

# Effet de la variabilité spatiale sur le comportement à la rupture d'un voile en béton

Wafaa Abdallah<sup>1,2</sup>, Jacqueline Saliba<sup>1</sup>, Sidi Mohammed Elachachi<sup>1</sup>, Zoubir Mehdi Sbartai<sup>1</sup>, Marwan Sadek<sup>2</sup>, Fadi Hage Chehade<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>I2M, UMR 5295, CNRS, Université de Bordeaux, Talence, France.

<sup>2</sup>EDST, Université Libanaise, Beyrouth, Liban.

**RESUME** La variabilité spatiale des propriétés mécaniques est une information importante à prendre en compte pour fiabiliser l'évaluation du comportement mécanique des structures en béton. Cette variabilité peut être déterminée par exemple à partir de la variabilité spatiale des observables CND lors du diagnostic des ouvrages en béton armé. L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet de cette variabilité sur le comportement à la rupture d'un voile en béton soumis au cisaillement. Plusieurs simulations ont été ainsi réalisées en prenant en compte la variabilité du module de Young et de la résistance à la traction et plus particulièrement l'effet de la longueur de corrélation de ces deux propriétés sur la rupture. Les résultats ont montré que la variabilité spatiale affecte les champs d'endommagement par contre les longueurs de corrélation considérées ont un faible effet sur la force maximale à la rupture.

**Mots-clefs** variabilité spatiale, voile, cisaillement, longueur de corrélation, béton, rupture.

## I. INTRODUCTION

Le comportement des structures dépend fortement de la variabilité des propriétés mécaniques des matériaux [Ghanoum et al., 2016]. Cette variabilité est connue dans les structures en béton armé à plusieurs échelles. En effet, le béton est un matériau fortement hétérogène constitué de plusieurs phases y compris différentes formes, tailles et natures de granulats [Saliba et al., 2016 ; Abdallah et al., 2019]. De plus, à l'échelle de la structure, les propriétés mécaniques du béton dépendent fortement des conditions de mise en œuvre et des conditions d'exposition. Afin de limiter le nombre de carottage, la quantification de cette variabilité spatiale peut être réalisée en se basant sur la dépendance des mesures de contrôle non destructif (CND) à différentes distances [Abdallah et al., 2021]. Ceci permet de déterminer la longueur de corrélation ou la distance à partir de laquelle les mesures ne sont plus corrélées (indépendantes). Un voile en béton a été considéré dans cette étude comme élément structurel. Dans ce contexte, plusieurs études disponibles dans la littérature ont été réalisées afin de comprendre le comportement à la rupture de ce type d'élément [Mangalathua et al., 2020] ; cependant très peu d'études ont considéré l'effet de la variabilité spatiale.

L'objectif de cet article est d'étudier numériquement l'effet de la variabilité spatiale des propriétés mécaniques du béton sur le comportement à la rupture d'un voile en béton soumis au cisaillement. La variabilité spatiale du module de Young  $E$  et de la résistance à la traction  $f_t$  a été ainsi générée dans Matlab par la méthode Circulant Embedding en considérant trois longueurs de corrélation 20, 40 et 60 cm égale pour  $E$  et  $f_t$  et un cas où cette longueur est différente pour les deux. L'échange Matlab / Cast3M

permet de projeter cette variabilité au niveau des points de gauss du maillage du voile. Les simulations ont été réalisées en 2D en utilisant le modèle d'endommagement mécanique de Fichant [Fichant et al., 1999]. Dans un premier temps, le modèle d'endommagement et les conditions aux limites sont présentés. Ensuite, l'effet de la variabilité spatiale de  $E$  et  $f_t$  sur le comportement à la rupture du voile soumis au cisaillement est analysé.

## II. MODELE D'ENDOMMAGEMENT ET CONDITIONS AUX LIMITES

Le modèle d'endommagement est basé sur la relation entre la contrainte totale et la contrainte effective [Fichant et al., 1999 ; Gangnant et al., 2016]. Le voile considéré est en béton avec 200 cm de longueur, 100 cm de hauteur et 15 cm d'épaisseur. Comme le rapport entre la hauteur et la longueur est égale à 0,5 ( $< 1,5$ ), la rupture est principalement contrôlée par le cisaillement [Mangalathua et al., 2020]. Afin de se rapprocher des conditions aux limites réelles des voiles en béton, deux plaques métalliques 200 cm x 10 cm x 15 cm représentatives de deux longrines horizontales sont placées dans les parties inférieure et supérieure du voile afin de répartir l'effort de cisaillement appliqué sur le voile. Chaque plaque est modélisée en utilisant un modèle élastique isotrope avec un module de Young de 210 GPa et un coefficient de poisson nul. Une charge de compression constante verticale de 75 KN/m a été appliquée sur la partie supérieure de la plaque afin de représenter le poids transmis par les étages supérieurs dans le cas des bâtiments ordinaires (figure 1 (a)). Le chargement en cisaillement a été réalisé en déplacement horizontal imposé  $U_x$  sur la face gauche de cette plaque supérieure. Les conditions aux limites cinématiques consistent à bloquer les déplacements selon  $y$  de la plaque inférieure et supérieure et selon  $x$  sur la face droite de la plaque inférieure pour éviter leur rotation et limiter les ouvertures de fissures liées à la flexion. Les paramètres d'entrée du modèle d'endommagement sont résumés dans la figure 1 (b) [Fichant et al., 1999 ; Gangnant et al., 2016].  $E$  et  $f_t$  sont considérés comme des champs aléatoires avec les moyennes  $\mu$  et les écart-types  $\sigma$  supposés constants.  $\alpha$  est un paramètre d'influence du matériau affectant la variable d'endommagement en compression afin de prendre en compte la dissymétrie du comportement du béton en traction et en compression.

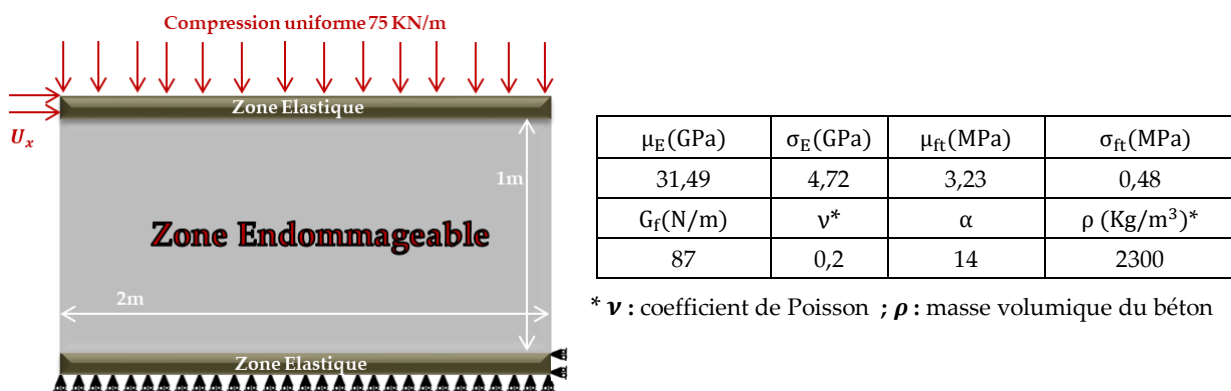
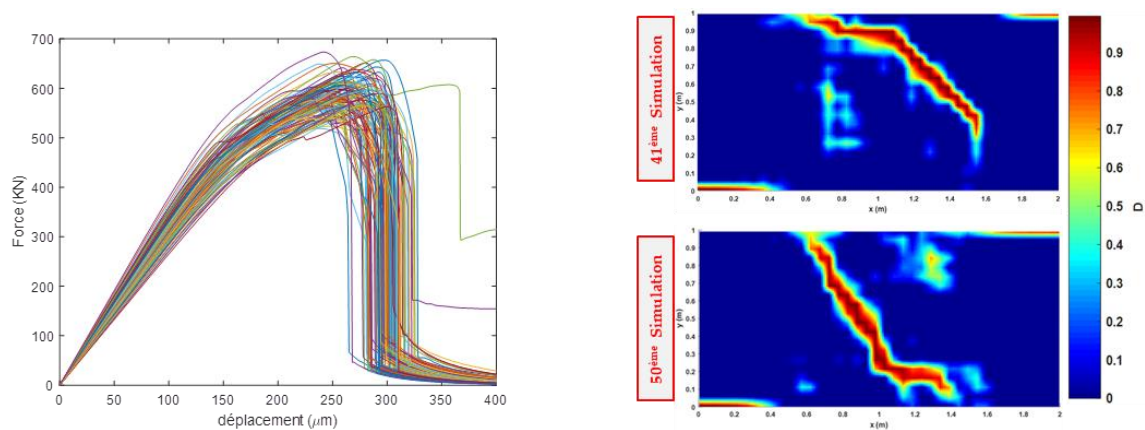


FIGURE 1. (a) Chargement et conditions aux limites et (b) Paramètres utilisés

## III. EFFET DE LA LONGUEUR DE CORRELATION SUR LA RUPTURE

Une étude paramétrique est réalisée pour étudier l'effet de la variabilité spatiale du béton sur le comportement mécanique du voile sollicité en cisaillement. Cette étude consiste à varier seulement la longueur de corrélation de  $E$  et  $f_t$ . 100 réalisations de  $E$  et  $f_t$  sont aléatoirement générées par la méthode Circulant Embedding pour plusieurs longueurs de corrélations avec  $l_E = f_t =$

20, 40 et 60 cm respectivement et  $l_E = 60 \text{ cm}$  et  $l_{f_t} = 20 \text{ cm}$ . Ces longueurs de corrélation sont parmi celles qui ont été considérées par [Ghanoum et al., 2016] pour étudier l'effet de la variabilité spatiale de la résistance à la traction sur la force de rupture d'un tirant. La figure 2 (a) présente les 100 courbes force-déplacement obtenues pour  $l_E = 60 \text{ cm}$  et  $l_{f_t} = 20 \text{ cm}$ . Les valeurs de la force maximale varient entre 523 à 673 KN et le déplacement correspondant varie entre 242 et 247  $\mu\text{m}$ . La figure 2 (b) présente deux exemples du champ d'endommagement correspondant à la force maximale. Les champs d'endommagement dépendent fortement de la distribution aléatoire de  $E$  et  $f_t$  avec une localisation de l'endommagement au niveau de la diagonale par cisaillement ou au niveau des zones de concentration des contraintes en bas à gauche et en haut à droite.



**FIGURE 2. (a) Courbes force-déplacement et (b) champs d'endommagement correspondant à la force maximale dans le cas où  $l_E = 60 \text{ cm}$  et  $l_{f_t} = 20 \text{ cm}$**

La figure 3 (a) montre la variation de la force maximale à la rupture du voile en fonction du nombre de simulations numériques allant de 1 à 100 représentant des distributions aléatoires différentes pour chaque longueur de corrélation. Les distributions cumulatives de la force maximale pour les différentes longueurs de corrélation de  $E$  et  $f_t$  sont aussi présentées dans la figure 3 (b). L'effet de la longueur de corrélation de  $E$  et  $f_t$  sur la force maximale est faible considérant les 100 simulations réalisées. Les moyennes  $\mu$  et les écart-types  $\sigma$  de la force maximale présentés dans le tableau 2 sont légèrement différents. Ce faible effet est peut-être dû à la marge de variation des longueurs de corrélations choisie pour l'étude paramétrique qui est petite par rapport à l'échelle du voile étudié. Le choix de ces valeurs utilisées dans cette étude est basé sur des valeurs utilisées dans la littérature sur des structures plus petites en comparaison avec la structure décrite ici. Par exemple, dans [Ghanoum et al., 2016], la variation de la longueur de corrélation entre 8 cm et 60 cm pour un tirant de 68 cm x 10 cm x 10 cm a influencé sur la force de rupture du tirant. Cela nécessite donc d'essayer d'élargir la plage des longueurs de corrélation étudiées par exemple jusqu'à 1,2 m.

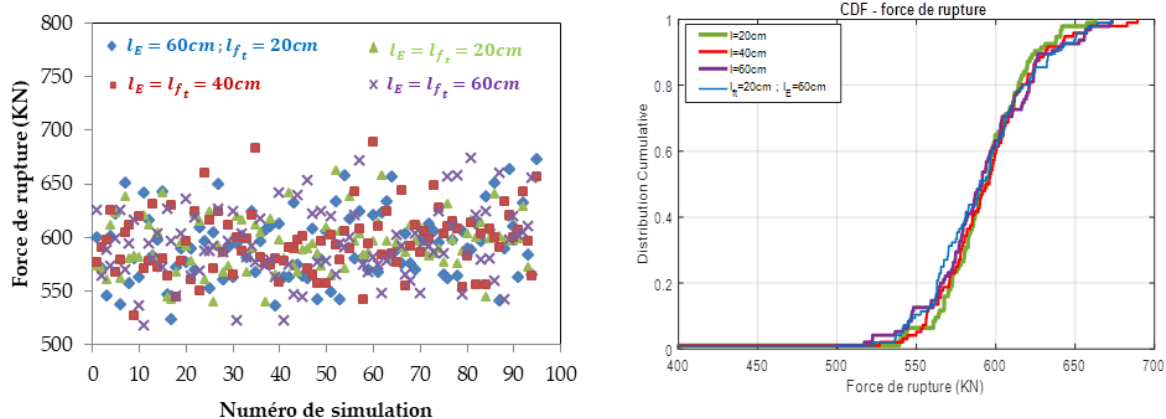
### III. CONCLUSION

L'effet de la variabilité spatiale sur le comportement à la rupture d'un voile en béton sollicité en cisaillement a été étudié. Un modèle d'endommagement implémenté dans le code de calcul en éléments finis Cast3M a été utilisé. Cette étude est basée plus particulièrement sur l'effet de la variation de la longueur de corrélation des deux champs aléatoires  $E$  et  $f_t$  sur la réponse globale de la structure. Les résultats ont montré que l'effet de la longueur de corrélation de  $E$  et  $f_t$  sur la force maximale à la rupture est faible. Une analyse plus poussée sera réalisée par la suite afin de comparer l'effet de la variabilité spatiale sur le comportement local de la structure en comparant les ouvertures et les positions des fissures. D'autres longueurs de corrélation seront aussi étudiées par la suite ainsi que l'effet des écart-

types  $E$  et  $f_t$  sur le comportement à la rupture des voiles qui seront armés afin de s'approcher de leur comportement réel.

**TABLEAU 2. Moyenne  $\mu$  et écart-type  $\sigma$  des 100 valeurs de la force maximale**

Sur 100 simulations réalisées	$l_E = l_{f_t} = 20\text{cm}$		$l_E = l_{f_t} = 40\text{cm}$		$l_E = l_{f_t} = 60\text{cm}$		$l_E = 60\text{cm} ; l_{f_t} = 20\text{cm}$	
	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
Force maximale (KN)	592,10	32,19	593,43	35,75	591,96	34,25	590,48	37,53



**FIGURE 3. (a) Evolution de la force maximale en fonction de nombre de simulations numériques réalisées et (b) distributions cumulatives de la force maximale pour les différentes longueurs de corrélation de  $E$  et  $f_t$**

## REFERENCES

- M. Ghanoum, J. Baroth, C. Rospars & A. Millard. (2016). Development of a Size effect Law for RC structures. *Key Engineering Materials*, 711,892-899.
- W. Abdallah, J. Saliba, Z. M. Sbartaï, M. Sadek, F. Hage Chehade & S. M. ElAchachi. (2019) Reliability analysis of non-destructive testing models within a probabilistic approach. *MATEC Web of conf.*, 281,6p. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928104003>
- W. Abdallah, Z. M. Sbartaï, J. Saliba, S. M. Elachachi, F. Hage Chehade & M. Sadek. (2021). Intégration de la variabilité spatiale pour une meilleure évaluation non-destructive du béton. *Academic Journal of Civil Engineering*, 38(2), 134-138.
- S. Fichant, C. La Borderie & G. Pijaudier Cabot. (1999). Isotropic and anisotropic description of damage in concrete structures. *Mech. Cohes.-Frict Mater.* 4,339-359.
- S. Mangalathua, H. Jangb, S.H. Hwangc & J.S. Jeonc. (2020). Data-driven machine-learning-based seismic failure mode identification of reinforced concrete shear walls. *Eng.Struct.* 208.
- J. Saliba, M. Matallah, A. Loukili, J.P. Regoin, D. Grégoire, L. Verdon, G Pijaudier-Cabot. (2016) Experimental and numerical analysis of crack evolution in concrete through acoustic emission technique and mesoscale modelling. *Engineering Fracture Mechanics*, 167, 123–137.
- A. Gangnant, J. Saliba, C. La Borderie & S. Morel (2016). Modeling of the quasibrittle fracture of concrete at meso-scale : Effect of classes of aggregates on global and local behavior. *Cement and Concrete Research*, 89, 35–44.