

# Réponse dynamique d'un pont en maçonnerie avec différents niveaux de modélisation

Chambreuil, C.<sup>1</sup>, El Masri, R.<sup>1</sup>, Giry, C.<sup>1,2</sup>, Lopez-Caballero, F.<sup>1</sup>, Ragueneau, F.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Université paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS, Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay, 91190, Gif-sur-Yvette, France.

<sup>2</sup> EPF École d'Ingénieurs, 55, avenue du Président Wilson, F-94230, Cachan, France.

**RESUME** Le territoire français compte environ 18 000 ponts ferroviaires en maçonnerie dont la plupart ont été construits avant 1904. Afin d'améliorer le plan de gestion des risques de ces structures, il est nécessaire de comprendre leur comportement. De plus, le développement de stratégies d'analyses rapides permettant d'évaluer le niveau de risque d'un pont permettrait de faciliter la gestion des réparations de ces structures. En particulier, les récents séismes sur le territoire ont montré que le risque sismique existe et qu'il ne doit pas être négligé dans le cas de structures anciennes. L'objectif de ce papier est donc d'étudier des modèles plus ou moins complexes de ponts en maçonnerie afin d'évaluer la vulnérabilité sismique de ces structures. Tout d'abord un critère d'endommagement est défini afin de construire des courbes de fragilités avec des analyses linéaires. Puis, des analyses non-linéaires sont réalisées pour évaluer le niveau de confiance que l'on peut avoir dans les analyses linéaires. Les résultats montrent que pour de faibles niveaux d'endommagement, les calculs élastiques donnent une bonne approximation du comportement global de la structure. Cependant, ils ont tendance à surestimer l'endommagement réel lorsque celui-ci devient plus important.

**Mots-clefs** Maçonnerie, Modélisation, Comportement non-linéaire, Critère d'endommagement, Courbe de fragilité.

## I. INTRODUCTION

### A. Contexte

Une majorité des ponts ferroviaires du territoire français sont en maçonnerie. Afin d'améliorer les plans de gestion de ces ouvrages, il est nécessaire d'analyser finement leur comportement, en particulier dans le cas de risques naturels tels que les séismes. Cependant, la modélisation de structures en maçonnerie reste un défi important en raison de la complexité de ces structures, principalement à cause de l'effet de l'âge et des changements dans les propriétés mécaniques. Des stratégies sont donc nécessaires pour éviter d'augmenter fortement les temps de calcul tout en modélisant suffisamment finement les phénomènes physiques.

### B. Objectif

L'objectif de ce papier est donc de proposer une stratégie pour évaluer les courbes de fragilité d'un ouvrage de type pont en maçonnerie. L'idée est de se baser sur des calculs élastiques rapides à

réaliser et d'approfondir les zones critiques de la courbe de fragilité avec des calculs non-linéaires plus fins.

## II. MODÉLISATION PAR ÉLÉMENTS FINIS D'UN PONT EN MAÇONNERIE

### A. Géométrie

Le pont modélisé est inspiré de [Hokelekli & al., 2019] (Figure 1). Il a été construit en 1787 à Bartin-Turkey. Il s'agit d'un pont constitué de voûtes en ogives. En revanche, la modélisation a été faite avec des voûtes en anse de panier plus représentatives de ce qui se fait en France.

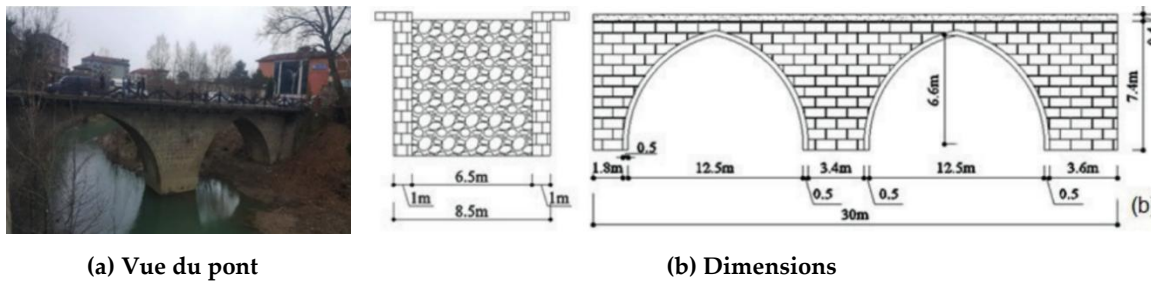


FIGURE 1. Pont de Bartin-Turkey

Le logiciel d'éléments finis Cast3M est utilisé pour modéliser le pont de la Figure 1. Le maillage est inspiré de [Tisserand & al., 2022] et est composé d'éléments cubiques linéaires pour la maçonnerie (en bleu sur la Figure 2) et le remplissage (en vert sur la Figure 2).

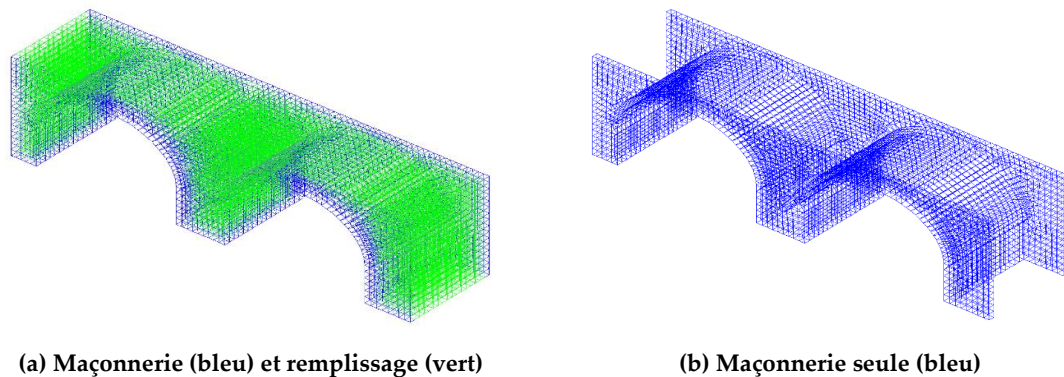


FIGURE 2. Maillage du pont

Pour les conditions aux limites, les trois piles sont encastées (Figure 3).

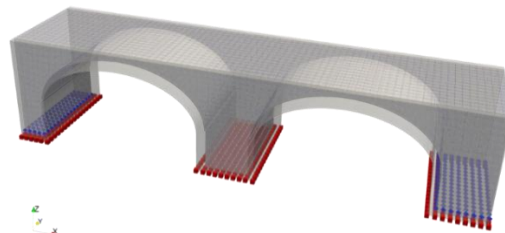


FIGURE 3. Conditions aux limites

Enfin, pour les calculs dynamiques, un amortissement de Rayleigh est utilisé avec un taux d'amortissement  $\xi$  de 5% pour les modes 1 et 3 du pont.

### B. Modèles matériaux non-linéaires

Des analyses élastiques sont réalisées dans un premier temps. Ensuite, des modèles matériaux non-linéaires sont considérés pour comprendre physiquement les phénomènes de dégradation du pont :

- Pour le **remplissage**, un modèle de Drucker-Prager est utilisé.
- Pour la **maçonnerie**, deux modèles matériaux non-linéaires sont étudiés : (i) le modèle de Mazars, (ii) le modèle RIBET développé dans [Richard & al., 2013]. Le modèle de Mazars est un modèle d'endommagement isotrope scalaire. Le modèle RIBET prend en compte de l'endommagement et du frottement en traction et de la plasticité en compression.

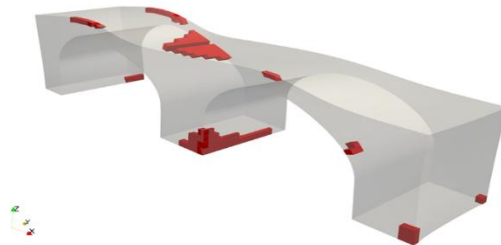
## III. DEFINITION D'UN CRITERE D'ENDOMMAGEMENT

On propose de définir un critère d'endommagement basé sur le critère de Rankine (eq.1) dans le but de tracer les courbes de fragilité du pont :

$$f_{rankine}(\sigma) = \max_i(\sigma_i) - f_t \quad (1)$$

avec :  $f_t$  la limite en traction du matériau et  $\sigma_i$  la contrainte principale.

À chaque incrément de temps du calcul dynamique, il est possible d'évaluer le nombre d'éléments dans lesquels la contrainte a dépassé la limite en traction du matériau. À la fin du calcul, on obtient une cartographie d'endommagement du pont comme présenté en Figure 4.



**FIGURE 4.** Éléments dont la contrainte a dépassé la limite en traction du matériau (rouge)

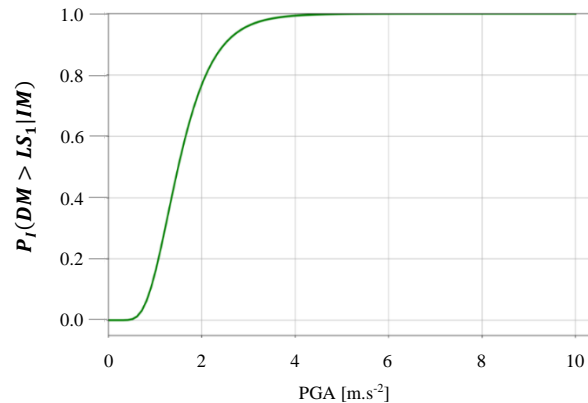
De plus, un critère global d'endommagement est proposé (eq.2) :

$$D_{I_{rank}} = \frac{V_{rank}}{V_{tot}} \quad (2)$$

avec :  $V_{rank}$  le volume des éléments ayant dépassé le critère et  $V_{tot}$  le volume total du pont.

Finalement, en considérant que le pont est fortement endommagé lorsque le critère dépasse 10%, en considérant un comportement linéaire du pont et en utilisant la base de données RESORCE 2012

(composée de **5800** séismes), on peut tracer la courbe de fragilité du pont comme présenté en Figure 5.



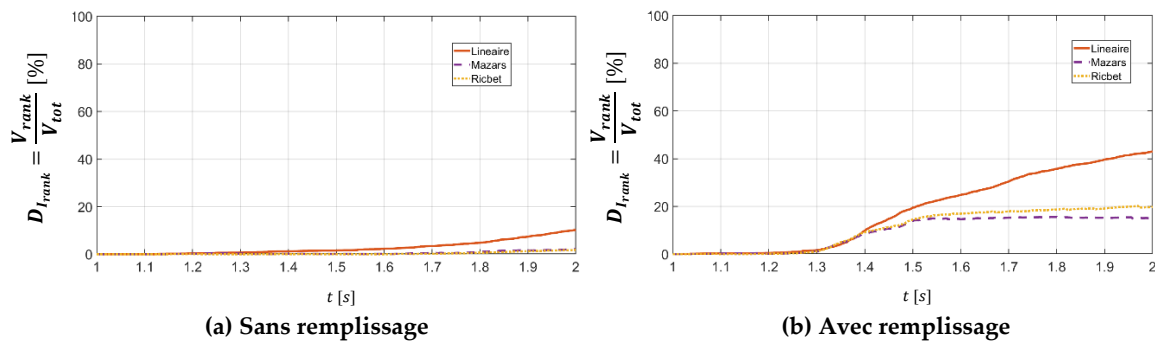
**FIGURE 5.** Courbe de fragilité du pont (comportement linéaire)

#### IV. ANALYSE DU COMPORTEMENT NON-LINÉAIRE DU PONT

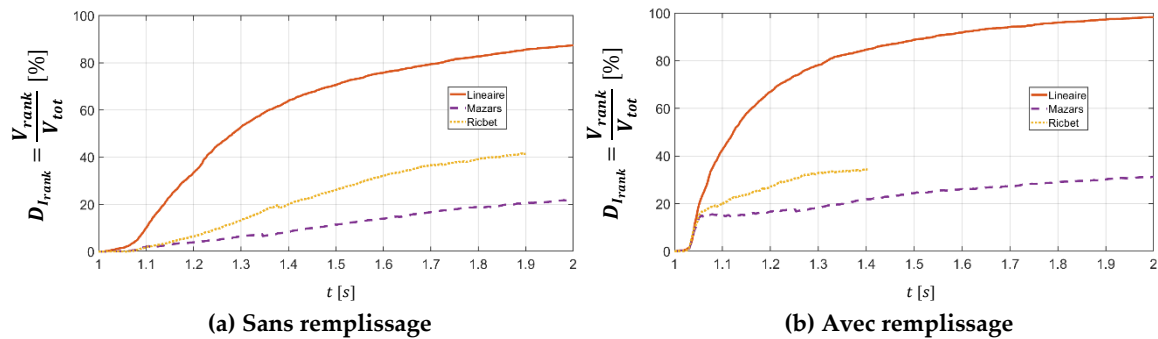
Dans la suite, on réalise des analyses push-over sur le pont avec les deux modèles non-linéaires, discutés en section II.B. pour la maçonnerie, et en comparaison avec les analyses élastiques.

##### A. Évolution du critère d'endommagement

Sur les Figures 6 et 7, on observe l'évolution du critère d'endommagement  $D_{I_{rank}}$  au cours du temps en fonction du choix du modèle pour la maçonnerie. Des essais quasi-statiques ont été réalisés, après application du poids propre du pont entre les instants  $t = 0$  s et  $t = 1$  s, avec un déplacement maximal respectivement de 1 cm (Figure 6) et 10 cm (Figure 7).



**FIGURE 6.** Évolution du critère d'endommagement en fonction du modèle matériel considéré pour la maçonnerie (déplacement maximal imposé = 1 cm)



**FIGURE 7.** Évolution du critère d'endommagement en fonction du modèle matériau considéré pour la maçonnerie (déplacement maximal imposé = 10 cm)

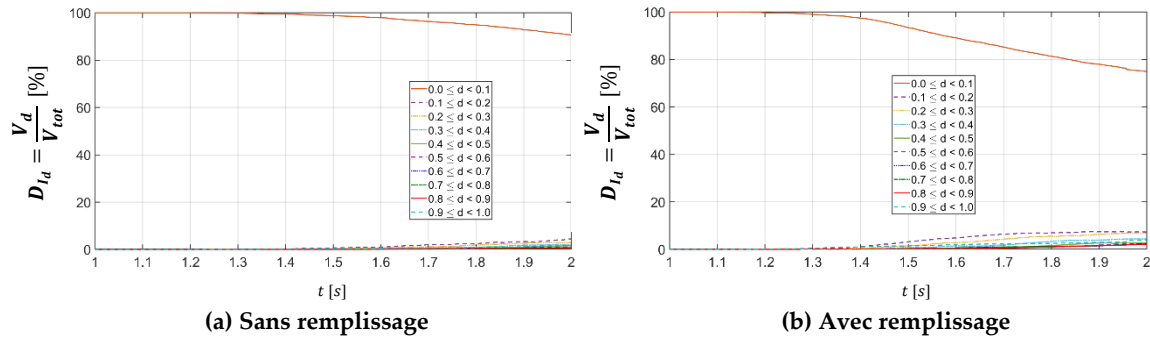
Tout d'abord, entre les Figures 6 et 7, on remarque que l'endommagement atteint bien des niveaux plus élevés avec tous les modèles dans le cas où l'on applique un déplacement maximal de 10 cm. En revanche, on remarque que le modèle de Ricbet a du mal à converger au-delà de 4 cm avec remplissage et 9 cm sans remplissage. Ceci peut être une conséquence de la puissance des outils de calculs utilisés et/ou du choix de l'incrément de chargement. Faire des calculs avec un modèle trop complexe peut donc devenir très lourd. D'où la nécessité d'évaluer les cas critiques pour lesquels il est nécessaire de réaliser ces calculs fins.

En particulier, on remarque sur la Figure 6 que les courbes des trois modèles se superposent pour de faibles niveaux d'endommagement. Puis pour des niveaux plus élevés, Ricbet et Mazars donnent des résultats similaires. On peut donc en déduire que les calculs linéaires peuvent être utilisés à condition d'avoir des niveaux de sollicitations assez faibles, qui n'endommagent pas plus de 10% du pont. Au-delà, les analyses linéaires surestiment fortement l'endommagement. Puis, pour des niveaux d'endommagement plus modérés, un modèle non-linéaire assez simple comme Mazars peut être utilisé. Un modèle plus complexe comme le modèle de Ricbet sera, quant-à-lui, uniquement utilisé pour les calculs les plus endommageant. On observe, en effet, sur la Figure 7 que Mazars a tendance à sous-estimer l'endommagement lorsqu'il devient plus important.

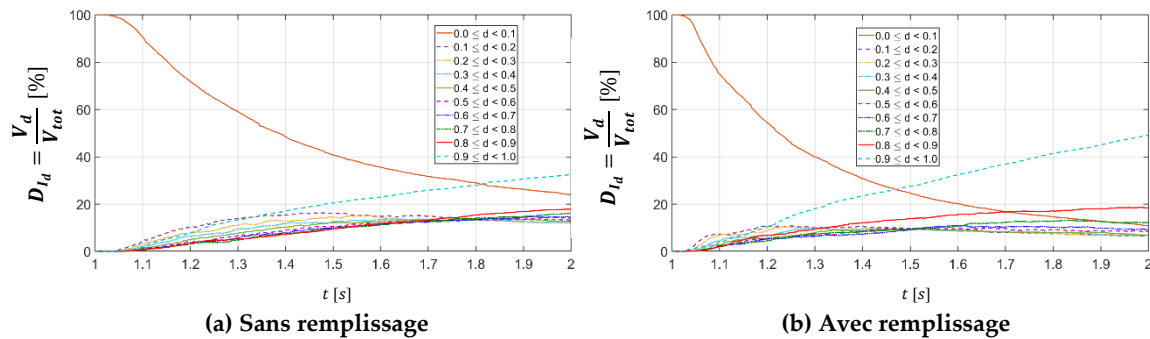
La comparaison avec et sans remplissage montre que la masse de ce dernier a un impact non négligeable sur la réponse du pont. En effet, en présence du remplissage, on endommage plus la maçonnerie. De plus, on a une augmentation importante à un instant donné alors que l'évolution de l'endommagement est beaucoup plus régulière sans le remplissage.

### B. Suivi des niveaux d'endommagement

Dans la partie précédente, on s'est intéressé uniquement au volume global d'éléments endommagés dans le pont. Cependant, il est possible de voir comment se répartit ce volume en termes de niveaux d'endommagement pour les modèles non-linéaires. La variable d'endommagement dans ces modèles est définie entre 0.0 et 1.0. On fait donc le choix de découper cela en 10 intervalles (0.0 à 0.1, 0.1 à 0.2, 0.2 à 0.3, ..., 0.9 à 1.0). Les Figures 8 et 9 présentent les résultats associés dans le cas du modèle de Mazars, avec et sans remplissage et pour un déplacement maximal respectivement de 1 cm (Figure 8) et 10 cm (Figure 9).



**FIGURE 8.** Évolution du critère d'endommagement par niveaux pour le modèle de Mazars (déplacement maximal imposé = 1 cm)



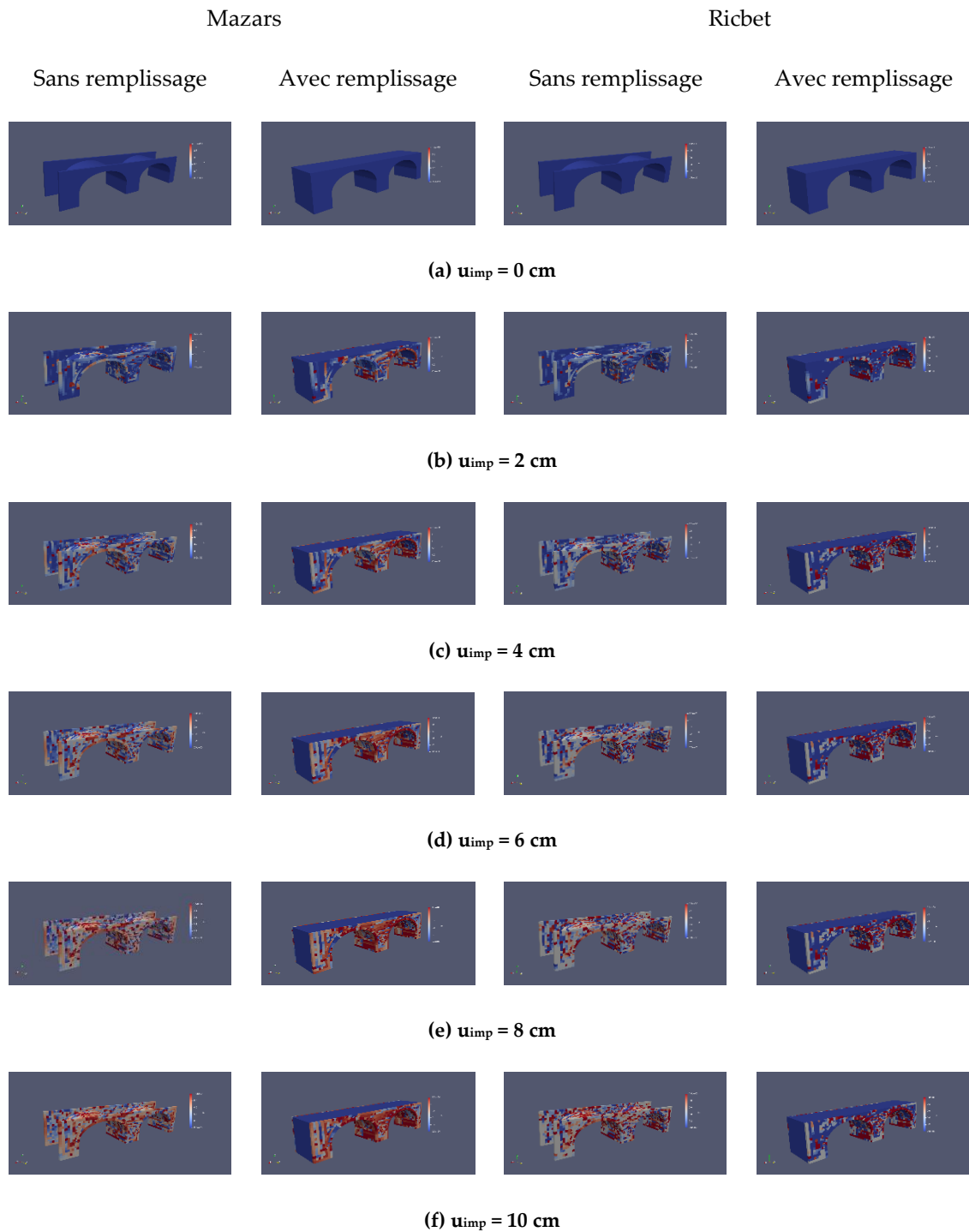
**FIGURE 9.** Évolution du critère d'endommagement par niveaux pour le modèle de Mazars (déplacement maximal imposé = 10 cm)

La Figure 8 montre que pour de faibles niveaux d'endommagement, la majorité des éléments endommagés l'est à de faibles niveaux ( $d$  compris entre **0.0** et **0.3**). En revanche, la Figure 9 montre que pour de forts endommagements, la proportion d'éléments très fortement endommagés ( $d$  compris entre **0.8** et **1.0**) augmente presque continuellement au cours du temps. On observe également certains niveaux qui se mettent à diminuer au bout d'un certain temps. Ceci signifie que les éléments endommagés continuent de s'endommager alors qu'il y a moins de nouveaux éléments endommagés. On observe donc des localisations d'endommagement dans certaines zones.

La comparaison avec et sans remplissage montre des comportements assez similaires mais avec le remplissage, on endommage plus rapidement fortement certaines zones du pont. Le suivi de la variable d'endommagement dans le pont au cours du temps pourrait alors nous permettre d'évaluer les zones les plus à risques.

### C. Évolution de l'endommagement dans le pont

La Figure 10 présente l'évolution des variables d'endommagement avec les modèles Mazars et Ricbet, avec et sans remplissage, au cours du calcul allant jusqu'à 10 cm de déplacement imposé. Dans tous les cas, on a une échelle qui va du bleu ( $d = 0.0$ ) au rouge ( $d = 1.0$ ).



**FIGURE 10.** Variable d'endommagement au cours du temps pour deux modèles de maçonnerie (déplacement maximal imposé = 10 cm)

Si on compare les deux modèles matériaux, on remarque des évolutions similaires avec les mêmes zones qui s'endommagent en même temps. En particulier, la pile centrale et les arches sont les éléments qui s'endommagent en premier et qui atteignent les plus forts niveaux d'endommagement à la fin du calcul. En revanche, sur les zones qui sont les moins sollicitées, on remarque que le modèle de Mazars conduit à des endommagements plus forts. Ce qui explique que l'on ait globalement un plus fort endommagement avec ce modèle dans le cas des déplacements élevés, comme discuté en Partie IV.A..

Sans remplissage, la maçonnerie du pont s'endommage de manière plus diffuse qu'avec le remplissage. On observe cela en particulier sur les deux piles extérieures du pont. À l'inverse les arches semblent moins endommagées lorsque l'on ne prend pas en compte le remplissage. On a donc bien un effet de l'inertie du remplissage qui ajoute une masse stabilisatrice au niveau des piles mais qui ajoute un effort à reprendre sur les arches.

## V. CONCLUSIONS

Les structures en maçonnerie présentent un comportement non-linéaire complexe. L'évaluation du comportement de ces structures sous chargement sismique, par exemple, nécessite de mettre en œuvre des calculs complexes et lourds. C'est pourquoi des stratégies pour accélérer les analyses sont nécessaires. L'idée de ce papier est donc de proposer des critères permettant d'évaluer la nécessité ou non de réaliser des calculs fins et complexes à partir de premières analyses élastiques.

Un critère d'endommagement a été proposé pour évaluer les niveaux d'endommagement à partir de calculs élastiques. Puis des analyses fines ont été réalisées avec deux modèles non-linéaires de niveaux de complexité différents. La comparaison des différents modèles montre que les analyses élastiques représentent plutôt bien le comportement global de la structure pour des niveaux d'endommagement faibles. Au-delà de **10%** d'endommagement, il semble en revanche nécessaire d'utiliser des modèles non-linéaires afin de ne pas surestimer l'endommagement. Le modèle de Mazars, le plus simple des modèles non-linéaires, semble également avoir ses limites pour de forts niveaux d'endommagement en termes de comportement global.

Des courbes de fragilités ont été également tracées à partir des calculs linéaires. Elles donnent une première information sur le comportement de l'ouvrage en maçonnerie sous différents chargements sismiques. Les analyses non-linéaires réalisées montrent toutefois qu'une stratégie à plusieurs niveaux de modélisation devrait être développée afin d'améliorer la représentativité des courbes de fragilité.

Une autre perspective à ce travail serait de pouvoir étudier l'influence de l'histoire de la structure sur son comportement dynamique, en simulant des endommagements initiaux et en appliquant des chargements dynamiques.

## REFERENCES

E. Hokelekli, & B. N. Yilmaz. (2019). Effect of cohesive contact of backfill with arch and sprandel walls of a historical masonry arch bridge on seismic response. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 63(3), pp. 926-937.

B. Richard, & Ragueneau, F. (2013). Continuum Damage Mechanics Based Model for Quasi Brittle Materials Subjected to Cyclic Loadings: Formulation, Numerical Implementation and Applications. *Engineering Fracture Mechanics* 98, pp. 383–406.

P.-J. Tisserand, H. Rostagni, C. Giry, T. T. H Nguyen, R. Desmorat, & F. Ragueneau. (2022). An orthotropic damage model with internal sliding and friction for masonry-like material. *Engineering Fracture Mechanics*, 267, 108397.

## REMERCIEMENTS

Cette recherche a été menée dans le cadre du projet MINERVE numéro DOS0186108. Le projet MINERVE est soutenu par le gouvernement français dans le cadre de France 2030 : CORIFER AAP1 – Projet « MINERVE ».