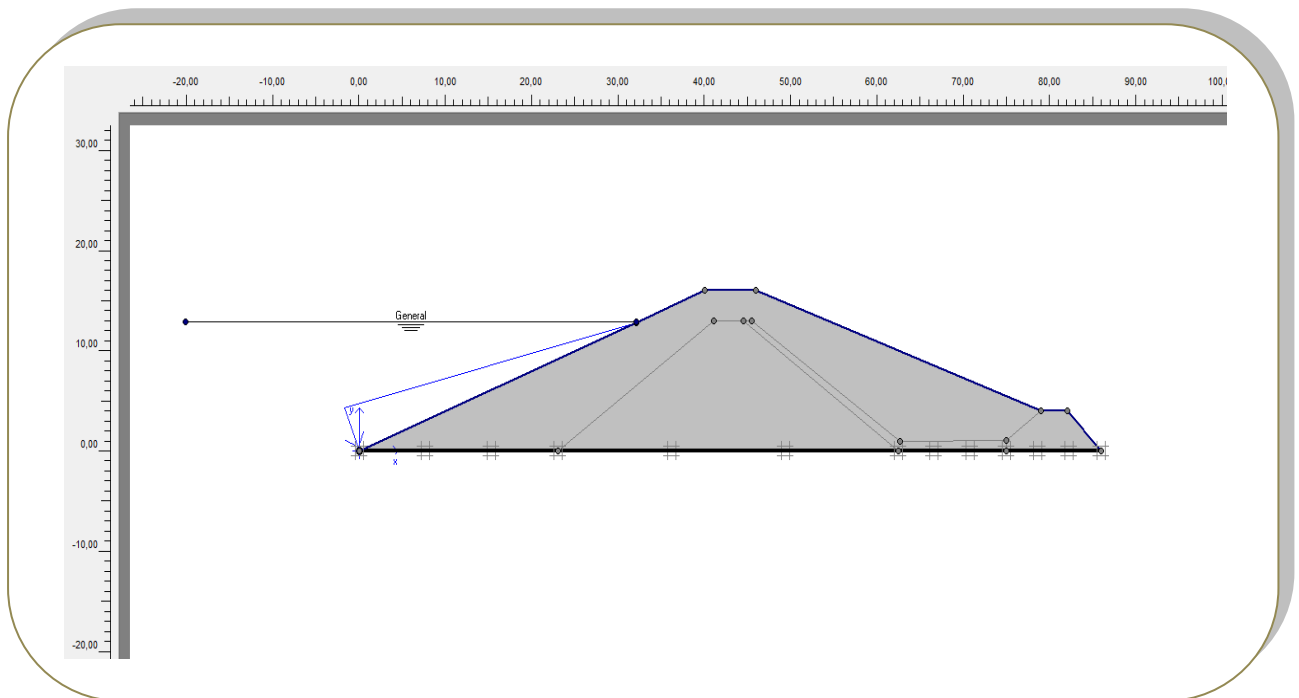


Figure III.15 : Présentation de la condition initiale avec charge amont correspondante  
(Barrage zoné)

Les figure III.16 à III.18 représentent respectivement la génération de la ligne de saturation, la déformé de maillage et les déplacements.

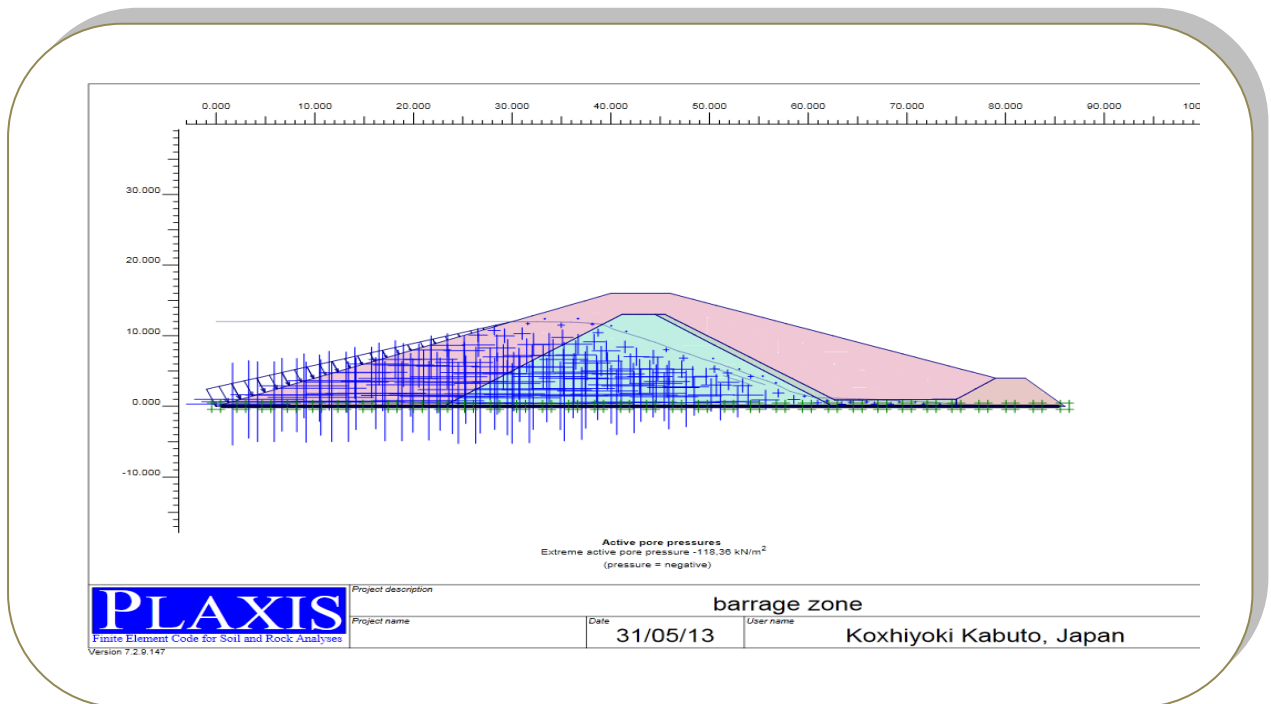


Figure III.16: Génération de la ligne de saturation (Barrage zoné)

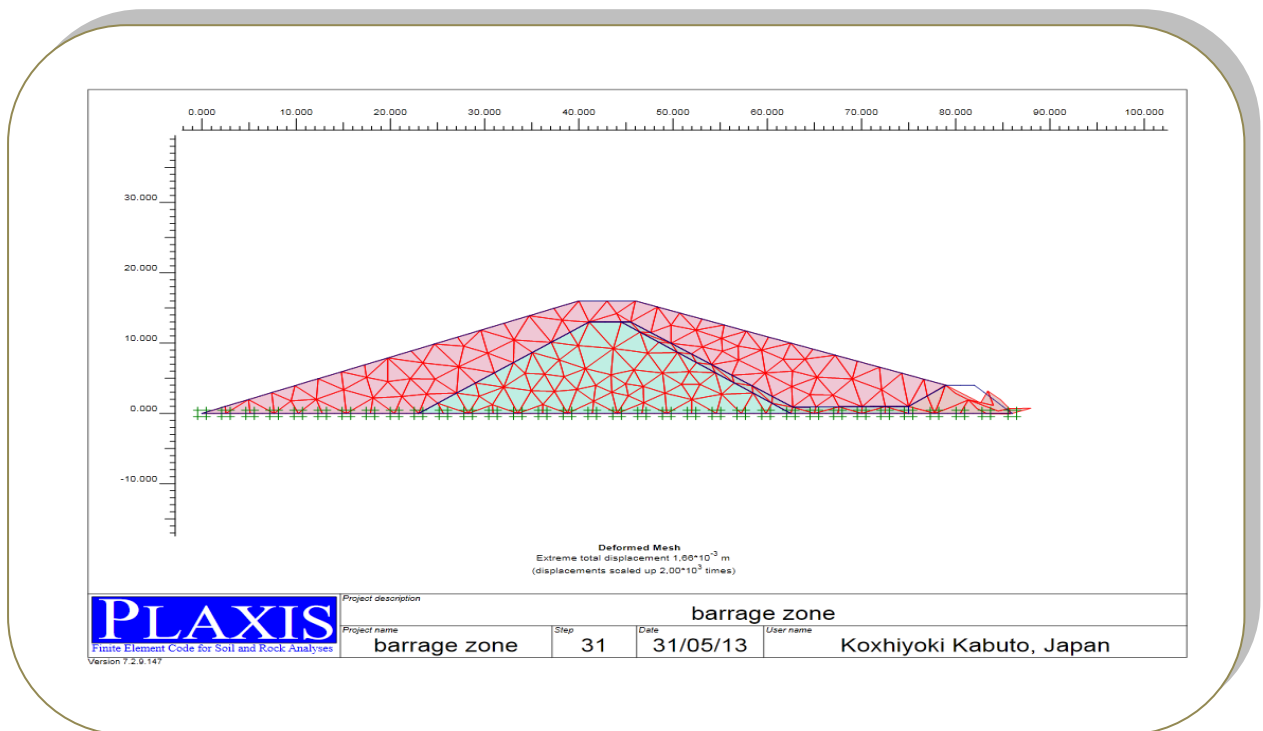


Figure III.17: Schéma représentatif de maillage déformé (Barrage zoné)

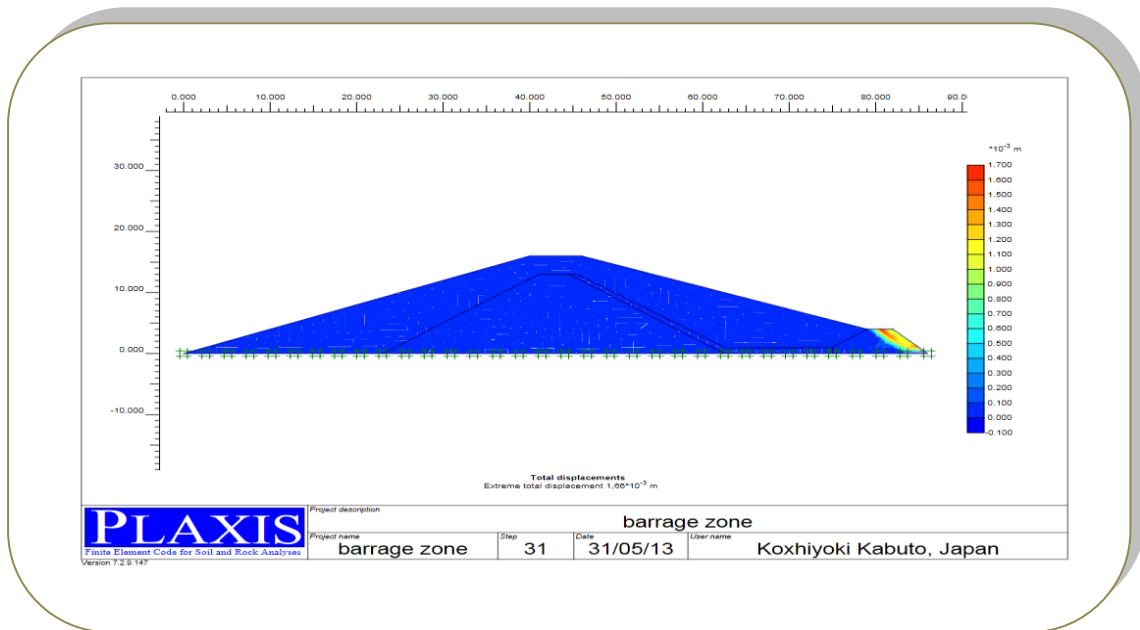


Figure III.18: Schéma représentatif des déplacements (Barrage zoné)

Les figures III.19 à III.21 illustrent les paramètres liées aux contraintes en l'occurrence :

- Contrainte totales,
- Contraintes effectives,
- Pressions interstitielles.

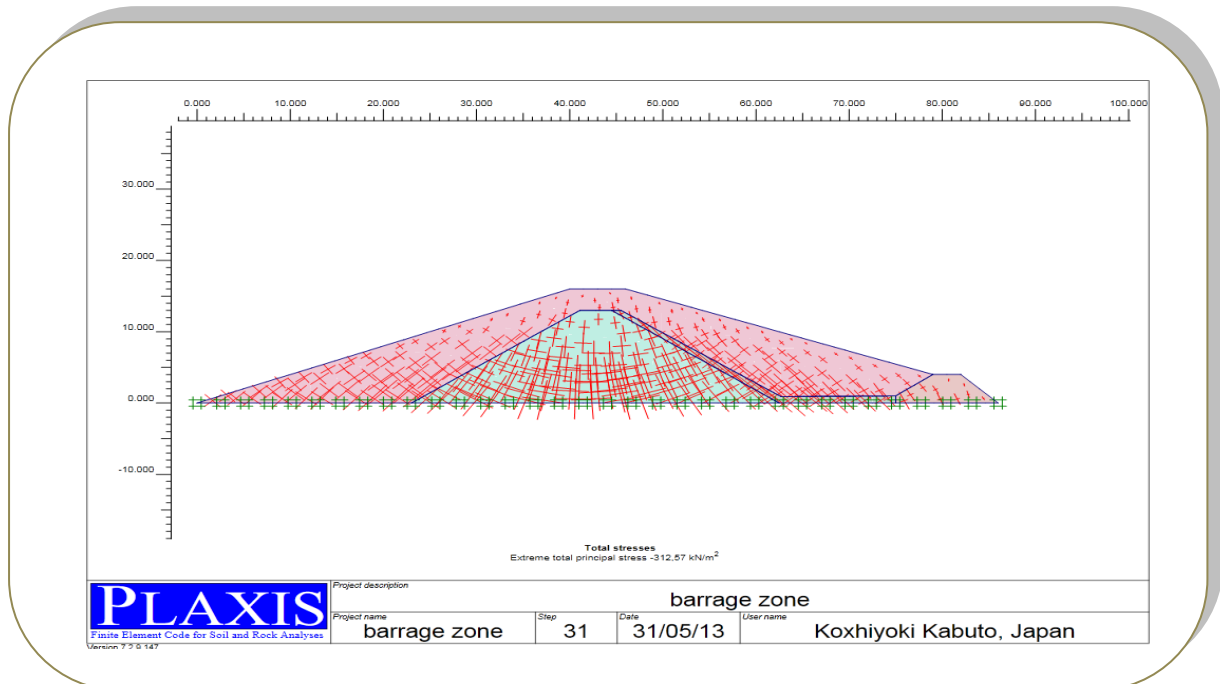


Figure III.19: Schéma représentatif de la contrainte totale (Barrage zoné)

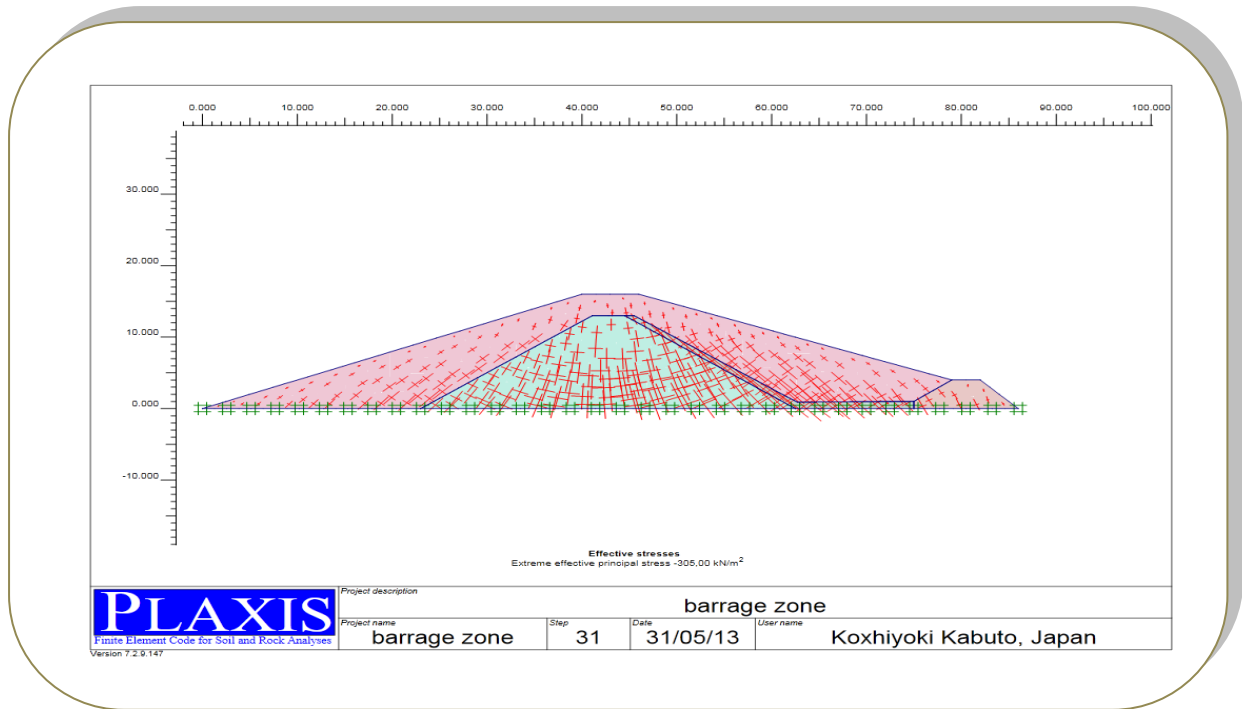


Figure III.20 : Schéma représentatif de la contrainte effective (Barrage zoné)

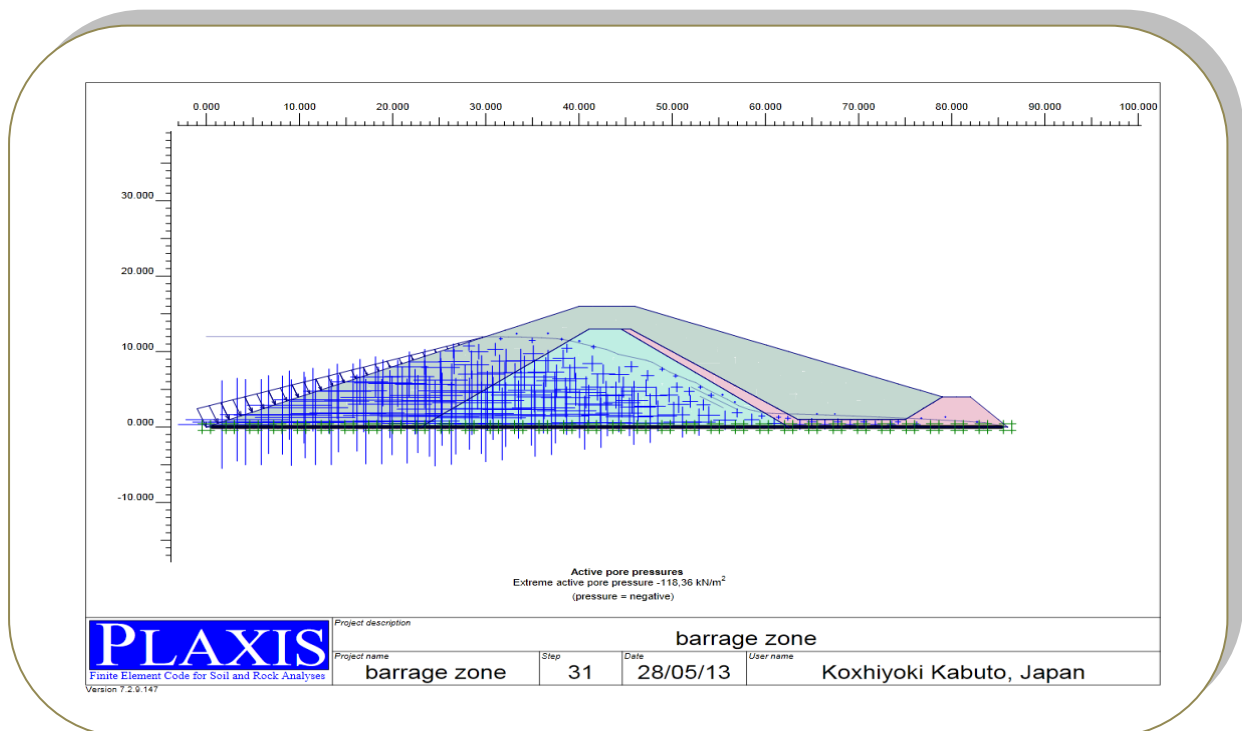


Figure III.21: Schéma représentatif de la pression interstitielle (Barrage zoné)

D'une manière similaire à la variante barrage homogène, il a été défini certains profils au niveau des quels seront analysés les paramètres liés aux écoulements dans le corps du barrage.

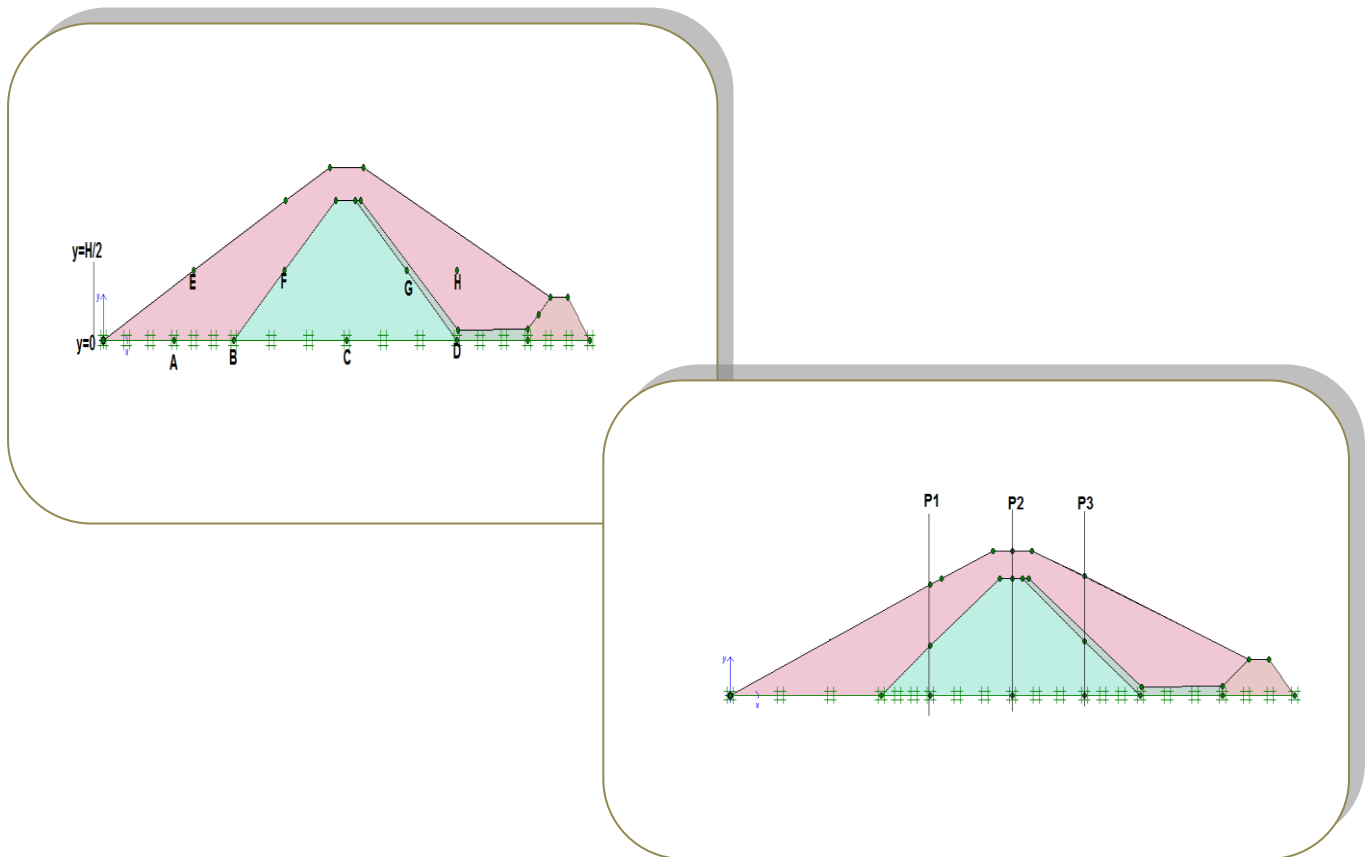


Figure III.22 : Schémas représentatifs des profils d'analyse (cas barrage zoné)

Le tableau III.3 donne la répartition des contraintes totales, contraintes effectives et pressions interstitielles dans différents profils d'analyses.

Tableau III.4 : Synthèse des résultats de la modélisation (barrage zoné)

<i>Profil</i>	<i>Point</i>	<i>Coordonnées</i>	<b>contraintes totales</b> [KN/m <sup>2</sup> ]	<b>Contraintes effectives</b> [KN/m <sup>2</sup> ]	<b>Pressions interstitielles</b> [KN/m <sup>2</sup> ]
Y=0	A	12,5	108,97168	108,97159	9,88935E-05
	B	23	234,34351	234,34329	0,00067573998
	C	43	281,52557	281,52553	3,88497E-05
	D	62,5	210,34459	210,34459	0
Y=6,5	E	20	6,6614842	6,661249	0,00022071
	F	32	125,15704	125,15705	7,1271E-05
	G	53,6	149,00468	138,89627	0
	H	62,5	71,566884	83,061259	0



Le tableau III.5 montre les déplacements au niveau des différents profils d'analyse.

Tableau III.5: Les résultats de déplacements (barrage zoné)

Profils	Hauteur [m]	Déplacements [m]
P1	0	0
	8	5,0372E-07
	12,3	9,7068E-07
P2	0	0
	13	4,581E-07
	16	1,3342E-06
P3	0	0
	8	5,0372E-07
	13,3	1,22E-06

### III.5. Interprétation des résultats :

#### III.5.1 Barrage homogène :

Pour cette variante les différentes conclusions tirées de la modélisation se résument en ce qui suit :

##### a) Déplacement :

Il a été conclu que le déplacement maximal a été enregistré en crête ( $1,31.10^{-3}$  m). Le déplacement est proportionnel à la hauteur du remblai. Les déplacements sont relativement faibles.

##### b) Pressions interstitielles :

Les valeurs des pressions interstitielles sont modérées. Leur évolution de l'amont vers l'aval est logique et dépend de la variation des charges d'eau en fonction de la position de la ligne de saturation.

Les valeurs des gradients hydrauliques obtenus à la base du barrage varient de 0,72 au pied amont du barrage jusqu'à 0,23 au voisinage du tapis drainant. Cette dernière valeur témoigne de la résistance du remblai vis-à-vis de phénomène d'érosion mécanique.

### III.5.2 Barrage zoné à noyau central :

L'analyse des paramètres liés à l'interprétation des résultats est similaire au cas de la variante barrage homogène.

#### a) Déplacements :

Les déplacements sont proportionnels à la hauteur des remblais. La déformation maximale est enregistrée au niveau de la crête du noyau (profil P<sub>2</sub>) et vaut  $1,33 \cdot 10^{-6}$  m. Il n'y a pas d'écarts importants des déformations entre le noyau et les recharges du barrage écartant tout risque de déformations différentielles.

#### b) Pressions interstitielles :

Les valeurs des pressions interstitielles sont relativement faibles. La contrainte liée à la concentration des pressions interstitielles sur la face amont du noyau n'a pas été enregistrée.

Les gradients hydrauliques au niveau de la base du noyau sont respectivement de

- $i=1,04$  à mi-distance entre le pied amont du barrage et le pied amont du noyau,
- $i=0,56$  au pied amont du noyau,
- $i=0,30$  au centre du noyau,
- $i=0,208$  au pied aval du noyau.

Cette dernière valeur écarte tout risque d'érosion interne puisque le gradient de conception reste toujours inférieur au gradient critique des matériaux du noyau.

### III.6 Conclusion :

A travers les résultats de la modélisation, leur interprétation par rapport aux paramètres décisifs, il n'est pas enregistré de phénomènes liés à des comportements anormaux. L'adoption de la variante définitive ne dépendra plus que de la disponibilité en quantités suffisantes des matériaux étanches pour ériger la totalité des remblais.

## CONCLUSION GENERALE

Les barrages de la catégorie 2 offrent de multiples avantages en terme de :

- Célérité de réalisation,
- Adaptation au caractère éparse des périmètres d'irrigation,
- Réponse à l'aspect aléatoire des précipitations,
- Maîtrise technique des études et réalisation par des compétences locales.

Toutefois, leur conception, à l'égard des enveloppes financières limitées, suscite un intérêt particulier parceque souvent dimensionner par des considérations empiriques.

Le travail élaboré, au niveau de ce mémoire, devait impérativement passé par une synthèse bibliographique sommaire sur l'ensemble des critères liés à leur conception et dimensionnement.

Il a été calculé la quasi-totalité des paramètres servant à la définition du profil type du barrage.

Ainsi, les calculs élaborés ont permis de retenir les principaux paramètres suivants :

- Apport moyen annuel de 14 Hm<sup>3</sup>,
- Un module spécifique annuel de 1,9 l/s.km<sup>2</sup>,
- Un apport fréquentiel 80% de 6 Hm<sup>3</sup>,
- Un apport solide spécifique de 645 T/m<sup>3</sup>.an,
- Un volume mort d'environ 2 Hm<sup>3</sup>,
- Un volume total de la retenue de 8 Hm<sup>3</sup>,
- Un volume utile de 7,3 Hm<sup>3</sup>,
- Hauteur totale du barrage de 16 m.

Dans une 2eme phase, il a été procédé à la définition de la géométrie du barrage ainsi qu'au dimensionnement des autres composants du corps de la digue. Les principales dimensions retenues se résument ainsi :

- 1) Barrage homogène :
  - Largeur en crête L=6m,

- Fruit amont 1/3, fruit aval 1/2,5,
  - Longueur tapis drainant  $L=23,5$ ,
  - Hauteur drain prismatique  $h=4m$ ,
  - Base du barrage  $B=94m$ .
- 2) Barrage zoné à noyau central :
- Fruit amont 1/2, fruit aval 1/3,
  - Hauteur de noyau  $H=13m$ ,
  - Base du noyau  $B=39 m$ ,
  - Hauteur drain prismatique  $h=4m$ .

Pour les deux variantes, une protection du talus amont contre l'effet de batiage a été dimensionnée, l'épaisseur de cette couche est d'environ 25 cm pour la variante digue homogène et de 30 cm pour la variante digue zonée à noyau central.

Après conception des profils du barrage, une modélisation a été en vue d'analyser le comportement du corps du barrage pour les deux variantes étudiées. Cette modélisation a été menée d'une manière paramétrée avec analyse des éléments suivants :

- Déformations des matériaux du barrage,
- Variation des champs de contraintes totales, effectives et pressions interstitielles,
- Analyse des critères liés à l'érosion mécanique par l'évaluation des gradients hydrauliques dans différentes zone du barrage et en fonction des profils choisis pour cette analyse.

Cette étude paramétrée a permis de mettre en évidence des critères de sécurité situés dans les limites de comportements normaux en l'occurrence :

- Faibles déformations et inexistence de déformations différentielles entre différents matériaux de la digue,
- Evolution modérée des pressions interstitielles et absence de développement intensif dans les zones critiques,
- Valeurs de gradients hydrauliques en deça des valeurs de gradients critiques pour les différents matériaux témoignant d'une résistance satisfaisante contre tout risque d'érosion interne.

## REFERENCE BIBLIOGRAPHIES

1. **EL HOUARI Nesrine; BEKHECHI Ilhem.** 1999/2000,"Etude du barrage SIKKAK Ain Youcef". Tlemcen : Université Aboubakr Belkaid.
2. **ANTON J.SCHLEISS.HENRI POUGATSCH,** 1969"LES BARRAGES; du projet de la mise en service". s.l. : Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.
3. **ISMAIL, DALACHI.** 2008/2009, "Etude d'un petit barrage sur l'oued TASSA". Tlemcen : Université Abou Bekr Belkaid.
4. **DJEMAI Mohammed; KORBAS Abdennour.**2000, " Etude d'un petit barrage en terre sur l'oued Khelfoune". Tlemcen : Université Aboubekr Belkaid.
5. **MOHAMED, ABDELHAKEM.** 2005-2006, MINI PROJET. Saida : Centre universitaire Dr Moulay Tahar - Saida.
6. **G. J, -M. Servais DOVONON.**1990," Comportement Statique et Dynamique d'une Section trapézoïdale de barrage-poids en béton". s.l. : ECOLE POLYTECHNIQUE DE THIES.
7. **FATIMA, OURGHI.** 1998,"Etude d'un petit barrage en remblais". Tlemcen : université Aboubakr Belkaid.
8. **CARRERE, ALAIN.** 1978 ,"Barrages".
9. **CODIS.** , 1985 "Petits barrage en terre etude et construction". s.l. : CEMEGREF.
10. 2005,"petite hydroélectricité: Guide technique pour la réalisation de projets". s.l. : ESHA,.
11. 2002,"modélisation dynamiques des barrages a l'aide du logiciel ANSYS-comportement élastique non linéaire"..
12. **DELIOU, PATRICK LE.** , 2007 "Les barrages: conception et maintenance". s.l. : Press universitaire de LYON.
13. "Rapport de site". s.l. : Control technique hydraulique (CTH).
14. **DEGOUTTE, GERARD.** 1997 ,"PETITS BARRAGES-Recommandations pour la conception,la réalisation et le suivi". s.l. : CEMAGREF.

15. **M.L.COMPAORE.** 1996"Cours de barrages-2eme Edition".
16. **PIMOT , G. CARTIE.**1984"Digues et barrages en terre de faible hauteur". s.l. : BULLETIN DE LIAISON DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSÉES.
17. **AIAIN BURON , ALAIN MEILHAC.** 1995"Les barrages".
18. **DUCLOUX, A.** "Le barrage de la Sorme, Etude et observations en cours de construction". : s.n.
19. **AMADOU BA,MAKTAR FALL,ALI NGOUILE NDIAYE.**1988 " Conception et dimensionnement d'un micro- barrage de retenue d'eau de ruissellement à KEUR NDOYE". s.l. : Ecole polytechnique de THIES.
20. **BOUVRDo, GARROSS.BERTHET.** 1990"BARRAGE ET RESERVOIRS".
21. **R.B.J. Brinkgreve,R. Al-Khoury,K.J. Bakker,P.G. Bonnier,P.J.W. Brand,W. Broere.** . 2003" PLAXIS,Version 8 Manuel de référence".
22. **BERNHARDT, VALERIE.** , 2006 " PLAXIS". s.l. : TERRASOL.
23. **BERTAL.M.A,BENYAHIA.O.** , 2012 " Traitement des fondations des barrages par l'injection et le drainage". Tlemcen : Université Abou Bekr Belkaid.