

# Modélisation de la rupture d'un béton armé par essai de flexion

Sébastien Richomme, Franck Delvare, Patrice Bailly, Guy Mavrothalassitis

► **To cite this version:**

Sébastien Richomme, Franck Delvare, Patrice Bailly, Guy Mavrothalassitis. Modélisation de la rupture d'un béton armé par essai de flexion. 17. Congrès Français de Mécanique (CFM'05), Aug 2005, Troyes, France. pp.NC, 2005. <ineris-00972499>

**HAL Id: ineris-00972499**

**<https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00972499>**

Submitted on 3 Apr 2014

**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.

# Modélisation de la rupture dynamique d'un béton armé par essai de flexion

Sébastien Richomme\*, Franck Delvare\*, Patrice Bailly\* , Guy Mavrothalassitis+

\*Laboratoire Energétique Explosions Structures, Université d'Orléans, ENSI de Bourges

+Institut National de l'Environnement industriel et des Risques

\*\*10 Bd Labitolle, 18020 Bourges Cedex

## Résumé :

*Le dispositif des barres de Hopkinson permet des sollicitations présentant de grandes vitesses de déformation. Les dépoillements classiques ne peuvent pas représenter la rupture dynamique par flexion trois points d'éprouvettes de béton ou de béton armé. Une modélisation originale est donc introduite pour analyser ces essais. Nous présentons ici cette méthode ainsi que les résultats obtenus pour une éprouvette de béton armé.*

## Abstract :

*The bending dynamical test with Split Hopkinson Pressure Bars is a good means to understand the dynamical behaviour of reinforced concrete beams. However, the traditional analyses of the signals cannot represent the dynamical rupture by three-point flexion of concrete or reinforced concrete beams. This article presents a new method to analyse the measurements of the obtained forces and their results for a reinforced concrete beam.*

## Mots clefs :

**Béton armé, flexion dynamique, barres de Hopkinson**

## Introduction

Dans le but de représenter le processus d'effondrement d'un bâtiment en béton armé, une connaissance précise des mécanismes de rupture et du comportement post-critique est nécessaire. A cette fin, le comportement en flexion d'une poutre en béton armé soumise à un chargement dynamique est important à caractériser. L'essai aux barres de Hopkinson [1, 2] à deux barres sortantes permet de solliciter des éprouvettes dans une gamme de vitesse adéquate. L'essai de compression, avec ce dispositif dans sa forme classique, sur des éléments de béton est maintenant bien connu [3]. Celui-ci a concouru à mettre en évidence le comportement dynamique original du matériau [4]. Le dispositif à deux barres sortantes, permettant des sollicitations de flexion, est rarement utilisé et a donc fait l'objet de peu d'études. En utilisant cette technique, il s'est avéré qu'un dépoillement classique ne pouvait être envisagé, rendant nécessaire la mise en place d'une analyse spécifique. Nous présentons dans cette communication le principe du dépoillement et les résultats obtenus pour un élément de béton armé. Ces travaux s'intègrent dans une étude plus globale [5] comprenant en particulier des essais de flexion statique, qui a permis, entre autres, la mise en valeur de l'influence de la vitesse de déformation.

## 1 Les moyens expérimentaux

### 1.1 Les corps d'épreuve

La composition des éprouvettes est présentée dans le tableau 1. Le matériau utilisé est donc un micro-béton dont la taille du plus gros agrégat est de l'ordre de 2 mm. La masse volumique moyenne des éprouvettes est 2320 kg/m<sup>3</sup>.

Composants	Sable 0/2	Sablon	Eau	Fumée de silice	Ciment		Fluidifiant
Pourcentage pondéral	51.6	9.2	11.5	5.5	22.1		0.23% de la masse de ciment

FIG.1-Composition du matériau testé

Les éprouvettes utilisées sont des éléments poutres en béton et en béton armé (figure 2). Ces éprouvettes sont des parallélépipèdes longs de 160 millimètres, larges de 40 mm et épais de 40 mm. Le choix des dimensions a été déterminé par le choix d'une éprouvette de petite taille mais de dimension cohérente avec une certaine idée de la représentativité, surtout concernant le renforcement en acier, et par la facilité de mise en œuvre. Les fils d'acier composant l'armature en cage, ont un diamètre de 3 mm.



FIG.2 – Epreuve de béton armé présentée avec son armature

## 1.2 Le dispositif d'essai

Nous utilisons pour effectuer les essais dynamiques le dispositif de Kolsky-Hopkinson. Dans sa configuration classique de compression, une éprouvette est placée entre deux barres. Un impacteur frappe la barre entrante et induit ainsi, un train d'onde de compression dans celle-ci. A l'interface barre-échantillon, une partie de l'onde est réfléchié tandis que l'autre est transmise dans la seconde barre (barre sortante). Les ondes de déformation sont mesurées au moyen de pont de jauges. L'analyse de ces signaux nécessite quelques précautions comme un calage précis des ondes et l'application d'une correction de dispersion [6]

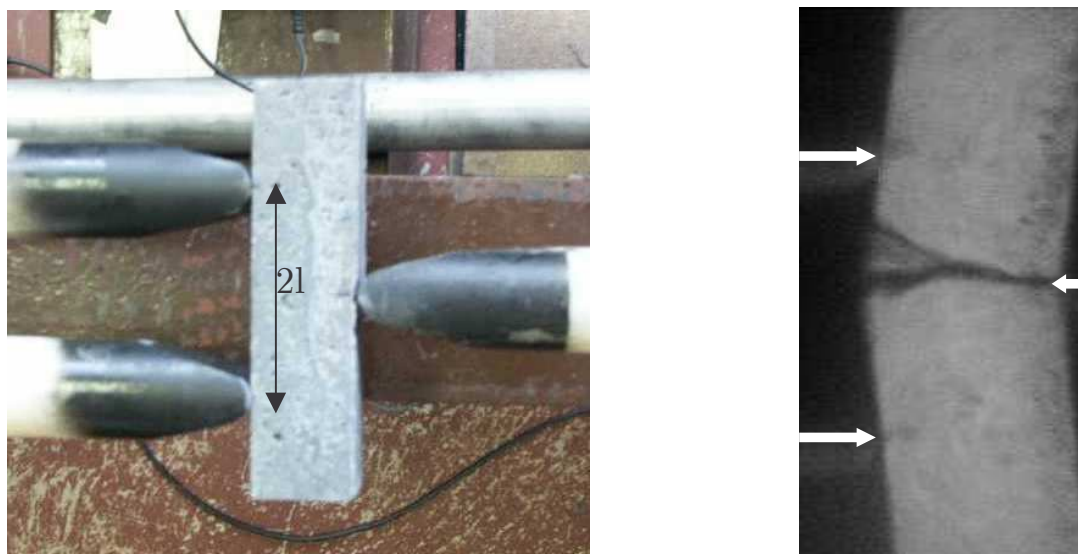


FIG.3- Dispositif de flexion dynamique aux barres de Hopkinson

Pour réaliser les essais de flexion dynamique aux barres de Hopkinson, la barre sortante est remplacée par deux barres sortantes (figure 3). Ce dispositif est similaire à un système de flexion trois points classique. L'éprouvette repose sur les deux barres sortantes qui servent d'appuis et, la barre entrante vient la solliciter en son centre. Avant l'essai, l'éprouvette est juste maintenue en suspension par la pression des trois barres. Un ressort pré-tenseur, situé sur la barre entrante, applique une pré-charge de faible intensité, afin d'éviter tout glissement de l'éprouvette.

Les signaux de déformations sont mesurés de manière traditionnelle sur les trois barres. Nous obtenons deux ondes transmises. Les essais ont été menés grâce au dispositif, composé de barres de nylon, du laboratoire de mécanique du solide (LMS) de l'Ecole Polytechnique. Le choix du matériau des barres est conditionné par des raisons d'impédance acoustique. La figure 3 présente une photographie de l'éprouvette en position, avant l'essai et, une autre prise lors d'un essai dynamique sur une éprouvette de béton armé. Pour des nécessités de visualisation, les barres sont repérées par les flèches blanches sur l'image de droite, image extraite du film d'un essai réalisé au moyen d'une caméra rapide (1000 images/secondes).

## 2 Résultats expérimentaux

Lors de ces essais réalisés avec le dispositif visible sur la figure 3, nous mesurons les forces et les vitesses aux interfaces barre-éprouvette. Nous déterminons donc la force entrante mais contrairement au dispositif de compression dynamique, nous obtenons deux forces sortantes. Après étude de ces deux signaux, il apparaît que ceux-ci sont identiques. Ces derniers présentent les forces entrantes et sortantes pour deux distances entre appuis ( $2l=60$  mm et  $2l=140$  mm). Ces valeurs représentent la distance minimale et la distance maximale entre appuis. Ces longueurs sont imposées par des considérations matérielles. En effet, l'éprouvette testée est longue de 160 mm donc 140 mm est la longueur maximale entre appuis qu'il nous paraît opportun de respecter. La plus petite distance possible entre les deux barres sortantes du dispositif est 60 mm.

Dans le cas où la distance entre appuis est la plus faible (figure 4-a), la valeur maximale de la force entrante est le double de la valeur maximale de la force sortante. Si on admet l'écart temporel comme dû aux effets de propagation des ondes, on peut dire que la force sortante vaut la moitié de la force entrante. Nous retrouvons ainsi le résultat classique des essais de flexion statique : la valeur des forces aux appuis est égale à la moitié de la force au centre. Nous admettons qu'il y a, dans ce cas, un équilibre quasi-statique des forces, et donc que l'exploitation se fera comme lors d'essais statiques.

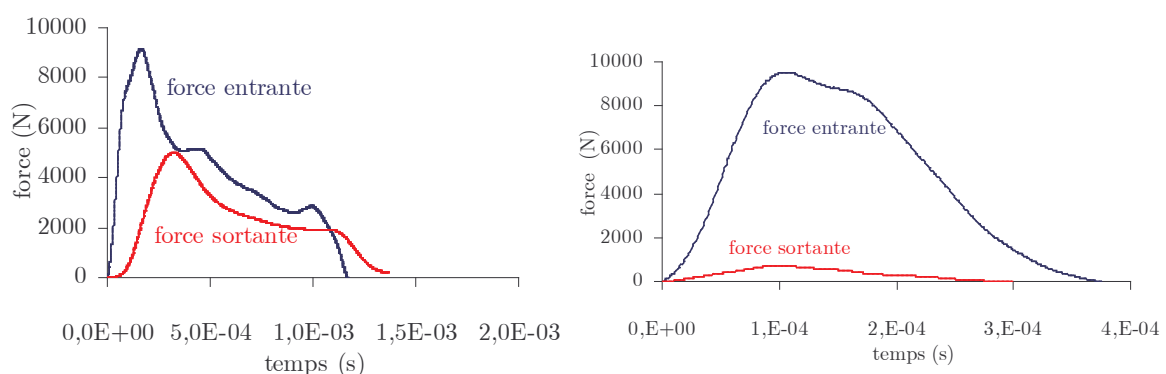


FIG.4 - Influence de la distance entre supports((a)  $2l=60$  mm, (b)  $2l=140$  mm)

Lorsque la distance entre appuis est la plus longue ( $2l=140$  mm), le rapport des forces est très différent (figure 4-b). La valeur maximale de la force entrante est approximativement la même que dans l'autre configuration et la première partie de la courbe est similaire mais, dans ce cas la force entrante s'annule plus vite ( $t=3.5 \cdot 10^{-4}$  s au lieu de  $t=1.2 \cdot 10^{-3}$  s). De plus, les valeurs de la force sortante restent très faibles, la valeur maximale de la force sortante ne dépasse pas 1000 N. Dans ce cas, nous n'observons pas d'équilibre entre la force de chargement et les réactions aux appuis, il était donc nécessaire de développer un autre type

d'analyse pour exploiter ces signaux. L'inertie du corps d'épreuve ne peut être, dans ce cas, négligée. Nous utilisons dorénavant une modélisation simple dite « solide rigide » pour analyser ces essais.

### 3 Méthode de dépouillement basée sur une analyse « solide-rigide »

Le but de cette modélisation est de caractériser le comportement critique et post critique de l'éprouvette, à partir des mesures de forces. L'élément-poutre est modélisé par deux demi-éprouvettes liées entre elles par une liaison qui a pour caractéristique un moment  $M$  (figure 5). Cette hypothèse est induite par le fait que la rupture se produit au centre de l'éprouvette. Il est clair qu'avec cette hypothèse, nous n'avons pas accès à la phase élastique du comportement et que la déformation élastique est négligée car peu importantes comparées aux grandes déformations localisées dans la section centrale en raison du comportement fragile du matériau. De plus c'est le comportement post-critique de cette zone que l'on désire étudier.

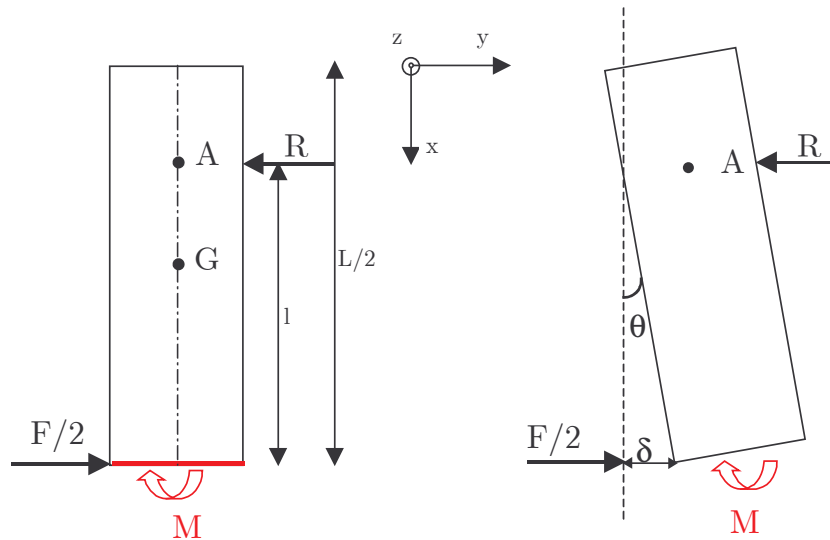


FIG.5 - Schématisation de la modélisation d'une demi-poutre

Pour déterminer le moment de la liaison, on étudie une demi-poutre de longueur  $L/2$ . Nous réalisons un bilan des forces et des moments exercés sur cet élément. En appliquant le principe fondamental de la dynamique en projection sur l'axe  $y$ , nous obtenons l'équation (1).

$$m \frac{\delta}{2} = \frac{F}{2} - R \quad (1)$$

avec  $F$  le chargement,  $R$  la réaction d'appuis et  $\delta$  le déplacement de la demi-poutre suivant  $y$ . On déduit ainsi l'accélération du mouvement. De plus, nous écrivons l'équation des moments en A (au droit des appuis) autour de l'axe  $(A, \underline{z})$ , pour obtenir l'équation (3).

$$J \ddot{\theta} = \frac{F}{2} l - M \quad (2)$$

Avec  $J$  le moment d'inertie en A autour de l'axe  $(A, \underline{z})$  et  $\theta$  l'angle de rotation de la demi-poutre.

Les données de l'essai sont  $F$ , la force entrante et  $R$ , une force sortante.

Cette équation doit s'écrire en un point fixe, le centre de gravité G par exemple. Nous avons vérifiée que le choix du point A, n'entraînait pas, dans notre cas, de modification des résultats.

Dans l'hypothèse où  $\theta$  l'angle de rotation de la demi-poutre est petit, on peut faire l'approximation suivante :

$$\sin \theta \approx \theta = \frac{\delta}{l} \quad (4)$$

Avec cette dernière relation et, en tenant compte de (2) et (3), on détermine ainsi une expression de  $M$  en fonction des forces mesurées :

$$M(F, R) = \frac{F}{2} \left( l - \frac{2J}{lm} \right) + R \frac{2J}{lm} \quad (5)$$

Il est à noter que l'on retrouve aisément les résultats statiques classiques, pour une poutre simplement appuyée de portée  $2l$ . En effet, lorsque  $\ddot{\delta} = 0$ , on a  $R = \frac{F}{2}$  et  $M = \frac{Fl}{2}$ .

#### 4 Etude d'une éprouvette de béton armé

Sur la figure 6, le moment  $M$  est tracé en fonction de  $\theta$ , l'angle de rotation de l'élément (figure 5), pour une éprouvette de béton armé.

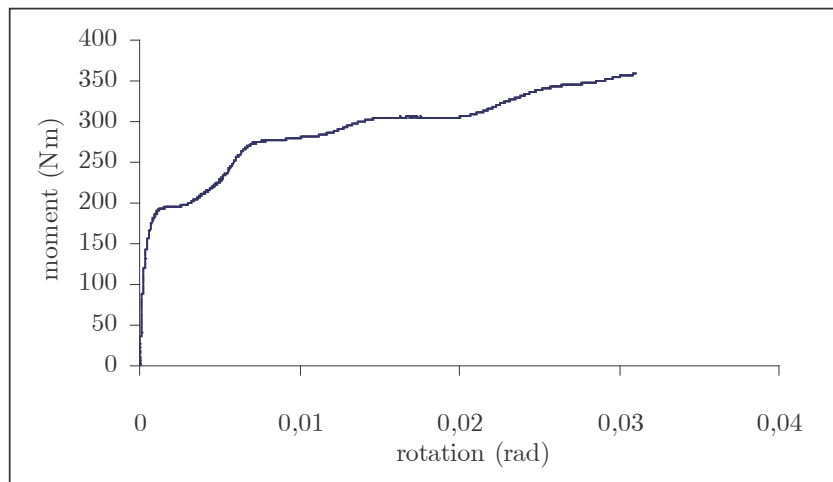


FIG.6-Moment/ rotation pour une éprouvette de béton armé ( $2l=140$  mm)

Sur cette courbe on observe un premier palier pour une valeur de 200 Nm, avant cette valeur, il n'y a pas de localisation et donc notre dépouillement n'est pas pertinent. On pourrait qualifier cette valeur comme un moment de fissuration. A partir de cette valeur le béton est fissuré et l'acier contribue, de manière plus claire, à la résistance de l'éprouvette. Ensuite la courbe atteint un second palier que l'on peut qualifier de moment plastique. A cet instant, l'acier se plastifie. Notre essai ne conduit pas à la rupture complète de l'éprouvette. La durée de l'essai est conditionnée par la taille de l'impacteur.

#### 5 Comparaison béton-béton armé

La figure 7 compare les résultats des moments obtenus par la modélisation pour une éprouvette de béton simple et de béton armé en fonction du déplacement  $\delta$  (figure 5). Pour le premier type d'éprouvette, on obtient une valeur maximale de 170 Nm. Il est à noter, que cette dernière est supérieure à la valeur relevée lors d'essais statiques sur un même élément. Le coefficient multiplicateur, ou facteur dynamique, est de l'ordre de 2.7.

Il est possible de dire que la réponse en moment d'une poutre armée en flexion dynamique se décompose en trois temps.

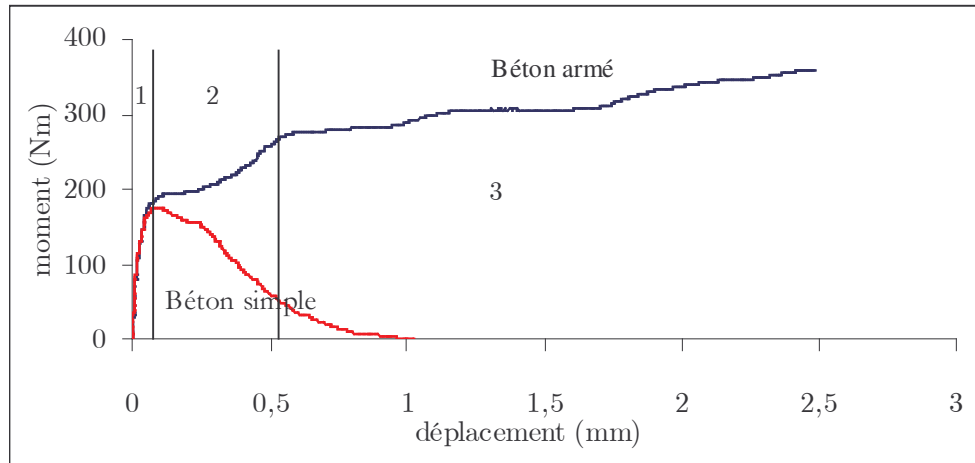


FIG.7-Comparatif des moments entre une éprouvette de béton simple et de béton armé

On s'aperçoit comme en statique que la première partie de la courbe de l'éprouvette armée est identique à celle obtenue pour un échantillon de béton simple (phase 1). Dans un second temps les micro-fissures du béton se transforment en macrofissures, la ruine du béton commence (phase 2). On observe ainsi la réponse du composite béton-acier. L'acier gêne l'ouverture des fissures. La valeur du moment de fissuration, correspondant pour une éprouvette de béton armé à la rupture du béton, est légèrement supérieure à la valeur maximale du moment pour une éprouvette de béton simple (200 au lieu de 170 Nm). On peut y voir déjà l'influence du ferrailage, même si celle-ci est plus visible dans la suite du chargement. Enfin le béton est totalement ruiné et seul l'acier permet à la structure de rester portante (phase 3). On observe alors la plastification des armatures.

## Conclusion

Nous avons mis au point un dépouillement des essais de flexion dynamique permettant de caractériser le comportement post-ultime d'éléments-poutres. Nous avons pu tracer des courbes moments en fonction du déplacement pour des éprouvettes de béton armé sur lesquelles nous mettons en évidence des paramètres connus en statique comme le moment de fissuration et le moment plastique. Ces essais ont été réalisés à une vitesse de déformation de l'ordre de 20/s et, ont ainsi permis de mettre en évidence l'influence de celle-ci. En moyenne, pour une éprouvette de béton armé, le moment de fissuration est multiplié par 3 et le moment plastique par 3.25 lors d'un essai dynamique.

## Références

- [1] **Hopkinson B.**, A method of measuring the pressure in the deformation of high explosive by impact of bullet, Phil. Trans. Roy. Soc. of London, 1914.
- [2] **Kolsky H.**, Stress waves in solids, Clarendon Press, Oxford, 1953.
- [3] **Gary G.**, Résumé des résultats expérimentaux sur mini-béton, essais de compression, rapport scientifique, projet 1.3 GRECO GEOMATERIAUX, dynamique des bétons et des roches, 1992.
- [4] **Bischoff P.H., Perry S.H.**, Compressive behaviour of concrete at high strain rates, Materials and Structures, vol. 24, pp. 425-450, 1991.
- [5] **Richomme S.**, Etude expérimentale du comportement dynamique d'éléments simples en béton et béton armé, Université d'Orléans, février 2005.
- [6] **Gary G., Klepaczko J.R., Zhao H.**, Correction de dispersion pour l'analyse des petites déformations aux barres d'Hopkinson, colloque C3, suppl. au journal de Physique III, vol. 1, 1991.