

Approche innovante pour la justification du barrage en béton de la Balme de Rencurel

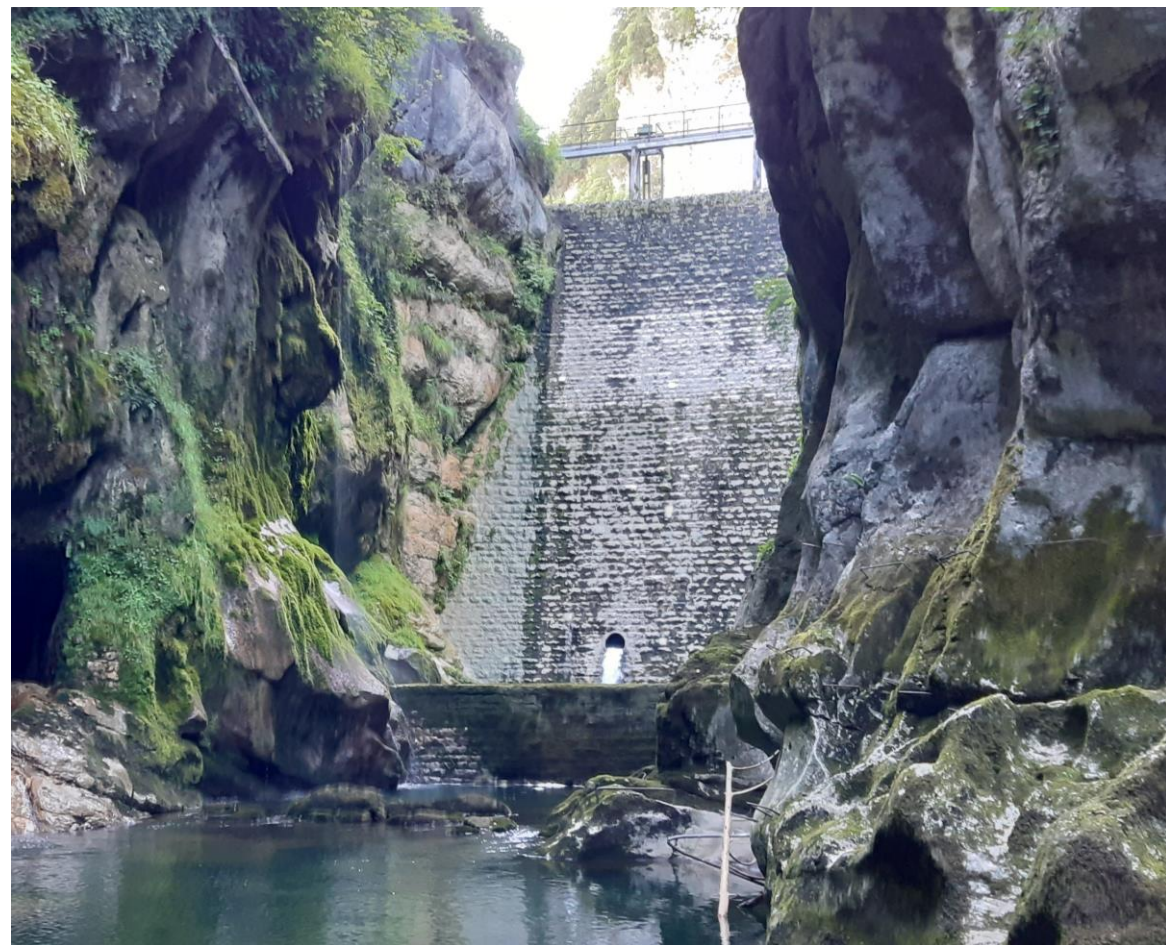
F. LAIGLE, SETEC Terrasol  terrasol (ex WSP )
setec

P. KOLMAYER, EDF-CIH  EDF

H. TRAN & M. CAMUSSO, ITASCA 

Symposium 2025
30 janvier 2025 – Aix les Bains

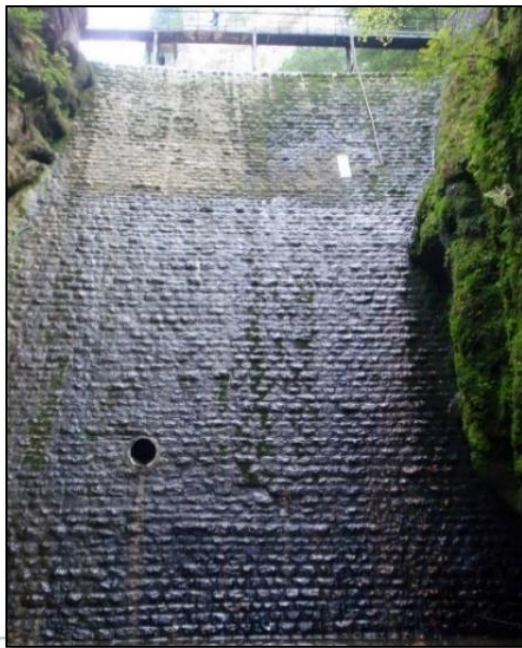
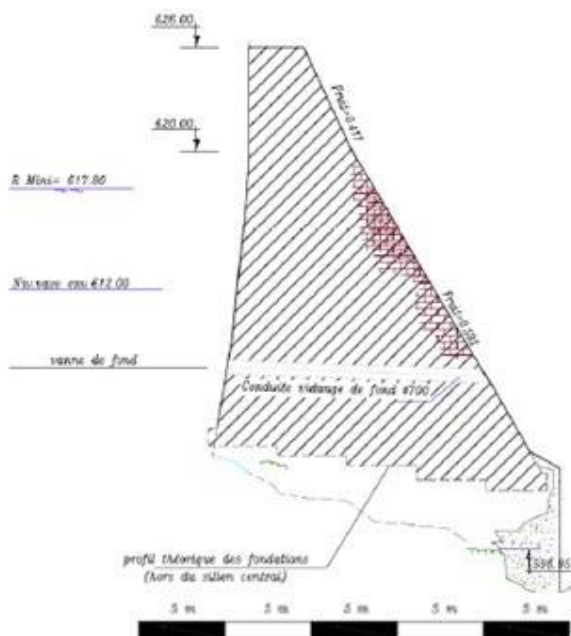
1. Principales caractéristiques du barrage
2. Démarche progressive d'études
3. Réflexions sur la modélisation non-linéaire d'un géomatériau cohérent
4. Modèle de calcul, hypothèses et interprétation
5. Analyse et compréhension du comportement
6. Estimation de la marge de sécurité et identification du mécanisme de ruine
7. Conclusions



Principales caractéristiques du barrage

- **Caractéristiques générales du barrage:**

- Barrage Poids-Voûte en béton cyclopéen
- Rivière: La Bourne (38/26)
- Mise en service : 1912
- Maître d'Ouvrage : EDF
- Hauteur : 24m
- Fruit aval: 0,4 à 0,6



- **Béton cyclopéen**

- $\approx 47\%$ de blocs de calcaire
- $\approx 30\%$ de mortier compact
- $\approx 14\%$ de mortier d'apparence peu compact
- $\approx 9\%$ de vide

- **Caractéristiques mécaniques des composants**

- Blocs de calcaire : $R_c \approx 130 \text{ MPa}$
- Mortier «peu poreux »: $R_c \approx 3,5 \text{ MPa}$
- Mortier «poreux »: $R_c \approx 0,8 \text{ MPa}$

Résistance généralisée à l'ensemble du corps du barrage :

$R_c \approx 0,8 \text{ MPa}$

- **Perré aval en moellons calcaires jointoyés**

- **Fondation rocheuse calcaire et un contact de bonne qualité et franc entre le barrage et sa fondation**



Démarche progressive d'étude

- **Calculs 2D**

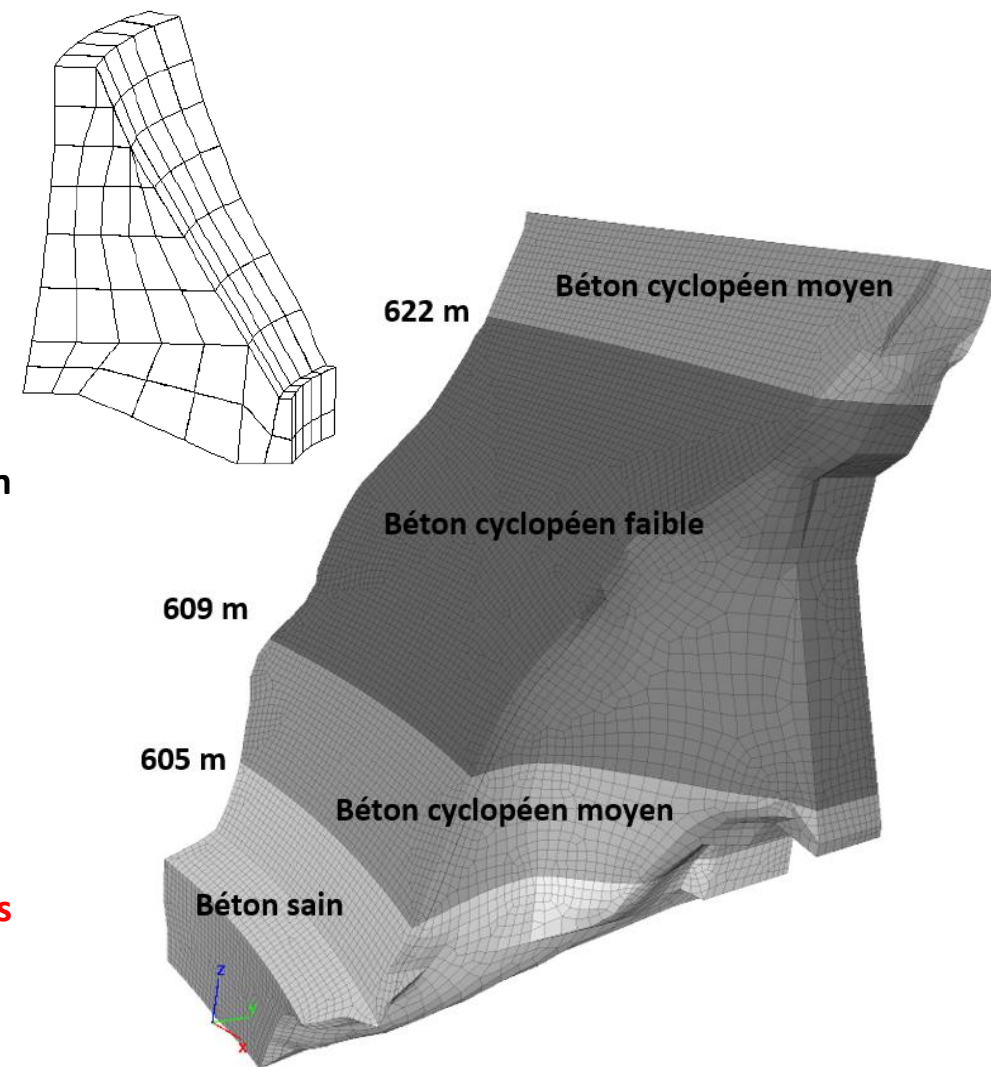
- Non justification liée à la géométrie 2D retenue

- **Calculs 3D avec un comportement élastique linéaire**

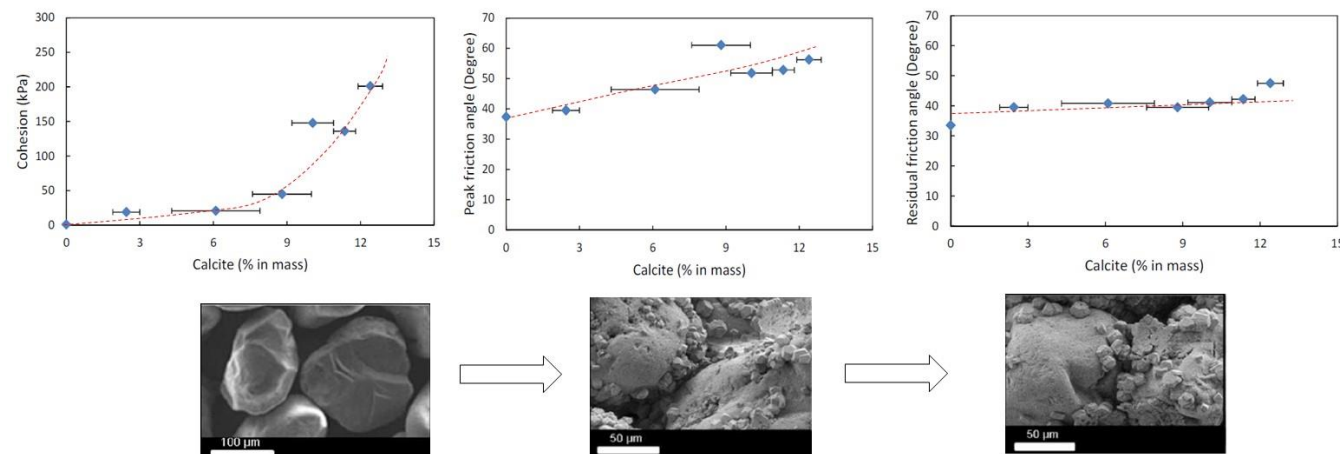
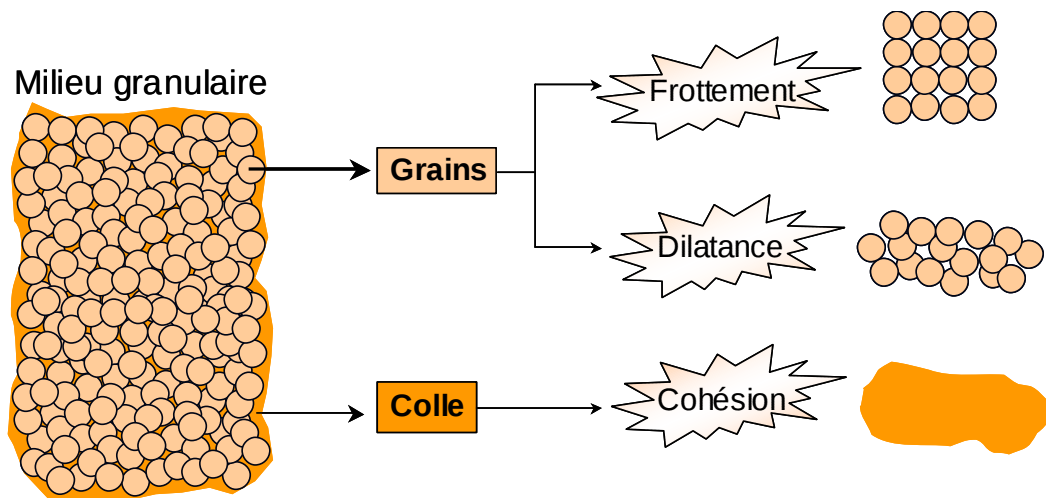
- Mise en évidence d'un report important des contraintes vers les rives.
 - ✓ $\approx 3/4$ de la poussée amont transmise aux rives
 - ✓ $\approx 1/4$ de la poussée amont reprise en cisaillement sur les plans horizontaux
- Stabilité générale glissement/renversement justifiée
- Concentrations de contraintes de compression en rives, dans le béton cyclopéen : ≈ 0.7 MPa.
- Non respect du critère de compression !!

- **Calculs 3D avec un comportement non-linéaire du béton cyclopéen**

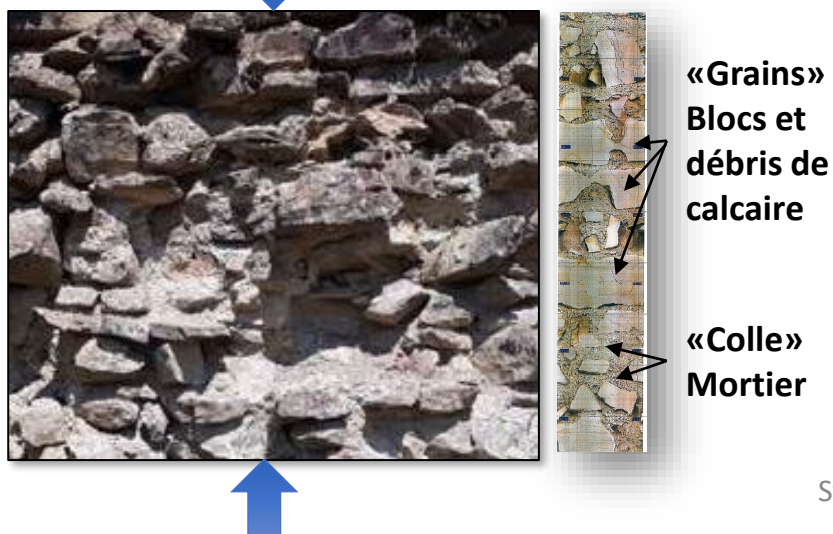
- Une discrétisation plus fine de l'ouvrage
- Une description « physique » de la rhéologie du béton cyclopéen
- Prise en compte du perré et de la piézométrie dans l'ouvrage et sous-pressions
- Une démarche d'évaluation de la marge de sécurité en cohérence avec les mécanismes de dégradation du béton cyclopéen



Réflexion sur une modélisation non-linéaire d'un géomatériau cohérent



Emeriault F. & Geindreau C. & Naillon A. & Abbas M. & Sirkis M. – Analyse microstructurale de la transition frottement-cohésion dans les sables biocimentés – Séance technique CFMR/CFMS/CFGF sur les roches tendres et sols indurés – 2021



Critère de résistance maximale de Mohr Coulomb

$$\tau = \sigma_n \tan \left(\phi_{cr} + \psi(\gamma_p; \bar{\sigma}) \right) + C(\gamma_p)$$

Résistance τ
 σ_n : Normale
 ϕ_{cr} : Angle de frottement
 $\psi(\gamma_p; \bar{\sigma})$: Résistance du squelette granulaire / Angle de dilatance
 $C(\gamma_p)$: Résistance de la « colle » / Cohésion

Réflexion sur une modélisation non-linéaire d'un géomatériau cohérent

$$\tau = \sigma_n \tan(\phi_{cr} + \psi(\gamma_p; \bar{\sigma})) + c(\gamma_p)$$

1. Lorsque la résistance maximale en compression est atteinte
Rupture « fragile » de la colle sous de petites déformations

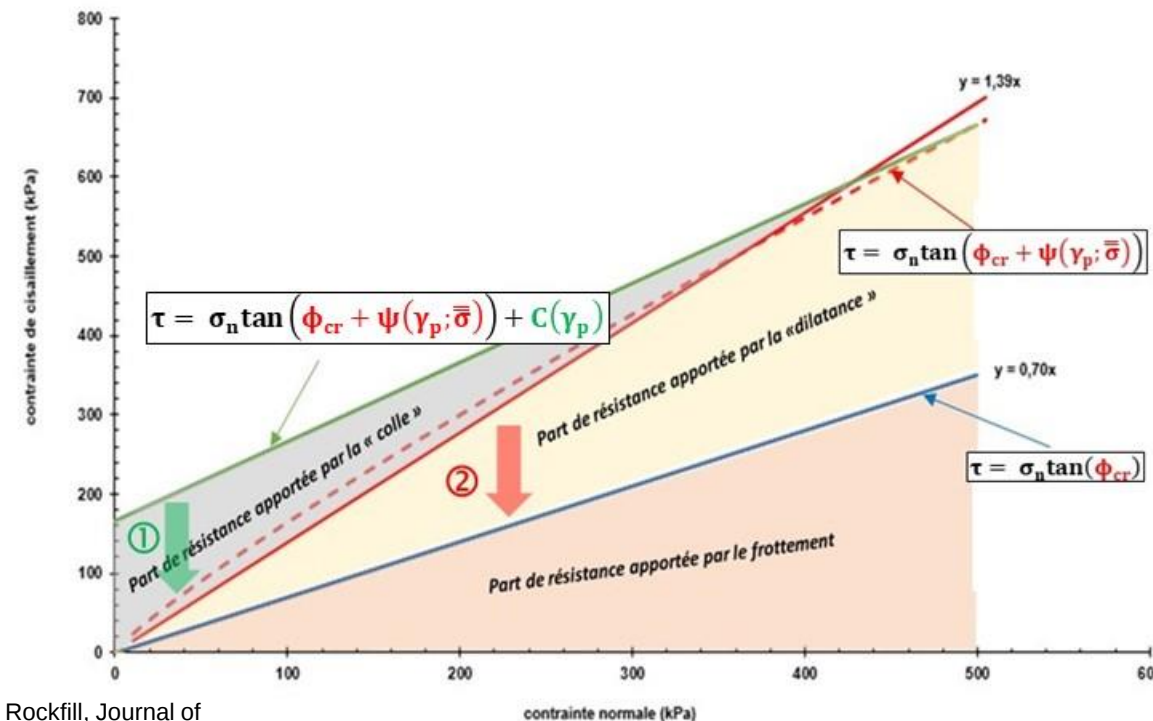
La résistance en cisaillement est alors gérée par le frottement et l'imbrication entre grains

$$\tau = \sigma_n \tan(\phi_{cr} + \psi(\gamma_p; \bar{\sigma}))$$

2. Evolution vers un état critique généralisé ou localisé

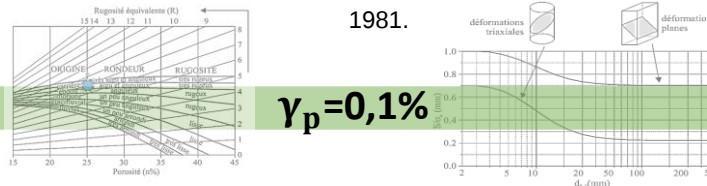
La résistance en cisaillement est alors gérée par le frottement

$$\tau = \sigma_n \tan(\phi_{cr})$$



N. Barton et al [1981] - Shear Strength of Rockfill, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 107, n°GT7, Juillet

1981.



$\gamma_p=0\%$

$$\tau = \sigma_n \tan(35^\circ + 10^\circ) + 165 \text{ (kPa)}$$

$\gamma_p=0,1\%$

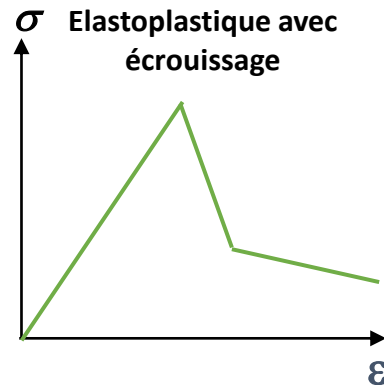
$$\tau = \sigma_n \tan(35^\circ + 19^\circ)$$

$\gamma_p=5\%$

$$\tau = \sigma_n \tan(35)$$

Modèle de calcul, hypothèses et interprétation

	Modélisation élastique	Modélisation élastoplastique sans écrouissage	Modélisation élastoplastique avec écrouissage
Masse volumique	2300 kg/m³		
Paramètres d'élasticité			
Module d'Elasticité E	10 GPa		
Coefficient de Poisson ν	0,20		
Paramètres du critère de résistance maximale			
Angle de frottement au pic de résistance		45°	35°
Angle de dilatance au pic de résistance		0°	10°
Cohésion au pic de résistance		165 kPa	165 kPa
Résistance en traction au pic de résistance		0 kPa	0 kPa
Paramètres dans le domaine post-pic de résistance			
Etat « fissuré »			
Angle de frottement - Etat « fissuré » : $\gamma_p = 0.1\%$			35°
Angle de dilatance - Etat « fissuré » : $\gamma_p = 0.1\%$			19°
Cohésion - Etat « fissuré » : $\gamma_p = 0.1\%$			0 kPa
Résistance en traction - Etat « fissuré » : $\gamma_p = 0.1\%$			0 kPa
Etat « résiduel »			
Angle de frottement - Etat « résiduel » : $\gamma_p = 5\%$			35°
Angle de dilatance - Etat « résiduel » : $\gamma_p = 5\%$			0°
Cohésion - Etat « résiduel » : $\gamma_p = 5\%$			0 kPa
Résistance en traction - Etat « résiduel » : $\gamma_o = 5\%$			0 kPa

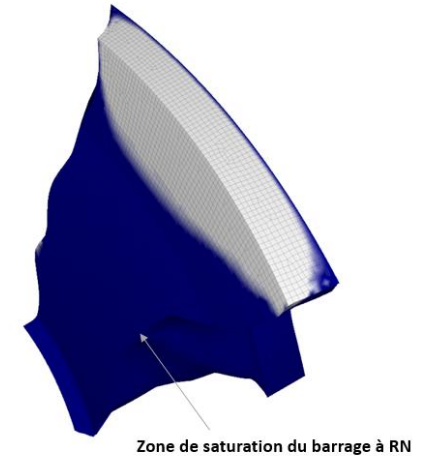


Situations de chargement:

- Construction
- Situation normale RN
- Situation de crue exceptionnelle
- Situation extrême sismique

Piézométrie:

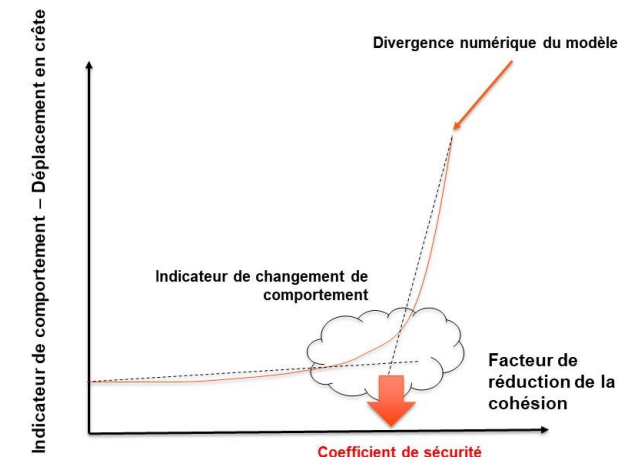
- Sous-pressions à l'interface barrage/fondation
- Piézométrie dans le corps du barrage



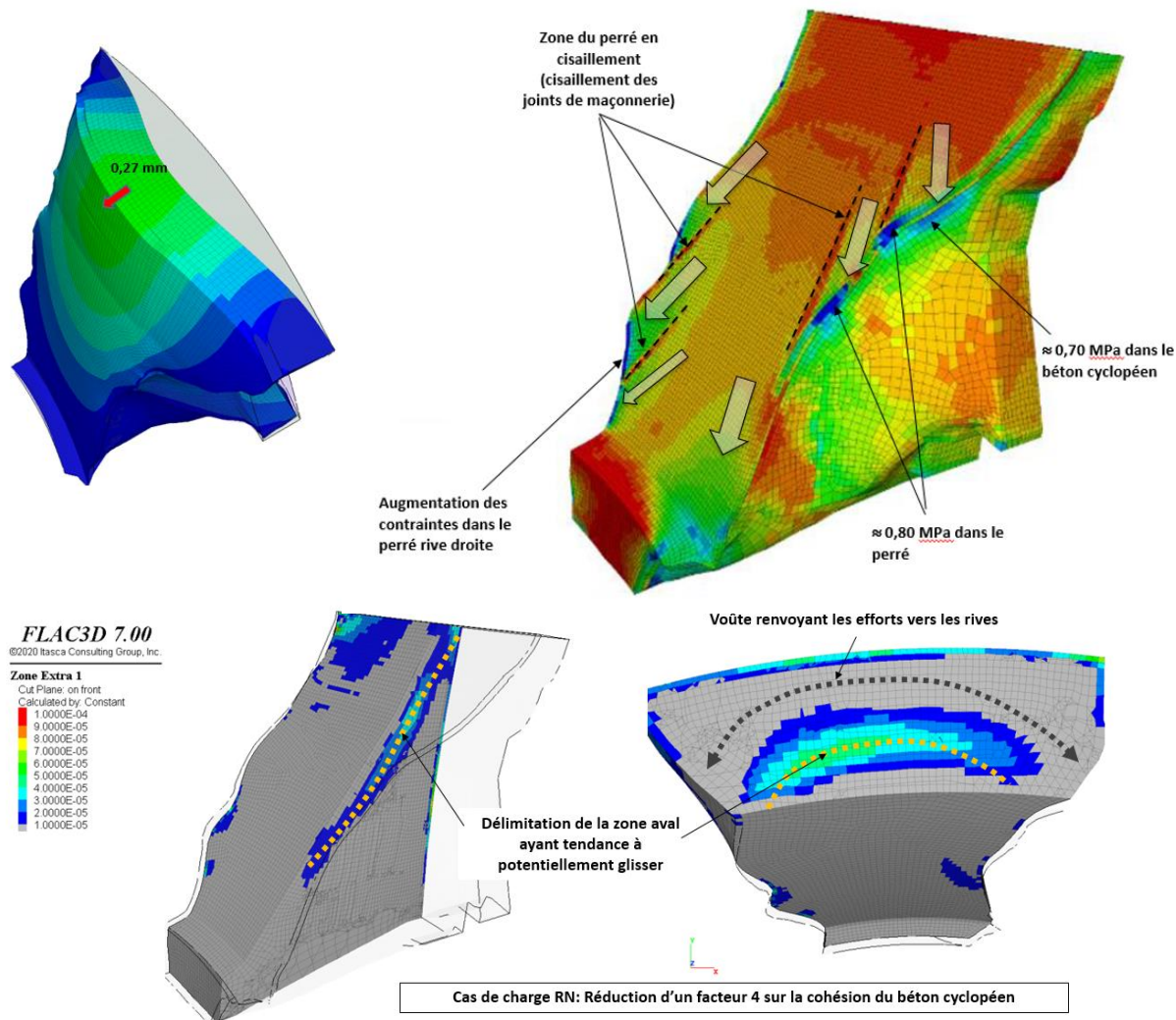
Interprétation des calculs:

- Analyse du champ des contraintes & déformations irréversibles
- Analyse des déplacements
- Identification du comportement et de la marge de sécurité par une approche:

$C_{réduction}$ & $\psi_{réduction}$

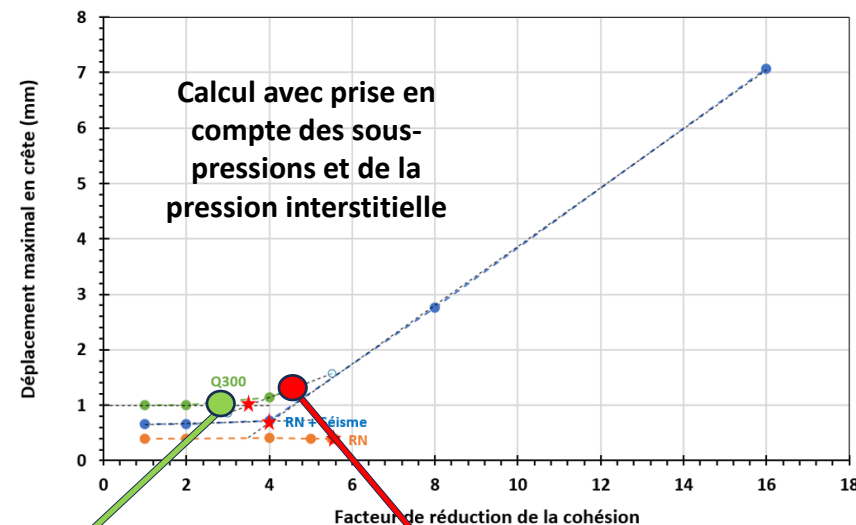
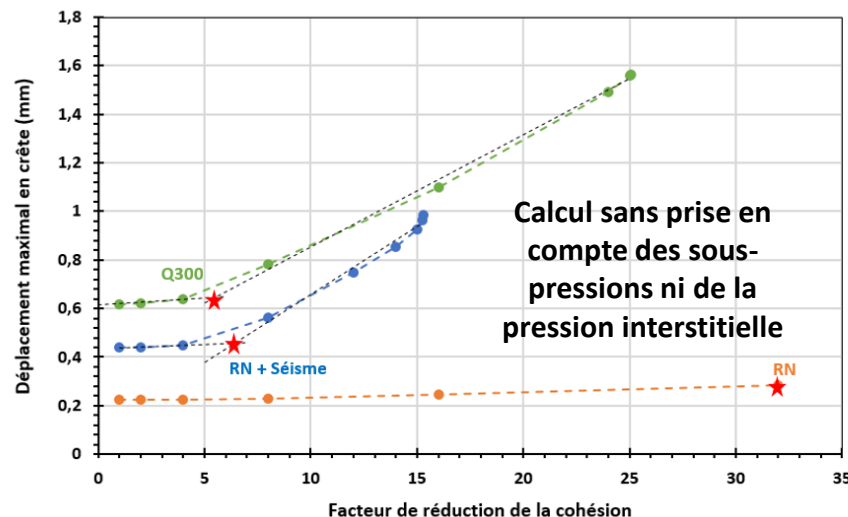


Analyse et compréhension du comportement

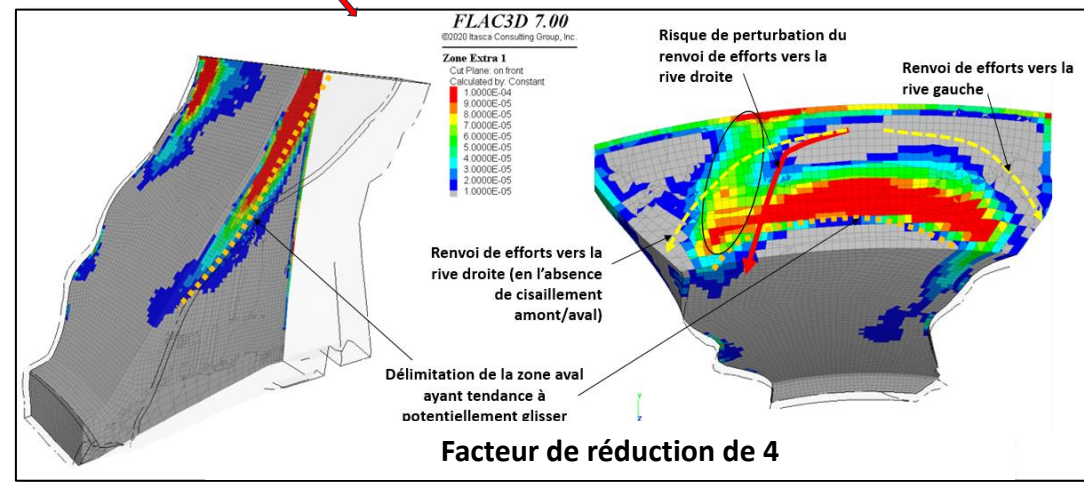
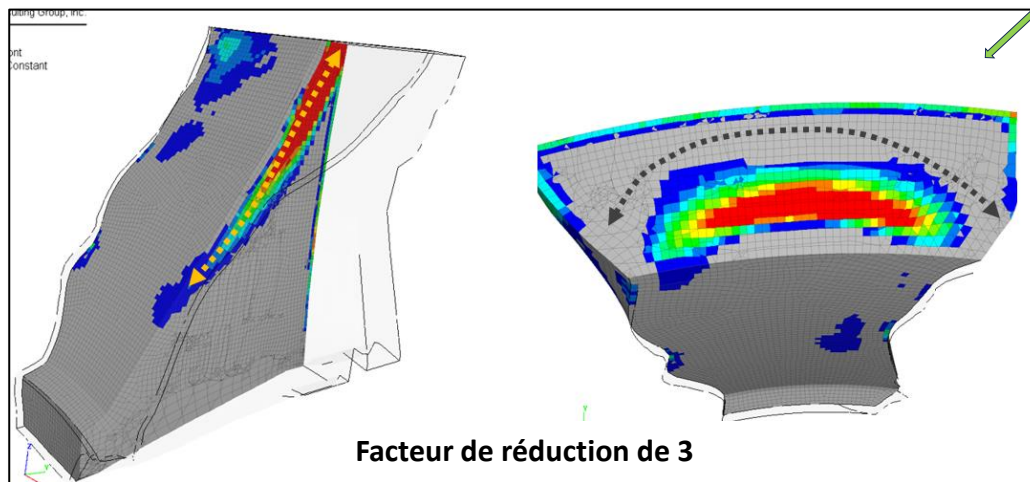


1. Report des contraintes vers les rives
2. Concentration des efforts de compression dans le perré aval
3. Le comportement du barrage est régi par 2 mécanismes :
 - **Un mécanisme représentatif de la stabilité générale** de l'ouvrage, correspondant à un "effet voûte" et renvoi des efforts très rapidement sur l'amont, vers la foundation en rives
 - **Un mécanisme représentatif d'un risque d'instabilité "interne"**, ne mobilisant que la partie aval de l'ouvrage, sur une faible profondeur, et qui correspondrait à une tendance au "glissement" du béton cyclopéen (avec dégradation éventuelle préalable du perré).
4. Une dégradation du perré peut ici être considérée comme un indicateur d'une éventuelle évolution du comportement de l'ouvrage.

Estimation de la marge de sécurité et identification du mécanisme de ruine

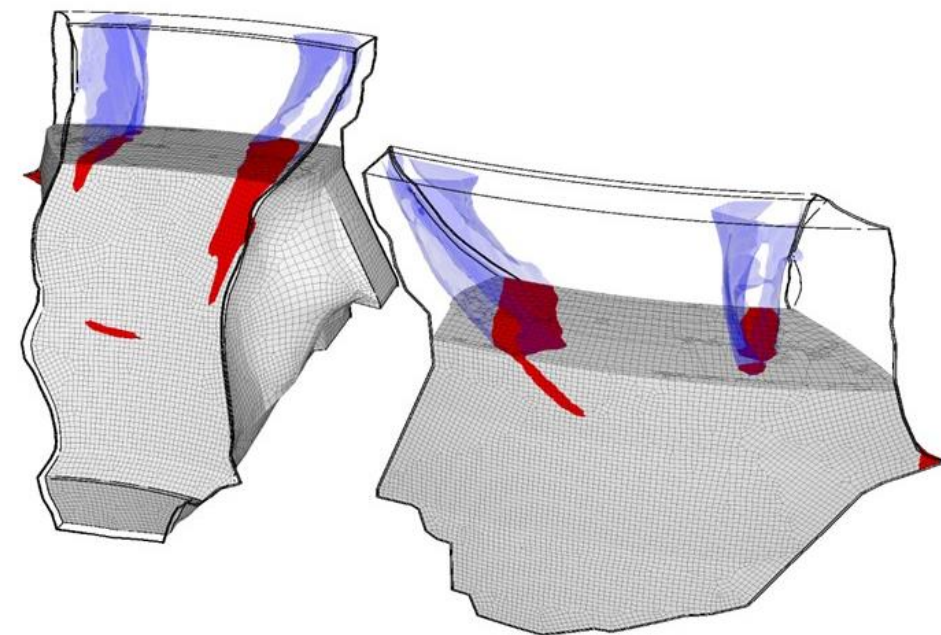


Isovaleurs des déformations de cisaillement irréversible < 0,01%



Comportement et justification de la stabilité de l'ouvrage

- Les coefficients de sécurité sous différentes situations sont acceptables et très élevés en situation normal.
- Si le perré ne contribue pas significativement à la stabilité de l'ouvrage, il est un indicateur pertinent d'une potentielle évolution du comportement du barrage.
- Le comportement est régi par 2 mécanismes :
 - **Un mécanisme «interne»** de glissement d'une partie de la masse de béton cyclopéen qui ne contribue pas à la stabilité générale du corps du barrage
 - **Un mécanisme qui pilote la stabilité générale du barrage**, qui correspond à un transfert des efforts vers les rives par effet de voûte.
- La ruine de l'ouvrage correspondrait à un cisaillement du béton cyclopéen vers la rive droite, empêchant l'effet « voûte » de se maintenir par suite d'une baisse de résistance du béton « dégradé ».



Approche de calcul et interprétation

- Nécessité de s'interroger sur les mécanismes régissant le comportement au-delà du maximum de résistance, pour un matériau cohérent.
- Approche type « géomatériaux » appliquée à un béton cyclopéen (*grains+colle*)
- Identification du mode de ruine et de la marge de sécurité en cohérence avec la rhéologie du matériau

