

CONCEPTION DES BARRAGES EN BETON

Hafid SOUNNY / DAH

www.GenieCivilPDF.com

PLAN DE L'EXPOSE

- ◆ Introduction
- ◆ Types de barrages
- ◆ Actions appliquées sur le barrage
- ◆ Etude de stabilité
- ◆ Etanchéité et drainage
- ◆ Traitement de la fondation

INTRODUCTION

Pourquoi un barrage en béton ?

- ◆ Nécessité d'évacuer une crue importante
- ◆ Incertitudes sur l'hydrologie (moins sensible au déversement)



INTRODUCTION

Pourquoi un barrage en béton ?

- ◆ Présence de fonctions hydrauliques complexes dans l'ouvrage (EC vanné, VF de fort débit)



INTRODUCTION

Conditions requises

1. Qualité de la fondation :

Fondation rocheuse de bonne qualité et proche de la surface



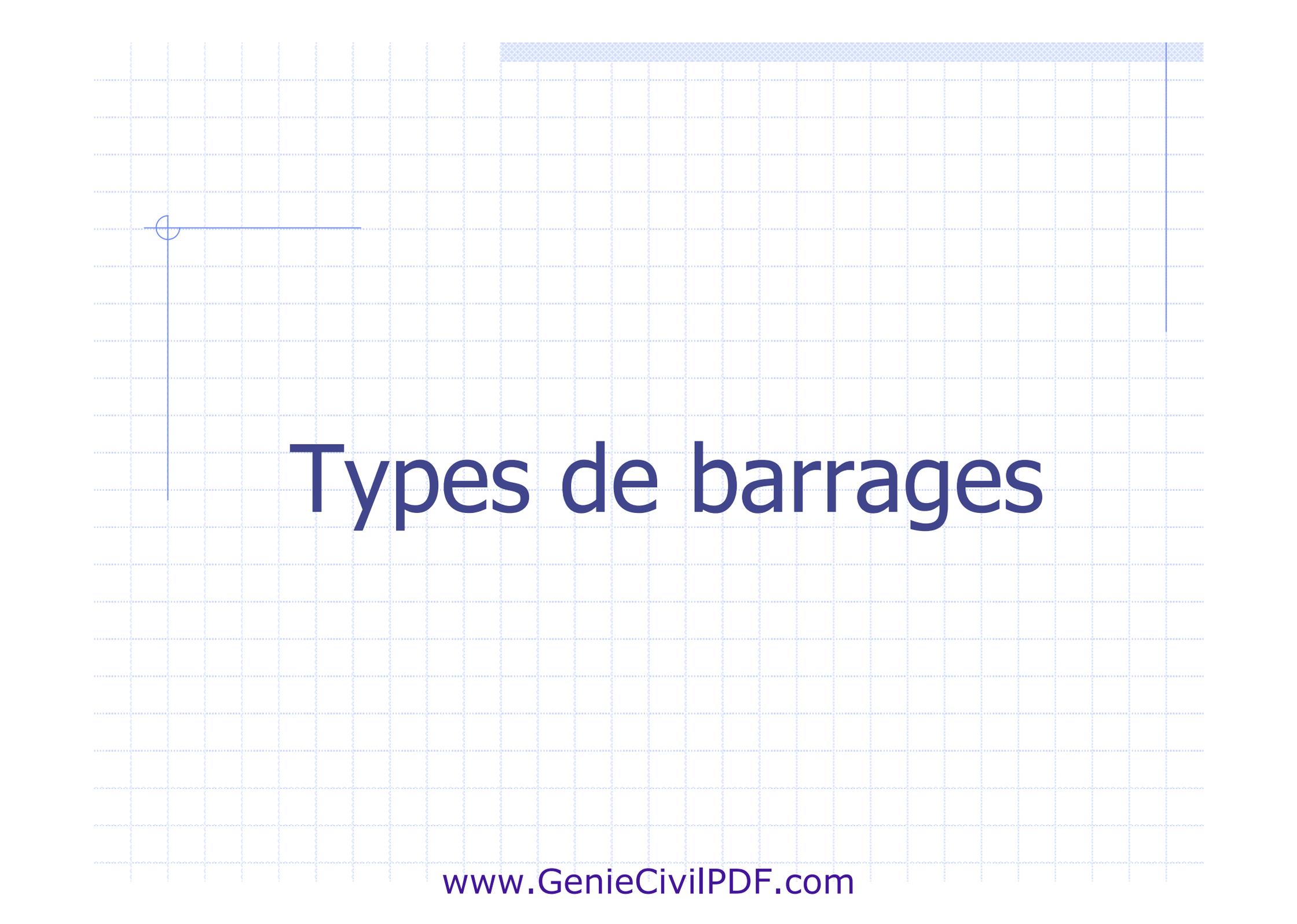
INTRODUCTION

Conditions requises

2. Disponibilité des matériaux de construction (granulats) en quantité et qualité suffisantes



Ces deux conditions sont souvent satisfaites simultanément.



Types de barrages

Types de barrages

1. Barrage Poids :

Massif, ce type, de section transversale triangulaire, résiste à la poussée de l'eau par son poids. Le poids de l'ouvrage permet de mobiliser le frottement sur la fondation

2. Barrage voûte :

Résiste grâce à sa forme à la poussée de l'eau qu'il reporte sur les terrains d'appui en rive et en thalweg. Constitué d'une voûte, parfois très mince, à simple ou à double courbure, le barrage voûte transmet au rocher d'appui des efforts nettement plus élevés que les autres types de barrages

3. Barrage à contreforts :

Résiste par son poids et par sa forme. Constitué d'un voile à l'amont qui reporte la poussée de l'eau sur les contreforts, il utilise moins de béton que le barrage poids

Type de barrages

Barrage voûte

Géométrie :

- Arcs travaillant en compression :
on exige que la contrainte
admissible du béton :

$$\sigma_{\text{cmax}} = 5 \text{ Mpa (Fs = 5)}$$

- $\sigma = p R / e \rightarrow (e = \dots)$

σ : Contrainte dans le béton

P : pression hydrostatique

R : rayon de la voûte

e : épaisseur de la voûte



Type de barrages

Barrage voûte

Conditions exigées :

- Conditions topographiques

Variante intéressante lorsque :

$$L/H < 6$$

- Rigidité de la fondation

Suffisante pour assurer un appuis
aux arcs : $E > 5 \text{ GPa}$



Type de barrages

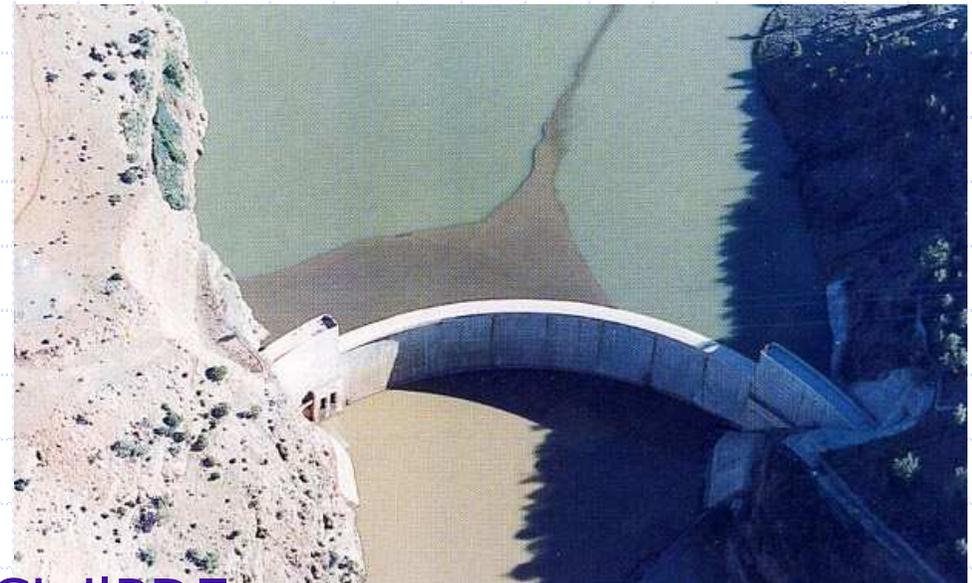
Barrage voûte

Conditions exigées (suite) :

- Résistance mécanique de la fondation

La fondation devra rester dans le domaine élastique sous les sollicitations élevés de la voûte

- Tenue des dièdres de fondation
sous l'effet des sous pression non dissipées à cause des compressions de la voûte



Type de barrages

Barrage voûte

Avantages :

- Économique :
~ 8 fois de moins p/r barrage poids
- peu sensible à la submersion
- non sensibles à la sous pression
(faible surface de contact béton-fondation)



Type de barrages

barrage poids

Conditions exigées

- Fondation rocheuse de qualité suffisante
- Faible déformabilité de la fondation (tassement différentiel !)
- Bonne résistance de la fondation au cisaillement (∃ Joint de glissement ?!)



Type de barrages

barrage poids

Barrage en maçonnerie :

- Agencement manuel de pierres ou moellons cimentés par du mortier de haute résistance
- Moellon bruts pour le corps du barrage et moellons taillés pour les parements



Barrages en maçonnerie



Type de barrages

barrage poids

Barrage en béton conventionnel (BCV) :

- Granulats (0-80mm)
- dosage de ciment : 200 à 250 kg/m³
- mise en place par plots de dimensions maximales 15x15m, pour diminuer les effets d'exothermiques de la réaction d'hydratation du béton ∨ joints de contraction longitudinaux et transversaux



Type de barrages

barrage poids

Béton compacté au rouleau (BCR) :

- Innovation technique majeure dans la technologie des barrages
- mise en place par les moyens de terrassement (transport par camion, réglage au buteur, compactage au rouleau vibrant lourd camions, buteurs, compacteurs) avec couches de 30cm
- Ce mode de réalisation exige une surface de plate-forme de travail supérieure à 500 m² pour que les engins puissent évoluer efficacement
- faible dosage en ciment : ~ 100 à 150 kg/m^3 moins d'exothermie
moins de joints de contraction
- Étanchéité amont assurée par membrane en PVC ou masque en béton
- Avantage majeur : Rapidité d'exécution

Type de barrages

barrage poids

Béton compacté au rouleau (BCR)



Type de barrages

barrage poids

Remblai dur :

- Technique nouvelle pour les petits barrages
- Symétrique de fruits $\sim 0,7 H/1V$: contraintes faibles et uniformes
- Etanchéité assurées par un masque amont réalisé après montée du massif : les fissurations dues à l'exothermie sont évitées
- remblai dur en BCR : utilisation d'alluvions naturels avec un traitement minimum et un dosage en ciment également minimum ($\sim 50 \text{ kg/m}^3$)
- Adapté aux fondations médiocres et au séisme

Type de barrages

barrage poids

Remblai dur :



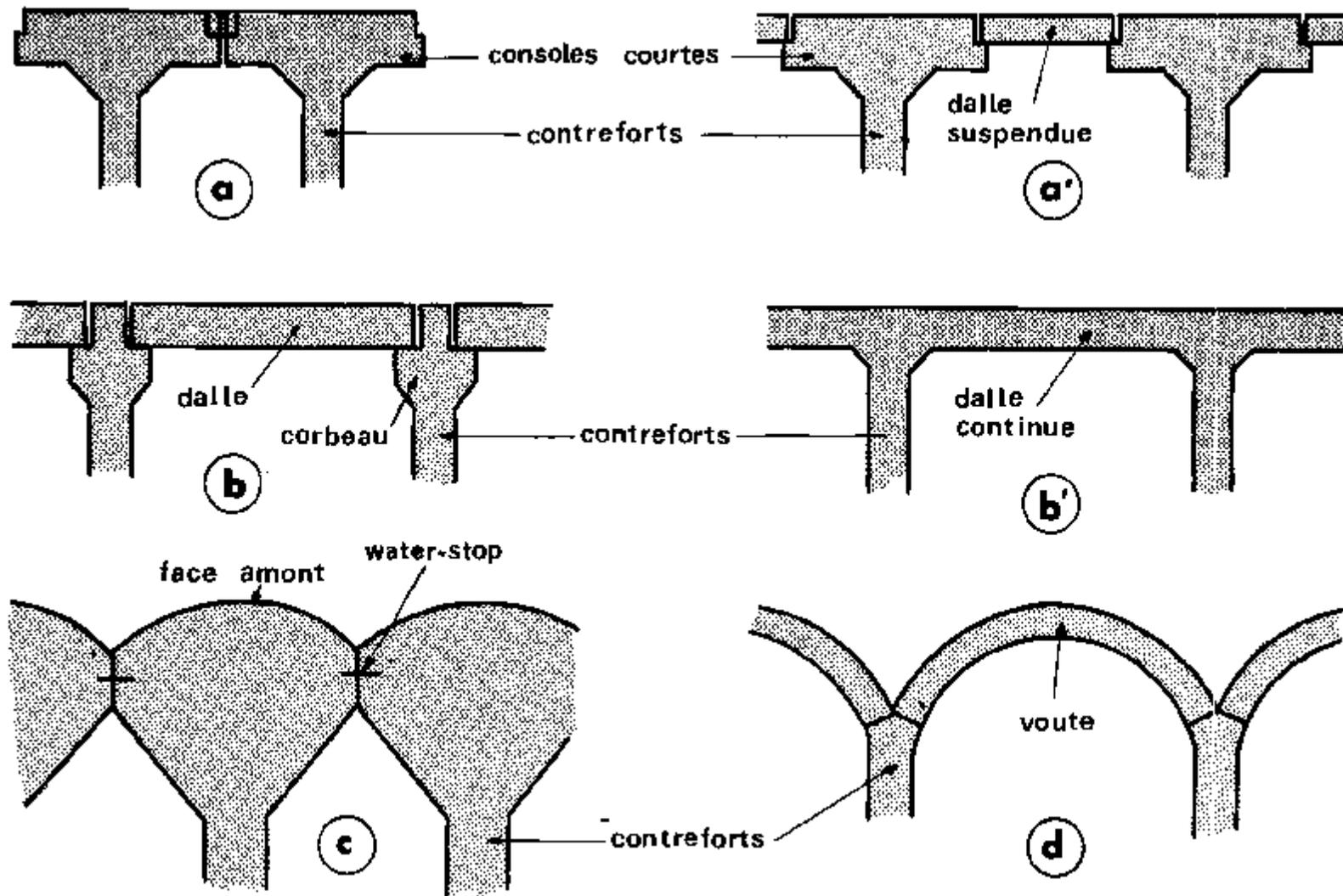
Type de barrages

barrage à contreforts

- Dans les larges vallées où le barrage poids en béton serait coûteux et où le barrage voûte n'est pas mécaniquement possible
- Coffrages de surface plus importants et plus compliqués
- Etanchéité - voile à l'amont ; Stabilité – contreforts
- Moins de sous pression

Type de barrages

barrage à contreforts



Type de barrages barrage à contreforts



Type de barrages

Choix du type

- ✓ **voûte** : les sites rocheux en vallée étroite avec organes hydrauliques sont importants
- ✓ **Maçonnerie** : contextes où la main- d'œuvre est abondante
- ✓ **Béton classique BCV** : les barrages comportant des ouvrages hydrauliques complexes, en particulier les barrages mobiles
- ✓ **BCR** : solution économique et sûre, dès que le volume de béton dépasse 35 à 40000 m³
- ✓ **Remblai dur à masque** : sites difficiles caractérisés par une fondation rocheuse relativement médiocre ou une exposition aux séismes



Actions appliquées sur le barrage

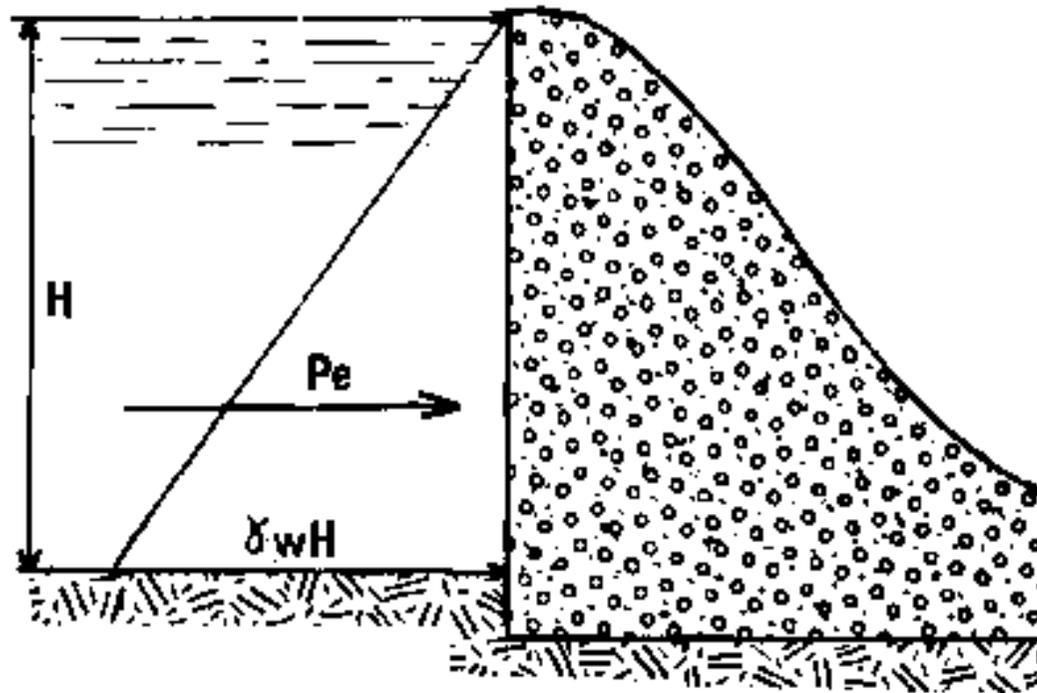
Actions appliquées sur le barrage

Action de l'eau

Poussée de l'eau :

$$P_e = 1/2 \gamma_w H^2$$

On considère le cas le plus défavorable qui correspond à une eau chargée soit un poids volumique $\sim 1,1$ à $1,3 \text{ t/m}^3$



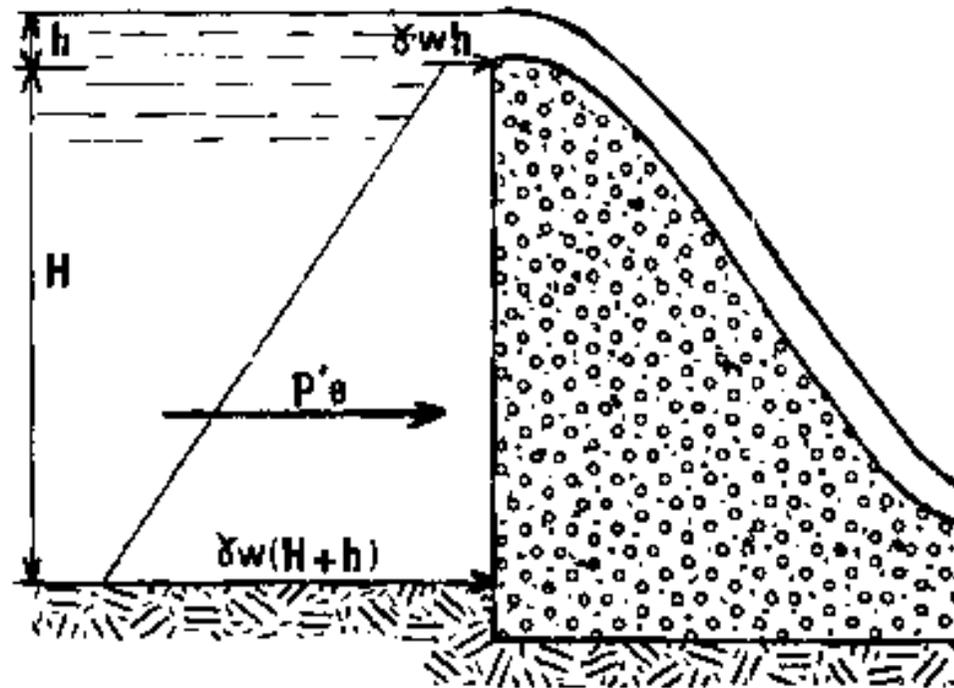
a : sans déversement

Actions appliquées sur le barrage

Action de l'eau

Poussée de l'eau en cas de plot déversant :

$$P_e = 1/2 \gamma_w (H + 2h) H$$



b : avec déversement

Actions appliquées sur le barrage

Action de l'eau

Action des sédiments :

Les sédiments s'accumulent souvent au pied amont du déversoir, il en résulte une poussée horizontale de valeur :

$$P_T = 1/2 \gamma_i h^2 \operatorname{tg}^2 (\pi/4 - \varphi/2)$$

γ_i : poids volumique immergé des sédiments $\sim 1 \text{ t/m}^3$

φ : angle de frottement interne des sédiments $\sim 20^\circ$

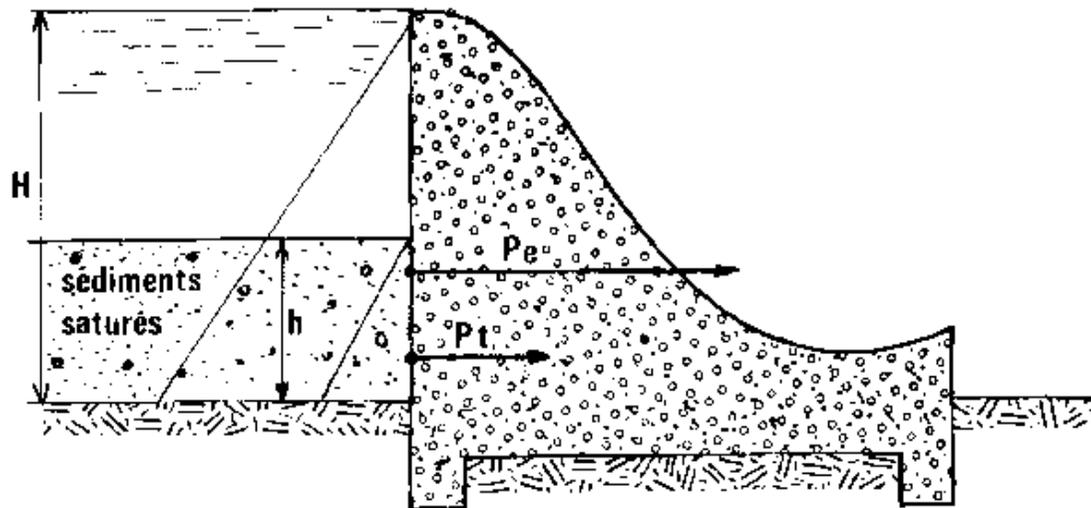


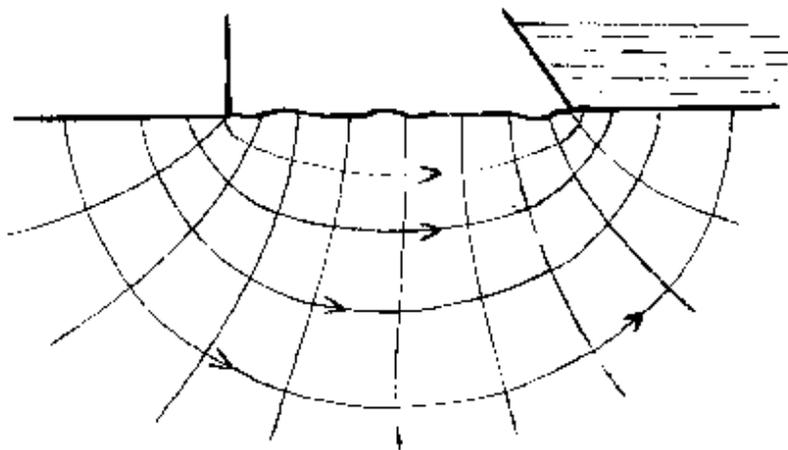
Figure V.2. La poussée des sédiments saturés s'ajoute à la poussée hydrostatique

Actions appliquées sur le barrage

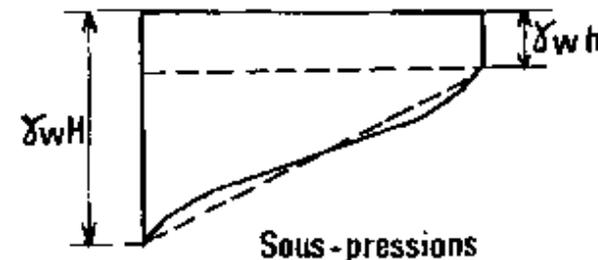
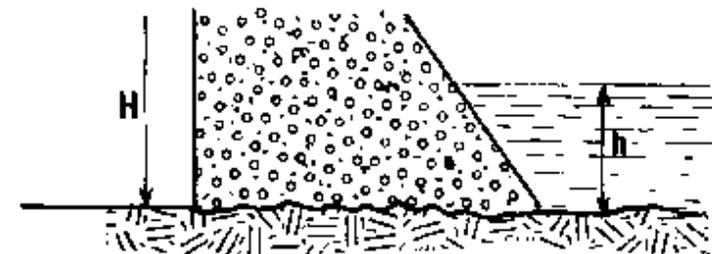
Action de l'eau

Les Sous-pressions :

La porosité, la fracturation et la fissuration des roches \vee pénétration de l'eau \vee Les interstices de la fondation sont occupés par l'eau qui exerce une pression sur les parois notamment : la surface de contact (Béton – Rocher) ou sur un plan de faiblesse situé dans la fondation ou dans l'ouvrage même.



Lignes d'écoulement sous l'ouvrage

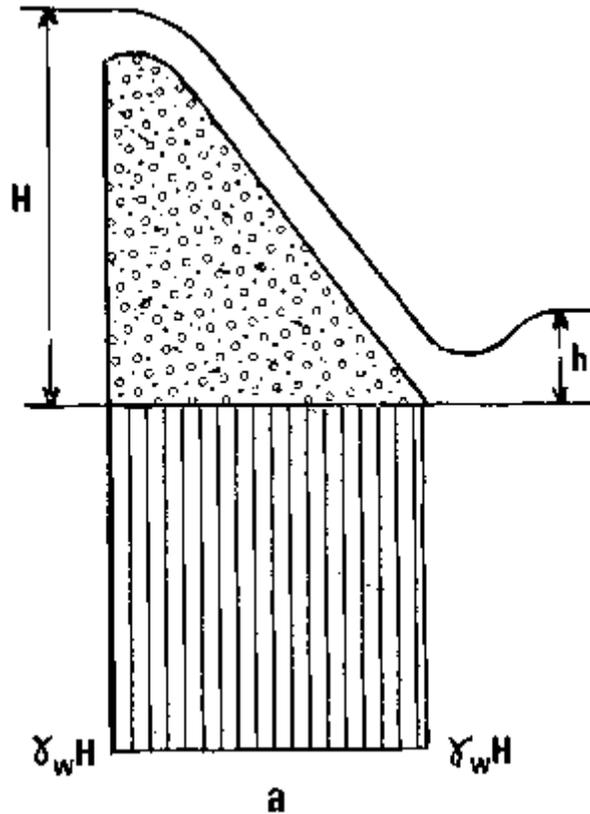


Sous-pressions

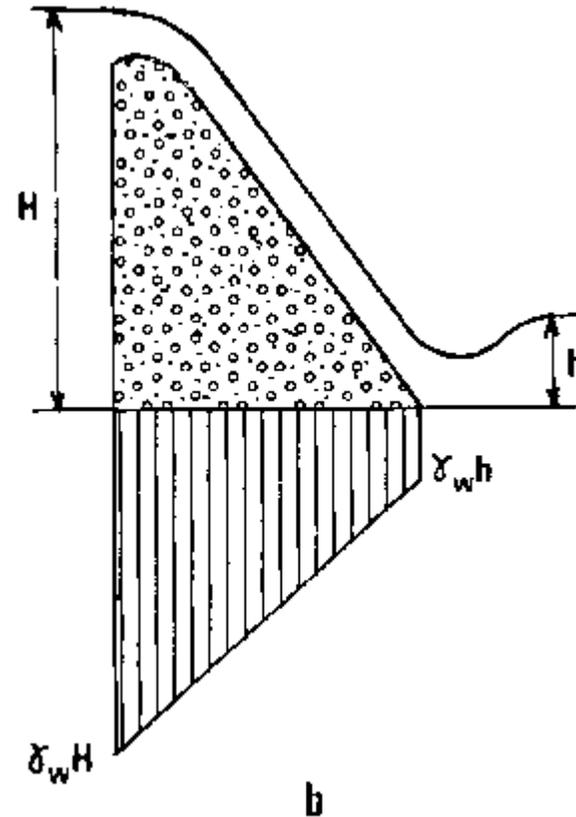
Figure V.3. Lignes d'écoulement sous le barrage

Actions appliquées sur le barrage

Action de l'eau



a: fondations hétérogènes anisotropes, non traitées, existence éventuelle de fissures en communication avec l'amont du barrage qui ne débouche pas à l'aval



b: fondations homogènes et isotropes non traitées. On admet qu'il y a circulation d'eau d'amont en aval avec perte de charge linéaire

Actions appliquées sur le barrage

Action de l'eau

Traitement de la fondation

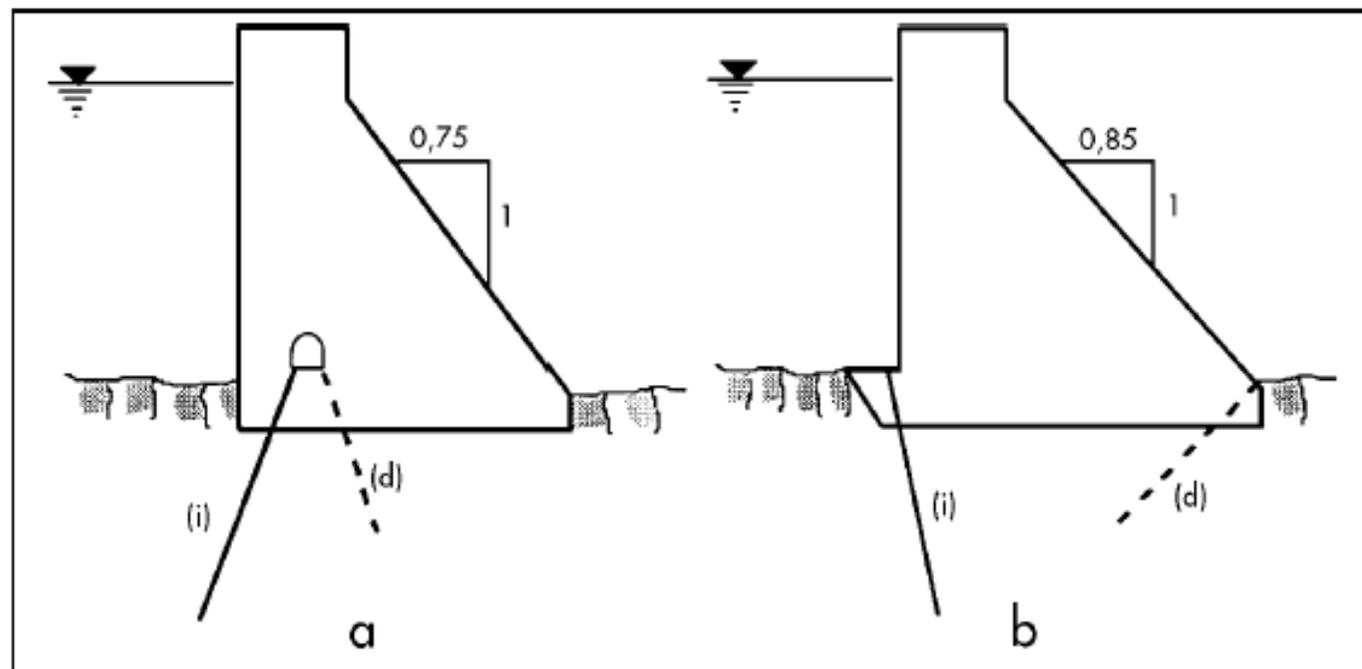
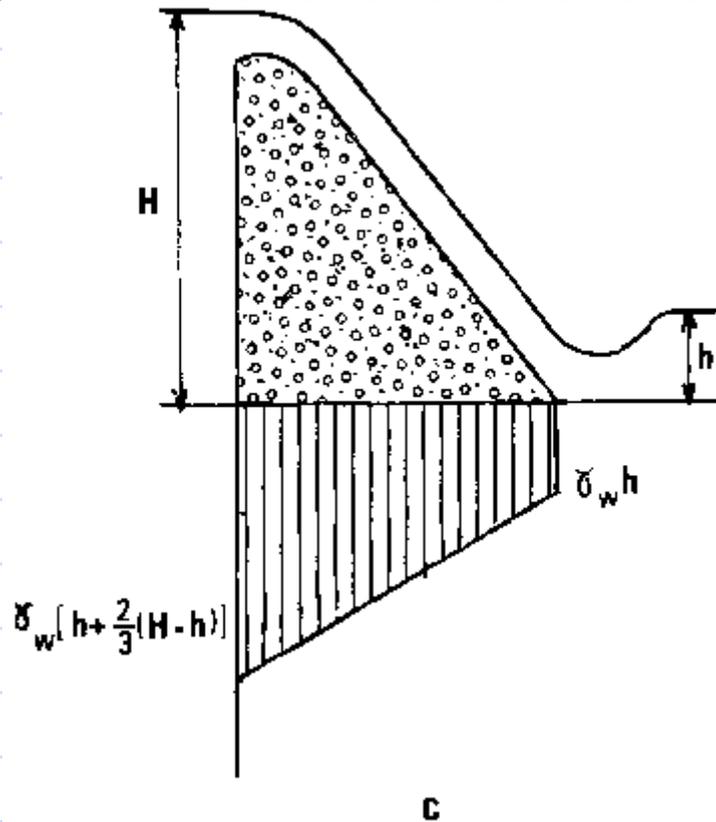


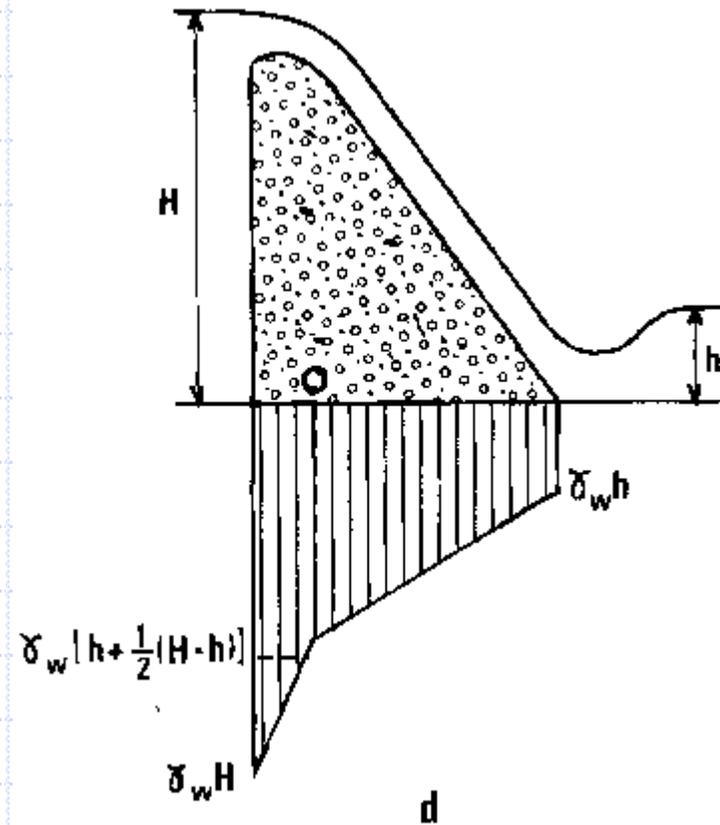
Fig. 1 - Implantation du rideau d'injection (i) et du voile de drainage (d) : a - avec galerie ; b - sans galerie

Actions appliquées sur le barrage

Action de l'eau



c : Fondations homogènes étanchées par une coupure étanche en amont qui entraîne une perte de charge amont importante.



d: Fondations homogènes et étanchées drainées à l'aval de l'organe d'étanchéité. On admet en général que le drainage est efficace à 50% et qu'au niveau du drain la sous-pression tombe à la valeur $\gamma_w (h+d(H-h))$

Actions appliquées sur le barrage

Action de l'eau

Autres formes de l'action de l'eau :

- Après déversement, l'eau peut provoquer des affouillements dangereux pour la stabilité de l'ouvrage
- L'eau en s'écoulant à forte vitesse sur des surface de béton peut provoquer des dégâts importants, l'érosion est rapide. Ce phénomène est d'autant plus grave que l'eau est chargée de particules dures
- L'arrivée d'une crue importante peut provoquer une montée anormale du plan d'eau, ceci se traduit par une augmentation de poussée à l'amont. Elle peut entraîner un déversement au-dessus de l'ouvrage et créer des affouillements que l'ouvrage n'est pas conçu pour supporter
- L'eau peut agir chimiquement sur le béton du parement amont : une eau pure dissout les carbonates et les sulfates du ciment. Les alternances d'humidité et de sécheresse, les variations de température peuvent aussi altérer le béton et parfois provoquer la corrosion des aciers éventuels

Actions appliquées sur le barrage

Action du poids propre

Cette action est favorable à la stabilité de l'ouvrage. Il convient de déterminer le poids volumique du béton atteint à la mise en œuvre.

En générale, le poids volumique du béton est : $2,4 \text{ t/m}^3$, excepté le cas où on utiliserait des granulats légers.

Actions appliquées sur le barrage

Action des séismes

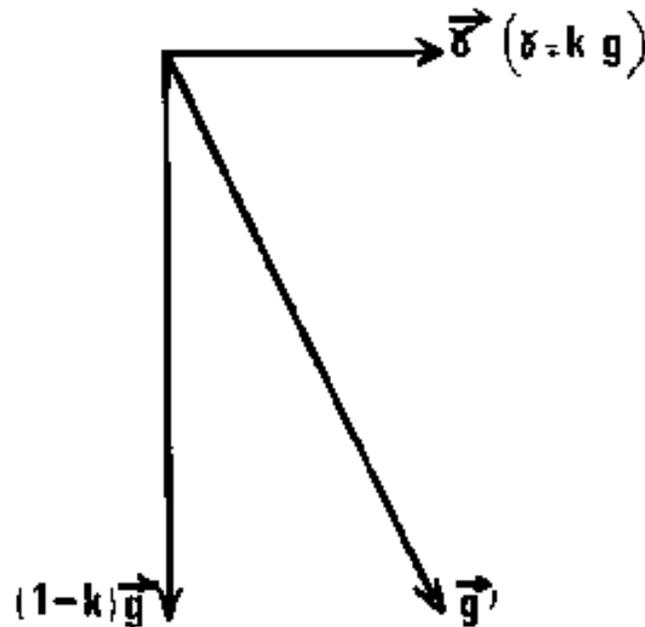
Les secousses telluriques provoquent des vibrations au sein des ouvrages c'est-à-dire des accélérations variables qui se combinent à celle de la pesanteur. Le poids propre, l'action de l'eau et même les caractéristiques de la fondation s'en trouvent modifiés.

Actions appliquées sur le barrage

Action des séismes

➤ Effet sur le poids :

Les séismes ont pour effets de réduire la pesanteur de 0 à 20% et d'y ajouter une composante horizontale $k g$ avec $0 < k < 0.2$



Actions appliquées sur le barrage

Action des séismes

- Effet sur la poussée hydrostatique :

une surpression hydrostatique à la profondeur z :

$$\Delta P = 0.875 k \sqrt{Hz} \quad (\text{Westergrad})$$

avec H = hauteur maxi du barrage.

- Pour le parement incliné d'un angle α :

$$\Delta P = 0.875 k \sqrt{Hz} \cos \alpha$$

Actions appliquées sur le barrage

Actions thermiques

Les variations de température, le gonflement et le retrait des bétons ont pour conséquence, des variations dimensionnelles (élongation, contraction) provoquant l'apparition de contraintes supplémentaires qui donnent naissance aux fissures susceptibles de mettre en cause l'étanchéité du béton

Actions appliquées sur le barrage

Actions thermiques

➤ Variation de la température :

Coefficient de dilatation thermique du béton est $\sim 10 \mu / m / ^\circ C$

➤ Retrait :

Le retrait accompagne la prise et le durcissement du béton. A cause de la capillarité, le retrait hydraulique s'effectue très lentement (plusieurs années).

Ordre de grandeur : peut atteindre $500 \mu / m$

les précautions s'imposent lors de la réalisation des ouvrages, pour en diminuer la valeur ou en réduire les effets

➤ Gonflement :

Le gonflement, phénomène inverse, accompagne l'humidification du béton préalablement soumis à une dessiccation poussée. En général, il ne dépasse pas $100 \mu / m$ et peut se produire au parement amont du barrage



ETUDE DE STABILITE DES BARRAGES POIDS

ETUDE DE STABILITE

Principe

L'étude de stabilité d'un **barrage poids** revient à vérifier

- Equilibre d'ensemble :
 - Stabilité au glissement
 - Stabilité au renversement
- stabilité interne du barrage

ETUDE DE STABILITE

Combinaison d'actions

- Combinaison fréquente ou quasi-permanente :

sollicitation correspondant au niveau de service courant de l'ouvrage. En général, c'est la combinaison du poids propre, de la poussée des sédiments déposés, de la poussée de l'eau à la retenue normale (R.N.) et de la sous-pression correspondante sous la fondation

- Combinaison rare :

il s'agit de la combinaison d'actions lors de la crue de projet (PHE). On prend en compte le poids propre, la poussée des sédiments déposés, la poussée d'une eau éventuellement chargée et la sous-pression correspondante sous la fondation

- Combinaison accidentelle :

en général, elle résulte du séisme survenant lorsque la retenue est à son niveau normal (R.N.).

ETUDE DE STABILITE

Stabilité au glissement

Si on désigne par W les forces verticales dues au poids du barrage et par U les sous-pressions, la stabilité au glissement est assurée si :

$$\Sigma P / \Sigma (W - U) \leq \tan\varphi$$

Le coefficient de sécurité au glissement F est alors :

$$F = \Sigma (W - S) \cdot \tan\varphi / \Sigma P$$

On admet habituellement $F \geq 1$

- on adopte en général un coefficient de frottement $\tan\varphi' = 0.75$. valeur utilisée pour le frottement béton sur béton et béton sur rocher de qualité
- Si la fondation est constituée de roche plus tendre (calcaire, marne), on peut être amené à adopter une valeur inférieure de l'ordre de 0.6

ETUDE DE STABILITE

Stabilité au glissement

Si on tient compte également de la cohésion des fondations, le coefficient de sécurité au glissement devient :

$$F = (C.B + \Sigma (W - S) \cdot \tan \varphi) / \Sigma P$$

B = Surface de glissement

- Dans ce cas, compte tenu de l'incertitude sur la cohésion, on adopte en général une valeur de $F = 4$ en fonctionnement normal
- Pour le rocher de qualité, la valeur admise pour la cohésion est généralement prise entre 0.5 et 2 MPa. La cohésion C s'annule dès qu'il y a fissuration ou joint
- Si le terrain comporte des plans de faiblesse horizontaux (stratification schistosité, fissure de décompression), l'étude de stabilité au glissement devra se faire sur le niveau de faiblesse

ETUDE DE STABILITE

Stabilité au glissement

Les coefficients de sécurité requis pour la stabilité au glissement pour les différents cas de charges sont illustrés dans le tableau :

Cas de charge	C = 0	C # 0
RN	1,5	4
PHE	1,2	3,7
RN + Séisme	1,1	1,3

ETUDE DE STABILITE

Stabilité au renversement

$$\sigma_{am} = \Sigma V/b \cdot (1 - 6.e/b)$$

> 0 « règle du tiers-central »

$$\sigma_{av} = \Sigma V/b \cdot (1 + 6.e/b)$$

< σ_{adm} (roché, maçonnerie)

$$e = \Sigma M_{/G} / \Sigma V$$

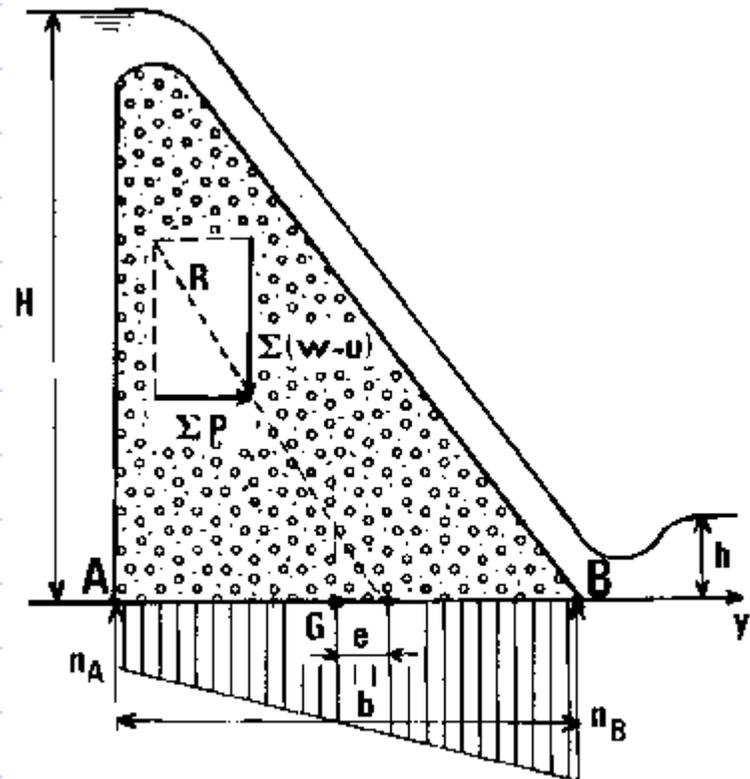


Figure V.9. -- Répartition des contraintes

ETUDE DE STABILITE

Stabilité au renversement

Condition de Maurice Lévy

$$\sigma_z > r \cdot P$$

P : pression hydrostatique, r = 75%



ETANCHEITE ET DRAINAGE

ETANCHEITE ET DRAINAGE

Etanchéité

- Parement amont du barrage en BCR
- Joints de reprise horizontales pour bge en BCR
- Joints Water-Stop
- Injections de clavage

ETANCHEITE ET DRAINAGE

Drainage

- Drains ascendants
- Drains au niveau des joints Water-Stop

ETANCHEITE ET DRAINAGE

Drainage





TRAITEMENT DE LA FONDATION

TRAITEMENT DE LA FONDATION

- Clef d'ancrage :
 - intercepter une zone décomprimée
 - réduire le risque de circulation d'eau au contact
 - amélioration de la stabilité au glissement
- Injections de consolidation du niveau d'assise
- Voile de drainage et d'étanchéité

TRAITEMENT DE LA FONDATION



TRAITEMENT DE LA FONDATION

- Cas de fondation meuble $H \leq 8m$

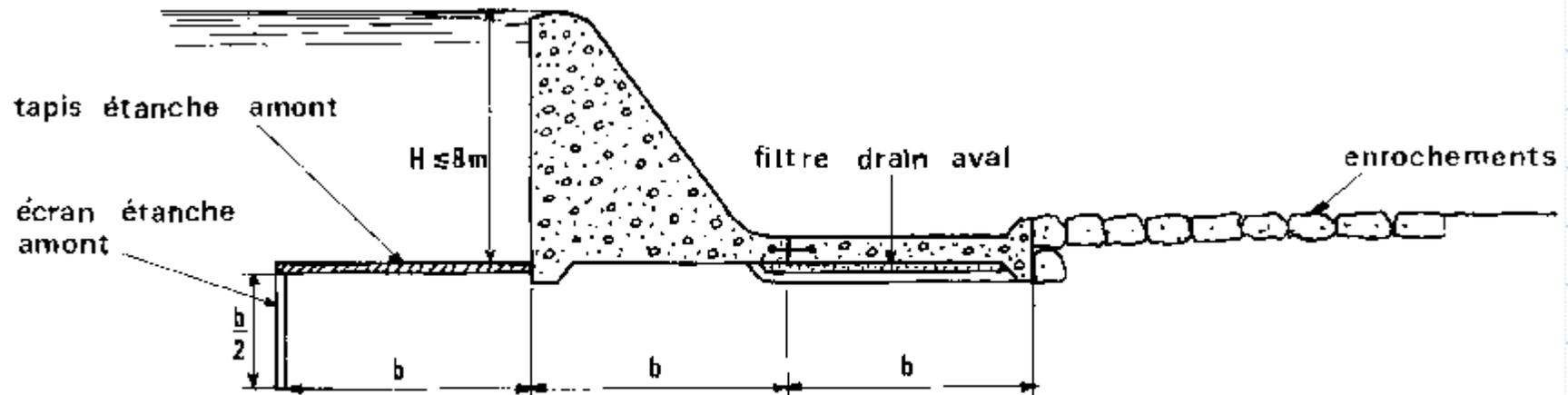


Figure V.14. - Schéma d'une coupe type de barrage poids en béton sur fondations meubles