

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen**

**Faculté de Technologie**

**Département de Génie Civil**



Mémoire pour l'Obtention du Diplôme

**Master en Génie Civil**

**Option structure**

**Thème :**

## Analyse dynamique des aspects conceptuels des barrages voûtes (Oued Taht-Maskara)

**Présenté le par :**

HADRI Ahmed El Amin

BENHAMED Ahlam

Soutenu juin 2018 devant le jury composé de :

M<sup>f</sup>. ZADJAOUI A.

Président

M<sup>f</sup>. BEKKOUCHE A.

Examineur

M<sup>me</sup>.BOURABAH M. I.

Examineur

M<sup>me</sup>. Smail. N

Encadreur

M<sup>f</sup>. ROUISSAT.B

CO-Encadreur

Année Universitaire 2017-2018

## *DEDICACE*

Je dédie ce modeste travail

- 🌹 A mes très chers parents pour m'avoir toujours soutenue et encouragé par leur présence et leur conseils à tous les instants, et pour m'avoir toujours entourée de leur amour. Qu'ils trouvent à travers ce travail le fruit et la récompense de leurs efforts et que Dieu leurs donne santé et prospérité.
- 🌹 A mes frères et sœur Samia, Abdelhammid et Mostapha.
- 🌹 A toute ma famille et amis je leur adresse mes plus chaleureux remerciements. Leur soutien moral tout au long de mes études m'a permis de tenir bon dans les moments difficiles.
- 🌹 A ma collègue Ahlam qui m'as partagé la réalisation de ce projet.
- 🌹 A Issam Benazza, Omar Yeddou , Ali Ihab halfaya, Amin Bouchenafa, Ibrahim Ghennou, Mohamed yassine lekhal. Hicham Bouzahri, Nadir boudaoud
- 🌹 A mes collègues de promotion qu'ils trouvent ici l'expression de toute ma reconnaissance.
- 🌹 Et à tous ceux qui me sont chers de loin et de près et qui partagent une place dans mon cœur.

Ahmed El Amin

## ***DEDICACE***

Ce travail n'a pas pu être réalisé sans l'appui et les efforts fournis par les personnes chères à mon cœur, c'est pour cela que je dédie en premier temps ce modeste travail à mes chers parents.

A toute ma grande famille Benhamed

En spécial mes oncles et mes chères tantes

Mes cousins et cousines

A mon collègue qui a partagé ce projet

A mes amis Azzi Fatima et Zerradi Hayat

A mes collègues de promotion qu'ils trouvent ici l'expression de toute ma reconnaissance

Et à toutes les personnes qui me connaissent de loin ou de près.

*AHLAM*

## ***REMMERCIEMENTS***

Avant tout, nous remercions dieu le tout puissant de nous avoir donné la chance, la capacité et la force de réaliser ce projet de fin d'étude.

Tout d'abord nous offrons nos sincères remerciements à nos encadreurs Madame N.Smail et Monsieur B. Rouissat pour avoir assuré la direction de notre recherche, leur encouragement et leurs conseils le long de l'élaboration de ce projet.

Nous remercions Monsieur A. Zadjoui de nous avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury.

Nous remercions également les membres de jury, Monsieur A. Bekouche et Madame M. I. Bourabah pour avoir accepté d'examiner ce présent mémoire.

Nos remerciements les plus vifs vont également à Monsieur Bessaid Ibrahim pour sa collaboration, son aide et son assistance tout au long de l'élaboration de ce mémoire. Qu'il trouve ici l'expression de notre parfaite considération.

## Résumé

En zone sismique, les barrages voûtes sont les plus envisageables à condition que la géologie et l'intégration des ouvrages annexes le permettent. Un barrage voûte reporte la majeure partie de la poussée de l'eau sur les rives par des effets d'arc. On trouve des voûtes de formes très différentes : les cylindres, cylindres-cônes, les simples courbures et les voûtes à double courbure.

En se basant sur la modélisation numérique, et en considérant l'influence des paramètres conceptuels pour ce type de barrages (élancement de la vallée, rayons de courbures, module de déformation du rocher et concavité des parements), le présent travail vise une analyse paramétrée liée au comportement des barrages voûtes en zone sismique par l'étude de deux variantes de conception: barrage à simple courbure et barrage à double courbure.

L'application d'une telle thématique a été faite sur le cas du barrage Oued Taht, dans la wilaya de Mascara, d'une hauteur de 44 m. La modélisation numérique a été guidée par le code de calcul CASTEM.

**Mots clés** : barrage, voûte, déformation, contrainte, simple courbure, double courbure.

## ملخص

في المناطق الزلزالية السدود المقوسة هي الأكثر جدوى شريطة أن تكون الجيولوجيا و تكامل الهياكل الفرعية تسمح. السد المقوس يريجى الكثير من فحوى المياه على الضفاف من قبل آثار الانحناء. هناك أشكال مختلفة للغاية من الأقواس أسطوانات أسطوانات المخاريط منحنيات بسيطة و القوس مزدوج الانحناء.

على أساس النمذجة العددية و النظر في تأثير معايير التصميم لهذا النوع من السدود ( النحول من الوادي معامل تشوه الصخور و انحياز التقعر) و هذا العمل هو تحليل حدودي متعلق بسلوك السدود المقوسة في المناطق الزلزالية من خلال دراسة تصميمان سد مفرد الانحناء و سد مزدوج الانحناء.

و جاء تطبيق مثل هذا الموضوع في قضية سد واد تحت في ولاية معسكر من على ارتفاع 44 متر. و استرشد النمذجة العددية من رمز الكمبيوتر

**الكلمات المفتاحية** السد المقوس التشوه الضغط الانحناء المفرد الانحناء المزدوج.

## ***ABSTRACT***

In seismic zone, arch dams are the most feasible provided that the geology and the integration of ancillary structure allow it. An arch dam postpones most of the pressure of water on the banks by arc effects. There are vaults of very different shapes : cylinders, cylinder-cones, simple curvatures and double curvature vaults.

Based on the numerical modeling, and considering the influence of conceptual parameters for this type of dams (slenderness of the valley, radii of curvature, modulus of deformation of the rock and concavity of the facings), the present work aims at a design variants : single curvature dam and double curvature dam.

The application of such a theme was made on the case of the Oued Taht dam, in the wilaya of Maskara, a height of 44 m. Numerical modeling was guided by the CASTEM calculation code.

**Key words** : dam, vault, deformation, stress, single curvature, double curvature.

## Table des matières

DEDICACE .....	I
REMERCIEMENTS .....	III
RESUME .....	IV
ملخص .....	V
ABSTRACT .....	VI
TABLE DES MATIERS.....	VII
LISTE DES FIGURES .....	XII
LISTE DES PHOTOS .....	XVII
LISTE DES TABLEAUX .....	XVIII
LISTE DU SYMBOLE .....	XIX
<i>LISTE DES ABREVIATIONS</i> .....	XX
LISTE DES NOTATION .....	XX
INTRODUCTION GENERALE .....	XXI

### Chapitre I : Généralités sur les barrages et critères de choix

<u>I.Introduction</u> .....	Erreur ! Signet non défini.
<u>II.Définition</u> .....	Erreur ! Signet non défini.
<u>III.Rôle des barrages</u> .....	Erreur ! Signet non défini.
<u>III.1. L'irrigation de cultures</u> .....	Erreur ! Signet non défini.

III.2.L'hydro-électricité.....	Erreur ! Signet non défini.
III.3. Contrôle des crues.....	Erreur ! Signet non défini.
IV. Les types de barrage.....	Erreur ! Signet non défini.
IV.1. Les barrages en béton.....	Erreur ! Signet non défini.
IV.1.1. Les barrage-poids.....	Erreur ! Signet non défini.
IV.1.2. Barrage voûte.....	Erreur ! Signet non défini.
IV.1.3. Barrage à contreforts.....	Erreur ! Signet non défini.
IV.1.4. Barrage en bétoncompacté au rouleau (BCR).....	Erreur ! Signet non défini.
IV.2. Barrage en remblai.....	Erreur ! Signet non défini.
V.Sollicitations sur les barrages.....	Erreur ! Signet non défini.
VI.Critères de conception des barrages.....	Erreur ! Signet non défini.
VI.1. Topographie.....	Erreur ! Signet non défini.
VI.2. Sismicité de la région.....	Erreur ! Signet non défini.
VI.3. Morphologie de la vallée.....	Erreur ! Signet non défini.
VI.4. Condition de fondations.....	Erreur ! Signet non défini.
VI.5. Données géologiques et géotechniques.....	Erreur ! Signet non défini.
VII.Avantages et inconvénients des barrages.....	Erreur ! Signet non défini.
IX.Conclusion.....	Erreur ! Signet non défini.

## **Chapitre II : Les barrages-voûtes**

I.Introduction.....	Erreur ! Signet non défini.
II.Conception et construction d'un barrage.....	Erreur ! Signet non défini.
I.1. Résistance à la compression.....	Erreur ! Signet non défini.
I.2. Résistance à la traction.....	Erreur ! Signet non défini.
III.Types et dimensionnement des voûtes.....	Erreur ! Signet non défini.
II.1.Types des voûtes.....	Erreur ! Signet non défini.
II.2. Dimensionnement des voûtes.....	Erreur ! Signet non défini.
IV.Choix de la forme initiale.....	Erreur ! Signet non défini.
III.1. Hauteur du barrage.....	Erreur ! Signet non défini.
III.2. Forme des sections horizontales.....	Erreur ! Signet non défini.
III.2.1. Arcs circulaires.....	Erreur ! Signet non défini.
III.2.2. Arcs constitués de segments de parabole.....	Erreur ! Signet non défini.
III.2.3. Arcs constitués d'arcs d'ellipse.....	Erreur ! Signet non défini.
III.2.4. Arcs constitués de segments de spirale logarithmique.....	Erreur ! Signet non défini.
III.3. Forme des sections verticales.....	Erreur ! Signet non défini.
III.4. Epaisseur de la console à la clé.....	Erreur ! Signet non défini.

III.5. Coefficient d'hardiesse .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.6. Stabilité des massifs d'appuis .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
V. Les contraintes développées dans les barrages voûtes .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
IV.1. Calcul des sollicitations dans la zone d'encastrement des arcs.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
IV.1.1. Méthode de calcul.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
IV.1.2. Conditions au contour.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
IV.2. Localisation des zones tendues et comprimées .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
VI. Déformations et les déplacements dans les barrages voûtes .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
V.1. Compatibilité des déformations .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
V.1.1. Déformation de l'arc au centre $\delta_a$ .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
V.1.2. Déformation de la console $\delta_c$ .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
V.2. Déplacements dus aux déformations de la fondation.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
VII. La stabilité dans les barrages voûtes .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
VI.1. Equilibre statique.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
VI.2. Equilibre élastique.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
VIII. Effets thermique sur les barrages voûtes .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
VII.1. Température du béton .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
VII.2. Effets de la température dans les barrages voûtes .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
VII.2.1. Variation uniforme de la température.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
VII.2.2. Gradient de température .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
IX. Comportement sismique des barrages voûtes .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
VIII.1. Séisme .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
VIII.2. Conception générale et scénario de rupture dans les barrages voûtes .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
VIII.3. Analyse sismique des barrages.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
VIII.3.1. Méthode des éléments finis.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
VIII.3.2. Méthodes simplifiées .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
VIII.3.3. Méthodes d'analyses traditionnelles .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
X. Fissuration.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
IX.1. Fissuration du pied amont.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
XI. Barrage voûte à double courbure .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
X.1. Principe de la voûte à double courbure.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
X.2. Calcul en coque.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
XII. Conclusion.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>

### **Chapitre III : Surveillances et auscultations des barrages**

I. Introduction .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
-----------------------	------------------------------------

II.Auscultation .....	Erreur ! Signet non défini.
III.Choix des profils d'auscultation .....	Erreur ! Signet non défini.
IV.Choix du dispositif d'auscultation .....	Erreur ! Signet non défini.
V.Contrôle des déplacements et des déformations.....	Erreur ! Signet non défini.
V.1. Vinchons .....	Erreur ! Signet non défini.
V.2. Pendules .....	Erreur ! Signet non défini.
V.3. Nivellement .....	Erreur ! Signet non défini.
V.4. Topographie .....	Erreur ! Signet non défini.
V.5. Inclinomètres.....	Erreur ! Signet non défini.
V.5. Extensomètres.....	Erreur ! Signet non défini.
V.6. Fissuromètre.....	Erreur ! Signet non défini.
VI.Mesures des paramètres hydrauliques .....	Erreur ! Signet non défini.
VI.1. Mesure des pressions interstitielles .....	Erreur ! Signet non défini.
VI.1.1. Piézomètres à tube ouvert.....	Erreur ! Signet non défini.
VI.1.2. Cellules de pression interstitielle .....	Erreur ! Signet non défini.
VII.Mesures des débits et de fuite de drainage .....	Erreur ! Signet non défini.
VIII.Auscultation des barrages voûtes.....	Erreur ! Signet non défini.
IX.Conclusion.....	Erreur ! Signet non défini.

## **Chapitre IV : Analyse conceptuelle des profils de barrages voûte basée sur la modélisation**

I.Introduction .....	Erreur ! Signet non défini.
II.Les objectifs .....	Erreur ! Signet non défini.
III.Application sur le cas du barrage Oued Taht .....	Erreur ! Signet non défini.
III.1. Présentation de l'ouvrage.....	Erreur ! Signet non défini.
III.2. Morphométrie du bassin versant .....	Erreur ! Signet non défini.
III.3. Profil type du barrage .....	Erreur ! Signet non défini.
III.4. Caractéristiques de la retenue.....	Erreur ! Signet non défini.
III.5. Géologie régionale et géologie du site .....	Erreur ! Signet non défini.
III.6. Combinaisons de conceptions analysées.....	Erreur ! Signet non défini.
IV.Présentation du code de calcul et variantes de la modélisation .....	Erreur ! Signet non défini.
IV.1. Description du logiciel .....	Erreur ! Signet non défini.
IV.2. Principaux objectifs du logiciel .....	Erreur ! Signet non défini.
IV.3. Procédure de résolution d'un problème avec CASTEM.....	Erreur ! Signet non défini.
IV.4. Unités .....	Erreur ! Signet non défini.
V.Etude des cas de la modélisation du barrage .....	Erreur ! Signet non défini.

V.1. Paramètres de modélisation .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
V.1.1. Prédimensionnement du profil du barrage.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
V.1.2. Maillage et discrétisation du barrage.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
V.1.3. Caractéristiques mécaniques .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
V.2. Objectifs de la modélisation .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
VI. Résultats graphiques et analytiques .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
VI.1. Barrage voûte à simple courbure .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
VI.1.1. Influence du module de déformation du rocher.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
VI.2.2. Influence du rayon de courbure de la voûte.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
VI.2. Barrage voûte à double courbure.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
VI.2.1. Influence du module de déformation du rocher.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
VI.2.2. Influence du rayon de courbure de la voûte .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
VI.3. Analyse comparative au niveau axial de la voûte .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
VII. Interprétation des résultats .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
VII.1. Analyse de l'évolution des contraintes.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
VII.1.1. Barrage voûte à simple courbure .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
VII.1.2. Barrage voûte à double courbure .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
VII.2. Analyse des déplacements .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
VIII. Conclusion.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>

## Liste des figures

### Chapitre I

Aucune entrée de table des matières n'a été trouvée.

### Chapitre II

Figure 1: Optimisation de la hauteur du barrage.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 2 : Définitions géométriques des arcs.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 3: Définition des arcs elliptiques.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 4 : Définition des arcs avec segments de spirale logarithmique.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 5 : Relation entre la géométrie des arcs et celle des consoles.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 6 : Dimensions caractéristique de la console a la clé.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 7: Relation entre le coefficient d'hardiesse C et la hauteur H, pour quelques barrages voûtes existants. .....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 8 : Analyse de stabilité des appuis et de la fondation .....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 9 : Zones tendues et comprimées dans un barrage-voûte. ....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 10 : Compatibilité entre les déformations radiales de la console et l'arc à leur point d'intersection. .....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 11 : Déplacements dus aux déformations de la fondation. ....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 12 : Température dans un barrage-voûte, approximation linéaire. ....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 13 : Effet d'une variation uniforme de la température : position de la force hyperstatique.	Erreur ! Signet non défini.
Figure 14 : Distribution 3D de la pression hydrodynamique selon la formulation de Westergaard.	Erreur ! Signet non défini.

### Chapitre III

Figure 1 : Vinchon.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 2 : Schéma d'installation d'un pendule.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 3 : Repère de nivellement en crête de remblai.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 4 : Cellule de pression interstitielle à corde vibrante. ....	Erreur ! Signet non défini.

### Chapitre IV

Figure 1 : Site du barrage Oued Taht. ....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 2 : La retenue du barrage Oued Taht. ....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 3 : Discrétisation du barrage.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 4 : Positions de comparaison des variations de contraintes.....	Erreur ! Signet non défini.

Figure 5 : Composante de la contrainte suivant X dans un barrage voûte à simple courbure pour R=55 m et E=4 Gpa.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 6 : Composante de la contrainte suivant Y dans un barrage voûte à simple courbure pour R=55 m et E=4 Gpa.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 7 : Composante de la contrainte suivant Y dans un barrage voûte à simple courbure pour R=55 m et E=4 Gpa.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 8 : Composante de la contrainte suivant X dans un barrage voûte à simple courbure pour R=55 m et E=8 Gpa.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 9 : Composante de la contrainte suivant Y dans un barrage voûte à simple courbure pour R=55 m et E=8 Gpa.....	65
Figure 10 : Composante de la contrainte suivant Z dans un barrage voûte à simple courbure pour R=55 m et E=8 Gpa.....	65
Figure 11 : Composante de la contrainte suivant X dans un barrage voûte à simple courbure pour R=27,5 m et E=4 Gpa.....	66
Figure 12 : Composante de la contrainte suivant Y dans un barrage voûte à simple courbure pour R=27,5 m et E=4 Gpa.....	66
Figure 13 : Composante de la contrainte suivant Z dans un barrage voûte à simple courbure pour R=27,5 m et E=4 Gpa.....	66
Figure 14 : Composante de la contrainte suivant X dans un barrage voûte à simple courbure pour R=27,5 m et E=8 Gpa.....	66
Figure 15 : Composante de la contrainte suivant Y dans un barrage voûte à simple courbure pour R=27,5 m et E=8 Gpa.....	66
Figure 16 : Composante de la contrainte suivant Z dans un barrage voûte à simple courbure pour R=27,5 m et E=8 Gpa.....	66
Figure 17 : Variation des contraintes suivant X dans face amont-rive droite du barrage voûte à simple courbure pour R=55m.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 18 : Variation des contraintes suivant Y dans face amont-rive droite du barrage voûte à simple courbure pour R=55m.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 19 : Variation des contraintes suivant X dans face aval-rive droite du barrage voûte à simple courbure pour R=55m.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 20 : Variation des contraintes suivant Y dans face aval-rive droite du barrage voûte à simple courbure pour R=55m.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 21 : Variation des contraintes suivant X dans face amont-rive gauche du barrage voûte à simple courbure pour R=55m.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 22 : Variation des contraintes suivant Y dans face amont-rive gauche du barrage voûte à simple courbure pour R=55m.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 23 : Variation des contraintes suivant X dans face aval-rive gauche du barrage voûte à simple courbure pour R=55m.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 24 : Variation des contraintes suivant Y dans face aval-rive gauche du barrage voûte à simple courbure pour R=55m.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 25 : Variation des contraintes suivant X dans fibre centrale du barrage voûte à simple courbure pour R=55m.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>

Figure 26 : Variation des contraintes suivant Y dans fibre centrale du barrage voûte à simple courbure pour R=55m. ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 27 : Variation des contraintes suivant X dans face amont-rive droite du barrage voûte à simple courbure pour R=27,5m. ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 28 : Variation des contraintes suivant Y dans face amont-rive droite du barrage voûte à simple courbure pour R=27,5m.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 29 : Variation des contraintes suivant X dans face aval-rive droite du barrage voûte à simple courbure pour R=27,5m.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 30 : Variation des contraintes suivant Y dans face aval-rive droite du barrage voûte à simple courbure pour R=27,5m.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 31 : Variation des contraintes suivant X dans face amont-rive gauche du barrage voûte à simple courbure pour R=27,5m. ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 32 : Variation des contraintes suivant Y dans face amont-rive gauche du barrage voûte à simple courbure pour R=27,5m. ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 33 : Variation des contraintes suivant X dans face aval-rive gauche du barrage voûte à simple courbure pour R=27,5m.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 34 : Variation des contraintes suivant Y dans face aval-rive gauche du barrage voûte à simple courbure pour R=27,5m.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 35 : Variation des contraintes suivant X dans fibre centrale du barrage voûte à simple courbure pour R=27,5m. ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 37 : Positions de comparaison des variations de contraintes dans un barrage voûte à double courbure. ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 38 : Composante de la contrainte suivant X dans un barrage voûte à double courbure pour R=55 m et E=4 Gpa. ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 39 : Composante de la contrainte suivant Y dans un barrage voûte à double courbure pour R=55 m et E=4 Gpa. ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 40 : Composante de la contrainte suivant Z dans un barrage voûte à double courbure pour R=55 m et E=4 Gpa. ....	80
Figure 41 : Composante de la contrainte suivant X dans un barrage voûte à double courbure pour R=55 m et E=8 Gpa. ....	80
Figure 42 : Composante de la contrainte suivant Y dans un barrage voûte à double courbure pour R=55 m et E=8 Gpa. ....	80
Figure 43 : Composante de la contrainte suivant Z dans un barrage voûte à double courbure pour R=55 m et E=8 Gpa. ....	80
Figure 44 : Composante de la contrainte suivant X dans un barrage voûte à double courbure pour R=45 m et E=4 Gpa. ....	80
Figure 45 : Composante de la contrainte suivant Y dans un barrage voûte à double courbure pour R=45 m et E=4 Gpa. ....	80
Figure 46 : Composante de la contrainte suivant Z dans un barrage voûte à double courbure pour R=45 m et E=4 Gpa. ....	81
Figure 47 : Composante de la contrainte suivant X dans un barrage voûte à double courbure pour R=45 m et E=8 Gpa. ....	81

Figure 48 : Composante de la contrainte suivant Y dans un barrage voûte à double courbure pour R=45 m et E=4 Gpa. ....	81
Figure 49 : Composante de la contrainte suivant Z dans un barrage voûte à double courbure pour R=45 m et E=4 Gpa. ....	81
Figure 50 : Variation des contraintes suivant X dans face amont-rive droite du barrage voûte à double courbure pour R=45m. ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 51 : Variation des contraintes suivant Y dans face amont-rive droite du barrage voûte à double courbure pour R=45m. ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 52 : Variation des contraintes suivant X dans face aval-rive droite du barrage voûte à double courbure pour R=45m.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 53 : Variation des contraintes suivant Y dans face aval-rive droite du barrage voûte à double courbure pour R=45m.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 54 : Variation des contraintes suivant X dans face amont-rive gauche du barrage voûte à double courbure pour R=45m. ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 55 : Variation des contraintes suivant Y dans face amont-rive gauche du barrage voûte à double courbure pour R=45m. ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 56 : Variation des contraintes suivant X dans face aval-rive gauche du barrage voûte à double courbure pour R=45m.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 57 : Variation des contraintes suivant Y dans face aval-rive gauche du barrage voûte à double courbure pour R=45m.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 58 : Variation des contraintes suivant X dans fibre centrale du barrage voûte à double courbure pour R=45m. ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 59 : Variation des contraintes suivant Y dans fibre centrale du barrage voûte à double courbure pour R=45m. ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 60 : Variation des contraintes suivant X dans face amont-rive droite du barrage voûte à double courbure pour R=55m. ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 61 : Variation des contraintes suivant Y dans face amont-rive droite du barrage voûte à double courbure pour R=55m. ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 62 : Variation des contraintes suivant X dans face aval-rive droite du barrage voûte à double courbure pour R=55m.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 63 : Variation des contraintes suivant Y dans face aval-rive droite du barrage voûte à double courbure pour R=55m.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 64 : Variation des contraintes suivant X dans face amont-rive gauche du barrage voûte à double courbure pour R=55m. ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 65 : Variation des contraintes suivant Y dans face amont-rive gauche du barrage voûte à double courbure pour R=55m. ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 66 : Variation des contraintes suivant X dans face aval-rive gauche du barrage voûte à double courbure pour R=55m.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 67 : Variation des contraintes suivant Y dans face aval-rive gauche du barrage voûte à double courbure pour R=55m.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 68 : Variation des contraintes suivant X dans fibre centrale du barrage voûte à double courbure pour R=55m. ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>

Figure 69 : Variation des contraintes suivant Y dans fibre centrale du barrage voûte à double courbure pour R=55m. .... **Erreur ! Signet non défini.**

## Liste des photos

### Chapitre I

Photo 1: Barrage à voûtes multiples de Beni Bahdel (Algérie). ..... **Erreur ! Signet non défini.**

### Chapitre II

Photo 1: Barrage de Moiry : arcs paraboliques avec mur d'aile .....21

Photo 2: Représentation schématique de la rupture sismique d'une faille .....34

### Chapitre III

Photo 1: Procédé de mesure des déplacements relatifs par vinchon .....44

Photo 2: Installation d'un pendule avec table de lecture .....46

Photo 3: Sonde inclinométrique avec galets de guidage .....48

Photo 4: Un type d'extensomètre.....48

Photo 5: Téléfissuromètre .....49

Photo 6: Sonde lumineuse .....50

### Chapitre IV

Photo 1: Vue amont du barrage d'Oued Taht bétonnage en cours.....53

Photo 2: Vue amont du barrage d'Oued Taht réalisation de l'évacuateur de crue .....53

Photo 3: Vue aval du barrage d'Oued Taht bétonnage du plot central .....54

Photo 4: Vue aval du barrage d'Oued Taht.....54

Photo 5: Vue du barrage d'Oued Taht bétonnage du couronnement .....54

Photo 6: Vue amont du barrage d'Oued Taht finitions de l'évacuateur de crue .....54

## Liste des tableaux

### Chapitre I

Tableau 1: Critères de choix du type du barrage .....	11
Tableau 2: Avantages et inconvénients des barrages .....	14

### Chapitre II

Tableau 1: Variation de l'épaisseur des consoles en fonction du type de la vallée .....	24
---	----

### Chapitre IV

Tableau 1: Unités utilisées par le logiciel CASTEM.....	58
Tableau 2: Variations des contraintes dans un barrage voûte à simple courbure avec $R=55m$ .....	60
Tableau 3: Variations des contraintes dans un barrage voûte à simple courbure avec $R=27,5$ .....	61
Tableau 4: Résultats des déplacements dans un barrage voûte à simple courbure pour $R=55m$ .....	61
Tableau 5: Résultats des déplacements dans un barrage voûte à simple courbure pour $R=27,5m$ .....	61
Tableau 6: Variations des contraintes dans un barrage voûte à simple courbure avec $E=4$ Gpa. ....	62
Tableau 7: Variations des contraintes dans un barrage voûte à simple courbure avec $E=8$ Gpa. ....	63
Tableau 8: Résultats des déplacements dans un barrage voûte à simple courbure avec $E=4$ Gpa. ....	63
Tableau 9: Résultats des déplacements dans un barrage voûte à simple courbure avec $E=8$ Gpa. ....	63
Tableau 10: Variations des contraintes dans un barrage voûte à double courbure avec $R=55m$ .....	75
Tableau 11: Variations des contraintes dans un barrage voûte à double courbure avec $R=45m$ .....	76
Tableau 12: Résultats des déplacements dans un barrage voûte à simple courbure pour $R=55$ m .....	76
Tableau 12: Résultats des déplacements dans un barrage voûte à simple courbure pour $R=45$ m .....	77
Tableau 14: Variations des contraintes dans un barrage voûte à double courbure avec $E=4$ Gpa. ....	77
Tableau 15: Variations des contraintes dans un barrage voûte à double courbure avec $E=8$ Gpa. ....	78
Tableau 16: Résultats des déplacements dans un barrage voûte à simple courbure pour $E=4$ Gpa .....	78
Tableau 17: Résultats des déplacements dans un barrage voûte à simple courbure pour $E=8$ Gpa .....	79
Tableau 18: Variations des contraintes en fonction du type de courbure des barrages avec $R=55m$ .....	88
Tableau 19: Variations des contraintes en fonction du type de courbure des barrages avec $R=45m$ .....	89
Tableau 20: Résultats des déplacements en fonction du type de courbure des barrages pour $R=55m$ .....	89
Tableau 21: Résultats des déplacements en fonction du type de courbure des barrages pour $R=45m$ .....	89

## ***LISTE DU SYMBOLE***

$b$  : Largeur de la base

$C$  : Coefficient d'hardiesse

$d_a$  : Epaisseur de l'arc

$E_b$  : Module d'élasticité du béton

$E_r$  : Module de déformation du rocher de fondation

$e$  : Epaisseur de l'eau sur le parement amont

$e_b$  : Epaisseur à la base

$e_c$  : Epaisseur au couronnement

$e_{mc}$  : Epaisseur minimale en crête

$g$  : L'accélération de la pesanteur

$H$  : Hauteur du barrage voûte

$h$  : Hauteur du barrage poids

$L$  : Largeur du barrage

$L_b$  : Largeur du site au niveau de la base

$L_c$  : Largeur du site au niveau de la crête

$n$  : Contrainte de la compression

$p$  : Pression de l'eau sur le parement amont

$Q$  : La poussée de l'eau

$Q_1$  et  $Q_2$  : Les réactions des surfaces d'appuis

$R$  : Rayon de courbure local

$S$  : Surface moyenne du barrage

$V$  : Volume du béton

$V_u$  : Volume utile de la voûte

$\rho_\beta$  : masse volumique du béton

$\lambda$  : Elancement

$\beta$  : valeur d'encastrement

$\delta_a$  : Déformation de l'arc au centre

$\delta_c$  : Déformation de la console

$\sigma$  : Contrainte moyenne d'arc

$\gamma$  : L'accélération supposée du sol

### ***LISTE DES ABREVIATIONS***

**BCR** : Béton Compacté au Rouleau

**BCV** : Béton Conventionnel Vibré

**CEA** : Commissariat à l'Energie Atomique

**CIGB** : Commission Internationale Des Grands Barrages

**CSB** : Comité Suisse des Barrages

**DMT** : Département de Mécanique et Technologie

**ISL** : Bureau D'Ingénieurs Conseils (France)

### ***LISTE DES NOTATIONS***

m : mètre

$m^3$  : mètre cube

$hm^3$  : hecto mètre cube

Pa : pascal

Mpa : méga pascal

$Kg/m^3$  : kilogramme par mètre cube

## *Introduction générale*

Dans le domaine du génie civil, les barrages ont toujours été considérés comme des ouvrages d'art spécifiques. Les raisons se trouvant, d'une part dans le caractère unique de chaque barrage et dans la complexité des comportements et des mécanismes mis en jeu d'autre part. Ces ouvrages présentent des enjeux importants, sur le plan de la sécurité publique, car leur rupture aurait des conséquences catastrophiques.

La conception des barrages, tâche difficile et compliquée, intègre de nombreux paramètres et critères, aussi bien techniques qu'économiques et il est souvent délicat de retrouver un compromis sécurité-économie. La géologie du site, les paramètres hydrologiques, la qualité des matériaux, le risque sismique restent les aspects les plus décisifs pour une conception rationnelle.

En zone sismique, les barrages voûtes sont les plus envisageables à condition que la géologie et l'intégration des ouvrages annexes le favorisent. Les barrages voûtes trouvent leur place idéale dans les sites relativement étroits (ratio largeur en crête/hauteur inférieur à 4), lorsque la qualité des fondations est excellente, surtout sur les rives. Aujourd'hui, ils sont souvent préférés à tous les autres types pour les sites de grande hauteur.

Un barrage voûte reporte la majeure partie de la poussée de l'eau sur les rives par des effets d'arc. La stabilité de ce genre d'ouvrage diffère essentiellement de celle des barrages poids, qui résulte d'une certaine inégalité entre la poussée de l'eau et le poids.

On trouve des voûtes de formes très différentes :

- les cylindres : tous les arcs sont identiques et superposés, avec un rayon et une épaisseur constants et égaux (réservé aux petits ouvrages, moins de 20 m de hauteur),
- les cylindres-cônes : rayon amont uniforme, le parement amont est un cylindre, l'épaisseur des arcs croît linéairement de haut en bas, les sections verticales sont donc toutes égales à un trapèze,

- les simples courbures, ainsi nommées car leur parement amont est encore un cylindre, mais l'épaisseur des arcs n'est plus constante et croît de la clé vers les appuis, le parement aval n'est en général pas une surface réglée,
- Enfin, les voûtes à double courbure, pour lesquelles les deux parements sont des surfaces à double concavité dirigée vers l'aval, en général, l'épaisseur croît de haut en bas et du centre vers les appuis.

Une meilleure connaissance et modélisation des phénomènes et actions auxquels sont soumis les barrages voûtes est nécessaire afin, d'une part, de mieux évaluer les risques de dégradations dans ces ouvrages, et d'autre part, de prédire l'évolution de leur comportement.

Le modèle numérique alimente les décisions et choix techniques: les nouveaux résultats du calcul permettent d'affiner l'interprétation des aspects conceptuels. Ils fournissent une nouvelle référence de normalité pour la sécurité de ce type d'ouvrage. Grâce à ce recalibrage permanent, le modèle numérique devient un véritable outil d'aide à la décision relative au comportement futur de l'ouvrage.

Pour les barrages voûtes, la poussée hydrostatique est reportée sur la fondation par des arcs travaillant en compression. C'est l'élancement de la vallée, la géométrie de la voute et le contraste de rigidité entre le béton et le rocher qui déterminent le comportement de l'ouvrage. Le barrage voute permet de réaliser une économie très notable de matériaux par rapport au profil poids, économie dont la nécessité est aujourd'hui plus urgente que jamais.

En se basant sur la modélisation numérique, et en considérant l'influence des paramètres conceptuels pour ce type de barrages, le présent travail vise une analyse paramétrée liée au comportement des barrages voûtes en zone sismique par l'étude de deux variantes de conception: barrage à simple courbure et barrage à double courbure.

L'élaboration du travail dans le cadre de ce mémoire de master, s'intégrant dans la thématique de l'analyse du comportement des barrages voûtes, a été étoffée par de multiples recherches bibliographiques liées à l'acquisition d'un niveau de connaissances

approfondi sur la conception des barrages voûtes, sur les principes de base de dimensionnement de ce type d'ouvrage ainsi que les critères de son choix pour des sites particuliers.

Pour se faire, un cas de barrage réel a été considéré, il s'agit du barrage sur l'Oued Taht, dans la wilaya de Mascara, d'une hauteur de 44 m.

L'analyse du comportement du barrage sous différentes sollicitations, a été paramétrée en relation avec les paramètres d'influence à savoir élargissement de la vallée, modules de déformation des rives et fondations, rayon de courbure transversale de l'arc de voûte, intégration de la simple ou double courbure dans la conception du barrage. Ces analyses paramétrées ont été guidées par l'étude de l'évolution des contraintes et déformations dans le corps du barrage.

Enfin, pour répondre à tous ces objectifs, le mémoire et dans un souci de cohérence dans sa forme globale a été structuré en quatre chapitres en l'occurrence:

Chapitre 1 : Généralité sur les barrages et critères de choix ;

Chapitre 2 : Les barrages-voûtes ;

Chapitre 3 : Surveillances et auscultations des barrages

Chapitre 4 : Analyse conceptuelle des profils de barrages voûte basée sur la modélisation.

## ***Chapitre I : Généralités sur les barrages et critères de choix***

### ***I. Introduction***

Les barrages sont l'une des réalisations les plus impressionnantes et les plus complexes en génie civil, et ils sont un facteur important dans la prospérité économique et le développement.

Une étude de barrage nécessite l'intervention de plusieurs disciplines scientifiques intégrées, chacune avec sa nature complexe et sensible. La zone, les données géologiques et hydrologiques forment ensemble la base de ce projet. Ces données ont affecté l'ensemble de la structure, y compris la sélection des matériaux, les fondations et les mesures de sécurité.

Le domaine des barrages se situe à l'intersection de diverses disciplines telles que la résistance des matériaux, la mécanique des sols, l'hydrologie, la géologie...

Une autre caractéristique de ces ouvrages est la grande importance des spécificités du site et le dimensionnement qui fait de chaque ouvrage un cas particulier.

Les barrages sont utilisés pour stocker l'eau pour l'hydro-électricité, l'irrigation de cultures, l'usage industriel, prévention des inondations...etc.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les types d'ouvrages existant, la conception et la construction de ces ouvrages et quelques points essentiels.

### ***II. Définition***

Les barrages sont, par définition, des ouvrages hydrauliques qui barrent sur toute la largeur une section d'une vallée et créent ainsi une cuvette artificielle, géologiquement étanche. De manière générale et dans la plupart des cas, la hauteur du barrage dépasse le niveau d'eau atteint par les cours d'eau en période de forte crue (A.J.Scheleiss et H.Pougatsch,2011).

### ***III. Rôle des barrages***

#### ***III.1. L'irrigation de cultures***

Du fait de l'importance croissante démographique attendue pour les prochaines décennies, l'irrigation doit être étendue afin d'augmenter la capacité de la production.

270 millions d'hectares sont irrigués dans le monde (A.Carrère,1994) ; cela représente le cinquième des terres cultivées, et ce cinquième fournit le tiers de toute la nourriture disponible, ce qui représente les trois quarts de la consommation mondiale d'eau ; l'agriculture est donc de loin le premier consommateur de l'eau des réservoirs.

### ***III.2.L'hydro-électricité***

L'énergie hydroélectrique, avec une production annuelle de 2 100 TWh, représente actuellement 20 % de la production électrique totale, et 7 % environ de toute l'énergie consommée dans le monde ; ces valeurs varient considérablement d'un pays à l'autre. Les plus grosses proportions existent en Norvège (99,6 %), Brésil (90 %), Autriche (79 %) et Canada (66 %). Dans le tiers monde, c'est souvent la seule ressource d'énergie disponible localement. En Europe, l'hydroélectricité a joué un rôle prépondérant dans le développement industriel du XIXe siècle, mais devient de moins en moins importante, les ressources naturelles ne pouvant suivre l'accroissement de la demande (A.Carrère,1994).

En Algérie seules deux barrages sont utilisés comme source de production d'énergie électrique, il s'agit des barrages d'erragvène et d'IghilEmda.

### ***III.3. Contrôle des crues***

Cela a été de tout temps une forte motivation pour l'édification de barrages, et souvent même l'objectif principal. Une protection permanente efficace de vastes contrées contre les crues a ainsi pu être obtenue, Le plus souvent, la protection contre les crues est un effet bénéfique secondaire des ouvrages construits dans un autre but.

Globalement, les autres objectifs des barrages sont mineurs en regard des trois buts principaux ; ils sont néanmoins d'importance dans l'aménagement des pays développés ou non ; il faut citer :

- L'alimentation en eau potable ou industrielle,
- La régularisation en vue de la navigation,
- Les développements touristiques et de loisirs,
- La recharge et l'assainissement des nappes phréatiques.

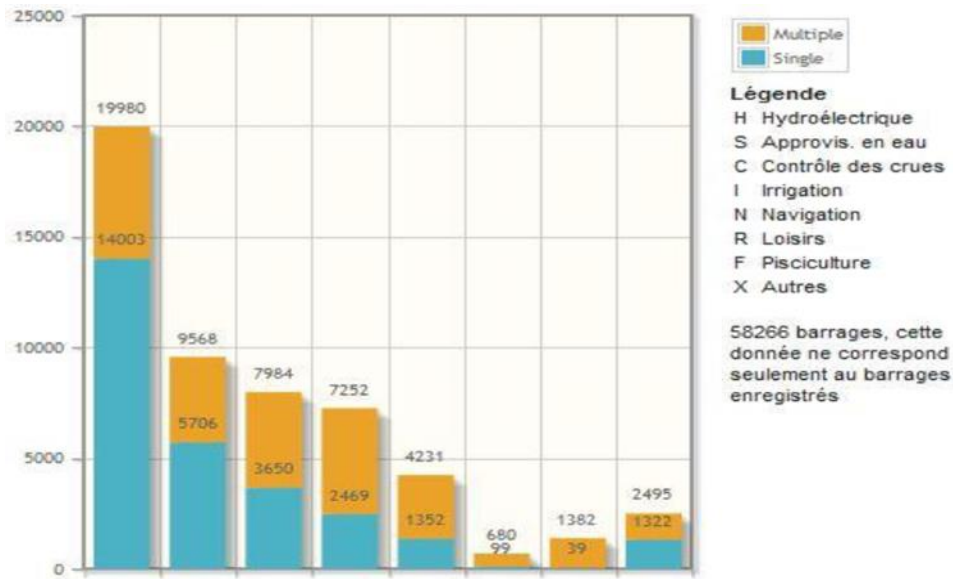


Figure 1 : Fonctions des grands barrages dans le monde(J.Larozee,2015).

#### IV. Les types de barrage

Dans les barrages nous distinguons deux types en fonction de la nature du matériau de construction (figure 2) :

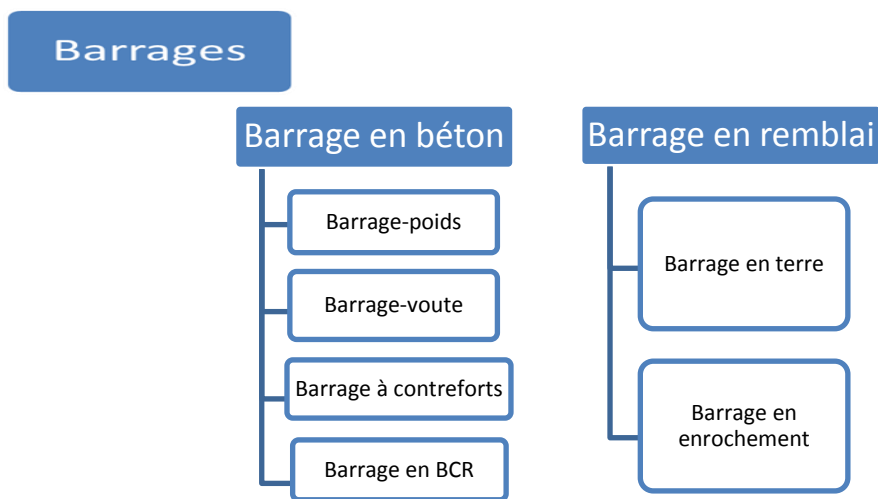


Figure 2 : Types de barrage.

##### IV.1. Les barrages en béton

Les barrages en béton sont principalement basés sur des roches, de module de déformation élevé. Les trois types de barrage en béton se distinguent par leur forme, la nature de leur système statique et leur manière de s'apposer à la poussée de l'eau (A.J.Scheleiss et H.Pougatsch,2011).

#### IV.1.1. Les barrage-poids

Un barrage poids est un ouvrage massif en maçonnerie ou en béton dont la stabilité, sous l'effet de la poussée de l'eau, est assurée par poids propre du barrage (P.Le Delliou,2004). Le barrage rigide a une forme d'un triangle, et le parement aval incliné avec un fruit de l'ordre de 0.75 à 0.80 (figure 3). On distingue dans un barrage poids les types suivantes (A.J.Scheleiss et H.Pougatsch,2011) :

- Barrage poids massif,
- Barrage poids évidé,
- Barrage poids voûte,
- Barrage poids incurvé,
- Barrage en béton compacté au rouleau (BCR).

La construction est généralement faite en collant le béton à travers un plot de 10 à 15 m avec des joints "Water Stop" (bande en caoutchouc ou PVC, large d'une quarantaine de centimètre dont les extrémités sont noyées dans le béton des plots (P.LeDelliou, 2004).

Le barrage poids est résistant à la pression de l'eau par son poids propre qui est calculé par la formule (A.J.Scheleiss et H.Pougatsch,2011) :

$$P=1/2.\rho_b.g.b.h.L$$

Avec :

h : hauteur du barrage (et hydrostatique pour le cas d'un profil triangulaire).

b : largeur de la base.

$\rho_b$  : masse volumique du béton.

g : l'accélération de la pesanteur.

L : largeur du barrage.

Les contrôles essentiels portent sur :

- La sécurité au renversement (stabilité du barrage),
- La sécurité au glissement (stabilité du barrage),
- La sécurité à la rupture (résistance du béton).

Les conditions requises pour fournir une structure rigide sont (G.Degoutte,1997) :

- Le rocher du site suffisamment résistant,
- Fondation rocheuse (module de déformation élevé),
- Disposer des matériaux de constructions (ciment, granulats) à proximité.

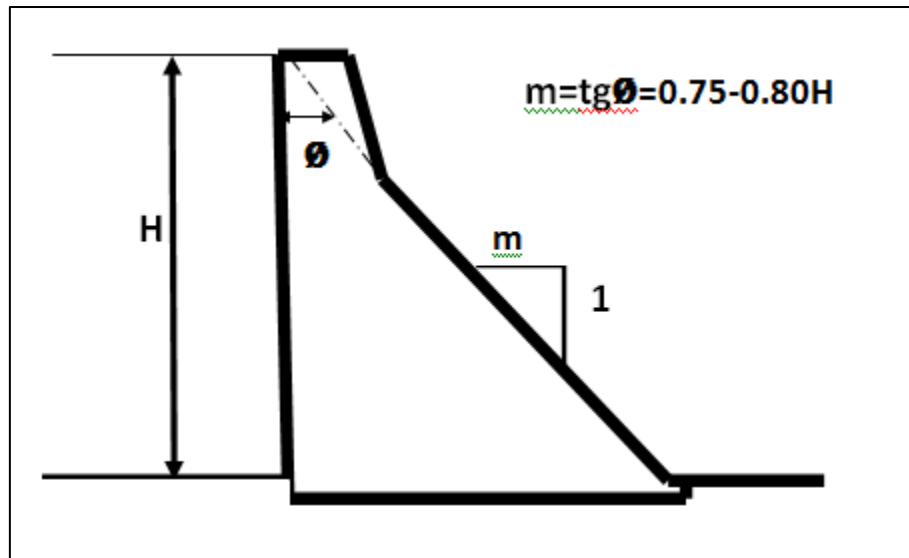


Figure 3 : Profil-type d'un barrage-poids

#### IV.1.2. Barrage voûte

Le barrage voûte est une sorte de barrage nommé en raison de sa forme arquée distinctive. La forme courbée de ces barrages permet une résistance à la pression de l'eau. Certains barrages voûtes sont arqués selon les deux plans (horizontal et vertical), dans ce cas on parle de barrage voûte à double courbure. Son but est de réduire la pression de l'eau sur le barrage. Ces ouvrages représentent 4,4% de tout les barrages est 25% des barrages en béton.

Les barrages voûtes sont utilisés lorsque la largeur de la gorge ne dépasse pas 5 à 6 fois la hauteur du barrage projeté. Pour des largeurs plus importantes des dispositions constructives Particulier ; ces doivent être adoptées. La force de l'eau est alors répartie sur les flancs rocheux. La forme des barrages voûtes présente de nombreuses variantes ; par suite de la variation de l'épaisseur les deux parements n'ont généralement pas la même définition géométrique.

Les barrages en voûte sont classifiés ainsi (figure 4):

- Barrage à voûte épaisse,
- Barrage à voûte mince,
- Barrage à voûte cylindrique,
- Barrage à voûte à double courbure.

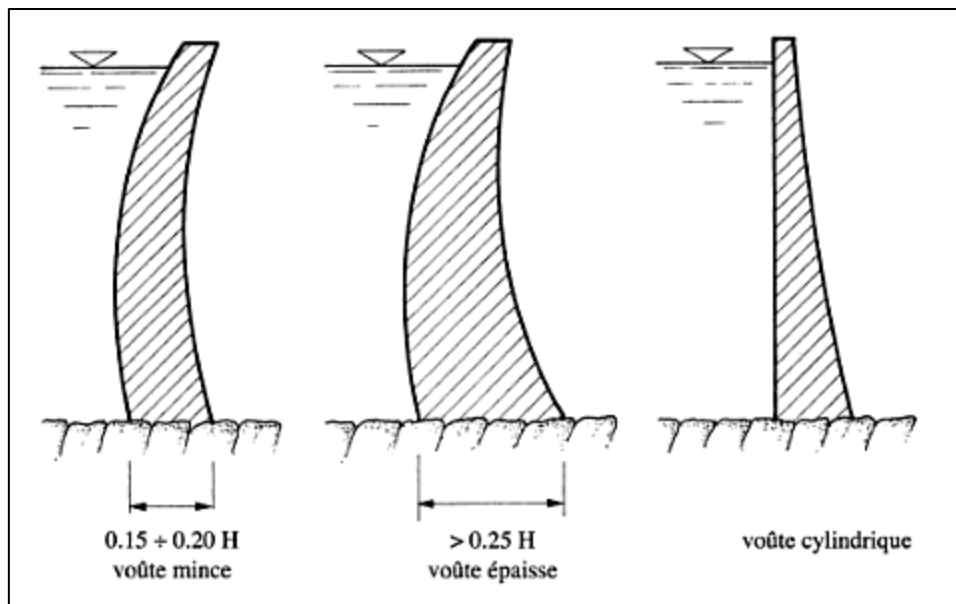


Figure 4 :Profils-types de barrages voûtes.

Les charges qui doivent être considérées pour adopter le profil de barrage voûte sont résumées dans ce qui suit:

- Le poids propre de la voûte, établi par plots construits indépendamment des voisins,
- La charge hydrostatique, souvent réduite par pure convention à la pression appliquée sur le parement amont du barrage. C'est seulement dans les projets récents qu'on tient compte, d'une façon ou d'une autre, des pressions d'eau qui s'exercent dans la masse de la fondation ou dans le barrage lui-même,
- Les autres charges extérieures sont la poussée des sédiments, la poussée de la glace en surface du plan d'eau, ou encore les forces d'inertie et variations de poussée dues aux séismes ;
- Les charges internes doivent aussi être considérées, comme pour l'étude de toutes les structures hyperstatiques : il s'agit des effets thermiques (équilibre initial, variations saisonnières), ainsi que des variations dimensionnelles potentielles plus aléatoires (retrait, gonflement) du béton.

Ce type de barrage est utilisé dans les conditions suivantes (G.Degoutte,1997):

- Des vallées étroites avec des pentes très solides pour supporter le poids de l'eau,
- Une fondation rigide,
- Une résistance mécanique de la fondation appréciable.

#### IV.1.3. Barrage à contreforts

Les barrages à contreforts sont des barrages en béton constitués des murs et des bouchures. Ces ouvrages représentent 5% des barrages (J.Larouzee,2015). Leur utilisation est idéale dans le cas des terrains dont les fondations sont perméables.

Les bouchures sont très souvent inclinées vers l'aval de façon que la poussée de l'eau est dirigée vers le bas pour améliorer la stabilité des contreforts. Dans la direction transversal, en particulier en ce qui concerne les impacts sismiques de rive à rive, les contreforts peuvent être munis de butons.

Les barrages à contreforts sont classifiés dans ce qui suit :

- Barrage à contreforts à tête élargie,
- Barrage à contreforts à dalles planes,
- Barrage à contreforts à voûtes ou dôme multiples,
- Barrage évidé.



Photo 1: Barrage à voûtes multiples de Beni Bahdel (Algérie).

#### IV.1.4. Barrage en béton compacté au rouleau (BCR)

La mise en place de béton BCR (Roller Compacted Concrete, RCC) permet d'utiliser des bétons très secs, très faiblement dosés en ciment. Les résistances obtenues, particulièrement faibles, sont compatibles avec les exigences des barrages poids qui s'opposent à la poussée de l'eau par leur poids propre.

Le barrage est construit par des couches minces d'épaisseur de 30 à 50 cm et compactées (J-M. Durand et al,1998).

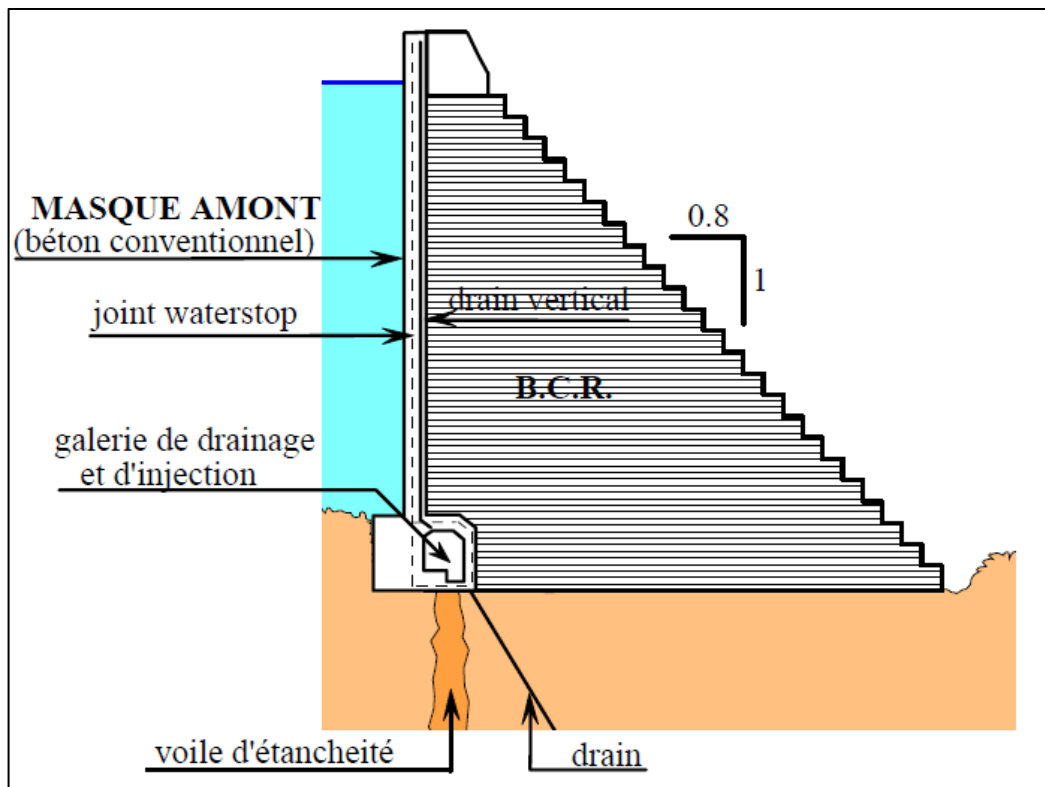


Figure 5 : Profil d'un barrage BCR.

#### IV.2. Barrage en remblai

Le barrage en remblai est constitué de matériaux granulaires naturels meubles, les parties principales sont :

- Le noyau : on utilise des sols fins pour assurer l'étanchéité du barrage,
- Les recharges : on les construit par des sols différents que le sol du noyau pour supporter le noyau,
- Le drain : on utilise des sols très perméables pour assurer l'écoulement de l'eau dans le sol et diminue la pression interstitielle,
- Les filtres : ce sont des parties peu épaisses, on la place entre les différentes parties contre l'infiltration des eaux et pour éviter l'érosion interne,
- Le rip-rap : couche superficielle constitué par des blocs d'enrochements sur les côtés du remblai pour le protéger contre l'effet des vagues.

On distingue deux types de barrage en remblais (A.J.Scheleiss et H.Pougatsch,2011) :

- Les barrages en terre, réalisés essentiellement à partir de sols naturels meubles prélevés dans des gravières. Ils sont classés en :
  - Barrage en terre homogène,
  - Barrage en terre zonée,
  - Barrage en terre à noyau d'argile,
  - Barrage en terre à masque amont,

- Barrage en terre à membrane interne en béton bitumineux.
- Les barrages en enrochements, dont la majeure partie est constituée de matériau provenant de carrière concassé. Ils sont classés en :
  - Barrage en enrochements à noyau d'argile,
  - Barrage en enrochements à masque amont,
  - Barrage en enrochements à écran interne.

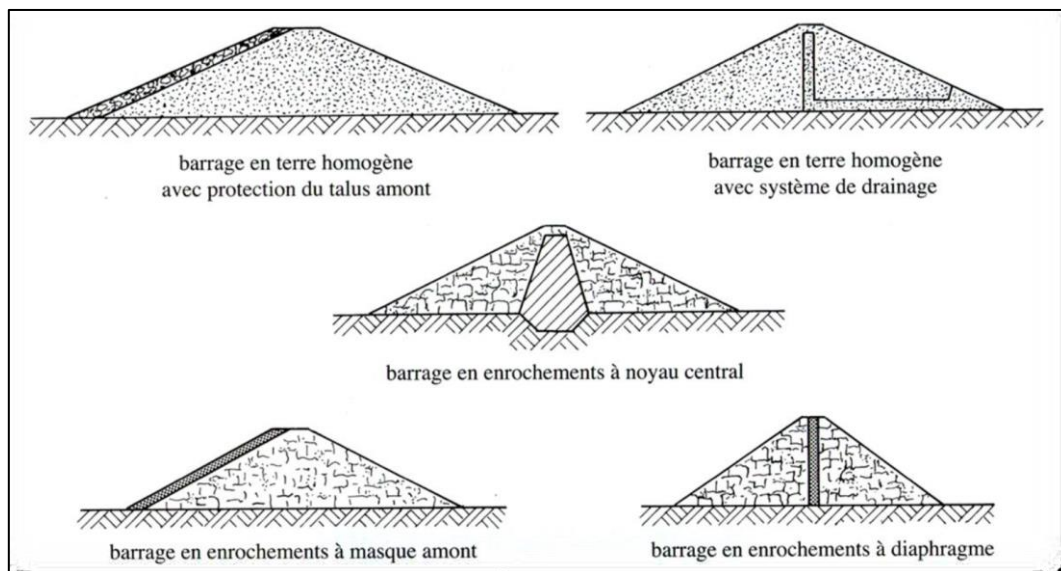


Figure 6 : Coupes schématiques de différents types de barrages en remblai et disposition des éléments d'étanchéité (A.J.Scheleiss et H.Pougatsch,2011).

## V. Sollicitations sur les barrages

La recherche des conditions de stabilité des structures et le calcul des pressions dans les matériaux qu'elles forment nécessitent de connaître les forces appliquées à ces structures. Dans les barrages les forces peuvent être résumées en (R.Ginnocchio et V.Pierre-Louis,2012) :

- Poids propre : la forme de la section et la densité moyenne des matériaux déterminent le poids de l'ouvrage,
- Réaction des appuis : dans un barrage voûte, les forces de réaction des rives transmises par effet d'arc de l'ouvrage,
- Poussée de l'eau : la poussée de l'eau est le résultat des forces exercées par l'eau sur chaque élément de surface du parement amont,
- Poussée de la glace : en hiver, la glace applique une poussée sur les ouvrages due à l'expansion thermique de la glace et au frottement du vent,
- Pressions interstitielles : la porosité du matériau provoque la présence d'eau dans l'ouvrage et sous ses fondations,

- Sous-pressions : la valeur de la sous-pression en un point d'un plan horizontal de section du barrage dépend de la distance de ce point au parement amont du barrage,
- Effets thermiques : les effets thermiques ne devraient être envisagés que dans le cas de barrages en matériaux assemblés (maçonnerie ou béton),
- Effets des tremblements de terre : il est nécessaire de tenir compte des effets de secousses sismiques dans le calcul des grands barrages et notamment l'interaction fluide-structure.

## VI. Critères de conception des barrages

Le choix du type de barrage est une tâche complexe qui nécessite la prise en compte d'un nombre particulièrement important de paramètres et d'informations relatifs aux critères ci-dessous :

### VI.1. Topographie

Un site de barrage, au sens topographique, se place sur un verrou, resserrement de la vallée situé juste en aval d'une cuvette naturelle susceptible, une fois fermée, de constituer un réservoir de volume suffisant. La forme du site proprement dit influe sur le choix du type de barrage ; on peut réduire cette forme à deux caractéristiques (A.Carrere,1994): la largeur relative ( $L/H$ ), qui varie en pratique de 1 à 4, parfois plus ; et la forme en U ou en V.

- Il y a lieu d'étudier plusieurs positions possibles sur un même site, avec leurs avantages et leurs inconvénients: un site topographiquement favorable n'est pas forcément à retenir du point de vue géotechnique par exemple,
- Le recours à la photographie aérienne.

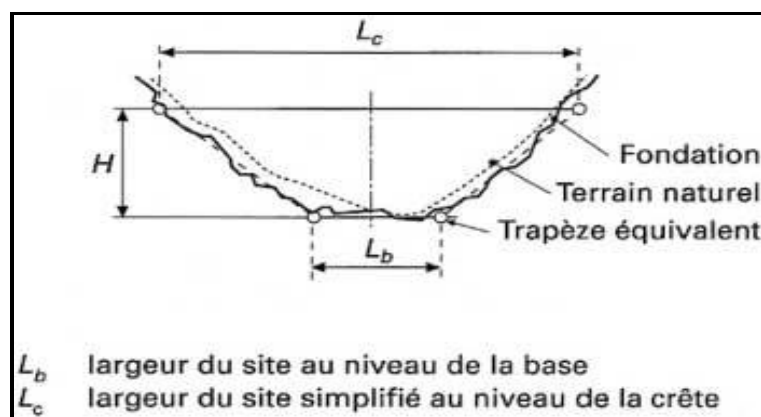
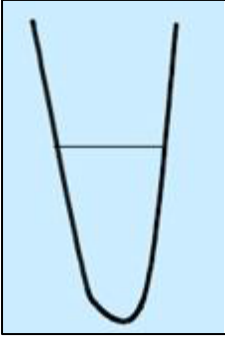
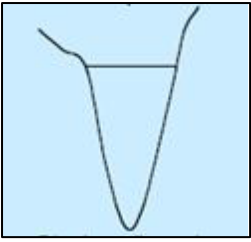
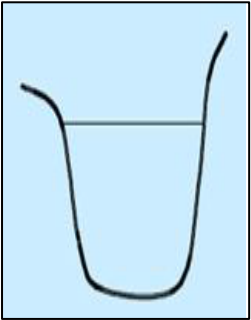
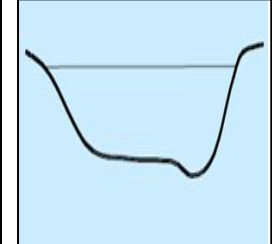


Figure 7 : Géométrie simplifiée d'un site de barrage (A.Carrere,1994).

Le tableau (1) récapitule les choix préliminaires des types de barrages en fonction de la morphologie de la vallée et de son élancement  $\lambda = \frac{L}{H}$ .

Tableau 1 : critères de choix du type du barrage en fonction de la morphologie de la vallée (B.Rouissat, 2010) :

Type vallée	Topographie	Considérations
	Vallée encaissée avec flancs verticaux	Le barrage voûte s'impose si la géologie et l'intégration des ouvrages annexe le permettent. Si la largeur est presque constante sur toute la hauteur, un barrage voûte cylindrique peut être envisagé. Si les crues sont importantes, un barrage poids permettra d'intégrer l'évacuateur des crues
	Vallée étroite en V	Le barrage voûte peut être envisagé si la géologie et l'intégration des ouvrages annexe le permettent. $\lambda \leq 5-6$ et courbes de niveau du rocher d'appui doivent être parallèles. Le barrage poids et le barrage en enrochement à masque amont sont envisageables. Le barrage en enrochement à noyau central est proscrit du fait de la pente importante des flancs (tassement différentiels et risque de fissuration du noyau)
	Vallée étroite en U	Le barrage voûte peut être envisagé si la géologie et l'intégration des ouvrages annexe le permettent. $\lambda \leq 4-5$ et courbes de niveau du rocher d'appui doivent être parallèles. Le barrage poids et le barrage en enrochement à masque amont sont envisageables. Le barrage en enrochement à noyau central est proscrit du fait de la pente importante des flancs (tassement différentiels et risque de fissuration du noyau)

	Vallée large	<i>À très important éliminant le barrage voûte. Tous les autres types de barrages peuvent être envisageables sous condition que les autres critères soient vérifiés.</i>
---	--------------	--

### **VI.2. Sismicité de la région**

L'étude, sur une base historique ou déterministe (sismotectonique), de la sismicité du site est entreprise et aboutit à la définition de deux séismes de (A.Carrere,1994) :

- Le séisme de projet, que l'ouvrage doit être en mesure de supporter sans aucun dommage,
- Le séisme maximal probable, auquel le barrage doit pouvoir résister sans ruine ni mise hors service de ses organes de sécurité.

### **VI.3. Morphologie de la vallée**

La morphologie de la vallée joue un rôle important dans le choix du site du barrage. La vallée doit être assez encaissée et les courbes de niveau doivent délimiter une cuvette fermée.

En première approximation, une vallée large conviendra mieux à l'aménagement d'un barrage en remblai. Un site étroit conviendra aussi à un barrage poids et un site très étroit conviendra aussi à une voûte. Tout cela bien sûr réserve que les fondations le permettent (G.Degoutte,1997).

### **VI.4. Condition de fondations**

La fondation est un élément des installations d'ingénierie, et fait partie intégrante de l'aménagement des barrages et représente l'élément prédominant. Elle est soumise à des exigences extraordinaires en fonction du volume d'efforts qu'elle reçoit du barrage d'une part, et d'autre part par l'action permanente et à long terme de l'eau.

Les fondations sont évaluées selon les trois critères suivants :

- La stabilité,
- Une dureté suffisante pour réduire les déformations,
- Le contrôle des infiltrations du point de vue débit et sous-pressions.

Les fondations peuvent être divisées en quatre groupes (G.Degoutte,1997):

**Les fondations rocheuses** : Ils sont considérés comme les plus portantes. À l'exception du cas des roches très dures ou très pauvres, les fondations rocheuses conviennent à la construction de tous types de barrages, avec des dispositions suffisantes pour le dégagement des matériaux à liaison variable et le traitement d'injection possible.

**Les fondations graveleuses** :En général, ces fondations conviennent aux barrages en remblais, au moins mécaniquement. En pratique, ce type de fondation est particulièrement adapté aux rivières ou fleuves à fort débit.

Les barrages en béton de très petite hauteur peuvent également être construits avec des précautions sur les fuites et les percolations et les tassements différentiels.

**Les fondations sablo-silteuses** : Les fondations sablo-silteuses sont des fondations de sable fin ou de silt peuvent convenir à la construction de barrages en terre, exceptionnellement pour de très petits barrages poids en béton avec de sérieuse précautions.

**Les fondations argileuses** : Des fondations argileuses nécessitent automatiquement le choix de barrages en remblai, avec des pentes de talus compatibles avec les propriétés mécaniques des formations en place.

#### *VI.5. Données géologiques et géotechniques*

La constitution même d'une retenue d'eau requiert du massif dans lequel elle est située des propriétés minimales en matière d'étanchéité naturelle. Il serait en effet très coûteux de généraliser l'étanchement artificiel à tout le fond du bassin, et de telles réalisations sont exceptionnelles.

Tout projet de barrage commence donc par une étude géologique, géophysique et géotechnique qui est progressivement affinée au fur et à mesure que le projet se développe et que les choix se précisent sur le type et la hauteur du barrage. Le géologue intervient en premier lieu pour expliquer la nature et la structure du site, mettre en évidence les principales incertitudes ; les reconnaissances géotechniques par sondages, galeries de reconnaissances, prélèvements, essais de laboratoire et essais in situ sont réalisées pour lever les inconnues. Ces études aboutissent à la détermination de la nature des différentes formations (sols ou roches) présentes sur le site, leur extension géométrique, leurs propriétés en matière de perméabilité, déformabilité, résistance mécanique, altérabilité à l'eau ; les discontinuités (failles, fractures, diaclases, zones de dissolution ou karsts) sont recherchées avec le plus grand soin.

Le choix du site est également conditionné par le coût qu'entraînent ses caractéristiques. Ainsi, le rapport du volume d'eau stocké au volume de l'ouvrage devra être le plus élevé possible.

Par ailleurs, les impacts de l'aménagement sur l'environnement humain et naturel devront être pris en compte dans la décision notamment les conditions climatiques (températures extrêmes, gel), qui constituent des sollicitations supplémentaires du futur ouvrage, les propriétés chimiques de l'eau, parfois agressive vis-à-vis de certains

matériaux notamment le béton, la disponibilité de matériaux de construction de qualité à proximité, les accès (G.Degoutte,1997).

### ***VII. Avantages et inconvénients des barrages***

Les avantages et particularités essentielles des barrages en béton sont énumérés sur le tableau (2):

*Tableau 2 : Avantages et inconvénients des barrages (A.J.Scheleiss et H.Pougatsch,2011) et R.Ginnocchio et V.Pierre-Louis,2012)*

<b>Type de barrage</b>	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<b>Barrage poids</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Faibles contraintes dans le béton</li> <li>▪ Faibles contraintes transmises aux roches</li> <li>▪ Le gradient hydraulique est faible au niveau de la fondation</li> <li>▪ Le déversement peut facilement être intégré</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sous pression importantes au niveau de la fondation</li> <li>▪ Volume d'excavation important</li> <li>▪ L'utilisation du béton est très élevée</li> <li>▪ Risques aux tassements, aux renversements, et au séisme</li> <li>▪ Refroidissement artificiel pendant le développement du béton</li> </ul>
<b>Barrage voûte</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Volume de béton faible par rapport au barrage poids</li> <li>▪ Volume d'excavation faible</li> <li>▪ Haute résistance au tremblement de terre</li> <li>▪ Sous pression faible au niveau de la fondation</li> <li>▪ Sensibilité aux tassements est moyenne</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Grand contraintes dans le béton et le rocher</li> <li>▪ Le gradient hydraulique est important au niveau de la fondation</li> <li>▪ L'intégration de l'évacuateur de crue est difficile</li> <li>▪ L'échauffement durant la prise du béton est considérable</li> <li>▪ Risque des glissements d'appuis à cause des sous pressions dans les fissures du rocher</li> </ul>
<b>Barrage à contreforts</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Volume de béton plus faible</li> <li>▪ Les contraintes transmises au rocher sont moyennes</li> <li>▪ Faibles sous pressions au niveau de la fondation</li> <li>▪ Faible échauffement</li> <li>▪ Moyens risques de tassement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Volume d'excavation important</li> <li>▪ Gradient hydraulique très important</li> <li>▪ Contraintes de température peuvent devenir importantes à la tête du contrefort</li> <li>▪ Haute sensibilité aux séismes</li> <li>▪ Importantes fouilles</li> </ul>
<b>Barrage en BCR</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Faible dosage en ciment</li> <li>▪ Faible coût de maintenance</li> <li>▪ Faible teneur en eau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nécessite une fondation sur les rochers</li> <li>▪ La possibilité de fusionner un</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Réalisation rapide</li> <li>▪ Problèmes liées à la température écartés</li> <li>▪ Surface de coffrage restreinte</li> <li>▪ Bonne résistance dans le cas d'un séisme et de submersion</li> </ul>	<p>évacuateur de crue</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aucun système de refroidissement artificiel en béton</li> </ul>
<b>Barrage poids évidé</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Comme pour les barrages poids</li> <li>▪ Volume de béton plus faible</li> <li>▪ Réduction des sous pressions au contact béton-rocher</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Comme pour les barrages poids</li> <li>▪ Augmentation du gradient hydraulique souterrain à proximité de la fondation</li> </ul>
<b>Barrage à voûtes multiples</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Volume de béton faible</li> <li>▪ Volume d'excavation relativement limité</li> <li>▪ Faibles sous pression sous la fondation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Contraintes importantes dans les voûtes</li> <li>▪ Nécessité d'armer les voûtes</li> <li>▪ Sensibilité aux tassements différentiels</li> <li>▪ Grande sensibilité au séisme</li> <li>▪ Intégration des ouvrages annexes difficile</li> <li>▪ Sensibilité aux gradients de température</li> </ul>
<b>Barrage en remblai à noyau central</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Corps du barrage très flexible s'adaptant aux conditions de terrain</li> <li>▪ Structure très peu sensible aux tassements et séismes</li> <li>▪ Excavations limitées</li> <li>▪ Gradient hydraulique faible dans le noyau et la fondation</li> <li>▪ Contraintes sur le sol de fondation sont très faibles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Volume de matériau à mettre en place très important</li> <li>▪ Disponibilité de matériau argileux en grande quantité à proximité du site</li> <li>▪ Mise en place du noyau argileux impossible lors de conditions météorologique défavorables</li> </ul>
<b>Barrage en remblai à masque amont</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Corps du barrage très flexible s'adaptant aux conditions du terrain</li> <li>▪ Structure peu sensible aux tassements globaux</li> <li>▪ Structure peu sensible aux séismes si des mesures spécifiques sont prévues</li> <li>▪ Excavation limitées</li> <li>▪ Contraintes très faibles sur le sol de fondation</li> <li>▪ Pas de matériaux argileux à mettre en place</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Volume de matériaux à mettre en place très important</li> <li>▪ Gradient hydraulique important sous la fondation de la plinthe</li> <li>▪ Fondation de la plinthe sur du rocher peu perméable</li> <li>▪ Structure sensible aux tassements différentiels du masque rigide et du remblai (enrochements)</li> </ul>

## ***IX. Conclusion***

Le choix du type de barrage s'impose tout naturellement dans bien des cas, sans qu'il soit nécessaire de faire des investigations poussées. Dans d'autre cas, le choix du type de barrage est une tâche qui nécessite différents aspects comme : hydrologie, la nature de fondation, disponibilité de matériaux à proximité, pour aboutir au meilleur choix économique.

La décision du choix du type de barrage n'est affinée qu'après avancement appréciable des études et en fonctions des contraintes rencontrées. La difficulté réside dans le fait que chaque projet de barrage est un cas singulier mettant en évidence des conditions de site nouvelles et parfois rencontrées pour la première fois.

---

## *Chapitre II : Les barrages-voûtes.*

### *I. Conception et construction d'un barrage*

Le grand volume de béton requis utilisé pour la construction des barrages et que celui-ci ne requiert pas une résistance exceptionnelle, le béton est un béton de masse.

Il est requis de s'assurer des procédures de construction en tenant compte de la résistance réduite du béton au jeune âge la résistance ultime en compression ne soit souvent pas le mode de défaillance prédominant.

En effet, le mélange de béton réalisé vise davantage une forte économie et une hausse de température minimale due à l'hydratation (A.Constantin,2015).

#### *I.1. Résistance à la compression*

Dans les barrages en béton, La résistance à la compression est la propriété prédominante et sont conçus de façon à minimiser les contraintes en tension. Par contre, de hautes résistances sont rarement requises dans le cas de barrages, à l'exception des barrages à voûte mince. Il est à noter que les résistances au cisaillement et à la traction sont directement reliées à celle à la compression, puisqu'elles sont tous fonction de la structure interne du béton (A.Constantin,2015).

#### *I.2. Résistance à la traction*

La résistance à la traction est fonction de la structure interne du béton, de la même façon que la résistance à la compression. De plus, étant donné qu'il est peu habituel d'évaluer la résistance à la traction aussi souvent qu'en compression, il est pertinent d'élaborer une relation entre les deux types de résistances. La résistance à la traction est un facteur important dans les calculs structuraux et de stabilité des barrages, puisqu'elle influence le facteur de sécurité attribué à la stabilité ainsi que longueur de fissuration. C'est aussi une caractéristique importante dans le cas des chargements sismiques (A.Constantin,2015).

### *II. Types et dimensionnement des voûtes*

#### *II.1.Types des voûtes*

Les barrages voûtes trouvent leur place idéale dans les sites relativement étroits (ratio largeur en crête/hauteur inférieur à 4), lorsque la qualité des fondations est excellente, surtout sur les rives. Aujourd'hui, ils sont souvent préférés à tous les autres types pour les sites de grande hauteur (plus de 150 m). En allant du plus simple au plus sophistiqué, on trouvera des voûtes de formes très différentes (A.Carrère, 1994) :

- Les cylindres : tous les arcs sont identiques et superposés, avec un rayon et une épaisseur constants et égaux (réservé aux petits ouvrages, moins de 20 m de hauteur),
- Les cylindres-cônes : rayon amont uniforme, le parement amont est un cylindre, l'épaisseur des arcs croît linéairement de haut en bas ; les sections verticales sont donc toutes égales à un trapèze,
- Les simples courbures, ainsi nommées car leur parement amont est encore un cylindre, mais l'épaisseur des arcs n'est plus constante et croît de la clé vers les appuis ; le parement aval n'est en général pas une surface réglée,
- Enfin, les voûtes à double courbure, pour lesquelles les deux parements sont des surfaces à double concavité dirigée vers l'aval ; en général, l'épaisseur croît de haut en bas et du centre vers les appuis.

## II.2. Dimensionnement des voûtes

Dans la pratique du dimensionnement d'une voûte, on commence par esquisser une première forme, sur la base de considérations de contraintes moyennes ou d'abaques. On donne aux arcs supérieurs un angle d'ouverture voisin de  $110^\circ$  ; l'épaisseur minimale en crête est (A.Carrère, 1994) :

$$e_{mc} = 0,012 (L_c + H)$$

Avec :

$e_{mc}$  (m) épaisseur minimale en crête,

$L_c$  (m) largeur du site au niveau de la crête,

$H$  (m) hauteur du barrage.

Il existe de nombreuses formules d'estimation du volume d'une voûte, au stade très initial des études ; toutes manquent de précision, et aucune ne vaut mieux que la simple intégration, de bas en haut, de la formule du tube pour des arcs de  $100^\circ$  d'ouverture et une contrainte moyenne de 4,5 MPa ; ce qui donne (A.Carrère, 1994) :

$$V_u = H^2/16\sigma (1+H/\sigma) (L_c^2 + 3L_b^2 + 2L_bL_c)$$

Avec :

$V_u$  (m<sup>3</sup>) volume utile de la voûte,

$\sigma$  (m) contrainte moyenne d'arc (exprimée en mètres d'eau),

$H$  (m) hauteur du barrage,

$L_c$ (m) largeur en crête du site simplifié

$L_b$  (m) largeur du site au niveau de la base

### III. Choix de la forme initiale

#### III.1. Hauteur du barrage

Le niveau de couronnement du barrage est déterminé par la géologie et la topographie d'une part, et par les critères économiques d'autre part.

La hauteur optimale est obtenue en analysant les coûts et les revenus générés par l'ouvrage en tenant compte des aspects de l'environnement.

La quantification du revenu est souvent très précise. L'incertitude hydrologique doit être prise en compte. Les expériences récentes ont montré que les projections à moyen terme des avantages attendus sont difficiles. Plusieurs scénarii et analyses de sensibilité sur les paramètres principaux doivent être considérés comme nécessaires. La différence entre les charges et les revenus est le bénéfice. La hauteur optimale correspond aux bénéfices maximum, avec respect pour les niveaux limites déterminés par la topographie et la géologie.

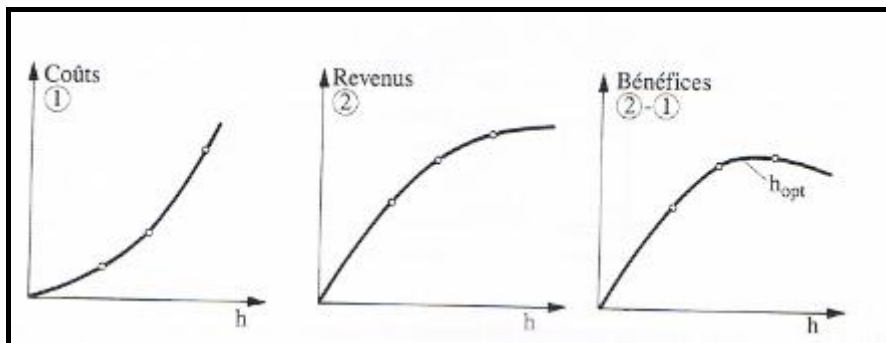


Figure 1: Optimisation de la hauteur du barrage (A.J.Scheleiss et H.Pougatsch,2011).

#### III.2. Forme des sections horizontales

Trouver la meilleure solution pour la géométrie d'un barrage voûte surtout à double courbure est un processus itératif. Dans la première étape, on admet les sections horizontales (les arcs).

##### III.2.1. Arcs circulaires

Dans les arcs circulaires, la géométrie préliminaire doit répondre aux conditions suivantes (A.J.Scheleiss et H.Pougatsch,2011):

- Le rayon de courbure diminue de manière continue de haut vers le bas,
- Au niveau du couronnement l'angle d'ouverture au centre  $2\alpha$  est de l'ordre de  $120^\circ$  à  $130^\circ$ ,

- A mi-hauteur, l'angle d'ouverture au centre  $2\alpha$  est supérieur à  $85^\circ$ ,
- A la base, l'angle d'ouverture au centre  $2\alpha$  est environ égal à  $80^\circ$ , cette condition est relativement facile à satisfaire dans les vallées en forme de V, mais beaucoup plus difficile dans les vallées en forme U,
- L'angle d'incidence de l'arc avec le rocher  $\beta$  doit être au moins supérieur à  $30^\circ$ , ce critère essentiel est parfois difficile à remplir et doit être apprécié en tenant compte de la géologie (fracturation, pendage).

Avec :  $2\alpha$  angle d'ouverture des arcs.

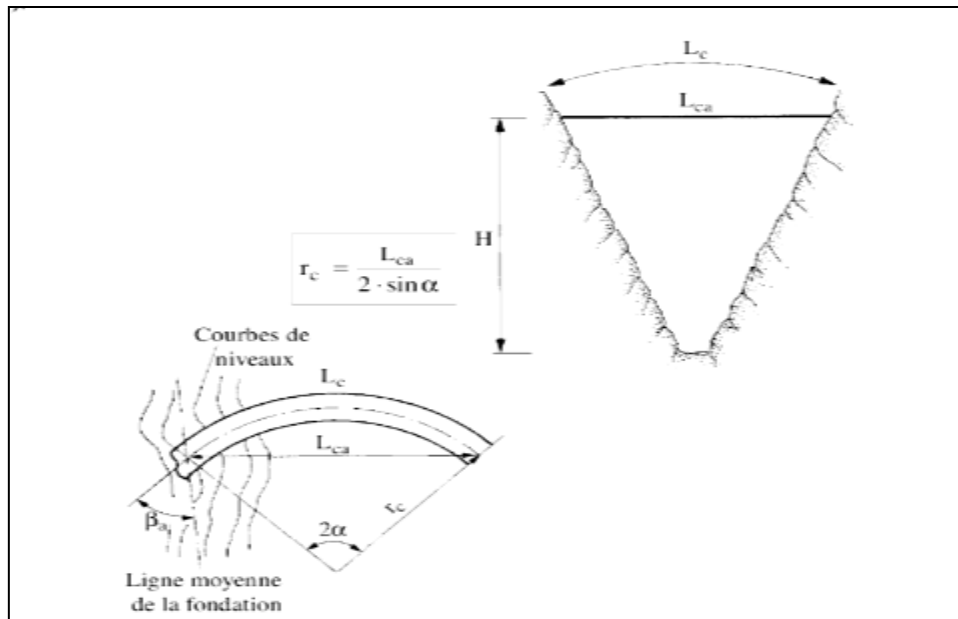


Figure 2 : Définitions géométriques des arcs.

### III.2.2. Arcs constitués de segments de parabole

En Suisse, plusieurs barrages voûtes ont été réalisés avec des arcs parabolique, est la solution à trois avantages importants :

- La forme parabolique permet de tenir en compte de l'effet de la proximité de la fondation dans le cas des profils très ouverts,
- On choisit souvent de définir les parements amont et aval par deux paraboles dont les cercles osculateurs au sommet ont le même centre. Cette disposition fait varier l'épaisseur de manière progressive vers les naissances et s'adapte par conséquent bien aux vallées dissymétriques,
- La forme parabolique des arcs permet de prolonger les arcs dans la fondation sans trop modifier la direction de la force résultante.

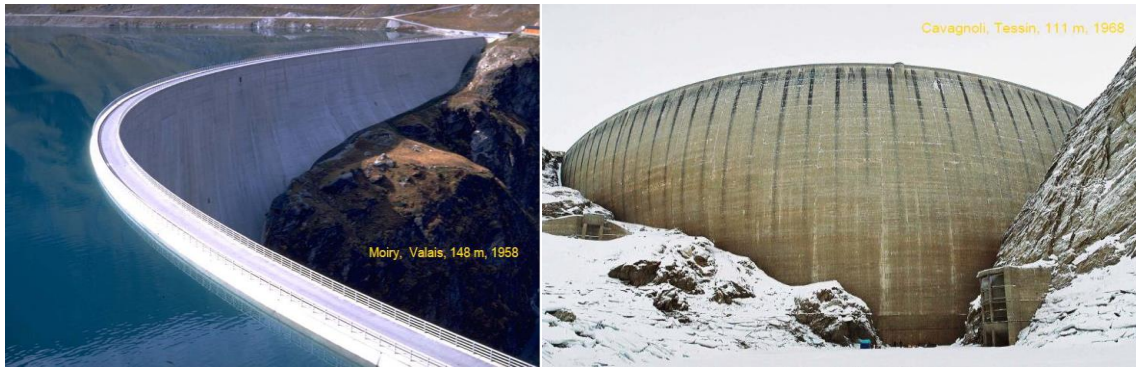


Photo 1 : Barrage de Moiry : arcs paraboliques avec mur d'aile en rive droite prolongeant la voûte d'une manière continue (A.J.Scheleiss et H.Pougatsch,2011).

### III.2.3. Arcs constitués d'arcs d'ellipse

Les arcs d'ellipse ont un degré de liberté supplémentaire par rapport aux paraboles. Ainsi, le rayon du cercle osculateur peut être choisi à la clé ou à l'angle d'incidence à la naissance sans recourir à des arcs constitués de plusieurs segments de courbes. Le rayon de courbure à la naissance est 2 à 3 fois plus grand qu'à la clé.

Le rayon de courbure local est déterminé par la formule ci-dessous (A.J.Scheleiss et H.Pougatsch,2011):

$$R = \frac{1}{a.b} \left( \frac{x^2.b^2}{a^2} + \frac{y^2.a^2}{b^2} \right)^{3/2}$$

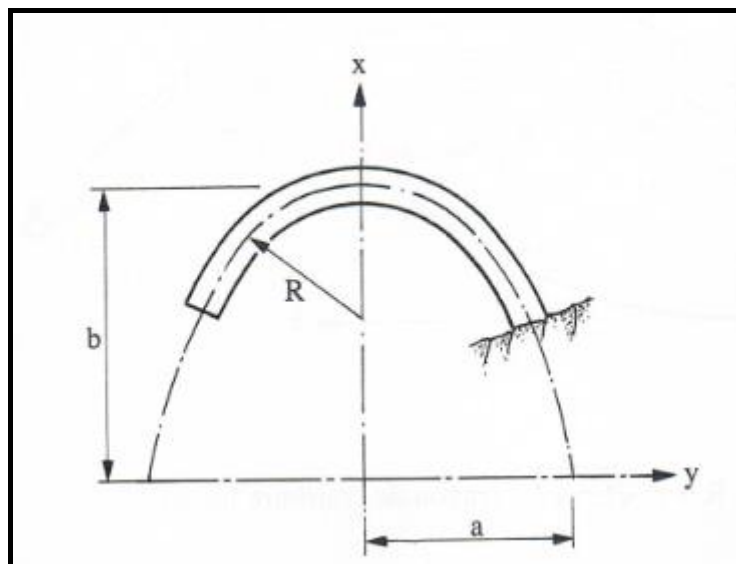


Figure 3: Définition des arcs elliptiques (A.J.Scheleiss et H.Pougatsch,2011).

### III.2.4. Arcs constitués de segments de spirale logarithmique

Les avantages des arcs spirale sont les mêmes que les arcs de paraboles ou d'ellipse. Le rayon de courbure change proportionnellement à la distance curviligne à la clé d'arc. Généralement, le rayon de courbure à la naissance est 1.5 à 3 fois plus grand qu'à la clé. Figure 3 présenter définition des arcs avec segments de spirale logarithmique.

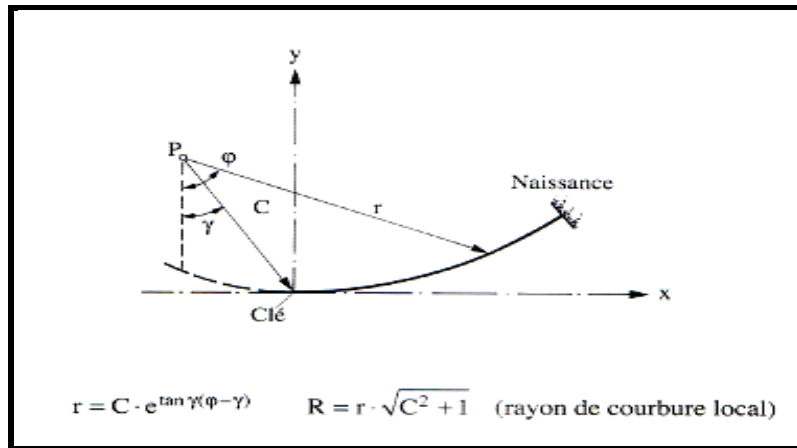


Figure 4 : Définition des arcs avec segments de spirale logarithmique (A.J.Scheleiss et H.Pougatsch,2011).

### III.3. Forme des sections verticales

La console présente la section verticale d'un barrage voûte. A l'axe, se trouve la console de clé dont la définition géométrique doit être effectuée simultanément avec la recherche des paramètres des arcs.

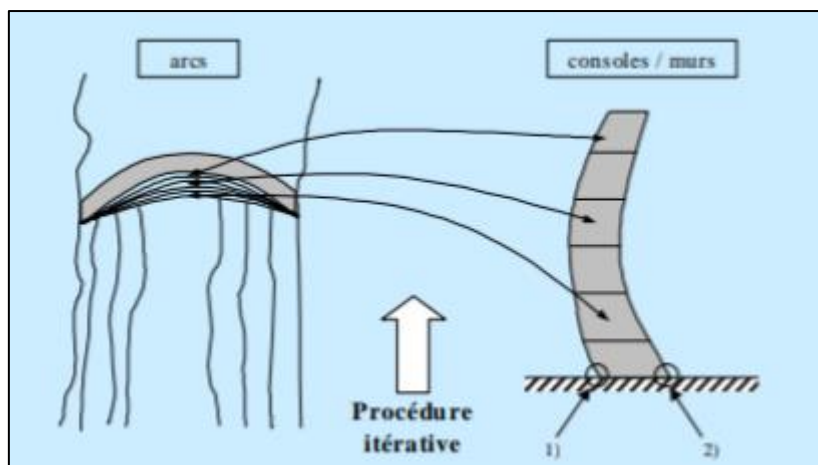


Figure 5 : Relation entre la géométrie des arcs et celle des consoles (EPFL,2006).

La géométrie des consoles doit s'efforcer de répondre aux deux conditions suivantes :

- A lac plein, aucune traction verticale ne doit se développer sur le parement amont,
- A lac vide, les tractions sur le parement aval sont limitées à  $|\sigma_{av}| \leq 1/4 \sigma_{am}$ .

Si le poids propre empêche de traction créé par la poussée hydrostatique, la première condition pas satisfait.

### III.4. Epaisseur de la console à la clé

Il y a beaucoup d'approches pour la prédimensionnement de la console à la clé, et les règles suivantes sont souvent utilisées (Tableau 1).

Tableau 1 : Variation de l'épaisseur des consoles en fonction du type de la vallée (B.Rouissat,2010).

Epaisseur	Vallée large en U	Vallée étroite en V
au couronnement	$e_c = H/15$	$e_c = H/20$
la base	$e_b = L_c/20$	$e_b = L_c/15$

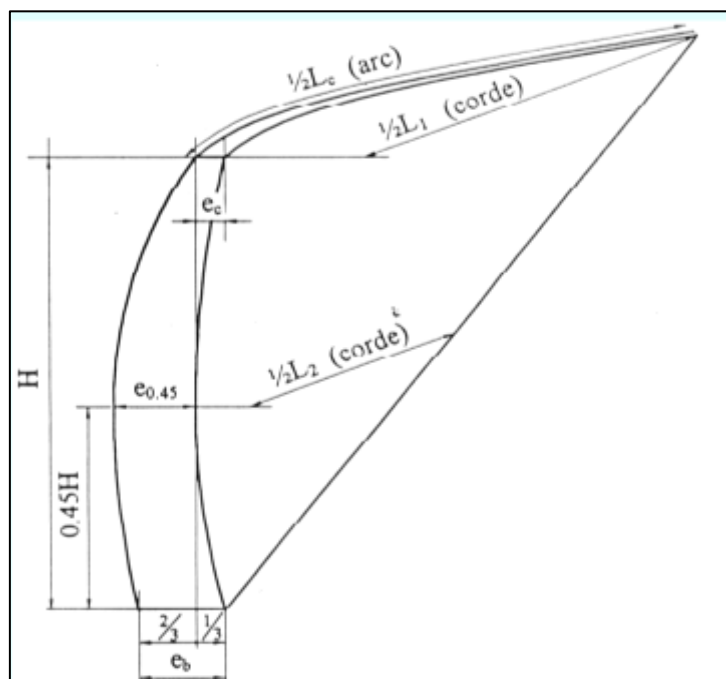


Figure 6 : Dimensions caractéristique de la console a la clé (B.Rouissat,2010).

### III.5. Coefficient d'hardiesse

Giovanni Lombardi a donné une définition de coefficient d'hardiesse pour un barrage voûte par la relation :

$$c = \frac{S^2}{V.H}$$

Avec :

c : coefficient d'hardiesse,

S : surface moyenne du barrage,

V : volume du béton,

H : hauteur sur la fondation.

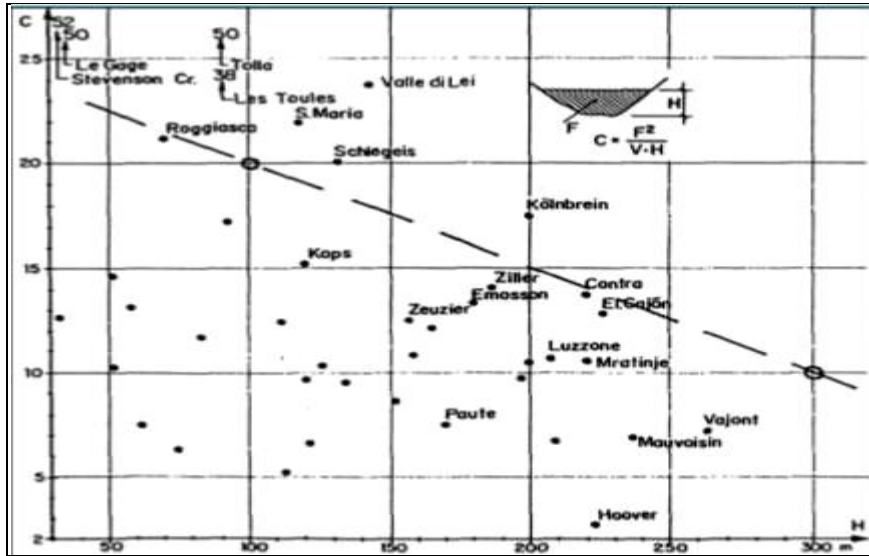


Figure 7: Relation entre le coefficient d'hardiesse C et la hauteur H, pour quelques barrages voûtes existants (EPFL,2006).

### III.6. Stabilité des massifs d'appuis

Compte tenu des charges importantes qui peuvent leur être transmises et de la présence d'eau, la stabilité des massifs d'appuis est essentielle compte tenu de la sécurité publique du barrage.

Le relevé des systèmes de discontinuités structurales du massif rocheux permet de localiser les plans pour une grande surface qui peuvent présenter des faiblesses potentielles. Un plan, ou encore l'intersection de deux ou plusieurs plans peut délimiter une zone avec le risque de glisser dans le cas où les forces de lui appliquer. Le mode de rupture est donné par la direction des fissures ou de la stratification.

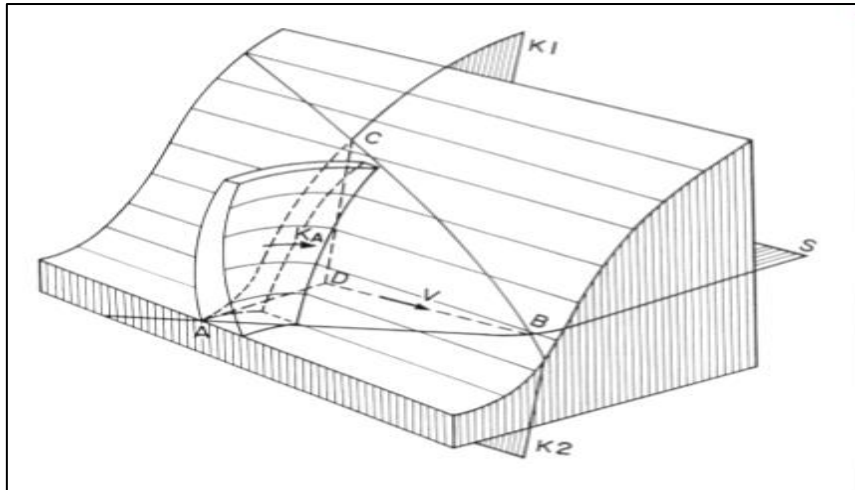


Figure 8 : Analyse de stabilité des appuis et de la fondation (EPFL,2006).

#### ***IV. Les contraintes développées dans les barrages voûtes***

Le calcul des contraintes dans les consoles et les arcs suppose une distribution linéaire entre les faces amont et aval. Après la flexion, les surfaces restent plates.

La poussée de l'eau sur les parements amont est considérée comme la cause principale qui provoque des contraintes sur les arcs. D'autres effets provoquent également des contraintes, comme la pression de l'eau sur les versants de la vallée, la variation de la température, le retrait et le fluage du béton.

D'après le principe de Saint-Venant, les contraintes sur le massif de fondation dépendent principalement de la direction et de la valeur de réaction de l'arc, pas la distribution locale de la pression dans la zone de contact de l'arc avec la roche, la distance de bord est d'environ 1,5 fois l'épaisseur de l'arc, tout se passe comme si les contraintes étaient réparties dans la massif de fondation suivant les équations de Boussinesq pour un demi espace de propriétés solides homogènes et isotropes.

##### ***IV.1. Calcul des sollicitations dans la zone d'encastrement des arcs***

Il s'agit de déterminer l'état de contrainte bidimensionnel du solide élastique constitué par la moitié de l'arc et son massif de fondation sur une épaisseur (profondeur) égale à environ 1,5 fois l'épaisseur de l'arc. Ce demi-arc est sollicité, sur son extrados, par la pression radiale uniforme de l'eau et, sur sa section de clé, par des contraintes normales réparties suivant un diagramme trapézoïdal, équivalentes aux efforts intérieurs agissant sur cette section (effort normal et moment fléchissant), tels qu'ils découlent du calcul classique de l'arc encastré (R.Othmar-J.).

*:IV.1.1. Méthode de calcul*

La distribution des contraintes dans un domaine élastique bidimensionnel est définie par une fonction de contrainte (fonction d'Airy).

En raison de l'absence de forces massiques les trois contraintes sont définies par les équations aux dérivées secondes de la fonction bi harmonique.

*IV.1.2. Conditions au contour*

Un disque est généralement sollicité par des charges appliquées sur son pourtour, quelquefois aussi par des forces agissant à l'intérieur de ce dernier et par des forces massiques par exemple le poids propre. En chaque point du contour d'un disque sollicité par des forces agissant dans son plan, l'équilibre entre forces extérieures et intérieures.

***IV.2. Localisation des zones tendues et comprimées***

La structure non spécifique permet de connaître dans certaines zones et sous certains cas de charges des contraintes de traction, de sorte que nous ne pouvons pas compter sur la résistance à la traction du béton.

En effet, les joints de construction ont une résistance à la traction pratiquement nulle, même si ils ont été injectés avec du coulis de ciment pour assurer la transmission de la force horizontale.

Des zones typiques de traction et de compression dans les arcs peuvent être mises en évidence sous l'influence de l'orientation de l'eau. Les tractions apparaissent sur :

- Le parement amont, à proximité des naissances,
- Le parement aval, à la clé.

Puis distinguer la zone de compression qui forme une voûte active.

L'intensité des contraintes de compression dans la voûte active peut augmenter de manière significative en fonction de l'extension de la zone de traction.

La naissance des arcs, les sections sont très comprimées à intrados et tendues à extrados.

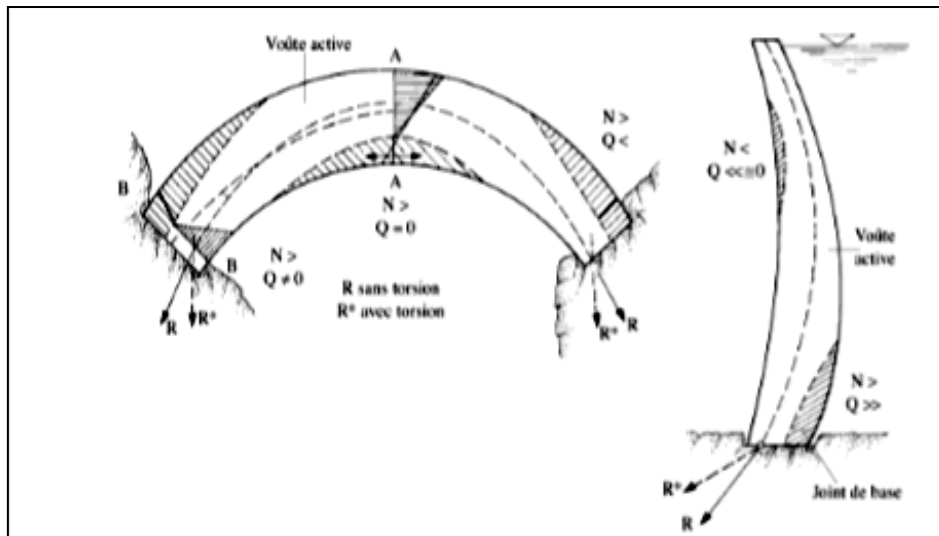


Figure 9 : Zones tendues et comprimées dans un barrage-voûte (A.J.Scheleiss et H.Pougatsch,2011).

## V. Déformations et les déplacements dans les barrages voûtes

### V.1. Compatibilité des déformations

La poussée de l'eau agissant sur le barrage voûte est répartie entre les arcs et les consoles. En appliquant la condition de la compatibilité des déformations radiales à chaque point de croisement entre les deux éléments comme montre la figure ci-dessous.

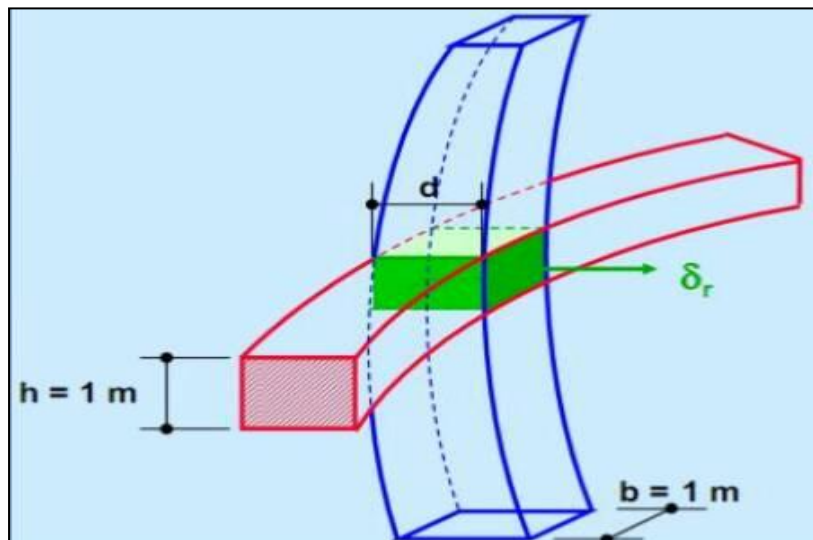


Figure 10 : Compatibilité entre les déformations radiales de la console et l'arc à leur point d'intersection (B.Rouissat,2010).

*V.1.1. Déformation de l'arc au centre  $\delta_a$* 

La déformation radiale au centre pour un arc chargé par une force radiale uniforme calculer par la relation suivante (B.Rouissat,2010):

$$\delta_a = \beta \cdot \frac{P_a \cdot R^2}{d_a \cdot E_b}$$

Avec :

R : rayon moyen de l'arc (à l'axe),

$d_a$  : épaisseur de l'arc,

$E_b$  : module d'élasticité du béton,

$E_r$  : module de déformation du rocher de fondation,

$\beta$  : valeur d'encastrement.

*V.1.2. Déformation de la console  $\delta_c$* 

Sous l'effet des forces horizontales transmises par les arcs, la déformation de la console en un point y quelconque déterminer par le principe des travaux virtuels.

**V.2. Déplacements dus aux déformations de la fondation**

Les forces normales et tranchantes ainsi le moment de flexion engendrent :

- Un tassement vertical,
- Une rotation dans le plan vertical de la section d'encastrement, un déplacement amont-aval du pied du barrage.

Les formules de Vogt ont été développées pour tenir compte de ces déformations à cause des forces unitaires qui agissent sur un demi-espace infini d'un milieu homogène.

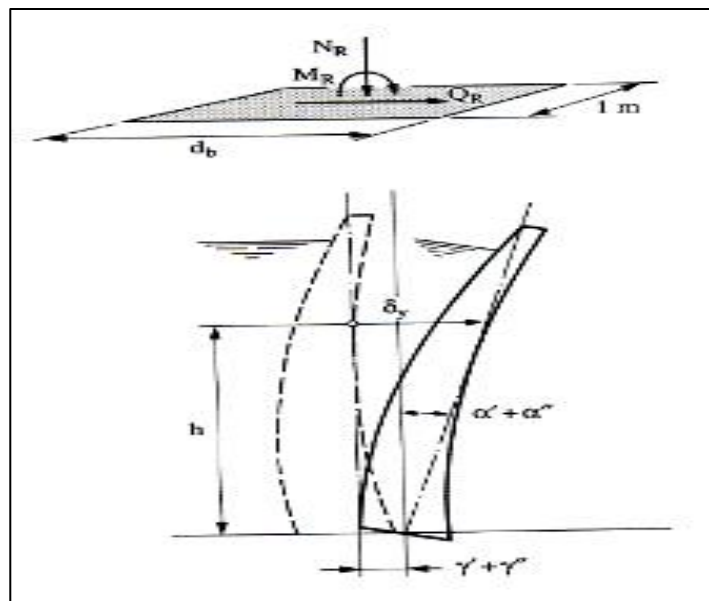


Figure 11 : Déplacements dus aux déformations de la fondation (A.J.Scheleiss et H.Pougatsch,2011).

## ***VI. La stabilité dans les barrages voûtes***

Instabilité des appuis et fondations des barrages voûtes, pendant l'exploitation de la retenue, due à l'hétérogénéité de la perméabilité de la fondation.

Les conditions de stabilité décomposées en deux groupes :

- Equilibre statique,
- Equilibre élastique.

### ***VI.1. Equilibre statique***

Les forces appliquées à un anneau après la négligence des sous pressions et le poids des anneaux au-dessus de l'anneau considéré sont :

- La poussée de l'eau Q,
- Les réactions des surfaces d'appui Q<sub>1</sub> et Q<sub>2</sub>.

L'équilibre statique sera atteint si les trois conditions suivantes sont remplies :

- Il existe un système de trois forces Q, Q<sub>1</sub>, Q<sub>2</sub> de résultante nulle,
- Les forces Q<sub>1</sub> et Q<sub>2</sub> rencontrent les surfaces d'appui sous un angle inférieur à l'angle de frottement des maçonneries sur le rocher de fondation,
- Les appuis peuvent résister aux forces Q<sub>1</sub> et Q<sub>2</sub>.

### ***VI.2. Equilibre élastique***

Les contraintes dans chaque section droite des anneaux doivent être inférieures à la valeur admissible.

Plusieurs méthodes sont utilisées pour le calcul approché de l'ouvrage. Une de ces méthodes est la formule du tuyau. Cette méthode donne des résultats plus précis si l'épaisseur de la voûte est plus faible que le diamètre.

La contrainte de compression moyenne n dans une section est calculée par la formule suivante (formule du tuyau) (R.Ginnocchio et V.Pierre-Louis,2012):

$$n = \frac{p \cdot R}{e}$$

Avec :

R : rayon de la fibre moyenne de l'anneau considéré,

e : épaisseur de la voûte à la clef,

p : pression de l'eau sur le parement amont,

n : contrainte de compression.

## ***VII. Effets thermique sur les barrages voûtes***

### ***VII.1. Température du béton***

Au début la température de dégagement de chaleur pendant la préparation sera ajoutée au béton frais. Après cela, on observe le refroidissement naturel du béton qui est un processus très lent, car il s'effectue principalement à travers les façades amont et aval, et tant qu'elles sont en contact avec l'air, par les faces supérieures des plots.

Lorsque le barrage atteint son équilibre thermique, les changements de température sont dus aux échanges avec son environnement immédiat : la température de l'insolation, de l'eau et de l'air.

Les températures affectent les contraintes et les déformations dans l'ouvrage, en particulier pour les barrages voûtes. Les changements de température sont prise en compte lors du calcul des barrages voûtes en regardant plusieurs états, comme lac vide, lac plein, les saisons (été/hiver) (R.Ginnocchio et V.Pierre-Louis,2012).

### ***VII.2. Effets de la température dans les barrages voûtes***

Dans le préambule, il convient de noter qu'il existe différentes périodes dans lesquelles la température interne du barrage voûte est prépondérante. Les premiers effets thermiques importants se manifestant par la libération de chaleur pendant la construction. Ensuite, produire un refroidissement naturel qui peut être accéléré par le système de circulation d'eau froide. Pendant le fonctionnement, les températures ambiantes (l'air et l'eau) aura un effet cyclique sur les déformations du barrage. Il y a trois facteurs qui affectent la température dans le béton, ce qui permet la détermination de l'état thermique du barrage qui change au cours de l'année, ces trois paramètres sont (A.J.Scheleiss et H.Pougatsch,2011):

- La température de l'air et le vent sur le parement aval,
- La température de l'eau ou de l'air sur le parement amont,
- L'insolation du parement aval.

La température de l'eau dans la surface entre 2 et 3°C à quelques mètres de profondeur, et 4°C au-delà de 10 à 20 m de profondeur. La température du béton allant de 5 à 25°C sous l'effet des échanges de chaleur sur le parement aval.

La variation de température est très significative sur les parements rendant le diagramme de température complexe. Le diagramme de température dans une section représenté par relation linéaire entre les deux parements (forme trapézoïdale) pour la simplification du calcul. Ce trapèze peut être décomposé en :

- Variation uniforme de la température par rapport à une température de référence,
- Gradient de température entre les deux parements.

La figure suivante (figure 11) présenter Température dans un barrage-voûte (approximation linéaire).

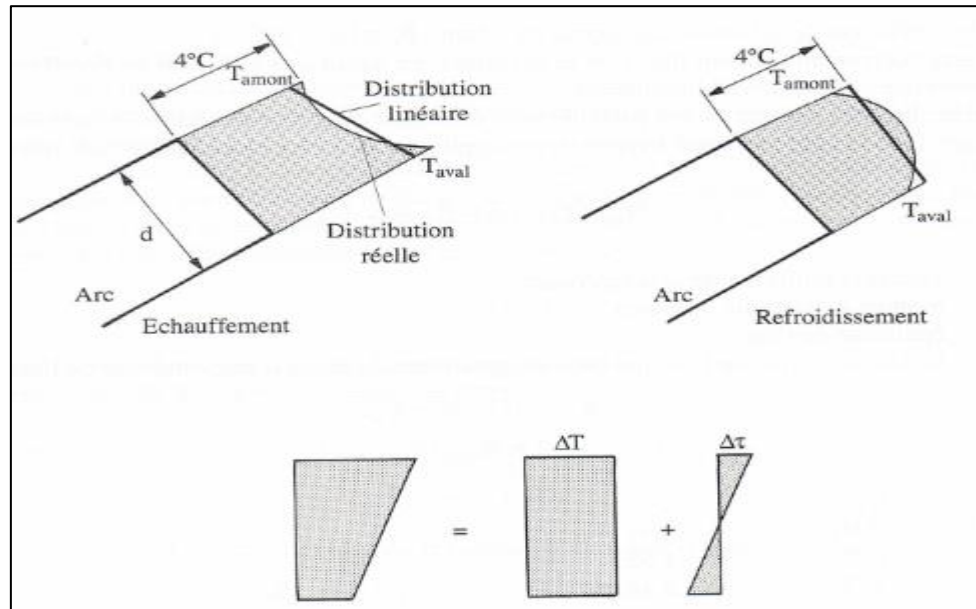


Figure 12 : Température dans un barrage-voûte, approximation linéaire (A.J.Scheleiss et H.Pougatsch,2011).

#### VII.2.1. Variation uniforme de la température

La variation uniforme de température s'applique bien dans le plan horizontal que le plan vertical.

Sous l'effet de changement de température, on observe un déplacement vertical du couronnement sans apparition de contraintes additionnelle.

La force hyperstatique dans le centre élastique de l'arc est accompagnée de moments de flexion dans les arcs, dus à l'hyperstaticité.

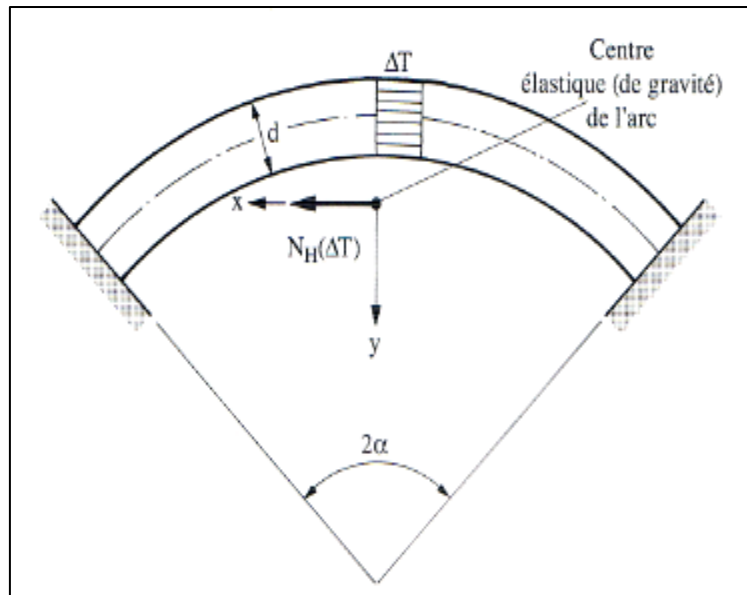


Figure 13 : Effet d'une variation uniforme de la température : position de la force hyperstatique.

#### VII.2.2. Gradient de température

Dans un arc soumis à un gradient de température, ne déformez pas le feuillet moyen, par contre les fibres sont déformées. La fibre extérieure s'allonge et la fibre intérieure se raccourcit. Les sections qui ne tournent pas, sont sollicitées par un moment de flexion uniforme dont l'effet est d'annuler les rotations relatives. Si les sections peuvent se déplacer librement proportion à l'autre, nous pouvons calculer la rotation de deux sections voisines, distantes d'une longueur unité, par la formule suivante (A.J.Scheleiss et H.Pougatsch,2011):

$$\Delta\omega = 2 \cdot \Delta\tau \cdot \beta t / d$$

Avec :  $\Delta\tau$  est la différence de température linéaire entre les parements.

Le moment de flexion qui annule cette rotation a pour expression :

$$M = \Delta\omega \cdot I \cdot E_B$$

La sélection du système de protection thermique le plus efficace doit considérer :

- La sélection du matériau isolant,
- L'efficacité de la protection thermique fournie,
- L'efficacité fonctionnelle incluant les aspects architecturaux et environnementaux, les facilités de construction et de maintenance, l'efficacité de drainage. La préservation de la possibilité inspection visuelle des parois du barrage et de la maintenance de celui-ci.

### ***VIII. Comportement sismique des barrages voûtes***

Cela fait maintenant certain nombre de décennies que les chercheurs dans le domaine du génie civil sont intéressés aux effets de sollicitations de nature dynamique ou sismique sur les structures hydrauliques (les barrages, les évacuateurs de crue, les vannes...).

Dans le calcul des barrages, il est nécessaire de prendre en compte les schémas sismiques qui peuvent se produire même dans les régions géologiquement stables.

Deux types de force sismique sont considérés :

- Les forces d'inertie, résultant d'une accélération horizontale du corps du barrage,
- Les forces hydrodynamiques provoquées par la réaction de l'eau de la retenue contre le barrage.

Le coefficient sismique calculé par (R.Ginnocchio et V.Pierre-Louis,2012) :

$$K = \gamma/g$$

$g$  : l'accélération de la pesanteur,

$\gamma$  : l'accélération supposée du sol.

#### ***VIII.1. Séisme***

Un séisme (ou tremblement de terre) est provoqué par une rupture brutale des roches le long d'un plan de faille. Cette rupture provoque des ondes sismiques et leur passage à travers le sol entraîne des vibrations qui peuvent être ressenties à la surface (MEDDE,2014).

Les causes des séismes peuvent être d'origine tectonique, mais aussi volcanique ou dues à la présence d'une retenue (A.J.Scheleiss et H.Pougatsch,2011).

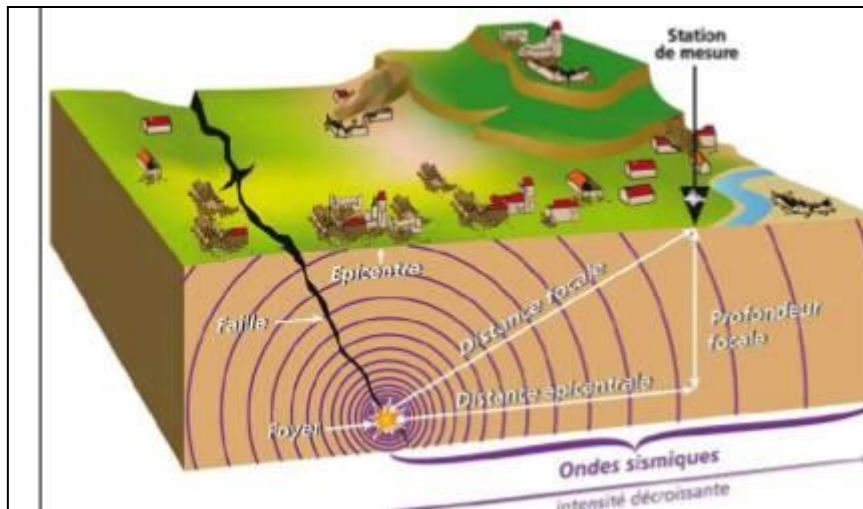


Photo 2 : Représentation schématique de la rupture sismique d'une faille (MEDDE,2014).

Les ondes sismiques sont des ondes élastiques. On distingue :

- Les ondes de volume qui traversent la terre (ondes primaires et ondes secondaires),
- Les ondes de surface sur les enregistrements des sismomètres (onde de Love et onde de Rayleigh).

### ***VIII.2. Conception générale et scénario de rupture dans les barrages voûtes***

Le dimensionnement d'une voûte dans la zone sismique est basé sur des principes analogues à ceux utilisés pour déterminer les dimensions statiques. Ce dimensionnement devrait prendre en compte en plus des efforts statiques, les forces d'inertie et les effets de couplage avec la retenue.

### ***VIII.3. Analyse sismique des barrages***

Lorsque le barrage et sa fondation sont soumis à un séisme, celui-ci génère un champ d'accélération qui dépend de la forme du barrage et des différents constituants. En fonction de la hauteur et la forme du barrage vis-à-vis du spectre du tremblement de terre, en fonction de la dureté des matériaux et son capacité d'amortissement interne, la réponse du barrage sera plus ou moins puissante. Cette réponse est aussi effectuée par les caractéristiques de la fondation et de la retenue.

Les choix de la (des) méthode (s) de calcul à effectuer dépendent de la réserve de sécurité de la structure sollicitée par un séisme par rapport aux changements statiques.

Quelle que soit la méthode développée, l'évolution finale de la sécurité de l'ouvrage vis-à-vis d'un séisme doit être basée non seulement sur le jugement de l'ingénieur et l'expérience passée (MEDDE,2014).

### VIII.3.1. Méthode des éléments finis

L'apparition dans le milieu des années 1960 de la méthode des éléments finis et l'ordinateurs puissants capables DZ gérer un grand nombre de calculs contribué au développement des analyses de systèmes structure-réservoir fondation.

La plupart des formules plus précises, fondées sur les éléments finis, les éléments de la frontière ou une combinaison des deux, ont été développées au fil des années pour modéliser les interactions fluide-structure en deux et en trois dimensions. (C.Gazarian-Pagé,2014).

### VIII.3.2. Méthodes simplifiées

Bien que la méthode des éléments finis soit très puissante, elle peut devenir très coûteuse dans le cas de grandes analyses de système de structure-réservoir. Cette situation est encore plus coûteuse dans le cas de l'analyse tridimensionnelle, où les domaines structural et fluide en particulier peuvent avoir des proportions gigantesques et causer des difficultés même pour les ordinateurs les plus puissants du marché actuel.

Cependant, les méthodes découplées restent fastidieuse, parce que leur utilisation nécessite souvent la prise en compte un grand nombre de modes de vibration structuraux et fluides pour assurer la convergence de la solution. Il faut ajouter que les méthodes découplées sont adaptées surtout aux analyses bidimensionnelles et que les méthodes d'analyse en trois dimensions ne sont pas encore tout à fait complètes.

Ces constatations ont fait en sorte qu'il s'est développé une demande pour des méthodes de calcul simplifiées, efficaces et robustes permettant de résoudre des problèmes d'interaction fluide-structure (C.Gazarian-Pagé,2014).

### VIII.3.3. Méthodes d'analyses traditionnelles

Les premières méthodes de calcul de la reprendre des ouvrages hydrauliques aux charges sismiques ont été mise en point parla méthode des masses ajoutées « Westergaard 1993 ».

La formulation modélise les forces d'inertie en provenance du réservoir agissant sur la structure par l'application de masses ajoutées à la face de la structure en contact avec l'eau. La masse ajoutée est calculée comme suit (C.Gazarian-Pagé,2014) :

$$m_i = 7/8 * \rho_w \alpha_{\square} V H_r ( H_r - z)$$

Avec :

$m_i$  : la masse ajoutée au nœud i,

w : la masse volumique de l'eau,

$A_i$  : l'air tributaire du nœud i sur la surface de la structure en contact avec l'eau,

$H_r$  : la hauteur d'eau dans le réservoir,

$z_i$ : la position verticale du nœud i.

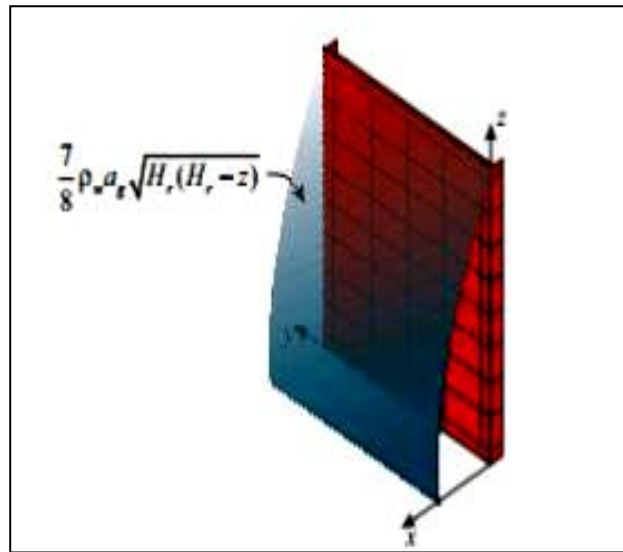


Figure 14 : Distribution 3D de la pression hydrodynamique selon la formulation de Westergaard (C.Gazarian-Pagé,2014).

## IX. Fissuration

La fissuration du béton est un processus complexe qui concerne, d'une part, les propriétés du matériau, et la géométrie de la structure ou d'une partie de la structure d'autre part. Les tensions internes provoquent souvent des fissures. Pendant l'installation, les gradients thermiques sont développés dans les éléments massifs qui génèrent des fissures.

Dans les barrages voûtes, l'apparition de fissures dues à des forces de cisaillement importantes par rapport aux efforts normaux est plus préoccupante. Ces forces de cisaillement importantes se développent surtout à proximité de la fondation. Il convient de noter que la fissure résultant du moment de flexion peut être prolongée par l'influence des forces de cisaillement sur les contraintes principales.

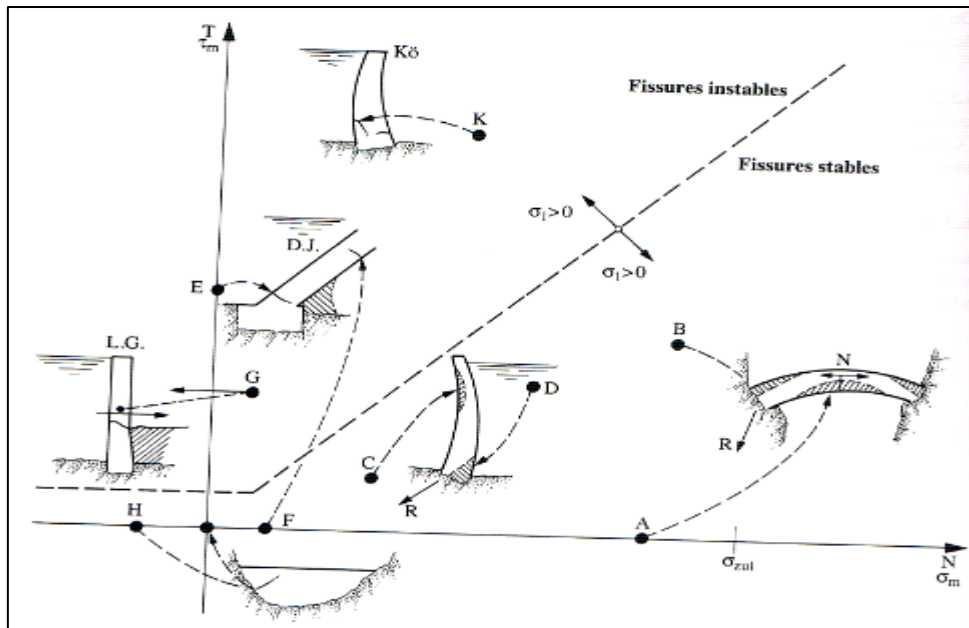


Figure 15 : Fissures stables et instables dans un barrage voûte (A.J.Scheleiss et H.Pougatsch,2011).

### IX.1. Fissuration du pied amont

Tous les méthodes par arcs- consoles mettre en évidence un fort moment d'encastrement des consoles dans la fondation, on particulier pour la console de clé.

Ces moments de flexion sont susceptibles d'induire des tractions importantes en pied amont, ou même des fissurations sur une section non négligeable. Ce phénomène a été observé par un dispositif d'auscultation de plusieurs voûtes importantes soumises à une brusque montée des eaux après d'une crue pendant la période froide. la basse température réduire l'impact d'arc et augmenter corrélativement l'effort repris par les consoles. La fissuration du pied amont de la voûte se reflète en particulier par une brusque montée des sous pressions mesurées sous l'ouvrage.

Il existe plusieurs solutions pour réduire l'effet d'encastrement de la console (P.LeDelliou,2007) :

- Assouplir le pied de la console en diminuant son épaisseur (le béton tendu est inutile) en assurant, si nécessaire, la stabilité à vide de la console par des béquilles comme à Marèges,
- Réaliser une pseudo-articulation du pied de la console avec, par exemple, une portion « près-fissurée » du béton. L'introduction des sous-pressions dans le corps de l'ouvrage est limitée par la mise en place d'un joint amont étanche du type de ceux mis en œuvre pour les barrages de Laouzas ou de Katse.

On peut noter que la traction à amont peut conduire à une fissuration du béton au pied du parement amont ou du rocher ou de contact entre le rocher et le béton.

## ***X. Barrage voûte à double courbure***

Le nom du barrage voûte à double courbure provient de la section incurvée d'épaisseur variable des coupes verticales du barrage, ainsi que la section courbe et d'épaisseur en général variable des sections horizontales.

### ***X.1. Principe de la voûte à double courbure***

Dans une voûte quelconque, les arcs sont déformés d'une manière différente (en fonction de la profondeur). Il y a un arc long qui tend à se déplacer plus qu'un arc court, ce qui conduit à une coupure (cisaillement) entre les arcs horizontaux et incline les contraintes qui plongent vers les rives.

La poussée de l'eau est répartie à chaque point du parement amont entre :

- Une force reprise par les consoles verticales, tels que les barrages poids, ces consoles génèrent des efforts tranchants et des moments de flexion entre les arcs sous l'effet de cette part de poussée,
- Une force reprise par les arcs, le cisaillement entre les arcs horizontaux et le plongement des contraintes qui en résulte tend à soulever les consoles du centre.

Dans la réalité, l'hyperstatisme implique :

- Les arcs sont chargés par les consoles et se déforment davantage en haut,
- Les arcs se déchargent sur les consoles et se déforment moins en bas.

La double courbure utilise l'effet de console. En bas, où les arcs chargent les consoles, on réduit la tendance néfaste à la flexion en donnant du poids déporté à l'amont. Le bas des consoles a donc le fruit de l'aval. On peut parler d'une véritable précontrainte permise par ce surcroît de poids amont lors de la mise en eau.

Les consoles chargent les arcs en haut, ce qui est bon pour la sollicitation des appuis, on incline encore plus les réactions d'appuis en donnant aux consoles un fruit amont. Au total, la console a la forme d'un arc dans la direction verticale.

La double courbure réduit les rayons des arcs inférieurs, les plus chargés, réduit également les cisaillements horizontaux en pied des consoles centrales. Elle limite l'ouverture du joint amont.

Le rayon des faces amont et aval est variable horizontalement et verticalement dans les barrages à double courbure. Ce type de profil réduit considérablement l'épaisseur de la voûte et le volume de béton utilisé.

### ***X.2. Calcul en coque***

Le calcul des structures en coque à double courbure permet de conserver des voûtes spéciales et élégantes, dont quelques réalisations remarquables qui peuvent être faites aux ingénieurs italiens (P.Le Delloiu,2007).

## ***XI. Conclusion***

Les barrages voûtes profitent de leur forme arquée en plan pour reporter une grande partie de l'effort de poussée de l'eau sur les flancs de la vallée. Ceux-ci reçoivent une force concentrée et sont donc soumis à une forte pression, ce qui nécessite une excellente fondation de roche au plan mécanique.

Les barrages voûtes sont très économes en béton par rapport aux barrages poids. Ainsi sur la fondation, renforçant ainsi le besoin d'une fondation d'excellente qualité. Ils s'adaptent convenablement en sites sismique notamment en présence de rocher de bonne qualité. Toutefois leur conception reste compliquée du fait de la variété des paramètres à considérer et de leur dépendance et interactions.

---

## *Chapitre III : Surveillances et auscultations des barrages.*

### *I. Introduction*

Tous les réalisations de l'homme, barrages sont parmi ceux qui peut certains égards conduire les risques potentiels trop grand. Travaux de construction garder impose des risques population entourant la propriété et l'environnement naturel et de l'homme.

La surveillance des barrages visant à la gestion des risques et de réduire au mieux sur le potentiel de l'emballage des moyens pour l'identification précoce des événements indésirables susceptibles d'engendrer une éventuelle défaillance ou rupture.

Toute organisation d'un processus de surveillance devrait donc viser à faire en sorte que l'on réduit au maximum les probabilités de défaillance par :

- L'identification des modes de rupture et leur prise en compte dans un programme de surveillance,
- La détection précoce de phénomènes initiaux et évolutifs qui pourraient mener à ces mécanismes de ruptures,
- La connaissance, via des paramètres physiques, du comportement du barrage et de ses composantes.

La sécurité des barrages en service repose sur trois concepts généraux :

- Une conception adéquate pour éviter le pire,
- Une réflexion préalable sur les conséquences et l'organisation des secours au cas où le pire arriverait,
- Une surveillance constante, en temps utile et les mesures correctives qui s'imposent.

La surveillance d'un barrage commence dès le début de la mise en eau (et même pendant la construction). Les statistiques de rupture montrent qu'il s'agit d'une des phases les plus critiques de la vie d'un barrage. Elle se poursuit pendant toute son exploitation (P.LeDelliou ,2007).

Contrôle comprend également la surveillance du bassin accumulation et de celle située directement à l'aval de l'ouvrage de retenue.

Le dispositif d'auscultation est un système de mesure judicieusement conçu de telle façon qu'il soit possible de mesurer tant les charges qui sollicitent l'ouvrage (causes) que les différents paramètres (grandeurs) qui caractérisent le comportement d'un ouvrage de retenue (conséquences) (A.J.Scheleiss et H.Pougatsch,2011).

## II. Auscultation

La surveillance est assurée par l'exploitant du barrage. Elle prend deux formes complémentaires (P.Le Delliou,2007):

- Une surveillance visuelle qui se traduit par des tournées d'inspections régulières,
- Une auscultation du barrage avec le relevé périodique d'appareils de mesures.

L'auscultation est la science permettant de définir et d'évaluer, vis-à-vis de la sûreté, le comportement des ouvrages à partir de renseignements obtenus par des séries de mesures appropriées. En cas d'anomalie, le rôle de l'auscultation est alors de tenter de déterminer les causes (R.Ginnocchio et V.Pierre-Louis,2012) .

Comprendre le barrage signifie toutes les procédures de surveillance qui sont effectuées sur l'ouvrage, sa structure, ses fondations et son environnement ainsi que l'analyse et l'interprétation des informations collectées.

Les objectifs de l'auscultation sont :

- Assurer la sécurité de la population sans limiter les conditions de fonctionnement de la structure,
- Evaluer l'évolution de la structure avec une précision suffisante pour permettre l'adoption en temps opportun des éléments d'entretien ou de fonctionnement appropriés,
- Permet à la fin de la chaîne de porter un jugement sur le comportement de l'ouvrage. Les conditions de sécurité ne peuvent être évaluées pour un barrage complet à tout moment, et encore moins garanties une fois pour toutes.

Elles dépendent d'éléments plus ou moins évidents et peuvent être développés et contrôlés (la rigidité, le régime hydraulique des fondations, la résistance...).

Il est nécessaire de s'appuyer sur la compréhension du mode de résistance structurale et d'identifier les grandeurs significatives telles que les déplacements et les contraintes afin de juger de l'évolution possible du comportement de la structure.

Le dispositif d'auscultation doit donc être conçu de manière à ne suivre que les paramètres significatifs du comportement en un nombre limité de points et selon des périodicités fixées à l'avance. Les paramètres généralement retenus sont (P.LeDelliou, 2007) :

- Les déplacements absolus ou relatifs,
- Des déformations locales, éventuellement traduites en contraintes,
- Des pressions (totales dans un remblai, sous-pressions ou pressions interstitielles),
- Des débits de drainage ou de fuite.

### ***III. Choix des profils d'auscultation***

Il est matériellement impossible de suivre, en tout point, de la structure et de sa fondation, tous les paramètres physiques à tout instant.

Le choix de l'emplacement des profils d'auscultation peut être motivé par les raisons suivantes :

- Les sections caractérisées par une hauteur importante du barrage et dont la fondation immédiate est relativement imperméable. Ceci peut générer d'importants excès de pression interstitielle à la base du barrage,
- Les sections caractérisées par la plus grande hauteur du barrage et peut donc accumuler les plus fortes déformations,
- Les sections caractérisées par une hauteur importante du barrage ainsi que par sa proximité d'un ancrage de génie civil (galerie de dérivation par exemple),
- Les sections caractérisées par interception d'une faille dont le comportement doit être suivi (R.Nadia,2014).

### ***IV. Choix du dispositif d'auscultation***

Le problème est de définir les types d'appareillage et leur implantation apportant une garantie satisfaisante pour atteindre cet objectif. En raison de la spécificité de chaque barrage, les dispositifs d'auscultation sont à étudier au cas par cas, le projecteur peut cependant s'appuyer sur quelques principes et sur le retour d'expérience des ouvrages en service (R.Nadia,2014).

La définition du dispositif d'auscultation sera donc établit par un expert, après une visite détaillée de l'ouvrage, une analyse de son comportement, des risques encourus et des travaux de confortement envisagés à plus ou moins long terme (Antoine et al, 1992)

Actuellement, il existe plusieurs procédés et d'appareils. Cependant, le matériel automatique ou télécommandé doit être associé à un examen visuel d'un observateur de l'ouvrage. Il est possible que la découverte de l'évolution de fuite ou de fissure...

Les qualités nécessaires dans les appareils utilisés sont (R.Ginnocchio et V.Pierre-Louis,2012) :

- Fidélité : toute dérive est un effet incompatible avec les impératifs d'une bonne auscultation,
- Robustesse : les conditions d'emploi sont généralement hostiles,
- Sensibilité : des variations de très faibles amplitudes doivent être décelées,
- Longévité : souvent ces appareils deviennent inaccessibles, une fois la construction achevée et un barrage est fait pour durer de longues années,
- Simplicité d'entretien : pour limiter la maintenance.

### ***V. Contrôle des déplacements et des déformations***

### V.1. Vinchons

Les vinchons mis au point par EDF permettent de mesurer, de manière aussi simple, les mouvements relatifs dans trois directions. Il existe aussi une version télémesurable de ces appareils (P.Le Delliou,2007).



Photo 1 : Procédé de mesure des déplacements relatifs par vinchon(R.Nadia,2014)

Le vibchon est constitué de deux pièces métalliques scellées de part et d'autre du joint ou de la fissure qu'il ausculte. La section métallique doit être au minimum de 2 cm \* 2 cm. La mesure se fait au pied à coulisse avec une précision de lecture de 1/100 de mm. Cependant compte tenu d'autres sources d'erreurs, la précision de la mesure est d'environ 0,05 mm (P.Reyet,2006).

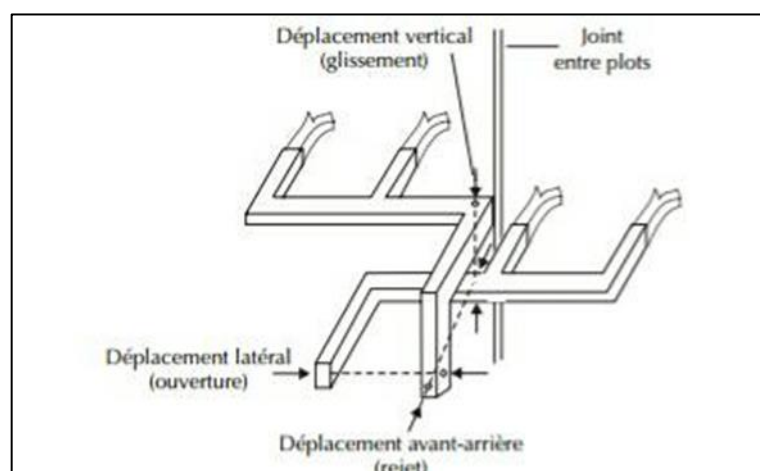


Figure 1 : Vinchon.

### V.1. Pendules

Ces appareils très simples processus sur la base du principe du fil à plomb. Il existe deux types, direct et inversé.

Les pendules sont des instruments de mesures très pratique pour les déplacements relatifs, avec une grande précision de l'ordre de 0,1 mm (P.Louis,2012).

Le pendule direct tendu par un poids, se compose d'un fil, soit en acier inoxydable, soit en alliage fer/nickel (36%) appelé l'invar. Le fil est attaché en haut, placé dans un puits vertical pour la construction ou le forage ultérieur. Le poids est plongé dans un bac amortisseur pour éviter les vibrations.

Le pendule inversé, le fil est placé au fond des puits et il est tendu par un flotteur annulaire en partie supérieure. L'ancrage est à l'extrémité inférieure, permet d'obtenir un déplacement absolu d'un point de structure par rapport à un point fixe de la fondation.

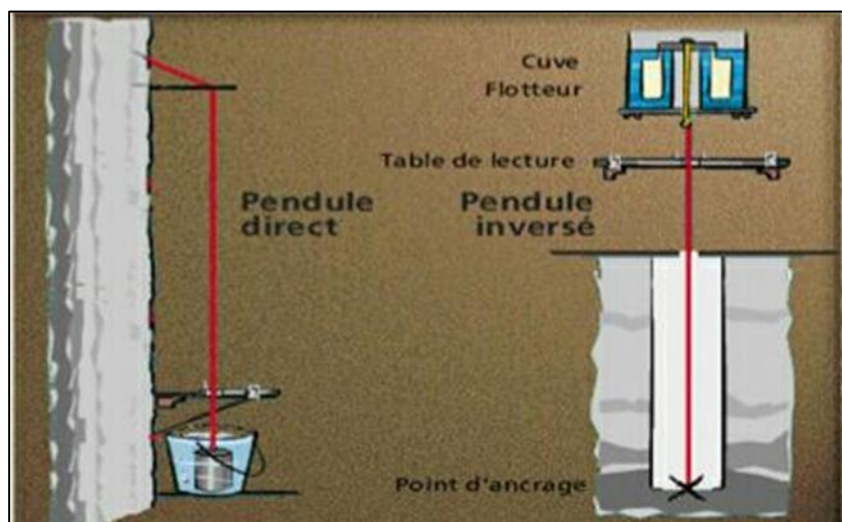


Figure 2 : Schéma d'installation d'un pendule (R.Nadia,2014).

La table de lecture est appelée table à pointé de visée, permet d'enregistrer les déplacements relatifs du fil à un niveau horizontal, entre l'ancrage du fil et l'ancrage de la table (P.Louis,2012).

La table de lecture assure une précision de l'ordre de 1/10 mm (P.Royet,2006).



Photo 2 : Installation d'un pendule avec table de lecture dans une galerie de barrage (R.Nadia,2014).

### V.3. Nivellement

Le nivellement est une méthode simple pour la mesure des hauteurs. La différence d'altitude entre points voisins est déterminée par des visées horizontales (au moyen d'un niveau) sur une mire verticale. La différence d'altitude est égale à la différence des lectures avant-arrière sur la mire (CSB, 2005b).

Le nivellement de la crête d'un barrage ou quelques-uns des points du parement aval se fait de façon traditionnelle à partir de plots de nivellement fixé dans la structure de la même et non pas dans un parapet ou un trottoir qui pourrait avoir des mouvements propres.

La précision dépend des distances de visée. Elle est en général de l'ordre du demi-centimètre et, dans les bonnes conditions, peut atteindre le millimètres (P.Royet,2006). Les tassements verticaux à l'intérieur d'un barrage en remblai font généralement appel à des systèmes hydrauliques à vases communicants.

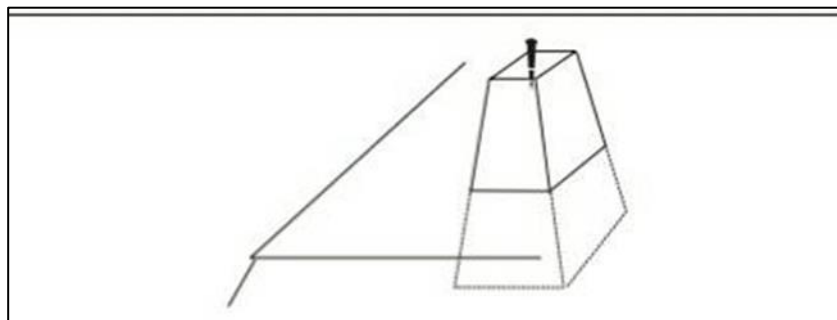


Figure 3 : Repère de nivellement en crête de remblai.

#### ***V.4. Topographie***

La géométrie absolue du barrage peut être suivie par topographie de haute précision. Le principe est le suivant : matérialisation par des visées optiques de droites horizontales joignant des points, réputés fixes et de coordonnées connues, à d'autres points mobiles, dont la position pourra alors être déterminée par un calcul géométrique. La fréquence des mesures topographiques est faible par rapport des mesures sur les pendules, par ailleurs plus précises (R.Ginnocchio et V.Pierre-Louis,2012).

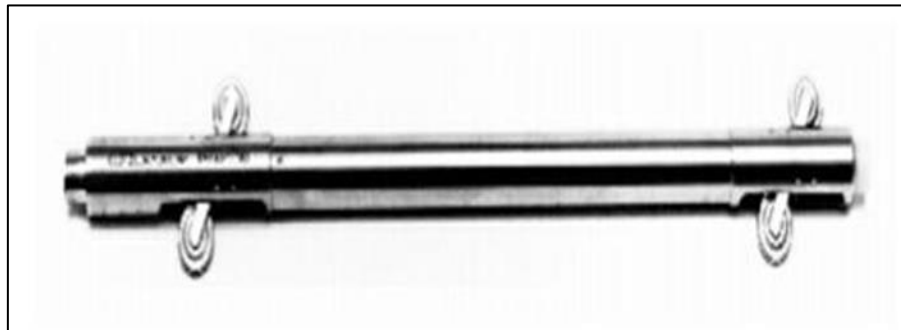
#### ***V.5. Inclinomètres***

Les inclinomètres ou clinomètres sont classés dans deux familles :

- Les inclinomètres de surface sont fixés sur l'ouvrage et mesurent de façon précise les mouvements en un point de l'ouvrage,
- Les clinomètres de forage sont surtout utilisés par les géotechniciens pour l'étude de la stabilité de sols (R.Nadia,2014).

L'inclinomètre est conçu pour mesurer le déplacement horizontal dans le sol.

Un inclinomètre est constituée d'un tube à l'intérieur duquel on enfile un capteur mesurant l'inclinaison par rapport à la vert. La connaissance de la position absolue de la tête du tube et l'intégration, le long du tube, des angles de déviation permettent de reconstituer les mouvements du terrains sur une même verticale et donc de localiser une surface de glissement éventuelle (P.Le Delliou,2007).



*Photo 3 : Sonde inclinométrique avec galets de guidage(R.Nadia,2014)*

#### ***V.5. Extensomètres***

Dans certains barrages importants en béton, on place, à la construction, des appareils de mesures constitués d'un tube à l'intérieur duquel se trouve un fil tendu.

La mesure par des moyens électriques, de la période de vibration de ce fil permet de connaître la tension du fil et donc sa longueur. Ces extensomètres sont destinés à mesurer les déformations relatives locales du béton.

En associant trois appareils dans des directions différentes, on peut, en théorie, remonter aux déformations principales (P.LeDelliou, 2007).

Il s'agit simplement d'une corde à piano tendue entre deux flasques solidaires du béton qui, en se déformant, fait varier la tension de la corde. Deux bobines placées au

voisinage de la corde la font respectivement vibrer et enregistre la fréquence de vibration de laquelle on obtient la déformation par la relation (R.Nadia, 2014) :

$$L - L_0 = K (F^2 - F_0^2).$$

Avec :

L = longueur calculée,

$L_0$  = longueur initiale,

F=fréquence mesurée,

$F_0$ =fréquence initiale.



Photo 4 : Un type d'extensomètre (R.Ginnocchio et V.Pierre-Louis,2012).

### V.6. Fissuromètre

Les fissuromètres utilisés pour mesurer les déplacements par rapport deux épontes d'une fissure ou des parties de structure séparées par joint.

Dans cette famille il existe toute une gamme d'instruments, du plus simple au plus sophistiqué.

- Le fissuromètre avec mesure au vernier (précision au 1/10 de mm),
- Le fissuromètre avec mesure au comparateur (précision au 1/100 de mm),
- Le fissuromètre avec capteur inductif (précision au 1/100 de mm mais nécessite d'une alimentation électrique) (P.Royet,2006).

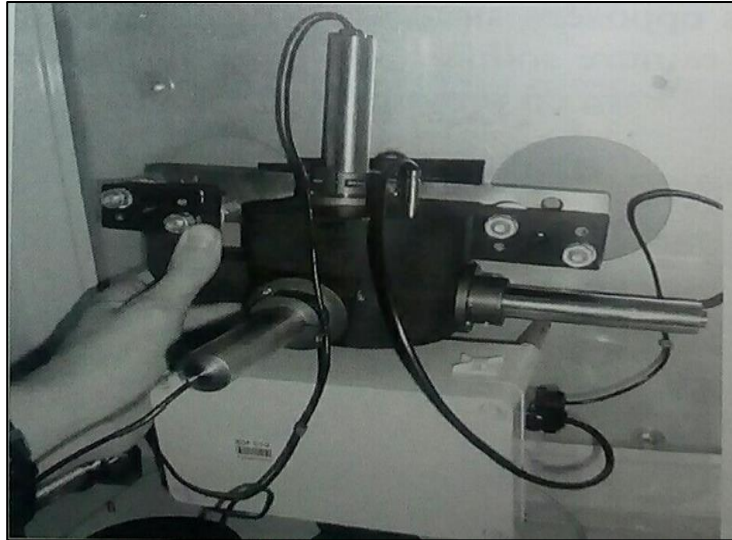


Photo 5 : Téléfissuromètre (R.Ginnocchio et V.Pierre-Louis, 2012).

## ***VI. Mesures des paramètres hydrauliques***

La sécurité des barrages implique principalement de contrôler les phénomènes hydrauliques. L'auscultation vise avant tout à identifier les développements des conditions d'écoulement dans le massif et dans la fondation.

### ***VI.1. Mesure des pressions interstitielles***

Le contrôle des pressions interstitielles dans le terrain et les appuis de l'ouvrage est assuré par des appareils qui jouent un rôle fondamental dans la surveillance des ouvrages ou des digues.

#### ***VI.1.1. Piézomètres à tube ouvert***

Un piézomètre est constitué d'un forage tubé sur toute sa longueur sauf sur une zone munie d'une crépine qui laisse passer l'eau mais pas le sable ou les fines. La mesure elle-même peut être très simple si le piézomètre n'est pas artésien (P.LeDellieu, 2007).



Photo 6 : Sonde lumineuse (R.Ginnocchio et V.Pierre-Louis, 2012).

### VI.1.2. Cellules de pression interstitielle

Les Cellules de pression interstitielle fournissent des mesures ponctuelles précises. Elles ont des temps de réponse plus rapides par rapport aux les piézomètres.

Il s'agit généralement capteur mesurant la déformation d'une membrane sous l'effet de la pression interstitielle.

Le principe de la mesure de la pression dépend du type d'appareil (cellule à contre-pression ou cellule à corde vibrante) la précision est 0.1 à 1Kpa (soit 1 à 10 cm) (Bonnelli et al, 2005).

On peut distinguer deux types d'instruments de mesure (R.Nadia,2014) :

- Capteurs pneumatiques,
- Capteurs hydrauliques,
- Capteurs électrique à corde vibrante.

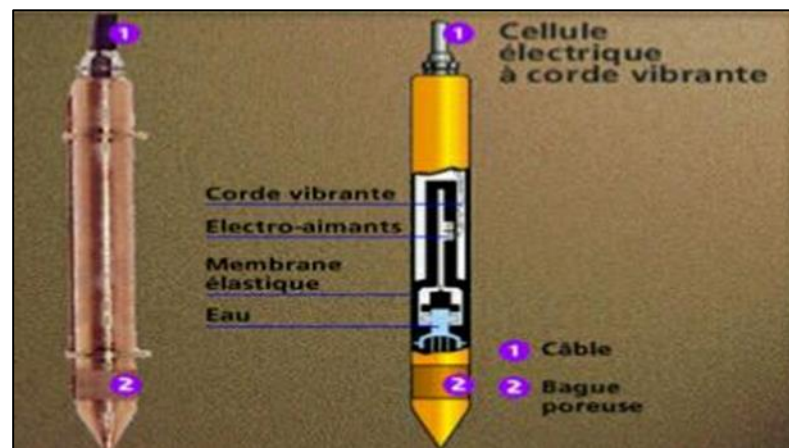


Figure 4 : Cellule de pression interstitielle à corde vibrante (R.nadia,2014).

## VII. Mesures des débits et de fuite de drainage

Contrôle de fuite fait partie des mesures hydrauliques comme les mesures de piézométrie d'intérêt tous les barrages en terre et les enrochements, en particulier.

Les débits ne peuvent être mesurés que lorsqu'ils sont préalablement collectés, le débit d'une source diffuse dans un remblai doit d'abord être recueilli dans un caniveau. La mesure elle-même peut être très rustique : on mesure simplement le volume obtenu dans un réservoir gradué pendant un temps donné (P. Le Delliou, 2007).

Les moyens utilisés sont :

- Dispositifs portables à capacité,
- Dispositifs fixes à déversoirs dont les mesures peuvent être réalisés soit par réglet soit par un capteur télémessurable à distance.

### ***VIII. Auscultation des barrages voûtes***

Le principe de l'auscultation basé sur le suivi de la géométrie par la topographie et (ou) par pendules directes ou inversés.

La forme des consoles avec des surplombs importants est un obstacle majeur à la fixation de pendules.

La crête des voûtes est très sensible aux changements de température tous les jours parce qu'il est relativement mince. Les effets thermiques locaux peuvent donc fausser la perception qu'on peut avoir du comportement général de la structure. Parfois intérêt de fixer les pendules quelques mètres au-dessous du couronnement pour éviter une trop forte perturbation des mesures.

Les piézomètres dans les appuis permettent le développement des sous pressions dans le massif rocheux. Nous pouvons également vérifier l'absence de contournement par en dessous par l'installation des piézomètres à l'aval de la voûte (P.LeDelliou, 2007).

### ***IX. Conclusion***

L'auscultation d'un ouvrage hydraulique est un point important de la vie de ce dernier. Cela permet de déceler toutes sortes d'anomalies pouvant entraîner une instabilité de l'ouvrage. Les moyens mis en œuvre pour assurer un suivi adapté doivent correspondre à la complexité de l'ouvrage. La surveillance des barrages, que ce soit dans son rôle qualitatif ou quantitatif permet de juger le comportement réel des barrages et de le comparer avec les provisions du projet initial pour décider sur les mesures à engager en matière de confortement si le comportement en exploitation du barrage diverge de celui prévu dans les études conceptuelles.

## ***Chapitre IV : Analyse conceptuelle des profils de barrages voûte basée sur la modélisation***

### ***I. Introduction***

Les barrages voûtes reportent la poussée hydrostatique sur la fondation par des arcs travaillant en compression. C'est l'élanement de la vallée, la géométrie de la voute et le contraste de rigidité entre le béton et le rocher qui déterminent le comportement de l'ouvrage.

Le barrage voute permet de réaliser une économie très notable de matériaux par rapport au profil poids, économie dont la nécessité est aujourd'hui plus urgente que jamais.

L'objectif du projet de fin d'études vise une analyse du comportement des barrages voûtes sous différentes sollicitations, en particulier les états de contraintes et déformations en tenant compte des paramètres d'influence ci-dessous:

- Elancement de la vallée ;
- Modules de déformation des rives et fondations ;
- Rayon de courbure transversale de l'arc de voûte ;
- Intégration de la simple ou double courbure dans la conception des barrages voûtes.

### ***II. Les objectifs***

Plusieurs objectifs sont recherchés à travers ces investigations. En premier lieu, et en considérant un cas de barrage réel (Barrage E TAHT dans la wilaya de Mascara), tenter de rechercher le profil le plus optimal (épaisseur de l'arc, rayon de courbure...etc).

Dans une seconde phase, analyser l'influence de la double courbure sur le comportement des barrages voûtes. Ces analyses sont conduites avec des études paramétrées comparatives des contraintes et déformations, paramètres capitaux pour le jugement sur les décisions conceptuelles et les choix techniques.

En se basant sur la modélisation numérique menée à travers le code de calcul CASTEM, et en considérant plusieurs combinaisons conceptuelles en fonction des paramètres d'influence suscités, les analyses comparatives auront comme objectif final d'orienter les conceptions de ce type d'ouvrages vers une rationalisation du profil type.

### ***III. Application sur le cas du barrage Oued Taht***

#### ***III.1. Présentation de l'ouvrage***

Le site du barrage Oued Taht se situe à proximité du village d'Ain Farah, à 65 km de Mascara au sud du chef. D'un coût de 2,732 milliards DA, ce projet a été lancé fin 2011. Sa réalisation a été confiée à deux entreprises nationales (publique et privée) et à une troisième étrangère. Les travaux sont en cours d'achèvement. Le volume de la tranche morte est de  $2 \text{ hm}^3$  et un volume utile de  $5 \text{ hm}^3$ , la capacité totale est de  $7 \text{ hm}^3$ .

L'ouvrage aura pour objet la mobilisation d'une ressource en eau qui sera destinée principalement pour l'alimentation en eau potable des communes limitrophes (Ain Ferrah, Oued El Abtal et Djillali Ben Amar), en plus l'utilisation en eau potable, une partie du volume sera destinée à l'irrigation (ISL,2011).



Figure 1 : Site du barrage Oued Taht.

### III.2. Morphométrie du bassin versant

- Nom du bassin versant principal : bassin versant d'Oued Taht,
- Superficie du bassin versant :  $767 \text{ km}^2$ ,
- Précipitation moyenne annuelle : 353 mm,
- Apport moyen annuel :  $16 \text{ hm}^3$ .

### III.3. Profil type du barrage

Le barrage d'Oued Taht de type voûte à parements verticaux parallèles de géométrie quasi-cylindrique en béton conventionnel vibré (BCV).

- Hauteur hors fondation : 36m,
- Hauteur totale : 44m,
- Largeur de la crête : 7m,
- Longueur de la crête : 155m,
- Fruit de parement amont et aval : 0.0H/1V ; parement vertical.

### III.4. Caractéristiques de la retenue

- Niveau retenue normale : 384 m NGA,
- Niveau des plus hautes eaux : 389,60 m NGA,
- Niveau minimum d'exploitation : 375 m NGA,
- Volume de la tranche morte : 2 hm<sup>3</sup>,
- Volume utile : 5 hm<sup>3</sup>,
- Volume total : 7 hm<sup>3</sup>,



Figure 2 : La retenue du barrage Oued Taht.



*Photo 1 : Vue amont du barrage d'Oued Taht  
bétonnage en cours.*



*Photo 2 : Vue amont du barrage d'Oued Taht  
réalisation de l'évacuateur de crue.*



*Photo 3 : Vue aval du barrage d'Oued Taht  
bétonnage du plot central.*



*Photo 4 : Vue aval du barrage d'Oued Taht.*



*Photo 5 : Vue du barrage d'Oued Taht  
bétonnage du couronnement.*



*Photo 6 : Vue du barrage d'Oued Taht  
finitions de l'évacuateur de crue.*



### **III.5. Géologie régionale et géologie du site**

La région du site du barrage de Oued ET TAHT est située à la limite du domaine tellien et du domaine pré atlasique : au Nord le domaine tellien constitué par un empilement de nappes pelliculaires, résultant d'une poussée vers le Sud des terrains autochtones, et dont les sédiments plastiques ont été intensément plissés et fracturés. Au Sud le domaine pré atlasique constitué de sédiments relativement plus rigides et faiblement plissés sismicité.

La région de Mascara est considérée comme une région présentant une activité sismique assez importante. Le relevé des données de la sismicité historique et instrumentale actuel, ainsi que les données relatives à la tectonique ont été pris en considération pour le choix de l'accélération, la valeur de 0,13 g a été retenue pour le séisme de projet et (0,36 g) pour le séisme exceptionnel.

L'axe du barrage de Oued TAHT est implanté dans les gorges entaillées par l'Oued dans les formations conglomératiques et gréseuses du Cartésien.

### ***III.6. Combinaisons de conceptions analysées***

En considérant les dimensions géométriques du barrage Oued Taht, et en intégrant les paramètres d'influence sur la conception des barrages voûtes (module de déformation du rocher, rayon de courbure, configuration des courbures), certaines variantes de conception ont été analysées par l'intermédiaire de la modélisation numérique à savoir :

1. Influence du module de déformation du rocher
  - Barrage voûte à simple courbure avec  $E=4$  Gpa et  $R= 55$ m ;
  - Barrage voûte à simple courbure avec  $E=8$  Gpa et  $R= 55$ m ;
  - Barrage voûte à simple courbure avec  $E=4$  Gpa et  $R= 27,5$ m ;
  - Barrage voûte à simple courbure avec  $E=8$  Gpa et  $R= 27,5$ m.
2. Influence du rayon de courbure de la voute
  - Barrage voûte à simple courbure avec  $R=55$  m et  $E=4$  Gpa ;
  - Barrage voûte à simple courbure avec  $R=27,5$  m et  $E=4$  Gpa ;
  - Barrage voûte à simple courbure avec  $R=55$  m et  $E=8$  Gpa ;
  - Barrage voûte à simple courbure avec  $R=27,5$  m et  $E=8$  Gpa.
3. Influence de la double courbure de la voûte
  - Barrage voûte à double courbure avec  $R=55$  m et  $E=4$  Gpa ;
  - Barrage voûte à double courbure avec  $R=55$  m et  $E=8$  Gpa ;
  - Barrage voûte à double courbure avec  $R=45$  m et  $E=4$  Gpa ;
  - Barrage voûte à double courbure avec  $R=45$  m et  $E=8$  Gpa.

Tous les cas de modélisation ont été analysés en mode Dynamique en tenant compte du signal sismique de Boumerdes.

## ***IV. Présentation du code de calcul et variantes de la modélisation***

### ***IV.1. Description du logiciel***

CASTEM est un logiciel de calcul de structures par la méthode des éléments finis et plus généralement de résolution d'équations aux dérivées partielles par la méthode des éléments finis.

Il a été développé au Département de Mécanique et Technologie (DMT) du Commissariat à l'Energie Atomique (CEA). La principale particularité de CASTEM, est d'être extrêmement adaptable aux multiples applications propres à chaque utilisateur (E.Le Fichoux,2011).

#### ***IV.2. Principaux objectifs du logiciel***

Les objets disponibles dans CASTEM 2000 sont classés selon le type d'informations qu'ils renferment et selon la signification que prennent ces informations dans l'analyse. On note également que le type de chaque objet peut être obtenu en listant son contenu à l'aide de l'opérateur LIST (S.Multon et L.Buffo,2007).

Nous allons cependant revenir sur quelques objets souvent utilisés dans CASTEM (S.Multon et L.Buffo,2007) :

- Objet de type Champ par point,
- Objet de type Champ par élément,
- Objet de type Liste,
- Objet de type Evolution.

#### ***IV.3. Procédure de résolution d'un problème avec CASTEM***

Tout problème (mécanique, thermique, chimique, ...) résolu avec CASTEM doit être construit de la manière suivante (S.Multon et L.Buffo,2007) :

##### *IV.3.1. Paramètres généraux*

Il s'agit de définir les options générales du calcul. On précise notamment ici la dimension du problème (1D, 2D, 3D), le type d'éléments utilisés, les hypothèses de calcul (par exemple "contraintes planes").

##### *IV.3.2. Géométrie*

La géométrie des différents éléments que l'on souhaite calculer se définit toujours selon la démarche suivante :

- Construction des points ;
- Construction des lignes à partir des points ;
- Construction des surfaces à partir des lignes ;
- Construction des volumes à partir des surfaces.

##### *IV.3.3. Modèle de comportement*

Le code CASTEM permet de gérer des problèmes très variés (mécanique, fluide, thermique, ...).

Il faut donc préciser avant tout calcul le modèle de comportement associé aux différentes géométries définies.

Les différentes formulations intégrées dans CASTEL sont :

- Mécanique ;
- Liquide ;
- Thermique ;
- Convection ;
- Poreux ;
- Darcy ;
- Frottement ;
- Rayonnement ;
- Liquide mécanique.

A chacune de ces formulations est associée une (ou plusieurs) loi de comportement. Par exemple pour la formulation MECANIQUE on trouve des lois de comportement élastique, plastique, ...

#### *IV.3.4. Caractéristiques des matériaux*

Le modèle de comportement choisi nous indique alors les différentes caractéristiques physiques ou mécaniques à préciser. Par exemple pour un modèle MECANIQUE ELASTIQUE on devra fournir le module d'Young et le coefficient de Poisson du matériau.

#### *IV.3.5. Conditions aux limites et chargement*

La définition des conditions aux limites et des chargements imposés à l'élément étudié est essentielle à la résolution de tout problème élément fini.

Par exemple, pour un problème mécanique, les conditions aux limites pourront être des déplacements bloqués et les chargements des forces imposées (poids propre, force ponctuelle).

Pour un problème thermique, les conditions aux limites pourraient des températures imposées et les chargements des sources de chaleur.

#### *IV.3.6. Résolution*

La résolution est dans la majorité des cas gérée par des opérateurs de CASTEM. Elle peut être linéaire (élasticité, thermique stationnaire,...) ou non linéaire (plasticité, viscoélasticité, thermique transitoire, ...). Dans ce dernier cas, la résolution est approchée à l'aide de méthodes numériques (résolution explicite, implicite, semi-implicite, ...).

#### IV.3.7. Post-traitement

La résolution des problèmes thermiques donne accès à la température aux nœuds de la géométrie.

La résolution des problèmes mécaniques donne quant à elle la valeur du déplacement aux nœuds de la géométrie. Il convient alors d'exploiter ce déplacement pour déduire les autres résultats attendus (déformations, contraintes, ...).

#### IV.4. Unités

CASTEM ne dispose d'aucun système particulier d'unités de mesure. C'est à l'utilisateur de fournir les données dans un système cohérent. Une fois que les unités de mesure utilisées dans les données sont définies, tous les résultats seront exprimés dans ces mêmes unités. Il existe cependant une exception à cette règle concernant la mesure des angles qui doivent toujours être exprimés en degrés. Le tableau N°1 présente trois exemples de systèmes cohérents utilisés par CASTEM:

Tableau 1 : Unités utilisées par le logiciel CASTEM

Longueur	Force	Contrainte
m	N	Pa
m	MN	MPa
mm	N	MPa

### V. Etude des cas de la modélisation du barrage

#### V.1. Paramètres de modélisation

##### V.1.1. Prédimensionnement du profil du barrage

Le prédimensionnement tient compte de plusieurs paramètres :

- Type de vallée ;
- Hauteur du barrage ;
- Longueur en crête.

L'épaisseur de la voûte en base  $e_b$  est approchée par :

$$e_b = 155/20 = 8 \text{ m}$$

L'épaisseur de la voûte en crête  $e_c$  peut être déterminée par :

$$e_c = 44/15 = 3 \text{ m}$$

Le rayon de courbure  $R$  de la voûte doit s'inscrire dans les conditions :

$$0,1 \leq e/R \leq 0,2$$

Cette condition donne pour le cas du barrage Oued Taht des rayons de courbures  $R_{\min}=27,5$  m et  $R_{\max}=55$  m.

#### V.1.2. Maillage et discrétisation du barrage

Un maillage est fait d'éléments attachés par des nœuds. Nous avons discrétiser notre profil avec différentes densités pour avoir des résultats plus précis et un maillage plus affiné.

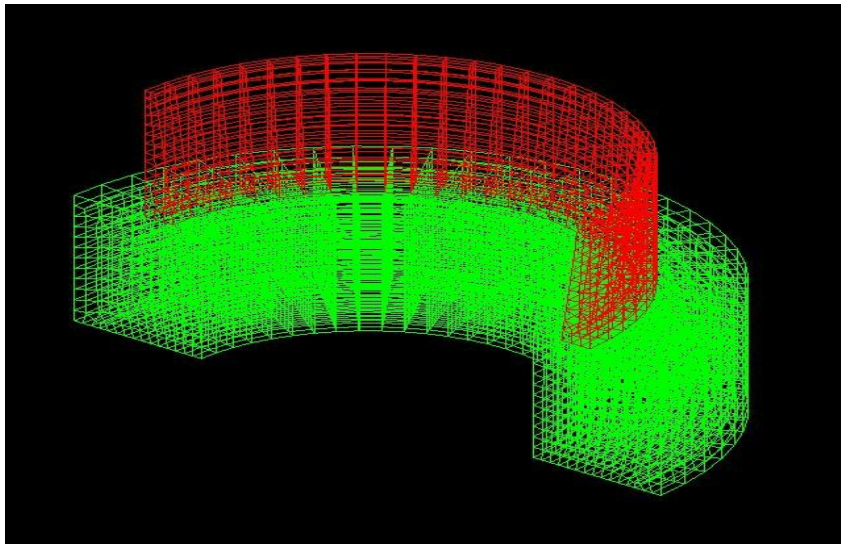


Figure 3 : Discrétisation du barrage.

#### V.1.3. Caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques mécaniques des matériaux utilisées pour la modélisation se résument ainsi :

- Masse volumique du béton  $R_{HOB} = 2\,350$  kg/m<sup>3</sup> ;
- Masse volumique du rocher  $R_{HOR} = 2\,650$  kg/m<sup>3</sup> ;
- Module d'Young du béton  $E_B = 0,035$  Gpa ;
- Module d'Young du rocher  $E_R = 4 - 8$  Gpa ;
- Coefficient de poisson du béton  $N_{UB} = 0.2$  ;
- Coefficient de poisson du rocher  $N_{UR} = 0.3$ .

#### V.2. Objectifs de la modélisation

Les résultats de la modélisation seront orientés par l'analyse des contraintes et des déformations dans le corps des différentes variantes de conception des barrages voûtes et ce par l'intermédiaire d'une analyse paramétrée liée aux critères d'influence conceptuels.

## VI. Résultats graphiques et analytiques

### VI.1. Barrage voûte à simple courbure

Afin de pouvoir lancer une analyse comparative des différentes variantes, certains repères ont été définis en position. Ces positions de comparaison sont présentées sur la figure 4.

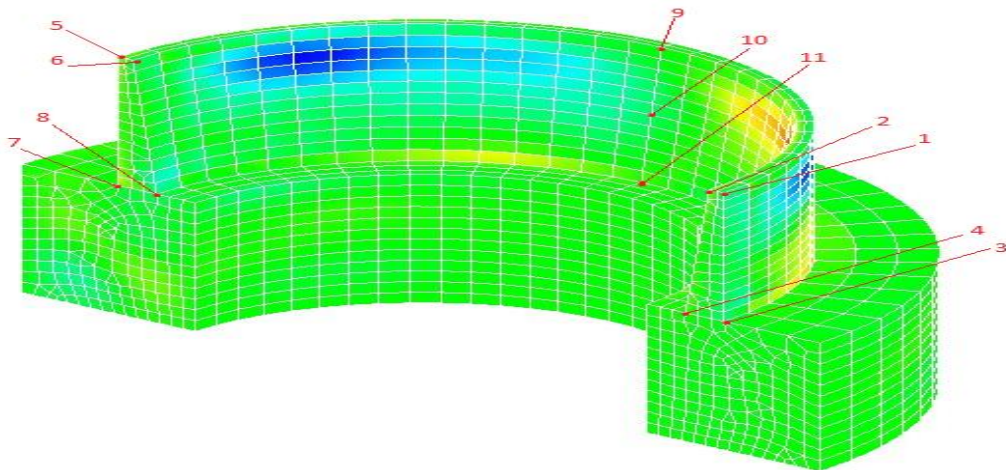


Figure 4 : Positions de comparaison des variations de contraintes.

#### VI.1.1. Influence du module de déformation du rocher

- i. Analyse des contraintes
  - a. Barrage voûte à simple courbure avec  $R= 55m$

Le tableau 2 donne la variation des contraintes directionnelles au niveau des repères de position pour un rayon de courbure de la voûte  $R= 55 m$ .

Tableau 2 : Variations des contraintes dans un barrage voûte à simple courbure avec  $R=55m$ .

Points \ Contraintes (Pa)	E=4 Gpa			E=8 Gpa		
	XX	YY	ZZ	XX	YY	ZZ
1	-92,8	-455	-49	9,28	-298	-105
2	126	151	29,9	-145	-379	-31,7
3	-187	-744	-175	-6,33	-25,3	-59,8
4	77,7	396	64,2	109	443	110
5	243	964	242	-222	-897	-201
6	-63,1	152	2,32	29,2	1,047 E+3	-93,3
7	262	923	48,7	16,6	-180	-47,4
8	-206	-685	-145	-174	-682	-177
9	130	-4,56	-18,9	307	-74,2	-89,2
10	198	39,9	9,02	201	-12	49,1
11	96,6	48,3	55,4	-34	-6,87	145

b. Barrage voûte à simple courbure avec  $R=27.5m$ 

Le tableau 3 donné la variation des contraintes directionnelles au niveau des repères de position pour un rayon de courbure de la voûte  $R= 27,5 m$ .

Tableau 3 : Variations des contraintes dans un barrage voûte à simple courbure avec  $R=27.5m$ .

Points \ Contraintes (Pa)	E=4 Gpa			E=8 Gpa		
	XX	YY	ZZ	XX	YY	ZZ
1	46,9	205	-32,6	-188	-1,194 E +3	23,8
2	484	760	487	451	1,921 E+3	446
3	52,5	186	48,2	-6,72	-19,7	-5,90
4	-131	-507	-129	18,5	360	4,73
5	-477	-1,778 E+3	-538	95,2	675	163
6	-1,002 E+3	-2,049 E+3	-1,058 E+3	-517	-1,982 E +3	-567
7	-30,3	-101	-13,8	0,350	122	43,6
8	-101	807	302	-112	-423	-114
9	-902	93,2	-152	-139	-140	-141
10	-8,58	19,1	16,1	-5,70	-19,3	-41,5
11	64,2	45,2	121	8,10	-20,9	7,12

ii. Résultats des déplacements

Les tableaux N°4 et 5 donnent en fonction des valeurs des modules de déformations du rocher de fondation la variation des déplacements associés.

a. Barrage voûte à simple courbure avec  $R=55m$

Tableau 4 : Résultats des déplacements dans un barrage voûte à simple courbure pour  $R=55m$ .

Déplacement (m)	Maximum	Minimum
E=4 Gpa	0,3064 E-4	-0,2990 E-4
E=8 Gpa	0,9245 E-5	-0.6973 E-5

b. Barrage voûte à simple courbure avec  $R=27,5m$

Tableau 5 : Résultats des déplacements dans un barrage voûte à simple courbure pour  $R=27,5m$ .

Déplacement (m)	Maximum	Minimum
E=4 Gpa	0,7628 E-5	-0,9069 E-5
E=8 Gpa	0,4785 E-5	-0,5723 E-5

V.2.2. Influence du rayon de courbure de la voûte

i. Analyse des contraintes

a. Barrage voûte à simple courbure avec  $E=4$  Gpa

Le tableau 6 donne la variation des contraintes directionnelles au niveau des repères de position pour un module de déformation du rocher  $E=4$  Gpa.

Tableau 6 : Variations des contraintes dans un barrage voûte à simple courbure avec  $E=4$  Gpa.

Points \ Contraintes (Pa)	R=55 m			R=27,5 m		
	XX	YY	ZZ	XX	YY	ZZ
1	-92,8	-455	-49	46,9	205	-32,6
2	126	151	29,9	484	760	487
3	-187	-744	-175	52,5	186	48,2
4	77,7	396	64,2	-131	-507	-129
5	243	964	242	-477	-1,778 E+3	-538
6	-63,1	152	2,32	1,002 E+3	-2,049 E+3	-1,058 E+3
7	262	923	48,7	-30,3	-101	-13,8
8	-206	-685	-145	-101	807	302
9	130	-4,56	-18,9	-902	93,2	-152

10	198	39,9	9,02	-8,58	19,1	16,1
11	96,6	48,3	55,4	64,2	45,2	121

b. Barrage voûte à simple courbure avec  $E=8$  Gpa

Le tableau 7 donne la variation des contraintes directionnelles au niveau des repères de position pour un module de déformation du rocher  $E=8$  Gpa.

Tableau 7 : Variations des contraintes dans un barrage voûte à simple courbure avec  $E=8$  Gpa.

Contraintes (Pa) Points	R=55 m			R=27,5 m		
	XX	YY	ZZ	XX	YY	ZZ
1	9,28	-298	-105	-188	-1,194 E +3	23,8
2	-145	-379	-31,7	451	1,921 E+3	446
3	-6,33	-25,3	-59,8	-6,72	-19,7	-5,90
4	109	443	110	18,5	360	4,73
5	-222	-897	-201	95,2	675	163
6	29,2	1,047 E+3	-93,3	-517	-1,982 E +3	-567
7	16,6	-180	-47,4	0,350	122	43,6
8	-174	-682	-177	-112	-423	-114
9	307	-74,2	-89,2	-139	-140	-141
10	201	-12	49,1	-5,70	-19,3	-41,5
11	-34	-6,87	145	8,10	-20,9	7,12

ii. Résultats des déplacements

Les tableaux N°8 et 9 donnent en fonction des valeurs des rayons de courbures de la voûte la variation des déplacements associés.

a. Barrage voûte à simple courbure avec  $E=4$  Gpa

Tableau 8 : Résultats des déplacements dans un barrage voûte à simple courbure pour  $E=4$  Gpa

Déplacement (m)	Maximum	Minimum
R=55 m	0,3064 E-4	-0,2990 E-4
R=27,5 m	0,7628 E-5	-0,9069 E-5

b. Barrage voûte à simple courbure avec  $E=8$  Gpa

Tableau 9 : Résultats des déplacements dans un barrage voûte à simple courbure pour  $E=8$  Gpa

Déplacement (m)	Maximum	Minimum
R=55 m	0,9245 E-5	-0,6973 E-5

R=27,5 m	0,4758 E-5	-0,5723 E-5
----------	------------	-------------

Les résultats graphiques sous forme de champs de contraintes sont présentés sur les figures de 5 à 16.

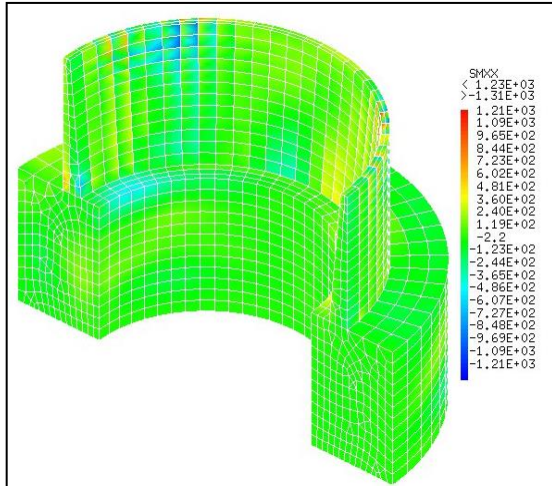


Figure 5 : Composante de la contrainte suivant X dans un barrage voûte à simple courbure pour R=55 m et E=4 Gpa.

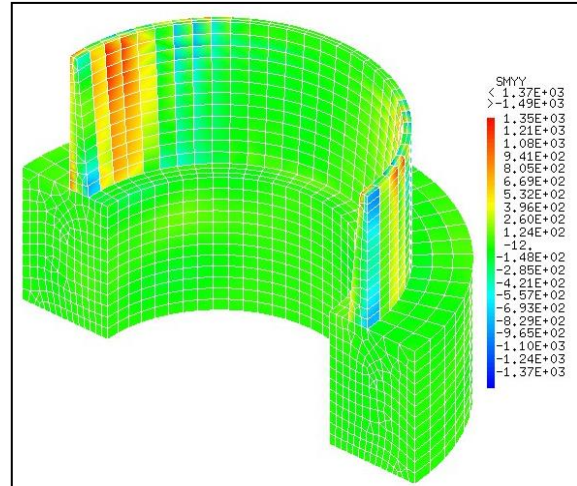


Figure 6 : Composante de la contrainte suivant Y dans un barrage voûte à simple courbure pour R=55 m et E=4 Gpa.

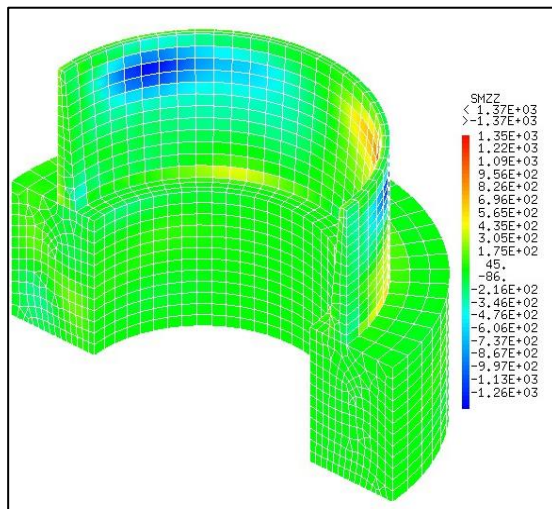


Figure 7 : Composante de la contrainte suivant Z dans un barrage voûte à simple courbure pour R=55 m et E=4 Gpa.

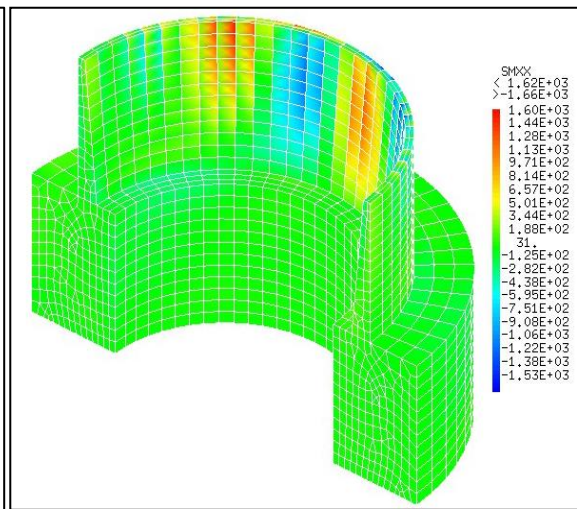


Figure 8 : Composante de la contrainte suivant X dans un barrage voûte à simple courbure pour R=55 m et E=8 Gpa.

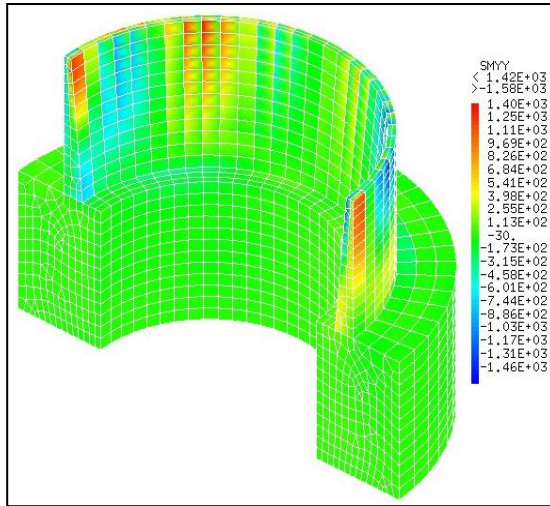


Figure 9 : Composante de la contrainte suivant Y dans un barrage voûte à simple courbure pour  $R=55$  m et  $E=8$  Gpa.

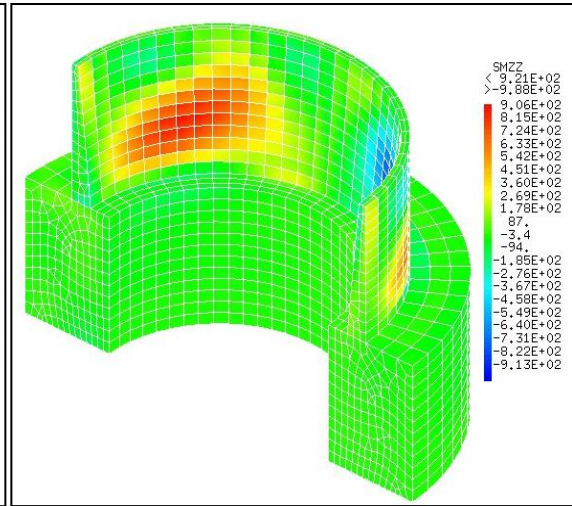


Figure 10 : Composante de la contrainte suivant Z dans un barrage voûte à simple courbure pour  $R=55$  m et  $E=8$  Gpa.

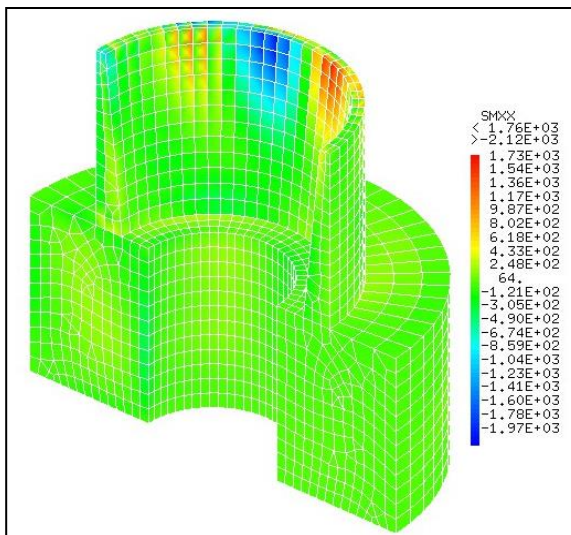


Figure 11 : Composante de la contrainte suivant X dans un barrage voûte à simple courbure pour  $R=27,5$  m et  $E=4$  Gpa.

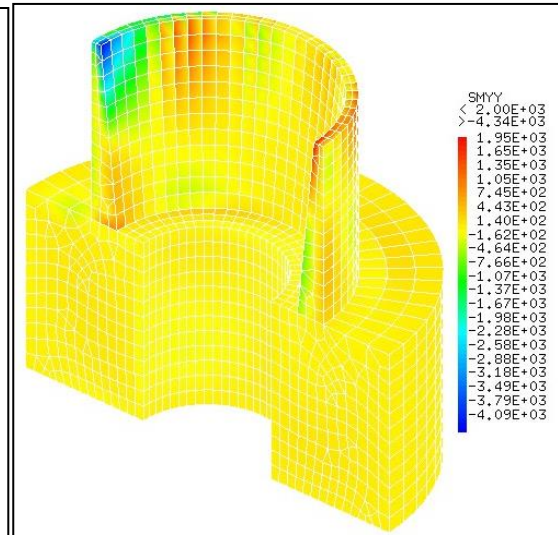


Figure 12 : Composante de la contrainte suivant Y dans un barrage voûte à simple courbure pour  $R=27,5$  m et  $E=4$  Gpa.

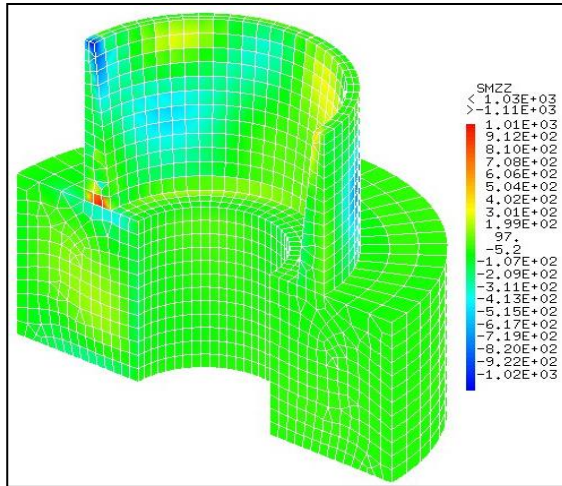


Figure 13 : Composante de la contrainte suivant Z dans un barrage voûte à simple courbure pour  $R=27,5\text{ m}$  et  $E=4\text{ Gpa}$ .

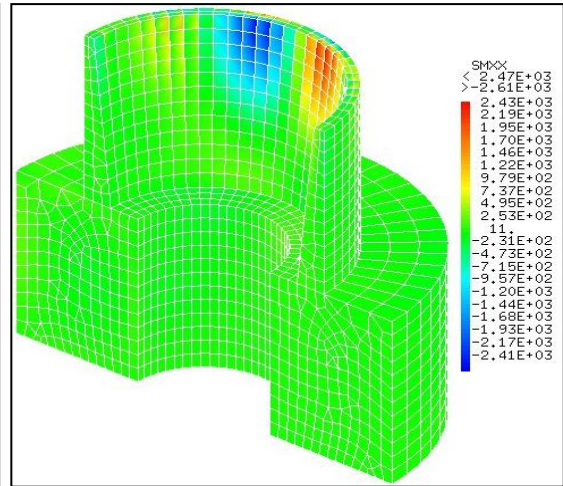


Figure 14 : Composante de la contrainte suivant X dans un barrage voûte à simple courbure pour  $R=27,5\text{ m}$  et  $E=8\text{ Gpa}$ .

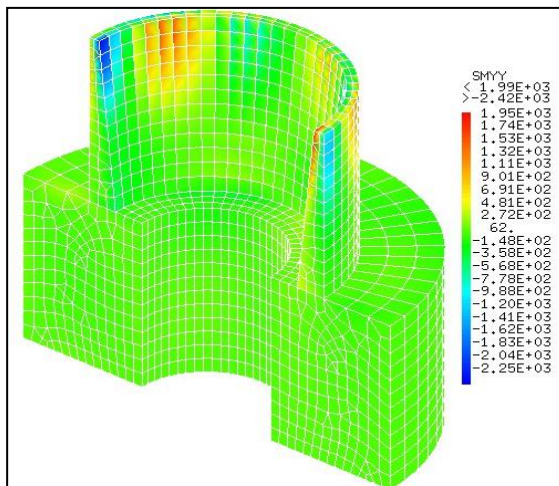


Figure 15 : Composante de la contrainte suivant Y dans un barrage voûte à simple courbure pour  $R=27,5\text{ m}$  et  $E=8\text{ Gpa}$ .

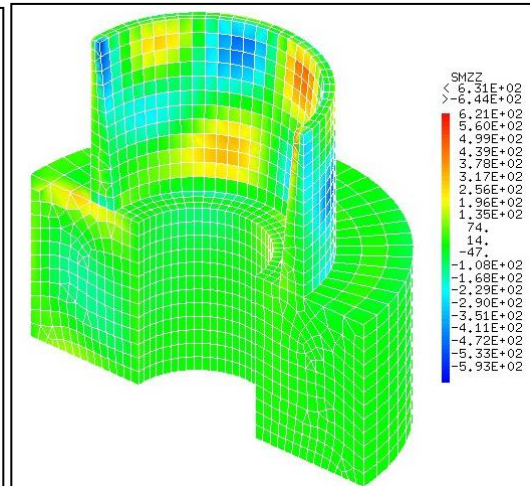


Figure 16 : Composante de la contrainte suivant Z dans un barrage voûte à simple courbure pour  $R=27,5\text{ m}$  et  $E=8\text{ Gpa}$ .

Les figures de 16 à 36 donnent les variations des contraintes en fonction de la variation des modules de déformations et des rayons de courbure de la voûte.

1<sup>er</sup> cas : R= 55 m

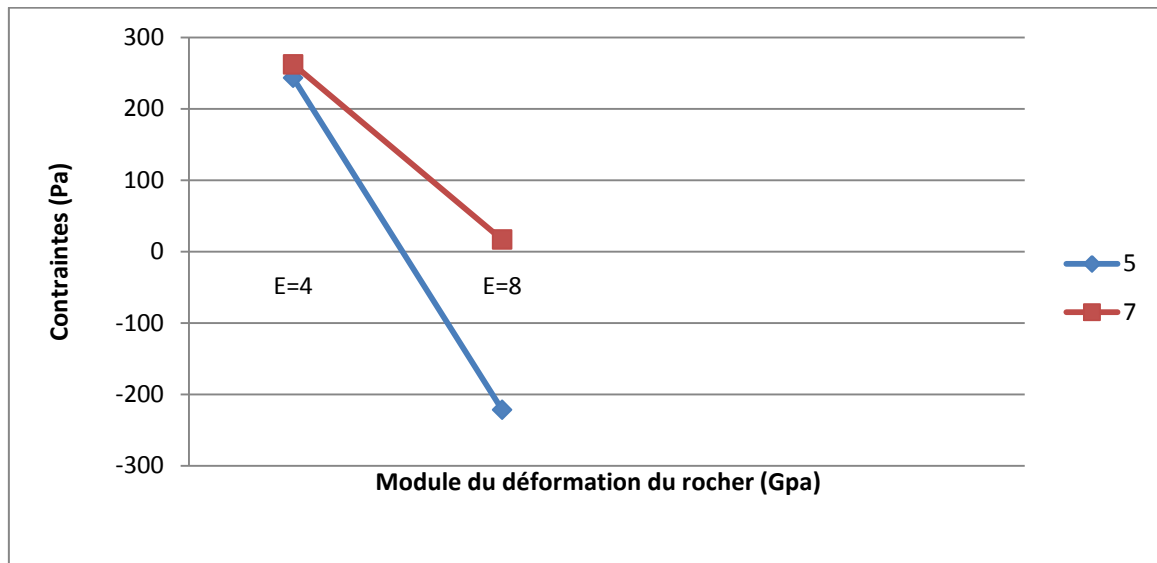


Figure 17 : Variation des contraintes suivant X dans face amont-rive droite du barrage voûte à simple courbure pour R=55m.

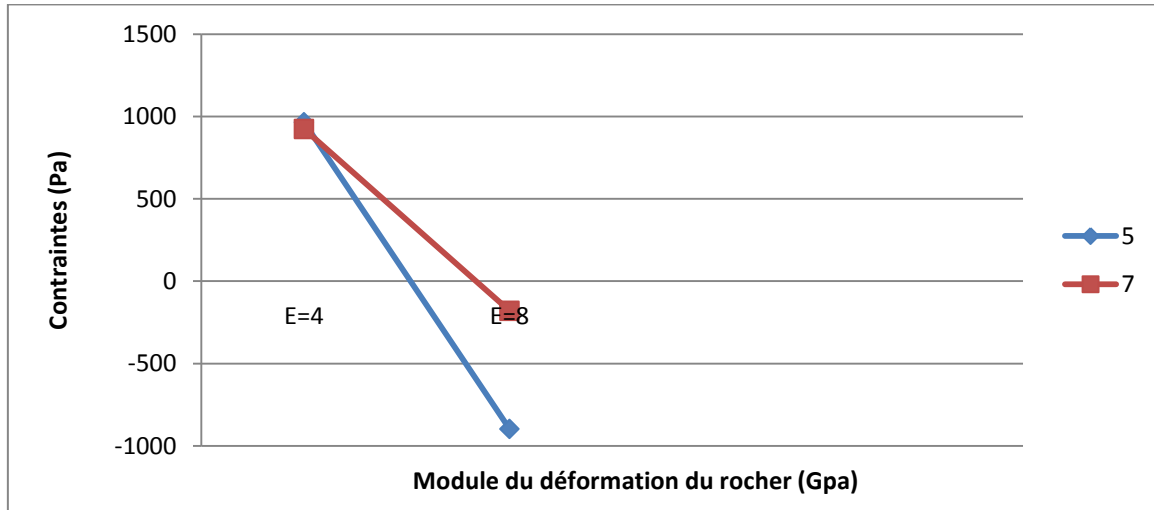


Figure 18 : Variation des contraintes suivant Y dans face amont-rive droite du barrage voûte à simple courbure pour R=55m.

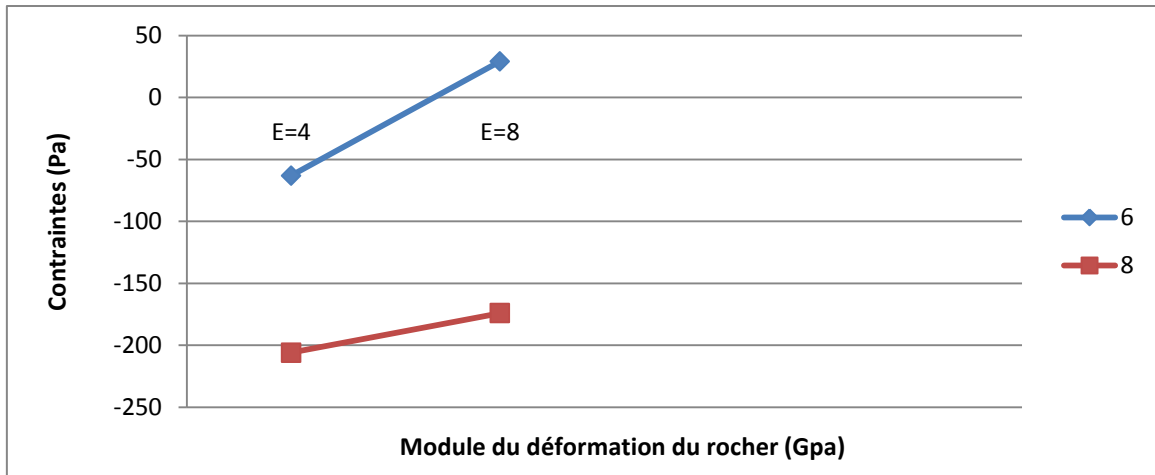


Figure 19 : Variation des contraintes suivant X dans face aval-rive droite du barrage voûte à simple courbure pour R=55m.

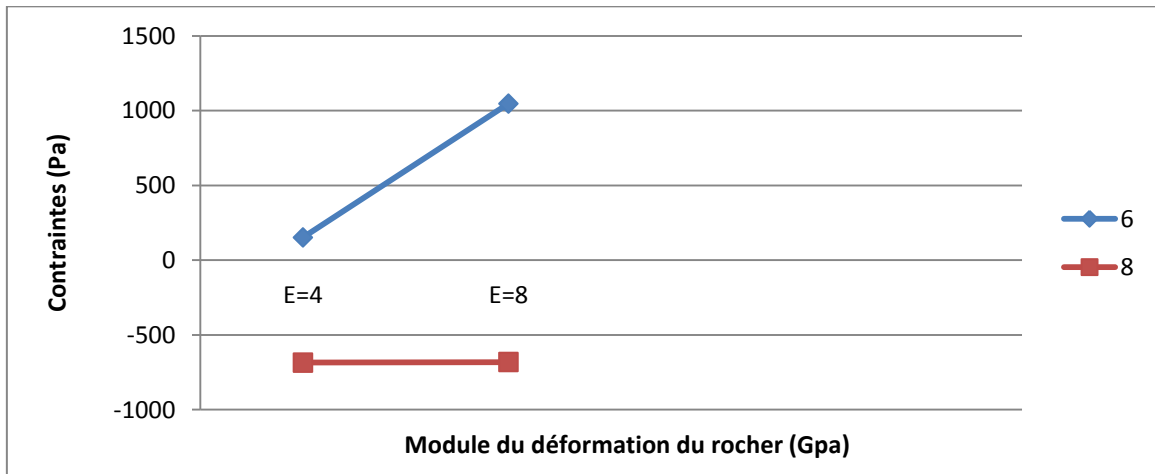


Figure 20 : Variation des contraintes suivant Y dans face aval-rive droite du barrage voûte à simple courbure pour R=55m.

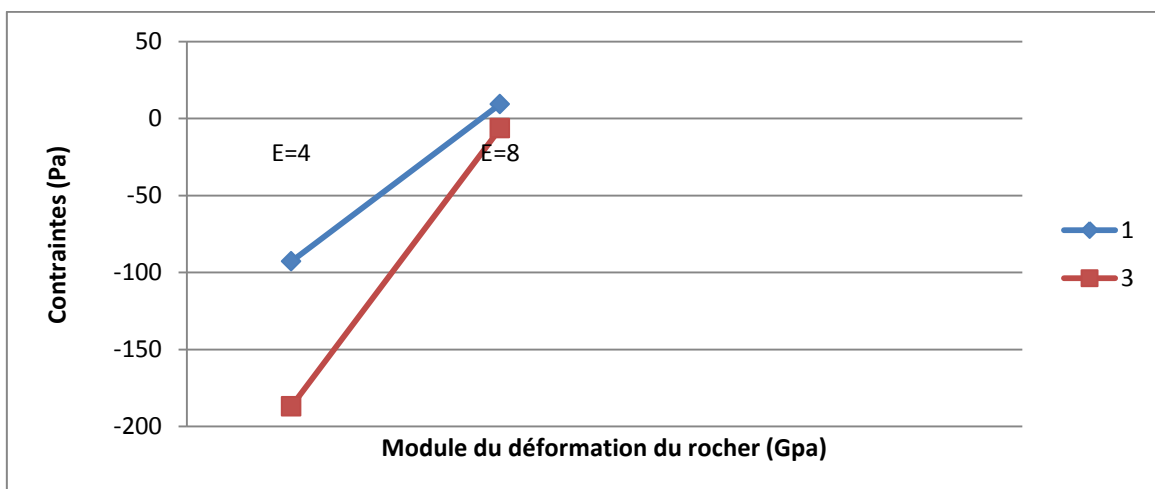


Figure 21 : Variation des contraintes suivant X dans face amont-rive gauche du barrage voûte à simple courbure pour R=55m.

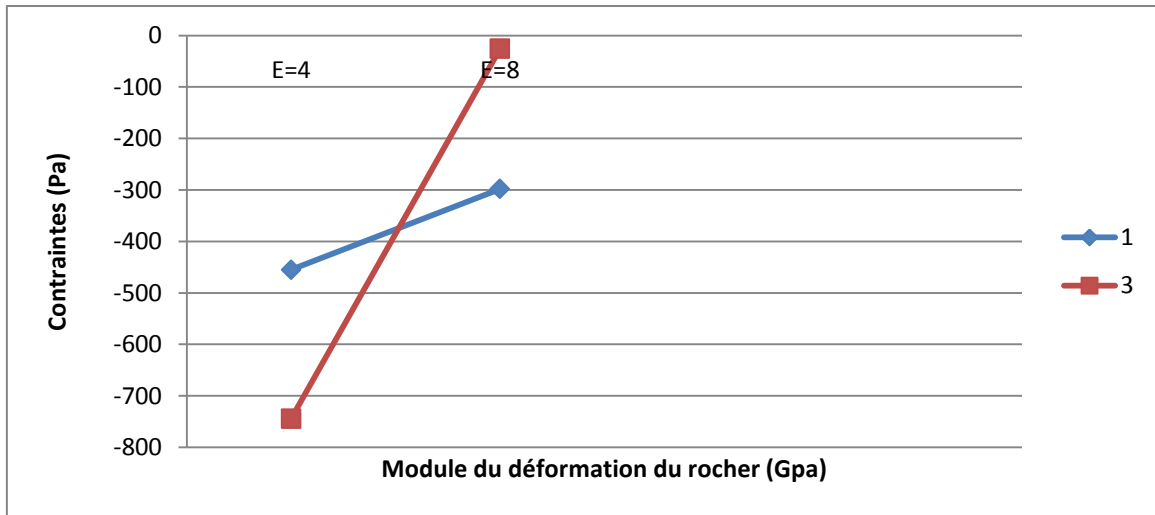


Figure 22 : Variation des contraintes suivant Y dans face amont-rive gauche du barrage voûte à simple courbure pour R=55m.

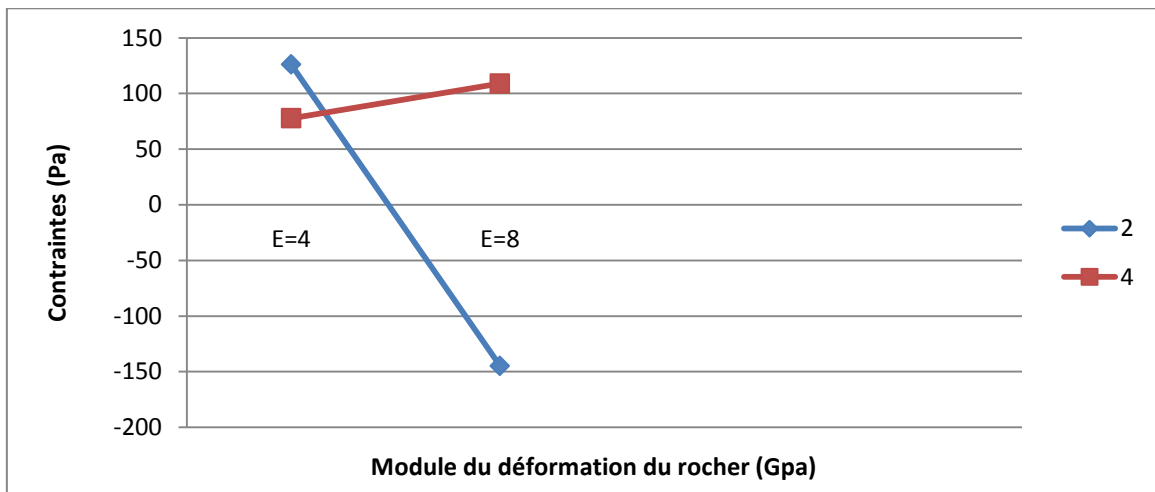


Figure 23 : Variation des contraintes suivant X dans face aval-rive gauche du barrage voûte à simple courbure pour R=55m.

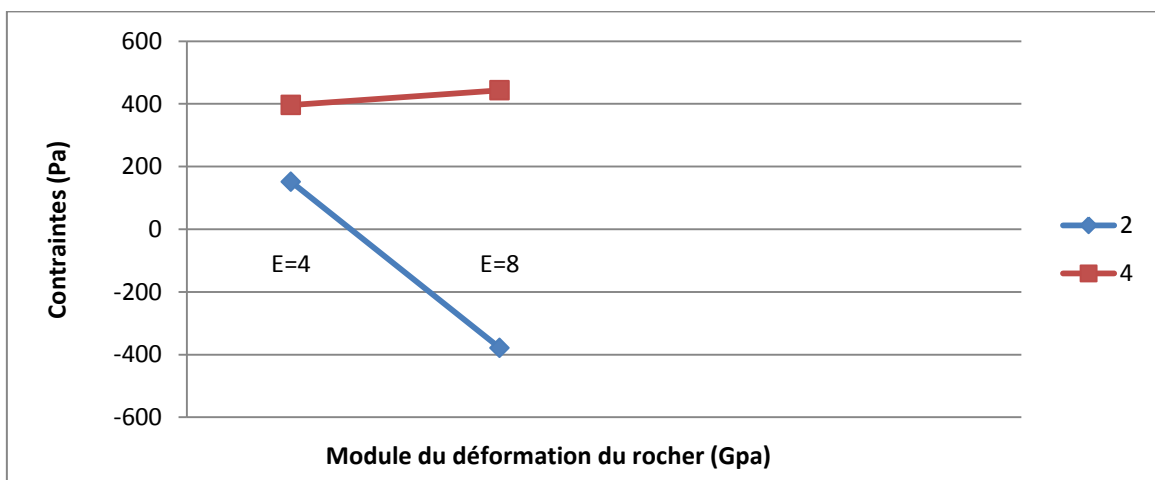


Figure 24 : Variation des contraintes suivant Y dans face aval-rive gauche du barrage voûte à simple courbure pour R=55m.

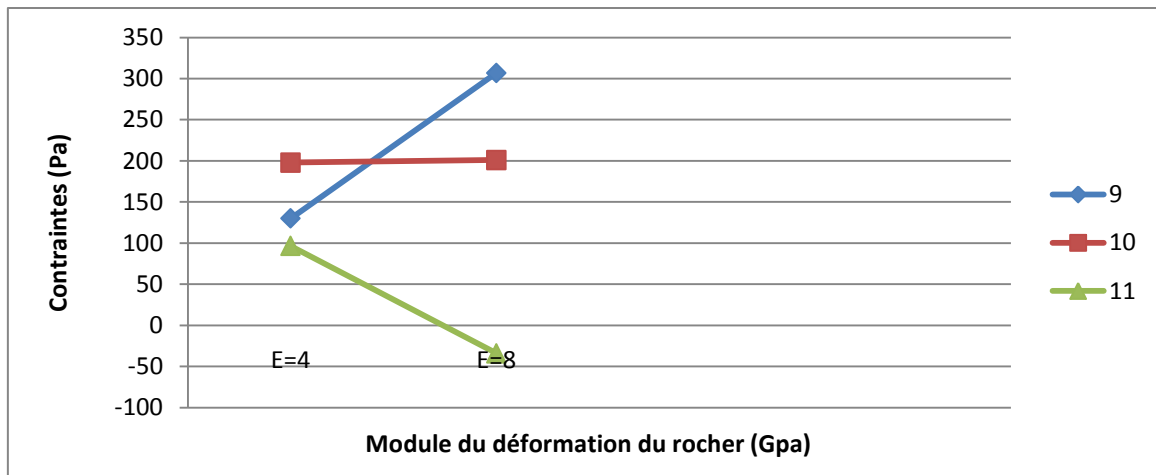


Figure 25 : Variation des contraintes suivant X dans fibre centrale du barrage voûte à simple courbure pour R=55m.

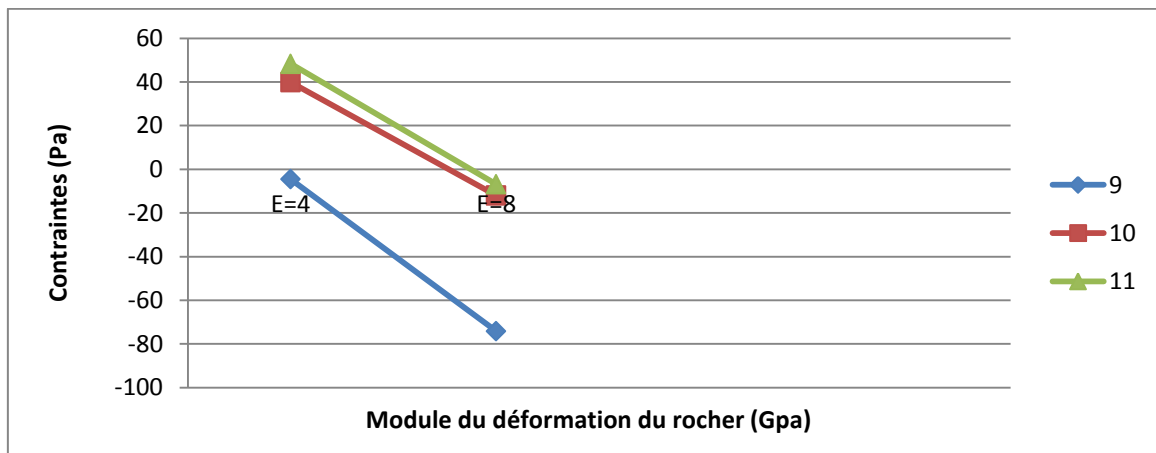


Figure 26 : Variation des contraintes suivant Y dans fibre centrale du barrage voûte à simple courbure pour R=55m.

2<sup>e</sup> cas : R= 27,5 m

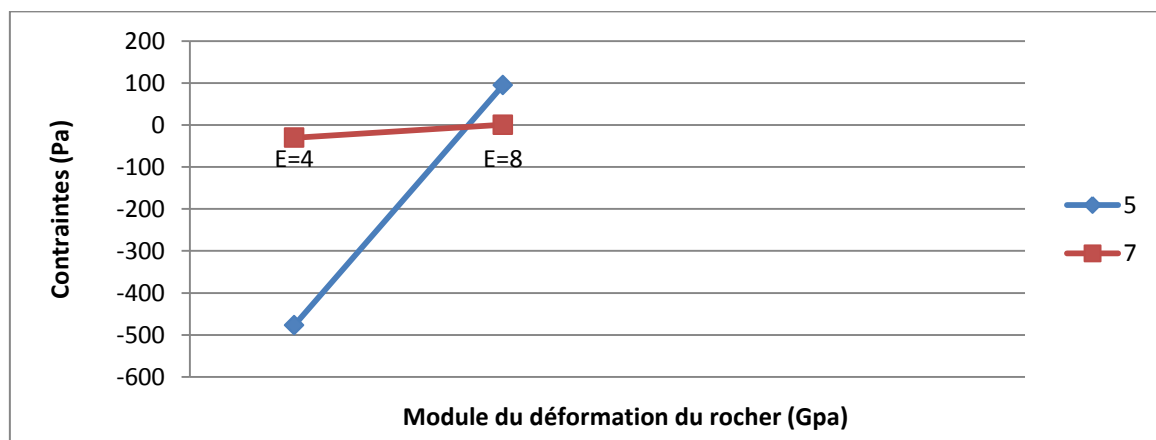


Figure 27 : Variation des contraintes suivant X dans face amont-rive droite du barrage voûte à simple courbure pour R=27,5m.

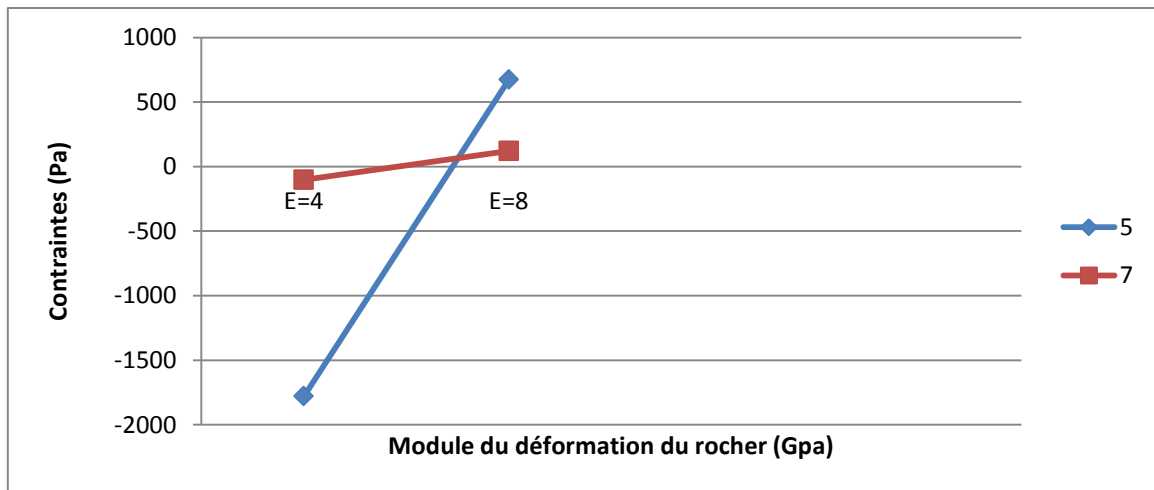


Figure 28 : Variation des contraintes suivant Y dans face amont-rive droite du barrage voûte à simple courbure pour R=27,5m.

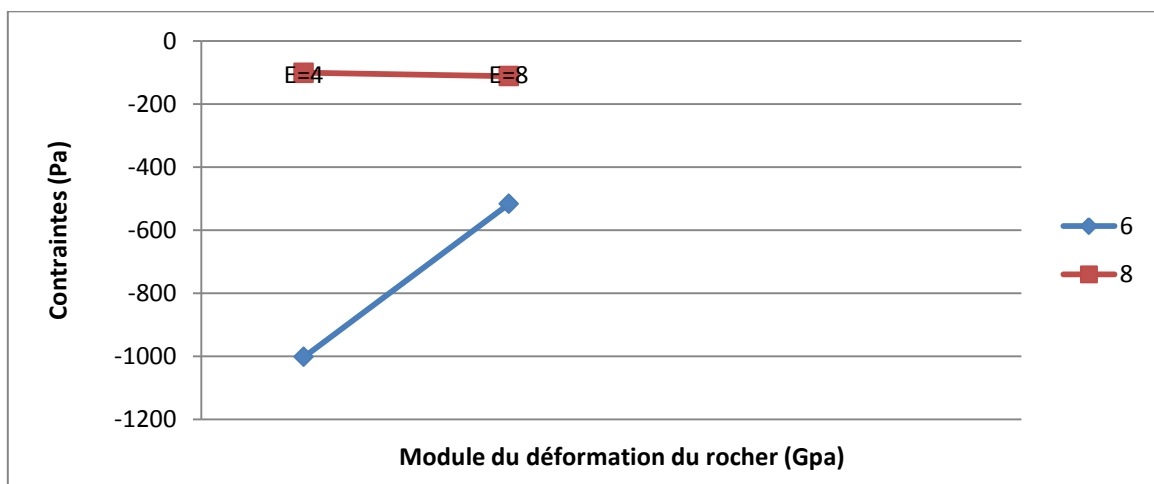


Figure 29 : Variation des contraintes suivant X dans face aval-rive droite du barrage voûte à simple courbure pour R=27,5m.

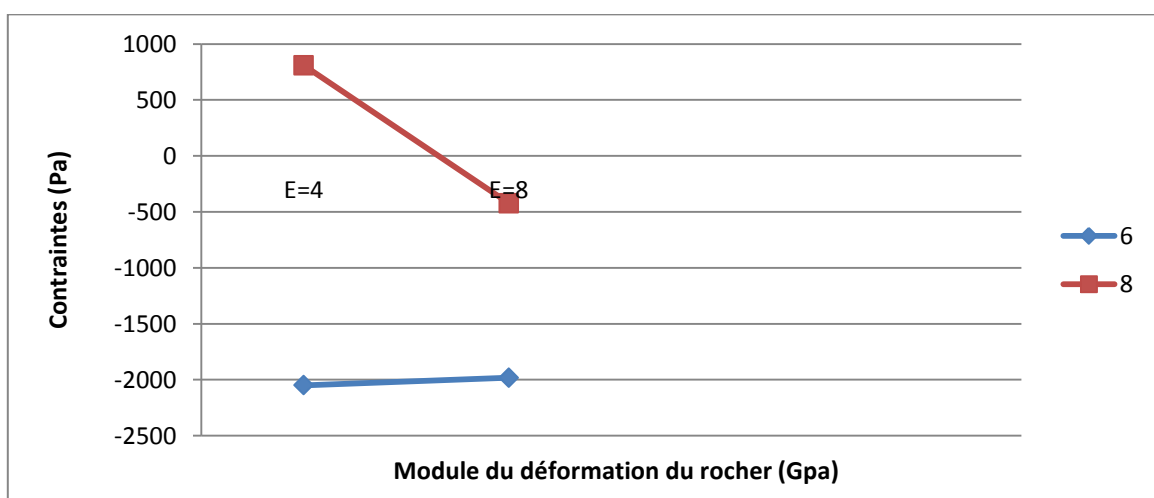


Figure 30 : Variation des contraintes suivant Y dans face aval-rive droite du barrage voûte à simple courbure pour R=27,5m.

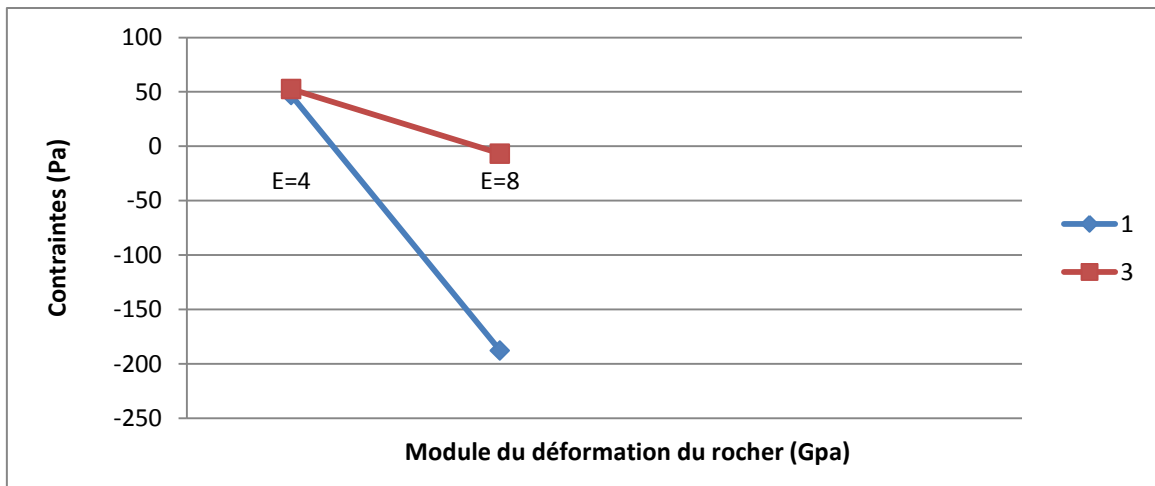


Figure 31 : Variation des contraintes suivant X dans face amont-rive gauche du barrage voûte à simple courbure pour R=27,5m.

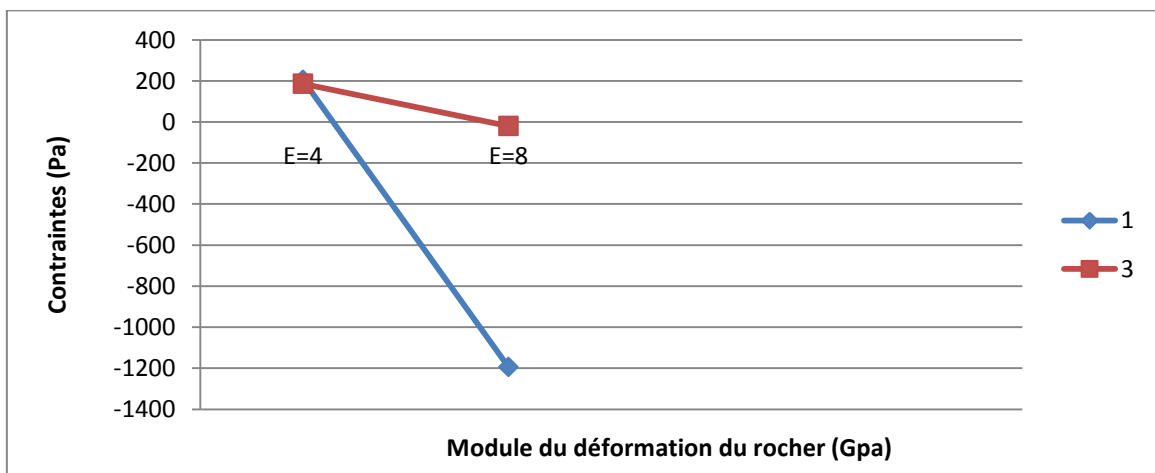


Figure 32 : Variation des contraintes suivant Y dans face amont-rive gauche du barrage voûte à simple courbure pour R=27,5m.

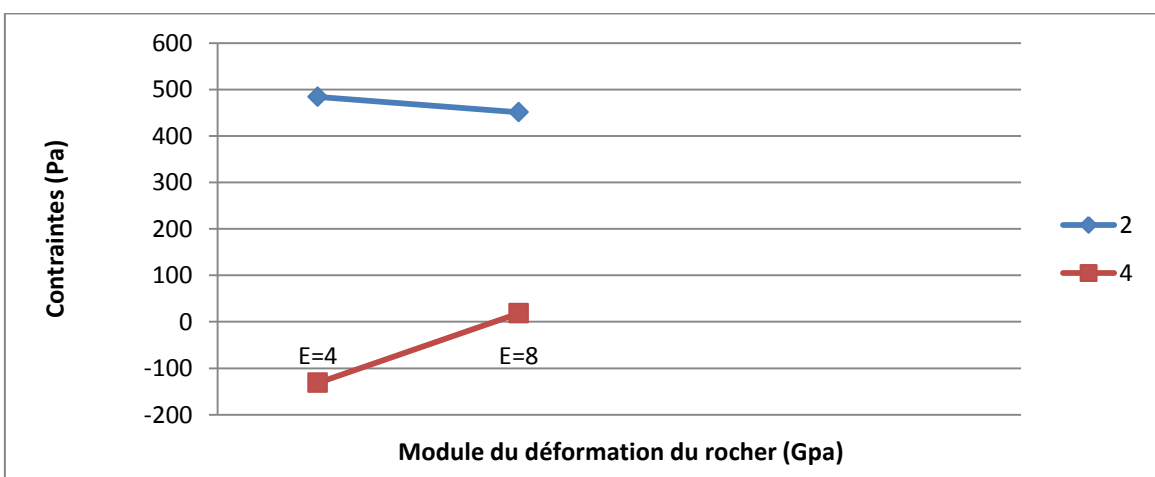


Figure 33 : Variation des contraintes suivant X dans face aval-rive gauche du barrage voûte à simple courbure pour R=27,5m.

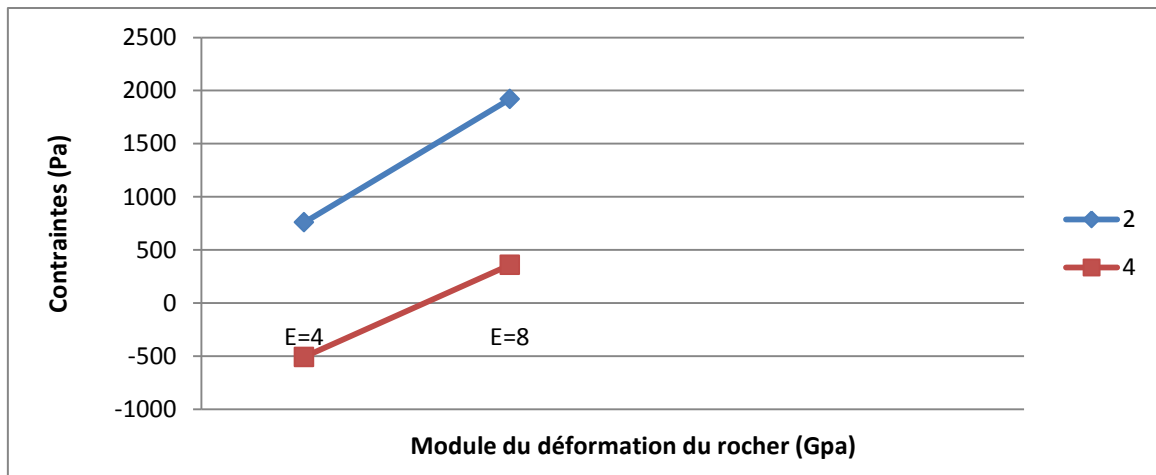


Figure 34 : Variation des contraintes suivant Y dans face aval-rive gauche du barrage voûte à simple courbure pour R=27,5m.

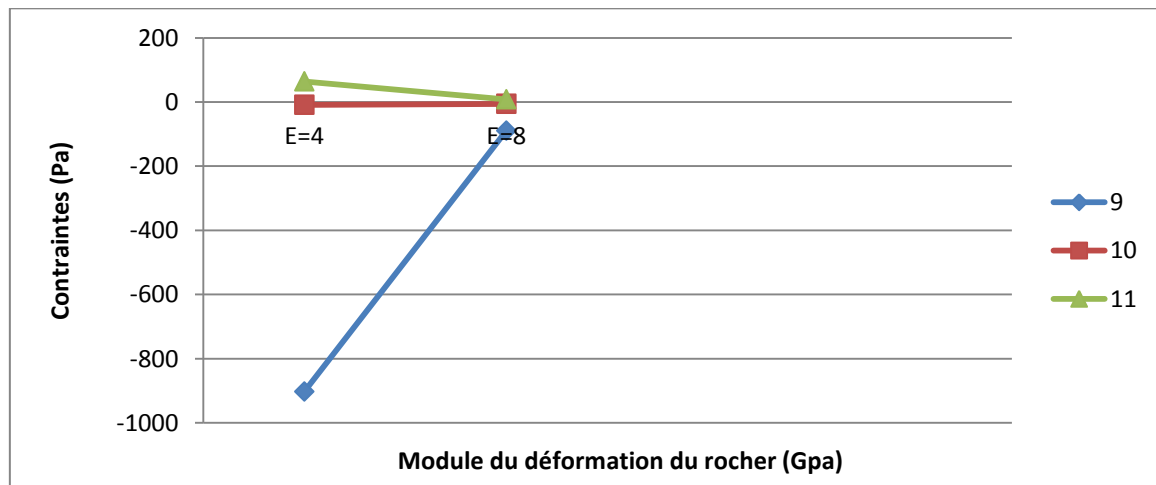


Figure 35 : Variation des contraintes suivant X dans fibre centrale du barrage voûte à simple courbure pour R=27,5m.

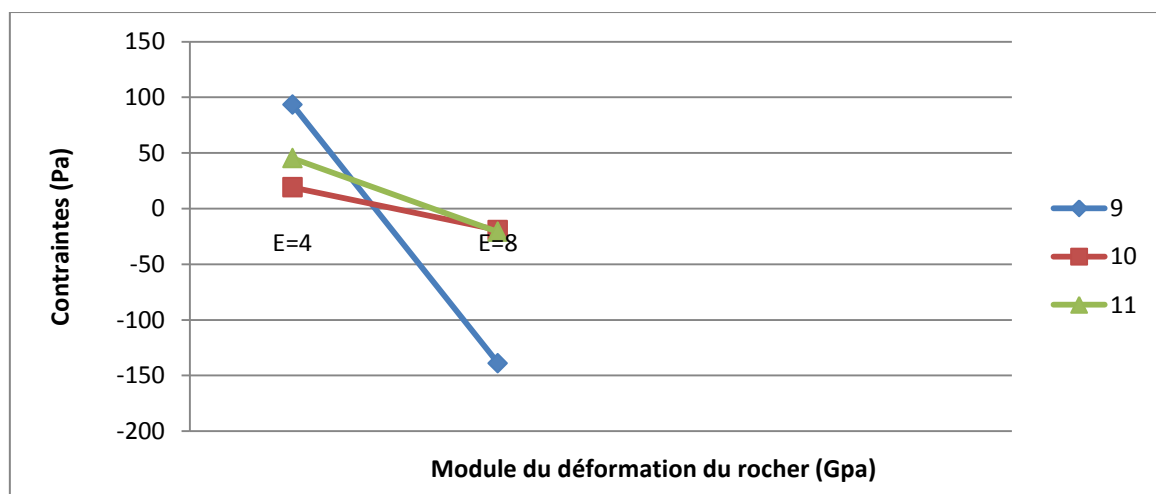


Figure 36 : Variation des contraintes suivant Y dans fibre centrale du barrage voûte à simple courbure pour R=27,5m.

## VI.2. Barrage voûte à double courbure

Afin de pouvoir lancer une analyse comparative des différentes variantes, certains repères ont été définis en position. Ces positions de comparaison sont présentées sur la figure 37.

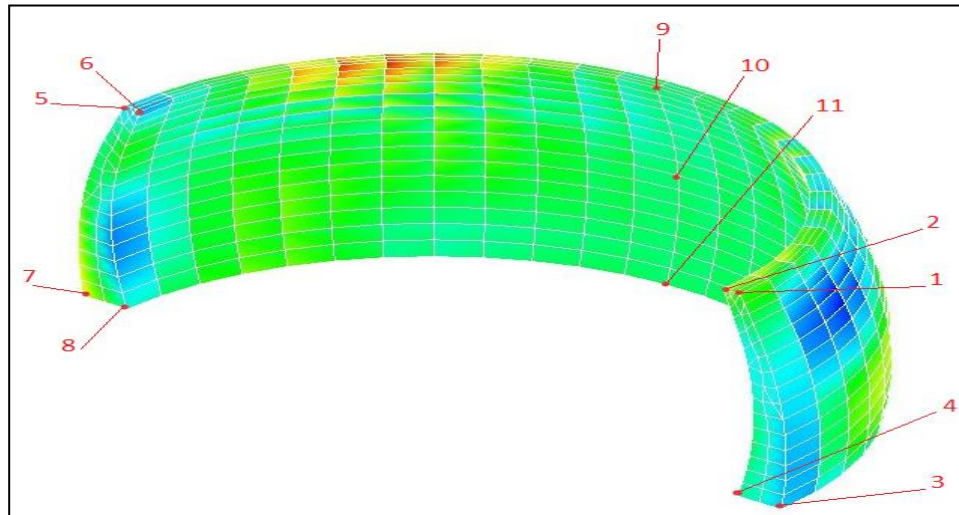


Figure 37 : Positions de comparaison des variations de contraintes dans un barrage voûte à double courbure.

### VI.2.1. Influence du module de déformation du rocher

- i. Analyse des contraintes
  - a. Barrage voûte à double courbure avec  $R=55\text{ m}$

Le tableau 10 donne la variation des contraintes directionnelles au niveau des repères de position pour un rayon de courbure de la voûte  $R= 55\text{ m}$ .

Tableau 10 : Variations des contraintes dans un barrage voûte à double courbure avec  $R=55\text{ m}$ 

Points \ Contraintes (Pa)	E=4Gpa			E=8Gpa		
	XX	YY	ZZ	XX	YY	ZZ
1	2,521 E+5	1,094 E+5	-1,233 E+5	-1,901 E+5	-5,412 E+5	3,787 E+4
2	2,576 E+4	5,632 E+5	-2,735 E+4	-7,792 E+4	-1,302 E+6	1,001 E+4
3	-9,74 E+4	-4,529 E+5	-1,221 E+4	-1,566 E+4	-8,717 E+4	1,417 E+5
4	- 1,809 E+4	-9,895 E+4	3,592 E+4	-1,048 E+4	-1,539 E+5	-2,846 E+4
5	- 1,393 E+5	-4,103 E+5	-1,076 E+5	1,829 E+5	8,53 E+5	2,092 E+5
6	2,281 E+4	-1,356 E+5	-1,288 E+4	-4,981 E+4	8,747 E+5	1,254 E+5
7	1,772 E+5	7,31 E+5	1,784 E+5	-2,12 E+4	-8,344 E+4	-2,226 E+4
8	- 4,054 E+4	-1,817 E+5	-4,297 E+4	2,272 E+4	1,019 E+5	2,31 E+4
9	8,119 E+5	-2,152 E+4	-9,905 E+3	-1,484 E+6	1,96 E+5	-1,228 E+5
10	3,589 E+5	3,435 E+4	-4,312 E+4	8,887 E+5	1,063 E+5	2,669 E+5
11	6,953 E+4	-5,696 E+3	5,051 E+4	-1,058 E+4	5,879 E+4	-4,632 E+4

b. Barrage voûte à double courbure avec  $R = 45\text{ m}$

Le tableau 11 donne la variation des contraintes directionnelles au niveau des repères de position pour un rayon de courbure de la voûte  $R= 55\text{ m}$ .

Tableau 11 : Variations des contraintes dans un barrage voûte à double courbure avec  $R = 45$  m.

Points \ Contraintes (Pa)	E=4Gpa			E=8Gpa		
	XX	YY	ZZ	XX	YY	ZZ
1	3,562 E+4	4,837 E+4	2,936 E+4	-1,764 E+5	3,977 E+5	1,374 E+5
2	-1,486 E+4	-2,398 E+5	4,403 E+4	7,825 E+4	9,049 E+5	1,083 E+5
3	-1,017 E+5	-4,828 E+5	1,696 E+5	-2,127 E+4	-7,730 E+4	1,374 E+5
4	-7,297 E+4	-3,163 E+5	4,666 E+4	1,448 E+4	-1,235 E+5	-1,504 E+4
5	-7,852 E+4	-3,234 E+5	-1,368 E+5	-7,579 E+4	6,312 E+5	-4,318 E+4
6	1,034 E+3	1,468 E+5	-7,496 E+4	-1,554 E+5	1,154 E+6	-1,704 E+5
7	1,696 E+5	6,927 E+5	1,697 E+5	1,696 E+4	7,026 E+4	1,660 E+4
8	-4,542 E+4	-1,828 E+5	-4,921 E+4	1,813 E+4	7,618 E+4	1,779 E+4
9	4,044 E+5	8,157 E+4	-8,520 E+3	-1,385 E+6	5,505 E+4	-1,591 E+5
10	-1,145 E+4	7,059 E+3	1,736 E+4	7,345 E+4	2,784 E+4	6,666 E+4
11	-3,049 E+4	-1,180 E+4	-5,530 E+4	-3,879 E+4	5,407 E+4	7,934 E+4

## ii. Résultats des déplacements

Les tableaux N°12 et 13 donnent en fonction des valeurs des modules de déformations du rocher de fondation la variation des déplacements associés.

a. Barrage voûte à double courbure avec  $R=55$ mTableau 12 : Résultats des déplacements dans un barrage voûte à simple courbure pour  $R=55$  m

Déplacement (m)	Maximum	Minimum
E=4 Gpa	0,1179 E-1	-0,1091 E-1
E=8 Gpa	0,7015 E-2	-0,5206 E-2

b. Barrage voûte à double courbure avec  $R=45$ mTableau 13 : Résultats des déplacements dans un barrage voûte à simple courbure pour  $R=45$  m

Déplacement (m)	Maximum	Minimum
E=4 Gpa	0,1376 E-1	-0,1565 E-1
E=8 Gpa	0,7280 E-2	-0,7166 E-2

## VI.2.1. Influence du rayon de courbure de la voûte

## i. Analyse des contraintes

a. Barrage voûte à double courbure avec  $E = 4 \text{ Gpa}$ 

Le tableau 14 donne la variation des contraintes directionnelles au niveau des repères de position pour un module de déformation  $E = 4 \text{ Gpa}$ .

Tableau 14 : Variations des contraintes dans un barrage voûte à double courbure avec  $E = 4 \text{ Gpa}$ .

Points	R=55 m			R=45 m		
	XX	YY	ZZ	XX	YY	ZZ
1	2,521 E+5	1,094 E+5	-1,233 E+5	3,562 E+4	4,837 E+4	2,936 E+4
2	2,576 E+4	5,632 E+5	-2,735 E+4	-1,486 E+4	-2,398 E+5	4,403 E+4
3	-9,74 E+4	-4,529 E+5	-1,221 E+4	-1,017 E+5	-4,828 E+5	1,696 E+5
4	-1,809 E+4	-9,895 E+4	3,592 E+4	-7,297 E+4	-3,163 E+5	4,666 E+4
5	-1,393 E+5	-4,103 E+5	-1,076 E+5	-7,852 E+4	-3,234 E+5	-1,368 E+5
6	2,281 E+4	-1,356 E+5	-1,288 E+4	1,034 E+3	1,468 E+5	-7,496 E+4
7	1,772 E+5	7,31 E+5	1,784 E+5	1,696 E+5	6,927 E+5	1,697 E+5
8	-4,054 E+4	-1,817 E+5	-4,297 E+4	-4,542 E+4	-1,828 E+5	-4,921 E+4
9	8,119 E+5	-2,152 E+4	-9,905 E+3	4,044 E+5	8,157 E+4	8,520 E+3
10	3,589 E+5	3,435 E+4	-4,312 E+4	-1,145 E+4	7,059 E+3	1,736 E+4
11	6,953 E+4	-5,696 E+3	5,051 E+4	-3,049 E+4	-1,180 E+4	-5,530 E+4

b. Barrage voûte à double courbure avec  $E = 8 \text{ Gpa}$ 

Le tableau 15 donne la variation des contraintes directionnelles au niveau des repères de position pour un module de déformation  $E = 8 \text{ Gpa}$ .

Tableau 15 : Variations des contraintes dans un barrage voûte à double courbure avec  $E = 8 \text{ Gpa}$ .

Points \ Contraintes (Pa)	R=55 m			R=45 m		
	XX	YY	ZZ	XX	YY	ZZ
1	-1,901 E+5	-5,412 E+5	3,787 E+4	-1,764 E+5	3,977 E+5	1,374 E+5
2	-7,792 E+4	-1,302 E+6	1,001 E+4	7,825 E+4	9,049 E+5	1,083 E+5
3	-1,566 E+4	-8,717 E+4	1,417 E+5	-2,127 E+4	-7,730 E+4	1,374 E+5
4	-1,048 E+4	-1,539 E+5	-2,846 E+4	1,448 E+4	-1,235 E+5	-1,504 E+4
5	1,829 E+5	8,530 E+5	2,092 E+5	-7,579 E+4	6,312 E+5	-4,318 E+4
6	-4,981 E+4	8,747 E+5	1,254 E+5	-1,554 E+5	1,154 E+6	-1,704 E+5
7	-2,210 E+4	-8,344 E+4	-2,226 E+4	1,696 E+4	7,026 E+4	1,660 E+4
8	2,272 E+4	1,019 E+5	2,310 E+4	1,813 E+4	7,618 E+4	1,779 E+4
9	-1,484 E+6	1,960 E+5	-1,228 E+5	-1,385 E+6	5,505 E+4	-1,591 E+5
10	8,887 E+5	1,063 E+5	2,669 E+5	7,345 E+4	2,784 E+4	6,666 E+4
11	-1,058 E+4	5,879 E+4	-4,632 E+4	-3,879 E+4	5,407 E+4	7,934 E+4

## ii. Résultats des déplacements

Les tableaux N°16 et 17 donnent en fonction des valeurs des rayons de courbures de la voûte la variation des déplacements associés.

a. Barrage voûte à double courbure avec  $E=4 \text{ Gpa}$ Tableau 16 : Résultats des déplacements dans un barrage voûte à simple courbure pour  $E=4 \text{ Gpa}$ 

Déplacement (m)	Maximum	Minimum
R=55 m	0,1179 E-1	-0,1091 E-1
R=45 m	0,1376 E-1	-0,1565 E-1

b. Barrage voûte à double courbure avec  $E=8 \text{ Gpa}$

Tableau 17 : Résultats des déplacements dans un barrage voûte à simple courbure pour  $E=8 \text{ Gpa}$

Déplacement (m)	Maximum	Minimum
R=55 m	0,7015 E-2	-0,5206 E-2
R=45 m	0,7280 E-2	-0,7166 E-2

Les résultats graphiques sous forme de champs de contraintes sont présentés sur les figures de 38 à 49.

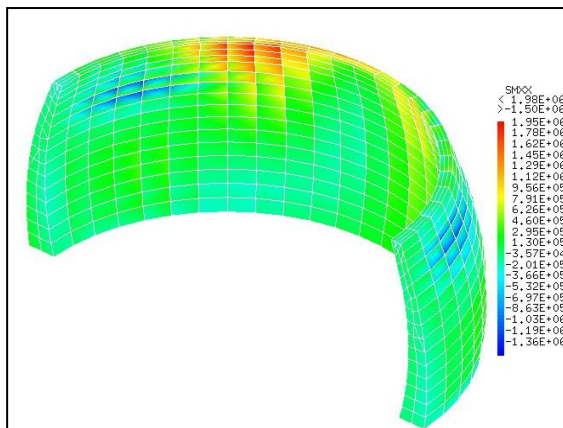


Figure 38 : Composante de la contrainte suivant X dans un barrage voûte à double courbure pour R=55 m et  $E=4 \text{ Gpa}$ .

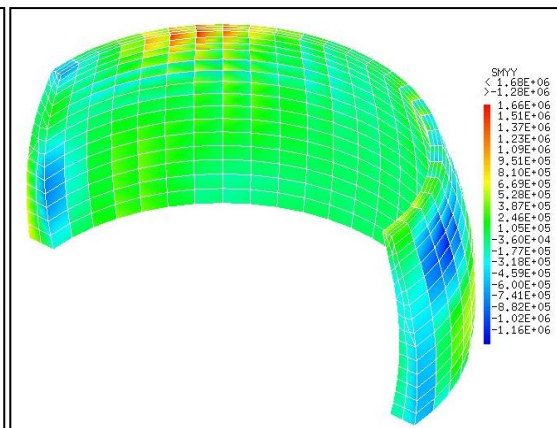


Figure 39: Composante de la contrainte suivant Y dans un barrage voûte à double courbure pour R=55 m et  $E=4 \text{ Gpa}$ .

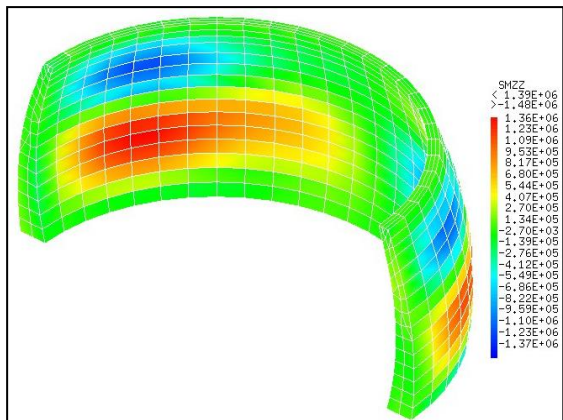


Figure 40 : Composante de la contrainte suivant Z dans un barrage voûte à double courbure pour R=55 m et  $E=4 \text{ Gpa}$ .

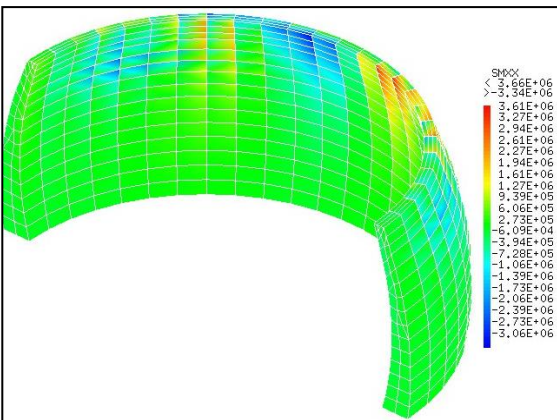


Figure 41: Composante de la contrainte suivant X dans un barrage voûte à double courbure pour R=55 m et  $E=8 \text{ Gpa}$ .

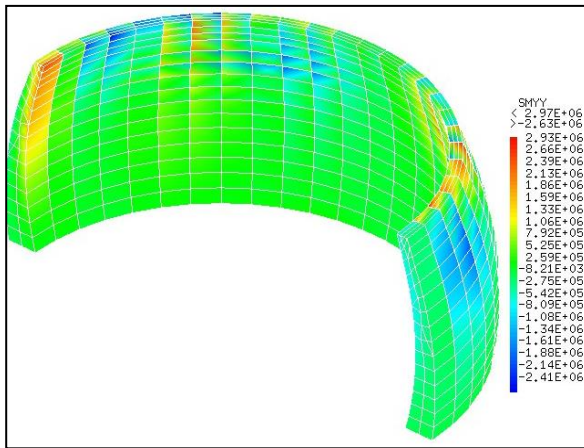


Figure 42: Composante de la contrainte suivant Y dans un barrage voûte à double courbure pour R=55 m et E=8 Gpa.

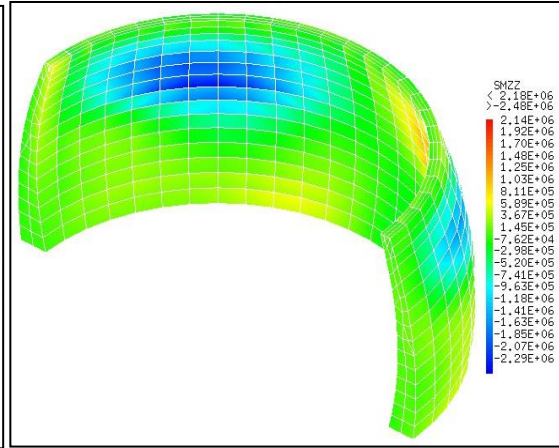


Figure 43: Composante de la contrainte suivant Z dans un barrage voûte à double courbure pour R=55 m et E=8 Gpa.

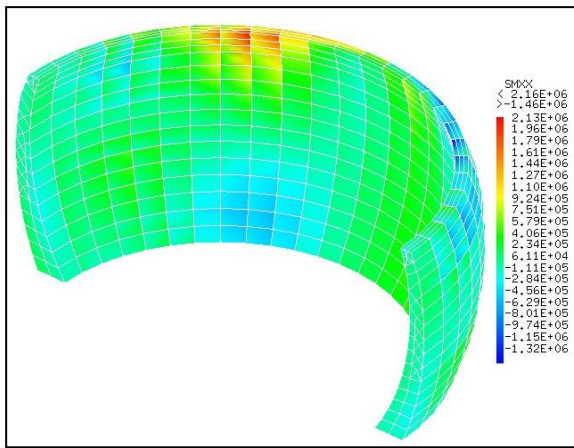


Figure 44 : Composante de la contrainte suivant X pour R=45 m et E=4 Gpa.

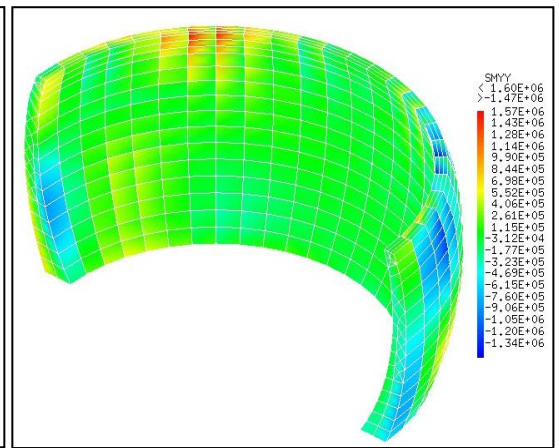


Figure 45 : Composante de la contrainte suivant Y pour R=45 m et E=4 Gpa.

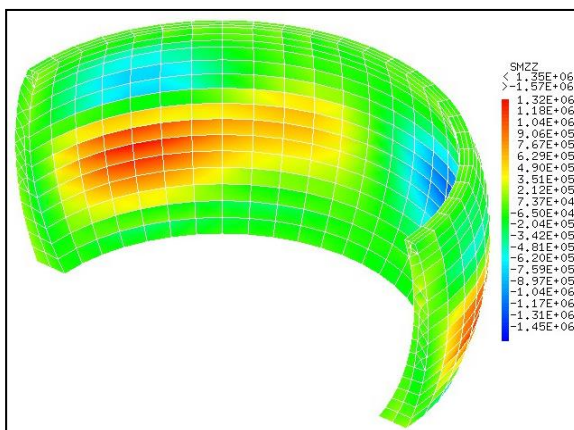


Figure 46: Composante de la contrainte suivant Z dans un barrage voûte à double courbure pour R=45 m et E=4 Gpa.

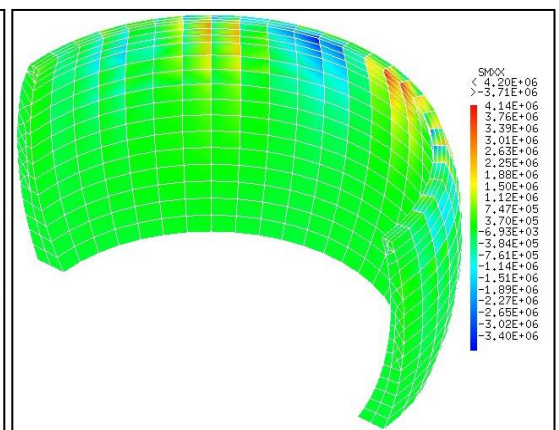


Figure 47: Composante de la contrainte suivant X dans un barrage voûte à double courbure pour R=45 m et E=8 Gpa.

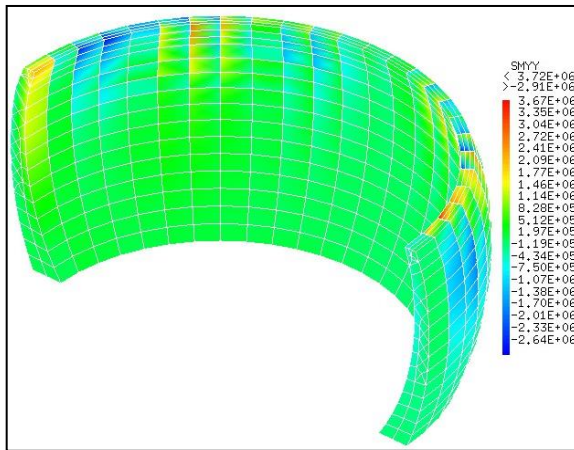


Figure 48: Composante de la contrainte suivant Y dans un barrage voûte à double courbure pour R=45 m et E=4 Gpa.

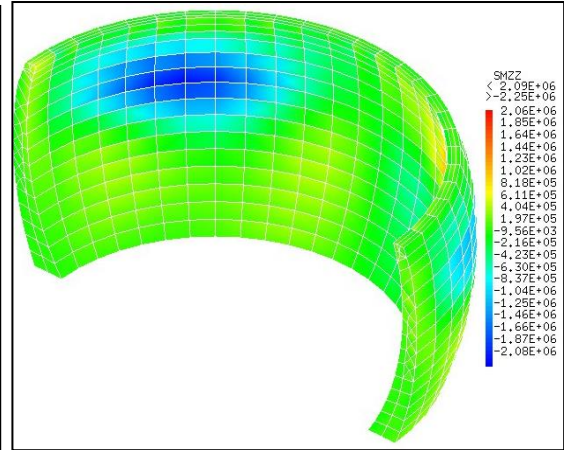


Figure 49: Composante de la contrainte suivant Z dans un barrage voûte à double courbure pour R=45 m et E=8 Gpa.

Les figures de 50 à 69 donnent les variations des contraintes en fonction de la variation des modules de déformations et des rayons de courbure de la voûte.

1<sup>er</sup> cas : R = 45 m

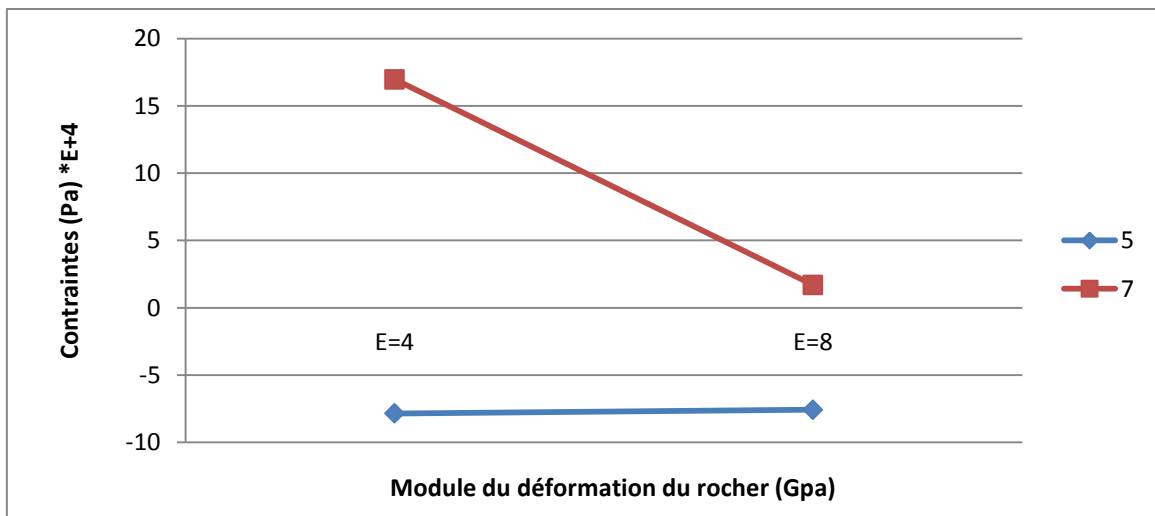


Figure 50 : Variation des contraintes suivant X dans face amont-rive droite du barrage voûte à double courbure pour R=45m.

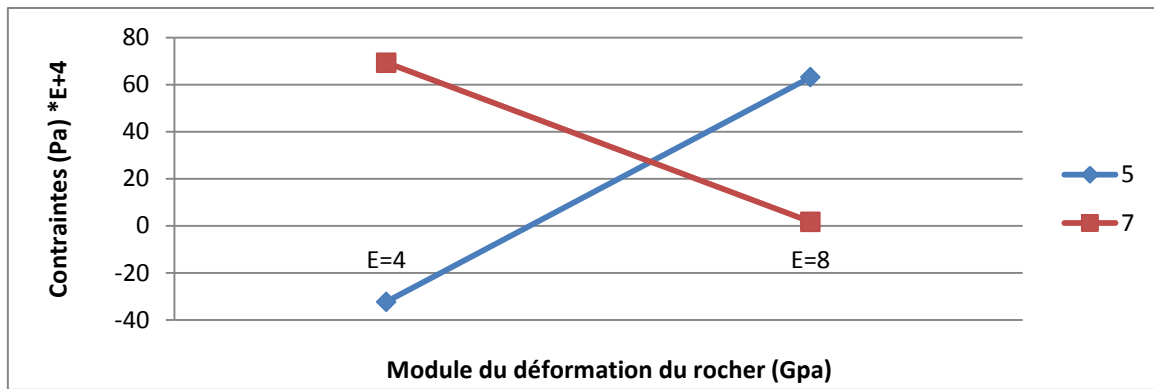


Figure 51 : Variation des contraintes suivant Y dans face amont-rive droite du barrage voûte à double courbure pour R=45m.

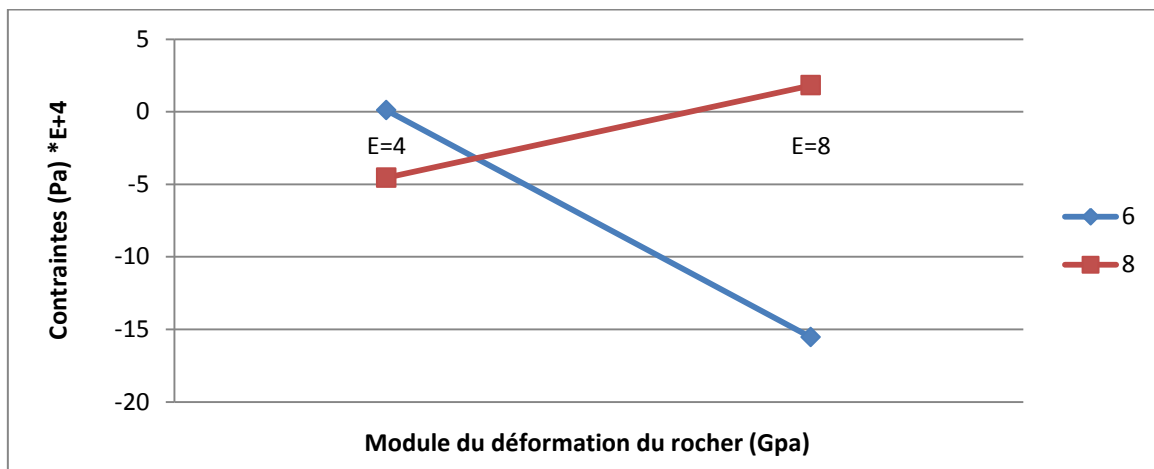


Figure 52 : Variation des contraintes suivant X dans face aval-rive droite du barrage voûte à double courbure pour R=45m.

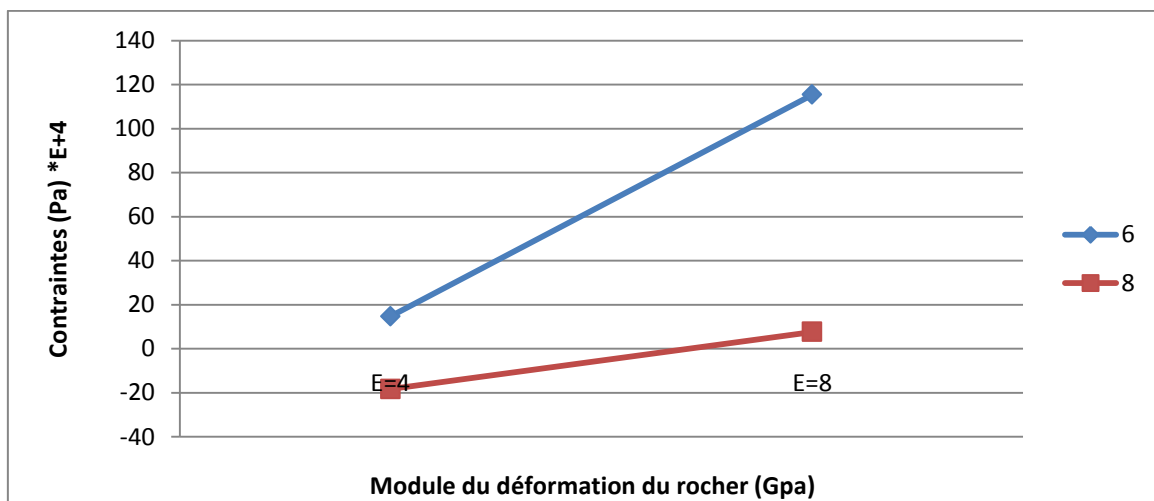


Figure 53 : Variation des contraintes suivant Y dans face aval-rive droite du barrage voûte à double courbure pour R=45m.

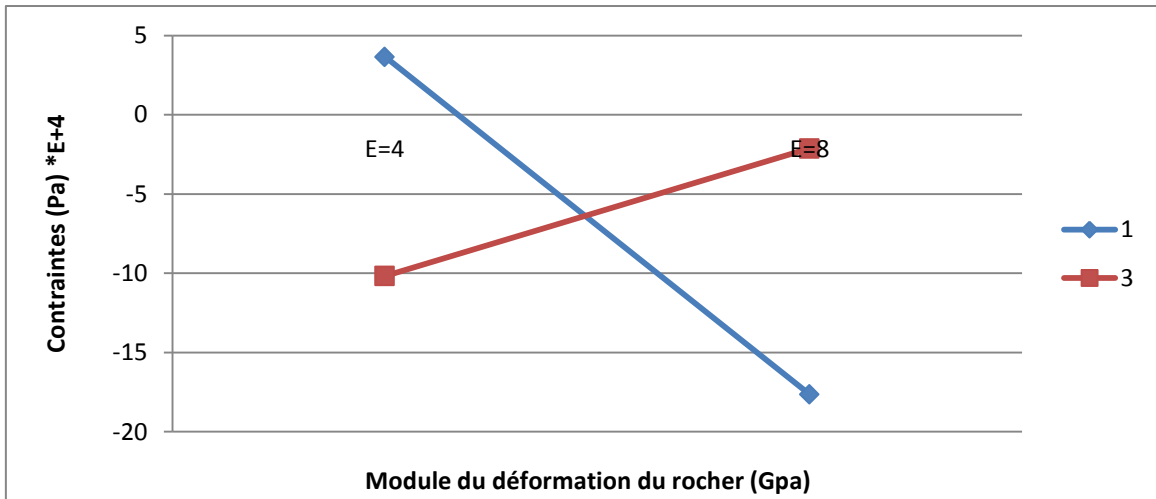


Figure 54 : Variation des contraintes suivant X dans face amont-rive gauche du barrage voûte à double courbure pour R=45m.

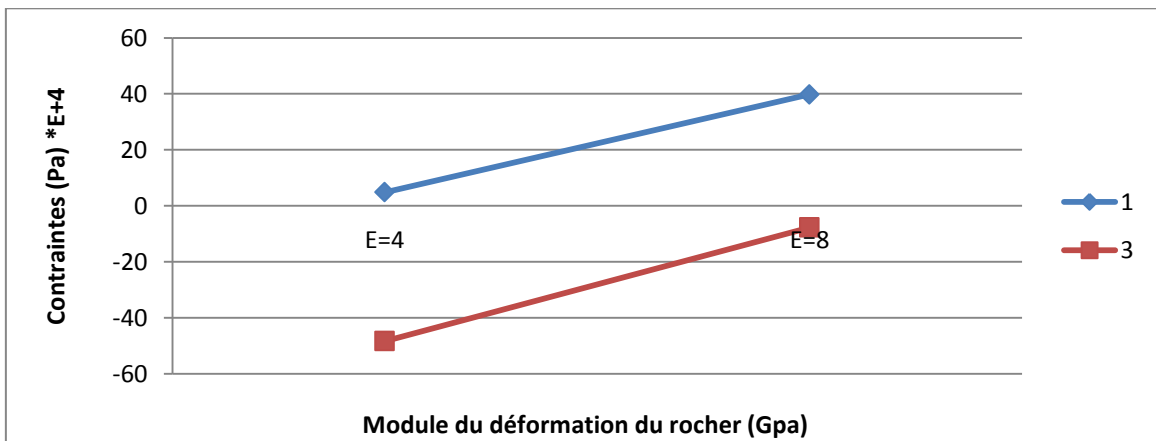


Figure 55 : Variation des contraintes suivant Y dans face amont-rive gauche du barrage voûte à double courbure pour R=45m.

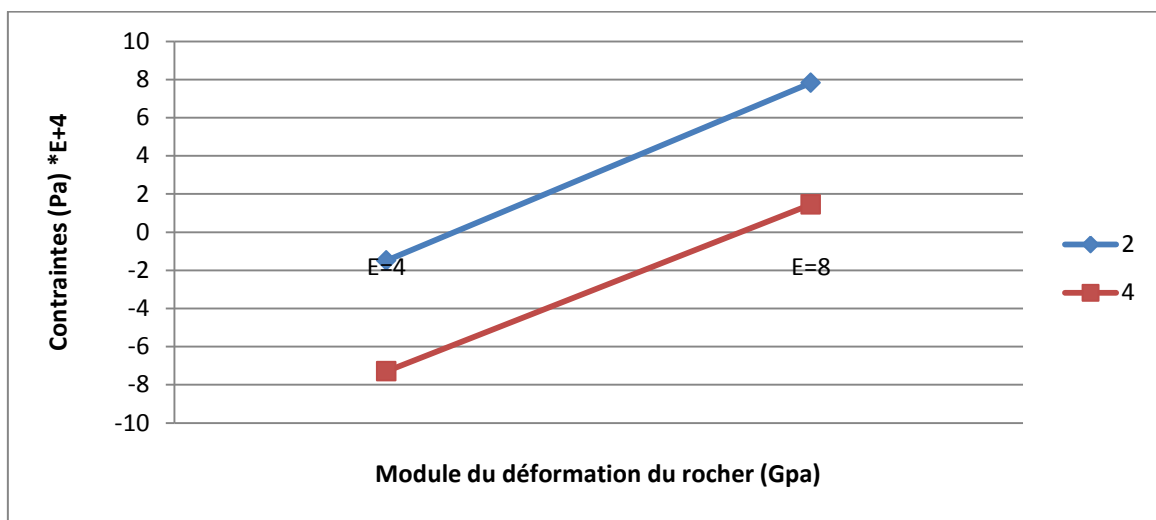


Figure 56 : Variation des contraintes suivant X dans face aval-rive gauche du barrage voûte à double courbure pour R=45m.

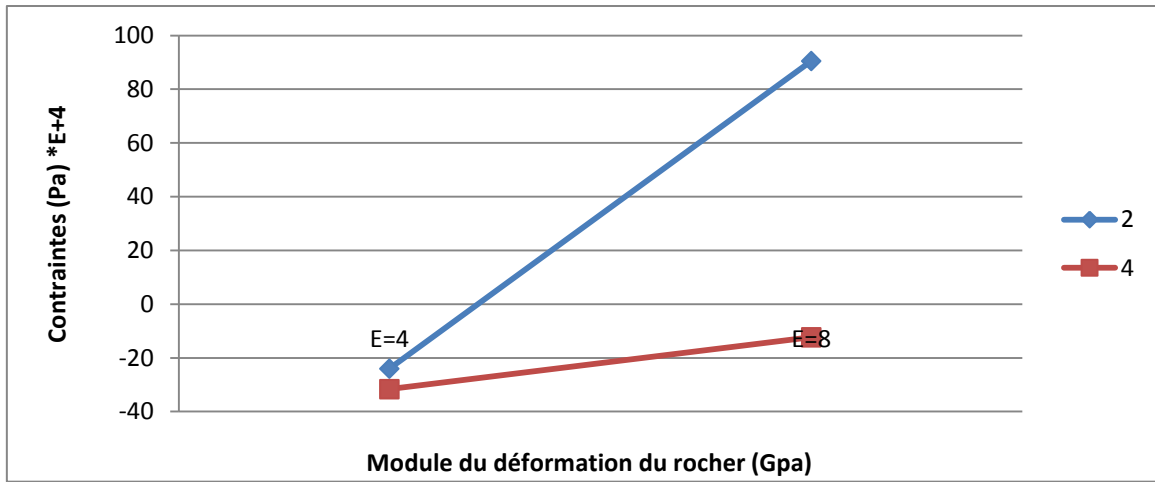


Figure 57 : Variation des contraintes suivant Y dans face aval-rive gauche du barrage voûte à double courbure pour R=45m.

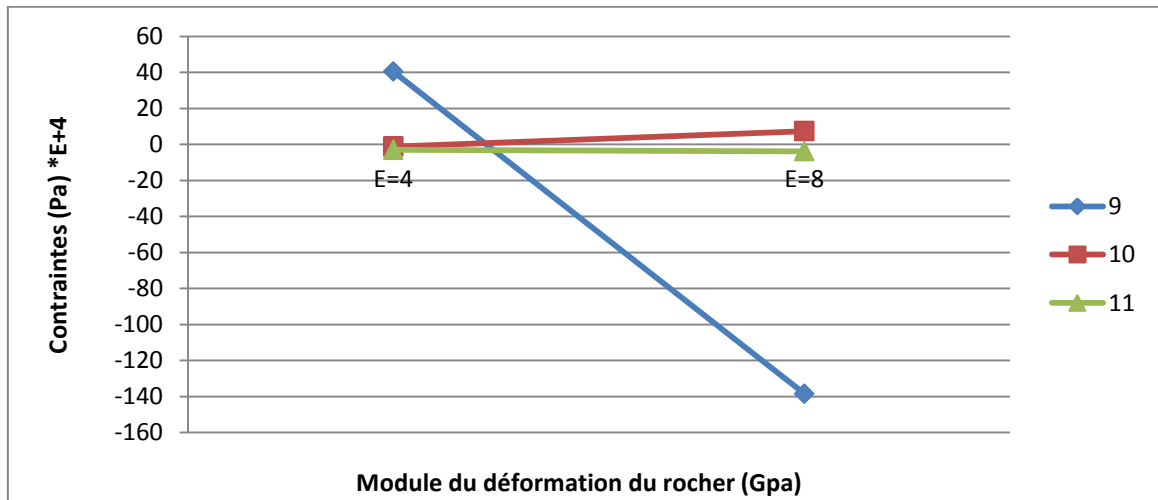


Figure 58 : Variation des contraintes suivant X dans fibre centrale du barrage voûte à double courbure pour R=45m.

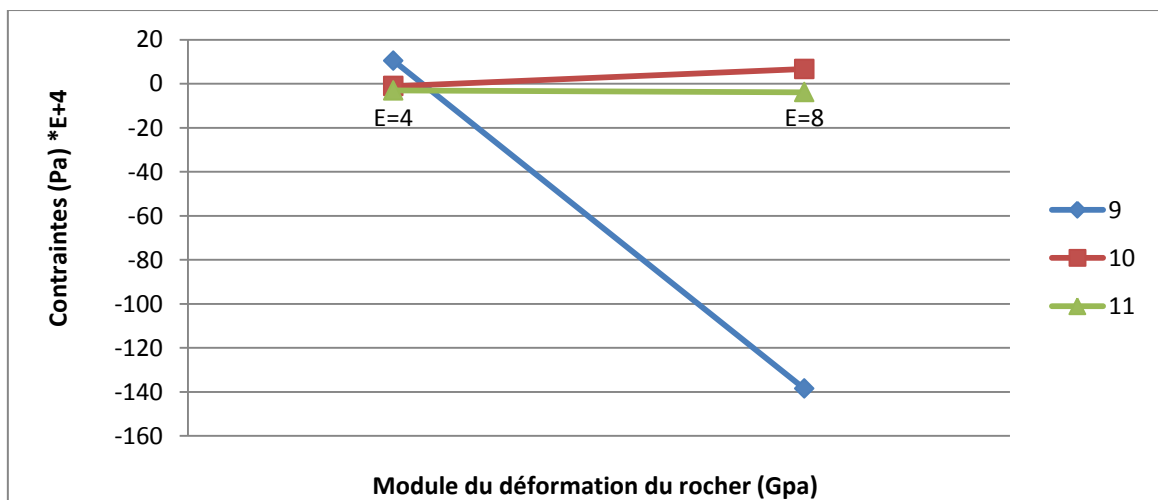


Figure 59 : Variation des contraintes suivant Y dans fibre centrale du barrage voûte à double courbure pour R=45m.

2<sup>e</sup> cas : R = 55 m

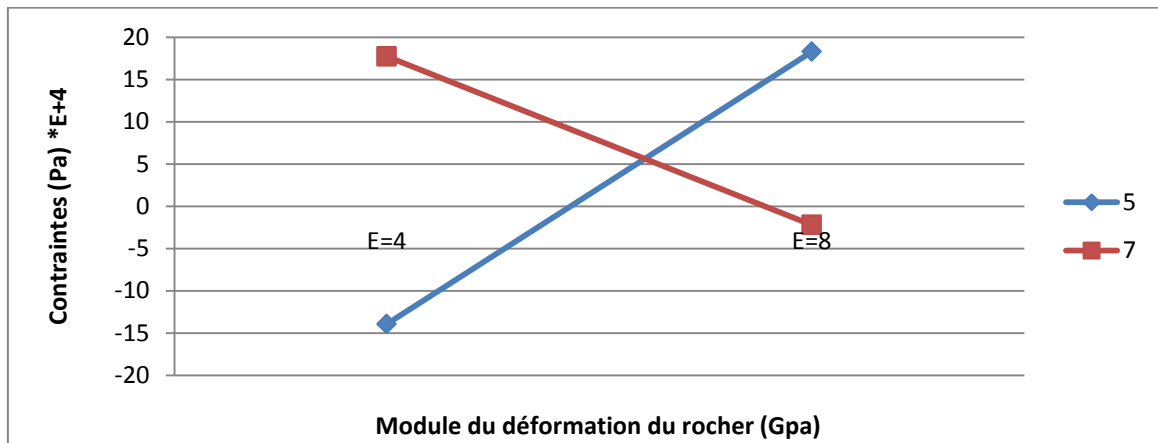


Figure 60 : Variation des contraintes suivant X dans face amont-rive droite du barrage voûte à double courbure pour R=55m.

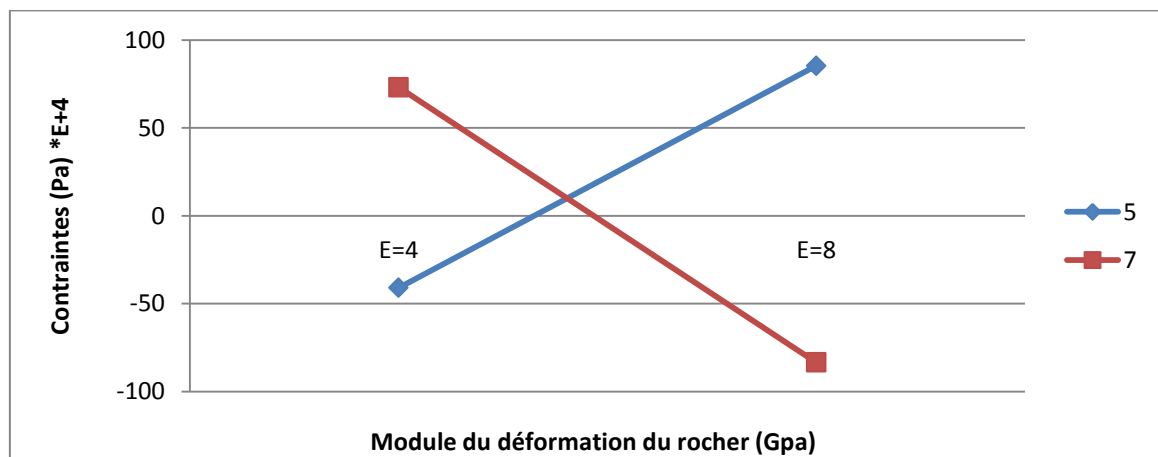


Figure 61 : Variation des contraintes suivant Y dans face amont-rive droite du barrage voûte à double courbure pour R=55m.

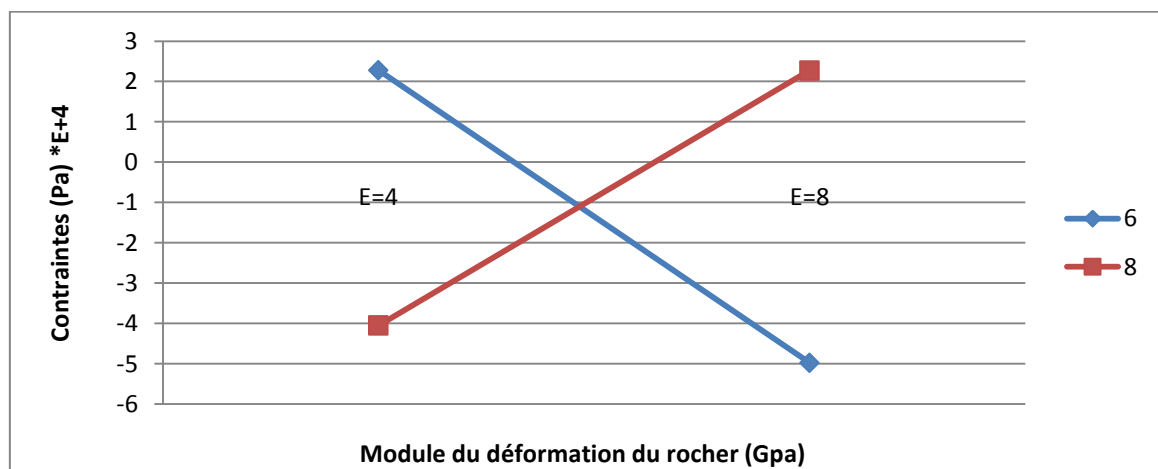


Figure 62 : Variation des contraintes suivant X dans face aval-rive droite du barrage voûte à double courbure pour R=55m.

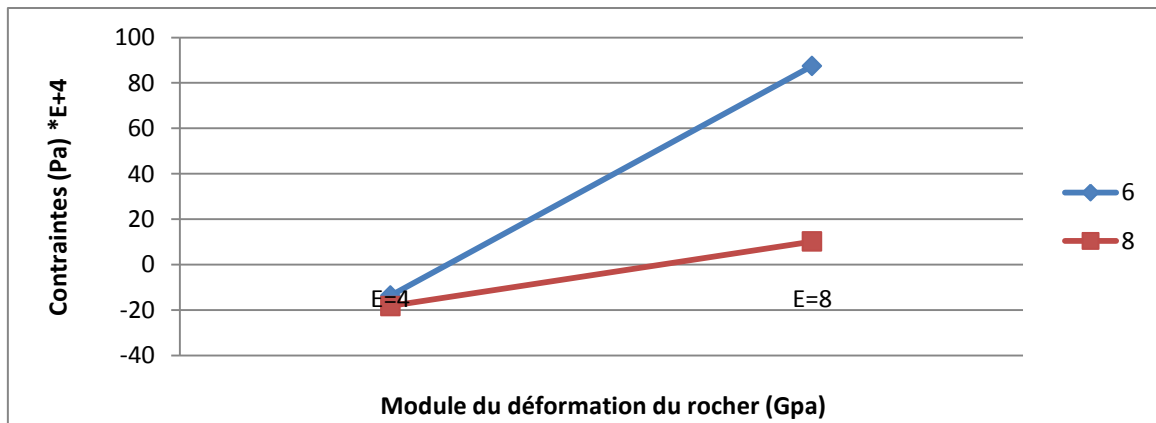


Figure 63 : Variation des contraintes suivant Y dans face aval-rive droite du barrage voûte à double courbure pour R=55m.

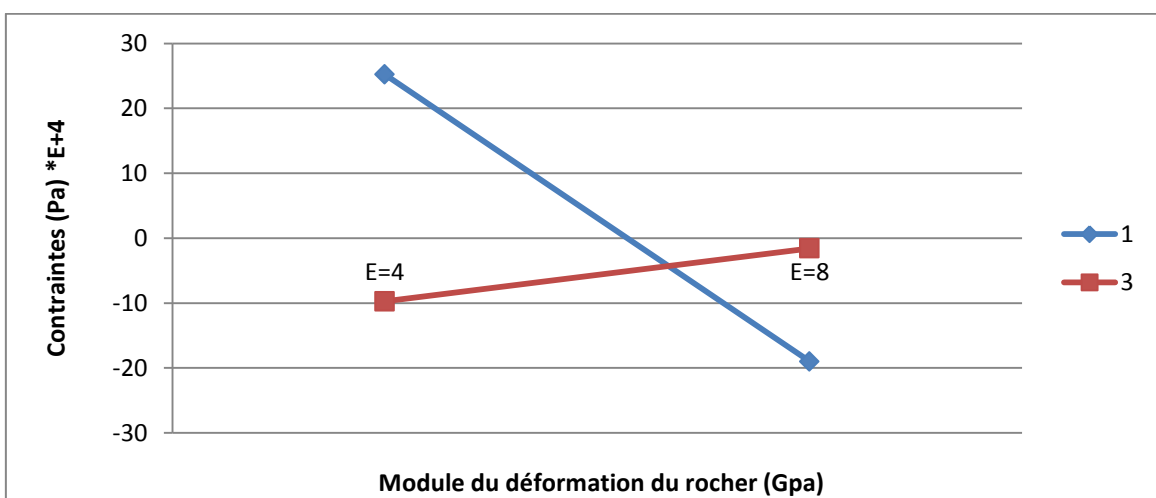


Figure 64 : Variation des contraintes suivant X dans face amont-rive gauche du barrage voûte à double courbure pour R=55m.

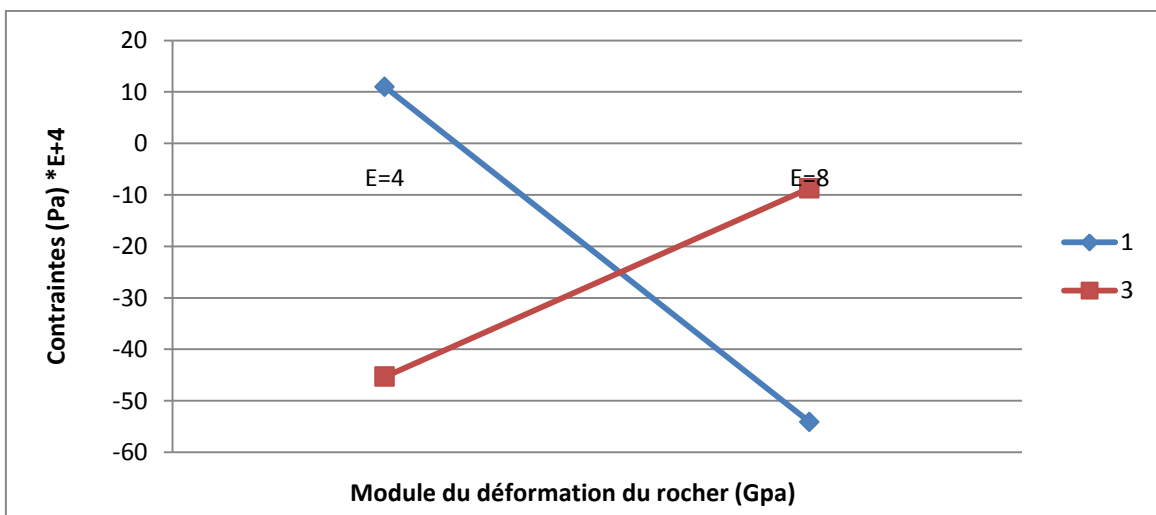


Figure 65 : Variation des contraintes suivant Y dans face amont-rive gauche du barrage voûte à double courbure pour R=55m.

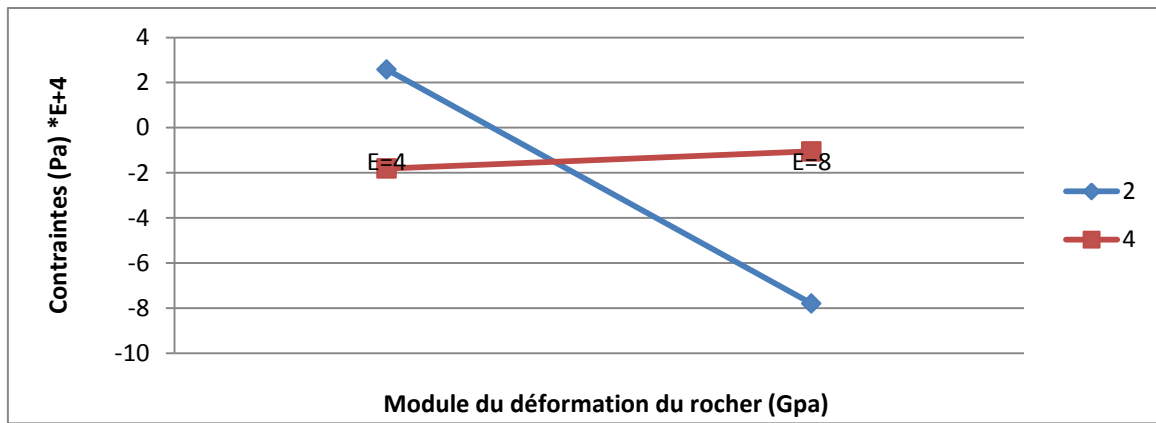


Figure 66 : Variation des contraintes suivant X dans face aval-rive gauche du barrage voûte à double courbure pour R=55m.

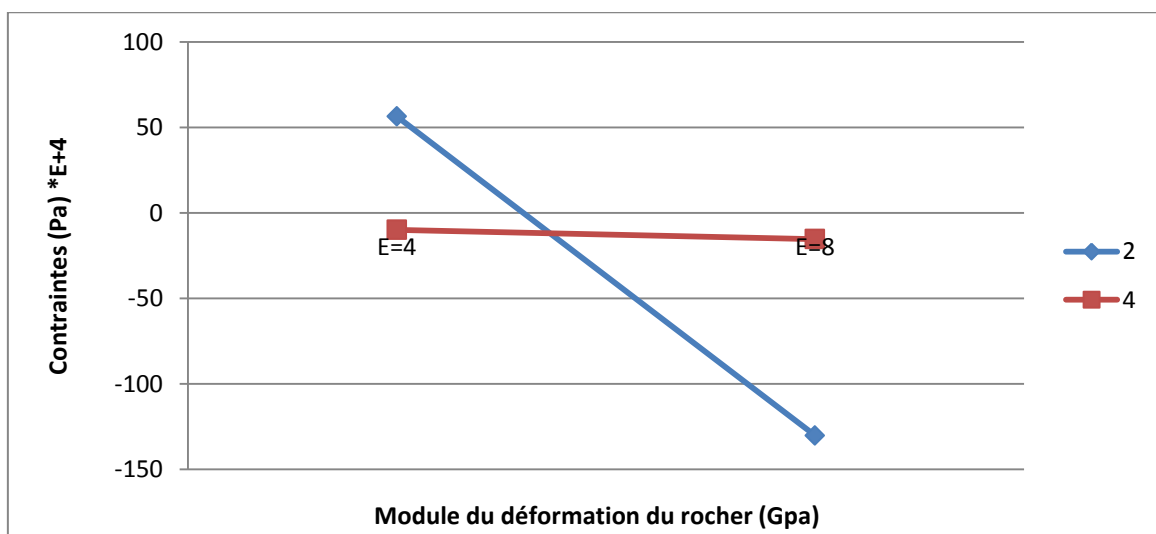


Figure 67 : Variation des contraintes suivant Y dans face aval-rive gauche du barrage voûte à double courbure pour R=55m.

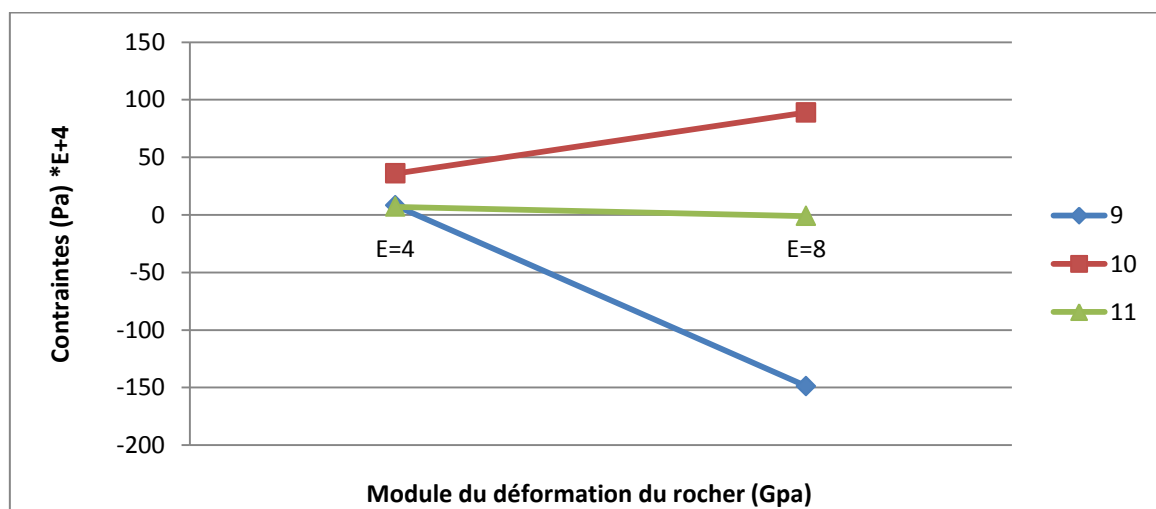


Figure 68 : Variation des contraintes suivant X dans fibre centrale du barrage voûte à double courbure pour R=55m.

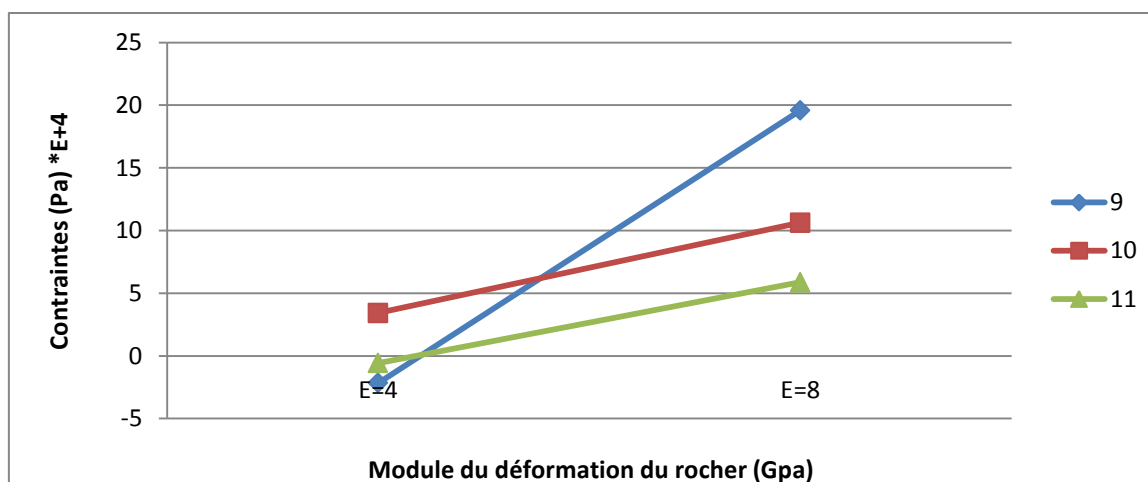


Figure 69 : Variation des contraintes suivant Y dans fibre centrale du barrage voûte à double courbure pour R=55m.

### VI.3. Analyse comparative au niveau axial de la voûte

#### i. Analyse des contraintes

Les tableaux N°18 et 19 donnent la variation des contraintes pour les deux cas de barrage voûte à simple courbure et à double courbure.

Tableau 18 : Variations des contraintes en fonction du type de courbure des barrages avec R=55m.

Contraintes (Pa)		E=4 Gpa			E=8 Gpa		
		XX	YY	ZZ	XX	YY	ZZ
Simple courbure	9	130	-4,56	-18,9	307	-74,2	-89,2
	10	198	39,9	9,02	201	-12	-49,1
	11	96,6	48,3	55,4	-34	-6,87	145
Double courbure	9	8,119 E+5	-2,152 E+4	-9,905 E+3	-1,484 E+6	1,960 E+5	1,228 E+5
	10	3,589 E+5	3,435 E+4	-4,312 E+4	8,887 E+5	1,063 E+5	2,669 E+5
	11	6,953 E+4	-5,696 E+3	5,051 E+4	-1,058 E+4	5,879 E+4	-4,632 E+4

Tableau 19 : Variations des contraintes en fonction du type de courbure des barrages avec R=45m.

Contraintes (Pa)		E=4 Gpa			E=8 Gpa		
		XX	YY	ZZ	XX	YY	ZZ
Simple courbure	9	-19,7	-16,7	22,8	510	121	115
	10	85,5	-20,2	-136	380	-38,1	79,1
	11	39,3	121	68,1	126	72,2	107
Double courbure	9	4,044 E+5	8,157 E+4	8,520 E+3	-1,385 E+6	5,505 E+4	-1,591 E+5
	10	-1,145 E+5	7,059 E+3	1,736 E+4	7,345 E+4	2,784 E+4	6,666 E+4
	11	-3,049 E+4	-1,180 E+4	-5,530 E+4	-3,879 E+4	5,407 E+4	7,934 E+4

## ii. Résultats des déplacements

Les tableaux N°20 et 21 donnent en fonction des valeurs des modules de déformations du rocher de fondation la variation des déplacements associés.

## a. Barrage voûte avec R=55m

Tableau 20 : Résultats des déplacements en fonction du type de courbure des barrages pour R=55m.

Déplacements (m)	E = 4 Gpa		E = 8 Gpa	
	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum
Barrage voûte				
A simple courbure	0,3064 E-4	-0,2990 E-4	0,9245 E-5	-0,6973 E-4
A double courbure	0,1179 E-1	-0,1091 E-1	0,7015 E-2	-0,5206 E-2

## b. Barrage voûte avec R=45m

Tableau 21 : Résultats des déplacements en fonction du type de courbure des barrages pour R=45 m

Déplacements (m)	E = 4 Gpa		E = 8 Gpa	
	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum
Barrage voûte				
A simple courbure	0,8740	-1,080	0,7227 E-5	-0,6903 E-5
A double courbure	0,1376 E-1	-1,1565 E-1	0,7280 E-2	-0,7166 E-2

## ***VII. Interprétation des résultats***

En premier lieu, nous signalons que pour le cas du barrage Oued Taht, l'élanement de la vallée qui est le rapport entre la longueur en crête et la hauteur du barrage est  $\lambda=3,52$ .

Pour ces conditions morphologiques, le barrage voûte est envisageable à condition que les critères géologiques et ceux relatifs à l'incorporation de l'évacuateur des crues soient satisfaites. En zones sismiques, les barrages voûtes sont les plus résistants de part leur hyperstaticité. Pour les barrages voûtes, l'optimisation de la géométrie vise à obtenir des contraintes de compression sur tout l'ouvrage.

### ***VII.1. Analyse de l'évolution des contraintes***

#### *VII.1.1. Barrage voûte à simple courbure*

- En crête, pour des faibles modules de déformation, les rayons de courbure influent énormément sur l'évolution des contraintes ;
- A la base, les contraintes de compression sont plus prononcées pour des faibles rayons de courbure ;
- Au niveau de la fibre centrale, les contraintes de traction sont influencées par les rayons de courbure de la voûte ;
- La réduction des rayons rendent les contraintes plus faibles ;
- Pour des modules de déformations élevées ( $E=8$  Gpa), les contraintes amont aval sont peu influencés par les rayons de courbure. Les rayons de courbure ont influence sur les contraintes latérales et celle en profondeur ;
- Les contraintes admissibles en analyse élastique restent dans les normes 8Mpa compression et 1,2Mpa en traction.

#### *VII.1.2. Barrage voûte à double courbure*

- Les contraintes en profondeur ne sont prononcées que dans le cas de module de déformation faible ( $E=4$  Gpa) et ce indépendamment des rayons de courbure ;
- Les contraintes dans le sens de la vallée permettent de maintenir l'arc en compression contrairement au barrage à simple courbure ;
- Dans le sens de la rigidité de la voûte (épaisseur), les contraintes de traction sont moins prononcées par rapport au la voûte à simple courbure ;
- Les rayons de courbure influent la variation des contraintes. La situation optimale est obtenue pour les faibles rayons ;
- Le module de déformation du rocher élevé améliore le comportement de l'ouvrage ;
- Malgré les variations importantes des contraintes par rapport au barrage à simple courbure, les plages normatives des contraintes sont respectées :
  - 8 Mpa maximum en compression ;

- 1,2 Mpa maximum en traction.

### ***VII.2. Analyse des déplacements***

- Le module de déformation du rocher E élevé donne les déplacements les plus faibles et ce quelque soit le type de courbure (simple ou double) ;
- Les déplacements sont réduits d'avantage pour des rayons de courbure plus faibles ;
- En terme de déplacement, le profil du barrage à double courbure le plus avantageux est obtenu pour des rayons plus faibles.

## **VIII. Conclusion**

Le projet de barrage est l'un des projets les plus complexe et pluridisciplinaire dans son étude comme son exécution, pour cela nous avons opté dans ce chapitre d'étaler d'une manière synthétique les différentes bases pour la réalisation d'un projet de barrage.

Globalement, nous pouvons dire que CASTEM est une bonne méthode d'analyse des contraintes et des déplacements dans les barrages voûtes.

### *Conclusion générale*

L'élaboration du travail devrait impérativement être précédée de certains aspects liés à la maîtrise technique des éléments liés à la conception et à la stabilité des barrages voûtes. En effet la contribution bibliographique avait pour objectif capital de cerner l'ensemble des critères liés aux principes de base de dimensionnement de ce type d'ouvrage, aux critères de son choix pour des sites particuliers, à l'analyse des paramètres d'influence sur la conception et enfin aux différents comportements dynamiques, thermiques et sismiques des barrages voûtes.

Cette contribution bibliographique a été d'un intérêt bénéfique pour l'élaboration de ce mémoire, d'autant plus, qu'au niveau de notre cursus de formation, les enseignements sur les barrages ne sont pas dispensés.

Plusieurs objectifs ont été recherchés au départ à travers les différentes investigations à engager dans le cadre du travail. En premier lieu, tenter, par l'intermédiaire de la modélisation numérique, de rechercher le profil le plus optimal (épaisseur de l'arc, rayon de courbure...etc). Dans une seconde phase, analyser l'influence de la double courbure sur le comportement des barrages voûtes.

Ces analyses ont été conduites avec des études paramétrées comparatives des contraintes et déformations, paramètres capitaux pour le jugement sur les décisions conceptuelles et les choix techniques.

En considérant plusieurs combinaisons conceptuelles en fonction des paramètres conceptuels d'influence (Module de rigidité du rocher, catégorie de courbure, rayon de courbure...etc), les analyses comparatives devaient déboucher sur l'objectif final qui est celui d'orienter les conceptions de ce type d'ouvrages vers une rationalisation du profil type.

A travers les études menées sur différentes variantes de conception des barrages voûtes appliquées sur le cas du barrage Oued Taht, les conclusions fondamentales ci-dessous peuvent être dégagées:

- Pour la conception en simple courbure : les rayons de courbures influent énormément l'évolution des contraintes en crête et en zone centrale des arcs pour de faibles modules de déformation  $E$  du rocher. Cette influence est moins prononcés pour des modules de déformation élevés ( $E = 8$  GPa).
- En terme de déformations, ces derniers sont fidèlement corrélés au module de déformation et indépendamment des rayons de courbures. Pour des modules de déformations élevés, les déplacements les plus faibles sont obtenus pour des rayons de courbure réduits.
- Pour la conception en double courbure : Les contraintes en profondeur dépendent étroitement des modules de déformations. L'arc est maintenu d'avantage en compression par rapport au barrage à simple courbure. Les contraintes de traction à la base sont moins prononcées par rapport à la conception en simple courbure.
- L'évolution importante enregistrée des contraintes a permis de maintenir comme même des seuils de 8 MPa en compression et 1.2 MPa en traction. En ce qui concerne les déplacements, les rayons de courbures les plus faibles offrent les déplacements les plus réduits.

En guise de synthèse, la conception des barrages voûte en zone sismique est une tâche compliquée et difficile intégrant parfois des paramètres antagonistes soit dans le sens de la sécurité ou de l'économie.

A travers l'élaboration de ce modeste mémoire, nous retenons avec force la précaution de la projection de ce type de barrage dans le cas d'un rocher de module de déformation relativement faible ( $4 < E < 6$  GPa). Dans ce cas précis, la prise en compte de l'influence des rayons de courbures est impérative. La conception en double courbure permet de réduire les rayons des arcs les plus chargé vers le bas et permet de réduire les cisaillements horizontaux en pied des consoles centrales. Ce type de conception peut compenser la faiblesse de rigidité du rocher de fondation.

Enfin, et en terme de perspectives, ce travail mérite d'être continuer par l'étude des aspects liés à l'adaptabilité du barrage voûte aux divers élancements des vallées et à la

projection d'une combinaison voûte-contreforts pour des sites de faibles modules de déformation du rocher.

## Les références bibliographiques

- A.Carrère, 1994. Les barrages. Traité construction, C5 555,p 2-24.
- A.J,Scheleiss. H,Pougatsch, 2011. Les barrages : du projet à la mise en service, Pressespolytechniques et universitaires romandes, Lausanne, Vol 17.
- B.Rouissat, 2010. Barrages voûtes. Cours M2 OH Université de Tlemcen.
- Bonnelli.S, Radzicki.K, Tourment.R, Félix.H, 2005. L'auscultation des barrages en terre.Ingenieries N°41.
- C.Gazarian-Pagé, 2014. Réponse dynamique et sismique 3D des évacuateurs de crue, Ecole Polytechnique De Montréal.
- Comité Suisse des Barrages, 2005. Dispositif d'auscultation des barrages, partie 2 : Equipements et méthodes de mesures.
- J.Larouzee, 2015. Théorie et pratique des modèles d'erreur humaine dans la sécurité des barrages hydroélectrique, Thèse de doctorat, MINE Paris Tech, France, 302p.
- J.M.Durand, P.Royet, P.Mériaux, 1998. Techniques des petits barrages en Afrique sahélienne et équatorial, Cemagref éditions, 414p.
- ISL Bureau d'Ingénieurs Conseils, 2011. Etude complémentaire de l'APD du barrage Taht, Mission 3/Revue de l'étude géologique et géotechnique, France.
- G.Degoutte, 1997. Petits barrages : Recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi, Cemagref éditions, 175p.
- MEDDE, 2014. Ministère de l'écologie du développement durable et de l'énergie. Risque sismique et sécurité des ouvrages hydrauliques.
- R.Nadia, 2014. Suivi du comportement des barrages Etude de cas, thèse de doctorat, Université de Tlemcen.
- R.Ginnocchio, V,Pierre-Louis, 2012. L'énergie hydraulique, Editions TEC&DOC.
- P.Le Delliou, 2004. Les barrages : Conception et maintenance, ENTPE, 265p.
- P.Royet,2006. La surveillance et d'entretien des petits barrages, Cemagref edition.

Faculté de Technologie

Département de Génie Civil

## Fiche chronologique de l'élaboration du mémoire de fin d'études

Intitulé PFE : Analyse des aspects conceptuels des barrages voûtes

**Etudiants :** Benhamed Ahlam & Hadri Ahmed El Amin

**Encadreurs :** Mme N. SMAIL      Mr B. ROUISSAT

<i>Dates</i>	<i>Evénements</i>
<b>10/10/2017</b>	Discussions avec Mme SMAIL N au sujet des PFE proposés
<b>01/11/2017</b>	Choix définitif du sujet du PFE
<b>14/11/2017</b>	Entretien avec Mme SMAIL sur les objectifs du sujet
<b>14/12/2017</b>	Sortie au barrage Béni Bahdel avec les deux encadreurs
<b>23/01/2018</b>	Séance de travail avec les deux encadreurs pour fixer les démarches et objectifs du PFE
<b>20/02/2018</b>	Rencontre avec l'encadreur pour consulter le travail bibliographique et décider sur le cas à étudier
<b>27/02/2018</b>	Rencontre avec Mr BASSAID, doctorant RISAM pour une initiation sur le logiciel CAST3M
<b>13 /03/2018</b>	Rencontre avec les deux encadreurs pour des explication sur les critères de conception des barrages
<b>13/03/2018</b>	Rencontre avec Mr ROUISSAT pour consulter et examiner l'état d'avancement du travail.
<b>10/04/2018</b>	Remise du travail bibliographique élaboré et démarches pour la partie modélisation
<b>23/04/2018</b>	Prise en charge des remarques et remise de la partie bibliographique corrigée aux encadreurs

<b>16/04/2018</b>	Travail de modélisation sur Cast3m avec d'énormes contraintes sur la programmation et l'exécution
<b>23/04/2018</b>	
<b>24/04/2018</b>	
<b>30/04/2018</b>	
<b>07/05/2018</b>	
<b>07/05/2018</b>	Rencontre avec encadreurs pour consultation sur les travaux de modélisation et discussions sur les difficultés rencontrées
<b>22/05/2018</b>	Rencontre avec les deux encadreurs pour traiter les cas de modélisation
<b>28/05/2018</b>	Rencontre avec les deux encadreurs pour finaliser les cas de modélisation
<b>30/05/2018</b>	Rencontre avec les deux encadreurs pour discuter sur les résultats graphiques de la modélisation et orienter les interprétations
<b>05/06/2018</b>	Remise du document relatif aux résultats analytiques et graphiques de la modélisation avec leur interprétation
<b>06/06/2018</b>	Rencontre avec les encadreurs pour finaliser la rédaction des parties restantes du mémoire
<b>09/06/2018</b>	Rencontre finale pour la supervision de l'ossature globale du mémoire avant sa remise le 10.06.2018