

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Centre universitaire d'Ain Témouchent

Institut de Technologie

Département de Génie Civil



Mémoire pour l'Obtention du Diplôme de Master en

Filière : Travaux publics

Option : voie et ouvrage d'art

Thème :

Auscultation des barrages en terre

Présenté par :

ETTAJ FATIMA ZAHRA

BELGHORZI KHADIDJA

Devant le jury composé de :

Président.....M^f KADDOUR HAKIM

Examineur.....M^f GUELIL MUSTAPHA

Encadreur.....M^f SIDI MOHAMED AISSA Mamoune

L'année universitaire 2019/20120

إهداء

❖ الى من كلله الله بالهيبة و الوقار ...الى من علمني العطاء بدون انتظار.... أرجو من الله أن يمد في عمرك لتري ثمارا قد حان قطافها بعد طول انتظار و ستبقى كلماتك نجوم أهتدي بها اليوم و في الغد و الى الأبد "والدي العزيز "

❖ الى ملاكي في الحياة ... الى معنى الحب و الحنان ...الى بسمه الحياة و سر الوجود ...الى من كان دعائها سر نجاحي ...الى سندي و قوتي و ملاذي بعد اللهالى أغلى الحبايب " أمي الحبيبة"

❖ الى من بوجودها أكتسب قوة و محبة لا حدود لها...الى من عرفت معها معنى الحياة ...الى الوجه المفعم بالبراءة "اختي العزيزة مريم"

❖ الى من ساندني و خطى معي خطواتي و يسر لي الصعاب...الى من شجعني و وقف بجانبني بمواقفه النبيلة و تطلع لنجاحي بنظرات الأمل و التفاؤل ..الى أعز صديق "ربيع"

❖ الى كل من الأهل و الأحباب و الأصدقاء الذين تميزوا بالوفاء و العطاء...الى من معهم سعدت...الى من كانوا معي على طريق النجاح و الخير

❖ الى كل أساتذتنا الكرام الذين قدموا لنا الكثير باذلين بذلك جهودا كبيرة في بناء جيل الغد...الى جميع اساتذتنا الأفاضل بلغرزى خديجة

"بسم الله الرحمن الرحيم : و قل اعملوا فسيرى الله عملكم و المؤمنين"

أهدي تخرجي لمن ساندني و دعمني طوال مرحلتي الدراسية أُمي و أبي، الآن
قد عرفت جيدا معنى الأسرة و معنى حنان و بر الوالدين و لذلك اجتهدت و
فعلت كل ما بوسعي لكي أنجح و أرفع رأسكم إلى الأعلى.

أهدي تخرجي إلى من علموني أن النجاح لا يأتي إلا بالصبر و الإصرار، شاركوني
الحياة بخلوها و مرها و وقفوا معي في كل خطوة حتى يشاهدوا ثمرة جهدهم.
لا أنسى أخواتي نعيمة و لينا و أخي زكرياء على تشجيعهم و تحفيزهم لي.
شكر خاص لجدتي نعيمة لدعواتها التي صنعت لي في حياتي العزيمة و
الإصرار.

و إلى خالي حفيظ الذي لم يكل من دعمه لي من بعيد أو قريب.
أخوالي، خالتي، أعمامي، إلى كل أهلي و أصدقائي و أحبائي، وصلنا إلى نهاية
المشوار، شكر خاص إلى كل شخص جعلني أرى جمال الحياة، فاللهم احفظهم
جميعا.

الحمد لله كما ينبغي لجلال وجهك و عظيم سلطانك.

pngtree.com

الى أستاذي المحترم "حكيم قدور"

أستاذي الكريم، كل التبجيل و التقدير لك بفضل الله و
بفضلك، استقيت منك العلم والمعرفة، فالكلمات و العبارات
لن توفيك شيئاً من حَقِّك و لو بجزء بسيط عن ما قدمته
لي

عن أبي هريرة رضي الله عنه قال: "قال رسول الله صلى
الله عليه و سلم: "من لا يشكر الناس لا يشكره الله"



A mon professeur, mon encadreur monsieur AISSA MAMOUN, un remerciement particulier et sincère pour tous vos efforts fournis. Vous avez toujours été présent, que ce travail soit un témoignage de ma gratitude et mon profond respect.

Nous avons eu le privilège de travailler parmi votre équipe et d'apprécier vos qualités et vos valeurs.

Nos remerciements s'adresse également à tous nos professeurs pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.



Table des matières

Liste des figures :	6
Liste des tableaux :	7
Résumé :	8
Abstract:	9
ملخص	10
Introduction générale :	11

Chapitre 01 : Généralités sur les barrages

1-1 Définition :	13
1-2 Les différents types de barrages :	13
1-2-1 Les barrages en béton :	14
Les barrages poids :	15
Les barrages voutes :	16
Les barrages à contreforts et à voutes multiples :	17
1-2-2 Les barrages en remblai :	18
Les barrages homogènes :	19
Les barrages à noyau :	20
Les barrages à masque :	20
1-3 L'utilisation des barrages :	21
1-4 Définition des sites :	21
1-5 Ouvrages annexes :	22
Dérivation pendant les travaux de construction :	22
Evacuateur de crues :	23
Vidange de fond et tour de prise :	23
Gabions :	24

Chapitre 02 : Les risques et les vulnérabilités des barrages en terre

2-1 Définition des risques et des vulnérabilités :	27
2-2 La rupture d'un barrage en terre :	27
2-3 Les causes d'accident :	27
2-4 Types de glissements :	27

Glissement plan :	28
Glissement circulaire :	28
2-5 Pathologies liées à l'instabilité de l'ensemble :	28
2-5-1 Le glissement des talus :	28
Le glissement coté aval en situation de crue :	29
Le glissement coté fleuve lors de la décrue :	29
2-5-2 L'instabilité mécanique en fondation :	30
2-6 Pathologie liée aux tassements :	30
2-6-1 Le tassement de la fondation :	30
2-6-2 Le tassement du remblai :	31
2-7 Pathologie liée aux étanchéités :	31
2-7-1 Défauts d'étanchéité du remblai et les conséquences :	31
Les fuites diffuses :	31
La surveillance de la ligne de saturation :	31
Le phénomène de Renard hydraulique :	32
2-7-2 Défauts d'étanchéité en fondation et les conséquences :	32
Les fuites en fondation et / ou sur les rives :	32
La formation des renards :	32

Chapitre 03 : La stabilité des barrages

3-1 Introduction :	34
3-2 Profil général du barrage :	34
3-2-1 Hauteur du barrage :	34
3-2-2 Largeur en crête du barrage :	35
3-2-3 Revanche :	35
3-2-4 Pentes des talus :	35
3-3 Les actions s'appliquent sur un barrage :	36
3-3-1 Actions permanentes :	36
3-3-2 Actions variables :	36
3-3-3 Actions accidentelles :	38
Forces d'inerties provoquées par la structure :	38
3-4 Les ruptures :	40
3-4-1 Principales origines de rupture pour un barrage en terre :	41
3-4-2 Les types de ruptures :	41

3-5 Principe d'analyse :	41
3-5-1 Notion de facteur de sécurité :	42
3-5-2 Choix de la valeur du coefficient de sécurité dans le calcul de stabilité :	43
3-5-3 Etude de stabilité des talus :	43
3-5-4 Causes de glissements :	44
3-6 Différentes méthodes de calcul :	44
3-6-1 Méthodes globales pour les calculs de 'Fs' :	45
3-6-2 Méthodes des tranches pour les calculs de 'Fs' :	45
Méthode de Fellenius :	46
Méthode de Bishop :	46
3-7 Différents cas de stabilité :	47
3-7-1 Fin de construction :	47
3-7-2 Retenue normale :	47
3-7-3 Vidange rapide :	47
3-8 Calcul sismique :	47
3-9 Coefficient de sécurité pour différents cas de fonctionnement :	49
3-10 Les risques d'infiltrations à travers le barrage en terre :	49
3-11 Exemple d'étude d'infiltrations du barrage en terre al izdihar SID EL ABDELI :	50
1 ^{er} cas : Drain horizontal.....	50
2 ^{ème} cas : Drain vertical.....	52
Commentaires :	53
Conclusion :	53

Chapitre 04 : Les méthodes et les techniques d'auscultation des barrages en terre

4-1 Introduction :	56
4-2 Principe général de la surveillance des barrages :	56
4-2-1 Les objectifs de la surveillance :	56
Pendant la construction et la première mise en eau :	56
En phase d'exploitation :	57
Le retour d'expérience :	57
4-2-2 Les principes généraux :	57
4-2-3 Les points principaux de l'inspection pour les barrages en remblai (en terre) :	58
4-3 L'auscultation des barrages en terre :	58

4-4 Les appareils d'auscultation des barrages :	59
4-5 les principaux types de mesures :	60
4-5-1 Mesure de la cote du plan d'eau :	61
4-5-2 Mesure des débits :	62
- Par empotement :	62
- Par seuil calibré	63
4-5-3 Mesure de la piézométrie :	65
Les piézomètres :	65
La mesure des pressions interstitielles :	66
4-5-4 Mesure des déplacements :	69
4-5-5 Mesure de déformations :	70
Fissuromètres :	70
Vinchons :	71
4-7 Les inconvénients des méthodes classiques :	71
4-8 Les nouvelles méthodes d'auscultation :	71
4-8-1 Les méthodes d'auscultation suivant les composantes du barrage :	71
L'auscultation géotechnique :	72
L'auscultation topographique :	74
4-9 L'utilisation des logiciels pour l'auscultation des barrages :	77
Le logiciel : CADAM3D	77
Le logiciel : MONITOR	78
Le logiciel : SURVEY	79
Le logiciel : Auscultex	80
Le logiciel : Leica GeomoS	81
4-10 Repérage des instruments d'auscultation :	82
4-11 Dispositif d'auscultation des barrages en terre :	83
4-12 Périodicité des mesures d'auscultation :	84
4-13 L'interprétation des mesures d'auscultation :	84
La vérification de la mesure :	84
L'analyse des mesures :	84
4-14 L'analyse de quelques phénomènes irréversibles :	85
Augmentation du niveau piézométrique dans un remblai :	85
Augmentation des débits des drains :	85
Baisse des débits des drains :	85



Conclusion et recommandations :.....86



Liste des figures :

FIGURE 1 : UN BARRAGE POIDS.	15
FIGURE 2 : UN BARRAGE VOUTE	16
FIGURE 3 : UN BARRAGE A CONTREFORT.....	17
FIGURE 4 : UN BARRAGE EN REMBLAI	19
FIGURE 5 : UN BARRAGE EN TERRE HOMOGENE.....	19
FIGURE 6 : UN BARRAGE A MASQUE	20
FIGURE 7 : UN TYPE DE DERIVATION DES TRAVAUX	22
FIGURE 8 : EVACUATEUR DE CRUE.....	23
FIGURE 9 : UNE TOUR DE PRISE	24
FIGURE 10 : GABION	25
FIGURE 11 : TYPE DE GLISSEMENT. [11].....	28
FIGURE 12 : LE MECANISME DE GLISSEMENT COTE AVAL EN SITUATION DE CRUE	29
FIGURE 13 : LE MECANISME GLISSEMENT COTE FLEUVE LORS DE LA DECRUE.....	30
FIGURE 14 : SCHEMA DE REPARTITION DES HAUTEURS. [11]	35
FIGURE 15 : POUSSEE HYDROSTATIQUE AMONT [17]	37
FIGURE 16 : POUSSEE HYDROSTATIQUE AVAL [17]	37
FIGURE 17 : ACTION DE SOUS-PRESSION [18]	38
FIGURE 18 : ACTION DE GLACE [16]	38
FIGURE 19 : ORGANIGRAMME DES DIFFERENTES ACTIONS SUR LES BARRAGES.....	40
FIGURE 20 : EFFET DE RUPTURE DES BARRAGES.	40
FIGURE 21 : METHODE DES TRANCHES. [11]	45
FIGURE 22 : METHODE DE BISHOP.....	46
FIGURE 23 : CHARGE DE PRESSION D'EAU POUR UN DRAIN HORIZONTAL	50
FIGURE 24 : CHARGE TOTALE D'EAU POUR UN DRAIN HORIZONTAL	51
FIGURE 25 : PRESSION D'EAU POUR UN DRAIN HORIZONTAL	51
FIGURE 26 : CHARGE DE PRESSION D'EAU POUR UN DRAIN VERTICAL.....	52
FIGURE 27 : CHARGE TOTALE D'EAU POUR UN DRAIN VERTICAL	52
FIGURE 28 : PRESSION D'EAU POUR UN DRAIN VERTICAL	53
FIGURE 29 : IDENTIFICATION D'UN PIEZOMETRE. [26]	59
FIGURE 30 : IDENTIFICATION D'UN FISSUROMETRE. [26].....	60
FIGURE 31 : ECHELLE LIMNIMETRIE INSTALLEE SUR UNE TOUR DE PRISE. [25]	61
FIGURE 32 : ECHELLE LIMNIMETRIE POSEE SUR LE PAREMENT AMONT. [25]	62
FIGURE 33 : EXUTOIRE D'UN DRAIN PERMETTANT DES MESURES PAR EMPORTEMENT DEPUIS LE FOSSE DU PIED. [25]	63
FIGURE 34 : SEUIL CALIBRE TRIANGULAIRE POUR MESURE DES DEBITS, EQUIPE DE SON LIMNIMETRIE AMONT. [25]	63
FIGURE 35 : DISPOSITIF DE MESURE AUTOMATIQUE TELETRANSMISE D'UN DEBIT DE FOSSE DE DRAINAGE, SEUIL TRIANGULAIRE ET CAPTEUR A ULTRASON. [25]	64
FIGURE 36 : -(A) SCHEMA D'UN DEVERSOIR A PAROI MINCE : VUE D'EN FACE. [25].....	64
FIGURE 37 : APPAREIL DE MESURE PIEZOMETRIQUE. [11]	66
FIGURE 38 : LECTURE PIEZOMETRIQUE. [11]	66
FIGURE 39 : LE PIEZOMETRE A TUBE OUVERT. [26]	67
FIGURE 40 : CELLULE AVEC DISPOSITIF DE MESURE A CONTRE PRESSION. [11].....	68
FIGURE 41 : TABLEAU DE MESURE DES PRESSIONS INTERSTITIELLES. [25]	68
FIGURE 42 : CELLULE DE PRESSION INTERSTITIELLE A CORDE VIBRANTE. [25]	69
FIGURE 43 : CELLULE A CORDE VIBRANTE [11].....	69
FIGURE 44 : FISSUROMETRE ELECTRONIQUE 3D ET LES DEPLACEMENTS SUIVIE [11]	70

FIGURE 45 : VINCHON [25]	71
FIGURE 46 : LES DIFFERENTS INSTRUMENTS UTILISES POUR L'AUSCULTATION GEOTECHNIQUE	72
FIGURE 47 : UNE SONDE PIEZOMETRIQUE [11]	72
FIGURE 48 : LES DIFFERENTS TYPES DES PIEZOMETRES	73
FIGURE 49 : A DROITE LE PRINCIPE DU SONAR, A GAUCHE SONAR A SONAR A PROFONDEUR VARIABLE ET SON TREUIL	74
FIGURE 50 : UTILISATION D'UN GPS POUR LA DETECTION DES PROBLEMES TOPOGRAPHIQUE	75
FIGURE 51: RECEPTEUR GPS PERMANENT	76
FIGURE 52: SCANNER 3D AVEC RESULTAT DES MESURES A DROITE	76
FIGURE 53: RADAR PAR PRINCIPE D'INTERFEROMETRIE	77
FIGURE 54 : PRISE D'ECRAN DU LOGICIEL CADAM3D	78
FIGURE 55 : PRISE D'ECRAN DU LOGICIEL MONITOR.....	79
FIGURE 56 : PRISE D'ECRAN DU LOGICIEL SURVEY	80
FIGURE 57 : PRISE D'ECRAN DU LOGICIEL AUSCULTEX	81
FIGURE 58 : UTILISATION DU LOGICIEL LEICA GEOMOS POUR L'AUSCULTATION DES BARRAGES	82

Liste des tableaux :

TABLEAU 1: INCLINAISON DES PENTES (AMONT-AVAL)	36
TABLEAU 2 : LES DIFFERENTES VALEURE DE 'Fs'	43
TABLEAU 3 : COEFFICIENT DE SECURITE POUR MULTIPLES CAS DE FONCTIONNEMENT	49

Résumé :

Pour comprendre le comportement à long terme d'un barrage , il est essentiel de procéder à la méthode d'auscultation qui est une méthode quantitative basée sur la mesure d'instruments, soigneusement choisis et positionnés pour vérifier et se rendre compte de l'évolution du comportement du barrage.

Il est nécessaire avant l'interprétation de l'auscultation du barrage d'étudier tous d'abord les pathologies liées aux barrages, puis la stabilité de ces types de barrage afin de connaître les actions auxquelles ces barrages sont soumis.

L'objectif de notre travail est de faire un survol sur les techniques et les méthodes utilisées actuellement en auscultation.

Cette étude nous a permis de faire une nouvelle classification selon les instruments et les technologies utilisés et de mettre en place une stratégie d'installation des systèmes d'auscultations des systèmes d'auscultations sous forme de recommandations.

Mots-clés : Barrage en terre, Auscultation, Techniques de mesure.

Abstract:

To understand the long-term behavior of an Embankment dam, it is essential to proceed to the auscultation method which is a quantitative method based on the measurement of instruments, carefully chosen and positioned to check and realize the evolution of the behavior of the dam.

Before interpreting the auscultation test, we must first study all the pathologies linked to the dams, then the stability of these types of dams in order to know the actions to which these dams are subjected.

The OBJECTIVE of our work is to provide an overview of the techniques and methods currently used in auscultation.

This study allowed us to make a new classification according to the instruments and the technologies used and to set up a strategy of installation of the systems of monitoring of the systems of monitoring in the form of recommendations.

Keys-words : Embankment -DAM, Auscultation, Techniques of measurement.

ملخص

لفهم سلوك السد على المدى الطويل، من الضروري المضي في طريقة التسمع وهي طريقة كمية تستند إلى قياس الأدوات، يتم اختيارها بعناية ووضعها للتحقق من التطور وتحقيقه عن سلوك السد.

قبل تفسير اختبار التسمع ، يجب علينا أولاً دراسة جميع الأمراض المرتبطة بالسدود ، ثم استقرار هذه الأنواع من السدود لمعرفة الإجراءات التي تتعرض لها هذه السدود.

الهدف من عملنا هو تقديم نظرة عامة على التقنيات والأساليب المستخدمة حالياً في التسمع.

سمحت لنا هذه الدراسة بعمل تصنيف جديد حسب الأدوات والتقنيات المستخدمة ووضع استراتيجية لتكوين أنظمة المراقبة لنظم المراقبة في شكل توصيات. كلمات المفتاح : سد طيني ، تسمع ، تقنيات القياس

Introduction générale :

Les barrages sont des constructions particulières de point de vue technique et économique, cela justifie certainement les hautes exigences imposées en ce qui concerne l'étude du projet, la conception et l'exploitation. En effet, le choix du type de barrage nécessite la prise en compte de plusieurs facteurs, citant la forme de la vallée(morphologie), la géologie, les conditions climatiques, la sismicité et la disponibilité des matériaux de construction, en vue de choisir la variante la plus économique tout en garantissant le plus haut degré de sécurité, et en minimisant les impacts causés par l'ouvrage. [1]

Les barrages présentent aussi un grand potentiel de danger, de ce fait, il est très important d'en assurer sa sécurité par la surveillance et l'auscultation qui est destinée à quantifier le comportement des barrages grâce au suivi des paramètres physique, qui est destinée aussi à aider à la surveillance immédiate de façon à détecter rapidement une évolution et délivrer une alarme. L'auscultation répond aussi à l'objectif d'améliorer la connaissance du comportement du barrage et de son évolution de façon à pouvoir détecter, en temps utile, des dérives dangereuses à moyen et long terme. [2]

Le présent travail nous permet d'étudier l'auscultation des barrages en terre à partir de cinq chapitres comme suit :

Chapitre 01 : il est consacré aux aspects généraux sur les barrages, leurs types, ainsi que leurs paramètres qui peuvent influencer sur la définition des sites.

Chapitre 02 : ce chapitre explique les différentes pathologies des barrages en terre qui peuvent menacer la stabilité des barrages et provoquer un risque.

Chapitre 03 : l'objectif de ce chapitre est d'étudier la stabilité du barrage en terre en citant les principes d'analyse ainsi que les différentes actions sur un tel type de barrage.

Chapitre 04 : il est consacré pour l'étude des mesures et les méthodes d'auscultation et de surveillance pour les barrages en terre.

Chapitre 05 : dans ce chapitre, on va étudier l'état de l'art des techniques et d'instruments d'auscultation.

Chapitre 01 : Généralités sur les barrages

1-1 Définition :

Un barrage est un ouvrage d'Art placé en travers d'un cours d'eau, destiné à retenir et stocker de l'eau ou à la dériver, notamment pour le contrôle des crues, l'irrigation, l'industrie, l'hydroélectricité, une réserve d'eau potable, etc. ...

Un barrage submersible est plutôt nommé chaussée, seuil ou digue, ce dernier terme est préféré au mot barrage quand il s'agit de canaliser un flot.

Un barrage fluvial permet de réguler le débit de l'eau, au profit du trafic fluvial, de l'irrigation, d'une prévention relative des catastrophes naturelles (crues, inondations), par la création de lacs artificiels ou de réservoirs. Il permet souvent la production de force motrice (moulin à eau) et d'électricité, on parle alors de barrage hydroélectrique. [3]

Le mot « barrage » mérite qu'on s'y arrête. La définition du Petit Larousse définit le mot barrage comme un ouvrage artificiel barrant un cours d'eau. Le caractère artificiel de l'ouvrage permet d'exclure les barrages naturels qui peuvent parfois se former.

Les barrages sont définis par des caractéristiques physiques (la hauteur, le volume de la retenue derrière le barrage), par un type de barrage selon sa forme ou les matériaux qui le constituent, par une utilisation principale... L'ensemble de ces critères donnent des clés d'entrée multiples pour classer les ouvrages. [4]

1-2 Les différents types de barrages :

On distingue, de façon schématique, divers types de barrages :

Suivant leur fonction :

Sachant qu'un même ouvrage sert le plus souvent à plusieurs fonctions:

- Accumulation d'eau restituée pour la production d'énergie, l'alimentation en eau ou l'irrigation ;
- Régulation d'un cours d'eau pour la navigation ou la gestion des crues et des étiages.

Suivant leurs caractéristiques géométriques :

- Barrages réservoirs, de grande hauteur.
- Barrages au fil de l'eau, sur le cours d'une rivière.

Suivant leur conception :

- Barrages poids, pour lesquels, comme leur nom l'indique, c'est la masse de l'ouvrage qui s'oppose à la pression de l'eau.

- Barrages voutes, pour lesquels la pression de l'eau est transmise par l'ouvrage sur les parois latérales.

Un barrage comporte toujours divers composants :

- le barrage proprement dit, qui retient l'eau, avec un masque d'étanchéité.
- un évacuateur de crues, évitant un excès d'eau dans le réservoir.
- des dispositifs de contrôle et de surveillance.

Pour les barrages réservoirs :

- une prise d'eau, pour envoyer l'eau vers son utilisation.
- une vanne de fond, pour permettre la vidange du réservoir.

Pour les barrages au fil de l'eau :

- des vannes de régulation du débit.
- souvent des écluses et des passes à poissons. [5]

1-2-1 Les barrages en béton :

Un barrage en béton est une structure solide et rigide et réalisée selon l'importance du projet, par exemple :

- Besoin d'évacuateur de crues.
- La production de l'énergie électrique.
- L'existence d'une fondation rocheuse de bonne qualité.

L'avantage du béton est notamment d'autoriser l'édification d'ouvrages plus résistants. Il en existe deux principaux types :

- les barrages poids.
- les barrages voûte.

S'y ajoutent les barrages à contrefort et à voûtes multiples, variantes des deux premiers.

Les barrages poids :

Ce type de barrage oppose son poids à l'eau pour la retenir. En fonction des propriétés de résistance du matériau, la forme triangulaire à l'aval de l'ouvrage s'est peu à peu imposée.

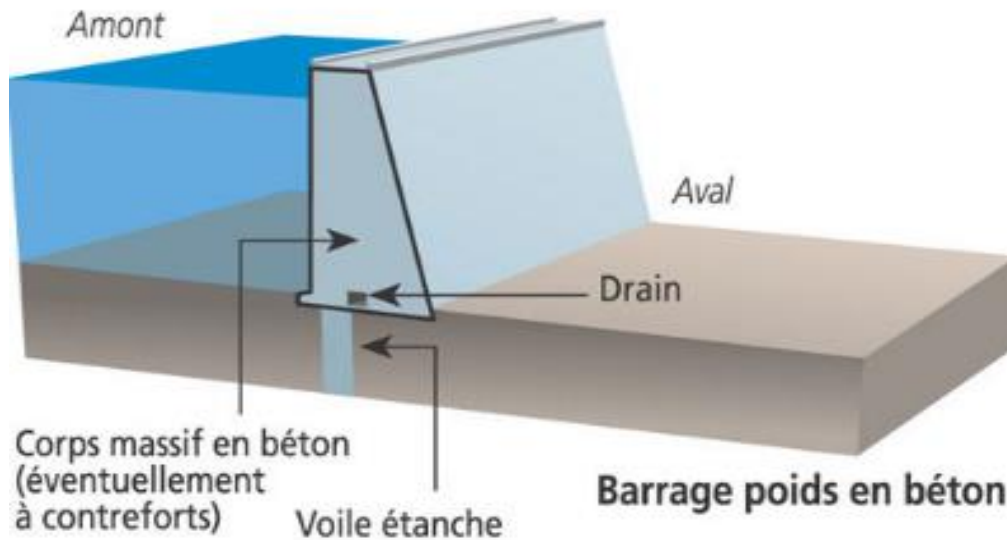


Figure 1 : Un barrage poids.

Les avantages :

- ➔ Grande pression sur le béton.
- ➔ Faibles contraintes transmises aux roches.
- ➔ Evacuateur de crues facilement intégrés.
- ➔ Gradient hydraulique faible au niveau de la fondation.

Les inconvénients :

- ➔ Grand volume d'excavation.
- ➔ Utilisation du béton très élevée.
- ➔ Refroidissement artificiel pendant la prise du béton.
- ➔ Grand risque de tassements et de renversement, et au séisme au cas d'absence d'une injection entre les blocs.
- ➔ Pression interstitielle importante au niveau de la fondation.

Les barrages voûtes :

Le barrage voûte représente l'ultime aboutissement de l'utilisation des propriétés du béton en termes de résistance. Il permet des économies de volume d'au moins 30 % par rapport à un barrage-poids.

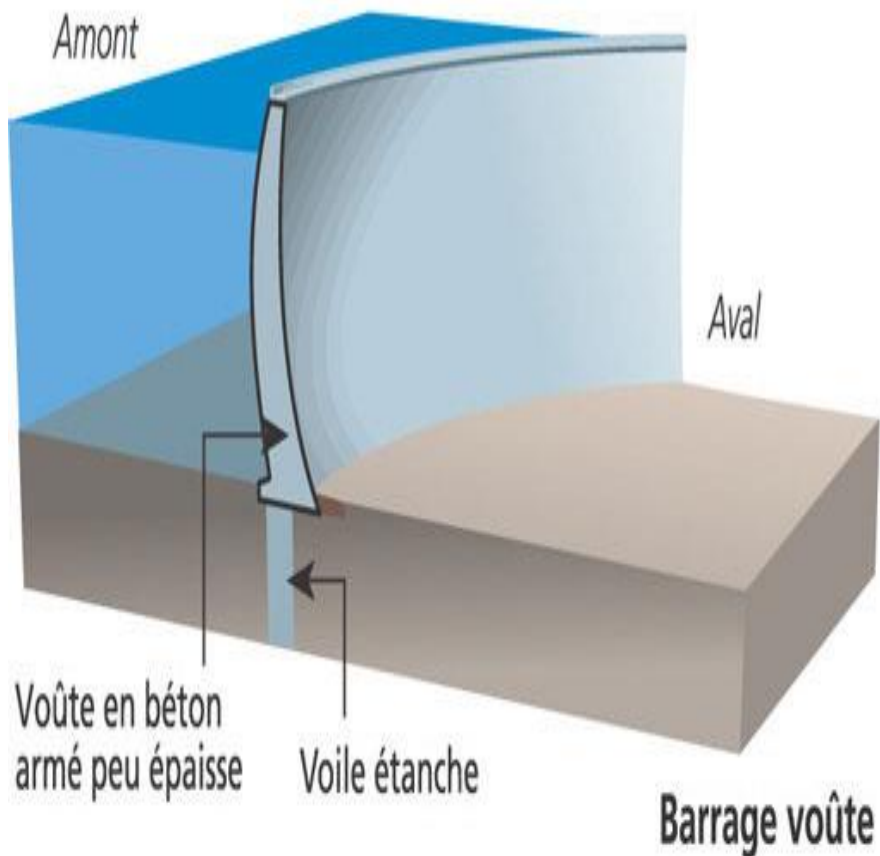


Figure 2 : Un barrage voûte

Les avantages :

- Le béton utilisé est faible.
- Grande résistance au séisme.

Les inconvénients :

- Le tassement est moyen.
- L'incorporation de l'évacuateur de crue n'est pas aussi facile.
- Le gradient hydraulique au niveau de la fondation est important.

Les barrages à contreforts et à voutes multiples :

Les autres formes de barrages voûtes sont des variantes des deux premiers types. Le barrage à contrefort est ainsi un barrage poids allégé de l'intérieur. Le barrage à voûtes multiples, quant à lui, repose sur des appuis intermédiaires, lorsqu'une trop grande portée sépare les deux rives d'un cours d'eau.



Figure 3 : Un barrage à contrefort

Les avantages :

- ➔ La contrainte supportée par la fondation rocher est moyenne.
- ➔ Le béton utilisé est faible.
- ➔ Le risque du tassement est moyen.
- ➔ La stabilité latérale seulement aux séismes.
- ➔ Faible pression interstitielle au niveau de fondation.

Les inconvénients :

- ➔ Grand risque aux séismes.
- ➔ Faible résistance à la gravité.
- ➔ Le volume de l'excavation est important.
- ➔ Le gradient hydraulique très élevé au niveau de la fondation.

1-2-2 Les barrages en remblai :

Les barrages en terre présentent notamment l'avantage de pouvoir reposer sur des fondations de médiocre qualité, c'est-à-dire compressibles.

Tous les barrages en terre peuvent être considérés comme des barrages-poids, c'est-à-dire qu'ils résistent à la pression de l'eau par leur propre poids. C'est ce qui explique leur section de forme trapézoïdale.

On en trouve de trois types :

- homogène.
- à noyau.
- à masque.

La plupart de ces barrages ont une structure souple, ils sont construits par des matériaux naturels comme l'argile, les roches, et les pierres, ses parties principales sont :

- le noyau : on utilise des sols fins pour assurer l'étanchéité du barrage et sa position est variée, verticale, inclinée, centrée...etc.
- les recharges : on les construit par des sols différents que le sol du noyau (sols frottant perméables) pour supporter et protéger le noyau.
- le drain : à partir de son nom, il assure l'écoulement de l'eau dans le sol et diminue la pression interstitielle, pour cela il doit contenir des sols très perméables.
- les filtres : ce sont des parties peu épaisses, on les place entre les différentes parties contre l'infiltration des eaux et pour éviter le phénomène de renard (l'érosion interne).
- le rip-rap : couche superficielle constitué par des blocs d'encrochements sur les côtés du remblai pour le protéger contre les vagues.

Barrage en terre compactée, homogène

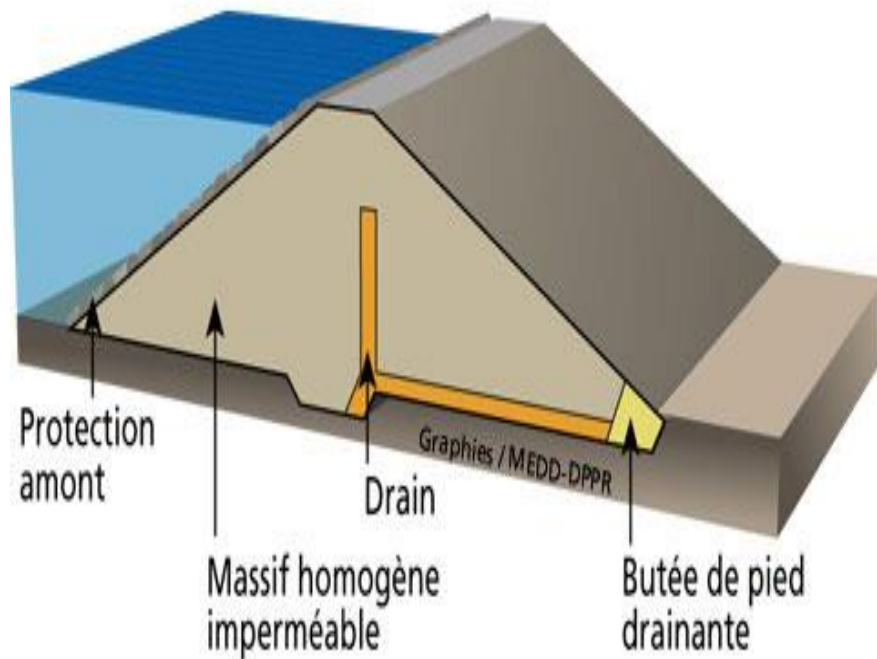


Figure 4 : Un barrage en remblai

Les barrages homogènes :

Un barrage en terre est dit homogène lorsqu'il est constitué d'un même matériau à dominante argileuse, relativement imperméable. Selon les ouvrages, la pente des talus sera plus ou moins forte, en fonction notamment des caractéristiques du matériau employé.

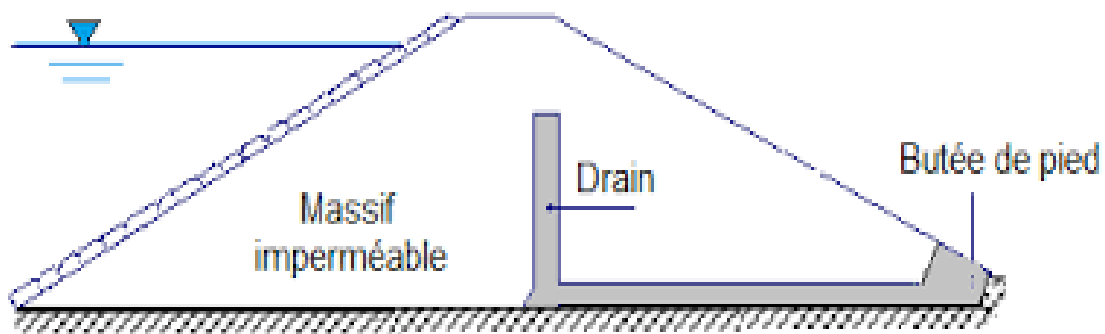


Figure 5 : Un barrage en terre homogène

Les barrages à noyau :

Dans un barrage à noyau, les fonctions de résistance et d'étanchéité sont en quelque sorte séparées. La résistance est assurée par les recharges placées sur les flancs de l'ouvrage, et l'imperméabilité par le noyau central.

Le noyau au centre de l'ouvrage va être constitué de la terre la plus imperméable possible. Il sera tenu de part et d'autre par des recharges composées, selon les cas, de terre plus perméable, d'alluvions ou d'enrochements.

Les barrages à masque :

Il peut aussi exister des sites où aucune terre n'est disponible, mais seulement des enrochements. Ceux-ci sont alors employés pour réaliser le corps du barrage, tandis que l'étanchéité est assurée par un masque de béton, ciment ou béton bitumineux posé sur l'ouvrage lui-même, côté amont.

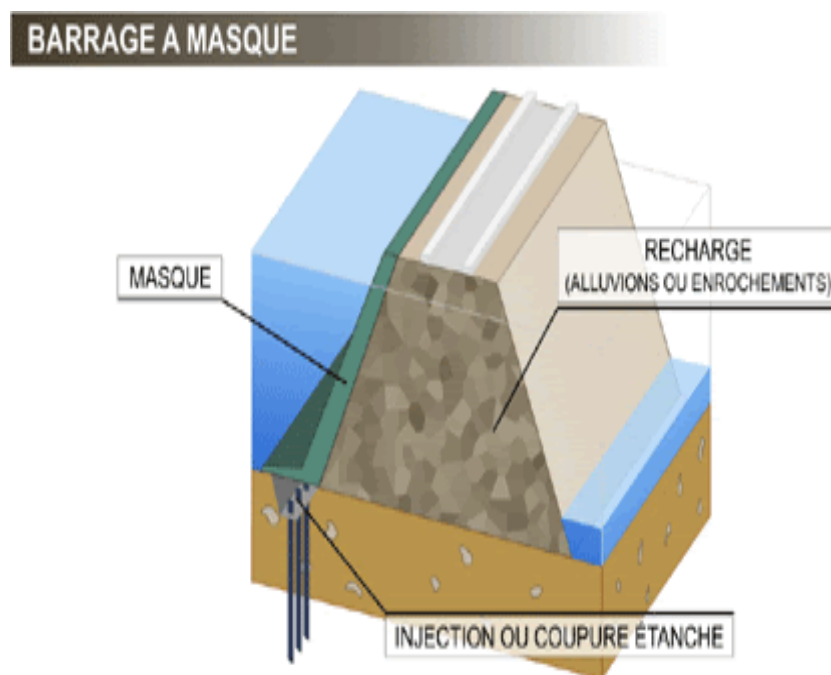


Figure 6 : Un barrage à masque

1-3 L'utilisation des barrages :

Les barrages peuvent être construits pour plusieurs objectifs :

- Produire de l'électricité à partir d'une énergie renouvelable, celle de l'eau, avec des usines hydroélectriques accolées au barrage ou situées plus bas dans la vallée et alimentées par des conduites forcées.
- Créer des réserves d'eau pour l'alimentation en eau potable des villes. L'eau peut également être nécessaire pour des besoins industriels.
- Irriguer des zones agricoles ayant de gros besoins en eau lors des périodes sèches.
- Alimenter en eau les canaux.
- Maintenir dans les rivières un débit minimum suffisant lors des étiages, pour assurer à la fois une qualité écologique satisfaisante des rivières et permettre les prélèvements par pompage à l'aval (pour des besoins d'alimentation en eau, d'irrigation...).
- Réduire l'effet des crues en retardant l'eau grâce au stockage dans la retenue qui se remplit pour la relâcher après le passage de la crue. [5]

1-4 Définition des sites :

Chaque site a des caractéristiques techniques propres, et pour faire le choix d'un site du barrage on distingue les différents critères suivants :

- ✓ Garantir la demande en eau à crée par la retenue, choisir alors un site en conséquence.
- ✓ Géologie d'éventuel emplacement du barrage et de la retenue.
- ✓ Un resserrement de la gorge liant les deux rives souhaité, soit vallée étroite d'où volume du barrage minium.
- ✓ Choisir l'emplacement rapproché des zones d'accès existantes, faciles pour éviter la création d'autres voies importantes pour engin et main d'œuvre.
- ✓ Un site convenant à l'emplacement des ouvrages annexes. [2]

1-5 Ouvrages annexes :

On peut diviser le barrage en deux parties :

- ✓ ouvrage principal (le corps).
- ✓ Ouvrages annexes très importants.

Dérivation pendant les travaux de construction :

Le rôle de cet ouvrage est de protéger le chantier vis-à-vis le risque de l'inondation.

1-barrage en construction.

2-canal de dérivation.

3-batardeau amont.

4-batardeau aval.

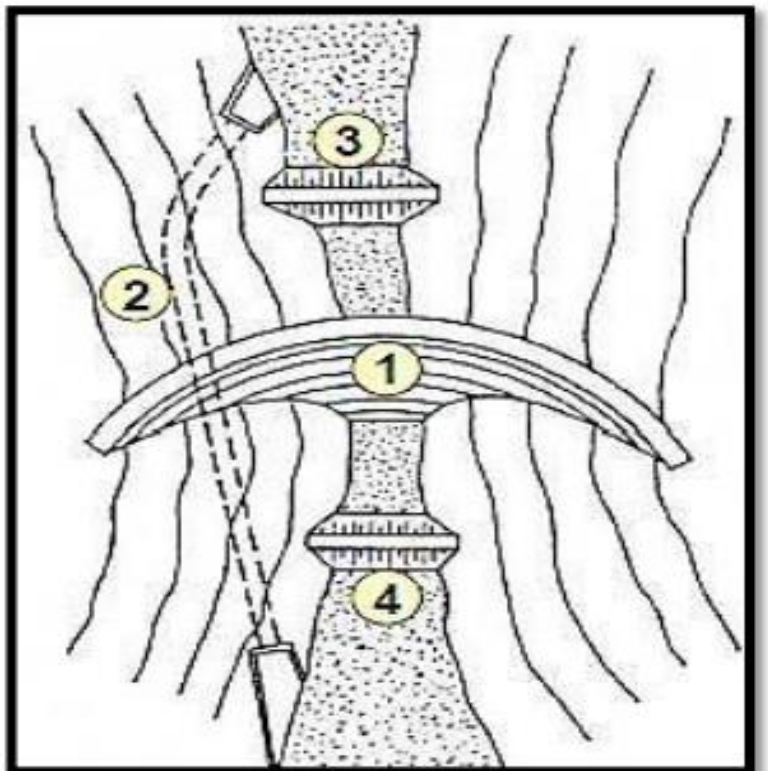


Figure 7 : Un type de dérivation des travaux

Evacuateur de crues :

On utilise l'évacuateur comme un déversoir libre des eaux de l'amont vers l'aval, pour assurer la sécurité au gel et le passage des corps flottants.

L'évacuateur est composé de trois éléments :

- ouvrage d'entrée.
- ouvrage de transport.
- ouvrage de sortie.



Figure 8 : Evacuateur de crue

Vidange de fond et tour de prise :

Ces ouvrages ont une grande importance dans les barrages car ils assurent :

- ⇒ La vidange complète et rapide du barrage.
- ⇒ Alimenté l'aval par l'eau dans les cas exceptionnels.
- ⇒ Stabilité des talus amont et aval.
- ⇒ Eviter la crue du chantier et produire l'énergie hydroélectrique.



Figure 9 : Une tour de prise

Gabions :

Ce sont des ouvrages flexibles et temporaires, on les construit à partir de remplissage des cages grillagées par les cailloux. Le gabion joue un rôle de mur de soutènement protégeant la vallée contre l'érosion fluviale et l'inondation. [6]



Figure 10 : Gabion

Chapitre 02 : Les risques et les vulnérabilités des barrages en terre

2-1 Définition des risques et des vulnérabilités :

- ⇒ Le **risque** est la confrontation d'un aléa (phénomène naturel dangereux) et d'une zone géographique où existent des enjeux qui peuvent être humains, économiques ou environnementaux.
- ⇒ En étude et gestion des risques, la **vulnérabilité** d'un groupe, d'une organisation, d'un élément bâti ou d'une zone géographique est le point faible de cette entité.

2-2 La rupture d'un barrage en terre :

Une rupture de barrage se produit lorsque la structure cède à des événements naturels (séisme, mouvement de terrain, crue, ...) ou de défaillances humaines (mauvaise conception, négligence, sabotage, ...)

2-3 Les causes d'accident :

Les causes de rupture peuvent être diverses :

a) Techniques :

Défaut de fonctionnement des vannes permettant l'évacuation des eaux, vices de conception, de construction ou de matériaux, vieillissement des installations,...

b) Naturelles :

Séismes, crues exceptionnelles, glissements de terrain (soit de l'ouvrage lui-même, soit des terrains entourant la retenue et provoquant un déversement sur le barrage).

c) Humaines :

Insuffisance des études préalables et du contrôle d'exécution, erreurs d'exploitation, de surveillance et d'entretien, malveillance ...

d) Progressives :

Dans le cas des barrages en remblais, par érosion régressive, suite à une submersion de l'ouvrage ou à une fuite à travers celui-ci (phénomène de « renard »).

e) Brutale :

Dans le cas des barrages en béton, par renversement ou par glissement d'un ou plusieurs plots.

[6]

2-4 Types de glissements :

On distingue deux types de glissement suivant la forme de plan de rupture :

Glissement plan :

Il se produit suivant un plan, au niveau d'une surface de discontinuité géologique, zone entre deux matériaux de nature différente. La ligne de rupture suit une couche mince de mauvaises caractéristiques sur laquelle s'exerce souvent l'action de l'eau. Une telle couche est appelée « couche savon », ce type de glissement est très rare dans les barrages.

Glissement circulaire :

Dans le cas des ruptures plus ou moins circulaires, on distingue deux méthodes :

- ✓ La première c'est la méthode globale : Elle suppose que le milieu est homogène et que la masse est en équilibre limite.
- ✓ La seconde c'est la méthode des tranches : Elle consiste à diviser la masse instable en un certain nombre de tranches verticales. [18]

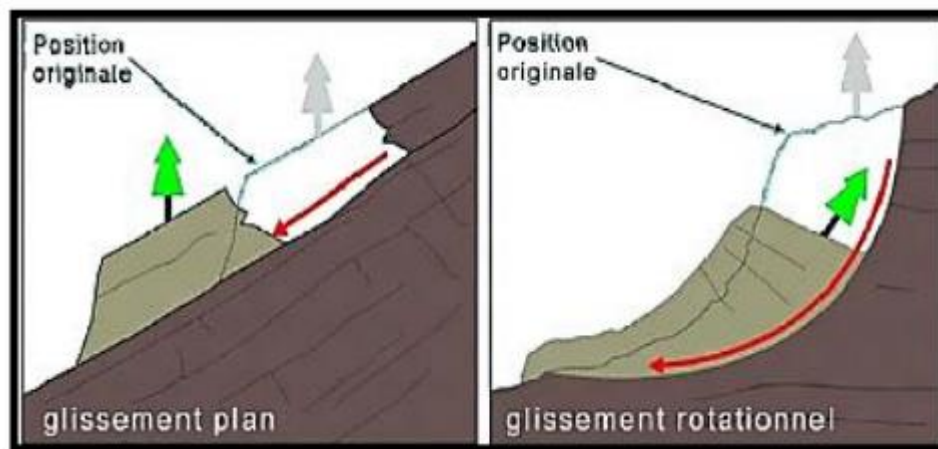


Figure 11 : Type de glissement. [11]

2-5 Pathologies liées à l'instabilité de l'ensemble :

Un ouvrage instable mécaniquement se caractérise par l'apparition de désordres dans sa masse qui se traduisent, en surface, par des déformations géo mécaniques décelables, au stade primaire, par l'auscultation topographique.

Schématiquement, deux formes d'instabilité mécanique peuvent être distinguées dans l'étude de la pathologie des ouvrages en remblai :

2-5-1 Le glissement des talus :

Il existe deux mécanismes de glissement :

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

Le glissement coté aval en situation de crue :

Ce mécanisme se produit lorsque trois facteurs sont réunis :

- Un profil de digue étroit avec pentes de talus fortes.
- Une piézométrie élevée dans la digue liée à l'absence de drainage et/ou à la présence des couches hétérogènes.
- Une faible compacité du remblai donnant de faibles caractéristiques mécaniques des matériaux du corps de digue, ou encore la présence d'une couche argileuse sous consolidée au niveau de la fondation.

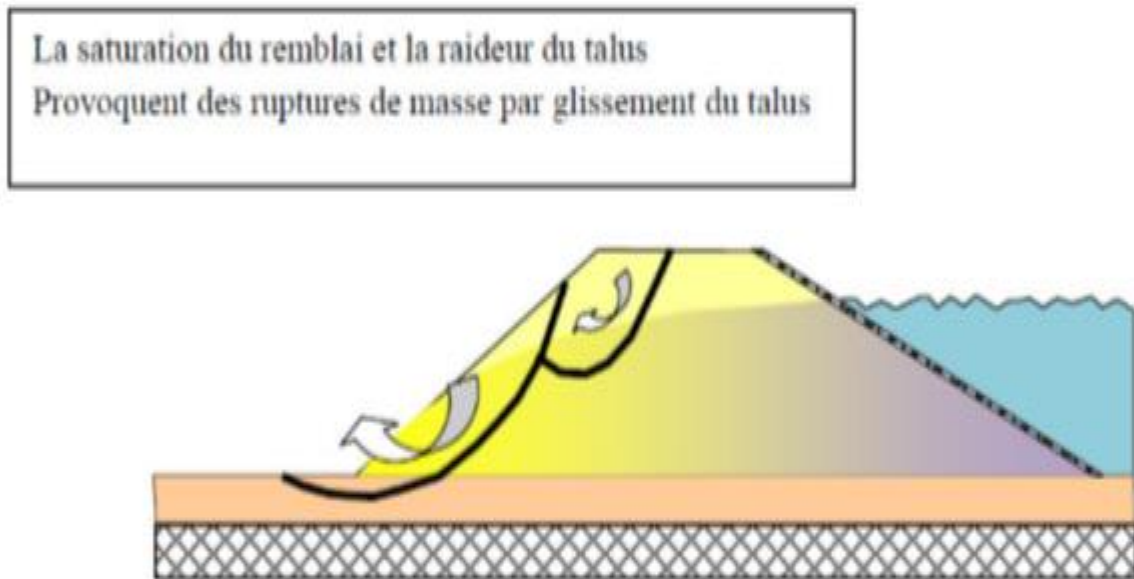


Figure 12 : Le mécanisme de glissement coté aval en situation de crue

Le glissement coté fleuve lors de la décrue :

Le mécanisme de rupture par glissement côté fleuve se produit lors de la décrue rapide du cours d'eau. Ce mécanisme, lié aux sous-pressions qui se développent pendant la période de crue, concerne surtout des talus de digues constitués de matériaux argileux, présentant des pentes raides ou des perrés trop étanches.

Ce mécanisme concerne particulièrement les digues à proximité de déversoirs équipés de remblais fusibles (remblai destiné à se rompre lorsque la hauteur d'eau l'atteint). En effet, la mise en fonction du déversoir s'accompagne de l'érosion rapide du remblai fusible.

Le débit dérivé dans le déversoir croît, ce qui provoque une décrue dans le fleuve pouvant alors provoquer des glissements de talus côté fleuve.

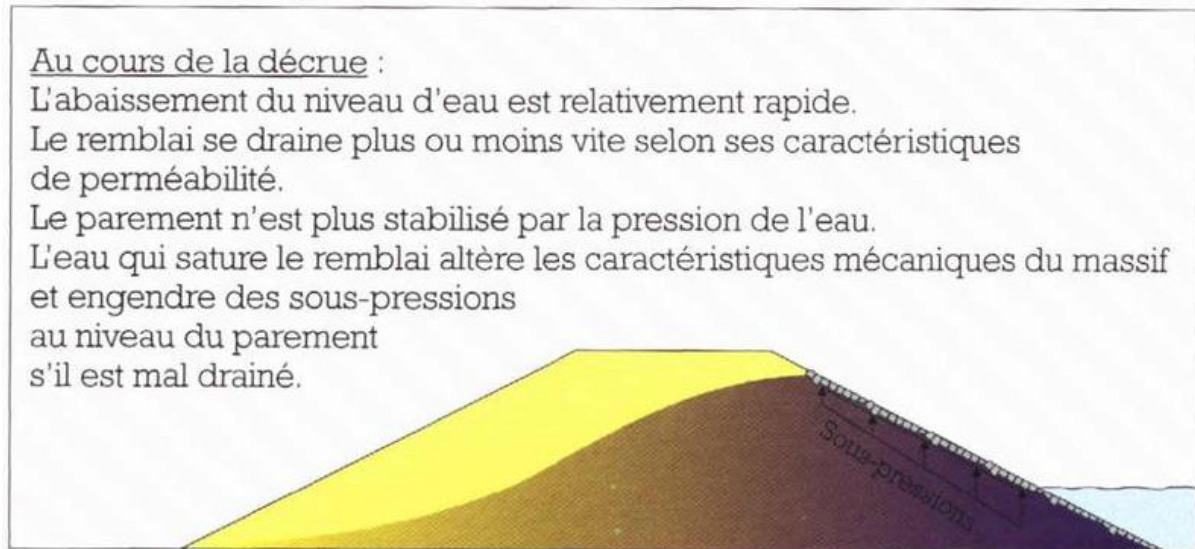


Figure 13 : Le mécanisme glissement coté fleuve lors de la décrue

2-5-2 L'instabilité mécanique en fondation :

Un barrage en remblai, par nature, sollicite moins sa fondation qu'un ouvrage poids : c'est la raison pour laquelle il est considéré comme le barrage des fondations « meubles ».

Rappelons, néanmoins, que la résistance mécanique de la fondation peut conditionner la stabilité :

En effet, des lignes de glissement affectant les talus, peuvent également recouper la fondation.

En outre, dans certains cas particuliers, la présence en fondation d'une couche mince aux médiocres propriétés mécaniques est susceptible de favoriser, sous la poussée du remblai, l'apparition d'un glissement de type plan le long de cette ligne de faiblesse.

2-6 Pathologie liée aux tassements :

2-6-1 Le tassement de la fondation :

Un tassement de la fondation, local ou généralisé peut :

- Réduire la revanche en crête d'ouvrage en se cumulant, par exemple, avec un tassement du remblai.
- Détruire ou endommager des conduites et des dispositifs de drainage situés à la base du remblai : cassures ou déboitement des canalisations, apparition de contrepentes,...

Aussi, les couches reconnues comme très compressibles à l'étude préalable (terre végétale, tourbe, alluvions non stabilisées) sont à décaper lors des travaux préparatoires afin de minimiser la valeur des tassements potentiels .si l'enlèvement complet de ces couches n'est

pas économiquement possible, des dispositions constructives particulières doivent être prévues dans le projet (larges risbermes amont et aval).

2-6-2 Le tassement du remblai :

Le remblai, même après compactage, reste un matériau compressible, surtout s'il s'agit d'une argile. Les couches de base du remblai sont, en effet, soumises au poids des couches supérieures et sont d'autant plus sujettes au tassement que la hauteur de l'ouvrage est importante.

Cependant, pour les petits barrages, construits avec des moyens de compactage appropriés, le tassement après du corps de remblai demeure limité voire négligeable. On considère habituellement que le tassement après construction d'un remblai correctement compacté est de l'ordre de 1% de sa hauteur, ce tassement étant quasiment nul pour les remblais de moins de 10 à 15 m de hauteur.

2-7 Pathologie liée aux étanchéités :

L'étanchéité du barrage, repose en fait sur :

- L'étanchéité du corps du remblai.
- L'étanchéité de la fondation et des rives, qui permet, en fait de raccorder l'étanchéité du remblai avec celle de la cuvette.

Les pathologies liées au défaut d'étanchéité du remblai sont malgré tout fréquentes même si les conséquences ne se montrent pas systématiquement graves.

2-7-1 Défauts d'étanchéité du remblai et les conséquences :

Les fuites diffuses :

C'est, bien sûr, le premier cas pathologique qu'il faut citer. Lorsque le remblai s'avère trop perméable et, par voie de conséquence, le débit de fuites est trop élevé, le volume d'eau utilisable devient inférieur aux prévisions et ne permet plus de satisfaire la totalité des besoins.

La surveillance de la ligne de saturation :

Le problème se pose lorsque, par erreur sur l'identification hydrodynamique des matériaux constitutifs ou suite à des défauts d'exécution, le remblai affiche un comportement hydraulique interne sensiblement différent de celui escompté, avec une ligne de saturation plus élevée que prévu. Outre le problème des débits de fuite, une telle configuration altère les conditions de stabilité du talus aval, et de plus, peut engendrer des sous pressions, non prises en remblai (évacuateur de crues, par exemple)

Enfin, et surtout, l'apparition d'un renard est à craindre.

Le phénomène de Renard hydraulique :

Plus la perméabilité croît, plus la vitesse de percolation, à l'instar du débit de fuite, augmente : il s'agit-là de l'une des premières conséquences de la loi de Darcy :

- ➔ Si les vitesses deviennent trop importantes, les particules solides du remblai sont susceptibles d'être entraînées, notamment au débouché des lignes de courant sur le talus aval.

On peut alors assister à la naissance d'un « renard » sous la forme d'un petit tunnel où l'eau circule de plus en plus facilement, avec l'amplification du gradient hydraulique, et qui progresse vers l'amont jusqu'à déboucher dans la retenue : on parle aussi d'érosion interne.

La trop grande perméabilité d'un remblai n'est cependant pas une condition nécessairement suffisante à la formation de renards, d'autres facteurs très importants interviennent dans l'explication du phénomène :

- ➔ Le gradient hydraulique (qui, lui aussi, conditionne la vitesse d'écoulement des eaux d'infiltration).
- ➔ L'hétérogénéité du remblai (défauts d'exécution : compactage insuffisant par places, mauvaise provenance des matériaux, lignes d'écoulement privilégiées le long des conduites prises dans le remblai ...).

L'évolution des phénomènes conduisant à la formation des renards peut être très lente (plusieurs années), mais tend à s'accélérer rapidement dès qu'apparaissent les premières manifestations visibles. Dans ce cas, une vidange partielle ou totale du plan d'eau s'impose dans les plus brefs délais.

2-7-2 Défauts d'étanchéité en fondation et les conséquences :

Les fuites en fondation et / ou sur les rives :

Les terrains de fondation du barrage forment la délicate charnière du « raccordement » de l'étanchéité de la cuvette avec celle du remblai.

Les débits de fuite qui résultent de telles pathologies sont souvent considérables et conduisent, parfois, purement et simplement, au non –remplissage de la retenue.

Une perméabilité excessive de la fondation peut engendrer un certain nombre d'effets secondaires préjudiciables tels que l'apparition de sous –pression dans la zone de talus aval du remblai sous pressions susceptibles d'en remettre en cause la stabilité.

La formation des renards :

L'apparition de renards dans un remblai de barrage découle a priori d'un défaut d'exécution.

Le même phénomène observé en fondation relève fréquemment d'une nature particulière de sol, non reconnue ou insuffisamment prise en compte lors des études préalables. [9]

Chapitre 03 : la stabilité des barrages

3-1 Introduction :

La stabilité d'un barrage en remblai réside dans la stabilité aux glissements de ses talus pour toute sollicitation pouvant survenir.

L'objet de ce chapitre est l'étendue de l'équilibre mécanique des masses de sol pouvant être mis en mouvement, soit par des phénomènes naturels (érosion, tremblements de terre...) soit consécutivement à des travaux de chantier (terrassements, remblais, constructions). Les différents mouvements de terrains peuvent se classer en 3 catégories :

- **les écoulements** : chutes soudaines de masses rocheuses. Les causes peuvent être internes au massif (altération, accroissement de la pression interstitielle, glissement banc sur banc dans une roche stratifiée) ou externes (écroulement de masse mises en surplomb par érosion de masses sous-jacentes plus tendres, fluage ou glissement d'une masse sous-jacente).
- **les coulées** : mise en mouvement brutal de masses de sol à l'état « liquide ».
- **le fluage** : par opposition aux mouvements précédents, celui-ci est lent, de faible amplitude et se développe dans une zone dont les dimensions sont mal définies.

Pour déterminer les conditions de stabilité, on fait appel aux méthodes de mécanique de sols qui sont basées sur l'étude de l'équilibre limite, car depuis un certain temps, le couplage entre les méthodes d'équilibre limite et les méthodes numériques utiles sont nécessaires pour l'analyse de la stabilité des ouvrages en terre. Le couplage entre ces deux méthodes ne cesse d'évoluer.

Dans ce chapitre, nous présenterons les différentes méthodes d'analyse de stabilité des talus ainsi que des notions et connaissances relatives à la stabilité. **[10]**

3-2 Profil général du barrage :

3-2-1 Hauteur du barrage :

La hauteur totale H_t est égale la hauteur normale des eaux maximales.

D'où:

H_1 : volume des dépôts solides.

H_2 : volume utile.

H_3 : volume perdu.

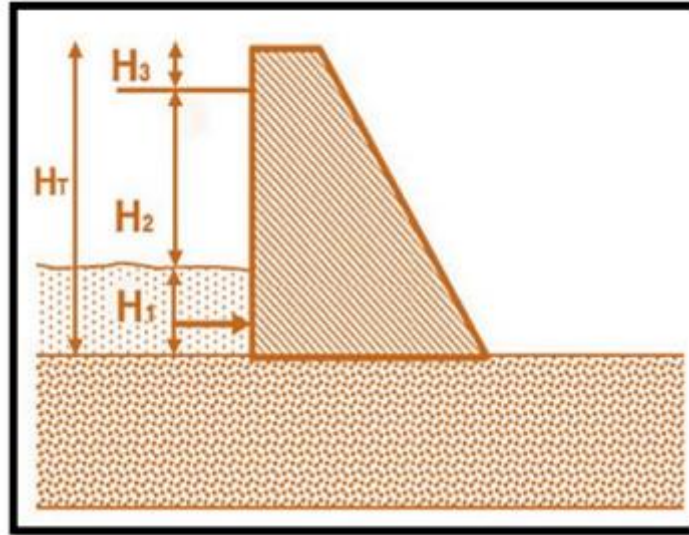


Figure 14 : Schéma de répartition des hauteurs. [11]

3-2-2 Largeur en crête du barrage :

Généralement la largeur en crête d'un barrage doit être supérieure à 3 m, on peut calculer la largeur L (m) à partir de ces formules :

1) **T.KNAPPEN:** $L = 1,65\sqrt{H}$

2) **Rolley :** $L = \sqrt[3]{H} - 3$

Avec H : la hauteur totale du barrage (m).

3-2-3 Revanche :

C'est une épaisseur qui assure la sécurité du barrage, d'après J.DUNGLAS, on a cette formule:

$$R = 0,75h + \frac{V^2}{2g}$$

Avec : h : hauteur des vagues.

V : vitesse des vagues d'après R.ROLLEY on a : $V = 1,5 + 2h$

g : accélération gravitationnelle. [\[12\]](#)[\[13\]](#)[\[14\]](#)[\[15\]](#)

3-2-4 Pentes des talus :

À l'aide du tableau suivant, on peut déterminer l'inclinaison des pentes (amont-aval).

Hauteur du barrage en (m)	Type du barrage	Pentes des talus	
		Amont	Aval
Inférieur à 5m	-homogène -à zones	1/2,5	½
		1/2	1/2
De 5 à 10m	-homogène, granularité étendue -homogène, à fort pourcentage d'argile -à zones	1/2	1/2
		1/2,5	1/2,5
		½	1/2,5
De 10 à 20m	-homogène, granularité étendue -homogène, à fort pourcentage d'argile -à zones	1/2,5	1/2,5
		1/3	1/2,5
		1/2	1/3

Tableau 1: Inclinaison des pentes (amont-aval). [16]

3-3 Les actions s'appliquent sur un barrage :

Les actions qui s'appliquent sur un barrage peuvent influencer sur sa stabilité, donc il faut les connaître pour comprendre son comportement et pour déterminer ses dimensions sous ces forces, en fonction de leur variation avec le temps et leur mode d'application.

On peut classer les actions en trois catégories comme suite :

3-3-1 Actions permanentes :

Ces actions constantes ou très peu variable avec le temps, on les note G.

On peut les citer comme suit :

- ⇒ Poids propre G_0 .
- ⇒ Poussée des sédiments G_1 .
- ⇒ poussée d'une recharge aval G_2 .
- ⇒ Action de tirant précontrainte G_3 .

3-3-2 Actions variables :

On note les actions variables en Q.

- ⇒ Poussée hydrostatique amont Q_1 : Au niveau du parement amont l'eau toujours exercée une pression horizontale mais variable en fonction de la hauteur du barrage.

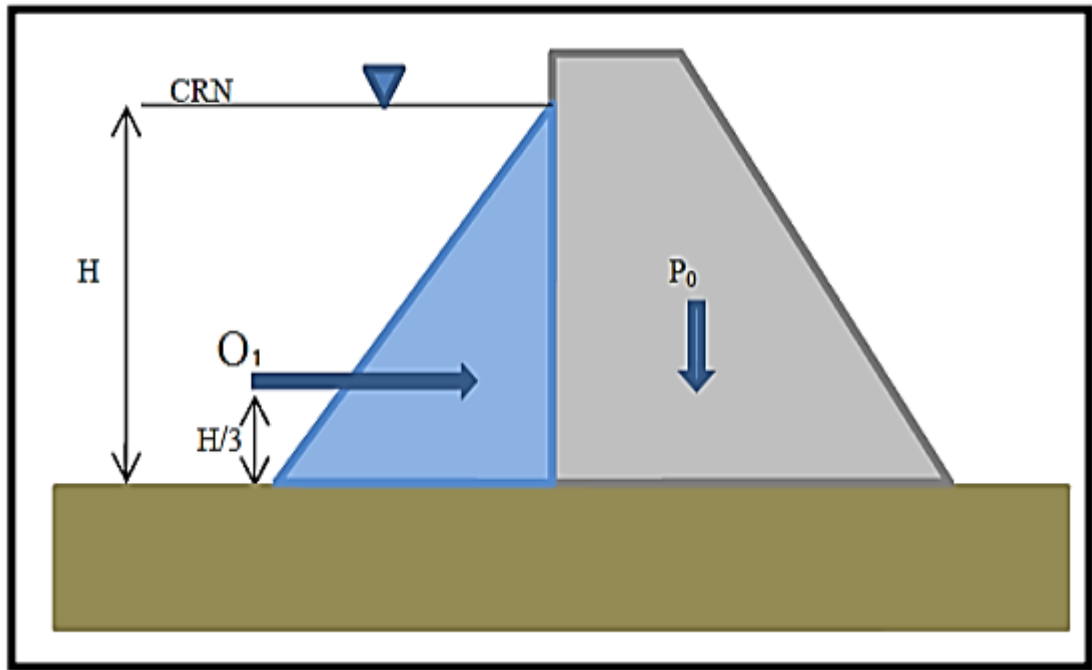


Figure 15 : poussée hydrostatique amont [17]

⇒ Poussée hydrostatique aval Q_2 : L'eau revient comme un résultat de la poussée hydrostatique amont qui est appliquée sur le parement amont du barrage, sa valeur n'est pas importante par rapport Q_1 mais il faut la prendre en considération.

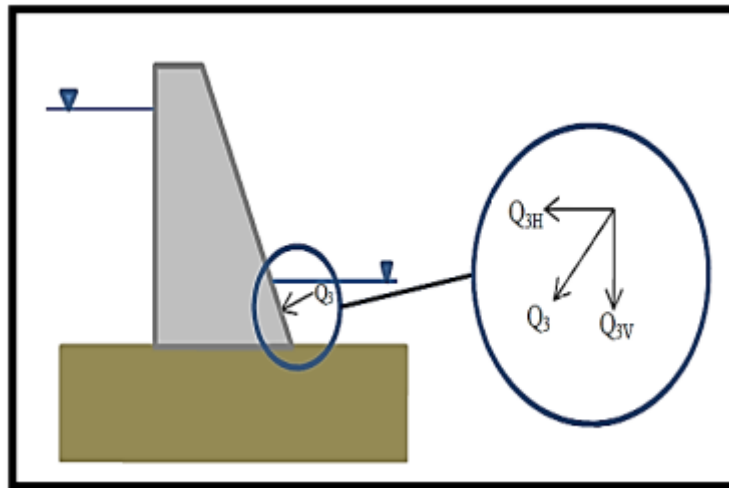


Figure 16 : Poussée hydrostatique aval [17]

⇒ Actions des sous-pressions Q_3 : Le principe de calcul basé sur la détermination du diagramme de sous pressions appliquées sur le barrage (entre barrage-fondation).

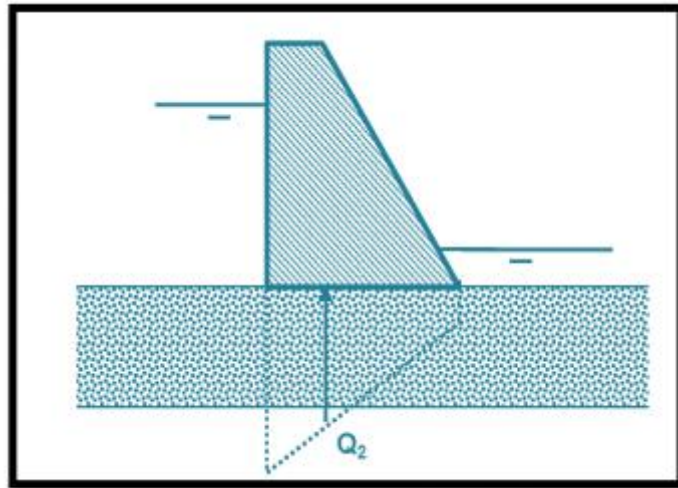


Figure 17 : Action de sous-pression [18]

⇒ Actions de la glace Q_4 : Cette action liée aux changements climatiques et caractéristique de la glace et ne concerne que les retenues situées en altitude.



Figure 18 : Action de glace [16]

⇒ Variation de la température : Le retrait et le gonflement du béton, ou bien la diminution et l'augmentation de volume sont des phénomènes liés aux variations de températures et la teneur en eau, elles peuvent créer des contraintes thermiques locales complémentaires sur notre ouvrage représentant dans l'élongation ou la contraction (l'apparition des fissures) des dimensions de la conception notamment au côté amont.

3-3-3 Actions accidentelles :

L'un des problèmes qui peuvent menacer la stabilité du barrage c'est le risque du séisme. Ce risque a deux types de sollicitations mécaniques :

Forces d'inerties provoquées par la structure :

On utilise la méthode pseudo- statique :

$$F = \alpha \times S \times \gamma b$$

D'où:

α : Le coefficient de sismique (l'accélération au sol multipliée par 0,67 pour la composante horizontale et multipliée par 0,20 pour la composante verticale).

S : La section de l'ouvrage.

γb : Le poids volumique de l'ouvrage.

1. Forces hydrodynamiques dues à la vibration :

Ces forces s'appliquent sur le côté amont du barrage, on les calcule par la méthode de **westergaard** :

$$P(z) = 0,875 \times \alpha \times \gamma w \times (H \times Z)^{0,5}$$

D'où:

α : Le coefficient de sismique.

H : La hauteur du barrage.

Z : La profondeur de l'eau. [\[13\]](#)[\[10\]](#)[\[17\]](#)[\[18\]](#)

De manière générale, nous résumons les actions comme suit :



Figure 19 : Organigramme des différentes actions sur les barrages.

3-4 Les ruptures :

Quel que soit le type des actions ou des sollicitations sur un barrage, elles menacent sa sécurité et sa stabilité et par la suite on aura un grand risque, autrement dit un dommage de l'ouvrage et des êtres vivants, donc on peut définir le risque comme un ensemble de l'aléa et des enjeux (vulnérabilités).

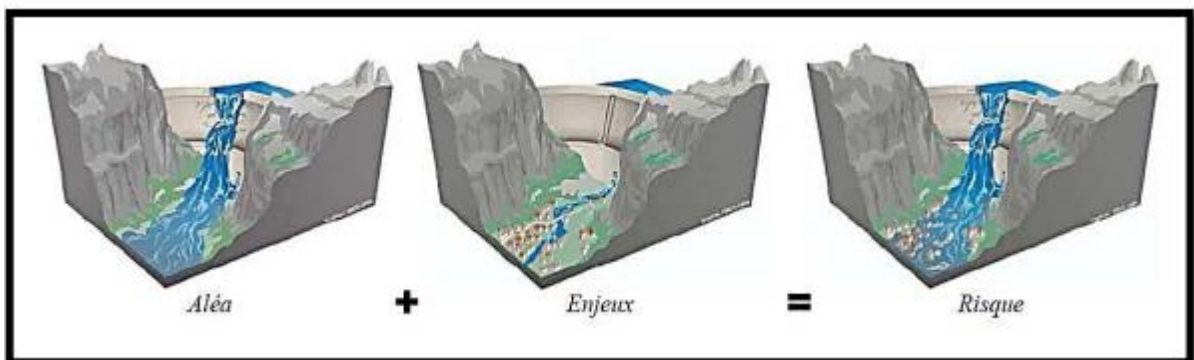


Figure 20 : Effet de rupture des barrages.

Les ruptures planes représentent un cas particulier très simple dans son principe.

Pour les surfaces de rupture de forme quelconque, le calcul est beaucoup plus complexe.

Pour évaluer la stabilité des talus par une méthode à l'équilibre limite, il existe des méthodes linéaires et non linéaires. Les méthodes linéaires sont des méthodes directes de calcul de coefficient de sécurité et les méthodes non linéaires nécessitent un processus itératif.

3-4-1 Principales origines de rupture pour un barrage en terre :

- ⇒ Submersion du barrage par une crue à cause d'une mauvaise estimation de la crue, ou d'un mauvais fonctionnement des vannes.
- ⇒ Le phénomène de renard au niveau du contact fondations-barrage ou fondation-ouvrages annexes.
- ⇒ Glissement des talus du barrage.
- ⇒ Liquéfaction du remblai par un séisme.
- ⇒ Risque de tassement.

Dans les origines des ruptures aussi, on ne peut pas négliger les erreurs humaines comme cause de rupture. Ces erreurs peuvent être représentées par l'insuffisance des études préliminaires, les défauts de construction, les erreurs de surveillance et de maintenance, ...etc.

[19]

3-4-2 Les types de ruptures :

- ✓ La rupture au premier remplissage qui représente 37% : elle prend beaucoup de temps selon la capacité du barrage.
- ✓ La rupture par déversement (submersion) qui représente 37% : cette cause a diminué pour les barrages récents.
- ✓ La rupture pendant l'exploitation qui représente 26% : la cause de cette rupture c'est le manque ou l'insuffisance d'entretien et de surveillance, on remarque que cette rupture touche beaucoup plus les barrages en remblai. [20]

3-5 Principe d'analyse :

La forme d'un barrage en remblai est caractérisée par une pente amont et une pente aval. Ces pentes peuvent provoquer un risque de glissement circulaire dans la digue et menacer la stabilité de notre ouvrage.

Pour calculer la contrainte au cisaillement on découpe le terrain en tranches verticale tout au long le plan du glissement.

Généralement, on utilise la formule suivante :

$$\tau = c + (N - U) \tan \varphi$$

Avec :

τ : La contrainte au cisaillement.

c : La cohésion.

N : La contrainte normale.

U : Pression interstitielle.

φ : Angle de frottement interne. [21]

3-5-1 Notion de facteur de sécurité :

En géotechnique, on ne peut pas parler de la stabilité des talus sans le facteur de sécurité FS.

Il existe de nombreuses méthodes pour le calcul de la stabilité des talus. Certaines se prêtent au calcul manuel, d'autres exigent l'utilisation d'outils informatiques.

Le coefficient de sécurité est utilisé pour les calculs à la rupture. Il permet d'apprécier la marge de sécurité vis-à-vis de la rupture.

Ce coefficient est défini par des rapports de forces, de contraintes, de moments ou même en termes de hauteurs de talus.

Pour ce coefficient de sécurité, il existe multiples définitions et chacune présente des avantages et des inconvénients. Donc pour évaluer la stabilité d'une pente, l'ingénieur doit bien choisir entre plusieurs définitions du coefficient de sécurité.

Nous citons ci-dessous un certain nombre de ces définitions :

- 1- Pour définir le coefficient de sécurité, Bishops a utilisé les relations suivantes :

$$F = \frac{\tau_{\max}}{\tau} = \frac{\text{résistance au cisaillement maximal de sol}}{\text{contrainte de cisaillement mobilisable}}$$

$$F = \frac{\text{effort résistant}}{\text{effort normal}}$$

➔ C'est une valeur ponctuelle qui va dépendre de la position du point M considéré le long de la surface testée.

- 2- pour une surface testée planaire, on utilise la définition suivante :

$$F = \frac{\text{Moment résistant}}{\text{Moment moteur}}$$

- 3- pour une surface testée circulaire, nous avons la définition suivante :

$$F = \frac{H_c}{H} = \frac{\text{Hauteur critique}}{\text{Hauteur réelle}}$$

→ Cette définition suppose que la surface testée est circulaire (ellipsoïdale en 3d).

Toutes ces définitions conduisent à des valeurs différentes pour une même géométrie, sauf dans le cas où l'on se trouve à la rupture ($f = 1$). [21]

3-5-2 Choix de la valeur du coefficient de sécurité dans le calcul de stabilité :

→ Le facteur de sécurité minimal 'Fs' adopté est assez rarement inférieur à 1.5.

→ Il peut quelquefois être égal à 2, pour des ouvrages dont la stabilité doit être garantie à tout prix (grand risque pour les personnes, site exceptionnel), ou pour des méthodes dont l'incertitude est grande (analyse en contrainte totale avec risque d'erreur sur la valeur de la cohésion drainé C_u [10]).

→ Pour certains sites peu importants ou pour certains ouvrages courants, et lorsqu'il n'y a pas de risque pour la vie humaine, on peut accepter des valeurs plus faibles pendant un moment très court ou pour des fréquences faible : 1.2. Mais pour pouvoir se rapprocher de 1, c'est-à-dire de la rupture, il faut être sûr de la validité des hypothèses et des paramètres adoptés, ce qui est souvent difficile en géotechnique.

Le tableau ci-dessous, nous donne les valeurs de 'Fs' en fonction de l'importance de l'ouvrage et des conditions particulières qui l'entoure : [21]

Fs	Etat de l'ouvrage :
<1	Danger
1.0-1.25	Sécurité contestable
1.25-1.4	-sécurité satisfaisante pour les ouvrages peu importants. -sécurité contestable pour les barrages, ou bien quand la rupture serait catastrophique.
> 1.4	Satisfaisante pour les barrages

Tableau 2 : les différentes valeurs de 'Fs' [21]

3-5-3 Etude de stabilité des talus :

Les problèmes de stabilité des talus sont systématiquement posés en conditions de déformation plane qui cause le glissement.

On distingue trois grandes catégories de glissements :

- Cercle de pente (flanc de talus).
- Cercle de pied de talus.
- Cercle profond (rupture profonde).

La stabilité donc dépend de la relation entre :

-
- ✓ Les moments moteurs dont le terme principal est le poids du massif.
 - ✓ Les moments résistants dus essentiellement à la résistance au cisaillement le long de ligne de rupture.
 - ✓ Soit à une augmentation des moments moteurs (surcharge au sommet d'un talus, modification de la géométrie de talus, action hydrodynamique dus à l'écoulement d'eau).
 - ✓ Soit à une diminution des moments résistants (suppression de masse en pied de talus, diminution des caractéristiques mécaniques du massif du fait d'infiltration d'eau important).

L'étude de stabilité des talus consiste à évaluer le rapport des forces résistantes aux forces motrices. Cette étude nécessite la connaissance des conditions géologique, hydrologique et topographique du terrain ainsi que les propriétés physique et mécanique du sol.

Généralement, on admet les hypothèses suivantes :

- On considère que le problème est bidimensionnel.
- On suppose que le massif se comporte comme un matériau rigide.
- La rupture se produit simultanément dans tous les points de la ligne de glissement.
- La mise en état de plasticité ne concerne que la ligne de glissement le reste du massif est en équilibre limite. [16]

3-5-4 Causes de glissements :

Les glissements sont dus à des modifications soit dans les moments résistants, soit dans les moments moteurs. On distinguera donc deux types de causes :

a) Diminution des moments résistants : les causes de diminution des moments résistants peuvent être naturelles (changement des conditions hydrauliques du terrain) ou consécutives à des travaux (tranchées en pied de pente, ou chargement rapide augmentant les pressions interstitielles) en pied de pente.

b) une augmentation des moments moteurs : certaines causes sont évidentes (surcharge du sommet de la pente, changement de pente,...), d'autres le sont beaucoup moins . Les problèmes d'infiltration, en particulier, sont souvent difficiles à cerner. Par exemple, les écoulements ont une action hydrodynamique qui tend à augmenter les moments moteurs. C'est le cas des drainages en pied de talus servant au rabattement de nappe. En effet, l'écoulement provoque des forces de percolation qui augmentent les moments moteurs ; il ne faut donc plus simplement considérer l'aspect statique du problème de stabilité de pentes [17]

3-6 Différentes méthodes de calcul :

Les méthodes se différencient essentiellement par :

- ➔ Le choix de la surface de rupture.

- ➔ La détermination de la répartition des contraintes le long de cette surface.
- ➔ La définition du coefficient de sécurité et la vérification de toutes les équations d'équilibre.

3-6-1 Méthodes globales pour les calculs de 'Fs' :

Ces Méthodes considèrent la totalité de la masse libre en faisant des hypothèses, quand à la distribution des contraintes normales le long de la surface de rupture. [19]

3-6-2 Méthodes des tranches pour les calculs de 'Fs' :

Cette méthode est basée sur le découpage de la pente à un nombre N des tranches, comme le montre la figure ci-dessous :

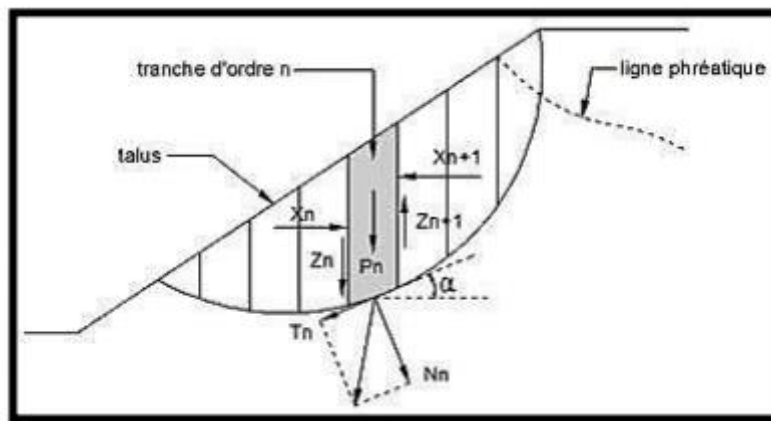


Figure 21 : Méthode des tranches. [11]

Le découpage de la masse en mouvement en tranches verticales a permis le développement d'un très grand nombre de méthodes.

La méthode des tranches est employée par la plupart des programmes de calcul sur ordinateur, car il peut traiter facilement les pentes avec une géométrie très compliquée, des propriétés de sol variables et l'effet de charges extérieures sur les contours. [20]

Les différentes méthodes basées sur la méthode des tranches :

- ✓ Méthode des tranches ordinaires : cette méthode développée par Fellenius « 1927-1936 » en négligeant les forces inter-tranches.
- ✓ Méthode de Bishop simplifiée « 1955 » : Bishop suppose que les forces de cisaillement sont nulles.
- ✓ Méthode de Jumbo simplifiée « 1954-1957-1973 ».
- ✓ Méthode de Low et Karafiath « 1960 ».
- ✓ Méthode du corps d'ingénieur « 1982 ».
- ✓ Méthode de Bishop rigoureuse « 1955 ».
- ✓ Méthode de Jumbo généralisée « 1954-1973 ».

- ✓ Méthode de Sarma « 1973 ».
- ✓ Méthode de Morgenstern et Price « 1965 ».

Choix de la méthode :

Les méthodes choisies pour les calculs des coefficients de sécurité de notre digue est la méthode des tranches de Fellenius et la méthode de Bishop.

Méthode de Fellenius :

Cette méthode néglige les forces qui existent entre les tranches, elle consiste à admettre que, la résultante de h_i et v_i est égale à h_{i+1} et v_{i+1} avec une ligne d'action qui coïncide. Cette résultante est parallèle à la base de la tranche. Quand les tranches adjacentes ont de différentes inclinaisons de la base, cette hypothèse simplificatrice conduit à des erreurs. [21]

Méthode de Bishop :

C'est une méthode qui est souvent utilisée dans la pratique du génie.

Dans ce procédé, les forces entre les tranches ne sont pas négligées, mais il est supposé que la force résultante est horizontale. En tenant compte de l'équilibre vertical de chaque tranche seulement, les forces horizontales n'entrent pas dans les calculs.

Cependant, l'équation de base est de nouveau l'équation d'équilibre moment. [22]

L'équilibre vertical d'une tranche exige maintenant que :

$$\gamma h = \sigma n + \tau \frac{\sin \alpha}{\cos \sigma} = \sigma' n + u + \tau \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha}$$

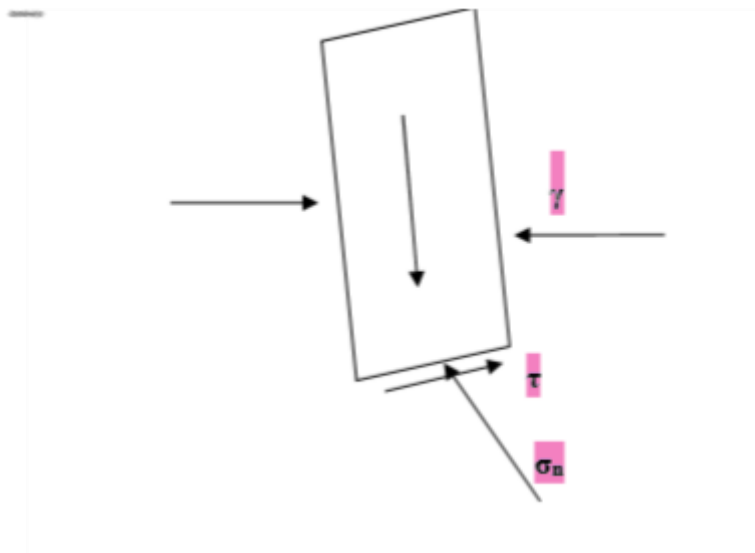


Figure 22 : Méthode de Bishop.

3-7 Différents cas de stabilité :

Les différents cas de stabilité se présentent comme suit :

- ✓ Fin de construction.
- ✓ Retenue normale.
- ✓ Vidange rapide.

Bien-sûr, dans tous ces cas, le séisme doit être pris en compte dans les zones sismiques.

3-7-1 Fin de construction :

Pendant la phase d'exécution de digue ou plus exactement dans les différentes couches de remblais qui constitueront plus tard le corps de la digue, le compactage de ces couches génèrent des pressions interstitielles dans le corps de la digue.

A la fin de la construction, ces pressions interstitielles n'auront pas le temps de se dissiper, dans ce cas, on va considérer un seul cas de contraintes totales c'est-à-dire dans la mesure de la pression interstitielles, on supposera que la dissipation n'a pas eu lieu.

3-7-2 Retenue normale :

La stabilité de la digue est vérifiée pour la retenue normale jusqu'au niveau de la cote de remplissage.

3-7-3 Vidange rapide :

Au cours de l'exploitation, il sera indispensable d'effectuer des vidanges pour diverses raisons technologiques et raisons d'exploitation. Lors de ces opérations, la ligne de saturation baisse plus lentement que les plans d'eau, de ce fait, il résulte des pressions interstitielles dans la partie amont car le matériau n'est pas perméable pouvant même compromettre la stabilité du talus amont.

Dans ce cas, on fait le calcul en termes de contraintes effectives car la pression interstitielle de dissipe progressivement dans le temps et on aboutit à l'équilibre hydrostatique. [13]

3-8 Calcul sismique :

Pour les régions sismiques, il est obligatoire d'effectuer le calcul sismique car la vérification de la stabilité au séisme est le cas le plus défavorable et l'effet du séisme s'ajoute aux forces qui tendent à faire glisser la digue suivant la ligne de rupture.

Cette force représente un effort produit lors d'un tremblement de terre et qui a deux composantes : verticale et horizontale, mais cette dernière cause beaucoup de dégâts.

Nous avons par mesure de sécurité combinée l'effort de l'effet sismique avec tous les cas. Pour la simulation des efforts sismiques sur la stabilisation, on adopte une valeur d'accélération égale à 20% de l'intensité de la pesanteur considérée égale à $9,81m^2/s$.

$$F_s = M \cdot K_s \cdot W \cdot \sin \alpha$$

- M : coefficient qui dépend des caractéristiques dynamiques de l'ouvrage.
- M=1 dans le cas d'un barrage.
- F_s : force sismique.
- K_s : coefficient qui dépend du degré de sismicité, pour la détermination de K_s , on a :

$$K_s = \frac{\text{Accélération sismique}}{\text{Accélération terrestre}}$$

D'où :

$$K_s = \frac{0,20 \times 9,81}{9,81} = 0,20$$

Donc : $F_s = M \times 0,25 \times W \times \sin \alpha$ [18][20]

3-9 Coefficient de sécurité pour différents cas de fonctionnement :

	Cas de sollicitation	Coefficient de sécurité
Fin de construction Selon <u>Fellenius</u>	Talus amont	
	R=35m	1,69
	R=28m	1,75
	R=32m	1,59
	Talus aval	
	R=29m	2,09
R=36m	2,01	
R=40,5m	2,80	
Retenue normale Bishop Sans séisme	Talus amont	
	R=35m	1,78
	R=28m	1,87
	R= 32m	1,63
	Talus aval	
	R=29m	2,19
R=36m	2,21	
R=40,5m	2,94	
Retenue normale Bishop avec séisme	Talus amont	
	R=35m	1,49
	R=28m	1,56
	R= 32m	1,36
	Talus aval	
	R=29m	1,82
R=36m	1,84	
R=40,5m	2,59	

Tableau 3 : Coefficient de sécurité pour multiples cas de fonctionnement. [18]

3-10 Les risques d'infiltrations à travers le barrage en terre :

Toute digue de barrage en terre représente un milieu poreux, pendant l'exploitation un certain débit d'eau s'infiltré, ceci est dû à la différence de pression de part et d'autre de la digue, ce qui va provoquer un courant de filtration se dirigeant de l'amont vers l'aval et ce qui va créer une zone dont tous les pores sont remplis d'eau. La surface délimitant cette zone s'appelle la surface de dépression (ou surface de saturation).

L'écoulement d'eau dans le corps du barrage et sa fondation menace la stabilité de l'ouvrage hydraulique, qui peut subir le phénomène d'érosion interne ou bien externe. Ces actions causent des endommagements très graves et irréversibles.

Bien que les mécanismes d'endommagement mettent en jeu de nombreux phénomènes physiques différenciables, on peut les résumer généralement par le concept d'érosion, interne ou externe, entendue comme la fragilisation d'un sol par suite de la modification de sa structure sous l'effet du passage d'un fluide.

Les principaux modes de rupture constatés sur les digues en remblai, c'est à dire la surverse, l'érosion du pied de digue du côté du fleuve (affouillement), l'érosion interne, et le glissement de talus du pied de digue du côté ou de l'autre de l'ouvrage. [22]

3-11 Exemple d'étude d'infiltrations du barrage en terre al izdihar SID EL ABDELI :

Toute conception d'un barrage en terre vise à satisfaire les conditions de stabilité et d'étanchéité. Les conditions de stabilité dépendent fortement de deux aspects essentiels, le contrôle des pressions interstitielles (dès la période de construction) et le contrôle d'écoulement d'eau à l'intérieur du remblai. Cet écoulement risque de provoquer des érosions internes induisant par conséquent la ruine de l'ouvrage. La modélisation de l'infiltration à travers le corps du barrage a été élaboré par le logiciel GéoSlope, ce qui permettra de prédire la charge totale d'eau, la pression d'eau et la charge de pression d'eau pour deux différents cas de drains (drain verticale et drain horizontale).

1^{er} cas : Drain horizontal

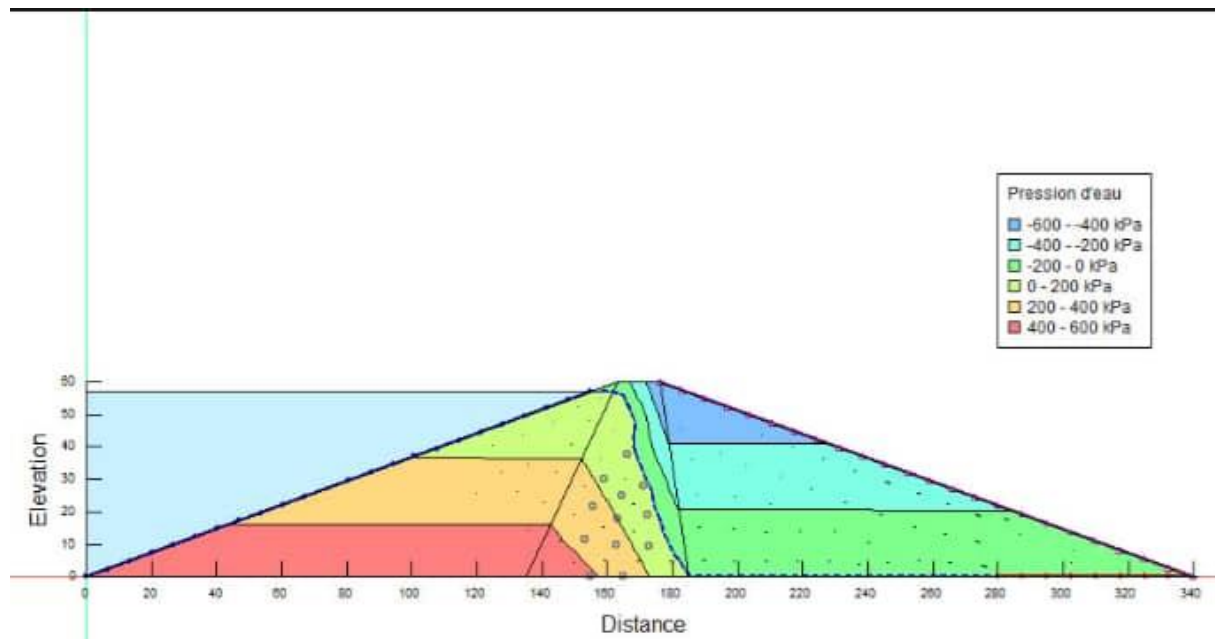


Figure 23 : Charge de pression d'eau pour un drain horizontal

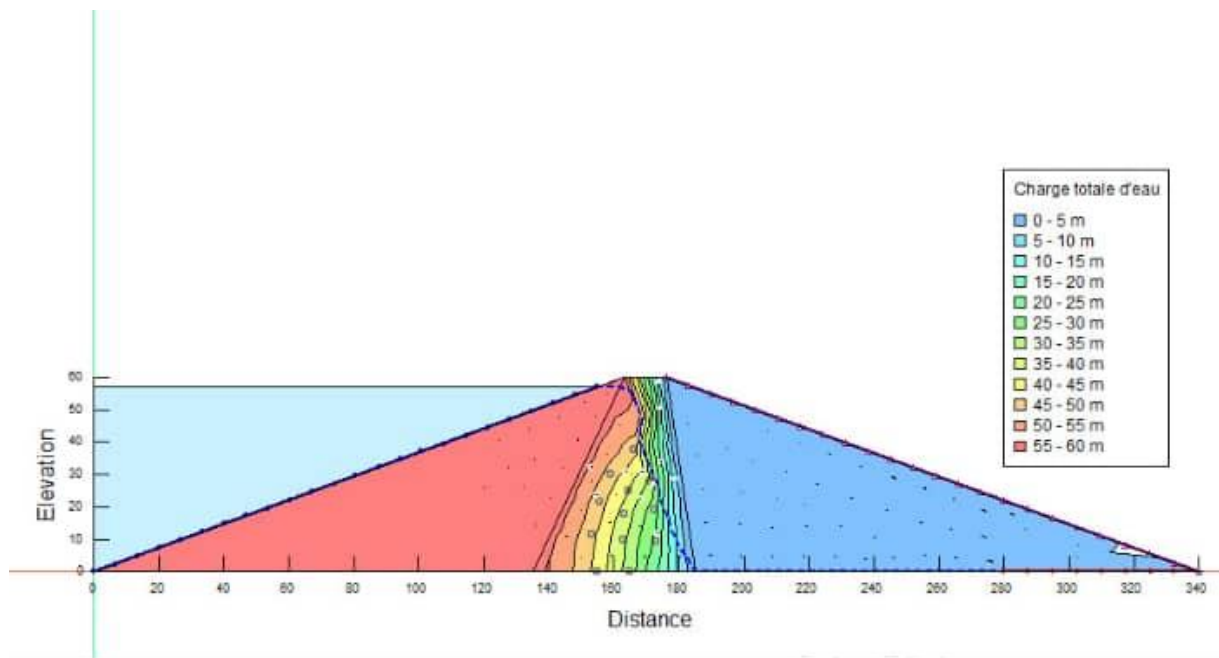


Figure 24 : Charge totale d'eau pour un drain horizontal

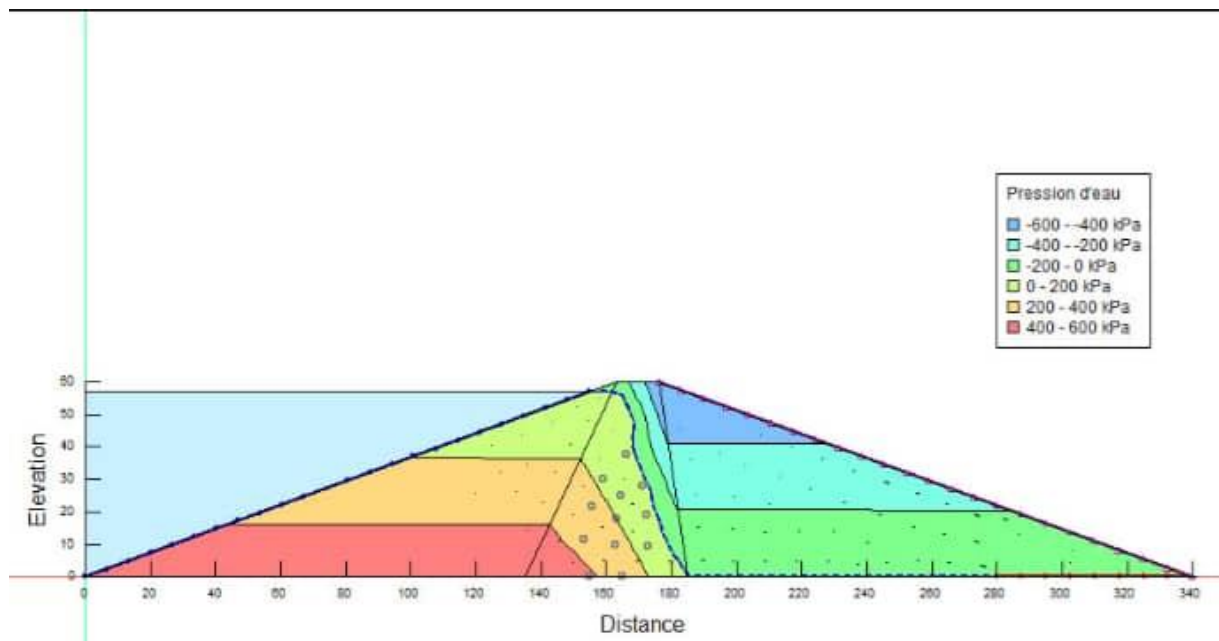


Figure 25 : Pression d'eau pour un drain horizontal

2^{ème} cas : Drain vertical

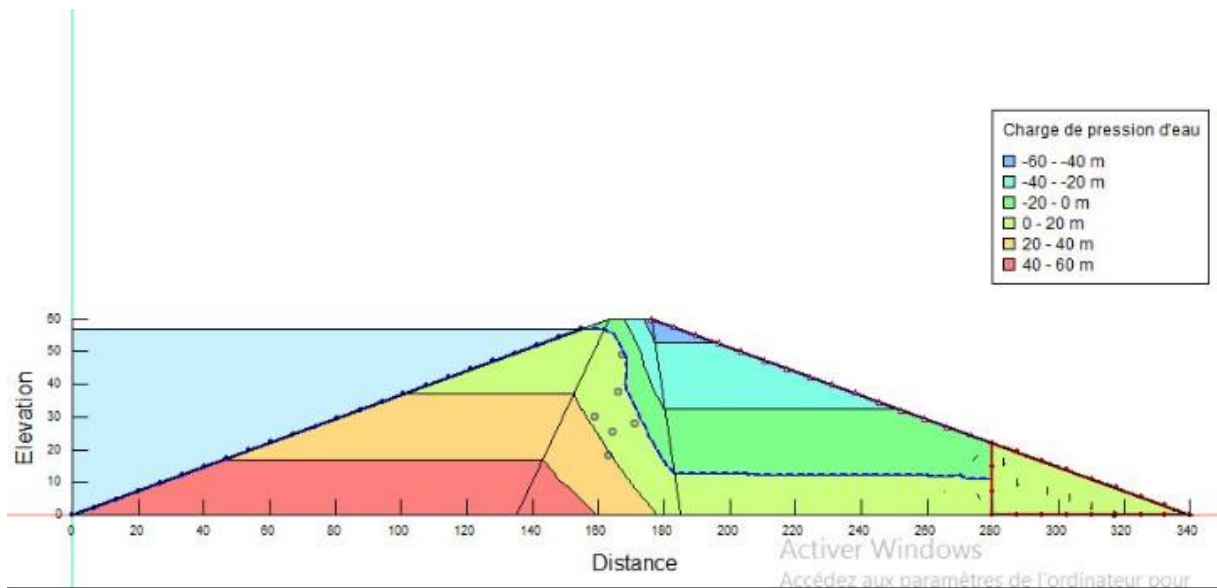


Figure 26 : Charge de pression d'eau pour un drain vertical

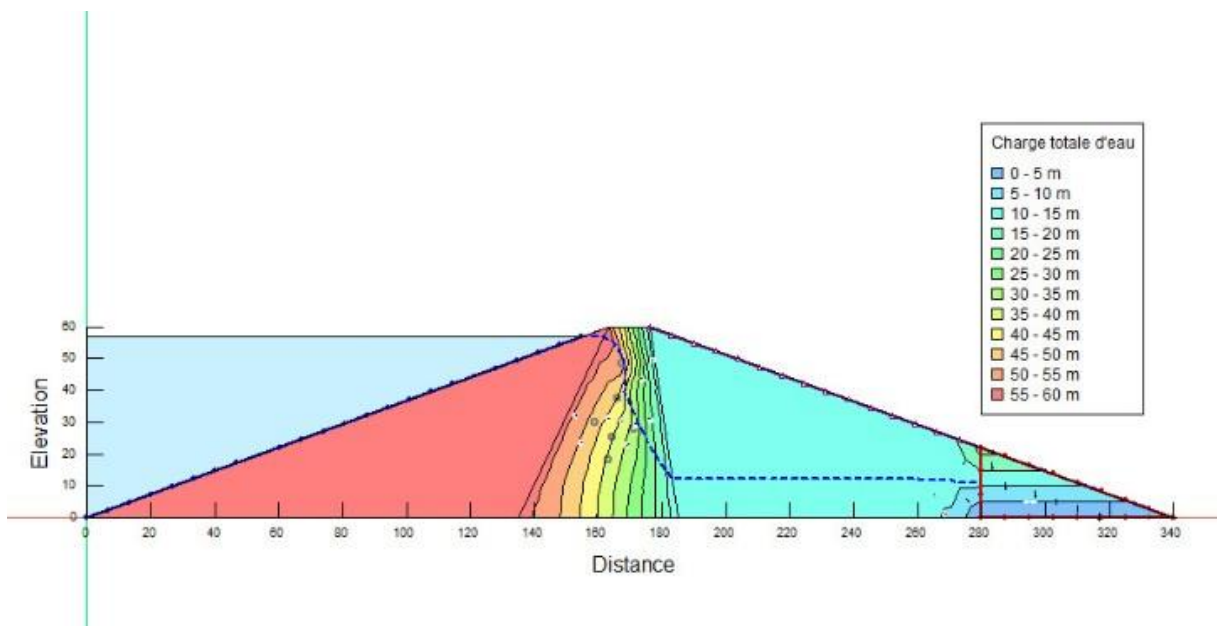


Figure 27 : Charge totale d'eau pour un drain vertical

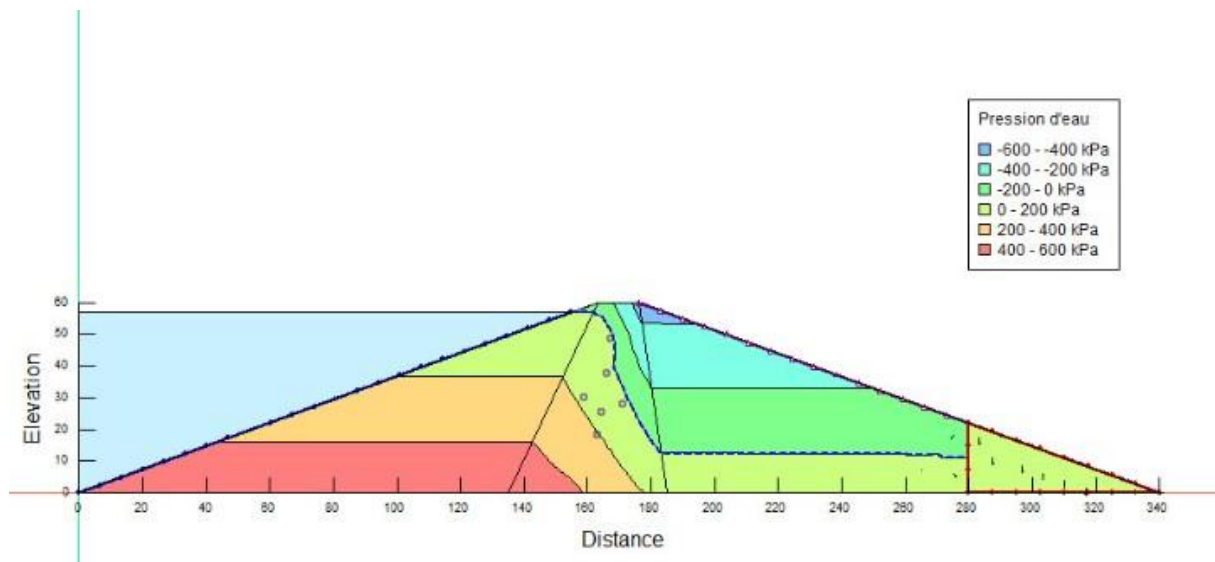


Figure 28 : Pression d'eau pour un drain vertical

Commentaires :

D'après les résultats obtenus, nous observons que la pression d'eau diminue en traversant vers le drain jusqu'à zéro, ce qui rend nos résultats normaux car on a l'effet de perméabilité, donc si c'était le contraire, nous aurons la probabilité de deux problèmes qui sont :

- ✓ Le phénomène de Renard.
- ✓ Le phénomène de Boulance

Ce qui nous intéresse, c'est les pressions interstitielles, parce qu'on a pas la possibilité de mesurer cette pression pour un barrage car il n'y a pas un instrument de mesure qui nous le permet donc nous sommes obligés de mesurer la contrainte totale et la contrainte effective pour faire la différence entre eux pour trouver une estimation de cette pression.

Au sein du corps du barrage, nous observons que le côté amont est en rouge, ce qui signifie qu'il y'a une recharge sur ce côté et ce qui est tout à fait normal car le remblai se sature.

Nous préférons pour ce type de barrage, l'utilisation des drains verticaux, ils nous permettent les études des affouillements car on peut avoir un écoulement qui pourra nous produire un effondrement dans le pied du barrage et qui va créer une instabilité.

Conclusion :

Un barrage présente un haut potentiel de danger, il est de ce fait primordial d'en assurer sa sécurité. En effet, une rupture peut entraîner des pertes en vies humaines ainsi que d'énormes dommages aux biens. Pour garantir un haut niveau de sécurité, il faut tout d'abord que l'ouvrage ait les dimensions lui permettant de faire face à tous les cas de charges et d'exploitation. Cette sécurité, pour un barrage en remblai, est obtenue en premier lieu par une vérification du bon choix des pentes des talus par un calcul de stabilité statique.



Chapitre 04 : Méthodes et techniques d'auscultation des barrages en terre

4-1 Introduction :

L'auscultation est un terme qui signifie l'action d'examiner attentivement une situation ou une chose, dans le but de mettre à jour ses faiblesses.

L'auscultation d'un barrage en terre est une nécessité pour comprendre le comportement à long terme d'un barrage, il est essentiel d'interpréter soigneusement les données d'auscultation mesurées. Le contrôle de la sécurité d'un barrage exige que les données mesurées soient interprétées dans le temps le plus court possible après les lectures. [26]

4-2 Principe général de la surveillance des barrages :

La surveillance d'un ouvrage a pour but essentiel de connaître, et si possible de prévenir, toute dégradation afin de le conserver en bon état de sécurité et ainsi apte à remplir ses fonctions.

On cherche principalement à détecter les anomalies et les désordres et à évaluer leurs éventuelles évolutions. Ces anomalies peuvent être dues à des mécanismes de vieillissement du barrage. Ils sont généralement lents mais une évolution rapide n'est pas totalement exclue, en particulier dans les premières années après la mise en eau. [25]

4-2-1 Les objectifs de la surveillance :

La méthodologie de suivi doit fournir les moyens de détecter les anomalies et les désordres, d'apprécier les vitesses d'évolution des mécanismes de vieillissement et leur aboutissement probable, en séparant les phénomènes réversibles des phénomènes irréversibles. Ceci afin de permettre au responsable de l'ouvrage de décider de la nature et de l'urgence des interventions.

La surveillance des barrages à trois grands objectifs :

Pendant la construction et la première mise en eau :

On cherche essentiellement à comparer le comportement de l'ouvrage par rapport aux prévisions du projet, que ce soit pour vérifier certaines hypothèses de calcul, pour valider les résultats de ces calculs ou pour vérifier la pertinence des choix. La première mise en eau fait l'objet de consignes particulières de gestion de la retenue, de surveillance visuelle et de suivi d'auscultation. En règle générale, la présence permanente de l'exploitant est exigée pendant toute cette phase. Dans les six mois qui suivent l'achèvement de la mise en eau, un rapport de première mise en eau doit être rédigé par le propriétaire qui indique les éventuelles modifications par rapport au projet et qui analyse le comportement barrage.

La surveillance pendant cette période doit être continue et complète.

En phase d'exploitation :

On cherche dans cette phase à détecter tout signe avertisseur de changement dans le comportement de l'ouvrage, ce qui nous amène d'une part à s'intéresser à l'apparition des nouveaux phénomènes et d'autre part aux évolutions lentes liées au vieillissement.

Pendant cette phase, la surveillance prend un rythme moins intense.

Le retour d'expérience :

Pour le domaine de l'ingénierie, ce retour d'expérience est valorisé sur les futurs projets que sur le suivi des autres barrages d'une même famille (un phénomène constaté peut se produire sur un autre barrage semblable). [25]

4-2-2 Les principes généraux :

La surveillance inclut les composantes complémentaires suivantes :

- ✓ L'inspection visuelle dont l'objectif est de déceler des anomalies perceptibles à l'œil.
- ✓ L'auscultation qui permet de mesurer l'évolution de certains paramètres et d'établir une analyse du comportement à l'ouvrage sur le long terme.
- ✓ Les essais périodiques de certains organes, les vannes en particulier, dans différentes conditions de fonctionnement.
- ✓ La tenue à jour du registre de l'ouvrage (ou registre de l'exploitant), qui consigne en particulier les opérations de surveillance. [26]

L'inspection visuelle :

Dans le domaine de la surveillance, la priorité est toujours pour l'inspection visuelle, et il convient de distinguer trois niveaux dans ce type d'inspection pour le barrage et ses abords :

- ➔ L'inspection visuelle de routine : elle a pour objectif de déceler rapidement tout phénomène nouveau affectant le barrage et de suivre qualitativement les évolutions.
- ➔ L'inspection visuelle à l'occasion des crues : c'est lors des crues que les barrages sont soumis aux sollicitations sévères : cote du plan d'eau élevée, débits importants sur le réservoir, ruissellement sur les parements. Une inspection visuelle détaillée donc s'impose dans ces occasions.
- ➔ Les visites techniques approfondies : la meilleure période de ce type d'observation est quand la retenue est pleine.

Les deux premiers niveaux sont du ressort du propriétaire ou de son exploitant. Le troisième niveau correspond aux visites techniques de l'ingénieur spécialiste chargé du suivi de l'ouvrage.

La bonne exécution de ces visites nécessite de procéder à des travaux d'entretien, tel que :

- ✓ Entretien strict de la végétation sur les talus des remblais et aux abords des ouvrages.
- ✓ Enlèvement de la calcite, gênant l'observation des parements en maçonnerie.
- ✓ Dégagement des exutoires de drainage et surveillance des dépôts de matériaux. [26]

4-2-3 Les points principaux de l'inspection pour les barrages en remblai (en terre) :

- Fuites localisées, éventuellement avec entrainement de grains de sol.
- Apparition de bourrelets et/ou fissures en crête ou sur le parement aval.
- Tassements, en particulier en crête ou au contact d'ouvrages en béton.
- Creusement de ravines sur les parements amont et aval.
- Végétation arbustive sur les talus et près du pied aval.
- Corrosion et rupture des fils des cages d'ouvrages en gabions.
- Dégâts dus aux animaux fouisseurs.

L'auscultation :

L'auscultation des barrages regroupe tous les dispositifs permettant de mesurer des grandeurs physiques susceptibles d'évoluer dans la vie du barrage, de façon à mettre en évidence son comportement et les phénomènes évolutifs significatifs de son vieillissement. Ainsi on mesure des déplacements, des déformations, des contraintes, des pressions, des débits, ...

Les essais périodiques :

Ils concernent les vannes et les clapets, les capteurs et leurs liaisons avec les postes de commande, les moyens d'alimentation en énergie. La périodicité des essais doit être précisément définie ainsi que leurs conditions de réalisations. [24][26]

4-3 L'auscultation des barrages en terre :

Il s'agit d'une méthode quantitative basée sur la mesure d'instruments, choisis et positionnés pour rendre compte de l'évolution du comportement de l'ouvrage. Le dispositif d'auscultation doit être conçu en fonction du type, des dimensions et des particularités techniques du barrage. [25]

L'ingénieur spécialiste devra proposer toutes les évolutions nécessaires du dispositif d'auscultation en fonction de l'état des appareils et du comportement de l'ouvrage.

Ce dispositif d'auscultation doit être constitué d'instruments simples, robustes et de lecture facile.

4-4 Les appareils d'auscultation des barrages :

Pour réaliser les mesures d'auscultation, l'exploitant peut utiliser divers outils, allant d'un tableau papier à un périphérique électronique portable.

Les conditions essentielles pour obtenir des mesures fiables et de bonne qualité, il faut que :

- Les différents instruments de mesure doivent être clairement identifiés avec un système qui ne laisse aucune ambiguïté (par exemple une lettre par type d'instrument, une éventuelle identification de la rive ou de la galerie et une numérotation dans un ordre logique). [27]



Figure 29 : Identification d'un piézomètre. [26]



Figure 30 : Identification d'un fissuromètre. [26]

- Le repérage des instruments doit également être rigoureux avec un rapport sur des vues en plan et des coupes qui figurent dans la consigne de surveillance du barrage.
- Les systèmes de lecture des mesures doivent être facilement accessibles et bien éclairés.

Les étapes :

Lorsque l'opérateur effectue une mesure, il doit vérifier si la valeur mesurée est dans la gamme des mesures précédentes. Cette opération est largement facilitée quand l'opérateur utilise un outil de saisie électronique qui contient cette fonctionnalité d'aide. Mais, même en cas de saisie sur un tableau papier, on peut y faire figurer les plages habituelles de variation des mesures. En cas de mesure "anormale" (c'est-à-dire sortant des plages habituelles de variation de l'appareil considéré), l'opérateur effectue une vérification du bon fonctionnement de l'appareil puis renouvelle la mesure.

De retour au bureau, l'opérateur archive les mesures dans la base de données dédiée. Cette opération s'effectue automatiquement si l'on a utilisé un outil électronique lors de la tournée. Une saisie numérique est nécessaire au bureau en cas d'utilisation d'un tableau papier lors de la tournée, des erreurs de retranscription des données sont alors possibles. Ensuite, il convient d'afficher à l'écran le graphe des mesures brutes, ce qui permet visuellement d'identifier une mesure "anormale" qui n'aurait pas été repérée lors de la tournée ou qui serait le fruit d'une erreur de saisie. Le cas échéant, un retour sur le terrain pour vérification de l'instrument et nouvelle mesure permettra de confirmer ou d'infirmer la mesure initiale.

Un principe essentiel est de privilégier la qualité des mesures à la quantité.

En ce qui concerne les capteurs, ils doivent répondre aux exigences suivantes :

- Robustesse et longévité, car les appareils sont parfois inaccessibles après la construction de l'ouvrage.
- Facilité de la mesure, qui doit pouvoir être faite dans de bonnes conditions de fiabilité, par un opérateur non spécialisé.
- La précision, car les mesures relevées sont souvent de faible amplitude.
- Facilité dans la vérification de la qualité de la mesure. [26]

4-5 les principaux types de mesures :

Les principaux types de mesures sont :

- La mesure de la cote de la retenue.

-
- La mesure des déplacements.
 - La mesure des débits.
 - La mesure de la piézométrie.
 - La mesure des déformations.

4-5-1 Mesure de la cote du plan d'eau :

Cette mesure participe à trois objectifs :

- ❖ Améliorer la gestion de la retenue par une connaissance continue des volumes d'eau disponible, ce qui nécessite de connaître la relation entre la cote et le volume de la retenue.
- ❖ Participer à l'auscultation du barrage en permettant d'examiner l'influence de la cote de la retenue sur les mesures de certains instruments.
- ❖ Enrichir les données hydrologiques.

Ce dernier objectif justifie, dans certains cas, l'installation d'une limnimétrie enregistreur. Dans tous les autres cas, et en particulier pour les besoins de l'auscultation, une échelle limnimétrie convient tout à fait pour la mesure de la cote du plan d'eau.

Si le barrage comporte des parties immergées verticales (des tours de prise ou parement vertical), on y installe une échelle continue couvrant l'amplitude des variations possibles du plan d'eau. [26]



Figure 31 : Echelle limnimétrie installée sur une tour de prise. [25]

Dans le cas contraire, on installe une série d'échelles de 1 m de hauteur profondément scellée dans le sol et implantées selon les courbes de niveau.



Figure 32 : Echelle limnimétrie posée sur le parement amont. [25]

Remarque : Afin de résister à l'oxydation, ces échelles installées sont le plus souvent en tôle émaillée.

4-5-2 Mesure des débits :

Le contrôle des débits est visuel.

Deux procédés de mesure des débits sont envisageables :

- **Par empotement :** cette mesure se fait au débouché d'un tuyau et à l'aide d'un récipient gradué et d'un chronomètre. Il faut disposer d'une dénivelée suffisante pour pouvoir placer le récipient gradué recueillant l'écoulement.



Figure 33 : Exutoire d'un drain permettant des mesures par emportement depuis le fossé du pied. [25]

Il existe également des dispositifs prêts à l'emploi qui permettent une lecture directe du débit et évitent toute erreur de calcul (dispositifs CAP4 ET CAP10).

- **Par seuil calibré** : cette mesure se fait au débouché d'un caniveau. On y construit un petit ouvrage en béton sur lequel est fixé un déversoir à paroi mince et en métal inoxydable. La meilleure précision est obtenue avec un déversoir en forme de triangle.



Figure 34 : Seuil calibré triangulaire pour mesure des débits, équipé de son limnimétrie amont. [25]



Figure 35 : Dispositif de mesure automatique télétransmise d'un débit de fossé de drainage, seuil triangulaire et capteur à ultrasons. [25]

Afin d'améliorer encore la précision, l'angle α peut être adapté en fonction de la gamme des débits effectivement mesurés ($\alpha < 20^\circ$ pour les débits jusqu'à 1l/s et $\alpha=80^\circ$ pour des débits maximaux de l'ordre de 10l/s).

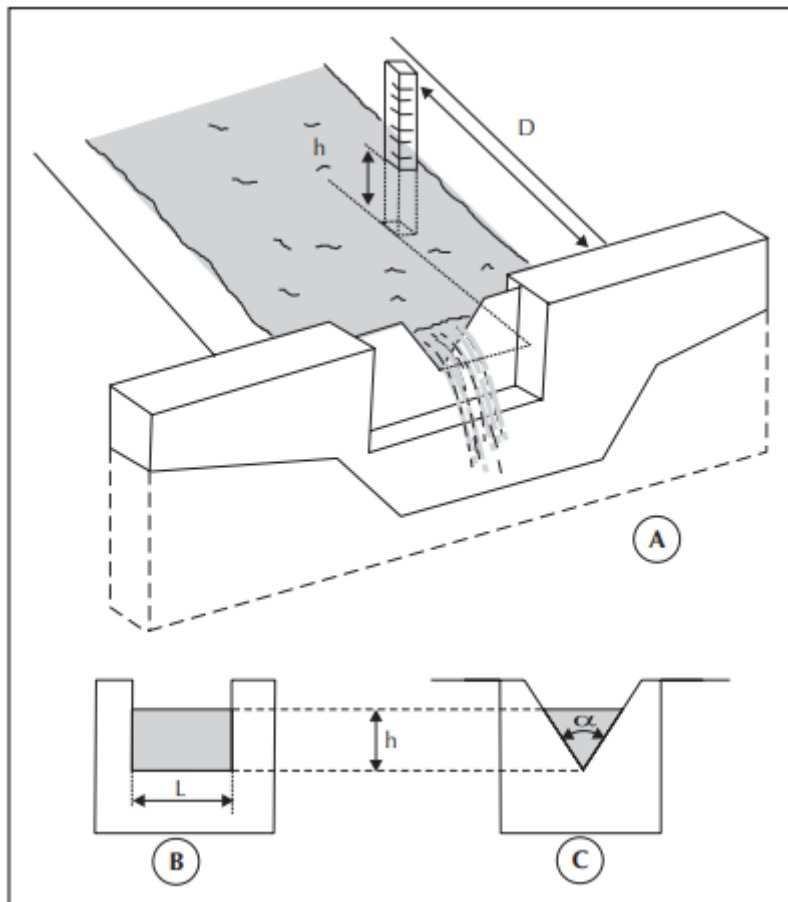


Figure 36 : -(A) schéma d'un déversoir à paroi mince : vue d'en face. [25]

Ces dispositifs sont installés sur les ouvrages neufs à la sortie des organes de drainage, et sur les barrages en service dans des zones où l'on observe des fuites.

4-5-3 Mesure de la piézométrie :

On peut classer les appareils en deux familles :

- Les piézomètres.
- Les cellules de pression interstitielles.

Les piézomètres :

Ils sont bien adaptés à la mesure du niveau piézométrique dans les fondations et en rive. Il s'agit de forages de faible diamètre (60 à 100mm) équipés de tubes crépines dans les sols meubles, à l'intérieur desquelles s'établit un niveau d'eau en équilibre avec le niveau de la nappe phréatique environnante. La « chambre de mesure » est le plus souvent, limitée à une courte partie du forage, la longueur restante étant isolée par un tubage et un coulis étanche.

Dans les remblais, on utilise parfois des piézomètres à chambre de mesure longue, en vue de détecter des zones de venues d'eau (par exemple en aval du système de drainage d'un remblai), mais la mesure n'est pas vraiment représentative d'un niveau piézométrique. Il faut alors veiller de plus à ce que le piézomètre ne crée pas de communications indésirables entre des zones théoriquement séparées.

La mesure est basée sur une lecture directe au moyen d'une sonde électrique d'environ 1cm de diamètre donnant la différence de cote entre la nappe phréatique et la tête du piézomètre qui aura été préalablement nivelée. [\[25\]](#)



Figure 37 : Appareil de mesure piézométrique. [11]



Figure 38 : Lecture piézométrique. [11]

La mesure des pressions interstitielles :

La mesure des pressions interstitielles dans les remblais est réalisée par des cellules à contre-pression ou à corde vibrante. La pression interstitielle régnant localement dans le remblai est transmise par une pierre poreuse au dispositif de mesure. Les cellules sont posées pendant la construction du remblai aux niveaux et emplacements choisis

et, selon le type, un câble ou des tubulures transmettent l'information au poste de mesure situé dans un local. Le soin apporté à la pose de ces cellules est primordial pour la qualité des mesures ultérieures, d'autant que ces appareils ne sont ni réparables, ni remplaçables. La pose de nouvelles cellules peut cependant se faire en forage, ce qui rend possible l'équipement de barrages en service. Il s'agit toutefois d'une opération délicate et relativement coûteuse. [26]

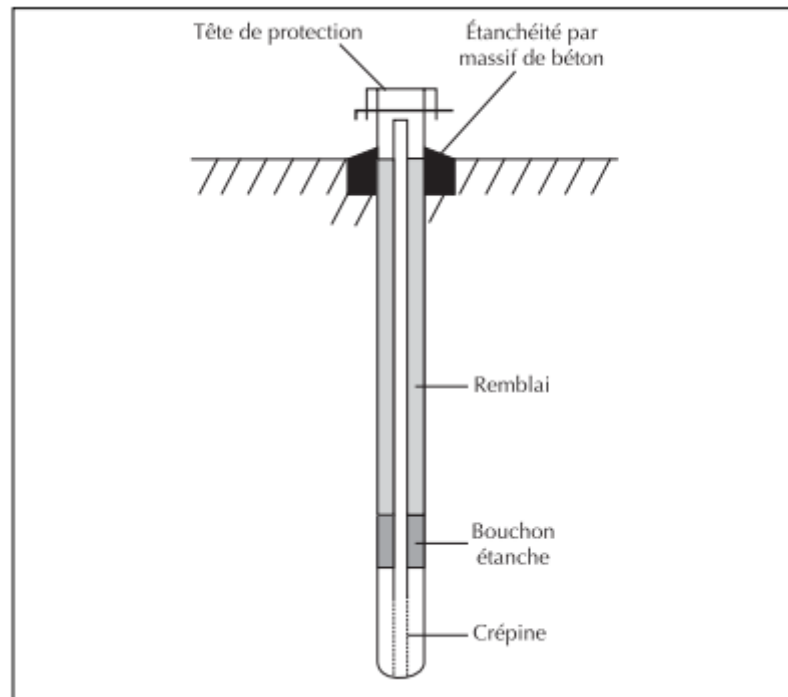


Figure 39 : Le piézomètre à tube ouvert. [26]

Les cellules de pression interstitielle ont des temps de réponse plus rapides que les piézomètres. Cependant, le coût du dispositif de mesure les réserve plutôt à des barrages de grande ou moyenne hauteur. Les cellules à corde vibrante sont recommandées pour leur longévité (mis à part les problèmes de léger fluage dans le temps).

Généralement, on distingue deux types de cellule de pression interstitielle :

❖ La cellule à contre-pression :

Le dispositif comporte une cellule de prise de pression noyée dans le remblai ou la fondation, une double tubulure flexible reliant la cellule au tableau de mesure, une valise ou un tableau de mesure avec bouteille d'azote sous pression et manomètres.



Figure 40 : Cellule avec dispositif de mesure à contre pression. [11]

Au tableau de mesure peuvent être reliées plusieurs cellules par l'intermédiaire d'une rampe de robinets. Pour une meilleure longévité, il convient de choisir des tubulures en polyéthylène plutôt qu'en rilsan. L'intérieur de la cellule comporte une membrane. D'un côté de cette membrane s'exerce la pression interstitielle par l'intermédiaire de la pierre poreuse. Le principe de la mesure consiste à équilibrer la pression interstitielle par une contre-pression appliquée grâce à la bouteille d'azote. [25]



Figure 41 : Tableau de mesure des pressions interstitielles. [25]

❖ La cellule à corde vibrante :

Le dispositif comporte une cellule de prise de pression noyée dans le remblai ou la fondation (figure 4), un câble électrique reliant la cellule au tableau de mesure, une valise contenant un dispositif d'excitation de la corde et de mesure de sa fréquence de vibration. [26]

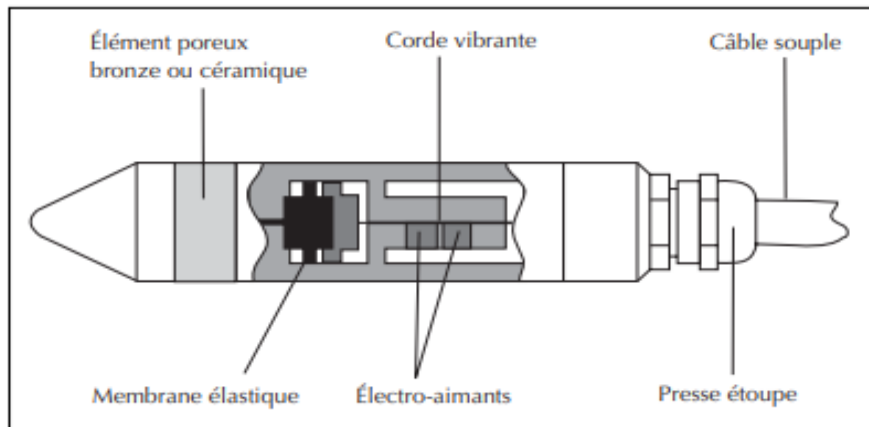


Figure 42 : Cellule de pression interstitielle à corde vibrante. [25]



Figure 43 : Cellule à corde vibrante [11]

Le principe de la mesure est le suivant : la pression interstitielle se communique par la pierre poreuse à un diaphragme. Une corde métallique est tendue entre un point fixe et ce diaphragme. Les variations de pression communiquées au diaphragme font varier la tension de la corde et donc sa fréquence propre de vibration (comme une corde d'instrument de musique). C'est cette fréquence de vibration que l'on mesure après excitation de la corde par un électroaimant disposé à l'intérieur de la cellule. [25]

4-5-4 Mesure des déplacements :

On peut distinguer schématiquement deux types de mesures de déplacements adaptés aux petits barrages :

- les mesures topographiques qui permettent de connaître les déplacements de repères matérialisés sur le barrage par rapport à des bases fixes situées autour de l'ouvrage :

nivellement pour suivre les tassements, mesures d'alignement pour suivre des mouvements dans la direction amont-aval, planimétrie pour suivre les mouvements dans les deux directions horizontales ;

– les pendules et les élongeâtes (ou extensomètres à grande base) qui permettent des mesures de déplacements différentiels entre la table de mesure et le point d'ancrage du fil ou de la barre. Si le point d'ancrage est situé en profondeur dans le rocher de fondation, on mesure alors un déplacement absolu. [26]

Un tassement excessif de la crête entraîne une diminution de la revanche (différence entre la cote de la crête et la cote des plus hautes eaux de projet), ce qui diminue la sécurité du barrage vis-à-vis du risque de surverse. Ce tassement peut refléter une forte compressibilité de la fondation, ou un compactage insuffisant du corps du barrage. [26]

Des amorces de glissement dans le talus aval du barrage, le talus des rives ou les versants de la retenue, sont susceptibles de remettre en cause de stabilité de ces talus. L'implantation d'inclinomètres peut permettre de localiser la zone de glissement en profondeur et de suivre l'évolution du glissement.

4-5-5 Mesure de déformations :

Selon que l'on mesure le déplacement relatif dans une ou dans trois directions, on distingue les fissuromètres ou les vinchons.

Fissuromètres :

Ces appareils sont installés sur un joint ou sur une fissure dont on veut suivre les évolutions. On mesure les déplacements relatifs des deux lèvres du joint ou de la fissure, en général dans l'axe perpendiculaire au plan de joint (ouverture du joint). [27]

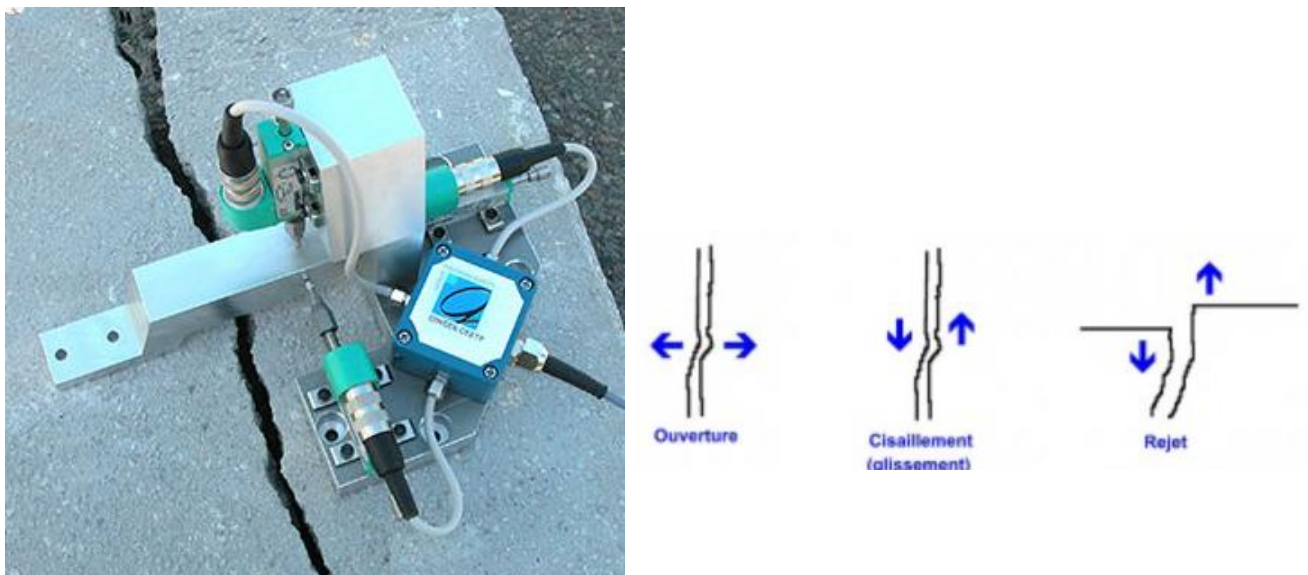


Figure 44: Fissuromètre Electronique 3D et les déplacements suivie [11]

Vinchons :

Le vinchon permet les mouvements relatifs dans les trois directions (ouverture, rejet et glissement). Le vinchon est constitué de deux pièces métalliques scellées de part et d'autre du joint ou de la fissure qu'il ausculte. La section des pièces métalliques doit être au minimum de $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$. [27]

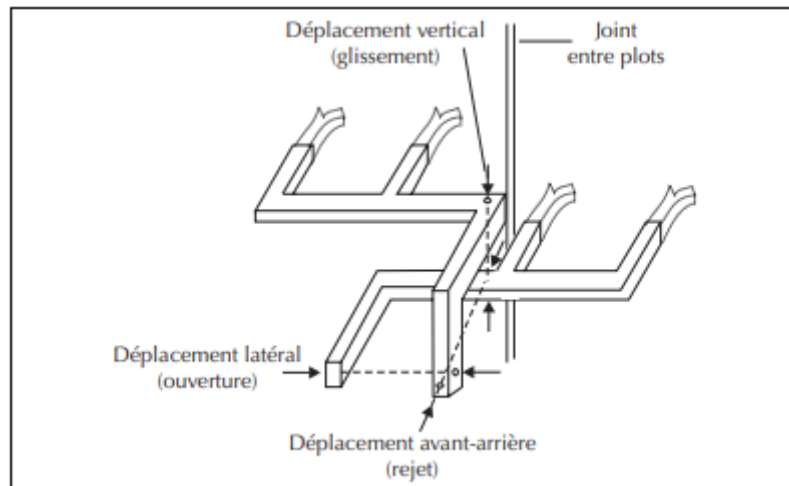


Figure 45 : Vinchon [25]

4-7 Les inconvénients des méthodes classiques :

Après avoir cité les principaux types de mesures ainsi que les différents appareils utilisés pour ces mesures, nous constatons que ces méthodes sont classiques, donc leur fonctionnement est limité. De façon plus précise, ce sont des méthodes ponctuelles c'est-à-dire des méthodes où on focalise seulement sur des points dans multiples emplacements de l'ouvrage que l'on veut mesurer, par exemple, la détection des zones vulnérables et qui sont exposées aux effondrements ou aux glissements de terrain surtout celles émergées dans l'eau sera presque impossibles avec ces méthodes classiques.

4-8 Les nouvelles méthodes d'auscultation :

4-8-1 Les méthodes d'auscultation suivant les composantes du barrage :

Selon notre vision, l'auscultation des barrages en terre peut se décomposer comme suit :

- ⇒ L'auscultation géotechnique : qui concerne la partie sol et souterraine ou sous-marine, à savoir celle liée aux phénomènes suivants :
 - Le glissement.
 - L'envasement.
 - L'effondrement.
 - Les infiltrations.
- ⇒ L'auscultation topographique : qui concerne les mesure géométriques superficielles comme :
 - Les fissures.
 - Les déplacements.

- Les déformations.

L'auscultation géotechnique :



Figure 46 : les différents instruments utilisés pour l'auscultation géotechnique

Pour l'auscultation géotechnique, nous utilisons de multiples objectifs pour la détection des glissements, des envasements, des effondrements et des infiltrations, tels que les piézomètres et ses différents types qui sont :

- ❖ Les sondes piézométriques : ces sondes hydrostatiques permettent de mesurer et surveiller le niveau d'eau (stable ou en mouvement), pour les puits et les forages en eaux profondes.



Figure 47 : une sonde piézométrique [11]

- ❖ Les piézomètres optiques : ce sont des types de piézomètres à fibres optiques ultra-compact et robuste, permettant la mesure des pressions d'eau interstitielle.
- ❖ Les piézomètres à laser : permettent de mesurer les pressions d'eau par principe de laser.



Figure 48 : les différents types des piézomètres

Pour l'auscultation des parties émergées dans l'eau, elle est faite par comparaison des cartes bathymétriques levé en différents périodes est utilisé. Le principe est celui du radar, le balayage est surfacique. Le produit du sonar est un Modèle numérique du terrain MNT précis.

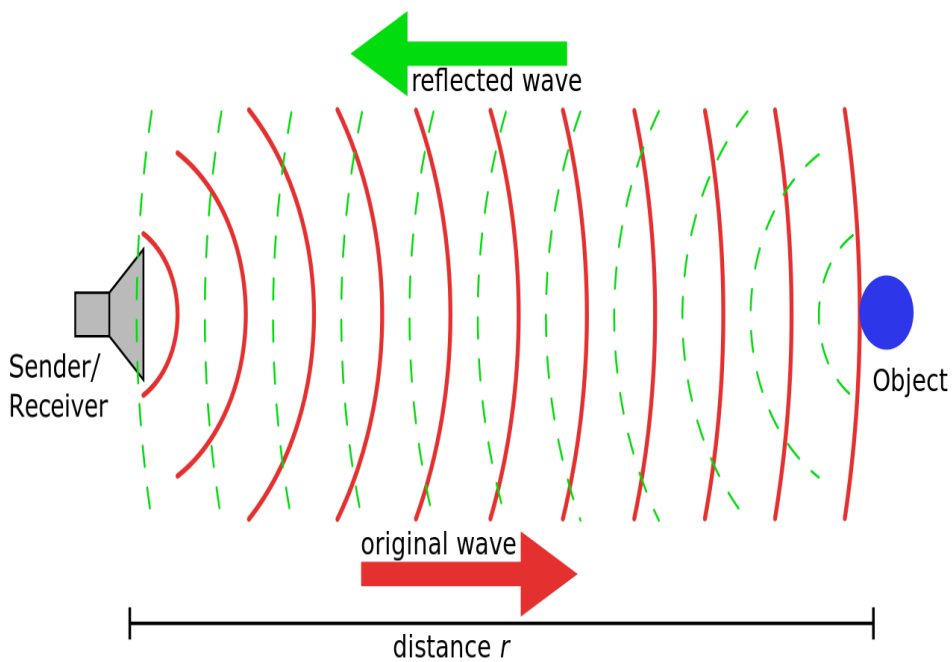


Figure 49 : A droite le principe du sonar, A gauche Sonar a Sonar à profondeur variable et son treuil

L'auscultation topographique :

Pour l'auscultation topographique, nous avons plusieurs choix de dispositif pour la détection des fissures, des déplacements et des déformations dans le corps du barrage, nous citons :

- ❖ Les stations totales :
Ces des appareils topographiques qui permette des mesures précise avec enregistrement des observations, elles sont les plus utilisé dans l'auscultation des barrages.



Figure 50 : utilisation d'un GPS pour la détection des problèmes topographique

❖ Les GPS :

L'utilisation du GPS est similaire que celle de la station totale sauf que L'avantage réside dans son indépendance des conditions météorologiques ainsi que le champ de vision entre les balises. Il est préférable d'avoir un récepteur GPS en permanence pour une auscultation efficace des barrages.



Figure 51: Récepteur GPS permanent

Soit pour le GPS ou les stations totales, il faut avoir un réseau de balises fixes pour les mesures périodiques. La configuration et la distribution spatiale est relatives aux zones vulnérables ou de risques.

- ❖ Les scanner 3D : durant ces dernières années, les améliorations technologiques des mesures utilisant la technique du LASER ont permis de faire évoluer les travaux du topographe. Ces évolutions offrent des nouvelles perspectives pour des relevés tri dimensionnel mais aussi pour des auscultations sans contact. Les scanners 3D se base sur le balayage surfacique par mesures de million de point en XYZ sur l'objet cible, avec une précision millimétrique.

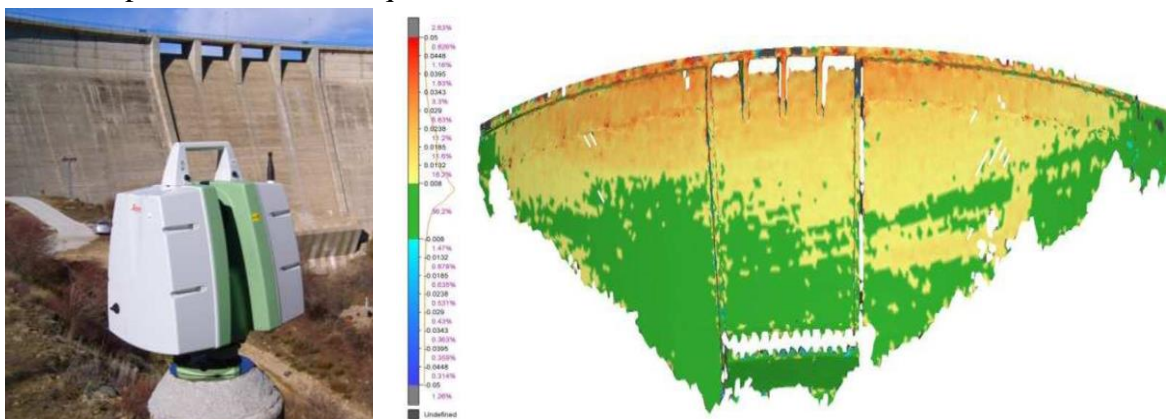


Figure 52: Scanner 3D avec Résultat des mesures à droite

- ❖ Radars : La technique est particulièrement adaptée pour le suivi des barrages grâce à sa très longue portée (plusieurs centaines de mètres à 1 km et plus selon antenne) et à sa grande précision sur la mesure de distance.



Figure 53: Radar par principe d'interférométrie

4-9 L'utilisation des logiciels pour l'auscultation des barrages :

Les logiciels d'auscultation des ouvrages sont des logiciels de traitement statistiques des données recueillis, ils permettent d'organiser les données, de les archiver, de les comparer et de les visualiser sous forme de graphes ou de tableaux.

Notons qu'il faut faire une différence entre les logiciels de conception géotechnique et les logiciels d'auscultation.

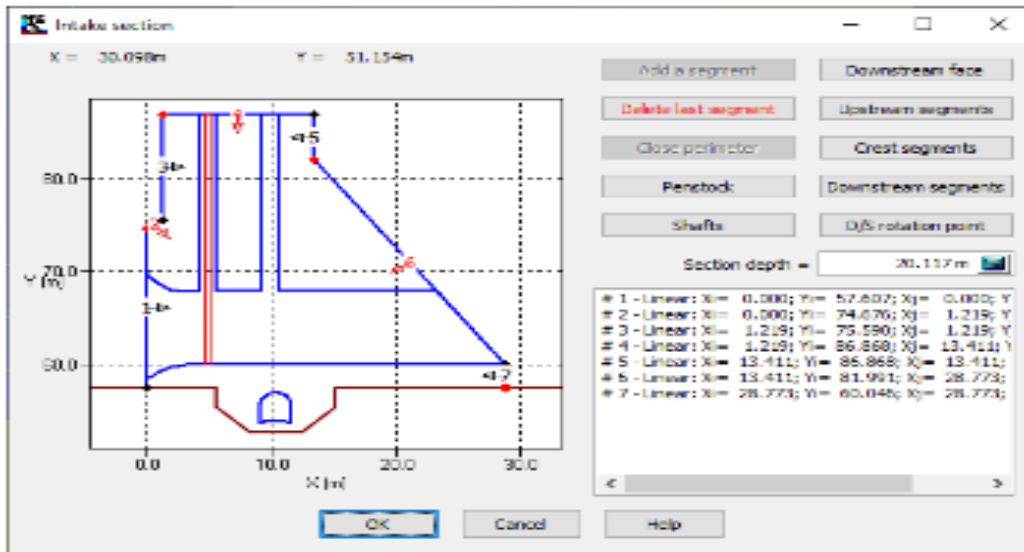
Les logiciels d'auscultation de barrages sont fournis en format d'une solution complète, c'est-à-dire intégrer avec le matériel d'auscultation ou sous forme d'application à part installable sur poste de travail. Ci-après une description des applications leaders dans ce domaine et caractéristiques et avantages.

Le logiciel : CADAM3D

CADAM3D est un logiciel convivial basé sur la méthode de gravité et développé à l'origine pour Hydro-Québec et pour le centre Expertise hydrique et barrages du ministère de l'Environnement du Québec.

Ce logiciel permet de modéliser en 3D un barrage, un évacuateur de crues, une prise d'eau ou un déversoir. Il n'est pas nécessaire d'être un expert en conception assistée par ordinateur. Il offre un environnement convivial pour nous aider à modéliser une structure hydraulique complexe. Il est possible d'ajouter des volumes, des vides et des masses pour compléter la géométrie. A cela s'ajoute la possibilité d'inclure des galeries de drainage, des barres d'ancrage passif et des remblais stabilisants.

Les avantages de ce logiciel :



Géométrie

Figure 54 : Prise d'écran du logiciel CADAM3D

- ✓ La géométrie de la structure est définie à l'aide d'outils de modélisation conviviaux.
- ✓ Les masses concentrées peuvent être utilisés pour ajouter ou soustraire des forces verticales en analyse statique et des forces d'inertie en analyse sismique.
- ✓ Définition des résistances à la traction, à la compression et au cisaillement des plans d'analyse et du contact béton-rocher.
- ✓ La fissuration des joints de levée peut être appliquée comme une condition initiale.

Le logiciel : MONITOR

Monitor est un logiciel développé et en constant développement par ISL Ingénierie pour l'auscultation des ouvrages de génie civil et plus particulièrement des barrages. Le logiciel permet la constitution d'une base de données d'auscultation, la visualisation des mesures, la modélisation et la surveillance.

C'est un logiciel de gestion de base de données d'auscultation des ouvrages de Génie civil et un outil d'aide à l'interprétation, visant le double objectif de rationaliser la gestion des données d'auscultation et d'assister l'exploitant pour leur interprétation.

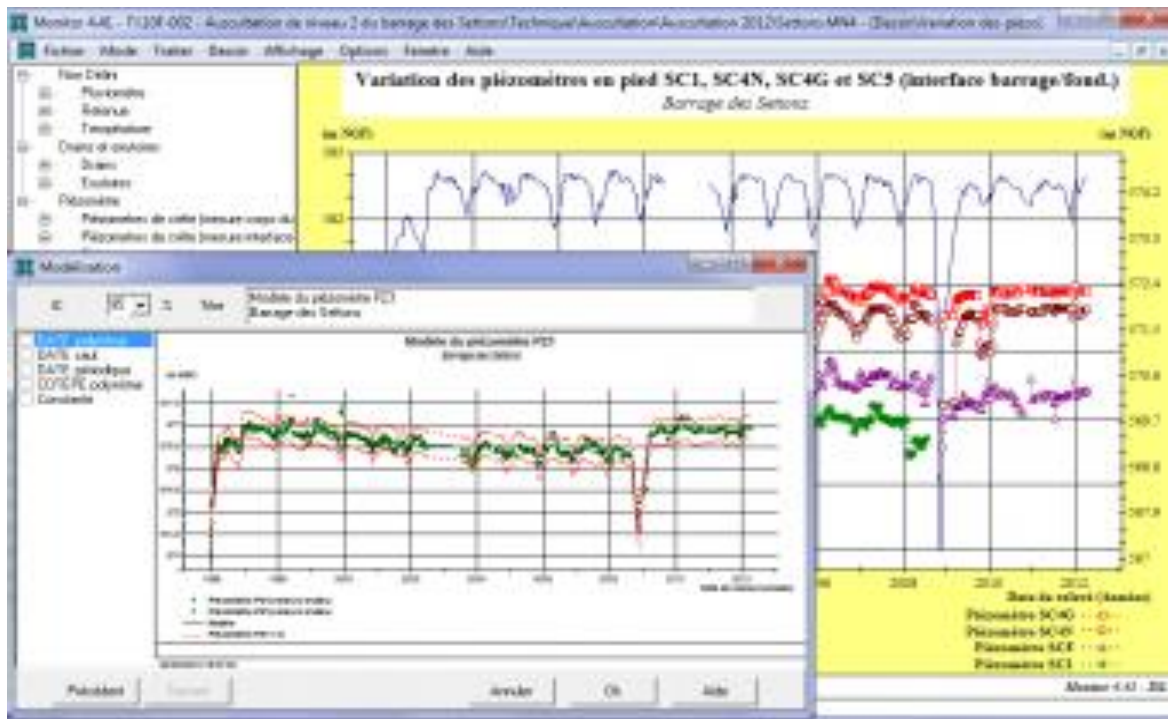


Figure 55 : Prise d'écran du logiciel MONITOR

Les avantages de ce logiciel sont :

- ✓ Stocker des bases de données d'auscultation (débits, pendules, niveau, ...) journalières ou horaires assurant :
 - L'archivage et le tri des mesures.
 - Gestion d'un dossier d'ouvrage d'auscultation.
 - Stockage des données sur serveur ISL.
- ✓ Visualiser les mesures de manière conviviale sous différentes formes : courbes, tableaux, vue 1D, vue 2D.
- ✓ Améliorer l'interprétation de niveau 0 et de niveau 1 à l'aide d'indicateurs de suivi des valeurs et des rapports « automatique ».
- ✓ Réaliser des modèles statistiques multi-variables permettant de définir à partir de la série de mesures disponibles, un modèle de comportement de prévision.
- ✓ Réaliser des graphiques de surveillance permettant d'établir une prévision de la mesure et un intervalle de confiance dans lequel doit se trouver une mesure « normale ».

Le logiciel : SURVEY

Survey est un logiciel statistique pour l'analyse de données d'auscultation de barrages et des digues.

Pour étudier le comportement d'un ouvrage face à diverses sollicitations et son évolution dans le temps, le traitement statistique ajuste les mesures brutes d'auscultation à un modèle explicatif. Pour obtenir des grandeurs comparables entre elles, les mesures brutes sont

ramenées à un état de sollicitation de référence, c'est-à-dire à des conditions de sollicitations identiques.

Les avantages de ce logiciel sont :

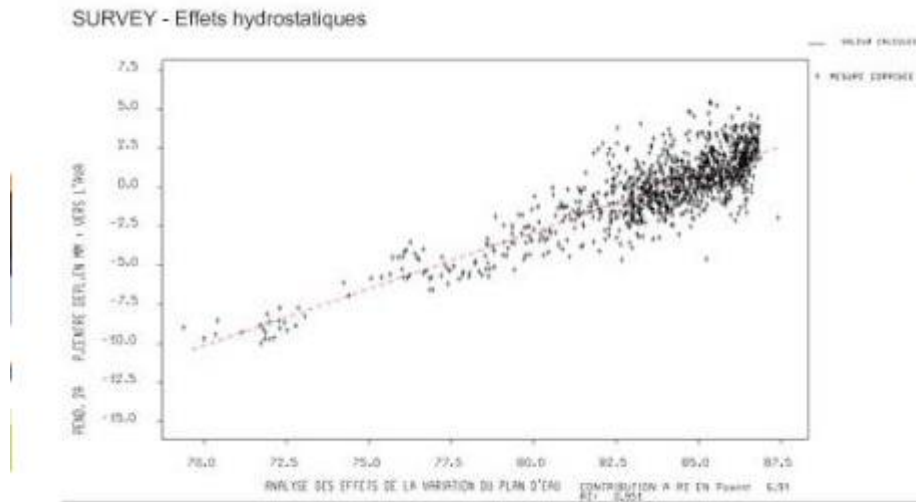


Figure 56 : Prise d'écran du logiciel Survey

- ✓ Formation possible sur mesure.
- ✓ Méthodes statistiques.
- ✓ Mise à jour régulière.

Le logiciel : Auscultex

Auscultex est un logiciel relatif à la gestion et à la capture des données d'analyse des barrages ainsi qu'à la gestion des cahiers d'inspection et de conservation.

La dernière nouveauté d'Auscultex est la capture de données sur place via un appareil PDA et l'extraction de données statistiques subséquente et des rapports continus avec plusieurs caractéristiques, grâce à la synchronisation de l'appareil périphérique et du PC.

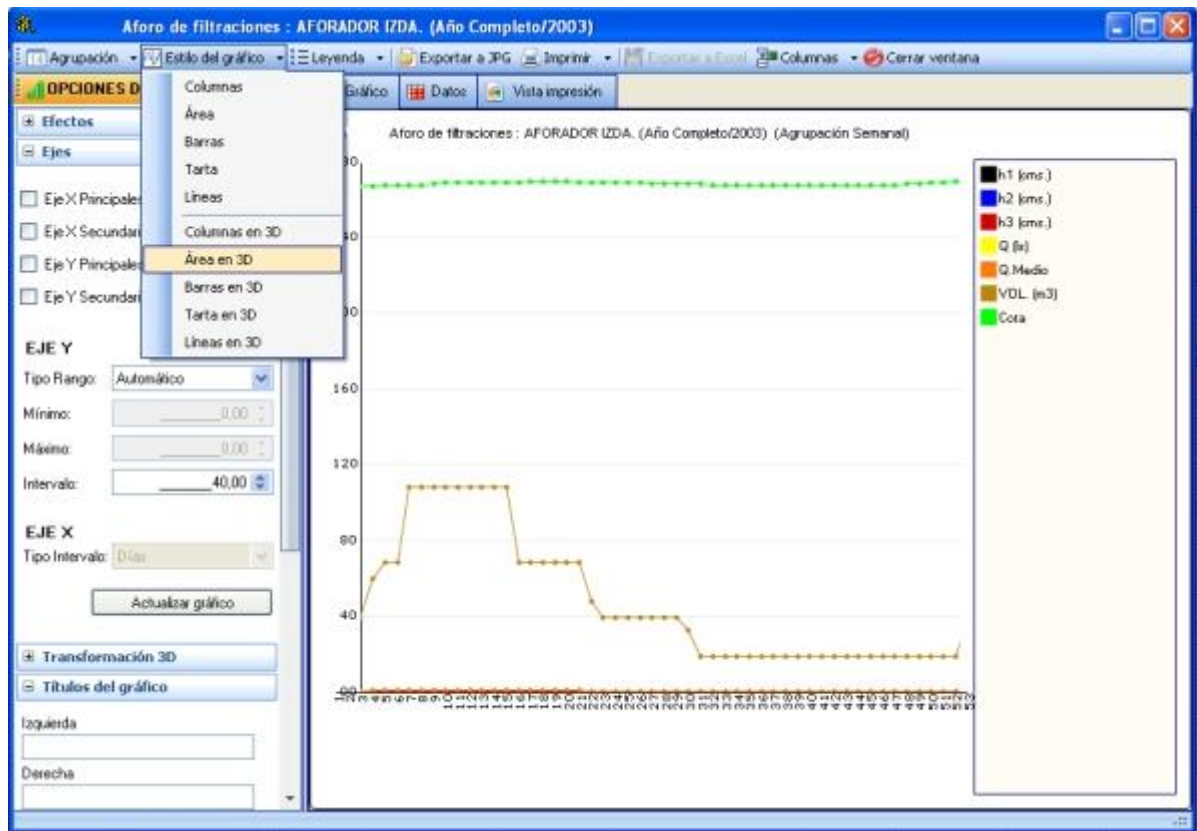


Figure 57 : Prise d'écran du logiciel Auscultex

Les avantages du logiciel :

- ✓ Auscultex permet de mécaniser et de compacter la saisie de données à partir d'un périphérique unique.
- ✓ Il accélère la réception des données via le PDA et permet d'obtenir facilement des données statistiques.
- ✓ Il résout les processus de gestion et les tests quotidiens d'un barrage en fonctionnement.
- ✓ Il permet de gérer pleinement chaque incidence, les procédures de visites et l'entretien quotidien d'une manière technologique très avancée, en réduisant le temps de travail.

Le logiciel : Leica GeomoS

Leica GeomoS est un logiciel qui garantit aux professionnels la flexibilité dans la gestion de leurs projets. Il est aussi ouvert, personnalisable pour une multitude d'applications de surveillance, une solution d'auscultation complète avec la plus grande précision et fiable pour affronter les défis majeurs dans le domaine de la surveillance d'infrastructures.

Les avantages du logiciel :

- ✓ Accepte la connexion à tout capteur ou logiciel d'auscultation Leica Geosystems ou fabricant tiers.

-
- ✓ Permet de nombreuses options de communications le contrôle des capteurs, le stockage des données et l'analyse instantanée.
 - ✓ L'API de Leica GeomoS permet les données dans vos propres systèmes.
 - ✓ Des flux de données automatisés utilisant les normes standards d'interfaçage offrent une fusion simple et puissante des capteurs.
 - ✓ GeomoS Monitor permet de programmer des cycles de mesure et enregistre toutes les données importantes dans la même base de données SQL.



Figure 58 : utilisation du logiciel Leica Geomos pour l'auscultation des barrages

4-10 Repérage des instruments d'auscultation :

Tous les instruments d'auscultation doivent être clairement identifiés, de façon à éliminer toute possibilité de confusion entre deux instruments ou plus. L'identification des instruments se fait en général au moyen d'une lettre désignant le type d'instrument (D pour drain, P pour piézomètre, C pour cellule de pression, V pour vinchon, ...), suivi d'un numéro d'ordre établi si possible logiquement (par exemple de la rive gauche à la rive droite, de l'amont à l'aval, du haut vers le bas, ...).

L'implantation précise des instruments doit être reportée sur plan et tous les renseignements nécessaires pour chaque instrument doivent figurer sur fiche :

- ➔ Date d'installation.
- ➔ Incidents rencontrés pendant la vie de l'instrument, opérations de maintenance.
- ➔ Cote de l'exutoire des drains et zone de captage.
- ➔ Cote de tête, cote de fond, hauteur crépine, diamètre des piézomètres.

-
- ➔ Cote de pose des cellules.
 - ➔ Mesure initiale des vinchons.
 - ➔ ... [26]

4-11 Dispositif d'auscultation des barrages en terre :

Il est bien entendu impossible de donner des règles strictes pour la conception des dispositifs d'auscultation des barrages. Ce qui suit doit être considéré comme des recommandations, à adapter au cas particulier que constitue chaque ouvrage.

Pour un barrage neuf, le dispositif d'auscultation doit être prévu dès l'avant-projet et mis en place pendant la construction. Il a vocation à évoluer, certains appareils pouvant être abandonnés délibérément au bout de plusieurs années et d'autres pouvant être ajoutés en cas de désordre révélé notamment par l'observation visuelle. Des instruments peuvent aussi être installés sur des barrages anciens qui n'en ont pas été pourvus à l'origine.

Les principaux phénomènes susceptibles de conduire à des désordres sont globalement de quatre types :

- des tassements de la crête du remblai, ce qui limite la sécurité du barrage vis-à-vis du risque de surverse, des pressions interstitielles excessives apparaissant lors de la construction du remblai ou lors de la première mise en eau, et qui peuvent remettre en cause les hypothèses adoptées lors du projet pour justifier la stabilité.
- un colmatage du système de drainage entraînant une montée de la piézométrie, qui peut atteindre le talus aval et mettre en danger la stabilité du remblai.
- L'existence de circulations d'eau à travers le remblai ou la fondation, non contrôlées par le système de filtration et de drainage, et pouvant, par leur aggravation progressive, conduire à l'érosion interne et à un mécanisme de renard.

Solutions :

Les tassements sont contrôlés à l'aide d'un dispositif topographique constitué de bornes de nivellement placées en crête de remblai (et éventuellement sur la risberme aval) tous les 20 à 30 m dans le sens de rive à rive, et de piliers d'observation placés sur les rives dans des zones non susceptibles d'être affectées par des mouvements.

La piézométrie est observée soit par des piézomètres, soit par des cellules de pression interstitielle. Un dispositif idéal comprend, d'une part, des profils amont-aval équipés de cellules permettant l'interprétation physique de l'évolution de la saturation et, d'autre part, un profil rive à rive sur le parement ou la risberme aval équipé de piézomètres à crépines longues dont le rôle est de détecter plus sûrement l'apparition d'une zone de fuite.

Si le barrage est doté d'un système de drainage des fondations, il convient d'en contrôler l'efficacité par des cellules ou des piézomètres, disposés de part et d'autre du système de drainage.

Les débits de drainage et fuites sont contrôlés par des dispositifs simples de mesure des débits. Les drains du barrage débouchent dans un collecteur aménagé à cet effet. Il peut être intéressant de séparer les zones de mesure pour faciliter l'analyse des résultats. [26]

4-12 Périodicité des mesures d'auscultation :

La périodicité des inspections visuelles doit être mensuelle à bimestrielle en phase d'exploitation normale et en l'absence de tout indice inquiétant quant au comportement de l'ouvrage.

C'est à l'occasion de ces visites d'inspection qu'il convient de procéder aux mesures simples d'auscultation :

- cote du plan d'eau.
- débit des drains.
- piézomètres et des cellules de pression interstitielle.
- vinchons.

En résumé, la périodicité de ces mesures dépendra de trois facteurs :

- La position du barrage dans son cycle de vie : première mise en eau, exploitation normale, vidange pour inspection, ...
- Son niveau de remplissage.
- L'apparition de phénomènes inquiétants. [26]

4-13 L'interprétation des mesures d'auscultation :

La vérification de la mesure :

L'agent d'exploitation chargé de faire les mesures des instruments d'auscultation, doit vérifier chaque mesure. Cela consiste à comparer la mesure à la précédente, ainsi qu'à la plage habituelle de variation de l'instrument considéré. Ainsi, on identifie rapidement la plupart des erreurs de lecture, ainsi que les dysfonctionnements éventuels de l'appareil d'auscultation. On peut alors refaire la mesure sans délai et/ou vérifier le bon fonctionnement de l'appareil.

Une vérification attentive est nécessaire. Si l'exploitant dispose d'un matériel informatique, il peut directement visualiser sur graphique interannuel les variations des mesures de chaque instrument et ainsi identifier rapidement toute mesure anormale ou inquiétante.

L'analyse des mesures :

Les variations des mesures relevées sur les barrages résultent d'une combinaison de facteurs le plus souvent difficiles à dissocier immédiatement, quels que soient la nature et le perfectionnement des instruments d'auscultation utilisés. Parmi tous les facteurs qui influencent sur le comportement d'un ouvrage, trois sont largement prépondérants :

-
- Les conditions hydrostatiques (niveau d'eau dans la retenue).
 - es conditions climatiques (température, pluie, nappe de versant).
 - L'âge du barrage.

Si les sollicitations hydrostatiques et climatiques sont réversibles par nature, les effets du facteur « temps » traduisent, au contraire, le caractère irréversible ou évolutif des phénomènes observés. Les variations des sollicitations réversibles sont évidemment intéressantes à connaître. Elles ne doivent pas, en principe, être de nature à mettre en cause la sécurité de l'ouvrage puisqu'il aura été normalement dimensionné pour pouvoir y résister. [23]

4-14 L'analyse de quelques phénomènes irréversibles :

Augmentation du niveau piézométrique dans un remblai :

Une telle évolution est inquiétante surtout si elle est constatée en aval du drain. Elle peut être le signe d'un contournement de ce drain. Dans tous les cas, la stabilité du remblai aval va diminuer.

Augmentation des débits des drains :

Dans un barrage en remblai, l'augmentation des débits de drainage traduit le vieillissement de l'étanchéité. Le phénomène n'est vraiment inquiétant que s'il est rapide. Il convient d'essayer de diagnostiquer l'origine de l'évolution des débits en scindant si possible les zones de mesure, afin d'orienter ensuite les actions de maintenance ou de réparation.

Baisse des débits des drains :

Contrairement à ce que l'on pourrait croire, la baisse de débit d'un drain peut être plus inquiétante que son augmentation. En effet, une baisse de débit à conditions hydrostatiques et climatiques constantes peut avoir deux origines :

- une amélioration naturelle de l'étanchéité du barrage et de sa fondation par colmatage à l'amont de la porosité et des fissures, ce cas est évidemment tout à fait favorable et rassurant.
- un colmatage du dispositif de drainage qui se trouve peu à peu contourné et ne capte plus les débits de fuite. Dans ce cas très inquiétant, la piézométrie va augmenter et les écoulements non contrôlés peuvent être à l'origine de mécanismes d'érosion interne ou de glissements du talus aval pour un barrage en remblai.

Conclusion et recommandations :

Dans le domaine des barrages comme dans bien d'autres cas, le risque zéro n'existe pas, d'où la nécessité d'un suivi méthodique du comportement des ouvrages, donc pour le suivi d'un barrage, l'auscultation est indispensable, de sa conception à sa mise hors service. Elle est précieuse pour faire progresser la connaissance sur le comportement et le vieillissement du barrage, et permet d'indiquer les travaux de confortement nécessaires avant qu'il soit trop tard.

A travers la description des avantages et inconvénients des technologies utilisées dans l'auscultation des barrages, nous pouvons confirmer que l'intégration de ces technologies représente la solution la plus judicieuse à suivre.

En effet, ces outils ne doivent en aucun cas écarter l'inspection visuelle, ni privilégier le balayage surfacique par laser 3D par rapport à la mesure ponctuelle par GPS. Ou la mesure par sonde radar par rapport au levé bathymétrique par simple corde...etc, Car chacune de ces méthodes et techniques à son échelle de mesure tout en mettons en évidence les avantages et les faiblesses qu'elle présentent.

Par ailleurs l'auscultation en temps réel doit être visée par l'intégration des nouveaux outils de télémesures pour les dispositifs décrits dans ce mémoire. Ceci permettra une amélioration des systèmes actuellement installés au niveau de nos barrages sans avoir recours au montage d'un système de zéro.

Nous pouvons dire que le barrage en terre représente un seul corps dont tous les organes sont étroitement liés. L'auscultation par système d'information intégrant tout l'aspect discuté représente la solution recommandée pour un management efficace pour la sécurité et la maintenance des barrages en terre.

Références bibliographiques :

- [1] : SUPPORT-COURS (DEPARTEMENT GENIE CIVIL, UNIVERSITE LARBI TEBSI)
- [2] : (2015/2016) (DEPARTEMENT GENIE CIVIL, UNIVERSITE ZIANE ACHOUR DE DJELFA)
- [3] : SUPPORT-COURS GENIE-CIVIL (LES BARRAGES EN REMBLAI)
- [4] : SUPPORT-COURS HYDRAULIQUE (LES DIGUES)
- [5] : SUPPORT-COURS GENIE-CIVIL (LES DIFFERENTS TYPES DE BARRAGES)
- [6] : ENCYCLOPEDIA UNIVERSALIS (BARRAGES, LES OUVRAGES ANNEXES)
- [7] : ARTICLE GEORISQUE : MIEUX CONNAITRE LES RISQUES SUR LE TERRITOIRE
- [8] : LE RISQUE RUPTURE DE BARRAGE DIMENC 2012
- [9] : (2014/2015) PROJET FIN D'ETUDE : ETUDE NUMERIQUE DE LA CONCEPTION DES BARRAGES EN TERRE-(DEPARTEMENT GENIE CIVIL – UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA)
- [10] : MINISTERE TECHNIQUE DE L'AGRICULTURE DES BARRAGES EN AMENAGEMENT RURAL.
- [11] : GOOGLE IMAGE
- [12] : LES BARRAGES GAMME 2006
- [13] : MAALEL,K ET HAFSIA, Z (MAI 2012) POLYCOPIE DU COURS OUVRAGES HYDRAULIQUES. UNIVERSITE DE TUNIS EL MANAR.
- [14] : ETUDE ET ANALYSE GEOTECHNIQUE DE CONSTRUCTION D'UN BARRAGE DE RETENTION D'EAU A AMBATOVOY.
- [15] : RODRIGUEZ, BERNARDO LA ROSA, SANTOS (2003/2004) MANUEL DE CONCEPTION ET PROJETS TYPIQUES DES DIGUES EN TERRE. ALGER
- [16] : LABORATOIRE DE CONSTRUCTION HYDRAULIQUE, ECOLE POLYTECHNIQUE DE LAUSANNE.
- [17] : MOULAY ELBOUDKHILI, A (JUN 2014) ETUDE PARAMETRE DE LA STABILITE DES BARRAGES POIDS. UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID.
- [18] : RECOMMANDATION POUR LA JUSTIFICATION DE LA STABILITE DES BARRAGES POIDS JANVIER 2006.

[19] : FEMMAM, H ET BENMEBAREK, N (MARS 2011) EFFETS DES DRAINS SUR LA STABILITE DES BARRAGES EN TERRE.

[20] : WWW. HYDROCOP.ORG

[21] : BOUBIDI, S (23 JANVIER 2012) 2TUDE DE LA STABILITE D'UN REMBLAI CAS DE GLISSEMENT DE L'AUTOROUTE EST-OUEST AU PK 210 (CONSTANTINE).

[22] : LA HOUILLE BLANCHE : ECOULEMENT EN MILIEU POREUX FUITES SOUS LES BARRAGES.

[23] : AUSCULTATION ET SUIVI DES OUVRAGES – LES MESURES D'AUSCULTATION : PRINCIPE ET OUTILS – LE RAPPORT D'AUSCULTATION (LES MESURES D'AUSCULTATION : PRINCIPES ET OUTILS LE RAPPORT D'AUSCULTATION.

[24] : M.POUPART, EDF / P.ROYET, CEMAGREF (LA SURVEILLANCE DES BARRAGES)

[25] : PAUL ROYET, GUIDE PRATIQUE : LA SURVEILLANCE ET L'ENTRETIEN DES PETITS BARRAGES.

[26] : S. BONELLI, K. RADZICKI, J. SZCZESNY, R. TOURMENT, H. FELIX (L'AUSCULTATION DES BARRAGES EN TERRE : UNE NECESSITE)

[27] : E.-R. MICHALSKI, D.CLERDOUET (LA SECURITE DES PETITS BARRAGES : ANALYSE DES RISQUES POTENTIELS, PROPOSITIONS DE MESURES TECHNIQUES PREVENTIVES).