



Club CAST3M, 29/11/2024



جامعة بجاية  
Tasdawit n Bgayet  
Université de Béjaïa



# Investigations numériques de l'impact des conditions de contact sur l'endommagement et le comportement sismique des barrage-poids. Étude de cas du barrage de Beni-Haroun

*Présenté Par : Abdelhamid BECHEUR  
Enseignant chercheur  
Université A. Mira Bejaia Algérie*

**Auteurs :**

**Abdelhamid BECHEUR (a), Zahia Abdelli (b)**

(a) Laboratoire de Recherche en Hydraulique Appliquée et Environnement LRHAE. Université de Bejaia. Thargua-ouzemour Bejaia 06000 Algerie .  
email : abdelhamid.becheur@univ-bejaia.dz

(b) Laboratoire de Recherche en Hydraulique Appliquée et Environnement LRHAE. Université de Bejaia. Thargua-ouzemour Bejaia 06000 Algerie.  
email : zahia.abdelli@univ-bejaia.dz

- **Objectif :**

- Étudier l'influence des conditions de contact et des culées en gradins sur l'endommagement sismique des barrage-poids. Étude de cas : Le barrage-poids de Beni-Haroun

- **Technique d'analyse** : Analyse push over basée sur la mécanique de l'endommagement continu.

- **Modèles utilisés** :

1. Modèle 1 : Maillage continu entre le barrage et le sol (sans interfaces).

2. Modèle 2 : Maillages séparés pour le barrage et le sol, avec relations de contact avec frottements.

- **Modèles d'endommagement en approche non locale** :

Trois modèles différents d'endommagement pour chaque cas :

- Modified Von Mises Model (MVM),
- Mazars
- Richard et Ragueneau (Ricrag 2010).

- **Contexte :**
- Les conditions de contact entre un barrage-poids en béton et sa fondation sont essentielles pour garantir son intégrité structurelle et sa stabilité.
- Les interfaces jouent un rôle crucial dans l'équilibre et la transmission des charges et des contraintes.
- **Challenge :**
- Prédire les zones endommagées et les zones de contact ainsi que leur évolution sous excitation sismique est une tâche complexe.
- **Approches courantes :**
  - **Études simplifiées** (souvent utilisées par certains bureaux d'études): Utilisation de maillages continus sans considérer les relations de contact.
  - **Études avancées** : Intégration des conditions de contact et des phénomènes de frottements dans les calculs.

# Le barrage-poids de Beni-Haroun

- Situé dans une zone sismique au nord de l'Algérie, le barrage de Beni-Haroun est l'une des constructions hydrauliques les plus importantes d'Afrique.
- **Caractéristique principale :**
  - Présence d'une culée en gradins dans la fondation, agissant comme un obstacle partiel au glissement.
- **Approches méthodologiques :**
  - **Frottements :**
    - Intégration de la loi de Coulomb pour modéliser les phénomènes de frottements, essentiels pour la stabilité du barrage poids.
  - **Pressions et effets hydrodynamiques :**
    - Utilisation de la méthode des masses ajoutées de Westergaard (1933) pour tenir compte des pressions hydrodynamiques
    - Prise en compte des pressions de soulèvement exercées en sous face.



## Description de la structure étudiée et modèle adopté

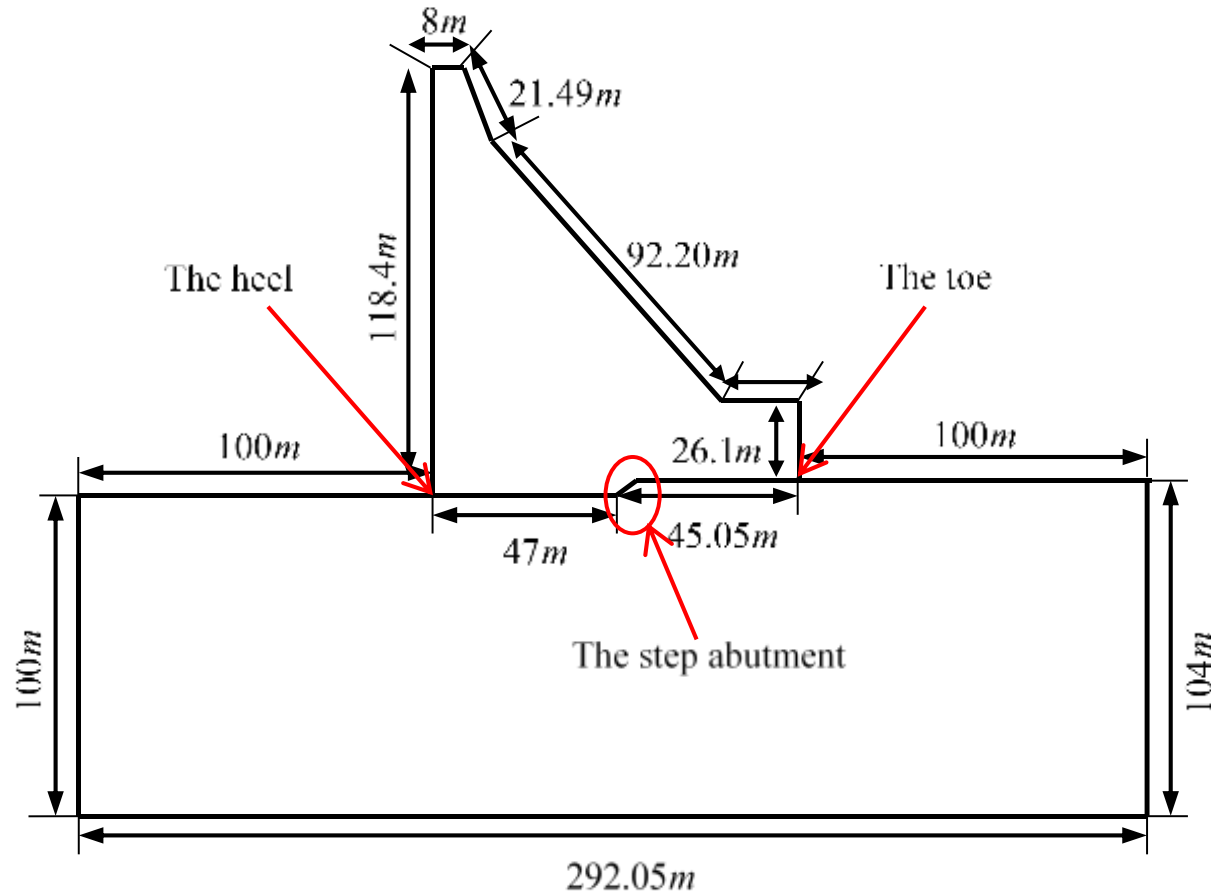


Figure 2. Dimensions of Beni-Haroun concrete gravity dam.

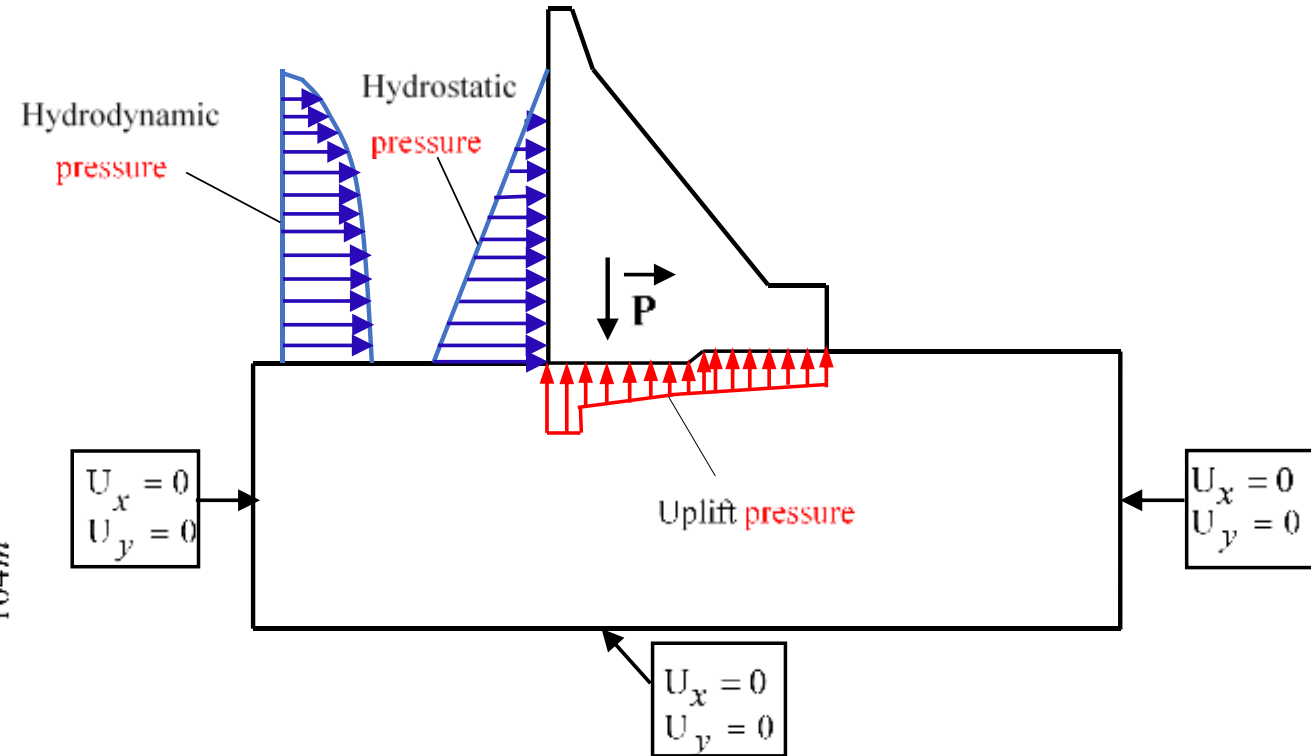


Figure 4. Pressure loads and boundary conditions

## Modèle éléments finis

### •Modèle utilisé :

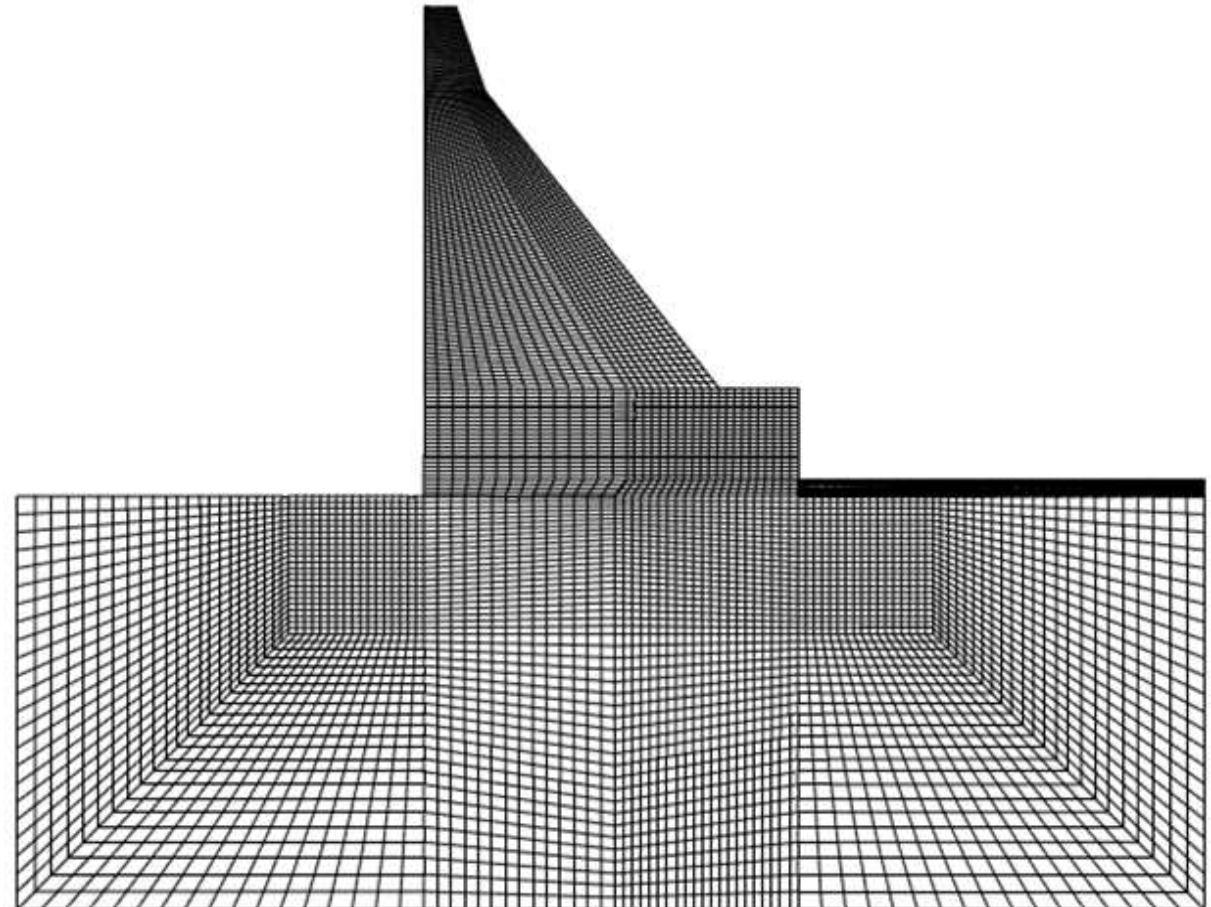
- Modèle 2D en déformation plane avec 9239 éléments QUA4.
- Calculs réalisés à l'aide du code CAST3M, développé par le CEA en France (CAST3M, 2023).

### •Critères pour les calculs non locaux :

- Les Tailles des éléments de maillage du barrage doivent être inférieures à la longueur caractéristique du béton  $l_c$ .
- $l_c$  défini selon Bažant & Pijaudier-Cabot (1989) comme comprise entre  $3d_a$  et  $5d_a$ , où  $d_a$  est la taille maximale des granulats du béton.

### •Application pratique :

- Taille maximale des granulats :  $d_a = 150$  .
- Longueur caractéristique  $l_c$  choisie = 600 mm.
- Le maillage doit garantir que  $l_c$  dépasse la taille des éléments dans les zones sujettes aux dommages et à leur propagation.



## Les Modèles endommagement utilisés (Brève présentation)

### **Bref rappel du modèle utilisé de Richard et al (2010) (RIC-RAG) et de la méthode de régularisation en approche non locale :**

$$d = 1 - \frac{1}{1 + \left( A_{Dir} H(\langle \varepsilon_{ij} \rangle_+ \langle \sigma_{ij} \rangle_+) + A_{Ind} \left( 1 - H(\langle \varepsilon_{ij} \rangle_+ \langle \sigma_{ij} \rangle_+) \right) \right) (\bar{Y}^{nl} - Y_0)}$$

$A_{Dir}$  et  $A_{Ind}$  sont des paramètres matériaux décrivant la fragilité du béton respectivement en traction et en compression,  $H$  est la fonction d'Heaviside.

#### Modified Von Mises model (MVM)

By introducing a state variable  $Y$ , as represented in expression (06), De Vree, Brekelmans, and van Gils in 1995 developed a damage evolution law by employing the exponential expression (07), as follows:

$$Y = \frac{k-1}{2k(1-2\nu)} I_1 + \frac{1}{2k} \sqrt{\left( \frac{k-1}{1-2\nu} I_1 \right)^2 + \frac{12k}{(1+2\nu)^2} J_2} \quad (06)$$

$$d = 1 - \frac{Y_0(1-B_2)}{Y^{nl}} - B_2 \exp[-B_1(Y^{nl} - Y_0)] \quad (07)$$

#### Mazars damage model

In this model (Mazars 1986)  $Y$  is defined as a function of the principal strains **so that it is** more sensitive to positive strains than to negative strains, **as shown in (08)**:

$$Y = \sqrt{\sum_i [\max(0, \varepsilon_i)]^2} \quad (08)$$

This expression (08) shows that **only positive principal strains are considered in the definition of  $Y$** . In addition, and in order to represent the **asymmetric fracture** behaviour of concrete, Mazars (1986) proposes two damage variables:  $D_t$  in tension and  $D_c$  in compression. The linear combination of these two damage modes gives a global isotropic damage variable  $d$  such as :

$$d = \alpha_t d_t + \alpha_c d_c \quad (09)$$

With an exponential expression for the evolution of damage,

$$d_t = 1 - \frac{Y_0(1-A_t)}{Y^{nl}} - A_t \exp[-B_t(Y^{nl} - Y_0)] \quad (10)$$

$$d_c = 1 - \frac{Y_0(1-A_c)}{Y^{nl}} - A_c \exp[-B_c(Y^{nl} - Y_0)] \quad (11)$$

**Brève présentation de la méthode de régularisation en approche non locale :**

L'approche non locale utilisée est basée sur les contraintes développée par Giry et al. (2011). Elle consiste à faire la moyenne de la surface de seuil d'endommagement au voisinage du point de Gauss courant. A cet effet, le taux de restitution d'énergie d'endommagement local est remplacé par le taux non local  $\bar{Y}^{nl}$  tel que la surface de seuil d'endommagement devienne:

$$f_d^{nl} = \bar{Y}^{nl} - (Y_0 + Z) \text{ and } \dot{d} = \lambda_d \cdot \frac{\partial f_d}{\partial \bar{Y}^{nl}} \quad \bar{Y}^{nl}(\mathbf{x}) = \frac{\int_{\Omega(\mathbf{x})} W(\mathbf{x} - \mathbf{s}) \bar{Y}(\mathbf{s}) ds}{\int_{\Omega(\mathbf{x})} W(\mathbf{x} - \mathbf{s}) ds}$$

$$W(\mathbf{x} - \mathbf{s}) = \exp \left[ - \left( \frac{2\|\mathbf{x} - \mathbf{s}\|}{l_c \cdot \rho(\mathbf{x}, \sigma_{prin}(\mathbf{s}))} \right)^2 \right]$$

$W(\mathbf{x}-\mathbf{s})$  est la fonction poids appelée aussi fonction de distribution de Gauss définissant l'interaction entre le point considéré situé en  $\mathbf{x}$  et les points voisins situés en  $\mathbf{s}$  et  $l_c$  la longueur caractéristique délimitant le voisinage à moyenner autour du point de Gauss considéré.



## **•Résultats et Discussion :**

**•Analyse des dommages :** Étude de l'impact des conditions de contact entre le barrage et la fondation l'endommagement du barrage.

**•Simulation utilisée :** Analyse pushover avec le modèle d'endommagement de RICRAG.

**•Justification du Choix du modèle de RICRAG :**

- Prend en compte plusieurs phénomènes : élasticité, écrouissage plastique, endommagement et glissement entre surfaces fissurées.
- Fiabilité et robustesse confirmées par des expériences numériques

**•Modèles étudiés :**

**1.Premier modèle :**

- Maillage continu pour le système barrage-fondation.
- Interfaces non prises en compte.

**2.Deuxième modèle :**

- Prise en compte des conditions de contact et des frottements.

## •Résultats et Discussion :

### Impact de l'accélération sur la distribution des dommages

- Accélérations analysées : 0.3g, 0.5g, et 0.7g (g étant l'accélération due à la gravité).

### •Résultats par modèle :

#### 1.Modèle sans contact :

- Début des dommages : Talon du barrage (base amont).
- Propagation : Horizontale à mesure que l'accélération augmente.
- Dommages initiaux apparaissent plus précocement.

#### 2.Modèle avec contact (interface) :

- Début des dommages : Culée du barrage.
- Propagation : Verticale avec l'augmentation de l'accélération.
- Début des dommages retardé par rapport au modèle sans joint.

### •Conclusion partielle :

- L'inclusion des interfaces modifie non seulement l'initiation des dommages, mais également leur mode de propagation sous l'effet des charges sismiques croissantes.

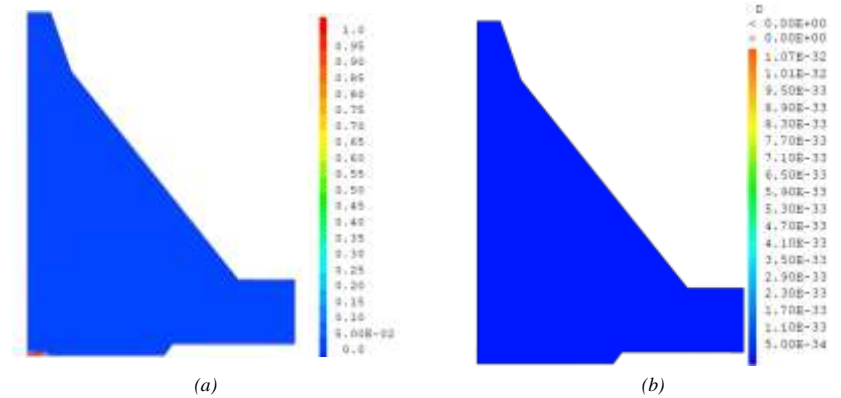


Figure 6. Damage distributions with the RICRAG damage model for 0.3g: (a) without interface, (b) with joint

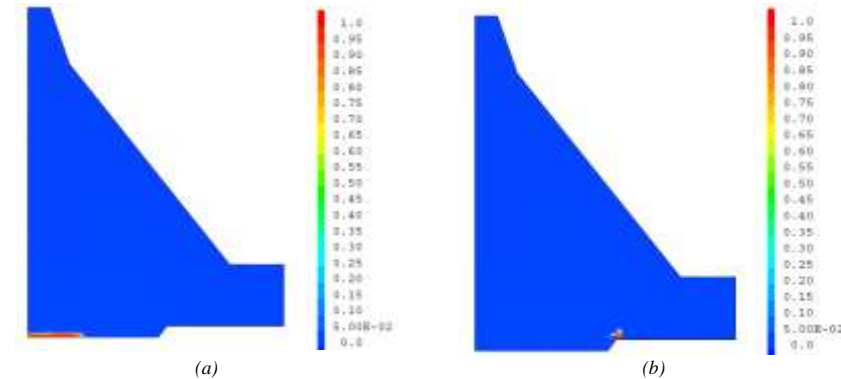


Figure 7. Damage distributions with the RICRAG damage model for 0.5g: (a) without interface, (b) with joint

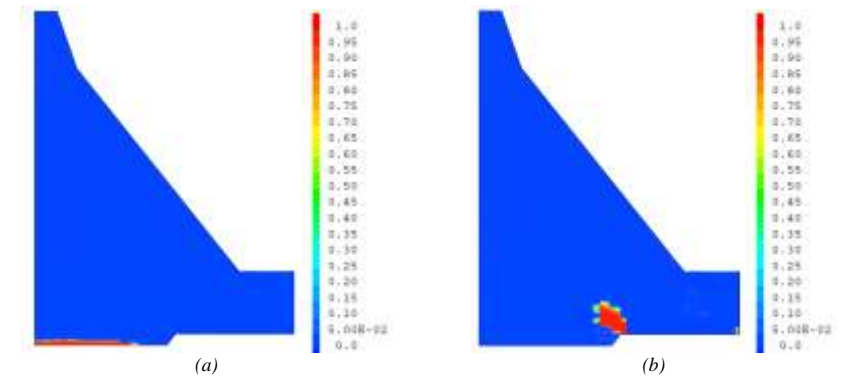


Figure 8. Damage distributions with the RICRAG damage model for 0.7g: (a) without interface, (b) with joint

## Validation des résultats : Analyse comparative des modèles de dommages

- Comparer les distributions de dommages obtenues avec le modèle RICRAG à deux autres modèles : MVM et Mazars.
  - Analyse réalisée uniquement avec le modèle de contact.
  - Effets évalués pour deux accélérations : 0.5g et 0.7g.
  - Résultats illustrés dans les figures 9, 10 et 11.
- **Résultats clés :**
- Dommages initiaux : Proches de la culée du barrage.
  - Propagation : S'intensifie avec l'augmentation de l'accélération.
  - Différence entre modèles :
    - **Mazars** : Dommages plus étendus pour une même magnitude par rapport aux modèles de RICRAG et MVM.
- **Conclusion partielle :**
- Les modèles de dommages influencent la quantification et la localisation des dommages sous sollicitations sismiques.

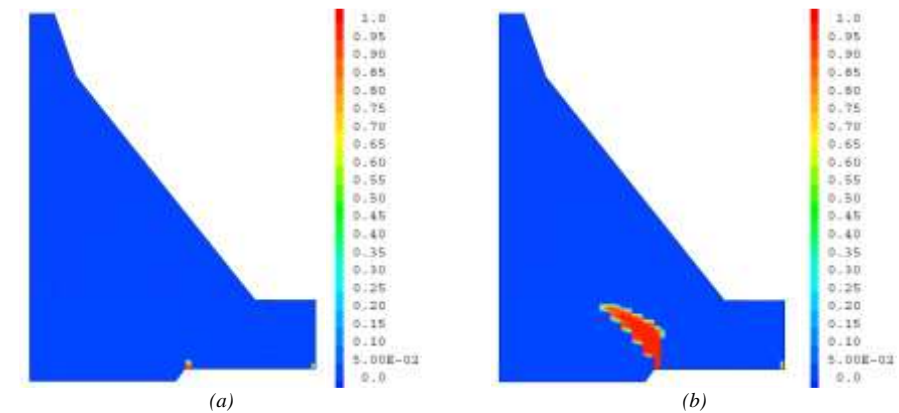


Figure 9. Damage distributions with the MVM damage model: (a) for 0.5g, (b) for 0.7g

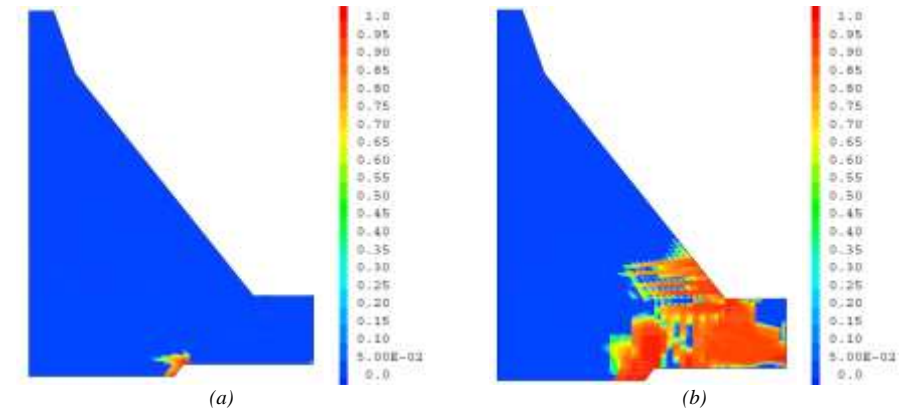


Figure 10. Damage distributions with the MAZARS damage model: (a) for 0.5g, (b) for 0.7g

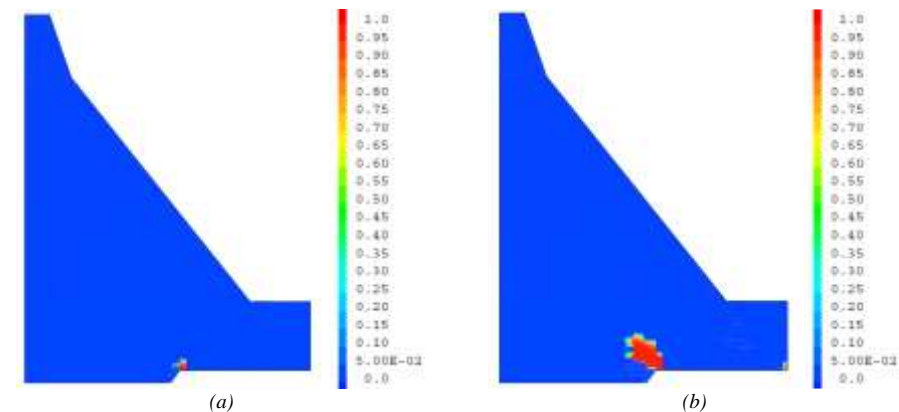


Figure 11. Damage distributions with the RICRAG damage model: (a) for 0.5g, (b) for 0.7g

# Analyse des contraintes : Distribution et évolution des champs de contraintes

- Étude des contraintes principales obtenues avec le modèle RICRAG.
- Analyse réalisée pour les mêmes accélérations : 0.3g, 0.5g, et 0.7g.

## • Résultats clés :

### • Accélération de 0.3g :

- **Modèle avec interface (figure 12b) :** Contraintes de traction inférieures, atteignant environ 4 MPa et réparties le long de l'interface.
- **Modèle sans interface (figure 12a) :** Contraintes de traction concentrées près de la zone singulière au talon, atteignant rapidement un maximum de 6 MPa.

### • Accélération (0.5g et 0.7g) :

- Contraintes de traction significativement plus élevées dans le modèle avec interface (figures 13b et 14b) par rapport au modèle sans interface (figures 13a et 14a).

### • Conclusion partielle :

- À faible magnitude, le modèle avec interface réduit les contraintes de traction critiques.
- À forte magnitude, les contraintes augmentent davantage avec le modèle à joint, soulignant l'impact des conditions de contact sur le comportement structurel.

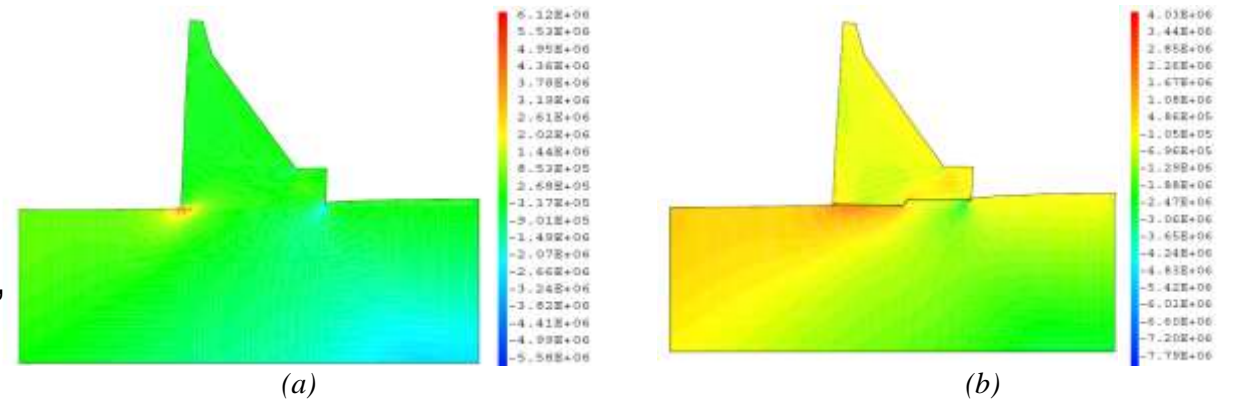


Figure 12. Principal stress isovalues with the RICRAG damage model for 0.3g: (a) without, (b) with *interface*

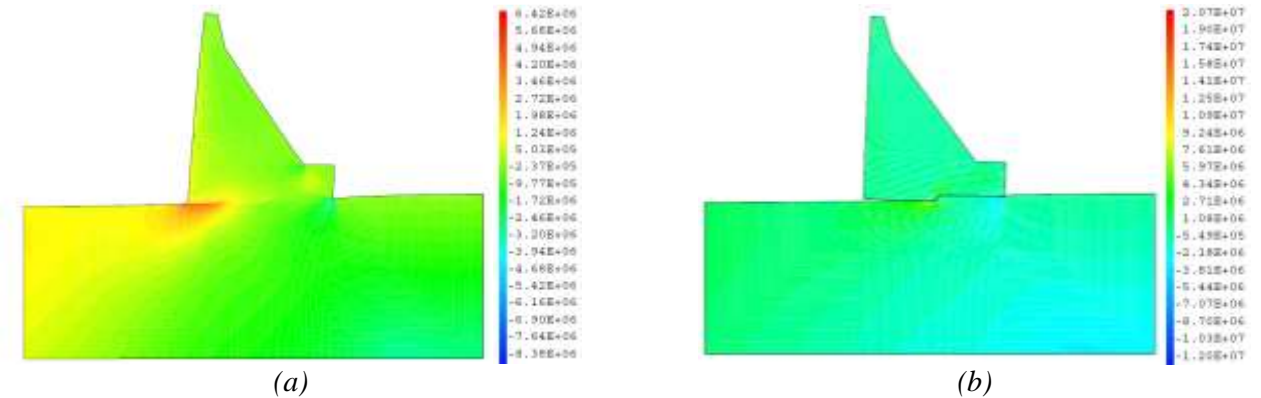


Figure 13. Principal stress isovalues with the RICRAG damage model for 0.5g: (a) without, (b) with *interface*

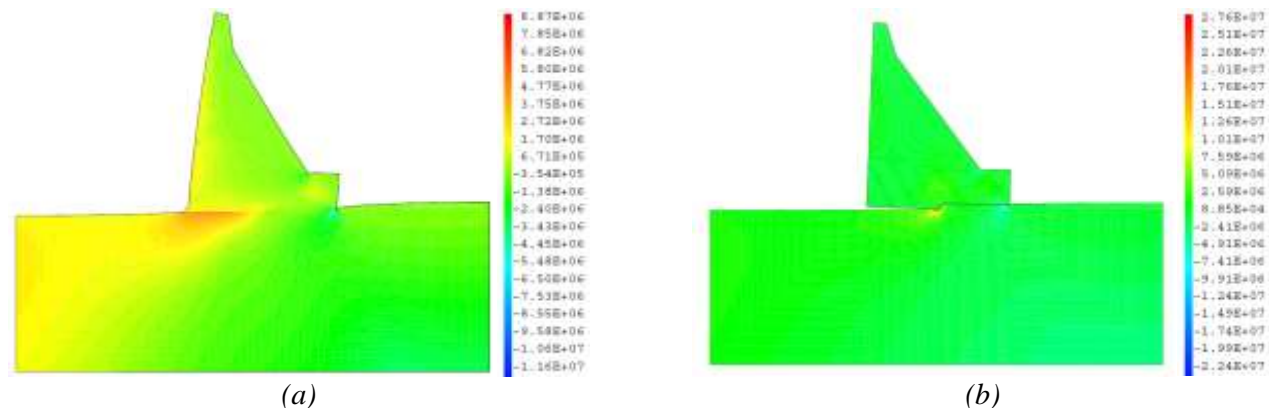


Figure 14. Principal stress isovalues with the RICRAG damage model for 0.7g: (a) without, (b) with *interface*

# Analyse des contraintes : Explications et solutions

- **Observation principale :**

- Augmentation des contraintes de traction dans le modèle avec joint pour 0.5g et 0.7g.

- **Explication :**

- **Phénomène observé :**

- Séparation partielle et glissement à l'interface.
- Redistribution des contraintes, concentrées dans la zone de fort gradient à la culée de la fondation.

- **Valeurs maximales des contraintes de traction :**

- Modèle avec joint : 20.7 MPa (0.5g) et 27.6 Mpa (0.7g).
- Modèle sans joint : 6.42 Mpa (0.5g) et 8.87 Mpa (0.7g).

- **Solutions pour réduire les contraintes :**

- **Optimisation géométrique :**

- Remplacer les angles vifs par des congés (selon les règles de bonne construction).

- **Modèle de comportement du sol :**

- Adopter un modèle élastoplastique pour le sol de fondation (Durieux & Van Rensburg, 2016) au lieu du modèle élastique utilisé ici.

- **Conclusion partielle :**

- Une meilleure conception géométrique et des modèles de comportement plus avancés peuvent réduire les contraintes critiques et améliorer la stabilité.

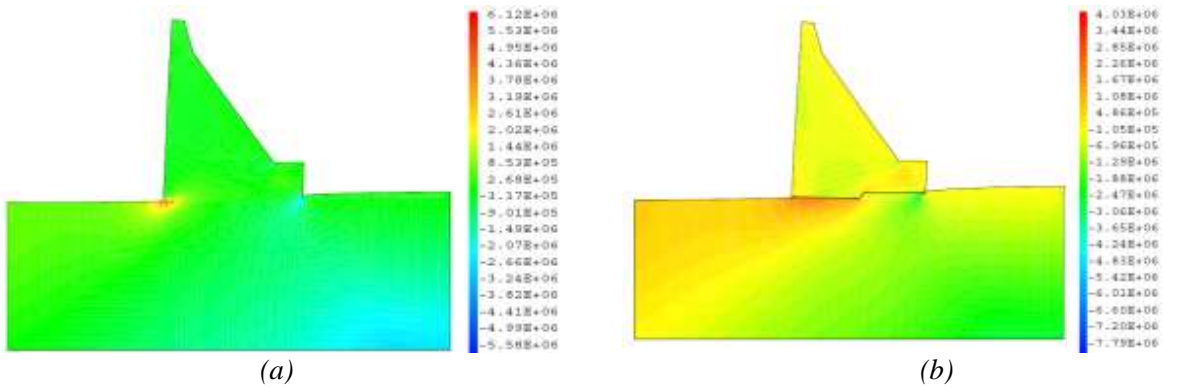


Figure 12. Principal stress isovalues with the RICRAG damage model for 0.3g: (a) without, (b) with interface

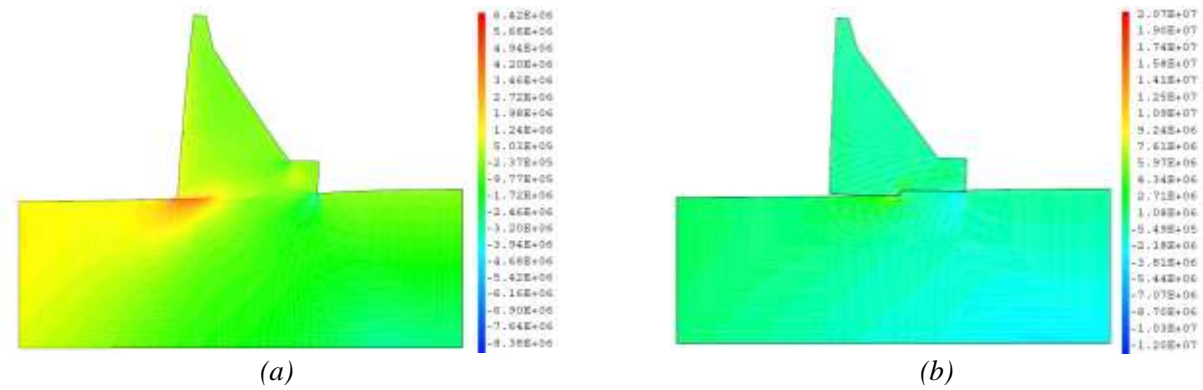


Figure 13. Principal stress isovalues with the RICRAG damage model for 0.5g(a) without, (b) with interface

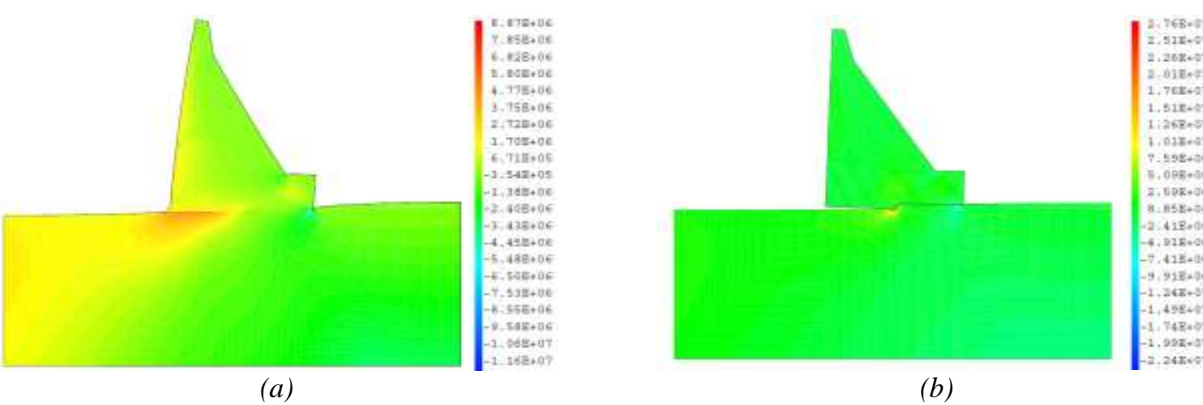


Figure 14. Principal stress isovalues with the RICRAG damage model for 0.7g: (a) without, (b) with interface

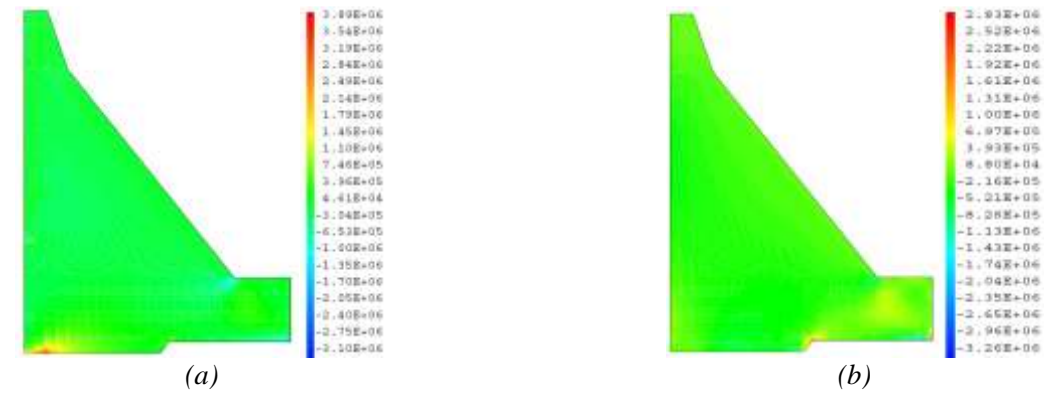


Figure 15. Principal stress isovalues with the RICRAG damage model for 0.3g: (a) without, (b) with *interface*

### Analyse des contraintes dans le barrage : Distribution et évolution

- Étudier les champs de contraintes principales dans le barrage séparément pour mieux comprendre leur distribution et leur évolution.
- **Résultats clés : Comparaison des modèles avec interface :**
- **Contraintes dans le barrage seul :**
  - Contraintes de traction maximales plus faibles : 2.83 MPa (0.3g), 5.73 MPa (0.5g), 5.49 MPa (0.7g).
  - Contrairement aux contraintes élevées dans la fondation : 20.7 MPa (0.5g), 27.6 Mpa (0.7g).
- **Conclusion : Le barrage subit moins de contraintes critiques que la fondation.**

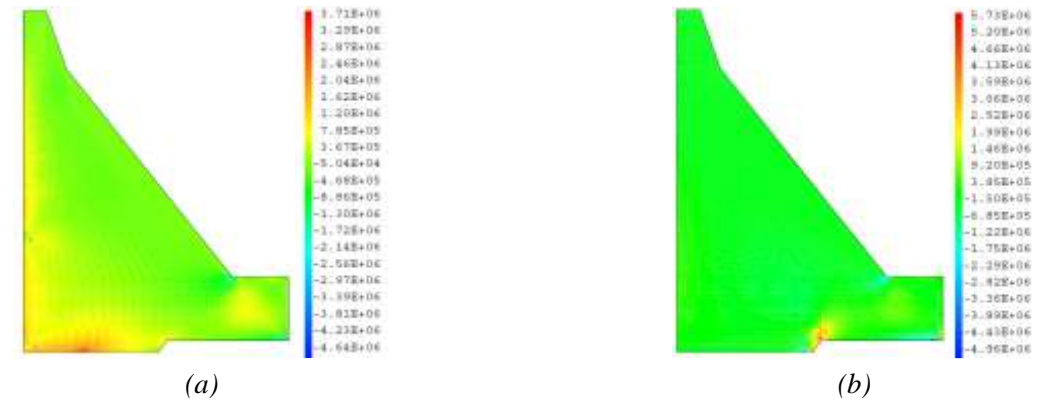


Figure 16. Principal stress isovalues with the RICRAG damage model for 0.5g: (a) without, (b) with *interface*

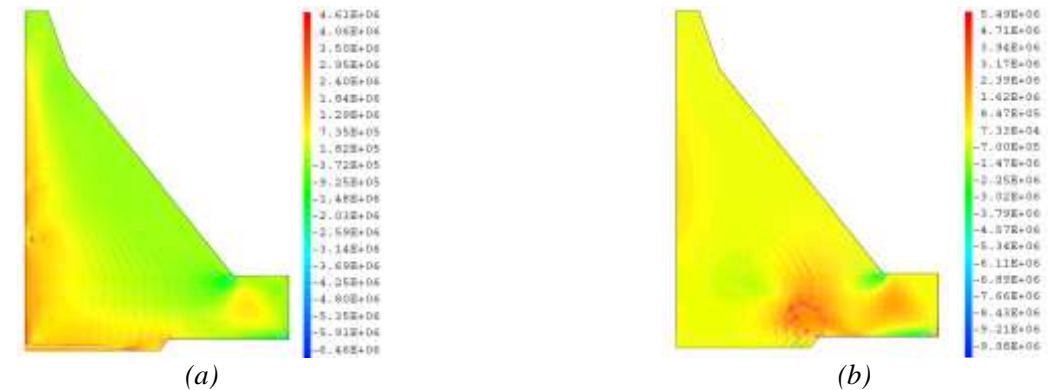
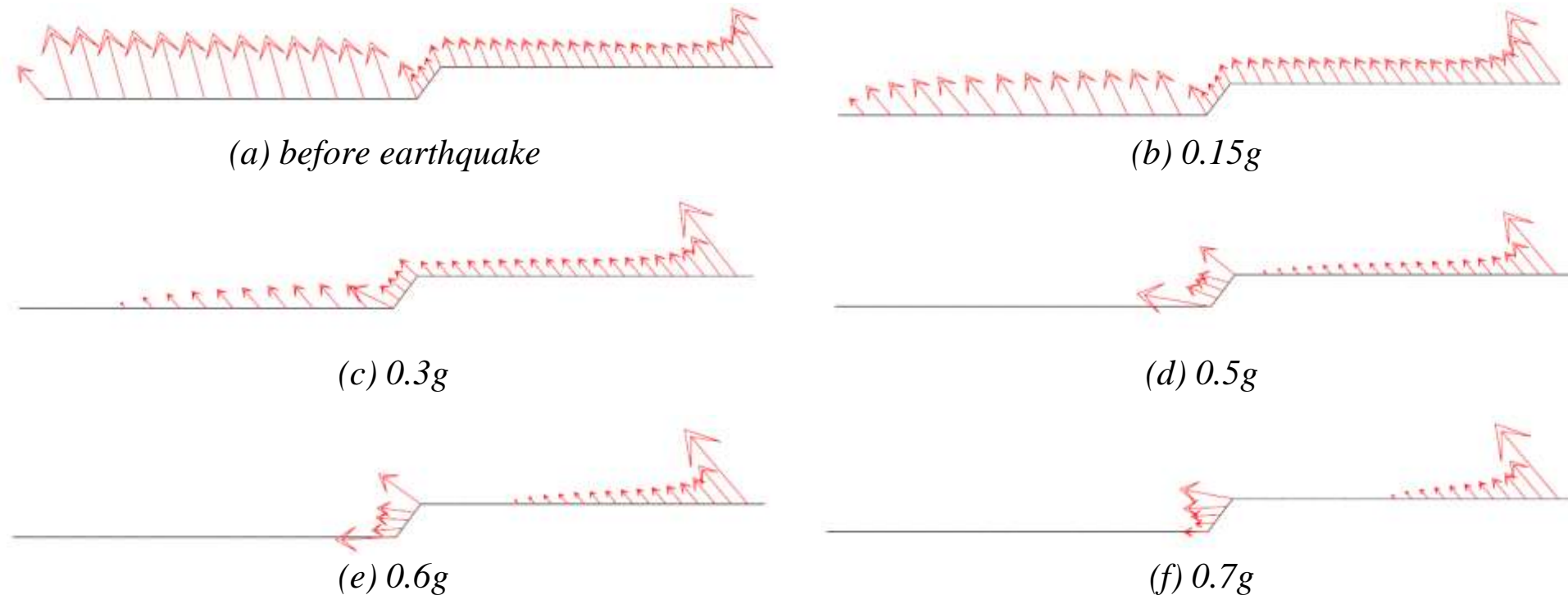


Figure 17. Principal stress isovalues with the RICRAG damage model for 0.7g: (a) without, (b) with *interface*

- **Confirmation par les réactions nodales (Figure 18) :**
  - Évolution des réactions de contact à la base du barrage pour différentes magnitudes (0.15g à 0.7g).
  - Redistribution des contraintes et phénomènes de décollement partiel et de glissement confirmés.
- **Conclusion générale :**
  - Le barrage est moins sollicité que la fondation, mais les phénomènes de contact influencent fortement les valeurs et la distribution des contraintes.



*Figure 18. Evolution of the computed nodal reactions of the lower contact surface under progressive Push-over actions*

# Analyse des déplacements horizontaux et verticaux en crete du barrage en fonction des magnitudes de l'action de pushover.

- Comparaison entre les deux modèles (avec et sans interface).
- **Déplacements horizontaux (Figure 19) :**
  - Jusqu'à 0.45g : Valeurs proches pour les deux modèles.
  - Au-delà de 0.45g : Écart croissant atteignant 11 cm :
    - Modèle sans interface : 9.19 cm.
    - Modèle avec joint : 19.9 cm.
- **Déplacements verticaux (Figure 20) :**
  - Jusqu'à 0.45g : Valeurs quasi-identiques.
  - Au-delà de 0.45g : Écart maximal de 5.74 cm :
    - Modèle sans interface : 1.14 cm.
    - Modèle avec joint : 6.78 cm.
- **Observation sur les valeurs négatives des déplacements verticaux :**
  - Explication :
    - Résultat de la déformation instantanée du sol rocheux de la fondation.
    - Compensation ultérieure par le mouvement de rotation du barrage.
- **Conclusion :**
  - Les modèles montrent une convergence jusqu'à une certaine magnitude (0.45g), mais les différences augmentent significativement à des intensités plus élevées, mettant en évidence l'impact des conditions de contact sur les déplacements du barrage.

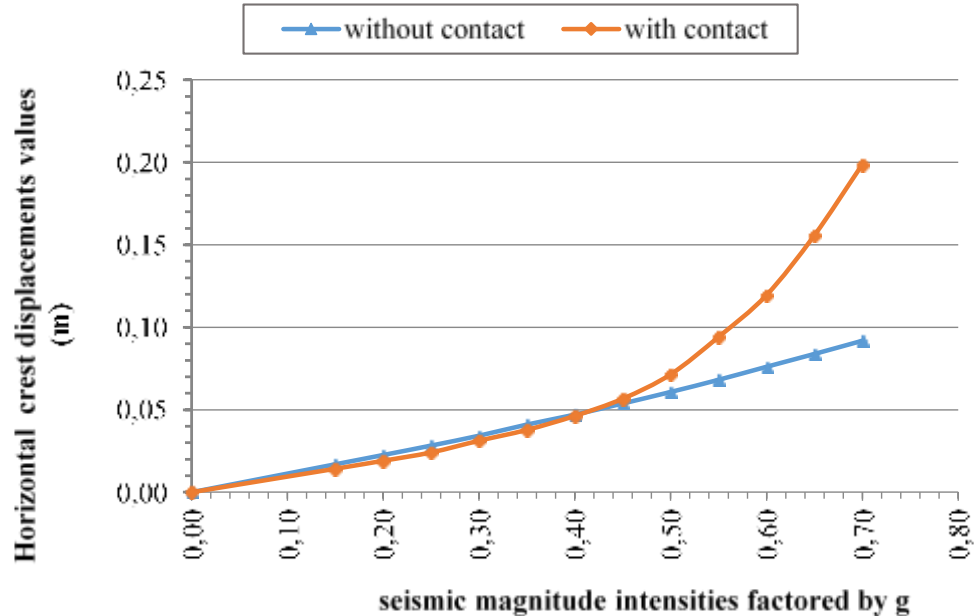


Figure 19. Horizontal crest displacement as a function of pushover action

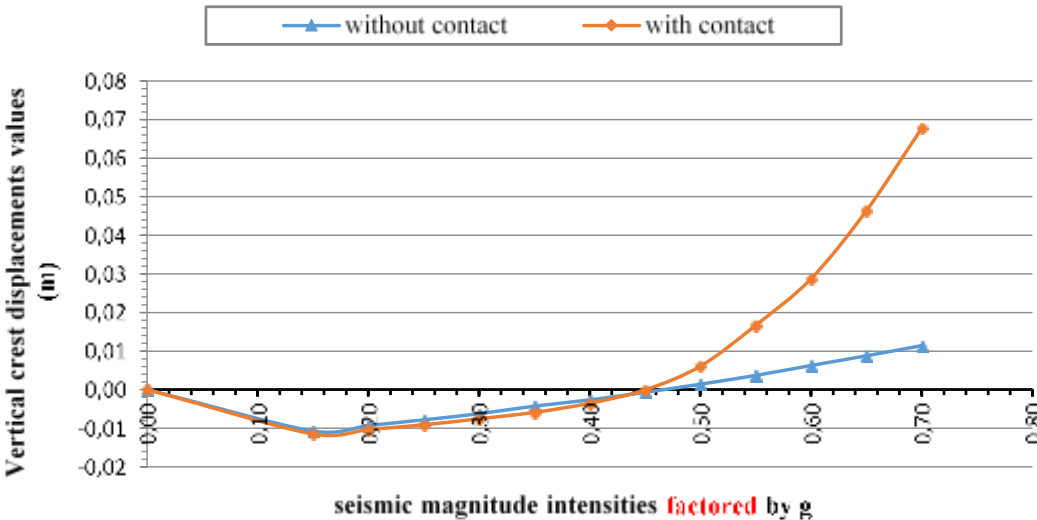


Figure 20. Vertical crest displacement as a function of pushover action



Comparaison des déplacements horizontaux en crete pour les trois modèles (RICRAG, Mazars, MVM).

•**Observation générale (Figure 21) :**

- Pour des accélérations faibles à modérées :
  - Les valeurs obtenues sont très proches pour les trois modèles.
- Pour des accélérations élevées ( $>0.5g$ ) :
  - Des écarts significatifs apparaissent entre les modèles.

•**Résultats clés pour 0.7g :**

•**Modèle Mazars :**

- Déplacement maximal 135 cm.
- Risque accru de défaillance du barrage.

•**Modèle MVM :**

- Déplacement modéré à 35.1 cm.

•**Modèle RICRAG :**

- Déplacement minimal à 20 cm.

•**Conclusion partielle :**

- Le modèle Mazars présente des résultats les plus critiques, suggérant un risque de rupture.
- Les modèles MVM et RICRAG montrent des performances nettement meilleures, avec une meilleure stabilité pour le RICRAG.
- Importance de choisir un modèle de dommage approprié pour une analyse réaliste et sécurisée

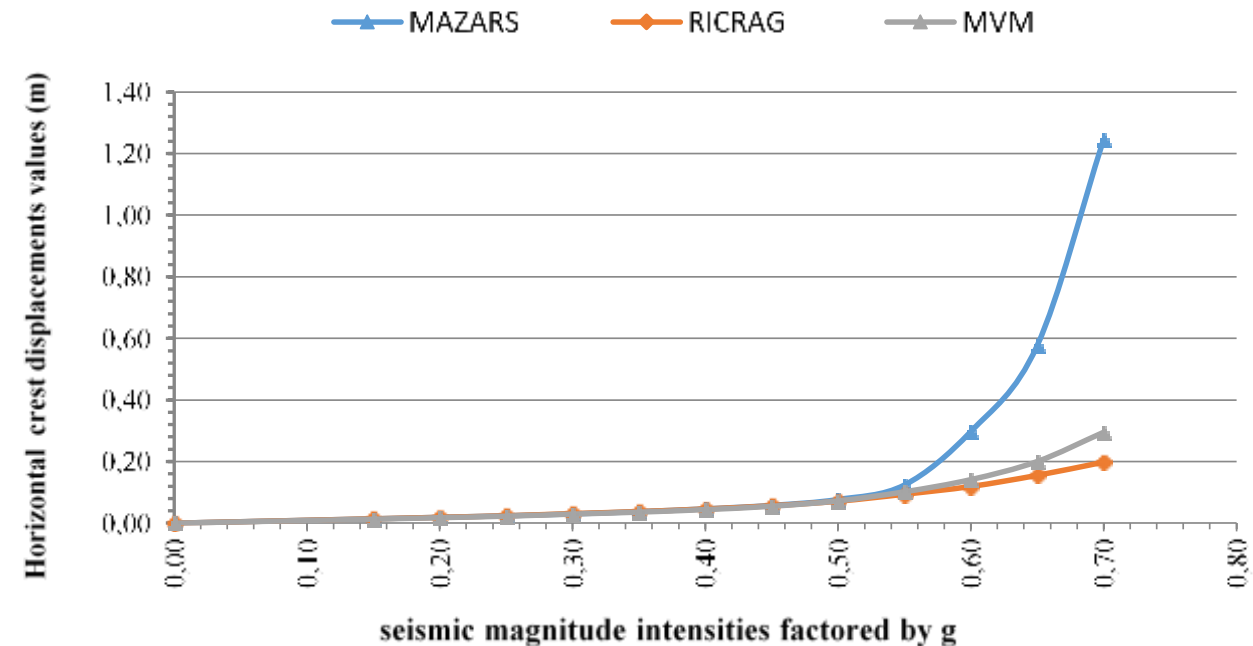


Figure 21. Horizontal crest displacement obtained by the three damage models

- **Analyse de la capacité sismique du barrage (courbes de capacités)**
- **Définition de la capacité sismique :**
  - Résistance intrinsèque de la structure face aux forces sismiques.
- **Indicateurs principaux :**
  - Résistance : Force de cisaillement totale à la base.
  - Réponse imposée : Déplacement au sommet du barrage (crête).
- **Observations des courbes de capacité (Figure 22) :**
  - **Pour des demandes faibles (déplacements  $\leq 3$  cm,  $\leq 0.3g$ ) :**
    - Capacités sismiques comparables pour tous les modèles.
  - **Pour des demandes élevées (déplacements  $> 3$  cm) :**
    - Les modèles avec maillage continu affichent une capacité accrue :
      - Modèle RICRAG : Supériorité de **62%** pour une demande en déplacements de 13 cm.
      - Modèle Mazars : Supériorité de **52%** pour une demande en déplacements de 10 cm.
      - Modèle MVM : Supériorité de **54.7%** pour une demande en déplacements de 14 cm.
- **Conclusion :** Les modèles à maillage continu pourraient surestimer la capacité pour des séismes modérés à forts.
- **Performance des modèles avec interface :**
  - Capacité de déplacement plus élevée.
  - Modèle Mazars : Plus grande déformation avant divergence des calculs, facilitant son utilisation en simulations numériques.
- **Conclusion partielle :**
  - Importance de considérer les hypothèses de fondation et les modèles de dommage pour une évaluation réaliste de la réponse sismique.
  - Les modèles avec interface offrent une meilleure prédiction des capacités de déplacement sous des séismes modérés et forts.

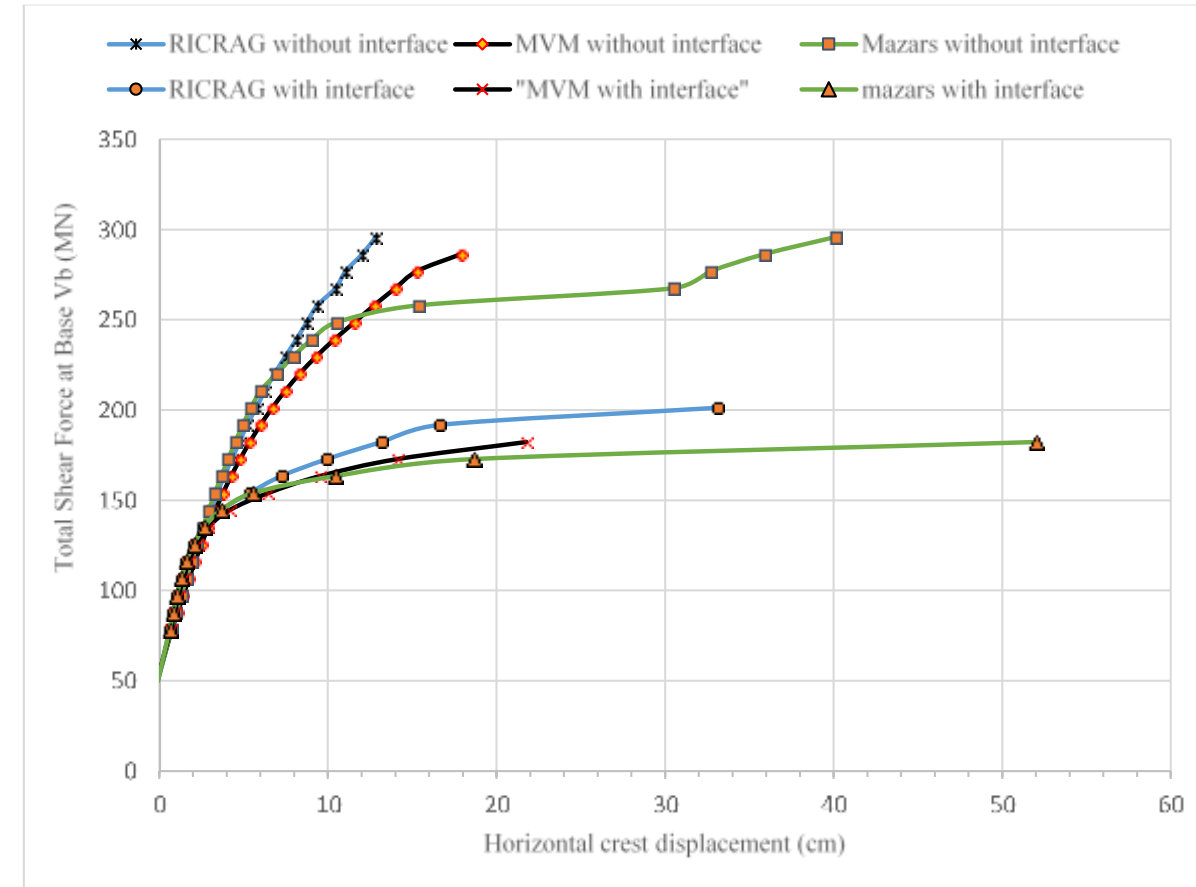


Figure 22. seismic capacity curves for continuous and discontinuous mesh damage models

## **Conclusion :**

### **•Meilleure Précision des modèles de calcul avec interface:**

- Meilleure représentation des interactions entre le barrage et la fondation grâce à l'intégration d'interfaces.
- Validation renforcée en utilisant des modèles de dommage et un gradin à l'interface.

### **•Pertinence de ces modèles :**

- Essentielle pour simuler des séismes de forte magnitude ( $>0.35g$ ).

### **•Problèmes identifiés :**

- Phénomènes de concentration des contraintes :
  - Localisés dans les zones avec des gradients de contraintes élevés.
  - Causés par des angles aigus et non arrondis dans la géométrie des gradins.

### **•Recommandations pour les travaux futurs :**

- Réaliser des investigations numériques supplémentaires :
  - Étudier les effets d'atténuation des concentrations de contraintes.
  - Optimiser les zones critiques au sein du barrage et du sol de fondation pour améliorer la conception et la construction.

### **•Conclusion générale :**

- La prise en compte des interfaces et de leurs particularités géométriques améliore significativement la précision des analyses sismiques.

*Pour plus de détails :*

<https://saice.org.za/wp-content/uploads/2022/11/SAICE-Journal-of-Civil-Engineering-Vol-66-No-4-AS-PUBLISHED-final-final-2024-12-10-Gaspar-corrected.pdf>

*Merci pour votre attention*