

Modélisation des barrages en béton

Les interfaces au cœur des études de comportement

P. DIVOUX

EDF-CIH, Savoie Technolac, 73373 Le Bourget du Lac, France.

Sommaire

Introduction

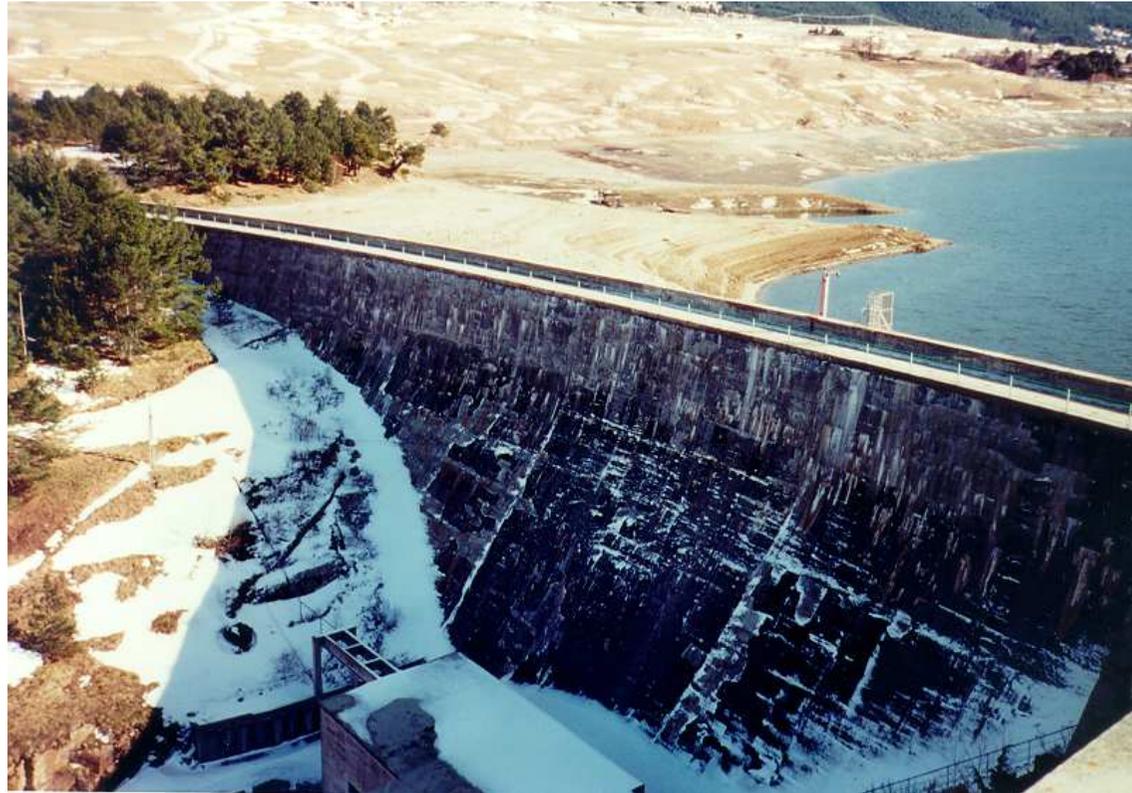
Les Eléments d'interface
hydromécaniques

Application aux barrages en
béton

Conclusion



Les Barrages-Poids



Barrage de Puyvalador

Le poids propre de l'ouvrage assure sa stabilité et permet notamment de faire obstacle à la poussée de l'eau.

Les Barrages-Voûtes



Barrage de Maury

Un barrage-voûte reporte la majeure partie de la poussée de l'eau sur les rives par effet d'arc.

André Coyne [1939]

Les barrages en béton

Des géo-structures construites par étapes et par morceaux

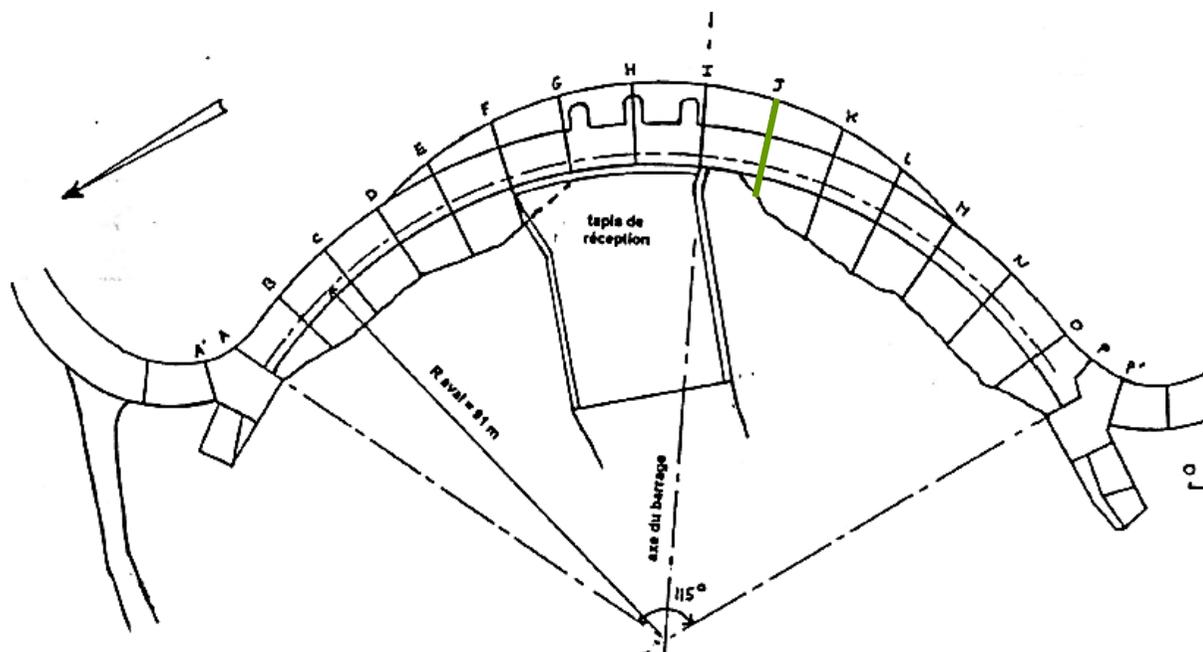


- Excavations - Préparation du fond de fouille
- Construction par plots
- Injections - Drainage
- Clavage

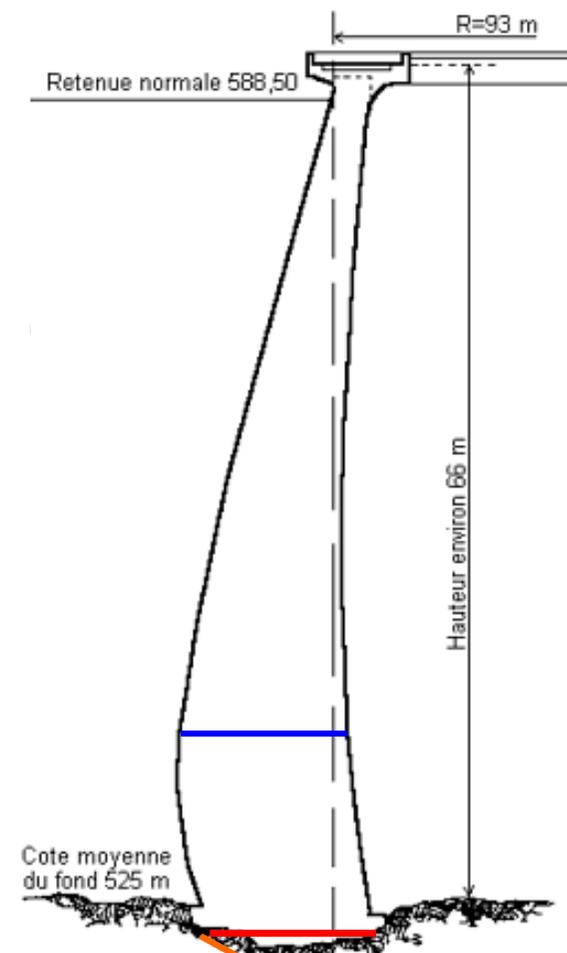
Les barrages en béton Des discontinuités localisées

Des discontinuités localisées mais :

- un comportement mécanique complexe
- un couplage hydromécanique important



- Joints de plots
- Contact barrage fondation
- Reprises de bétonnage
- Joints rocheux



Exemple du barrage de Maury

Les barrages en béton Principales sollicitations

- Poids propre - Construction par plots
- Retrait du béton
- Clavage
- Mise en eau
- Effets thermiques

et éventuellement :

- Endommagement du béton ou de la fondation
- Réactions chimiques du type alcali-granulat
- Séismes

Introduction

Les barrages en béton

Objectif de la modélisation

En général, pour les barrages en béton :

- Les non-linéarités du comportement mécanique des barrages en béton sont concentrées au niveau des discontinuités
- Les écoulements se font par l'intermédiaire du jeu de discontinuités dans la structure et la fondation
- Un couplage hydromécanique fort :
 - L'ouverture des fissures engendre la propagation de sous-pressions
 - La propagation des sous-pressions génère des efforts déstabilisateurs

Cela nécessite l'utilisation régulière :

- I - D'Éléments d'Interface avec un couplage hydromécanique
- II - Des lois de comportement spécifiques pour les interfaces

L'objectif principal de la modélisation :

- Meilleure compréhension du comportement des barrages en béton
 - Répartition et transmission des efforts
 - Ouvertures de fissure et risques de cisaillement
 - Propagation des sous-pressions

Sommaire

Introduction

Les Eléments d'interface hydromécaniques

Application aux barrages en
béton

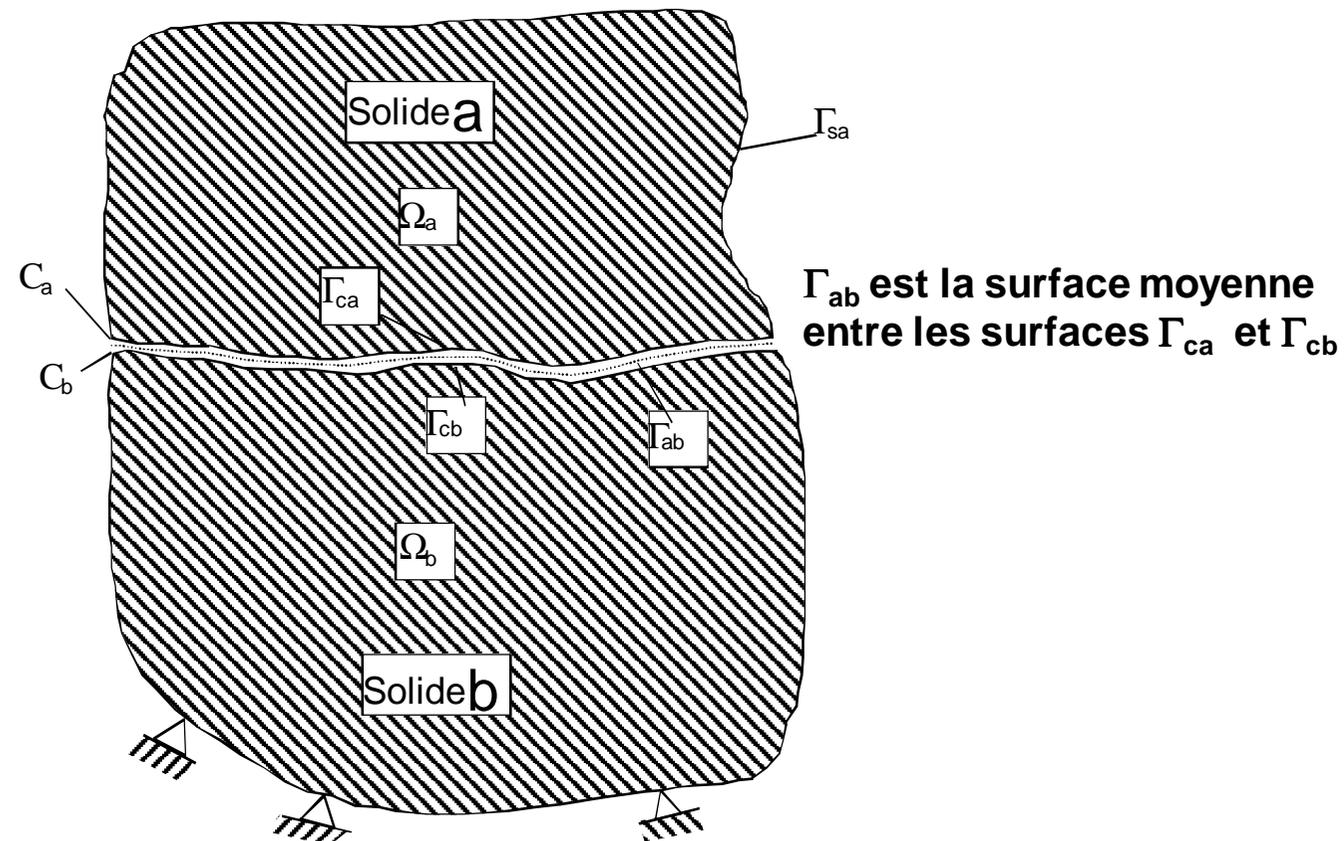
Conclusion



Formulation du problème

Performance des Eléments d'Interface

- Problématiques d'intégration
- Problématiques de convergence



Formulation du problème

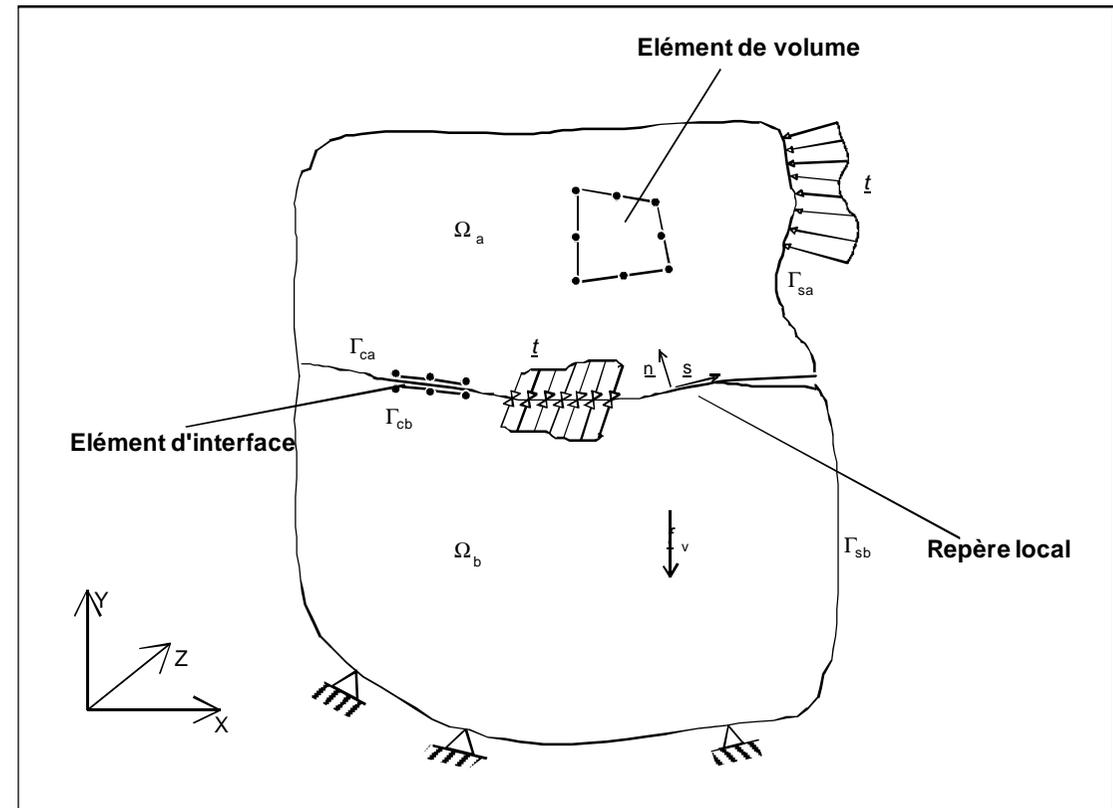
Hypothèses :

- Solides et interfaces saturés
- Eau incompressible
- Principe des contraintes effectives

$$\sigma = \sigma' + b.p$$

avec

- σ – contrainte totale
- σ' – contrainte effective
- b – porosité - coefficient de Biot (entre 0 et 1)
- p – pression intersticielle



Formulation du problème

Le comportement des matériaux et des interfaces

Les solides **a** et **b** doivent rester en équilibre tout en respectant la loi de comportement en chacun de leurs points.

Solides **a** et **b** :

- Loi de comportement mécanique – Evolution de la contrainte effective
- Loi de comportement hydraulique – Evolution du débit – Loi de darcy

$$\underline{d\sigma}^t = \underline{\underline{D}}^t . \underline{d\varepsilon}^t$$

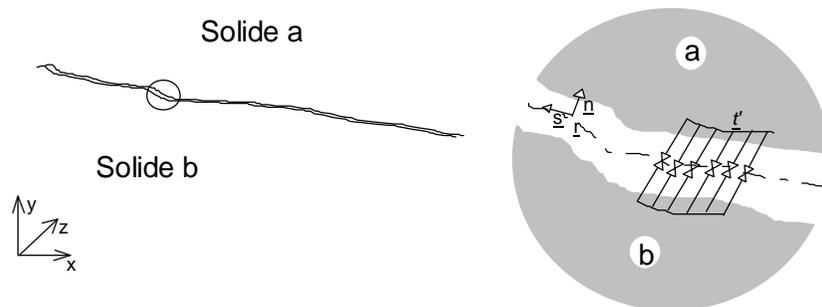
$$\underline{q}^t = \underline{\underline{k}}_p^t . \underline{\nabla p}^t$$

Interface entre **a** et **b** :

- Loi de comportement mécanique – Evolution de la contrainte
- Loi de comportement hydraulique – Evolution du débit dans l'interface - Loi cubique

$$\underline{dt}^t = \underline{\underline{d}}^t . \underline{d\delta}^t + b^t . p^t$$

$$\underline{q}_s^t = f_q \left(\underline{\nabla p}_s^t, \underline{\delta}^t \right)_{-\infty < \tau \leq t}$$



Formulation du problème

Les équations locales de l'équilibre

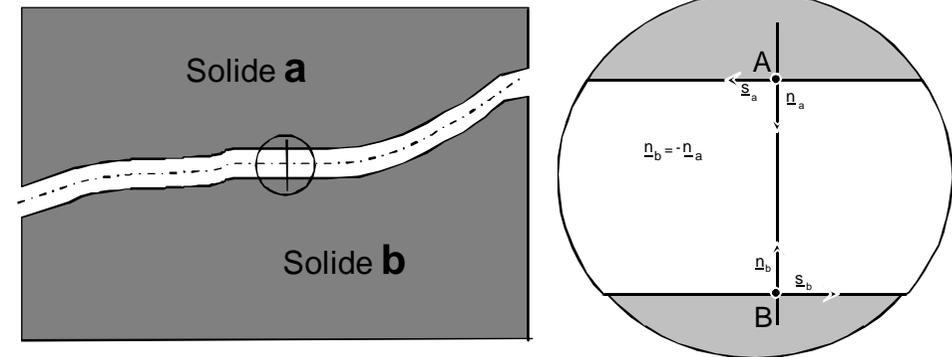
Solides a et b :

- Conservation de la quantité de mouvement
- Conservation de la masse fluide

Interface entre a et b :

- Action = Réaction
- Conservation de la masse fluide

Avec au niveau de l'interface :



- Hypothèse 1 : Γ_{ca} et Γ_{cb} sont localement " parallèles ".
- Hypothèse 2 : Pas de termes d'inertie ni de force de volume dans l'interface.
- Hypothèse 3 : Le comportement mécanique de l'interface est supposé identique sur toute " l'épaisseur " de l'interface.
- Hypothèse 4 : La vitesse débitante tangentielle est supposée constante dans une direction perpendiculaire au plan de joint.
- Hypothèse 5 : Variation de volume \Leftrightarrow Variation de l'épaisseur

$$\left\{ \begin{array}{l} \underline{\text{div}} \underline{\underline{\sigma}} + \underline{\underline{f}} = \rho_s \cdot \underline{\underline{\ddot{u}}} \\ \underline{\text{div}} \underline{\underline{q}} + \underline{\text{div}} \underline{\underline{u}} = 0 \\ \left. \begin{array}{l} \underline{\underline{t}}_a = -\underline{\underline{t}}_b \\ p_a = p_b \end{array} \right\} \text{ localement sur } \Gamma_{ca} \text{ et } \Gamma_{cb} \\ -q_{na} - q_{nb} + e_n \cdot \underline{\text{div}} \underline{\underline{q}}_s + \dot{e}_n = 0 \text{ sur } \Gamma_{ca} \text{ ou } \Gamma_{cb} \end{array} \right.$$

Formulation du problème

Formulation variationnelle - Principe des travaux virtuels

A un instant donné,

$\forall \underline{\mathbf{u}}^*$ champ de déplacement virtuel cinématiquement admissible,

$\forall p^*$ champ de pression virtuelle hydrauliquement admissible,

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_{\Omega_s} \rho_s \cdot \underline{\mathbf{u}}^* \cdot \underline{\ddot{\mathbf{u}}}.d\Omega + \int_{\Omega_s} \underline{\underline{\boldsymbol{\varepsilon}}}^* \cdot \underline{\underline{\boldsymbol{\sigma}}}'.d\Omega - \int_{\Omega_s} \underline{\underline{\boldsymbol{\varepsilon}}}^* \cdot \underline{\underline{\mathbf{m}}}.p.d\Omega = \\ \int_{\Gamma_{ca}} \underline{\underline{\mathbf{u}}}_a^* \cdot \underline{\underline{\mathbf{t}}}_a.d\Gamma + \int_{\Gamma_{cb}} \underline{\underline{\mathbf{u}}}_b^* \cdot \underline{\underline{\mathbf{t}}}_b.d\Gamma + \int_{\Gamma_s} \underline{\underline{\mathbf{u}}}_s^* \cdot \underline{\underline{\mathbf{t}}}.d\Gamma + \int_{\Omega_s} \underline{\underline{\mathbf{u}}}_s^* \cdot \underline{\underline{\mathbf{f}}}.d\Omega \\ \int_{\Omega_s} \underline{\underline{\nabla p}}^* \cdot \underline{\underline{\mathbf{q}}}.d\Omega - \int_{\Omega_s} p^* \cdot \text{div} \underline{\underline{\dot{\mathbf{u}}}}.d\Omega = \\ \int_{\Gamma_s} p^* \cdot q_n.d\Gamma + \int_{C_a} p^* \cdot \mathbf{e}_n \cdot q_c.dC - \int_{\Gamma_{ca}} \underline{\underline{\nabla p}}_s^* \cdot \mathbf{e}_n \cdot \underline{\underline{\mathbf{q}}}_s.d\Gamma + \int_{\Gamma_{ca}} p^* \cdot \dot{\mathbf{e}}_n.d\Gamma \end{array} \right.$$

Formulation du problème

Hypothèse des petits déplacements et petites déformations

A l'instant t ,

$\forall \underline{\mathbf{u}}$ champ de déplacement virtuel cinématiquement admissible,

$\forall p^*$ champ de pression virtuelle hydrauliquement admissible,

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_{\Omega_s^0} \rho_s \cdot {}^T \underline{\mathbf{u}}^* \cdot \underline{\ddot{\mathbf{u}}} \cdot d\Omega + \int_{\Omega_s^0} {}^T \underline{\boldsymbol{\varepsilon}}^* \cdot \underline{\boldsymbol{\sigma}}' \cdot d\Omega + \int_{\Omega_s^0} {}^T \underline{\boldsymbol{\varepsilon}}^* \cdot \underline{\mathbf{m}} \cdot p \cdot d\Omega = \\ \int_{\Gamma_{ab}} \left({}^T \underline{\mathbf{u}}_a^* - {}^T \underline{\mathbf{u}}_b^* \right) \cdot \underline{\mathbf{t}} \cdot d\Gamma + \int_{\Gamma_s^0} {}^T \underline{\mathbf{u}}^* \cdot \underline{\mathbf{t}} \cdot d\Gamma + \int_{\Omega_s^0} {}^T \underline{\mathbf{u}}^* \cdot \underline{\mathbf{f}} \cdot d\Omega \\ \int_{\Omega_s^0} {}^T \underline{\nabla p}^* \cdot \underline{\mathbf{q}} \cdot d\Omega - \int_{\Omega_s^0} p^* \cdot \text{div} \underline{\dot{\mathbf{u}}} \cdot d\Omega = \\ \int_{\Gamma_s^0} p^* \cdot q_n \cdot d\Gamma + \int_{C_{ab}} p^* \cdot \mathbf{e}_n \cdot q_c \cdot dC - \int_{\Gamma_{ab}} \underline{\nabla p}_s^* \cdot \mathbf{e}_n \cdot \underline{\mathbf{q}}_s \cdot d\Gamma + \int_{\Gamma_{ab}} p^* \cdot \dot{e}_n \cdot d\Gamma \end{array} \right.$$

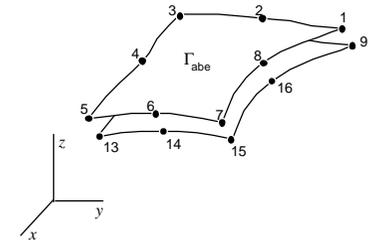
Formulation du problème

Eléments Finis - Discrétisation spatiale et fonction d'interpolation

A l'instant t ,

∇ $\underline{\underline{u}}^*$ champ de déplacement virtuel cinématiquement admissible,

∇ $\underline{\underline{p}}^*$ champ de pression virtuelle hydrauliquement admissible,



$$\left\{ \begin{aligned}
 & \int_{\Omega_s} {}^T \underline{\underline{U}}^* \cdot {}^T \underline{\underline{H}}_{\underline{\underline{u}}} \cdot \underline{\underline{H}}_{\underline{\underline{u}}} \cdot \dot{\underline{\underline{U}}}^t \cdot d\Omega + \int_{\Omega_s} {}^T \underline{\underline{U}}^* \cdot {}^T \underline{\underline{B}}_{\underline{\underline{u}}} \cdot \underline{\underline{\sigma}}^t \cdot d\Omega - \int_{\Omega_s} {}^T \underline{\underline{U}}^* \cdot {}^T \underline{\underline{B}}_{\underline{\underline{u}}} \cdot \underline{\underline{m}} \cdot \underline{\underline{H}}_{\underline{\underline{p}}} \cdot \underline{\underline{P}}^t \cdot d\Omega \\
 & = + \int_{\Gamma_{ab}} {}^T \underline{\underline{U}}^* \cdot ({}^T \underline{\underline{h}}_{\underline{\underline{ua}}} - {}^T \underline{\underline{h}}_{\underline{\underline{ub}}}) \cdot \underline{\underline{t}}^t \cdot d\Gamma - \int_{\Gamma_{ab}} {}^T \underline{\underline{U}}^* \cdot ({}^T \underline{\underline{h}}_{\underline{\underline{ua}}} - {}^T \underline{\underline{h}}_{\underline{\underline{ub}}}) \cdot b \cdot \underline{\underline{n}} \cdot \underline{\underline{h}}_{\underline{\underline{p}}} \cdot \underline{\underline{P}}^t \cdot d\Gamma \\
 & \quad + \int_{\Gamma_s} {}^T \underline{\underline{U}}^* \cdot {}^T \underline{\underline{h}}_{\underline{\underline{u}}} \cdot \underline{\underline{t}}^t \cdot d\Gamma + \int_{\Omega_s} {}^T \underline{\underline{U}}^* \cdot {}^T \underline{\underline{H}}_{\underline{\underline{u}}} \cdot \underline{\underline{f}}^t \cdot d\Omega \\
 & \int_{\Omega_s} {}^T \underline{\underline{P}}^* \cdot {}^T \underline{\underline{B}}_{\underline{\underline{p}}} \cdot \underline{\underline{q}}^t \cdot d\Omega - \int_{\Omega_s} {}^T \underline{\underline{P}}^* \cdot {}^T \underline{\underline{H}}_{\underline{\underline{p}}} \cdot \underline{\underline{m}} \cdot \underline{\underline{B}}_{\underline{\underline{u}}} \cdot d\Omega \cdot \dot{\underline{\underline{U}}}^t \\
 & = + \int_{\Gamma_s} {}^T \underline{\underline{P}}^* \cdot {}^T \underline{\underline{h}}_{\underline{\underline{p}}} \cdot q_n^t \cdot d\Gamma + \int_{C_{ab}} {}^T \underline{\underline{P}}^* \cdot {}^T \underline{\underline{h}}_{\underline{\underline{p}}} \cdot e_n^t \cdot q_c^t \cdot dC \\
 & \quad - \int_{\Gamma_{ab}} {}^T \underline{\underline{P}}^* \cdot {}^T \underline{\underline{b}}_{\underline{\underline{p}}} \cdot e_n^t \cdot \underline{\underline{q}}_s^t \cdot d\Gamma + \int_{\Gamma_{ab}} {}^T \underline{\underline{P}}^* \cdot {}^T \underline{\underline{h}}_{\underline{\underline{p}}} \cdot \underline{\underline{n}} \cdot (\underline{\underline{h}}_{\underline{\underline{ua}}} - \underline{\underline{h}}_{\underline{\underline{ub}}}) \cdot \dot{\underline{\underline{U}}}^t \cdot d\Gamma
 \end{aligned} \right.$$

Formulation du problème

Bilan

Un système matriciel non linéaire global :

$$\begin{cases} \underline{\underline{\mathbf{M}}} \cdot \underline{\underline{\dot{\mathbf{U}}}}^t + \underline{\underline{\mathbf{L}}}^t + \underline{\underline{\mathbf{C}}}_{up} \cdot \underline{\underline{\mathbf{P}}}^t = \underline{\underline{\mathbf{F}}}^t \\ \underline{\underline{\mathbf{V}}}^t + {}^T \underline{\underline{\mathbf{C}}}_{up} \cdot \underline{\underline{\dot{\mathbf{U}}}}^t = \underline{\underline{\mathbf{Q}}}^t \end{cases}$$

$$\underline{\underline{\mathbf{M}}} = \int_{\Omega_s} \rho_s \cdot {}^T \underline{\underline{\mathbf{H}}}_u \cdot \underline{\underline{\mathbf{H}}}_u \cdot d\Omega$$

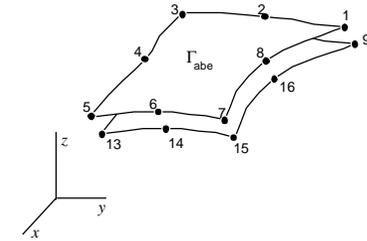
$$\underline{\underline{\mathbf{C}}}_{up} = - \int_{\Omega_s} {}^T \underline{\underline{\mathbf{B}}}_u \cdot \underline{\underline{\mathbf{m}}} \cdot \underline{\underline{\mathbf{H}}}_p \cdot d\Omega + \int_{\Gamma_{ab}} b \cdot {}^T \underline{\underline{\mathbf{h}}}_p \cdot {}^T \underline{\underline{\mathbf{n}}} \cdot (\underline{\underline{\mathbf{h}}}_{ua} - \underline{\underline{\mathbf{h}}}_{ub}) \cdot d\Gamma$$

$$\underline{\underline{\mathbf{F}}}^t = \int_{\Gamma_s} {}^T \underline{\underline{\mathbf{h}}}_u \cdot \underline{\underline{\mathbf{t}}}^t \cdot d\Gamma + \int_{\Omega_s} {}^T \underline{\underline{\mathbf{H}}}_u \cdot \underline{\underline{\mathbf{f}}}^t \cdot d\Omega$$

$$\underline{\underline{\mathbf{Q}}}^t = + \int_{\Gamma_s} {}^T \underline{\underline{\mathbf{h}}}_p \cdot \underline{\underline{\mathbf{q}}}_n^t \cdot d\Gamma + \int_{C_{ab}} {}^T \underline{\underline{\mathbf{h}}}_p \cdot \underline{\underline{\mathbf{e}}}_n^t \cdot \underline{\underline{\mathbf{q}}}_c^t \cdot dC$$

$$\underline{\underline{\mathbf{V}}}^t = - \int_{\Omega_s} {}^T \underline{\underline{\mathbf{B}}}_p \cdot \underline{\underline{\mathbf{q}}}^t \cdot d\Omega + \int_{\Gamma_{ab}} {}^T \underline{\underline{\mathbf{b}}}_b \cdot \underline{\underline{\mathbf{e}}}_n^t \cdot \underline{\underline{\mathbf{q}}}_s^t \cdot d\Gamma$$

$$\underline{\underline{\mathbf{L}}}^t = \int_{\Omega_s} {}^T \underline{\underline{\mathbf{B}}}_u \cdot \underline{\underline{\sigma}}^t \cdot d\Omega - \int_{\Gamma_{ab}} ({}^T \underline{\underline{\mathbf{h}}}_{ua} - {}^T \underline{\underline{\mathbf{h}}}_{ub}) \cdot \underline{\underline{\mathbf{t}}}^t \cdot d\Gamma$$



A résoudre dans le respect du comportement local :

- Des solides :

$$\underline{\underline{d\sigma}}^t = \underline{\underline{\mathbf{D}}}^t \cdot \underline{\underline{d\varepsilon}}^t$$

$$\underline{\underline{\mathbf{q}}}^t = \underline{\underline{\mathbf{k}}}_p^t \cdot \underline{\underline{\nabla}} \underline{\underline{\mathbf{p}}}^t$$

- Et des interfaces :

$$\underline{\underline{dt}}^t = \underline{\underline{\mathbf{d}}}^t \cdot \underline{\underline{d\delta}}^t + b^t \cdot p^t$$

$$\underline{\underline{\mathbf{q}}}_s^t = f_q \left(\underline{\underline{\nabla}} \underline{\underline{\mathbf{p}}}_s^t, \underline{\underline{\delta}}^t \right)_{-\infty < \tau \leq t}$$

Formulation du problème Résumé

Ingrédients :

→ Des hypothèses générales :

- Solides et interfaces saturés
- Eau incompressible
- Principe des contraintes effectives

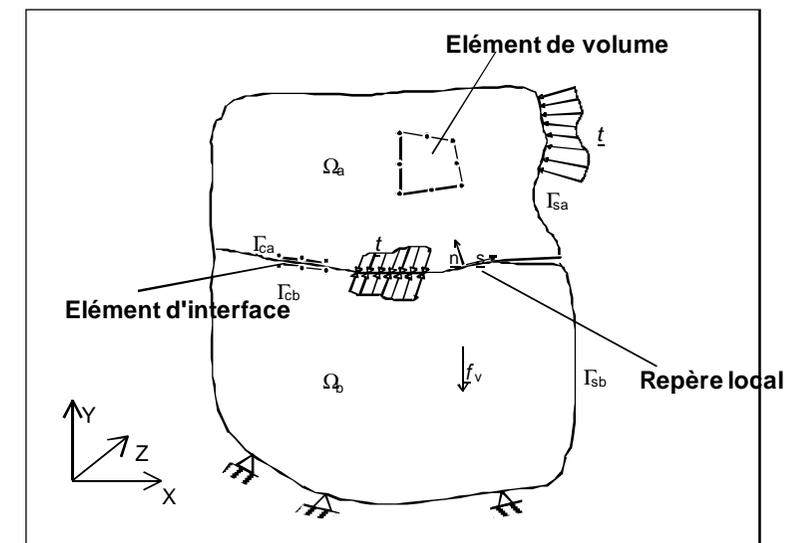
→ Des règles locales :

- Lois de comportement des matériaux
- Conservation de la quantité de mouvement
- Conservation de la masse fluide

→ Le principe des travaux virtuels

→ L'hypothèse des petits déplacements et petites déformations

→ Des Elements Finis de Volume et d'Interface



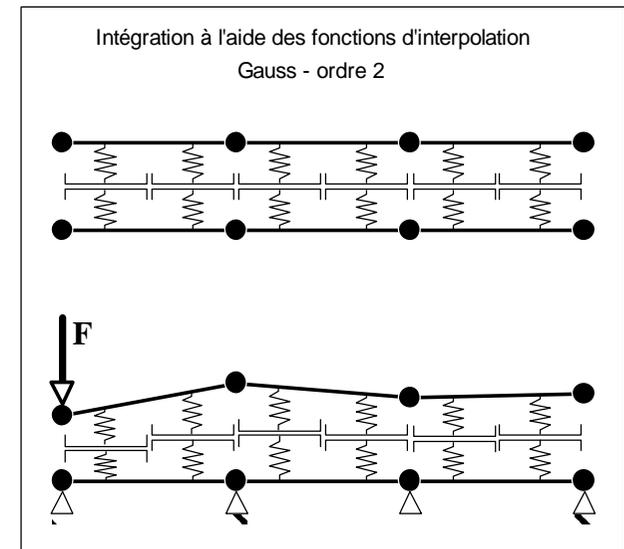
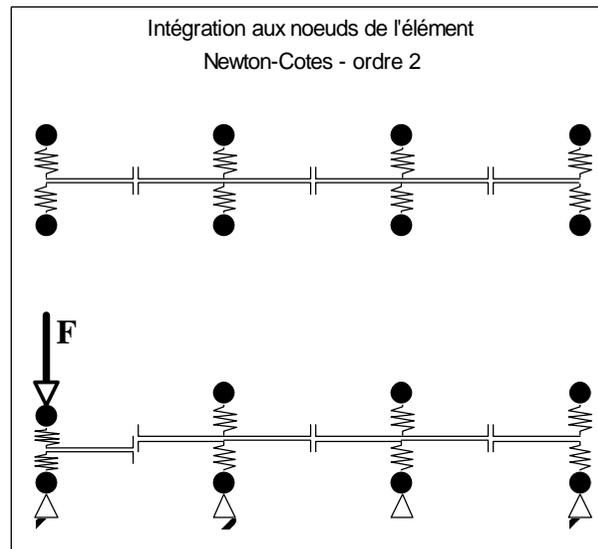
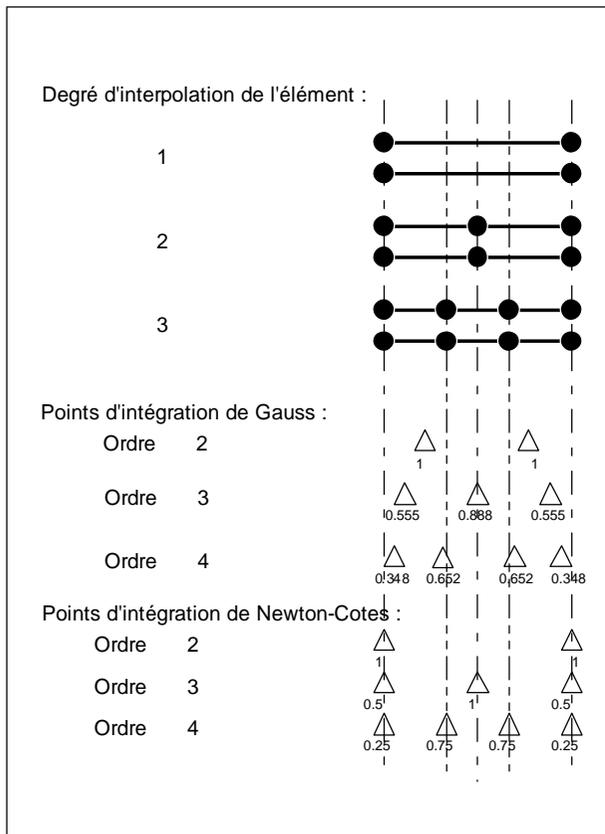
Résultats :

→ Système matriciel non-linéaire à résoudre à chaque pas de temps

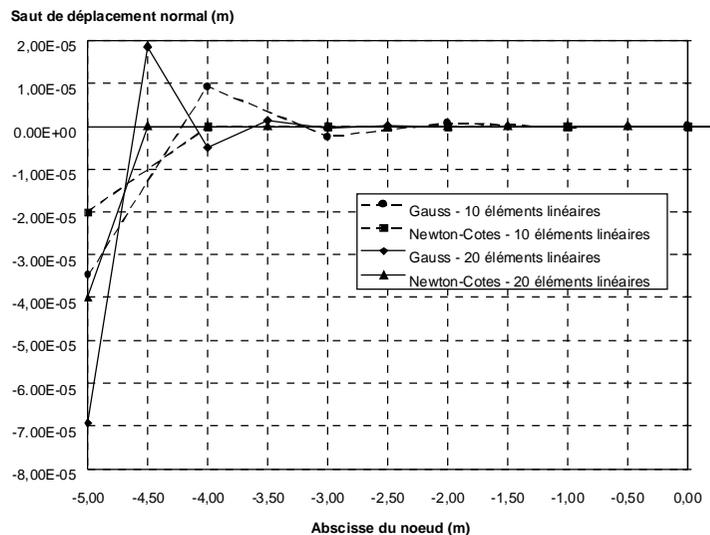
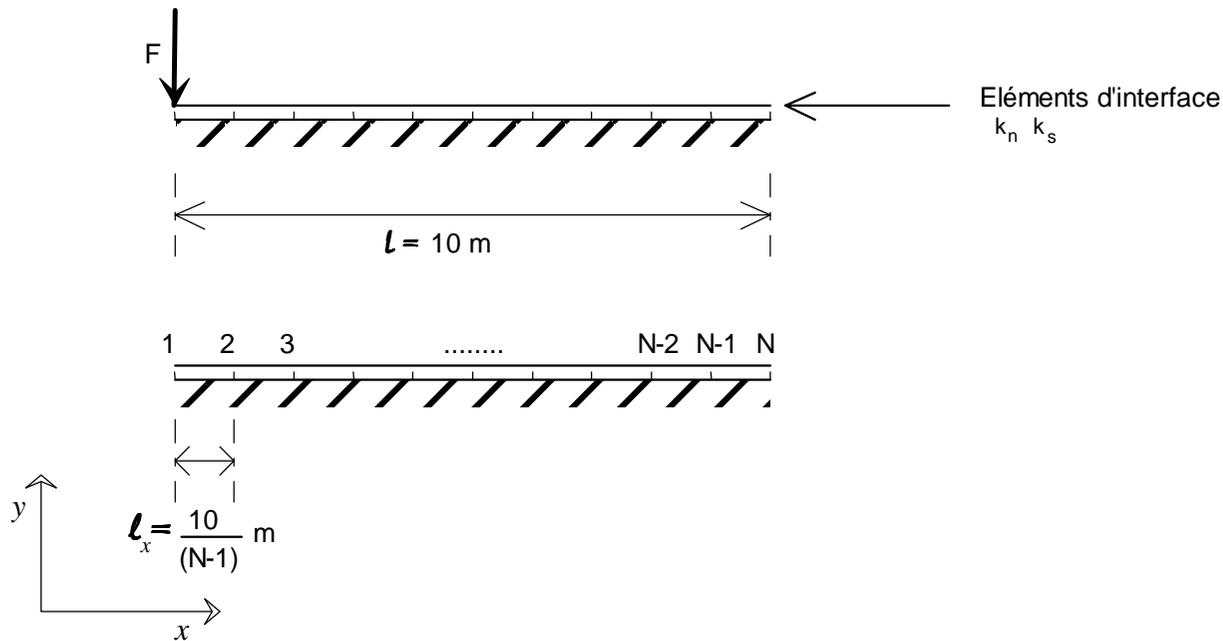
→ Cela nécessite :

- La connaissance et le respect des hypothèses
- L'utilisation d'un algorithme de résolution

Performance des Eléments d'Interface Des problématiques d'intégration numérique

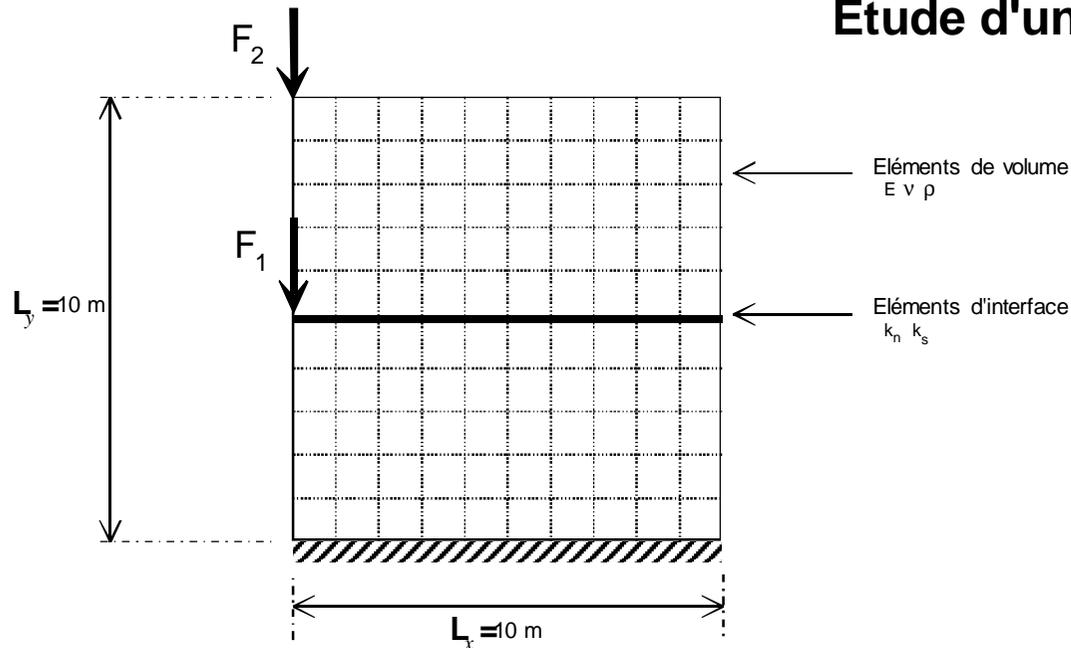


Performance des Eléments d'Interface Des problématiques d'intégration numérique



Performance des Eléments d'Interface Des problématiques d'intégration numérique

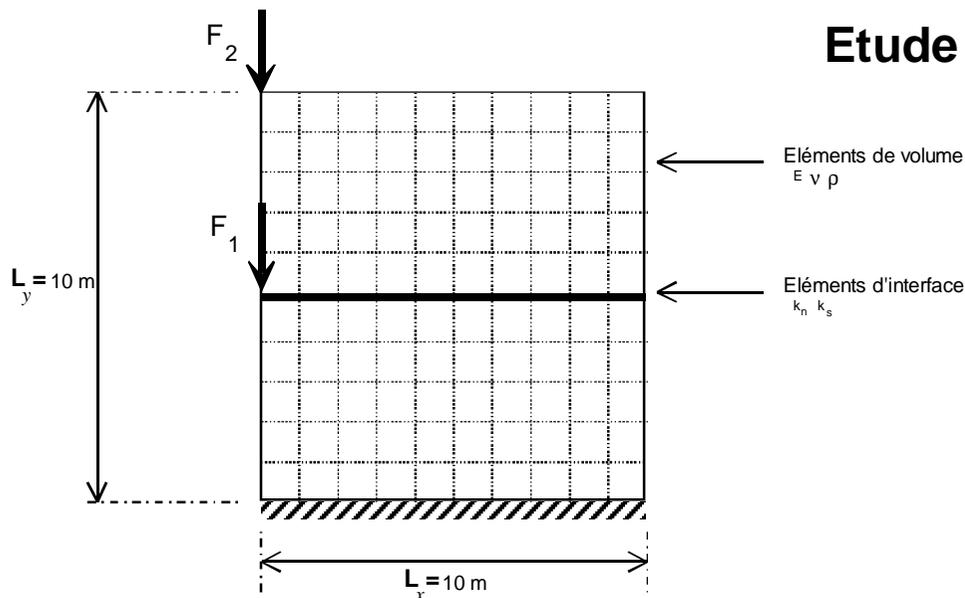
Etude d'un cas simple



avec la prise en compte :

- Deux cas de charge
- Différentes finesses du maillage
- Différentes méthodes d'intégration (Gauss, Newton-Côtes)
- Différents paramètres mécaniques

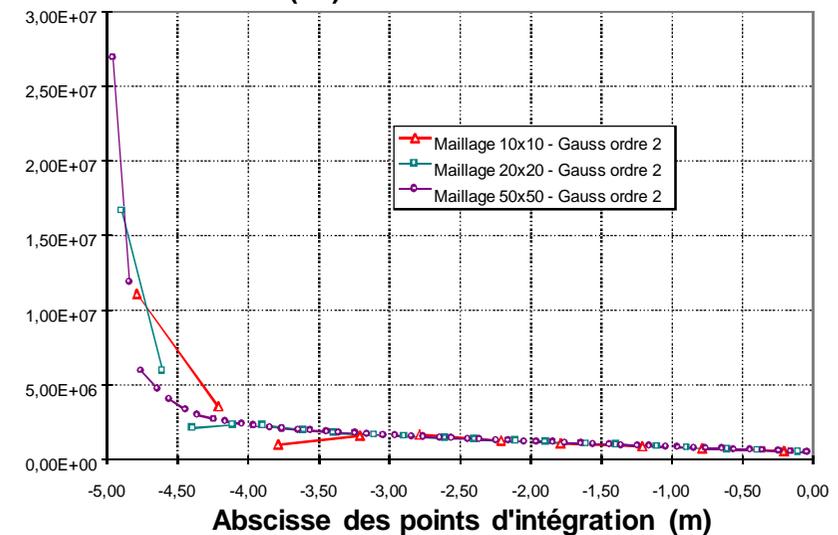
Performance des Eléments d'Interface Des problématiques d'intégration numérique



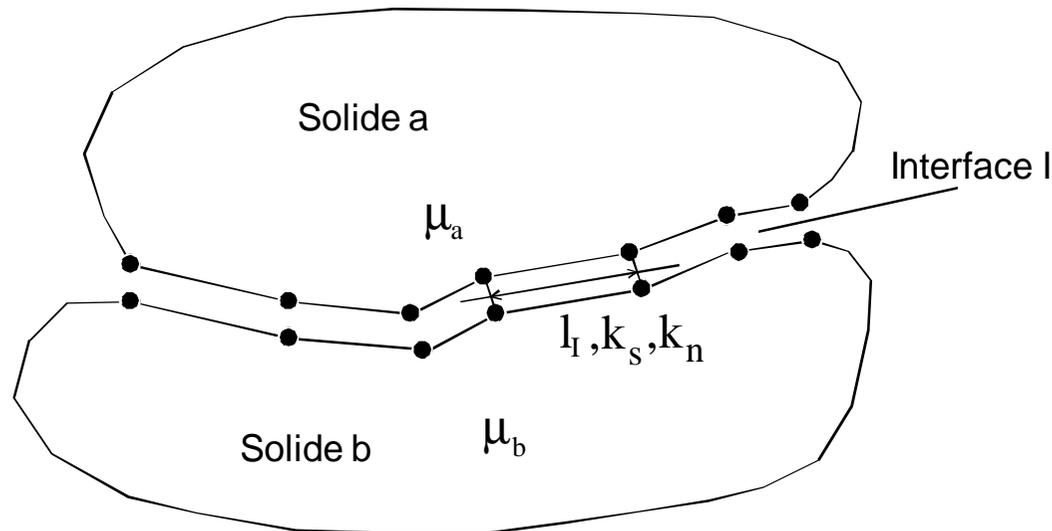
On note une influence sur ces oscillations :

- du cas de charge
- de la finesse du maillage
- de la méthode d'intégration (Gauss, Newton-Côtes)
- des paramètres mécaniques des solides et de l'interface

Contrainte normale (Pa)



Performance des Eléments d'Interface Mise au point d'un critère de qualité du maillage



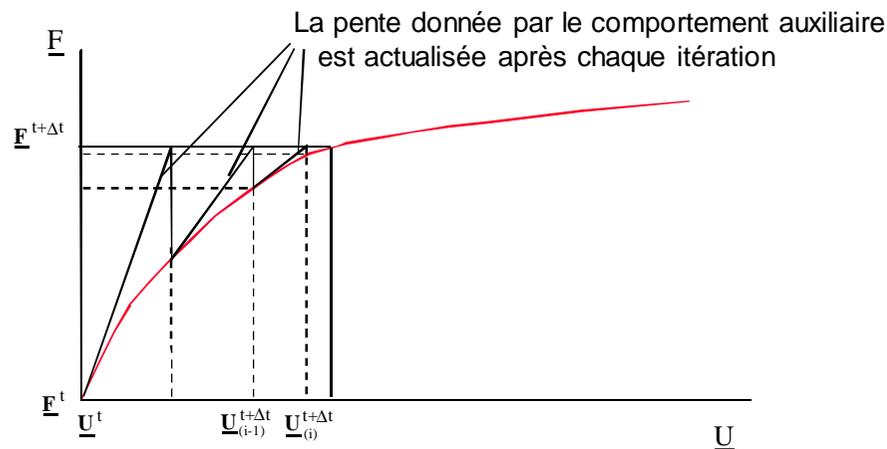
après analyse des termes de la matrice de rigidité du système :

$$c_q = \frac{k_{\max} \cdot l_I}{\min(\mu_a, \mu_b)}$$

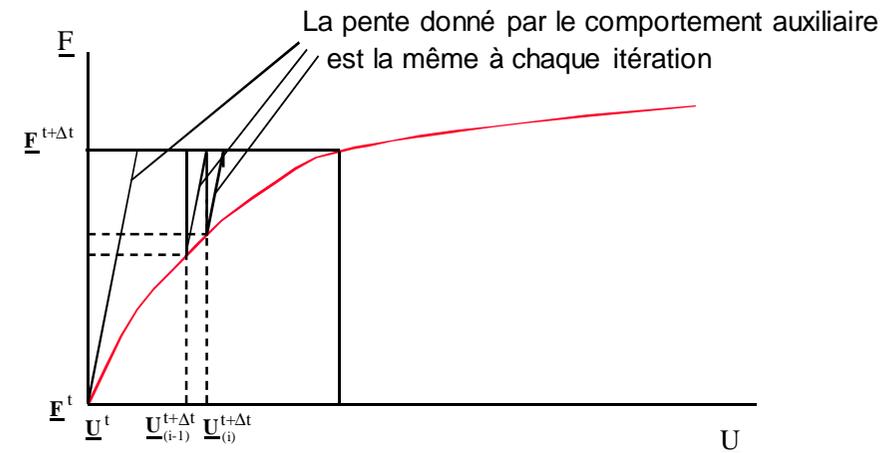
Performance des Eléments d'Interface Des problématiques de convergence

Les méthodes de résolution de Newton-Raphson

La méthode de Newton-Raphson :



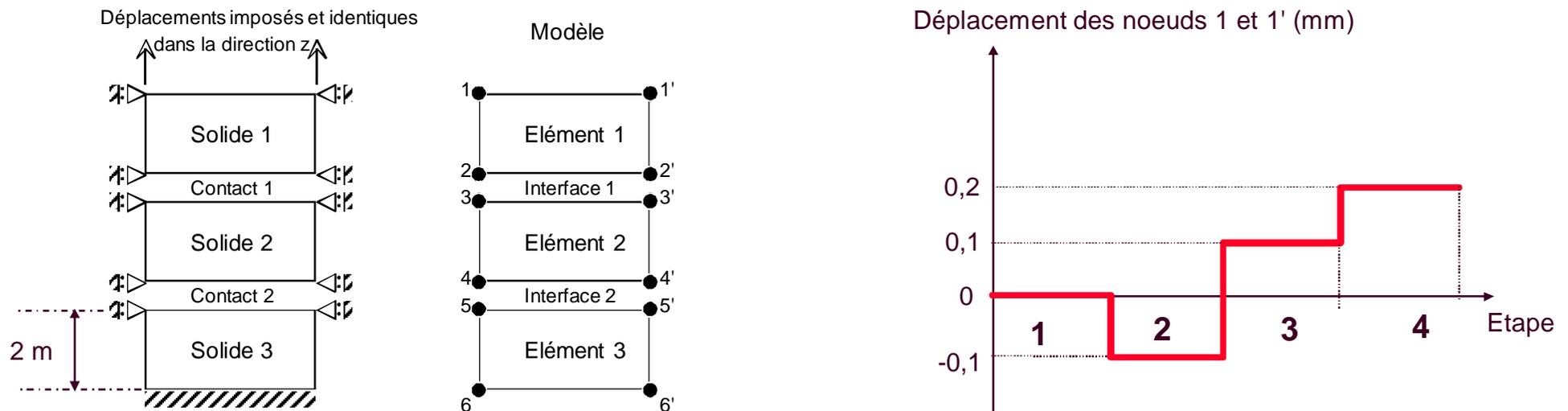
La méthode de Newton-Raphson modifiée :



Performance des Eléments d'Interface Des problématiques de convergence

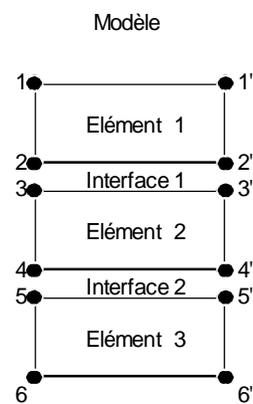
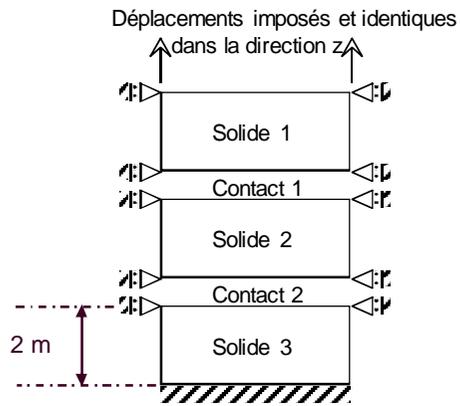
Application des méthodes de Newton-Raphson à un cas simple :

- 3 solides élastique linéaire
- 2 interfaces élastiques en compression sans résistance à l'ouverture

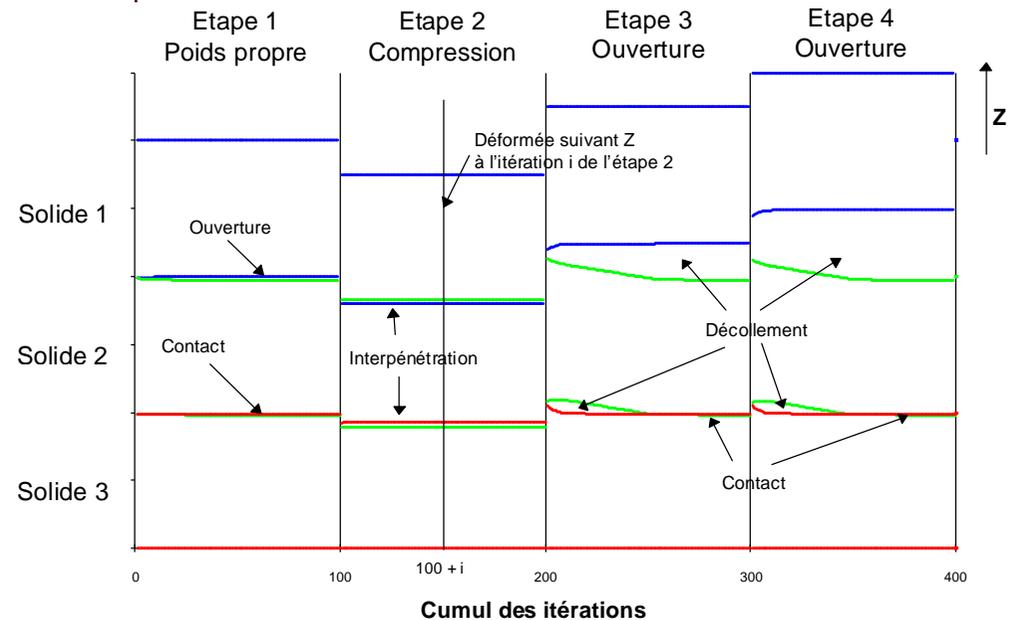
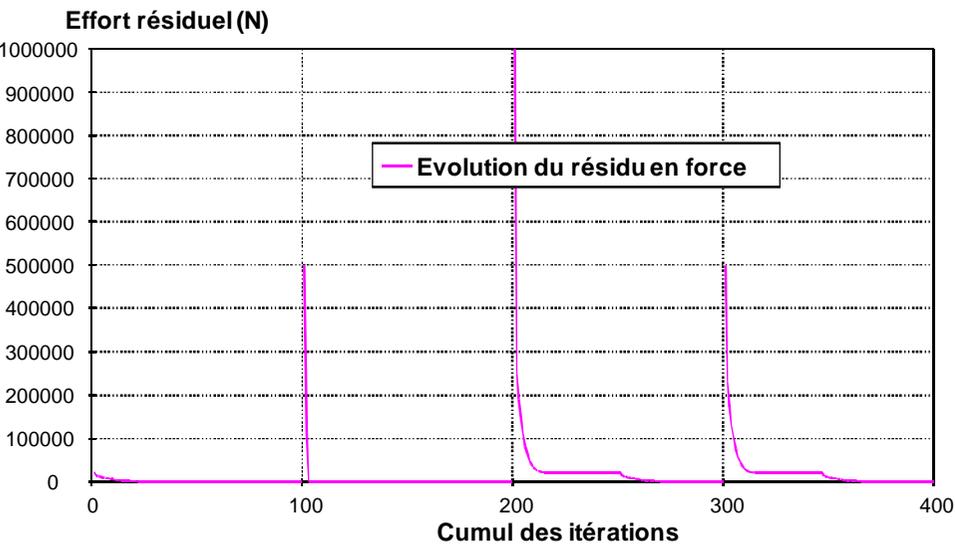
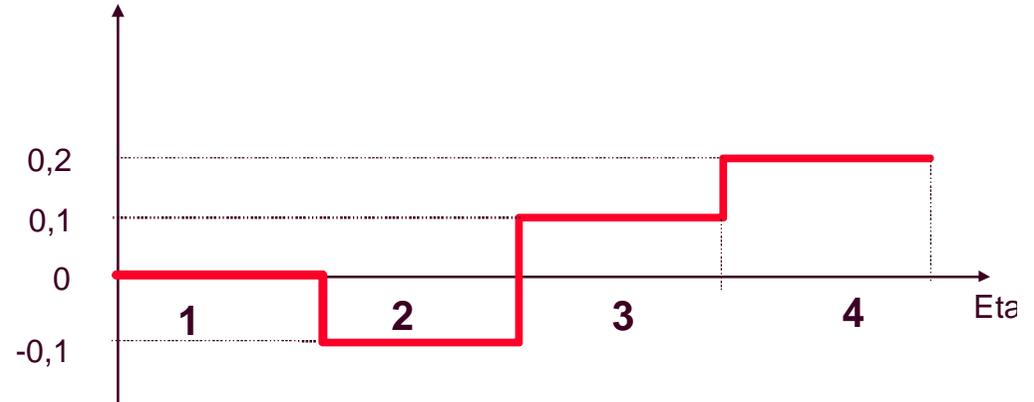


Performance des Eléments d'Interface Des problématiques de convergence

La méthode de Newton-Raphson modifiée appliquée à un cas simple



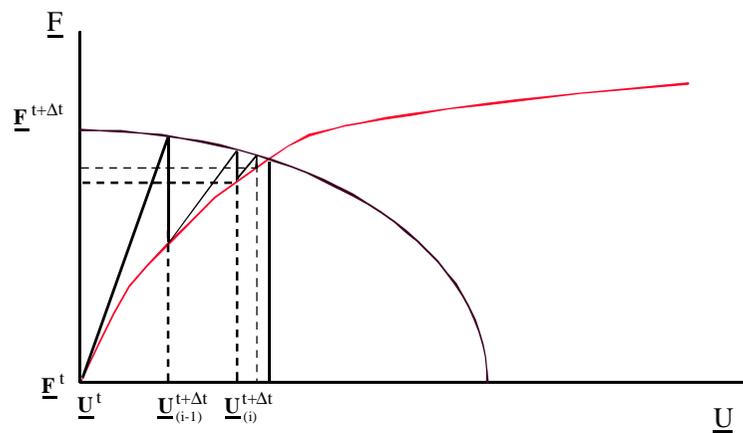
Déplacement des noeuds 1 et 1' (mm)



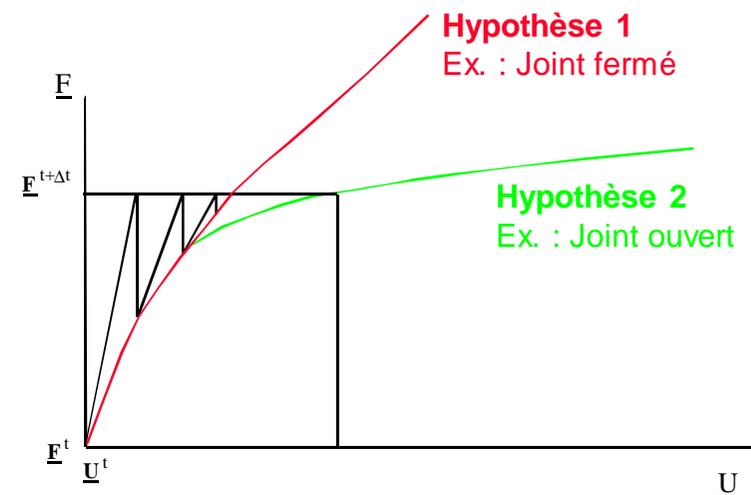
Performance des Eléments d'Interface Des problématiques de convergence

Les méthodes de résolution Autres algorithmes

La méthode de longueur d'arc :



Une méthode de recherche du comportement :



Les Eléments d'Interface hydromécaniques

Synthèse

Trois points de vigilance concernant la modélisation des discontinuités avec des Eléments d'Interface :

- La connaissance des hypothèses de la formulation**
- Les problèmes d'intégration numérique**
- Les problèmes de convergence**

Sommaire

Introduction

Les Eléments d'interface
hydromécaniques

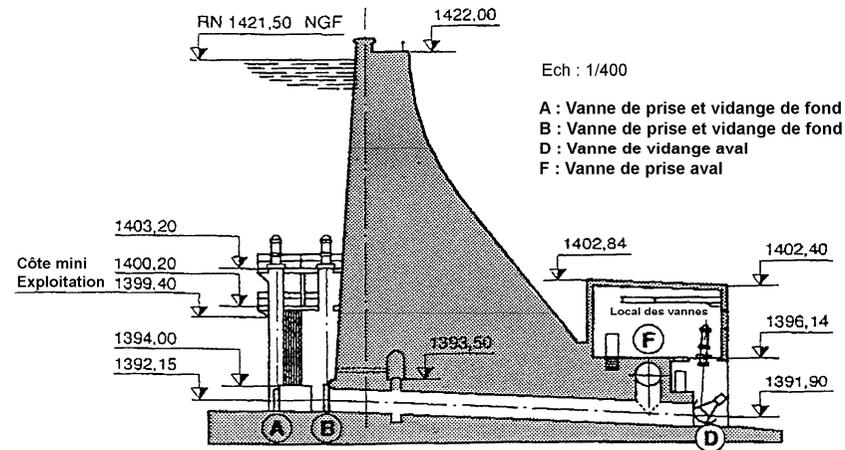
**Application aux barrages
en béton**

Conclusion



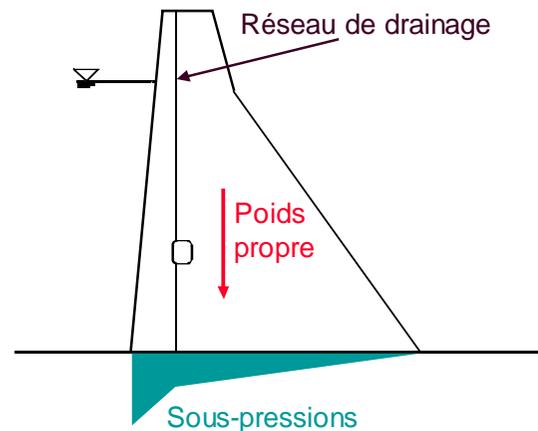
Stabilité des barrages-poids

Analyse de sections verticales

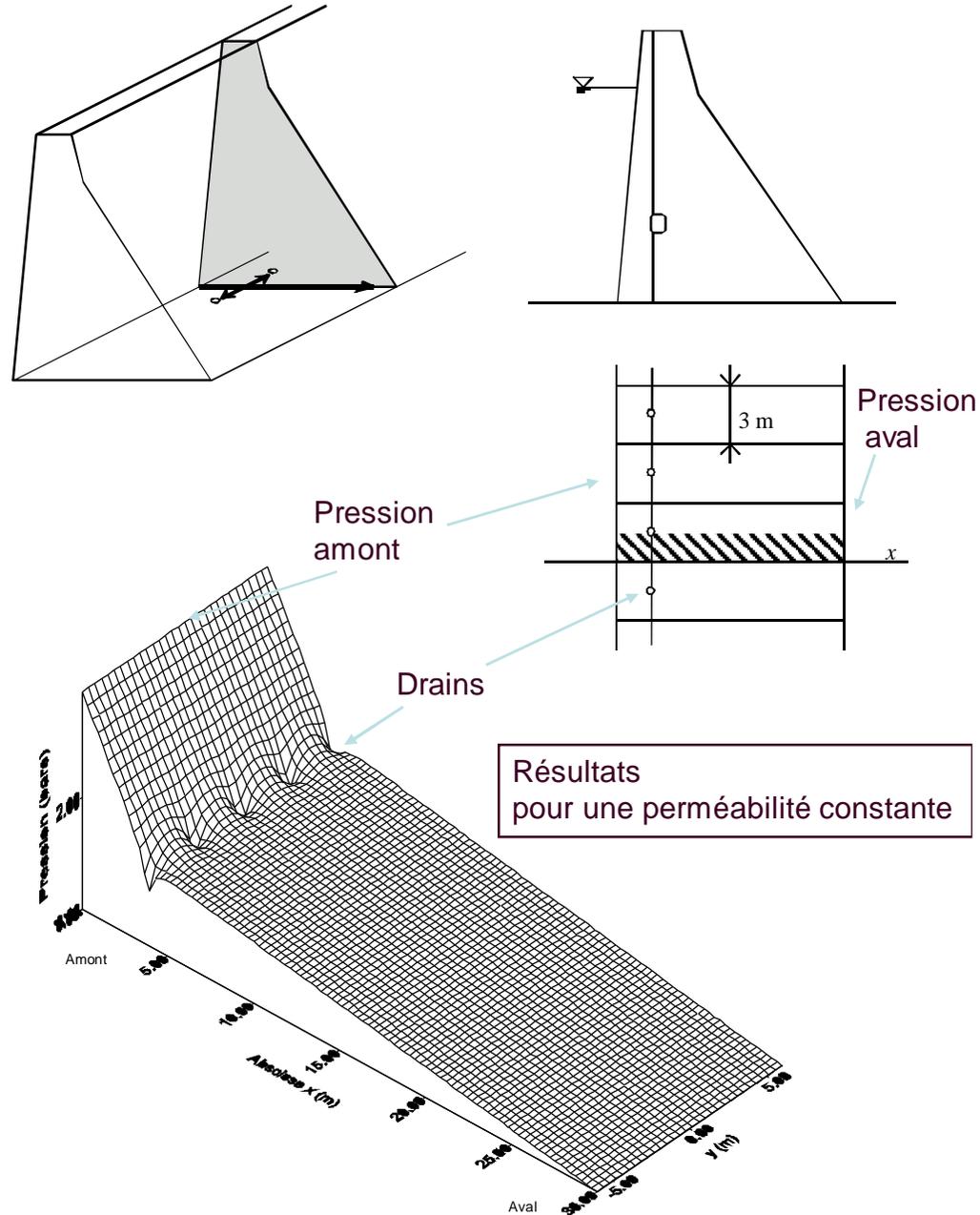


Barrage de Puyvalador, coupe dans l'axe de vidange

La méthode simplifiée



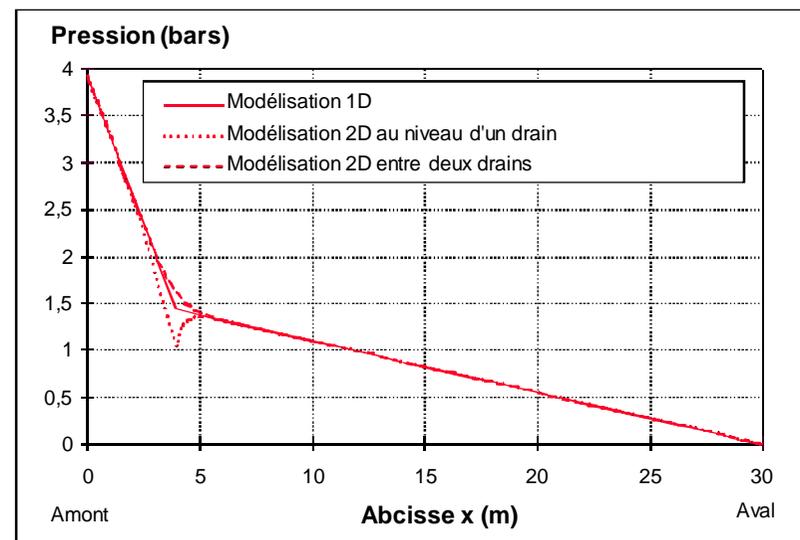
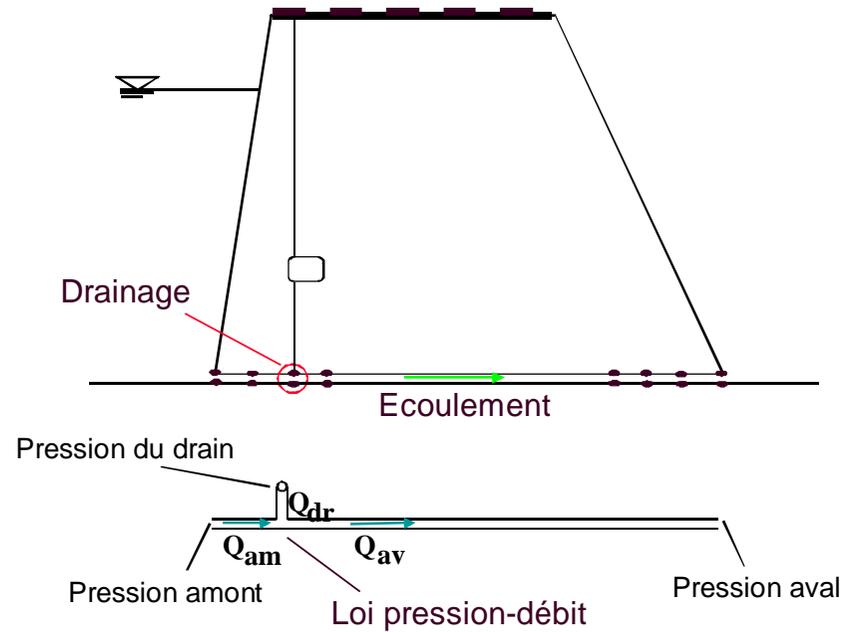
Stabilité des barrages-poids Les sous-pressions



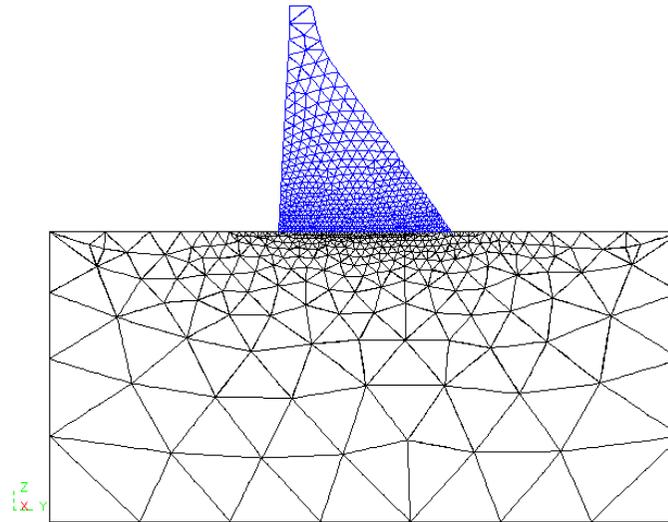
Stabilité des barrages-poids

Les sous-pressions

Modélisation 1D de l'écoulement



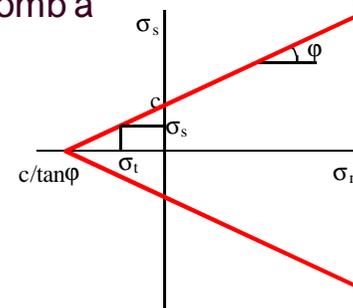
Stabilité des barrages-poids Etude du contact barrage-fondation



- Les solides ont un comportement mécanique élastique linéaire.
- Comportement mécanique des joints :

Loi élastoplastique de Mohr-Coulomb à cinq paramètres :

- un angle de frottement φ
- une cohésion c
- un angle de dilatance ψ
- une rigidité normale k_n
- une rigidité tangentielle k_s



- Ecoulement laminaire dans les joints :

Loi cubique : le débit par unité de largeur est proportionnel au cube de l'ouverture

Stabilité des barrages-poids

Un jeu de paramètres

| Caractéristiques du béton et du rocher | |
|---|---|
| Masse volumique du béton : | $\rho_b = 2400 \text{ kg/m}^3$ |
| Module d'Young du béton : | $E_b = 20 \text{ GPa}$ |
| Coefficient de Poisson du béton : | $\nu_b = 0.2$ |
| Masse volumique du rocher : | $\rho_f = 2400 \text{ kg/m}^3$ |
| Module d'Young du rocher : | $E_f = 8 \text{ GPa}$ |
| Coefficient de Poisson du rocher : | $\nu_f = 0.16$ |
| Caractéristiques mécaniques de l'interface : | |
| Rigidité élastique tangentielle : | $k_s = 5.10^{-9} \text{ Pa/m}$ |
| Rigidité élastique normale : | $k_n = 10^{-10} \text{ Pa/m}$ |
| Angle de frottement : | $\varphi = 37^\circ$ |
| Angle de dilatance : | $\psi = 0^\circ$ |
| Cohésion : | $c = 0 \text{ Pa}$ |
| Résistance à la traction maximale : | $c/\tan \varphi = 0 \text{ Pa}$ |
| Caractéristiques hydrauliques de l'interface : Loi cubique | |
| Coefficient de perméabilité | $k_c = 6,4.10^{-5} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ |
| Epaisseur initiale de l'écoulement | $e_{n0} = 0,1 \text{ mm}$ |
| Epaisseur minimale de l'écoulement | $e_{\min} = 0,1 \text{ mm}$ |

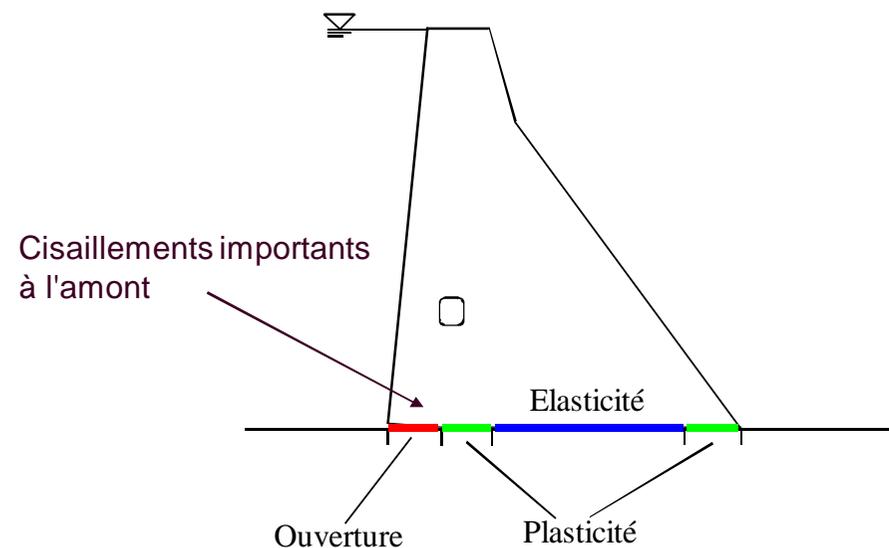
Stabilité des barrages-poids Intérêt de l'utilisation des éléments d'interface

Sur le plan pratique :

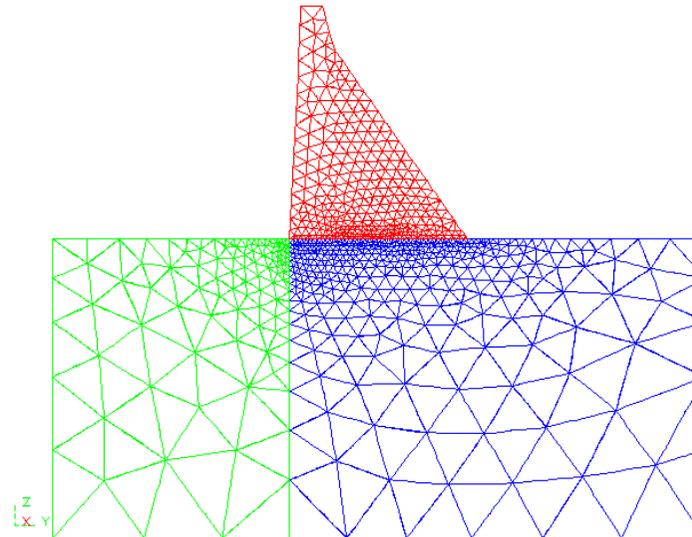
- Distribution de contrainte
- Influence des paramètres mécaniques
- Longueur de fissuration
- Efficacité du drainage
- Propagation des sous-pressions

Mais vigilance sur le plan numérique :

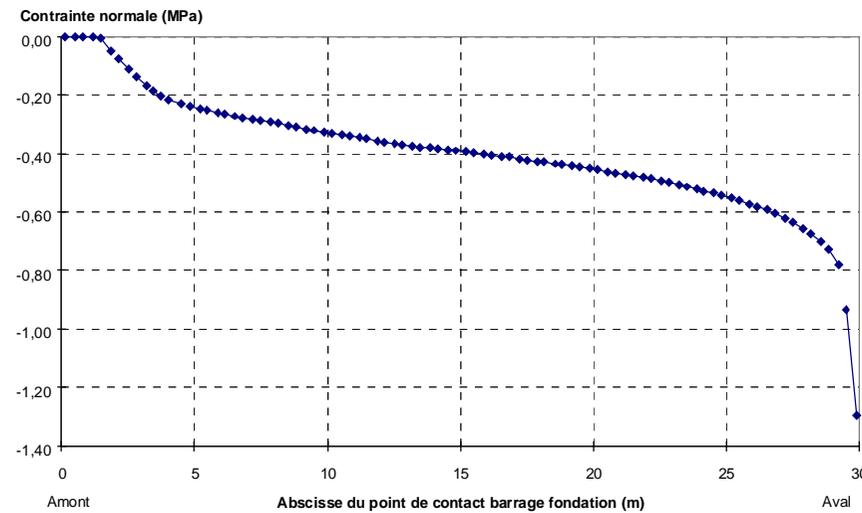
- Sensibilité du maillage
- Connaissance des problèmes de convergence



Stabilité des barrages-poids Influence d'une faille dans la fondation rocheuse



Maillage 2D du barrage de Puyvalador



Avec les mêmes paramètres, on note une diminution de moitié de la longueur de fissuration.

Stabilité des barrages-poids Synthèse

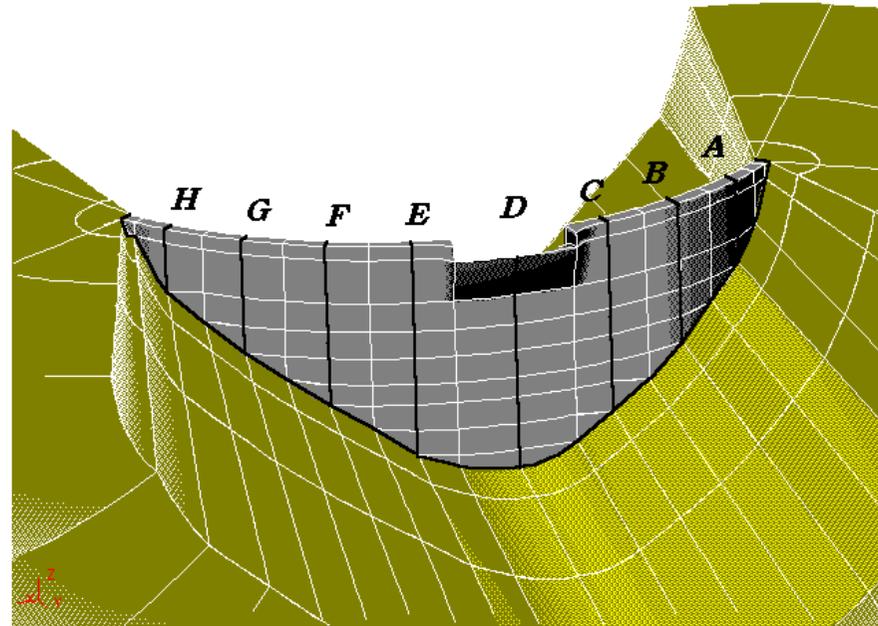
L'utilisation des Eléments d'Interface pour le calcul de la stabilité des barrages-poids permet :

- **Une approche plus juste dans la modélisation du drainage**
- **Le calcul de la propagation des sous-pressions**
- **Une meilleure compréhension de l'influence des paramètres mécaniques**
- **Une mise en évidence des limites de la méthode simplifiée**

Cependant :

- **Hypothèses fortes concernant la localisation des non-linéarités et de l'écoulement**

Les barrages-voûtes Etude type de comportement

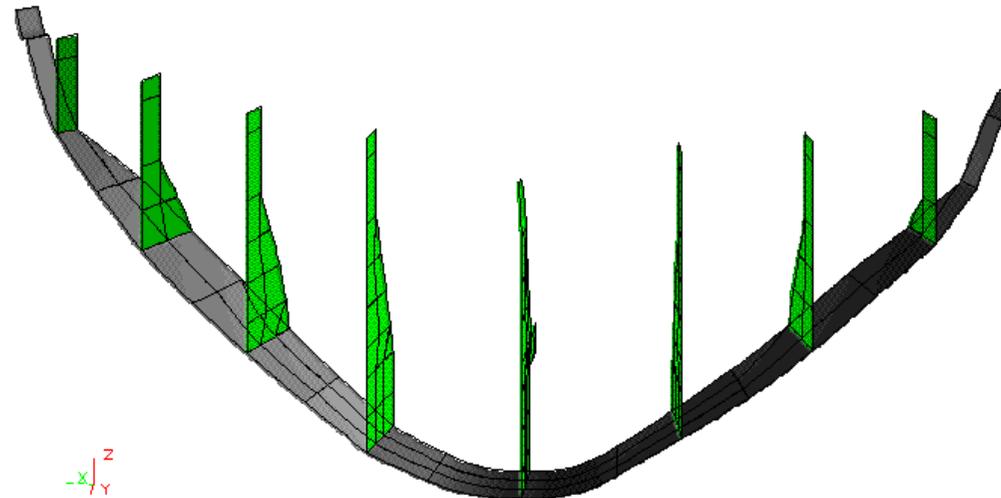


Maillage 3D du barrage de Puylaurent

Barrage-voûte à simple courbure

- 73 mètres de hauteur
- 220 m de longueur en crête
- capacité du réservoir de 70 000 m³

Les barrages-voûtes Discontinuités considérées



Les joints "water-stop" empêchent la propagation des sous-pressions à l'intérieur des joints de plots. Ils ont un comportement purement mécanique.

Le contact barrage-fondation est modélisé par des éléments d'interface hydro-mécanique.

Les barrages-voûtes

Hypothèses retenues pour l'exemple d'application

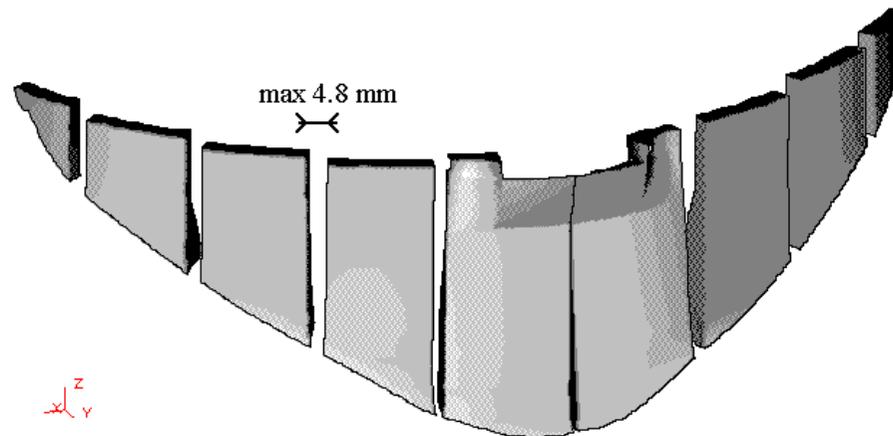
Le béton et le rocher de fondation sont imperméables et ont un comportement élastique linéaire.

Les joints de plots et le contact béton-rocher suivent un comportement élasto-plastique de type Mohr-Coulomb.

La loi d'écoulement dans le contact barrage-fondation est linéaire en débit.

| | |
|---------------------------------|--|
| Rocher de fondation | |
| Masse volumique : | $\rho_f = 2400 \text{ kg/m}^3$ |
| Module d'Young : | $E_f = 18 \text{ GPa}$ |
| Coefficient de Poisson : | $\nu_f = 0,2$ |
| Béton | |
| Masse volumique : | $\rho_c = 2400 \text{ kg/m}^3$ |
| Module d'Young : | $E_r = 36 \text{ GPa}$ |
| Coefficient de Poisson : | $\nu_r = 0,2$ |
| Coef. de dilatation thermique : | $\alpha = 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ |
| Joint de plots | |
| Rigidité normale : | $k_n = 10 \text{ GPa/m}$ |
| Rigidité tangentielle : | $k_s = 0 \text{ GPa/m}$ avant clavage $k_s = 5 \text{ GPa/m}$ après clavage |
| Angle de frottement : | $\varphi = 45^\circ$ |
| Cohésion : | $c = 0 \text{ Pa}$ |
| Angle de dilatance : | $\psi = 0^\circ$ |
| Contact béton rocher | |
| Rigidité normale : | $k_n = 10 \text{ GPa/m}$ |
| Rigidité tangentielle : | $k_s = 5 \text{ GPa/m}$ |
| Angle de frottement : | $\varphi = 45^\circ$ |
| Cohésion : | $c = 0 \text{ Pa}$ |
| Angle de dilatance : | $\psi = 0^\circ$ |

Les barrages-voûtes Construction et retrait thermique



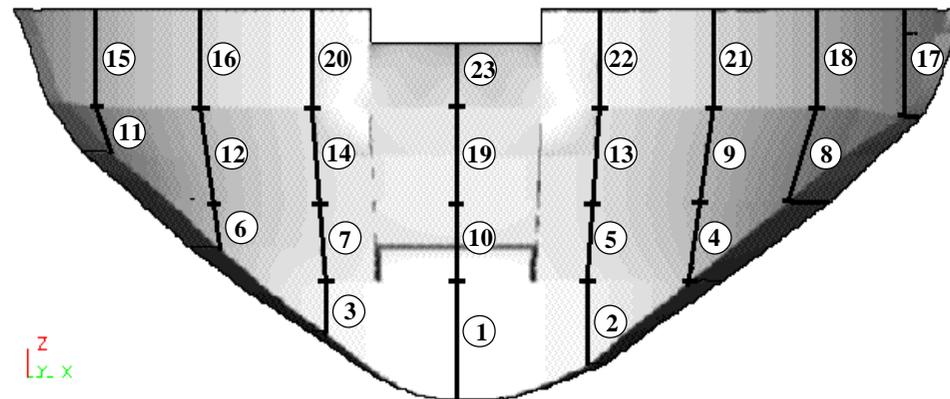
Après retrait thermique - Déformée x 1000

- **Le poids propre de l'ouvrage est appliqué en une étape**
 - Rigidité tangentielle nulle entre les plots
 - Les plots se comportent indépendamment sans s'interpénétrer
- **Le retrait thermique est modélisé par une diminution uniforme de la température du béton de 15°C**

Les barrages-voûtes Modélisation du clavage

Deux scénarii de clavage :

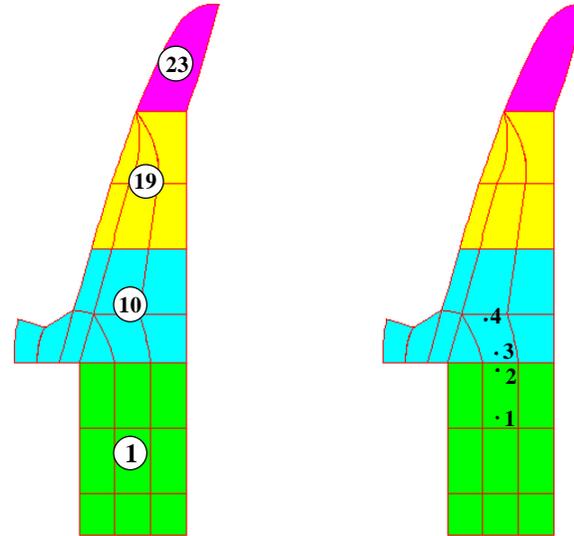
- 1 - Remplissage des joints de plots sans sur-clavage
- 2 - Modélisation du sur-clavage en 23 étapes



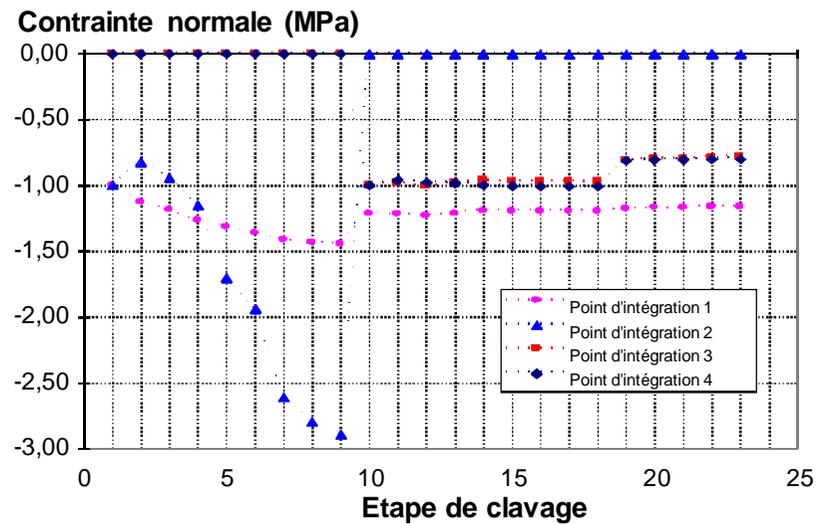
Les compartiments de clavage

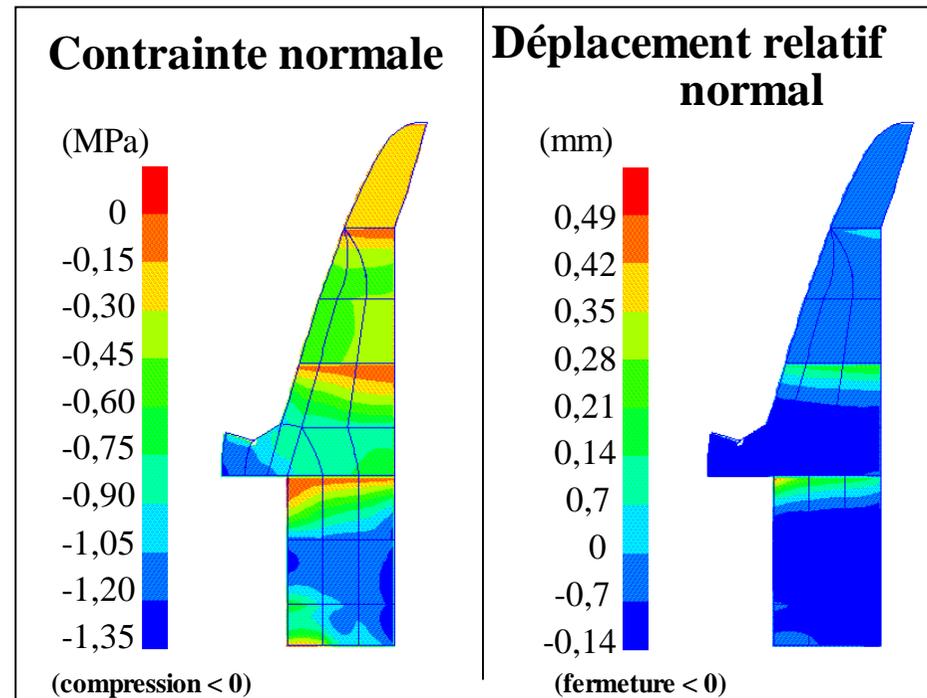
| Compartiment : | Pression de clavage : |
|-------------------------|-----------------------|
| 1-2-3-4-5-6-7-10 | 1 MPa |
| 8-9-11-12-13-14-19 | 0,5 MPa |
| 15-16-17-18-20-21-22-23 | 0,2 MPa |

Les barrages-voûtes Modélisation du clavage



Compartiments de clavage du joint de plot central D





Après clavage, contraintes normales et déplacements relatifs normaux dans le joint de plot central D

- Le clavage d'un compartiment engendre l'ouverture de la partie supérieure du compartiment inférieur
- La contrainte normale est supérieure à 1 MPa dans le compartiment 1

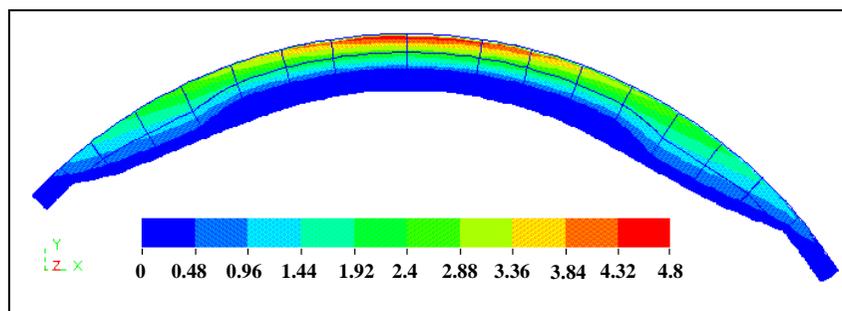
Les barrages-voûtes

Mise en eau

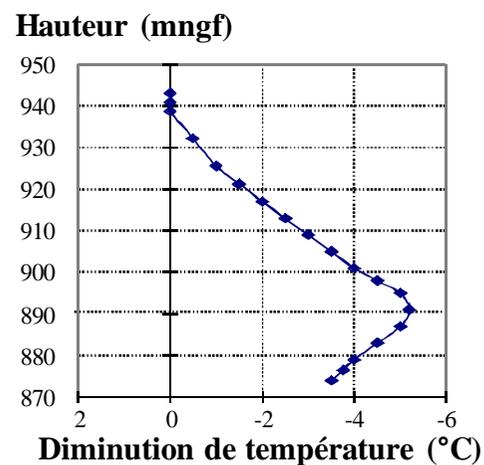
La mise en eau est effectuée en huit étapes pour atteindre la cote normale 938.8 m

Différents calculs ont été effectués pour estimer :

- Les effets du sur-clavage
- Les effets des sous-pressions au niveau du contact béton-rocher



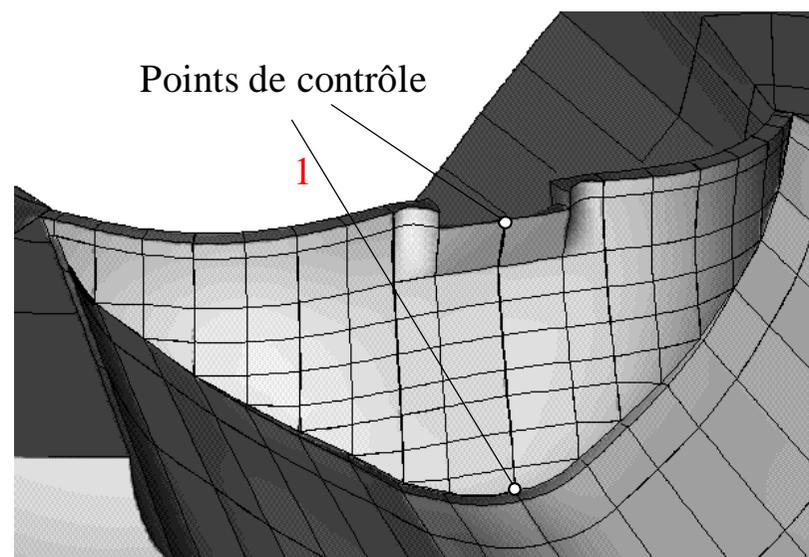
- Les effets d'un retrait thermique résiduel



Les barrages-voûtes

Mise en eau

| | Retrait thermique résiduel | Sous-pressions au contact béton-rocher | Scénario de clavage |
|--------------|----------------------------|--|---------------------|
| Calcul n° 1 | Non | Non | 1 |
| Calcul n° 1t | Oui | Non | 1 |
| Calcul n° 2 | Non | Non | 2 |
| Calcul n° 2t | Oui | Non | 2 |
| Calcul n° 3 | Non | Oui | 1 |
| Calcul n° 3t | Oui | Oui | 1 |



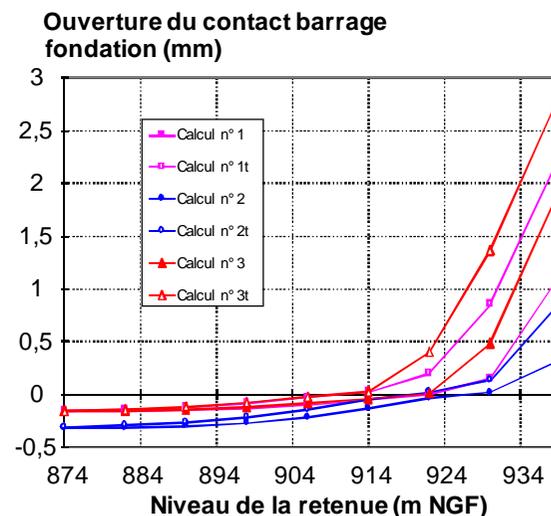
*Résultats du calcul n° 1 - Déformée (x 1000)
du barrage en fin de mise en eau (938.8 m)*

Les barrages-voûtes

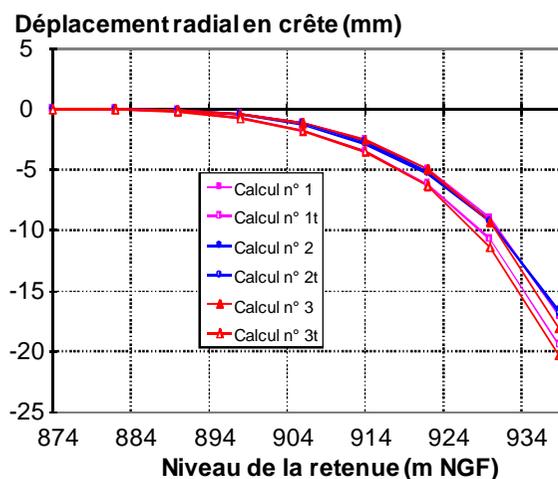
Mise en eau

La dernière étape de mise en eau contribue de manière importante à l'ouverture du joint de contact barrage-fondation.

Point de contrôle 1



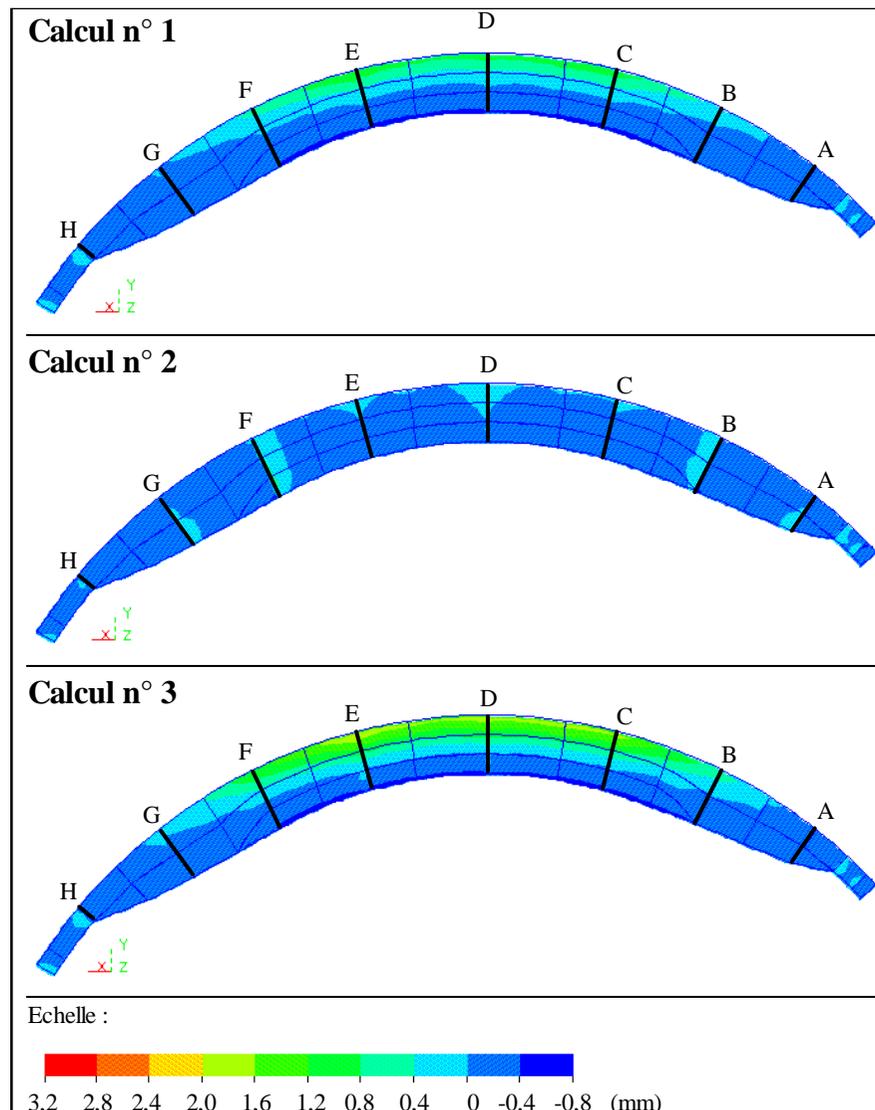
Point de contrôle 2



Le retrait thermique résiduel et le surclavage ont une influence faible sur les déplacements en crête

Les barrages-voûtes

Mise en eau



*Déplacements relatifs normaux le long du contact
barrage-fondation en fin de mise en eau (938,8 mNGF)*

L'utilisation d'Eléments d'Interface pour la modélisation du comportement des barrages-voûtes permet :

- **D'étudier les effets du clavage des joints de plots et son influence sur le comportement futur du barrage**
- **De mieux appréhender les effets thermiques**
- **D'estimer l'influence des sous-pressions au niveau du contact barrage-fondation**

Ce sont des points importants pour la conception des barrages-voûtes.

Sommaire

Introduction

Les Eléments d'interface
hydromécaniques

Application aux barrages en
béton

Conclusion



- **Les Eléments d'Interface hydromécaniques :**
 - sont des outils bien appropriés à la modélisation du comportement des barrages en béton,
 - nécessitent des développements spécifiques pour :
 - ▢ *le drainage dans les barrages-poids,*
 - ▢ *le clavage des barrages-voûtes.*

- **Néanmoins, il faut rester vigilants et connaître les limites de la modélisation des discontinuités :**
 - Difficultés numériques :
 - ▢ *hypothèses de la formulation Eléments Finis*
 - ▢ *précision du maillage*
 - ▢ *problèmes de convergence*
 - Connaissance et extrapolation des données géotechniques du rocher et du béton.

Référence principale : Thèse de Doctorat - « Modélisation du comportement hydro-mécanique des discontinuités dans les structures et les fondations rocheuses. Application aux barrages en béton » - Université de Grenoble - 1997 – P. DIVOUX