

Étude statistique de la réponse mécanique lors d'essais de traction directe à l'échelle locale

J. Lhonneur^{1,4}, A. Girboveanu^{2,3}, F. Jamin^{3,4}, C. Péliou^{1,4}, Y. Monerie^{3,4}, M.S. El Youssoufi^{3,4}

¹ IRSN, B.P.3, 13115 St-Paul-Lez-Durance Cédex, France, {joffrey.lhonneur,celine.pelissou}@irsn.fr

² Université Technique de Constructions de Bucarest, Département de Constructions en Béton Armé, Bucarest, Roumanie,

³ LMGC, Université de Montpellier, CNRS, Montpellier, France, {andrei.girboveanu,frederic.jamin}@umontpellier.fr

⁴ MIST Lab, IRSN, CNRS, Université de Montpellier, France, {yann.monerie,moulay-said.el-yousoufi}@umontpellier.fr

Résumé — La dispersion de la réponse mécanique d'un essai de traction directe sur une pâte de ciment à l'échelle locale, ou échelle de l'interface pâte de ciment/granulat, dépend, d'une part, de la dispersion des caractéristiques mécaniques de la pâte de ciment et, d'autre part, du dispositif expérimental. Une étude statistique numérique quantifie la dépendance de la dispersion des réponses mécaniques d'un essai de traction directe à la position de fixations en acier servant à la traction de l'échantillon. Les résultats de cette étude sont comparés à des observations expérimentales.

Mots clés — échelle locale, traction directe, modélisation numérique, incertitude.

1 Introduction

La modélisation de la fissuration du béton nécessite de considérer la liaison entre la pâte de ciment et les granulats du béton, communément appelée interface ou auréole de transition [1]. Ce constat a motivé la mise en place d'essais mécaniques spécifiques en laboratoire à l'échelle dite locale [2]-[3] afin de caractériser et d'identifier le comportement mécanique d'une pâte de ciment pure et de l'interface pâte de ciment/granulat à partir d'un échantillon composite.

Il existe globalement deux manières de mettre un échantillon de ciment en traction : de façon indirecte ou de façon directe. Les essais de traction indirecte, comme l'essai brésilien (également appelé essai de fendage), sont généralement plus simples à mettre en place mais nécessitent des hypothèses souvent restrictives sur les dimensions des éprouvettes. Ces hypothèses font que de tels essais ne sont pas applicables à une petite échelle. Un moyen de lever les restrictions sur les dimensions des échantillons est de considérer un essai de traction directe.

Un dispositif expérimental de traction directe, a été développé dans le cadre du laboratoire commun MIST (IRSN/LMGC) dans le but d'identifier le comportement mécanique à la rupture de la pâte de ciment pure à l'échelle locale [3]. Une estimation de l'erreur de mesure imputable au positionnement des fixations en acier, servant à la traction de l'échantillon, lors de la mise en place des essais expérimentaux est proposée par une approche Éléments Finis. Les incertitudes expérimentales sur les essais sont prises en compte au travers d'hypothèses de modélisation des conditions aux limites. Les conclusions de l'étude numérique sont ensuite comparées aux mesures expérimentales.

2 Essai de traction directe sur une pâte de ciment à l'échelle locale

L'éprouvette de ciment est parallélépipédique, de section carrée de 10 mm de côté, et 30 mm de hauteur. Afin de la mettre en traction, quatre fixations en acier sont collées sur cette éprouvette comme illustré sur la Figure 1.

Le procédé de collage des fixations sur l'éprouvette permet de positionner les fixations avec une précision donnée suivant les trois directions portées par les vecteurs \vec{x} , \vec{y} et \vec{z} (voir Fig. 1.d). Bien que le positionnement des fixations soit relativement précis selon \vec{x} et \vec{y} , les fluctuations des positions selon

\vec{z} se trouvent être de l'ordre de grandeur des allongements à rupture des éprouvettes, soit un dixième de millimètre.

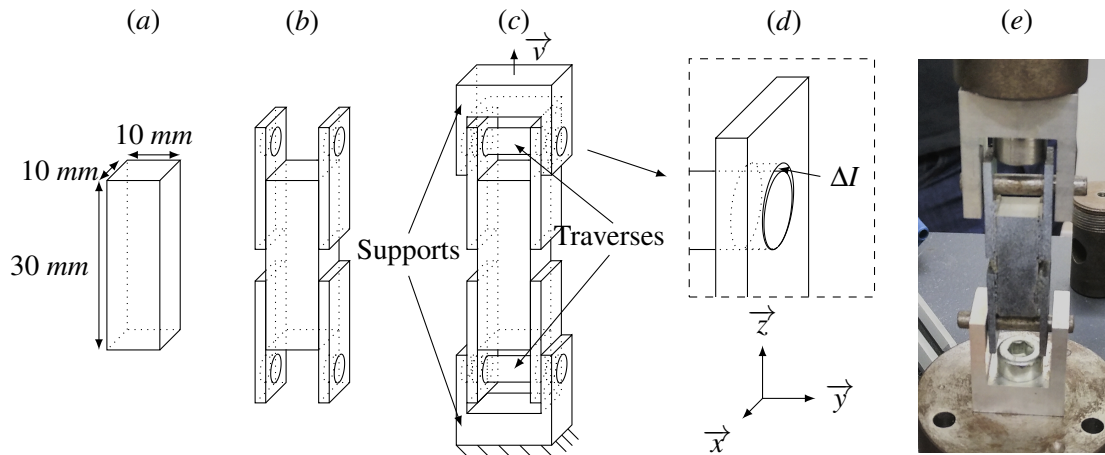


FIGURE 1 – (a) Géométrie des éprouvettes de ciment, (b) éprouvette de traction collée à quatre fixations en acier, (c) principe de l'essai, (d) zoom sur le jeu entre une fixation et une traverse et définition des directions \vec{x} , \vec{y} et \vec{z} et (e) photo d'une éprouvette montée sur le dispositif de traction directe.

Une dispersion des réponses force/déplacement de la machine de traction utilisée lors de ces essais (voir Fig. 2.a) est observée. On observe un comportement fragile des éprouvettes avec des faciès de rupture variables (voir Fig. 2.b).

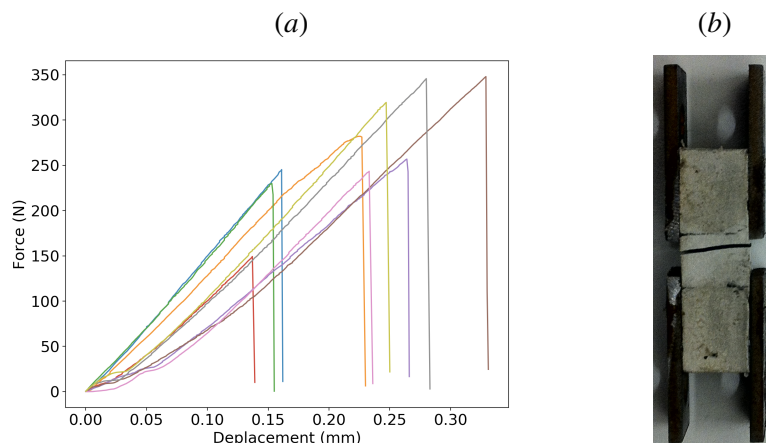


FIGURE 2 – (a) Réponses expérimentales obtenues sur neuf essais de traction directe sur une pâte de ciment pure à 90 jours d'hydratation et (b) faciès de rupture d'une éprouvette de pâte de ciment en traction directe.

L'origine de la dispersion peut être imputable à divers facteurs :

- une dispersion des caractéristiques mécaniques de la pâte de ciment ;
- une dispersion des caractéristiques mécaniques de la colle servant à lier les fixations en acier à l'éprouvette ;
- une dispersion de la géométrie des zones réellement collées ;
- une dispersion du positionnement des fixations relativement à l'éprouvette.

Il est nécessaire que des quatre sources de dispersion, seule la première ait un impact significatif sur la dispersion des réponses des essais de traction directe à l'échelle locale afin d'utiliser les réponses force/déplacement des essais de traction directe pour permettre une mesure de la dispersion des caractéristiques mécaniques de la pâte de ciment à l'échelle locale.

3 Modélisation des essais

L'étude développée dans cet article considère uniquement la partie réversible des essais (pré-rupture). L'acier et le ciment sont alors considérés parfaitement élastiques linéaires et isotropes et les modules élastiques sont donnés dans le Tableau 1. Cette étude n'ayant pas vocation à fournir des résultats quantitatifs précis et par soucis de simplification, le collage des fixations en acier est supposé parfait. Les simulations numériques menant aux résultats ci-après ont été réalisées avec le logiciel *LMGC90* [4] développé au LMGC.

TABLE 1 – Modules élastiques des différentes phases.

Phases	Ciment	Acier
Module d'Young	23 <i>GPa</i>	210 <i>GPa</i>
Coefficient de Poisson	0,2	0,3

On peut raisonnablement modéliser l'incertitude de positionnement des fixations selon \vec{z} en supposant que les coordonnées des centres des trous des fixations selon \vec{z} sont des variables aléatoires suivant une loi uniforme sur un intervalle I . La longueur de l'intervalle I correspond alors au jeu ΔI (voir Fig. 1.d) autorisé, durant le procédé de collage, sur la position des fixations selon \vec{z} . Le jeu est estimé à un dixième de millimètre par une mesure au pied à coulisse.

Une campagne de 1000 simulations numériques en déformations planes (2D) des essais de traction avec un tirage aléatoire des positions de fixations a été réalisée. Pour modéliser la mise en place progressive du contact entre les traverses et les fixations en acier, les simulations sont effectuées sur plusieurs pas de temps. Elles s'arrêtent lorsque l'allongement atteint la valeur de 0,1 *mm*, correspondant à l'ordre de grandeur de l'allongement à rupture observé expérimentalement. Pour chaque essai, les réponses mécaniques pré-rupture sont enregistrées. Les résultats numériques sont exposés dans la partie suivante.

4 Résultats numériques

La Figure 3 représente une illustration de la mise en place progressive du contact entre les fixations en acier et les traverses ainsi que les iso-valeurs de la déformation selon l'axe de traction au pas final obtenues pour une position non symétrique des fixations. On constate une concentration de la déformation sur le milieu droit de l'éprouvette (Figure 3.b).

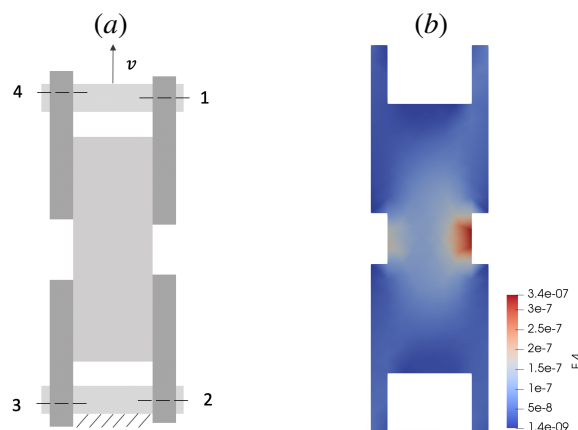


FIGURE 3 – (a) Illustration de la mise en place progressive du contact entre les fixations en acier et les traverses : les fixations 1 et 2 sont les premières à entrer en contact suivies de la fixation 3 puis de la fixation 4 (b) iso-valeurs de la déformation selon l'axe de traction obtenues pour une position non symétrique des fixations.

La dispersion des réponses mécaniques est étudiée au travers de deux variables : la force de traction obtenue au déplacement final F et l'énergie élastique accumulée durant l'essai w (voir Fig. 4). Bien

que le comportement des différentes phases soit linéaire, la réponse de l'essai est seulement linéaire par morceaux de par son caractère hyperstatique (a priori les fixations n'entrent pas toute en même temps en contact avec les traverses).

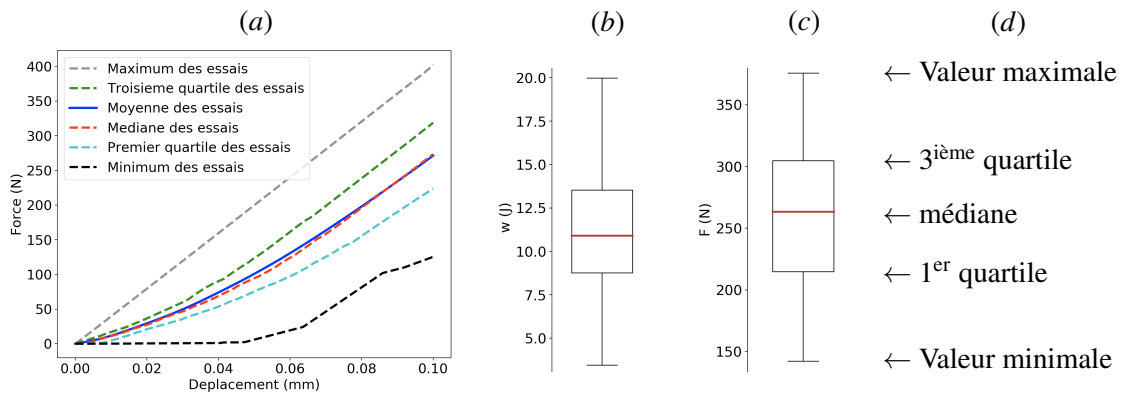


FIGURE 4 – (a) Statistique des réponses numériques des essais de traction, (b) statistique de l'énergie élastique accumulée lors de l'essai, (c) statistique de la force au déplacement final et (d) explication des diagrammes boîtes.

Les résultats montrent que la seule influence d'un défaut de positionnement des fixations peut entraîner des variations conséquentes sur les réponses mécaniques :

- La force mesurée au déplacement final varie de 142 à 376 N. L'écart interquartile de la force finale représente 35% de sa valeur médiane.
- L'énergie élastique accumulée durant l'essai varie de 3,4 à 20 J. L'écart interquartile de l'énergie élastique accumulée durant l'essai représente environ 45% de sa valeur médiane.

En utilisant le théorème central limite, il est possible d'estimer la précision sur la réponse moyenne des essais de traction. Cette réponse est obtenue en moyennant plusieurs essais expérimentaux. Plus le nombre d'essais utilisés pour calculer la réponse moyenne est important, plus la précision avec laquelle est calculée la moyenne est grande. La Figure 5 donne les résultats de cette étude.

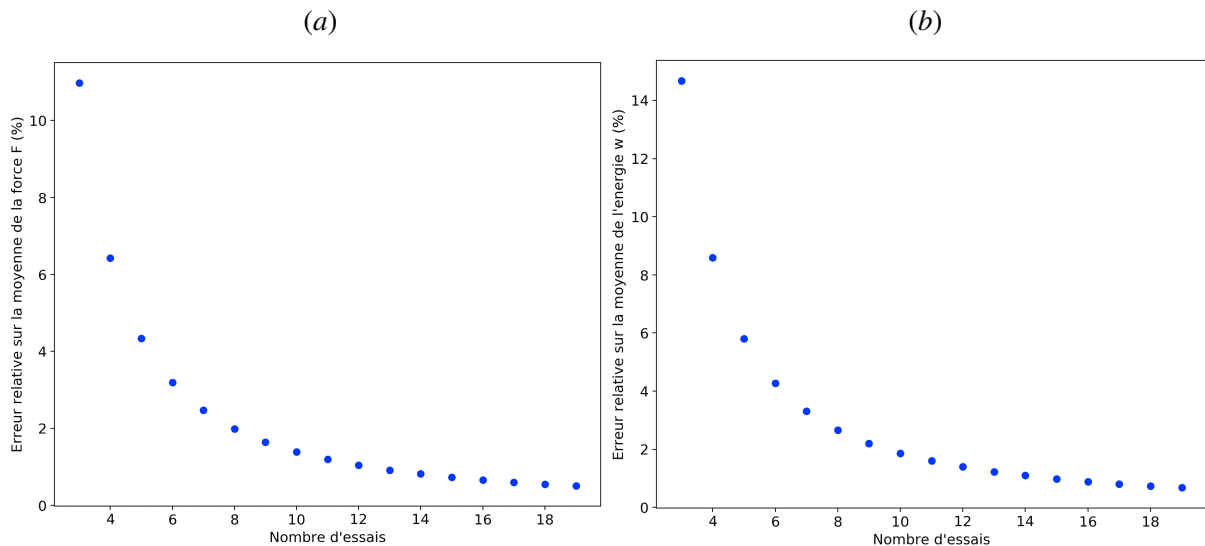


FIGURE 5 – En fonction du nombre d'essais effectués : (a) précision sur la moyenne de la force au déplacement final F , (b) précision sur la moyenne de l'énergie w élastique accumulée.

La préparation d'échantillons et la mise en place des essais de traction directe demande beaucoup de temps. Aussi, la base expérimentale actuellement disponible [3] ne permet de disposer que de trois essais par temps d'hydratation. Les moyennes sur trois essais de la force au déplacement final F et de l'énergie élastique accumulée w ne peuvent être estimées, respectivement, qu'avec une précision à 12% pour F et à 14% pour w . En revanche, une précision à moins de 2% pour F et w est estimée en effectuant la moyenne sur dix essais.

5 Comparaison aux résultats expérimentaux

La Figure 6 présente la dispersion de neuf essais expérimentaux à partir des statistiques de l'énergie élastique accumulée à un allongement de $0,1 \text{ mm}$ (Figure 6.b) ainsi que des statistiques de la force correspondant à un allongement de $0,1 \text{ mm}$ (Figure 6.c). Une variation d'environ 50% autour de la valeur médiane de la force à un allongement de $0,1 \text{ mm}$ ainsi qu'une variation d'environ 60% autour de la valeur médiane de l'énergie élastique accumulée à un allongement de $0,1 \text{ mm}$ sont observées.

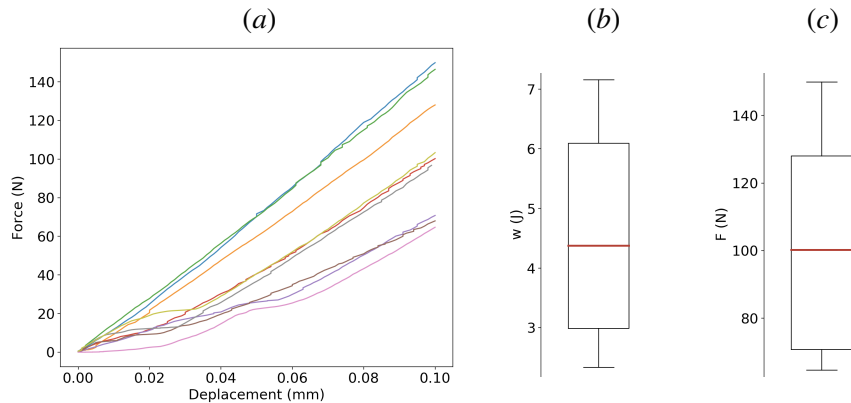


FIGURE 6 – (a) Réponses expérimentales obtenues sur neuf essais de traction directe sur une pâte de ciment à 90 jours d'hydratation, (b) statistique de l'énergie élastique accumulée et (c) statistique de la force au déplacement de $0,1 \text{ mm}$.

En considérant la préparation des éprouvettes comme seule source de dispersion, l'étude numérique a donné des variations du même ordre de grandeur que celles observées expérimentalement à savoir :

- une variation autour de la valeur médiane de la force à un allongement de $0,1 \text{ mm}$ d'environ 50% pour l'étude expérimentale contre 35% pour l'étude numérique ;
- une variation autour de la valeur médiane de l'énergie élastique accumulée à un allongement de $0,1 \text{ mm}$ d'environ 60% contre 45% pour l'étude numérique.

Ce constat montre que la mesure de la dispersion des caractéristiques mécaniques de la pâte de ciment à l'échelle locale ne peut pas être acquise par la simple donnée de la réponse force/déplacement d'une machine de traction. Néanmoins, des techniques de corrélation d'images pour le post-traitement des résultats expérimentaux, dont le recours a été développé au LMGC, notamment sur cet essai de traction directe [3], apporterait une information supplémentaire permettant potentiellement de réduire les incertitudes de mesure liées au collage des fixations.

La rigidité apparente obtenue numériquement est plus élevée que celle mesurée sur les réponses expérimentales. Cela est majoritairement dû à la présence des trous dans les fixations au niveau desquels les traverses viennent transmettre l'effort de traction. En effet, leur présence rend l'éprouvette non homogène dans son épaisseur. En déformations planes, les fixations ne sont pas trouées et le déplacement est imposé sur toute l'épaisseur des fixations, induisant une force apparente plus grande et donc une rigidité apparente plus grande.

6 Conclusion

Une étude numérique reposant sur une modélisation simplifiée d'un problème de rupture en traction directe d'éprouvettes de pâte de ciment à l'échelle locale a révélé que la précision du positionnement des fixations en acier sur les éprouvettes engendre une dispersion non négligeable des réponses enregistrées par la machine de traction. Ceci montre que les propriétés mécaniques de fissuration de la pâte de ciment pure à l'échelle locale ne peuvent être obtenues par la seule utilisation de la réponse force/déplacement d'une machine de traction. L'utilisation de techniques de corrélation d'images [5] permettrait, néanmoins, de réduire les incertitudes de mesures imputable au collage des fixations en acier sur l'éprouvette de pâte de ciment pure.

Une estimation de la précision avec laquelle la réponse mécanique moyenne des essais de traction peut être calculée permet de statuer sur la capacité de ces essais à déterminer des paramètres mécaniques moyens à l'échelle locale. Aussi, pour obtenir, à partir de ces essais de traction directe, une estimation des propriétés mécaniques élastiques moyennes de la pâte de ciment à l'échelle locale avec une précision à moins de 2%, il faut effectuer une moyenne sur au moins dix essais. Actuellement, trois essais sont disponibles. Il faut donc prendre en compte une erreur de plus de 12%. Cette incertitude doit être considérée dans l'identification des propriétés élastiques et des paramètres à rupture.

Des essais de flexion trois points à l'échelle locale sont actuellement en cours de développement. Leur caractère isostatique devrait mener à une quasi-annulation de la dispersion des résultats expérimentaux directement imputable à la mise en place des essais. Une attention particulière est portée sur ces essais pour rendre leur modélisation la plus aisée possible.

Références

- [1] D. Keinde et al. *Effect of the interfacial transition zone and the nature of the matrix-aggregate interface on the overall elastic and inelastic behavior of concrete under compression : a 3D numerical study*, European Journal of Environmental and Civil Engineering, Taylor & Francis, 1167-1176, vol. 18, 2014.
- [2] B. Mielniczuk et al. *Characterization of behavior and cracking of a cement paste confined between spherical aggregate particles*, Cement and Concrete Research, Elsevier, 235-242, 2016.
- [3] M. Jebli et al. *Experimental characterization of mechanical properties of the cement-aggregate interface in concrete*, Construction and Building Materials, Elsevier, 16-25, 2018.
- [4] F. Dubois et al. *LMGC90*, 10^{ième} Colloque National en Calcul des Structures, Giens, 2011.
- [5] A. Chrysochoos et al. *Fields of stored energy associated with localized necking of steel*, Journal of Mechanics of Materials and Structures, mathematical sciences publishers, 245-262, 2009.