

Etude du comportement dynamique d'un mortier et d'un béton en traction indirecte

X. Régat, J.-L. Hanus

INSA-CVL, Univ. Orléans, PRISME, EA 4229, 88 Bd Lahitollle, 18 020 Bourges Cedex

Téléphone : 02 48 48 40 00, Télécopie : 02 48 48 40 50

xavier.regat@insa-cvl.fr, jean-luc.hanus@insa-cvl.fr

Mots clés : Béton, Corrélation d'Images Numériques, Dynamique, Flexion trois points, Fissure

1 INTRODUCTION

Les analyses de risque portant sur des installations industrielles conduisent à étudier la vulnérabilité de structures à des actions accidentelles du type explosion ou impact de projectiles. Les effets d'impact, initialement ignorés dans les études des dangers, doivent désormais être pris en compte dans l'évaluation des «*effets dominos générés par les fragments sur des installations et équipements proches*» [MEDDE (2010)]. Nombre de ces installations, comme des entrepôts de stockage ou des enceintes de protection, ont pour matériau constitutif le béton. Il apparaît donc important de connaître le comportement du béton face à ces sollicitations dynamiques extrêmes pouvant induire de fortes vitesses de déformation. Les observations expérimentales mettent en évidence une augmentation de la résistance en traction du béton avec la vitesse de sollicitation [Malvar et Crawford (1998)] mais la quantification de cette résistance reste un sujet ouvert [Weerheijm et Doormaal (2007)], [Erzar et Forquin (2010)]. L'objet de ce travail est ainsi d'investiguer expérimentalement cet effet de vitesses au moyen d'un des essais les plus simples à réaliser tant en statique qu'en dynamique : l'essai de flexion trois points. En plus des mesures habituelles de force, de déplacement ou de vitesse et de déformation par jauges, les essais ont été suivis avec une caméra rapide pour permettre une analyse par corrélation d'images.

2 ESSAIS DE FLEXION TROIS POINTS SUR POUTRE EN MORTIER ET EN BETON

2.1 Caractéristiques des échantillons

Il est question ici d'essais de flexion trois points réalisés sur des éprouvettes prismatiques normalisées non entaillées de dimension $L \times h \times b = 160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$, avec une portée L_a de 120 mm. Un mortier et un béton (R30A7,5) ont été testés. Les caractéristiques moyennes des échantillons, déduites de pesées hydrostatiques et de mesures de fréquence de résonance, sont reportées dans le tableau 1.

	E [GPa]	écart type	ρ [kg/m ³]	écart type
Béton	43,33	0,33	2361	7
Mortier	27,92	0,76	2127	30

TABLE 1 – Caractéristiques matérielles des éprouvettes utilisées

2.2 Corrélation d'Images Numériques (CIN)

Les propriétés matérielles des échantillons sont souvent déduites de mesures mécaniques qui sont locales : extensomètre, jauge. Ces mesures sur des matériaux hétérogènes et pour des essais dans lesquels les champs sont eux-même hétérogènes rend leur interprétation délicate. Dès lors, l'utilisation de techniques expérimentales rendant accessible l'ensemble d'un champ sur une surface doit nous conduire à mieux analyser nos essais. L'ensemble des essais a ainsi été suivi à l'aide d'une caméra rapide (Photron Fastcam SA5 N&B). La corrélation d'images numériques a été réalisée à l'aide du logiciel Icasoft [Touchal et al. (1996)]. Pour l'ensemble des essais la taille du motif retenu est de $20 \times 20 \text{ px}^2$. En effet dans ces conditions il est possible d'avoir plus d'une dizaine de motifs sur la plus petite dimension tout en assurant une mesure du déplacement précise à 2×10^{-2} pixel. La taille d'un pixel variant de 133 à 159 $\mu\text{m}/\text{px}$ pour les essais statiques et de 196,08 à 198,02 $\mu\text{m}/\text{px}$ pour les essais dynamiques, nous avons ainsi un déplacement connu avec une précision de $\pm 2,66 \mu\text{m}$ jusqu'à $\pm 3,96 \mu\text{m}$ en fonction des essais.

3 ESSAIS DANS LE DOMAINE QUASI-STATIQUE

Les essais de flexion trois points sont pilotés en déplacement imposé. En plus des informations de force et de flèche, une mesure de déformation est obtenue au moyen d'une jauge collée en position centrale sur la face inférieure de l'échantillon. Cette mesure nous permet de tracer l'évolution des contraintes (déterminées à partir de la mesure de l'effort $\sigma = \frac{3F}{bh^2} \frac{L_a}{2}$) en fonction des déformations.

De ces mesures, nous déduisons : le module d'Young, la contrainte à la perte de linéarité de la réponse (notée σ_y) déterminée, pour une déformation de 5μ et la résistance à la flexion (notée σ_u) déduite de la charge maximale.

Initiation de la fissuration

La corrélation d'images nous permet de mettre en évidence le comportement en flexion élastique (champ de déplacement antisymétrique, cf. figure (1)) avant la rupture ainsi que de détecter l'apparition de la fissuration.

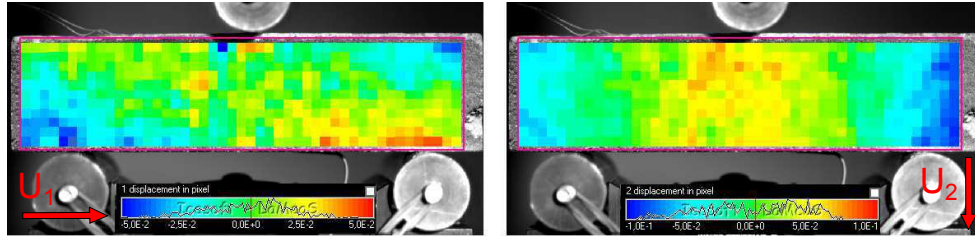


FIGURE 1 – Champs de déplacement obtenus à l'aide de la CIN

On considère que la fissuration va débuter avec la fin du comportement élastique du matériau. Celle-ci va se traduire par la perte d'antisymétrie observée sur le champ de déplacement longitudinal (U_1). Il est donc proposé de suivre l'évolution de l'indicateur suivant, portant sur la différence des champs de déplacement longitudinaux entre fibre supérieure et fibre inférieure, au cours du chargement :

$$Ind = \frac{1}{n_c} \sum_{i=1}^{n_c} |U_1(i, 1) - U_1(i, n_l)| \quad (1)$$

où n_c et n_l représentent respectivement le nombres de motifs dans les directions longitudinales et transversales. La croissance brutale de la valeur de cet indicateur révèle l'initiation de la fissuration.

Identification du module d'Young

L'exploitation du champ de déplacement déduit de la CIN a également permis d'identifier le module d'Young par recalage éléments-finis en minimisant l'écart, au sens des moindres carrés, entre les champs de déplacement mesurés et ceux simulés [Kavanagh et Clough (1971)]. Cette démarche a été mise en place au sein du code Cast3m pour des essais de flexion trois points, la minimisation se faisant à l'aide de l'algorithme de Gauss-Newton. Malgré les faibles déplacements mesurés ($\approx 100 \mu m$ pour la flèche) cette méthode nous a permis de déterminer le module d'Young (E_{FEMU}) de manière très satisfaisante vis à vis d'autres méthodes (voir tableau 2).

Essai N°	$\dot{\epsilon} [s^{-1}]$	σ_y [MPa]	σ_{rupt} [MPa]	E_{reso} [GPa]	E_{jauge} [GPa]	E_{FEMU} [GPa]
Béton 1	$2,4 \times 10^{-6}$	5,48	7,89	43,25	44,61	/
Béton 2	$1,1 \times 10^{-6}$	5,53	5,53	43,06	42,93	/
Béton 3	$4,3 \times 10^{-6}$	5,37	8,99	43,46	45,10	44,05
Mortier 1	$2,6 \times 10^{-6}$	5,53	7,43	/	28,82	26,82
Mortier 2	$5,9 \times 10^{-6}$	5,40	8,34	27,71	29,04	26,12

TABLE 2 – Synthèse des essais quasi-statiques

4 ESSAIS DANS LE DOMAINE DYNAMIQUE

Les essais sont effectués à l'aide du dispositif des barres de Hopkinson dans une configuration d'essai de flexion 3 points [Delvare et al. (2010)]. La figure (2) montre le dispositif utilisé lors des essais en flexion trois points. Le jeu de barres utilisées a pour matériau constitutif un nylon ($E = 3,3$ GPa et $\rho = 1150$ kg/m³). Les jauges, montées sur les barres entrantes et sortantes, permettent de mesurer les ondes incidentes, réfléchies et transmises et d'en déduire la force et la vitesse aux interfaces échantillon/barres. Il est à noter qu'en l'absence de *pulse-shaper* l'échantillon demeure hors d'état d'équilibre.

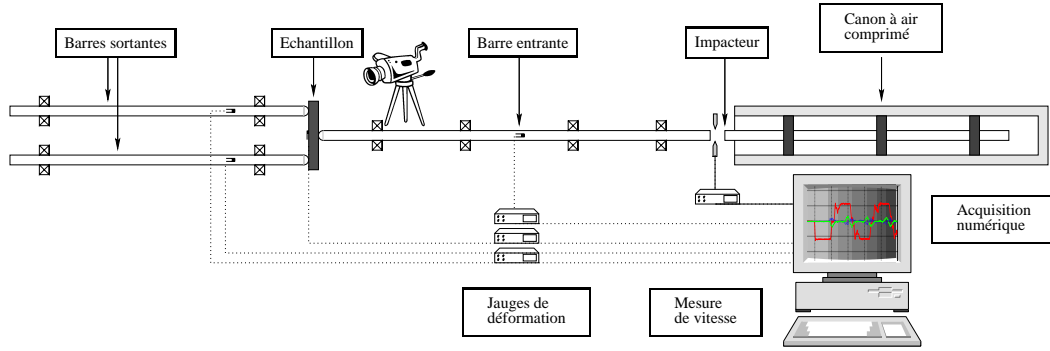


FIGURE 2 – Dispositif des barres de Hopkinson pour la flexion trois points

Suivi de la fissuration

L'indicateur proposé pour détecter l'apparition de la fissuration sous chargement statique a été également mis en œuvre dans le cadre des essais dynamiques. Le suivi de l'essai réalisé avec une plus grande fréquence d'acquisition nous permet de suivre l'évolution de la fissuration sur plusieurs images. Les figures (3(a)) et (3(b)) nous permettent de comparer les évolutions simultanées du critère d'une part et d'autre part de la déformation mesurée à l'aide d'une jauge et déterminée à l'aide des champs de déplacements issus de la CIN. On remarque que ce critère permet de détecter l'apparition de la rupture au même instant que la jauge (décharge ou changement de pente). Tandis que la déformation issue de la CIN, malgré une bonne similitude avec celle de la jauge, ne nous permet pas de distinguer nettement ce changement de pente.

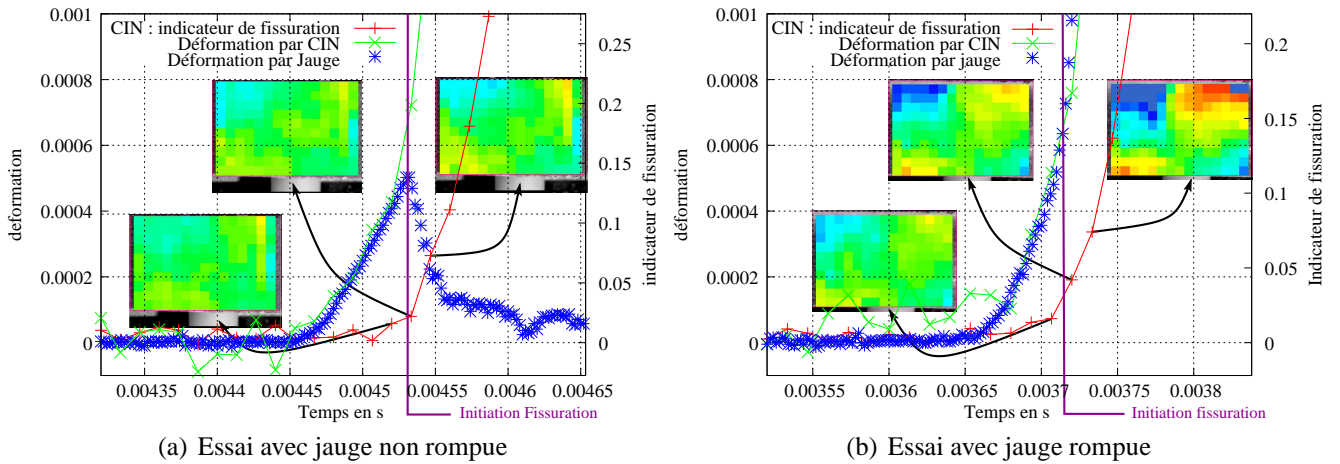


FIGURE 3 – Évolutions temporelles de l'indicateur de fissuration et de la déformation longitudinale

5 EXPLOITATION DES RESULTATS

Les mesures réalisées en statique et en dynamique nous permettent de déterminer la limite de non linéarité σ_y de la réponse à partir des mesures de jauges de déformation confirmées par les mesures issues de la CIN. Nous disposons d'un moyen de vérification supplémentaire pour les essais dynamiques en faisant appel aux mesures issues des jauges montées sur les barres qui nous informent des conditions aux limites tant en déplacement qu'en effort. Des simulations numériques sont réalisées qui utilisent comme données d'entrée soit les efforts, soit les déplacements. L'instant d'apparition de la fissuration, qui est également celui de validité des simulations élastiques, est déterminé par la perte de conformité entre les simulations à effort imposé et celles à déplacement imposé (voir figure 4).

Il est ainsi possible de mettre en évidence l'augmentation de la valeur de la contrainte au seuil de non-linéarité avec la vitesse (voir figure 5).

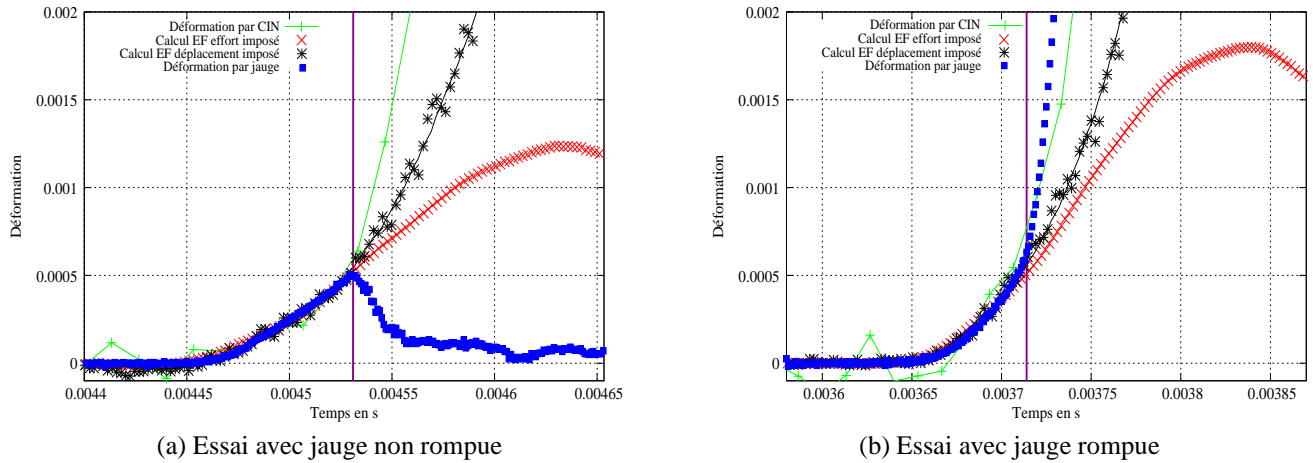


FIGURE 4 – Comparaison des déformations longitudinales entre expérience et simulation

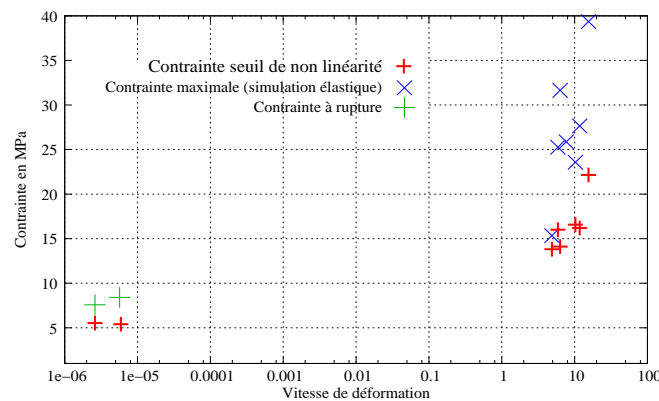


FIGURE 5 – Sensibilité à la vitesse de la réponse du mortier

6 CONCLUSIONS

Une procédure pour étudier la résistance en traction du béton est proposée. Elle repose sur des essais de flexion trois points équivalents en statique et en dynamique. L'utilisation de la corrélation d'images numériques permet d'une part de disposer de mesures redondantes pour confirmer la validité des procédures de dépouillement et d'autre part d'offrir de nouvelles données pour l'identification et/ou la validation de modèles numériques. Un premier résultat est que pour les matériaux étudiés, l'instant d'initiation de la rupture peut précéder de manière significative celui du maximum de l'effort.

7 REMERCIEMENTS

La région Centre est remerciée pour le soutien financier à cette étude dans le cadre du projet IMFRA2.

REFERENCES

- [Delvare et al. (2010)] Delvare F., Hanus J.L., Bailly P., *A non-equilibrium approach to processing Hopkinson Bar bending test data : Application to quasi-brittle materials*, International Journal of Impact Engineering, Volume 37, Issue 12, pp. 1170-1179, 2010
- [Erzar et Forquin (2010)] Erzar B. and P. Forquin P., "An experimental method to determine the tensile strength of concrete at high rates of strain". *Exp. Mech.*, 50 :941–955, 2010.
- [Kavanagh et Clough (1971)] Kavanagh K. T. and Clough R. W. (1971). "Finite element applications in the characterization of elastic solids". *Int. J. Solids Structures*, 7 :11–23, 1971.
- [Malvar et Crawford (1998)] Malvar L.J. and J.E Crawford. J.E., Dynamic increase factors for concrete. In *28th Department of Defense Explosives Safety Seminar*, Orlando, FL, 1998.
- [MEDDE (2010)] MEDDE, "Circulaire du 10 mai 2010 récapitulant les règles méthodologiques applicables aux études de dangers [.../...]" NOR : DEVP1013761C, 2010.
- [Touchal et al. (1996)] Touchal S. and Morestin F. and Brunet M., "Mesure de champs de déplacements et de déformations par corrélation d'images numériques". *Actes du Colloque National Mécamat 96*. Aussois, 179–182, 1996.
- [Weerheijm et Doormaal (2007)] Weerheijm J. and Van Doormaal J.C.A.M., "Tensile failure of concrete at high loading rates : New test data on strength and fracture energy from instrumented spalling tests". *International Journal of Impact Engineering*, 34 (3) : 609–626, 2007.