

## Chapitre III : Interaction fluide-structure

### III-1- Introduction :

L'interaction fluide-structure s'intéresse au comportement d'un système constitué par deux entités considérées comme : une structure mobile (rigide ou déformable) et un fluide (en écoulement ou au repos) autour ou à l'intérieur de la structure. L'évolution de chacune de ces entités qui dépendent l'une de l'autre peut faire apparaître un phénomène de couplage. Plus précisément, le mouvement de la structure est influencé par l'écoulement du fluide à travers les efforts transmis à l'interface, et réciproquement, le mouvement de la structure influence l'écoulement du fluide par les déplacements de l'interface qui entraîne le fluide dans son mouvement.

Dans les études de cas des barrages poids en béton sous sollicitations sismiques, la méthode des éléments finis constitue l'outil le plus puissant actuellement pour l'analyse approfondie des systèmes fluide-structure faisant intervenir notamment des conditions géométriques d'interface quelconques ainsi le choix des variables.

### III-2- Interaction structure rigide-fluide incompressible :

Le phénomène de comportement dynamique des barrages poids en béton à l'interaction fluide-structure sous actions sismiques constitue un domaine actif et très important. La prévision des mouvements couplés du système barrage-réservoir ainsi que l'évaluation des pressions hydrodynamiques s'exerçant sur le parement amont du barrage est une tâche particulièrement complexe.

L'interaction barrage-réservoir se produit lorsque le mouvement de l'eau sur le talus amont du barrage engendre une propagation d'ondes de pression vers la direction amont du réservoir.

L'interaction barrage-réservoir est simulée par la masse ajoutée concentrée (solution de Westergaard) aux nœuds submergés de la face amont de la prise d'eau. Ces masses sont déterminées en multipliant la pression hydrodynamique évaluée au niveau d'un nœud de la face amont par la surface dépendant de ce nœud. La pression hydrodynamique  $p(y)$ , varie en fonction de la profondeur.

L'hypothèse de Westergaard néglige la compressibilité de l'eau et, l'amortissement supplémentaire qui devrait être introduit par la propagation d'ondes vers l'amont du réservoir. Cette hypothèse constitue la solution de Westergaard (1933) qui est fréquemment utilisée dans l'analyse dynamique des barrages et qui reste une bonne approximation de la distribution verticale de la pression hydrodynamique dans un liquide incompressible. Cette solution est basée sur l'hypothèse d'un système bidimensionnel dans lequel un barrage rigide,

### Chapitre III : Interaction fluide-structure

à paroi amont verticale, est en contact avec un réservoir d'eau incompressible de profondeur constante et de longueur infinie. Bien que cette méthode soit habituellement choisie dans la modélisation pour sa simplicité. [15]

Le fluide est supposé incompressible, parfait, non visqueux et les écoulements sont supposés irrotationnels. Dans ce cas la pression s'annule à la surface libre

Westergaard a présenté à une équation approximative conservatrice pour la distribution parabolique de force hydrostatique pour un barrage rigide :

$$P_{(z)} = \frac{7}{8} \sqrt{h(h-z)} p \ddot{U}_g$$

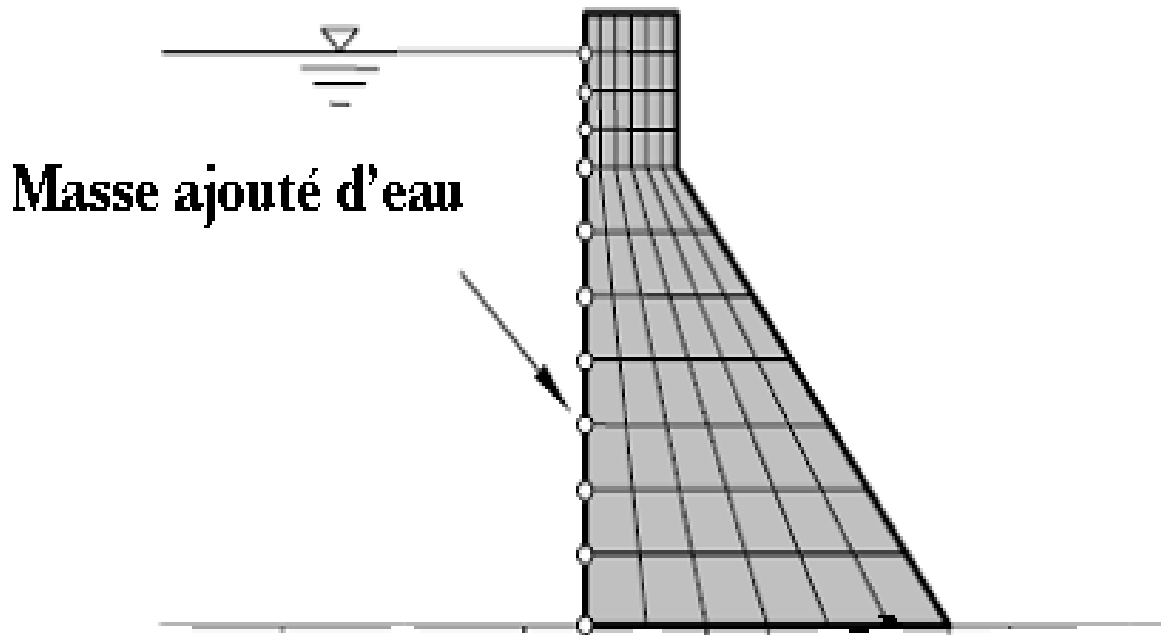
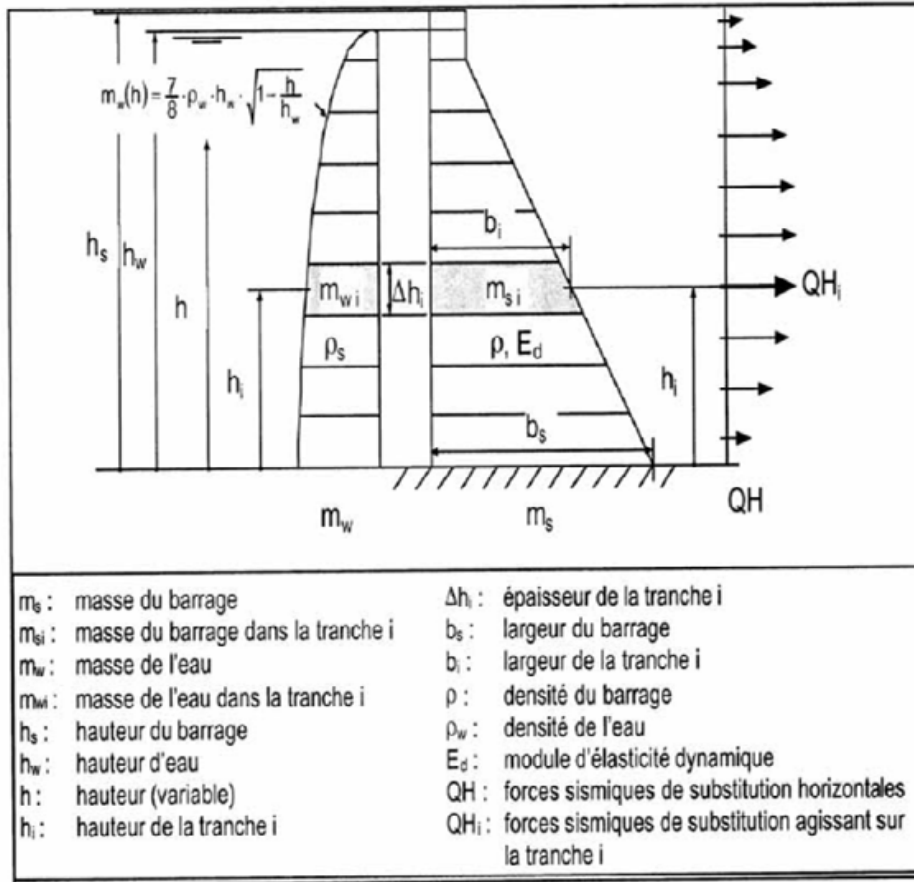


Figure III-1- Interaction fluide structure méthode de masse ajoutée WESTERGAARD

## Chapitre III : Interaction fluide-structure

### III-3- Détermination de la masse d'eau entraînée :



La masse oscillant avec le barrage représentant l'effet hydrodynamique de l'eau sur le barrage avec un parement amont approximativement vertical se calcule en fonction de la hauteur  $h$  selon l'équation suivante de Westergaard :

$$m_w(h) = \frac{7}{8} \rho_w h \sqrt{1 - \frac{h}{h_w}} \quad (\text{III-1})$$

Pour des raisons pratiques, le barrage est divisé en plusieurs tranches horizontales.

Le choix de cette division se fait en fonction de la forme du barrage, du niveau d'eau et de la précision souhaitée du calcul. Les différentes tranches peuvent être d'épaisseur variable. Pour la tranche  $i$ , on peut écrire :

$$m_w(h) = \frac{7}{8} \rho_w h \sqrt{1 - \frac{h}{h_w}} \Delta h_i \quad (\text{III-2})$$

Westergaard a présenté à une équation approximative conservatrice pour la distribution parabolique de force hydrostatique pour un barrage rigide :

$$P_w(h) = \frac{7}{8} \sqrt{h_w(h_w - h)} \rho_w \ddot{U}_g \quad (\text{III-3})$$

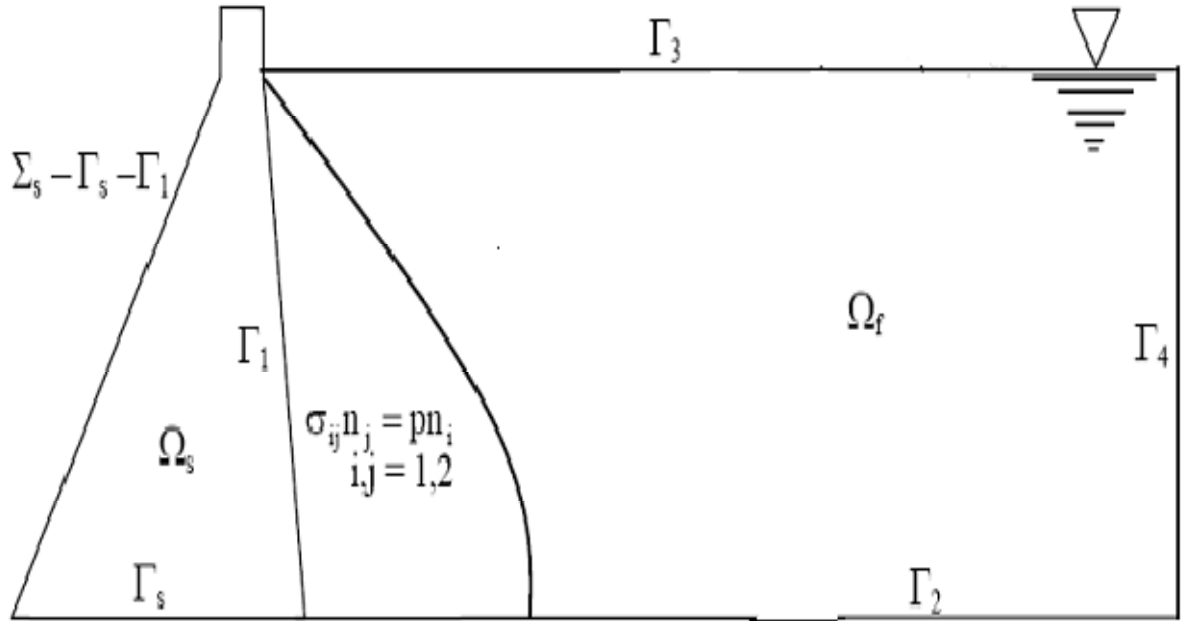
Avec  $\ddot{U}$  : accélération de sol. [8]

## Chapitre III : Interaction fluide-structure

### III-4- Mise en équation :

#### III-4-1- Interaction fluide structure :

Le mouvement du système de barrage-réservoir est considéré comme bidimensionnel et limité à des petites amplitudes. Le fluide est assumé qu'est non visqueux et se prolonge à l'infini dans la direction ascendante. Cependant, les effets des vagues extérieures, compressibilité de l'eau, flexibilité de barrage, rayonnement atténuant à la frontière ascendante du réservoir sont négligés.



**Figure III-2-Domaine de Barrage-réservoir**

C'est le modèle barrage- rigide avec fluide incompressible qui peut être considéré en tant que prolongation du problème de Westerwald. Pour ce modèle, les équations régissant pour le déplacement et des champs de pression hydrodynamiques sont désaccouplées.

Le champ continu de pression satisfait Laplace l'équation et la distribution des pressions hydrodynamiques peuvent être obtenues à partir des équations suivant :

$$\nabla^2 p = 0 \quad |_{\Omega_f} \quad (III-4)$$

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho_f \ddot{u}_n^g \quad |_{\Gamma_1} \quad (III-5)$$

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad |_{\Gamma_2 + \Gamma_4} \quad (III-6)$$

## Chapitre III : Interaction fluide-structure

Dans ces équations, les paramètres physiques

$\rho_f$  et représentent respectivement la densité de masse liquide

$g$  constante de la gravité.

Les symboles  $\Gamma_2$ ,  $\Gamma_3$  et  $\Gamma_4$  correspondent respectivement au réservoir baser, la surface moyenne contre l'équilibre et les frontières finies de troncation d'élément.

Dans L'Équation (III-5) le  $\ddot{u}_n^g$  indique la composante normale extérieure de l'accélération au sol prescrite le vecteur s'est appliqué aux particules pleines humides à l'interface de l'barrage-eau. [14]

Alternativement, le système discret correspondant des équations finies d'élément est :

$$M_F \ddot{P} + K_F P = q \quad (\text{III-7})$$

Les matrices pour le sous-ensemble de l'eau de réservoir, sont respectivement :

$$M_F = \int_{\Gamma_3} N_P^T \frac{1}{g} N_P d\Gamma \quad (\text{III-8})$$

$$K_F = \int_{\Omega} \nabla N_P^T \nabla N_P d\Omega \quad (\text{III-9})$$

Le vecteur  $q$  de charge dans l'équation (III-7) est donné par l'expression :

$$q = - \int_{\Gamma_1} \rho_f \ddot{u}_n^g N_P^T d\Gamma \quad (\text{III-10})$$

Ce modèle n'est pas prévu donnent des résultats précis pour de grands barrages comme flexibilité de barrage et arrosent la compressibilité ont été omises. Puisque, en général, les effets de vague de surface sont d'importance mineure et peut être ignoré pour tous les buts pratiques (Timimoune et Seghir 1998, O'connor et botte 1988), le vecteur des pressions hydrodynamiques agissant aux points nodaux du modèle de réservoir de l'eau peut être directement estimé à partir :

$$P = -K_F^{-1} q$$

### III-4-2- Méthodes d'interaction fluide-structure :

Le couplage fluide-structure est très probablement, après l'interaction sol-structure, l'interaction la plus fréquemment rencontrée. Une analyse de la réponse sismique des structures telles que les barrages, les réservoirs de stockage et les structures offshore, nécessite la considération des effets d'interaction fluide-structure et, dans quelques circonstances, de la compressibilité de l'eau. Ces effets peuvent introduire des modifications substantielles dans les caractéristiques modales de la structure, telles que les fréquences et modes propres de vibrations.

## Chapitre III : Interaction fluide-structure

La première solution au problème des pressions hydrodynamiques sur les barrages ayant un parement amont vertical exposé à un mouvement horizontal et harmonique a été publiée pour la première fois par WESTERGAARD en 1933. Depuis, beaucoup de recherches sont apparues sur ce sujet dans lesquelles différents aspects du problème ont été pris en compte.

Différentes méthodes de modélisation du fluide ont été développées, modélisation par des éléments finis ou bien des éléments infinis. Ces différentes méthodes se basent sur diverses hypothèses :

- \* Le barrage est supposé infiniment rigide ce qui n'est pas le cas des barrages en terre.
- \* Le liquide est considéré comme homogène, non visqueux et incompressible.
- \* Le phénomène des ondes de surface est négligé.
- \* Le mouvement du liquide est considéré comme irrotationnel.
- \* Aucun changement n'intervient dans la configuration géométrique de la région occupée par le liquide durant les vibrations.
- \* Seules les vibrations de petit ordre sont prises en considération.

Le problème de détermination de la pression hydrodynamique en cas de tremblement de terre est une partie essentielle de la tâche générale, qui consiste à assurer la stabilité sismique des structures :

a- Formulation du problème.

b- Recherche d'un système acceptable d'hypothèses concernant :

- \* Le type de barrage et les différentes formes qui en découlent.
- \* La nature de la fondation.
- \* La nature du tremblement de terre (surtout son sens de propagation).

c- Recherche de modèles mathématiques.

### III-4-3- Les différentes méthodes d'interaction fluide-structure :

#### a- La méthode de masse ajoutée :

La première approche de ce problème a été abordée par WESTERGAARD, qui a calculé la répartition des pressions sur un écran vertical limitant un réservoir semi-infini de profondeur constante dans l'hypothèse d'un mouvement horizontal harmonique de l'écran de période  $T$ .

Le problème de compressibilité de l'eau a été pris en considération dans une étude faite par WESTERGAARD, et d'après ces résultats, il a remarqué que pour une hauteur du

## Chapitre III : Interaction fluide-structure

parement limitée à 100 m, l'augmentation en pression n'excède pas 5% , alors la compressibilité peut être négligée.

L'effet du fluide non compressible peut être simplement pris en compte par ajout d'une masse appropriée à chaque nœud de contact barrage-fluide du parement amont, donc selon la structure, le fluide peut introduire :

- \* Un effet d'inertie (qui s'ajoute à l'inertie de la structure).
- \* Un effet de compressibilité (qui produit des modes de résonance).
- \* Un effet de viscosité (qui produit un facteur d'amortissement ajouté).

### \* **Effet d'inertie :**

Selon WESTERGAARD, l'effet du fluide sur la structure est caractérisé par l'adjonction à la matrice masse de la structure d'une matrice des masses ajoutées, pour cela, il a proposé de représenter le volume d'eau par un tronçon de parabole.

Les hypothèses sur lesquelles repose cette méthode :

- \* Le barrage est rigide ;
- \* La face amont est un plan vertical ;
- \* Le liquide est incompressible ;
- \* Le réservoir est étendu à l'infini dans la direction amont.

La superposition due à l'inertie de l'eau, peut être représentée par un diagramme parabolique (ou elliptique éventuellement), défini par l'expression :

$$P(y = 0) = \frac{7}{8} \rho_w H \left(1 - \frac{Z}{H}\right)^{\frac{1}{2}} \ddot{u}_g \quad (\text{III-11})$$

$P$ : Surpression sur la face amont ( $y=0$ ).

$\rho_w$  : Masse volumique du fluide.

$H$  : Niveau d'eau du réservoir.

$Z$  : Coté de la partie immergée de la face amont.

Le même effet peut être obtenu par un bloc d'eau attaché à la face amont du barrage. Conformément à la théorie de WESTERGAARD, ce bloc doit avoir une forme parabolique avec une épaisseur à la base égale à  $7/8 H$ .

Les masses ajoutées, aux éléments de la matrice masse du barrage, correspondant aux d.d.l de l'interface barrage-fluide, sont proportionnelles aux aires tributaires de chaque nœud de la face amont.

## Chapitre III : Interaction fluide-structure

### \* **Effet de compressibilité :**

Il engendre un effet d'amortissement qui correspond à l'absorption des ondes sismiques à l'infini. Cet effet est toujours très faible par rapport aux autres effets amortisseurs rencontrés dans la structure, sauf dans le cas de grand barrage où les résultats négligeant cet effet sont sans significations.

Des études effectuées par Chopra à l'université de Californie, Berkeley, semble indiquer que la présence d'une couche de vase a pour résultat une réduction importante du phénomène de compressibilité et de réflexion, autrement dit que la vase est parfois bénéfique.

### \* **Effet de viscosité :**

Contrairement à l'effet d'inertie et à l'effet de compressibilité (quand il est important), l'effet de viscosité est souvent faible et ne modifie quasiment pas les fréquences de résonance et les déformées modales des structures.

### **b- Solution de WESTERGAARD :**

La solution exacte donnée par WESTERGAARD est exprimée sous forme d'un développement en série de fonctions sinusoïdales :

$$Cn = \sqrt{1 - \frac{16\gamma_w H_1^2}{n^2 g k T^2}} = \left[ 1 - \frac{1}{n^2} \left( \frac{T_0}{T} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \text{ et } T_0 = \frac{4H}{c} \quad (\text{III-12})$$

$$P(Z) = \frac{8\alpha H}{\pi^2} \gamma_w \sum_{1.3.5} \frac{1}{n^2 C_n} \sin\left(\frac{n\pi}{2H} Z\right) \quad (\text{III-13})$$

Avec :

$P$ : Pression sur l'écran.

$\alpha$  : Coefficient de l'intensité sismique en direction horizontale, sur le site.

$\gamma_w$ : Poids volumique de l'eau.

$H$  : Profondeur de l'eau.

$k$  : Module de compressibilité de l'eau.

$T$  : Période du mouvement de l'écran, supposé harmonique.

$T_0$  : Période propre du réservoir.

$C$  : Célérité des ondes de compression dans l'eau ( $C \cong 1440 \text{ m/s}$ ).

On constate que le terme correctif  $1 - \frac{1}{n^2} \left( \frac{T_0}{T} \right)^2$  dû à la compressibilité de l'eau est négligeable, dès que la période propre du réservoir ( $T_0$ ) est petite devant la période propre de l'écran.



## Chapitre III : Interaction fluide-structure

Si la compressibilité de l'eau est négligeable, il est possible d'établir une expression approchée de forme parabolique ou elliptique, indépendante de la période de vibration de l'écran.

On a :

- La répartition parabolique de WESTERGAARD :

$$P(Z) = \frac{7}{8} - \alpha \gamma_w \sqrt{HZ}$$

- La répartition elliptique de KARMAN :

$$P(Z) = 0.707 \alpha \gamma_w \sqrt{Z(2H - Z)} \quad (\text{III-14})$$

### Remarque :

Pour l'évaluation de la pression hydrodynamique, M.Hatanaka recommande d'introduire, dans la relation de WESTERGAARD, un coefficient d'amplification  $C'_0$ . En cas d'un mouvement du sol de type choc ce coefficient peut atteindre sa valeur maximale estimée à 1,5. On aura :

$$P(Z) = \frac{7}{8} C'_0 \alpha \gamma_w \sqrt{HZ} . \quad (\text{III-15})$$

### III-5- Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons surtout essayé de mettre en évidence le problème de l'interaction fluide structure ainsi que la méthode de Westergaard qui est fréquemment utilisée dans l'analyse dynamique des barrages et qui reste une bonne approximation de la distribution verticale de la pression hydrodynamique dans un liquide incompressible.