

Etude par criblage des facteurs influents sur la réponse mécanique du béton sous compression uniaxiale

Nesrine Salah, Etienne Malachanne, Frédéric Jamin, Frédéric Dubois, A. S. Caro-Bretelle, Moulay Saïd El Youssoufi, Perrin Didier

▶ **To cite this version:**

Nesrine Salah, Etienne Malachanne, Frédéric Jamin, Frédéric Dubois, A. S. Caro-Bretelle, et al.. Etude par criblage des facteurs influents sur la réponse mécanique du béton sous compression uniaxiale. Academic Journal of Civil Engineering, 2021, Special Issue - RUGC 2020 Marrakech, 38 (1), pp.213-216. 10.26168/ajce.38.1.52 . hal-03186643

HAL Id: hal-03186643
https://imt-mines-ales.hal.science/hal-03186643

Submitted on 1 Apr 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etude par criblage des facteurs influents sur la réponse mécanique du béton sous compression uniaxiale

N. Salah[1,2], E. Malachanne[1], F. Jamin[2,3], F. Dubois[2,3], A. S. Caro[1], M. S. El Youssoufi[2,3], and D. Perrin[4]

1 LMGC, IMT Mines Alès, Univ. Montpellier, CNRS, Alès, France, nesrine.salah@umontpellier.fr

2 LMGC, Univ. Montpellier, CNRS, Montpellier, France

3 MIST Lab., IRSN, CNRS, Montpellier, France

4. PCH, IMT Mines Alès, Alès, France

RESUME Une approche par éléments finis cohésifs-volumétriques, tenant compte des propriétés mécaniques de la zone de transition interfaciale (ITZ), est utilisée pour étudier le comportement mécanique du béton lors d'un essai de compression uniaxiale. Dans ce travail, un modèle géométrique bidimensionnel à l'échelle mésoscopique du béton numérique a été considéré. Les échantillons obtenus sont maillés à l'aide du logiciel GMSH avec une méthode de Delaunay.
Les résultats des simulations à l'aide du Modèle de Zones Cohésives Frottantes (MZCF) permettent, à travers une étude de criblage de type Hadamard, d'apporter des éléments de réponses concernant les facteurs les plus influents et leur contribution à la résistance maximale du béton en compression uniaxiale.

Mots-clefs Modèle de zones cohésives, pâte de ciment, zone de transition interfaciale, rupture.

I. INTRODUCTION

Le comportement béton, un matériau poreux et multiphasique avec la coexistence de plusieurs échelles toutes déterminantes, vis-à-vis de sollicitations mécaniques diverses et environnementales extrêmes doit être appréhendé par le biais d'approches multi-physiques et multi-échelles. En utilisant la classification donnée par Wittmann(1983), le béton peut être considéré à l'échelle micro, méso ou macro. Il est évident que à chacune de ces échelles, différents types de paramètres d'entrée sont considérés. A l'échelle mésoscopique, on s'intéresse au Volume Élémentaire Représentatif (VER) pour lequel les propriétés ultimes sont liées aux interactions pâte de ciment/granulat.

Plusieurs approches ont été développées pour considérer l'interface comme une troisième phase (Shuguang & Qingbin, 2015). Néanmoins, la faible épaisseur (quelques micromètres) de cette zone pose plusieurs difficultés pratiques telles que le maillage. Dans ce travail, un modèle de zone cohésive est utilisé pour prendre en compte le comportement mécanique cette troisième phase entre la pâte de ciment et le granulat. Afin d'éviter les problèmes de maillage, l'épaisseur de l'interface est cachée dans la loi d'interaction qui couple l'adhérence, le frottement et le contact unilatéral.

Nous nous intéressons, grâce au Modèle de Zones Cohésives Frottantes (MZCF) (Bisoffi-Sauve et al. 2019), aux mécanismes d'endommagement et au comportement irréversible des bétons sous un chargement de compression uniaxiale. Ces simulations permettent notamment, à travers une étude par criblage basée sur les matrices d'Hadamard selon les plans de Plackett et Burman d'apporter des éléments de réponses concernant les facteurs les plus influents et leur contribution à la résistance maximale du béton en compression uniaxiale.

II. ETUDE DE LA REPONSE MECANIQUE D'UN BETON NUMERQIUE SOUS UNE COMPRESSION UNIAXIALE A L'ECHELLE MESOSCOPIQUE

A. Matériels, sollicitations et paramètres du modèle

Les propriétés élastiques des matériaux utilisés sont obtenues par des essais de compression uniaxiale et elles sont présentées dans le **Tableau 1**. Ainsi, les paramètres cohésifs du modèle dans les deux modes de rupture (mode I en traction et mode II en cisaillement) sont représentés dans le **Tableau 2.** Les paramètres équivalents dans l'étude de criblage sont présentés en X_i.

TABLEAU 1. Propriétés élastiques des phases

	Propriétés élastiques	
	E (GPa)	ν
Matrice	12.5	0.29
Inclusions (granulats)	60	0.29

TABLEAU 2. Les paramètres cohésifs (énergie de rupture et contrainte cohésive dans les deux modes)

	Mode I : traction		**Mode II : cisaillement**	
	Pâte de ciment			
Énergie cohésive	w_{1p}	X_1	w_{2p}	X_3
Contrainte cohésive	σ_{1p}^{coh}	X_5	σ_{2p}^{coh}	X_7
	Interface pâte/granulat			
Énergie cohésive	w_{1i}	X_2	w_{2i}	X_4
Contrainte cohésive	σ_{1i}^{coh}	X_6	σ_{2i}^{coh}	X_8

B. Modèle de zone cohésive

La loi cohésive adoptée dans cette étude, est une extension de la loi présentée dans (Perales et al. 2008) qui prend en compte les modes mixtes (Bisoffi-Sauve et al. 2019).

On se limitera dans cette partie à présenter les principales équations de la loi cohésive, ainsi que ses paramètres : Le modèle considère la non-pénétration entre deux corps en contact ; l'adhésion est définie ici au sens d'une résistance à la séparation évolutive traduisant le processus de rupture (Perales. 2005). La force d'adhésion **R** entre les deux corps est décomposée en une partie normale R_N et une partie tangentielle R_T telles que R_N =*R*.$\boldsymbol{n}$. , associées à des déplacements normal u_N et tangentiel u_T.

Le saut de déplacement est décomposé de la manière suivante :

$$[u] = [u_N].\boldsymbol{n} + [u_T] \quad avec \ [u_N] = [u].\boldsymbol{n}$$

Par ailleurs, on introduit une variable β qui représente l'intensité d'adhérence (Pérales.F. 2005) qui évolue au cours du chargement et qui est liée à un paramètre d'endommagement D de telle sorte que :

$$\beta = 1 - D$$

Dans ce problème, on résout :

- Condition unilatérale (condition de Signorini) avec adhésion :

$$[|u_N|] \geq 0\,, \quad \left(R_N + R_N^{coh}\right) \geq 0$$

Cette condition est utilisée pour modéliser un contact parfait.

On peut l'écrire sous la forme d'une condition de complémentarité :

$$[|u_N|].\left(R_N + R_N^{adh}\right) = 0$$

- Frottement de coulomb avec adhésion :

- Si $\left|R_T + R_T^{coh}\right| < \mu(\beta).\left(R_N + R_N^{coh}\right) \quad \Rightarrow V_T = 0$: pas de glissement.
- Sinon $\left|R_T + R_T^{adh}\right| = \mu(\beta).\left(R_N + R_N^{coh}\right) \quad \Rightarrow V_T = -\lambda.\frac{R_T + R_T^{coh}}{||R_T + R_T^{coh}||}$, $\lambda > 0$: glissement

$$\text{avec } R^{coh} = K(\beta).[|u|] \ \ et \ K(\beta) = \beta(C_N n \otimes n + C_T \frac{u_T \otimes u_T}{||u_T||^2})$$

avec C_N et C_T les raideurs interfaciales normales et tangentielles.

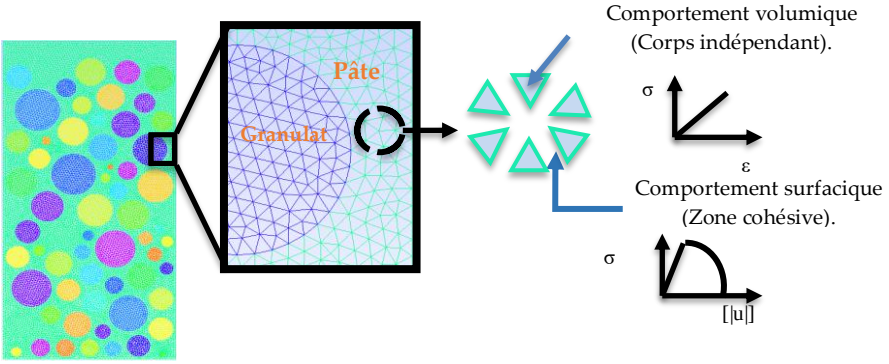


FIGURE 1. Approche multi-cops et complémentarité volumique-surfacique.

C. Etude par criblage , résultats et interprétations

Une étude par criblage a été menée afin d'estimer les effets des paramètres cohésifs (lors d'un essai de compression uniaxiale) avant d'entreprendre une étude d'influences des facteurs par l'application de la méthodologie des stratégies d'optimisation de paramètres basée sur les plans d'expériences. La matrice d'expériences X D-optimale (max[det (^{T}X.X)] d'un plan factoriel complet k = 8 facteurs X_i (ici les paramètres cohésifs) à deux niveaux est obtenue par permutation circulaire et selon le critère d'optimisation d'inégalité de Cauchy-Schwarz des deux niveaux attribués à chaque facteur. Les influences ou poids des facteurs et de l'effet de leurs interactions sur une propriété déterminée peuvent être estimés par les valeurs des coefficients d'un modèle mathématique de type polynomial linéaire du premier degré (par rapport à chaque variable) traduisant la relation de cause à effet entre le vecteur réponse Y et les facteurs X_i de la matrice d'expériences X.

Dans le cas d'un criblage des seuls facteurs influents, le modèle mathématique associé se simplifie sous la forme :

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^{K} b_i X_i$$

Dans ce modèle on néglige toutes les interactions entre les facteurs.
L'histogramme **Fig. 2a)** montre les valeurs des coefficients b_i associés aux facteurs X_i déterminés à partir du modèle polynomial, ajusté par la méthode des moindres carrés multilinéaires. Ce dernier permet de distinguer les facteurs les plus influents. Les valeurs de coefficient supérieures à l'écart type de la réponse traduisent une relative bonne significativité des facteurs influents. En effet, la p-value inférieure à 5% (ici, 3.35%) indique que la simplification du modèle est correcte par rapport à l'expérience dans le domaine expérimental d'intérêt choisi (étendue des valeurs de chacun des facteurs ciblés). Dans ce cas, les deux paramètres qui impactent fortement la résistance macroscopique sont l'énergie cohésive interfaciale et la contrainte cohésive interfaciale en mode II et le modèle pourrait être simplifié à seulement deux paramètres :

$$\hat{y} = b_0 + b_4 X_4 + b_8 X_8$$

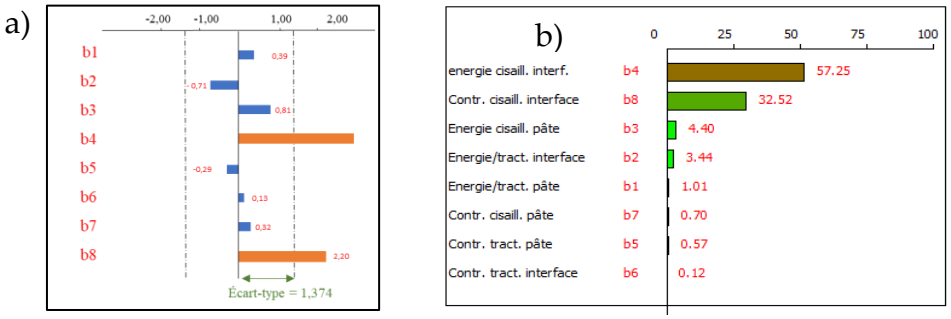


FIGURE 2. Histogramme des effets (à gauche), diagramme de l'effet Pareto (à droite).

Le diagramme « effet Pareto » **Fig. 2b)** permet de hiérarchiser la contribution de chacun des paramètres par rapport à son impact (donné ici en %). On trouve que la contribution de l'énergie cohésive occupe plus que la moitié de l'ensemble des contributions du reste des paramètres cohésifs.

REFERENCES

F. Perales, S. Bourgeois, A. Chrysochoos, Y. Monerie,(2008) Two field multibody method for periodic homogenization in fracture mechanics of nonlinear heterogeneous materials, *Engineering Fracture Mechanics*, 75 (11), 3378-3398, https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2007.07.017.

Li Shuguang & Li Qingbin. (2015). Method of meshing ITZ structure in 3D meso-level finite element analysis for concrete, *Finite Elements in Analysis and Design*, Volume 93, 96-106, https://doi.org/10.1016/j.finel.2014.09.006.

M. Bisoffi-Sauve, S. Morel & F. Dubois. (2019). Modelling mixed mode fracture of mortar joints in masonry buildings, *Engineering Structures*, 182, 316-330, https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.064.

F.Perales (2005). Fissuration des matériaux à gradient de propriétés. Application au Zircaloy hydruré. *Thèse de doctorat, Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc.*

Wittmann, F. (1983). Structure of concrete with respect to crack formation. *Fracture Mechanics of Concrete*, 43(5), 6.