

# Résistance cohésive des bétons en dynamique rapide

B. ERZAR / CEA – Gramat

P. FORQUIN / Laboratoire Sols, Solides, Structures, Risques, UMR 5521 CNRS – Université Joseph Fourier – Grenoble INP, Grenoble

La simulation numérique constitue aujourd'hui un outil d'intérêt majeur pour évaluer la réponse de structures face à des agressions comme le souffle ou un impact. Les travaux présentés dans cet article visent à améliorer la modélisation de l'endommagement dynamique du béton à partir de la description des mécanismes activés et des spécificités liées à sa nature hétérogène. Tout d'abord, des essais d'écaillage ont été réalisés. Ils ont permis de générer des endommagements partiels pour plusieurs éprouvettes qui ont ensuite été évalués par des essais de traction quasi-statique. Enfin, un modèle d'endommagement, basé sur la description des mécanismes activés au cours de la fragmentation des matériaux fragiles, a été modifié pour prendre en compte la résistance cohésive liée à la présence des granulats.

L'endommagement et la rupture dynamique des bétons sont aujourd'hui encore mal compris. En effet, le manque de données expérimentales affecte la qualité des modèles et limite les capacités prédictives des simulations pour des structures subissant des sollicitations rapides et intenses. Dans des travaux précédents [1,2], l'influence de la saturation en eau et de la vitesse de déformation sur la résistance en traction des bétons ont été investigués. Dans la littérature, on ne trouve que très peu de données sur le comportement postérieur au pic de contrainte en dynamique. Il est pourtant nécessaire d'étudier quantitativement la résistance de cohésion des bétons à haute vitesse

de déformation afin de disposer d'une modélisation fiable de l'endommagement dynamique.

## Étude expérimentale de la résistance cohésive du béton en régime dynamique

Deux bétons, présentant des mésostructures différentes, ont été soumis à un chargement de traction dynamique. L'essai d'écaillage aux barres de Hopkinson [1] a été utilisé pour solliciter des éprouvettes à différents niveaux de chargement, permettant d'initier des dommages plus ou moins importants. Dans cet essai, une onde élastique de compression est transmise à l'éprouvette de béton placée au bout de la barre de Hopkinson. Cette impul-

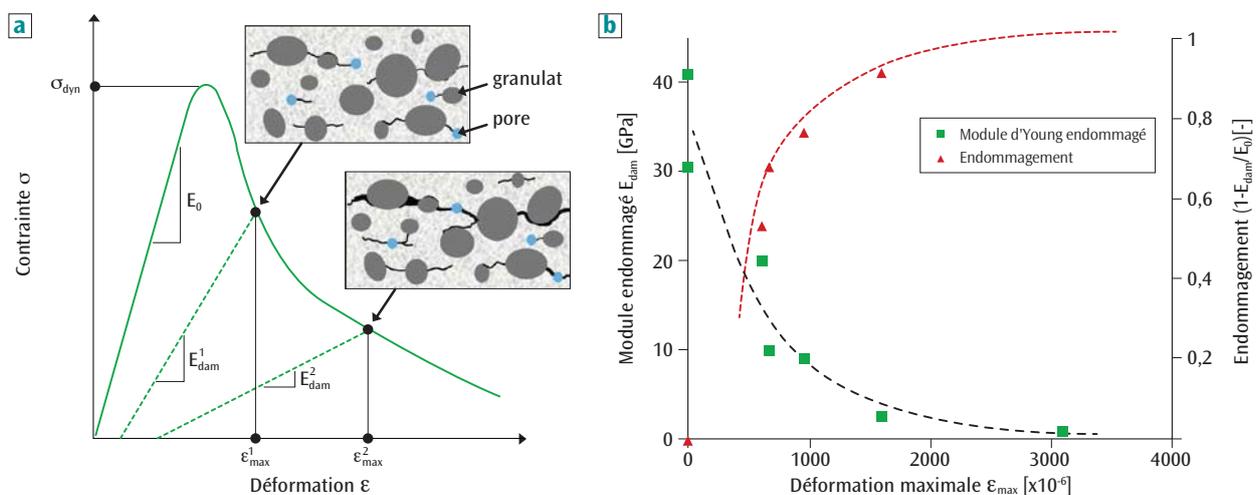


Figure 1.

(a) Comportement en traction dynamique d'un béton et (b) résultats expérimentaux obtenus sur des éprouvettes endommagées par un chargement dynamique [3].

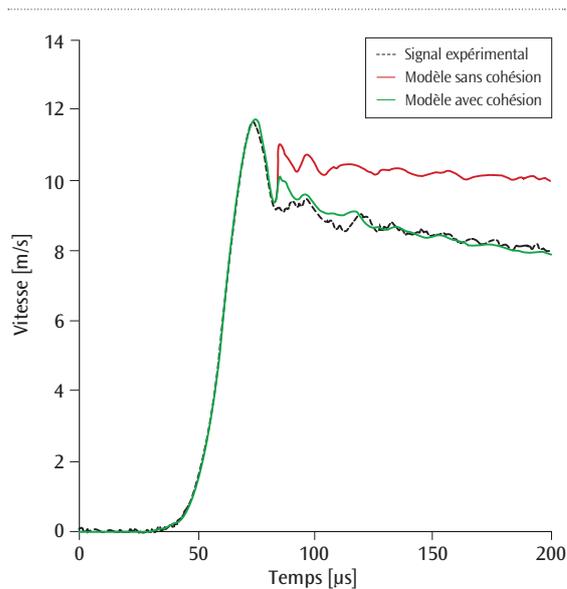


Figure 2. Comparaison expérience-calcul du profil de vitesse mesuré sur la surface libre (essai sur béton séché,  $\dot{\epsilon} = 135 \text{ s}^{-1}$ ) [3].

sion est réfléchi sur la surface libre et entraîne l'apparition de contraintes de traction à des vitesses de déformation comprises entre 20 et 180  $\text{s}^{-1}$ . L'instrumentation, composée de jauges de déformation et d'une mesure de vitesse de la surface libre par interférométrie, permet de déterminer la célérité des ondes élastiques dans le béton, donc le module d'Young, mais aussi la contrainte maximale atteinte au cours de l'essai et la vitesse de déformation dans la zone endommagée.

Lors des essais réalisés aux plus faibles vitesses de déformation (de 20 à 60  $\text{s}^{-1}$ ), les éprouvettes ont été récupérées endommagées mais non rompues par le chargement de traction dynamique. Des essais de traction quasi-statique ont ensuite été conduits sur ces éprouvettes, permettant de mesurer des pertes locales de raideur dans les zones endommagées [3]. Ces données (figure 1) montrent que le niveau d'endommagement est directement lié à la déformation maximale atteinte durant l'essai d'écaillage. Malgré des tailles maximales de granulats différentes, les deux bétons montrent des résistances de cohésion similaires [3].

### Modélisation de la rupture dynamique des bétons

Les données expérimentales de la figure 1 montrent que le béton, sollicité en traction dynamique, ne se comporte pas comme un matériau fragile. Les multiples fissures initiées par le chargement dynamique trouvent de nombreux obstacles sur leur chemin. Les granulats, par un phénomène de pontage (figure 1a), contribuent à résister à l'ouverture des fissures. Ainsi, pour rompre une éprouvette de béton en dynamique, il faut atteindre une déformation 5 fois supérieure à celle correspondant au pic de contrainte.

Si l'initiation, la propagation de fissures et l'occultation de défauts sont bien décrits par le modèle de Denoual-Forquin-Hild [4,5], un ingrédient supplémentaire doit être ajouté pour décrire la résistance cohésive du milieu endommagé. Ce terme, dépendant de la vitesse de déformation et piloté par la déformation du béton, est activé lorsque l'endommagement est initié. L'identification des paramètres additionnels est réalisée à partir d'essais d'écaillage menés à des vitesses de déformation de l'ordre de 50  $\text{s}^{-1}$ . Le modèle est ensuite confronté à d'autres essais menés à des vitesses supérieures (figure 2). L'ajout de cohésion permet d'améliorer la restitution par la simulation numérique de mesures locales (déformations, vitesse) et de l'endommagement des éprouvettes de béton [3].

### Conclusion

Afin d'améliorer la compréhension du comportement dynamique des bétons, des essais d'écaillage ont été réalisés se soldant pour certains par un endommagement partiel des éprouvettes. Des essais de traction quasi-statique ont permis de quantifier le niveau d'endommagement résultant du chargement dynamique, montrant que le béton résiste en dynamique à des déformations très largement supérieures à celles menant à sa rupture en quasi-statique. Pour prendre en compte ces spécificités liées à la nature hétérogène des bétons, un terme de cohésion a été ajouté à un modèle dédié à la fragmentation des matériaux fragiles. La restitution des essais par simulation a ainsi été notablement améliorée en reproduisant correctement l'évolution de comportements locaux et le faciès d'endommagement multi-fissuré d'éprouvettes de bétons.

### Références

- [1] B. ERZAR, F. FORQUIN, "An experimental method to determine the tensile strength of concrete at high rates of strain", *Experimental Mechanics*, 50, p. 941-955 (2010).
- [2] B. ERZAR, F. FORQUIN, "Experiments and mesoscopic modelling of dynamic testing of concrete", *Mechanics of Materials*, 43, p. 505-527 (2011).
- [3] B. ERZAR, F. FORQUIN, "Analysis and modelling of the cohesion strength of concrete at high strain-rates", *International Journal of Solids and Structures*, 51, p. 2559-2574 (2014).
- [4] C. DENOUAL, F. HILD, "A damage model for the dynamic fragmentation of brittle solids", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 183, p. 247-258 (2000).
- [5] F. FORQUIN, F. HILD, "A probabilistic damage model of the dynamic fragmentation process in brittle materials", *Advances in Applied Mechanics*, 44, p. 1-72, (2010).