

# Analyse par corrélation d'images numériques d'une poutre en béton armé soumise à un essai de flexion

Culture Sciences  
de l'Ingénieur

Louis COLLIN<sup>1,2</sup> - Sylvain LANGLOIS<sup>1</sup> - Olivier RATEAU<sup>1</sup>

Édité le  
05/06/2025

école  
normale  
supérieure  
paris-saclay

<sup>1</sup> Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS, LMPS, Gif-sur-Yvette <sup>2</sup>ERMES, EDF R&D, Palaiseau

*Cette ressource est issue d'un travail personnel de Louis Collin et Sylvain Langlois, Doctorants au Laboratoire de Mécanique de Paris-Saclay (LMPS) dans le cadre de leurs activités d'enseignement. Le projet a été mis en œuvre grâce à la collaboration d'Olivier Rateau, Responsable technique des laboratoires de Génie Civil.*

Cette ressource pédagogique s'intéresse à une séance de travaux pratique dont le but est d'amener une poutre en béton armé à la ruine. Les étudiants sont amenés à étudier les faciès de fissuration et comparer les sollicitations résistantes avec les calculs analytiques. La théorie, l'instrumentation et le déroulé de l'essai ont fait l'objet de trois ressources de Culture Sciences de l'Ingénieur : *Fabrication d'une poutre en béton armé* [1], *Etude théorique d'une poutre en flexion 4 points* [2] et *Cassage d'une poutre en béton armé* [3].

Cette ressource propose une modification du dispositif expérimental en intégrant la technique de la corrélation d'images numériques (voir la ressource *Présentation générale de la corrélation d'images numérique* [4]), méthode qui permet d'observer en temps réel l'évolution des champs de déplacement et des faciès de fissuration dans la zone centrale de la poutre. Enfin une comparaison entre les mesures obtenues effectuées avec les capteurs classiques et celles issues de la corrélation d'images est présentée.

## 1 - Présentation de l'essai

La ruine de la poutre en béton armé est étudiée à l'aide d'un essai de flexion 4 points [2]. En particulier, l'objectif de l'essai est de comparer les valeurs expérimentales telles que la flèche, la position de la fibre neutre ainsi que la charge par rapport aux grandeurs calculées en suivant l'Eurocode. Ces grandeurs sont déterminées au cours de trois phases distinctes : la phase linéaire, celle à l'Etat Limite de Service (ELS) et celle à l'Etat Limite Ultime (ELU). La transition entre ces phases correspond à l'apparition des premières fissures (Linéaire à ELU), et à la ruine de la poutre (ELS à ELU).

### 1.1 - Matériaux

La poutre étudiée en béton armée est fabriquée à partir d'un béton avec un rapport E/C = 0,41. Les granulats sont composés de 45% de sable 0-4 mm, 21% de gravillons 4-10 mm et 34% de graviers 2-20 mm. La formulation détaillée est donnée dans le Tableau 1 avec, pour chaque composant, la masse volumique et la quantité nécessaire pour produire 1m<sup>3</sup> de béton. Le ferrailage de la poutre consiste en deux barres HA16 en fibre inférieure et 2 barres HA8 en fibre supérieure, comme indiqué sur la Figure 1b. Les étapes de fabrication de la poutre sont détaillées dans la ressource *Fabrication d'une poutre en béton armé* [1]. L'essai de flexion intervient 28 jours après la coulée.

Tableau 1 : Formulation du béton

Désignation	Densité [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]	Quantité [ $\text{kg} \cdot \text{m}_{\text{béton}}^{-3}$ ]
Sable 0-4 mm	2570	853
Gravillon 4-10 mm	2677	392
Gravier 8-20 mm	2530	632
Ciment	3110	350
Eau	1000	145
Plastifiant	1000	7

## 1.2 - Montage expérimental

La poutre est disposée sur deux appuis : un appui rotulé à gauche et un appui simple à droite (Figure 1a). Cette configuration garantit que le système est isostatique. Le repère cartésien utilisé pour analyser la cinématique de l'échantillon est également indiqué sur la Figure 1a. Un vérin hydraulique applique un effort  $F_{\text{machine}}$  sur un profilé métallique, permettant de répartir la charge sur la poutre au niveau de deux appuis ponctuels, situés à 1 mètre l'un de l'autre et centrés par rapport à l'éprouvette (Figure 1a). Le chargement est contrôlé en imposant le déplacement au vérin. Dans cette étude, seule la région centrale de la poutre, en flexion pure, sera étudiée en corrélation d'images numériques. La région d'intérêt de la caméra est surlignée en gris sur la Figure 1 et se situe aux niveaux des deux appuis du profilé métallique.

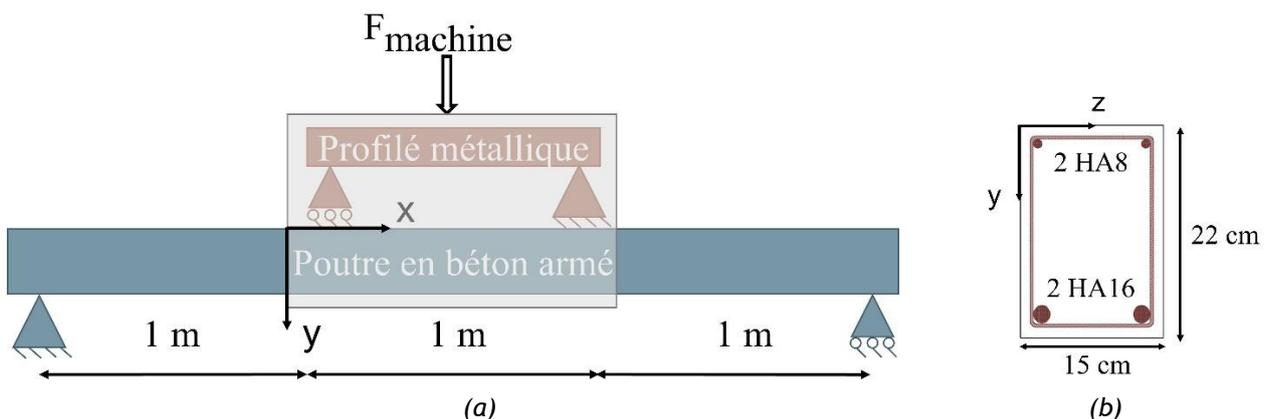


Figure 1 : Modélisation de l'essai de flexion quatre points appliquée à la structure (a), Plan de ferrailage de la poutre en béton armé (b).

## 1.3 - Instrumentation classique

Le vérin est muni d'un capteur d'effort permettant de mesurer la charge appliquée au cours de l'essai. Pour la mesure des grandeurs cinématiques, le banc d'essai comporte deux capteurs LVDT permettant de mesurer le déplacement du vérin et de mesurer la flèche de la poutre au cours du chargement mécanique [3]. 10 billes métalliques sont également collées sur la surface latérale de la poutre, à l'endroit des points rouges sur la Figure 5. La mesure manuelle par déformètre de l'élongation entre deux billes sur la même ligne horizontale permet de déterminer le profil des déformations  $\varepsilon_{xx}$  de la section de la poutre.

## 1.4 - Corrélation d'images numériques

En complément de cette instrumentation classique, un système de corrélation d'images numériques (CIN) est mis en place (Figure 2). Un spot lumineux éclaire la zone d'intérêt tandis que des rideaux noirs sont installés autour de la zone d'essai pour limiter les variations de lumière, comme par

exemple la variation de l'ensoleillement au cours de l'essai. L'appareil photo utilisé est un Canon EOS 60D dont les caractéristiques sont décrites dans le tableau 2. L'éprouvette est mouchetée en utilisant de la peinture noire et une grille (Figure 3).

Tableau 2 : Paramètres pour la mise en place de la corrélation d'image

Type de caméra	Canon EOS 60D
Définition	2748 x 1835 px
Rendu des niveaux de gris	8 bits
Objectif	Canon EF 25 mm
Ouverture	f/2.8
Echelle de l'image	0.2 mm/px
Fréquence d'acquisition d'image	1/7 fps
Technique de motif	Peinture noire
Longueur moyenne de corrélation	3.76 px



Figure 2 : Dispositif expérimental utilisé pour la mesure par CIN. La photo est prise après la ruine de la poutre

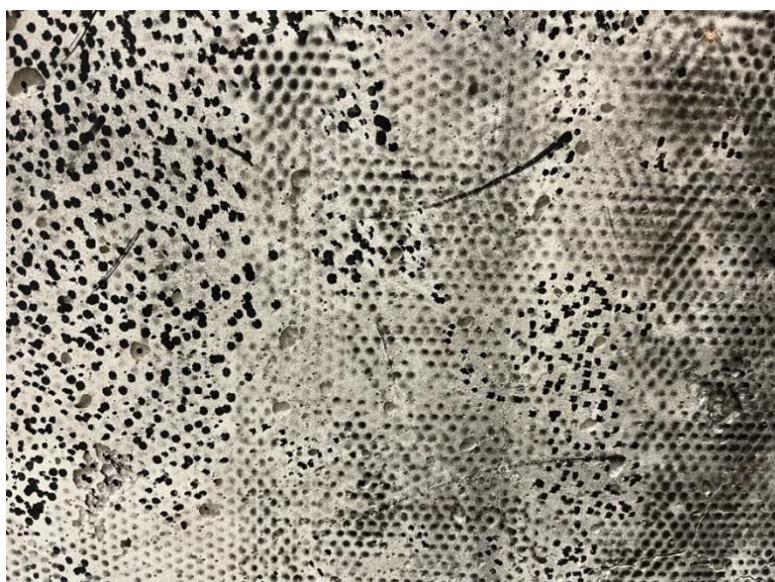


Figure 3 : Mouchetis projeté sur l'éprouvette

## 2 - Analyse des résultats expérimentaux

### 2.1 - Courbe force-déplacement

La courbe force vs. déplacement vérin est présentée sur la Figure 4. Sur les premiers millimètres de déplacement, le banc d'essai (appuis + cadre) participe à la reprise de l'effort, d'où une rigidité faible et non représentative de l'échantillon. Cet effet se dissipe dès que le chargement imposé dépasse 2 kN. Une phase élastique est ensuite observée, caractérisée par un régime linéaire représentatif d'une rigidité constante. L'apparition des premières fissures dues à la flexion pure de la poutre en béton armé est notée par une croix rouge sur la Figure 4 et intervient à un effort de 9.04 kN, ce qui est cohérent avec la valeur théorique calculée qui était de 7.19 kN. La rigidité, correspondant désormais à la rigidité fissurée de la poutre, diminue ensuite jusqu'à atteindre la ruine de la poutre, caractérisée par un palier d'effort aux alentours de 81.8 kN. Les numéros de photos sont indiqués pour 4 différents paliers de chargement : la phase de première fissuration (photo n°25), deux paliers en phase de fissuration (n°50 et 80), la ruine de la poutre (n°126).

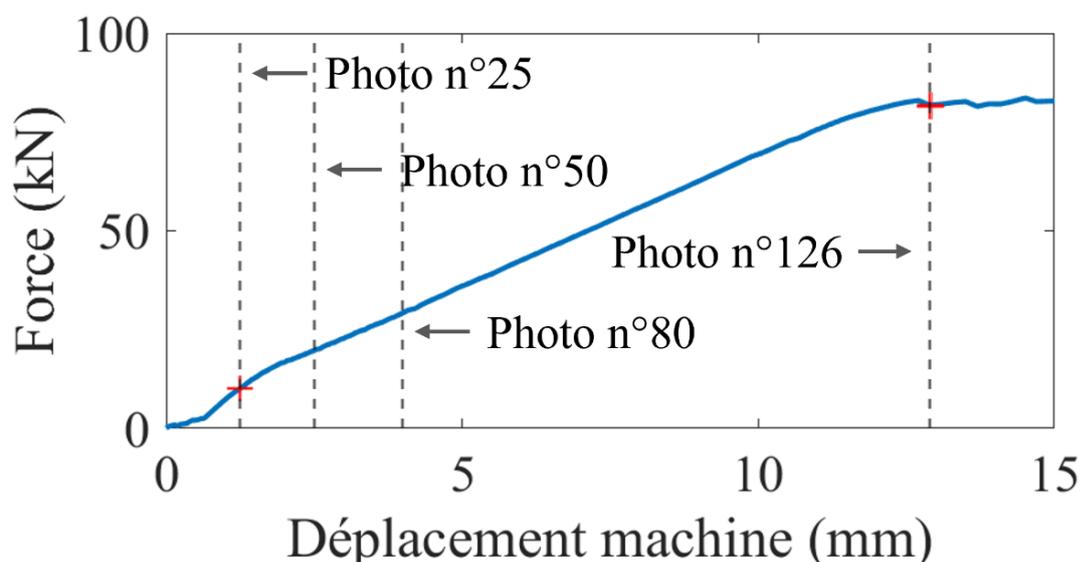


Figure 4 : Force en fonction du déplacement vérin. Les croix rouges indiquent, dans l'ordre croissant de l'effort, la charge à première fissuration et la charge ultime reprise par la poutre.

### 2.2 - Mesures des champs de déplacement par CIN

Le post-traitement des mesures de CIN est réalisé avec le logiciel Correli [5] développé au Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay (LMPS).

La fonctionnalité *live* permet d'effectuer les calculs de corrélation et de visualiser les résultats au cours de l'essai. Cela facilite notamment l'observation de l'amorçage et de la propagation des fissures dans la zone centrale de l'éprouvette. Cette approche offre une meilleure distinction entre la phase linéaire et l'état limite de service (ELS), grâce à une compréhension plus précise des mécanismes de fissuration dans le béton.

L'image de référence, sans chargement mécanique, est affichée sur la Figure 5 avec le maillage élément fini sur lequel le déplacement  $u$  est calculé. La longueur moyenne d'un élément du maillage est de 52 px, soit environ 12 mm pour la résolution utilisée. Cette taille est choisie pour faciliter la convergence des calculs lors de l'essai tout en assurant une bonne précision des mesures.

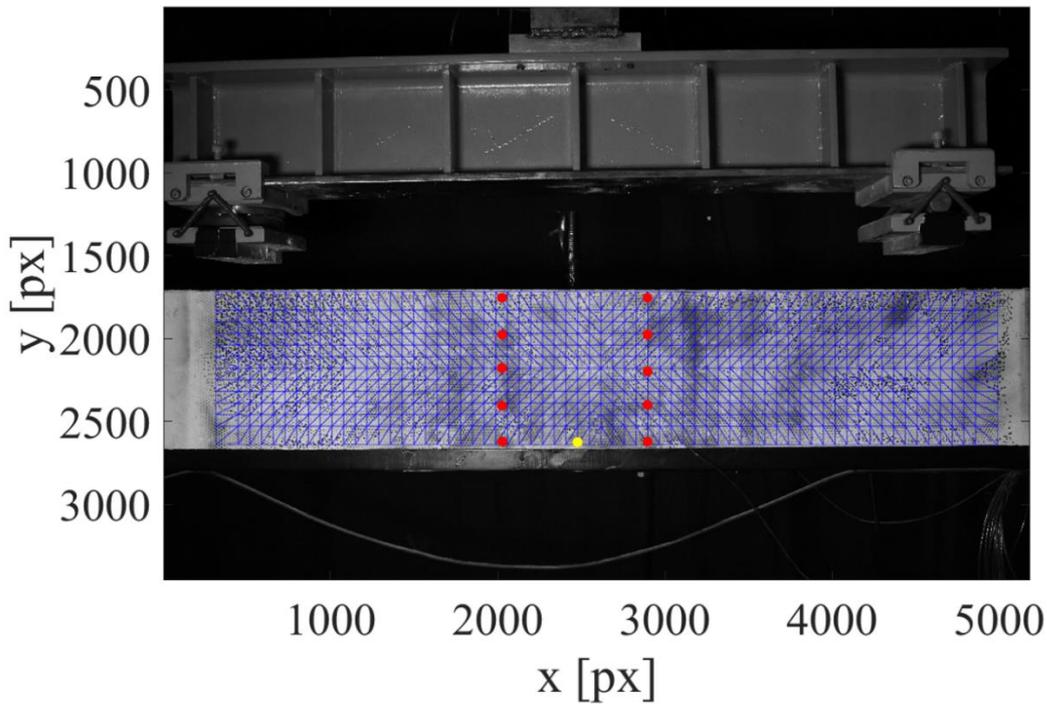


Figure 5 : Image de référence utilisée pour la CIN avec le maillage en bleu.

Pour mener à bien le calcul de CIN, 50 images sont prises sans chargement au début de l'essai pour déterminer les incertitudes de mesure. Au cours de l'essai, le moment de déclenchement des photos est noté pour pouvoir les synchroniser avec les mesures d'effort et de déplacement prises de manière analogique. La formulation globale de la CIN est détaillée dans la ressource *Présentation générale de la corrélation d'images numériques* [4]. Les paramètres du calcul sont décrits dans le tableau 3.

Tableau 3 : Paramètres d'analyse CIN

Logiciel CIN	Correli 3.2 [5]
Filtrage des images	Aucun
Taille des éléments	~ 52 px
Fonctions de forme	Linéaire (éléments T3)
Critère de correspondance	Somme des différences finies régularisées
Interpolant	Spline
Seuil des bruits des déplacements	0.07 px

Les champs de déplacement obtenus par corrélation d'images numériques (CIN) sont illustrés en Figure 6 pour les 4 différentes photos indiquées sur la courbe de chargement (Figure 4). En phase linéaire, à l'instant 25, les champs de déplacement dans les directions X et Y présentent un comportement classique pour une sollicitation en flexion, avec un déplacement vertical maximal au centre de l'éprouvette. À partir de l'instant 50, les profils de déplacement dans la direction Y restent inchangés, bien que l'amplitude du déplacement mesure augmente. À l'inverse, dans la direction X, des gradients de déplacement apparaissent, marquant l'amorçage puis la propagation des fissures dans la poutre, depuis sa face inférieure vers sa face supérieure. Ces fissures, qui s'ouvrent progressivement au fil de l'essai, entraînent des gradients avec des valeurs qui augmentent à mesure que l'essai avance et se rapproche de la ruine. Lors de la mise en ruine de la poutre, les déplacements observés deviennent trop importants pour rester dans le cadre de la CIN, les calculs risquent de diverger. C'est pourquoi aucune photo n'a été prise lors de la mise en ruine.

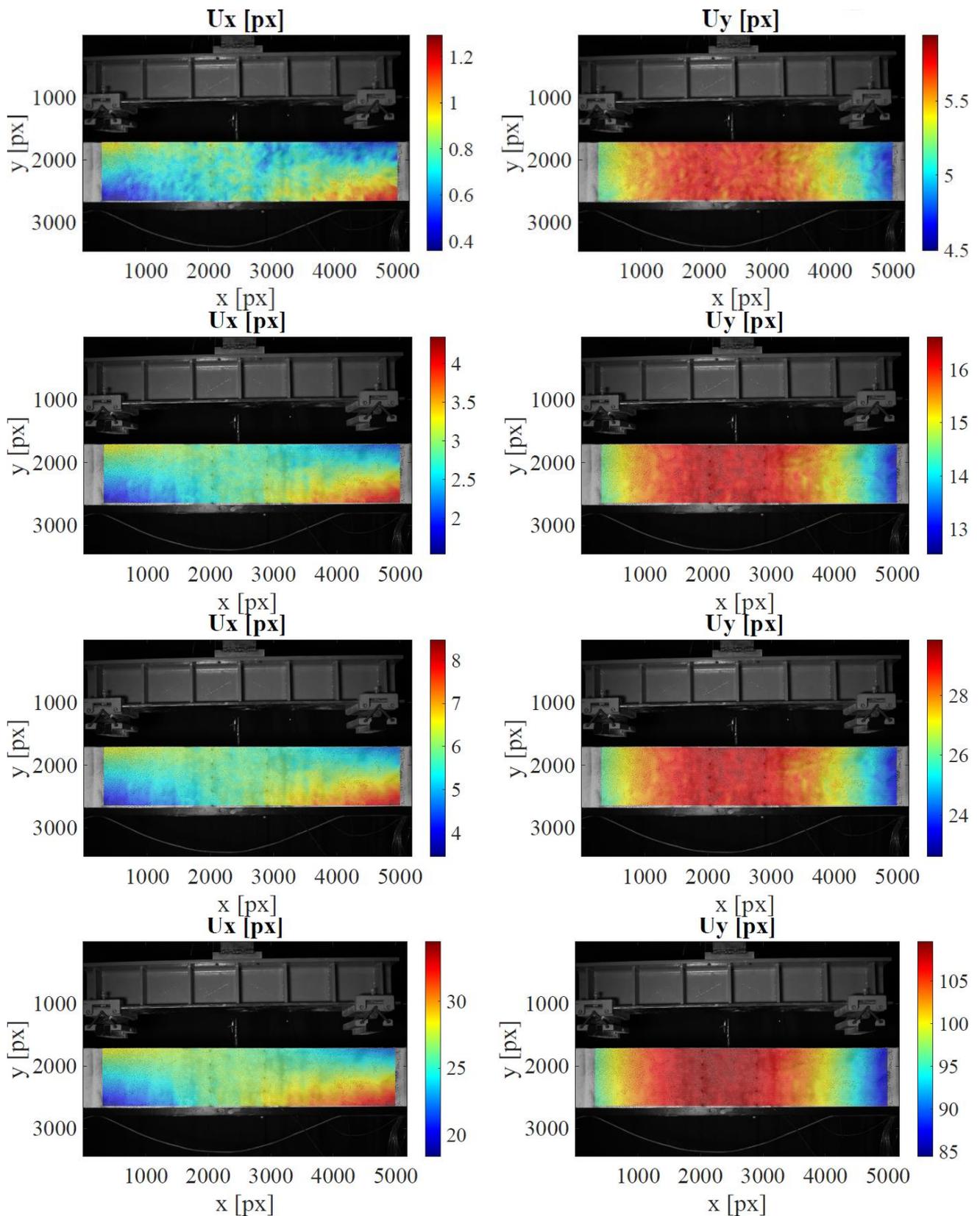


Figure 6 : Champs de déplacement selon  $U_x$  et  $U_y$  (gauche et droite) mesurés par CIN aux instants 25, 50, 80 et 100 (de haut en bas)

Avec la mesure des champs de déplacement au centre de la poutre, il est possible de déterminer une mesure de flèche en considérant l'évolution du déplacement dans le temps du point marqué en jaune sur la Figure 5. Cette valeur serait cependant erronée, dans le sens où elle ne prendrait pas en compte l'écrasement des appuis sur lesquels repose la poutre. Pour une valeur plus fiable de la flèche, il faudrait donc prendre une caméra avec une région d'intérêt qui couvrirait toute l'éprouvette, mais qui réduirait aussi la précision de la mesure dans la région centrale. Le choix a

donc été fait ici de se concentrer uniquement sur l'apport de la CIN dans la connaissance plus fine des déformations dans la région centrale.

### 2.3 - Mesure des déformations au centre de la poutre

Un des objectifs de l'essai est de déterminer l'évolution des déformations dans la section centrale de la poutre ainsi que la position de l'axe neutre. Ces mesures, initialement prises avec un déformètre, sont comparées à celles obtenues par CIN. Il est en effet possible de créer des jauges virtuelles aux mêmes positions que les billes utilisées pour les mesures avec le déformètre. Le tableau 4 présente les résultats obtenus par les deux méthodes. Certaines valeurs n'ont pas pu être mesurées avec le déformètre suite au décollement des billes au cours de l'essai.

Tableau 4 : Comparaison des mesures de déformation obtenues par le déformètre et par CIN

Force F [kN]	$\varepsilon_{xx}$ mesurée par déformètre [‰]					$\varepsilon_{xx}$ mesurée par CIN [‰]				
	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub>	d <sub>5</sub>	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub>	d <sub>5</sub>
9.8	0.10	0.07	0.02	-0.05	-0.13	0.30	0.20	0.13	-0.03	-0.18
20	0.23	0.08	-0.12	-0.35	-0.57	0.32	0.03	-0.18	-0.53	-0.84
30	0.38	0.09	-0.28	-0.65	-1.9	0.48	0.04	-0.34	-0.84	-1.5
70	0.86	0.11	-0.72	-1.8	-	1.1	0.15	-0.85	-1.3	-3.3
82	1.0	-0.09	-1.2	-	-	1.2	0.13	-1.0	-1.7	-4.1

Les deux méthodes de mesure présentent des tendances globalement similaires, avec des écarts relativement faibles. Toutefois, une comparaison précise des résultats reste délicate. En effet, la réflexion de la lumière par les billes impose d'effectuer les mesures de déformation par CIN à proximité de ces dernières, sur des nœuds du maillage dont la hauteur ne correspond pas nécessairement à celle des billes. De plus, la CIN fournit une mesure instantanée, tandis que les mesures au déformètre s'étalent sur une durée plus longue, ce qui peut induire un phénomène de relaxation à effort constant. Enfin, la fiabilité des mesures obtenues par déformètre dépend fortement de la qualité du collage des billes à la surface.

L'incertitude de mesure des déformations par CIN est estimée à 0.04%. Le déformètre offre une meilleure précision pour les valeurs plus faibles de déformation dans la configuration actuelle de la caméra. Si l'on venait zoomer plus spécifiquement sur la région où sont placées les billes, une incertitude plus faible sur les mesures de CIN serait obtenue.

Les deux méthodes de mesure montrent que l'axe neutre (défini comme la zone où la déformation est nulle) se situe initialement à proximité de la zone de la mesure  $d_3$ , ce qui correspond au milieu de la hauteur de la poutre. À partir d'une charge de 10 kN, l'axe neutre remonte progressivement vers le haut de la poutre en béton armé, se localisant au niveau de la mesure de  $d_2$  pour un effort de 80 kN. Ce comportement est également attendu, puisque l'aire de béton située dans la partie inférieure de la poutre subit une fissuration progressive, et reprend donc moins d'effort. Cependant, avec seulement 5 mesures de déformation, il est difficile de tracer précisément l'évolution de l'axe neutre au cours du temps.

Expérimentalement, la mesure par CIN présente deux avantages significatifs. Cette méthode permet tout d'abord d'obtenir des données tout au long de l'essai sans avoir à arrêter la manipulation pour prendre les mesures manuellement à chaque incrément d'effort. La figure 7 illustre la richesse des données obtenues en comparaison au Tableau 4. Le second avantage est que la mesure par CIN est non intrusive, à la différence de la mesure par déformètre qui dépend fortement du décollement des billes au moment de la prise de mesure.

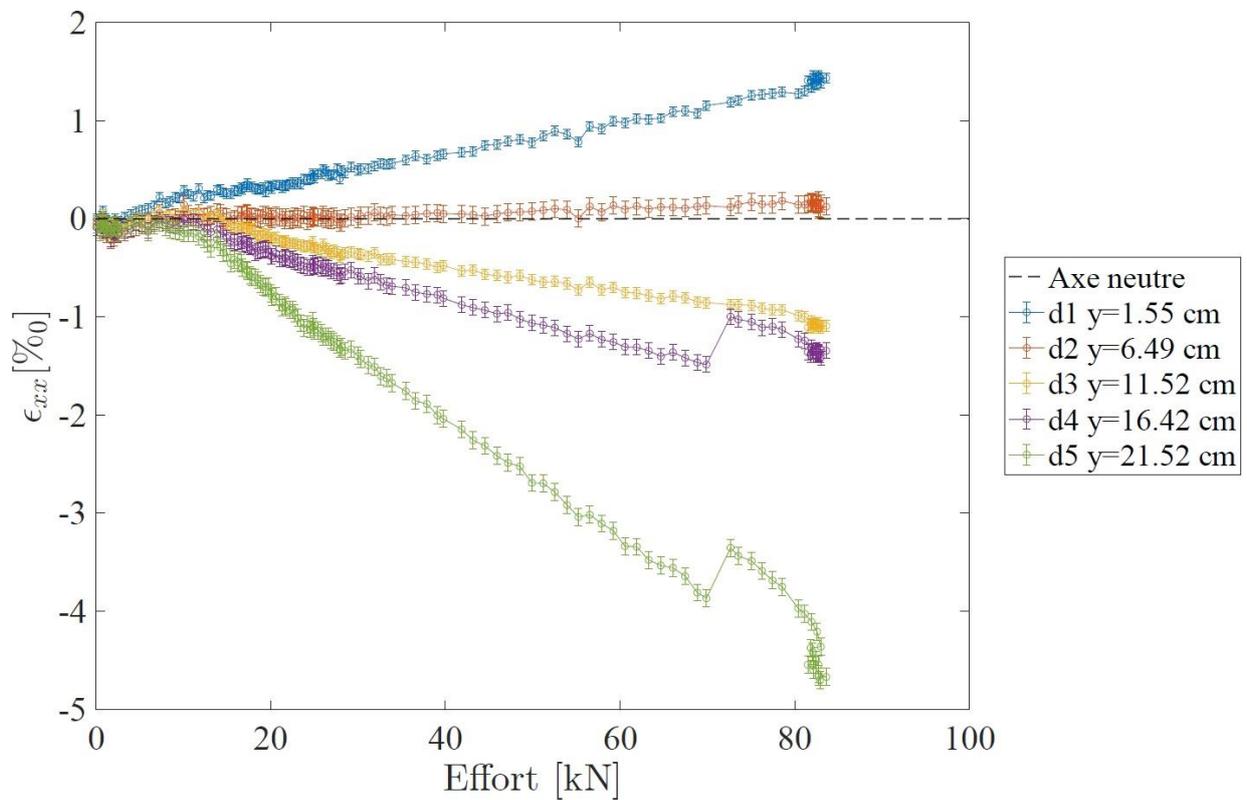


Figure 7 : Mesures des déformations  $\epsilon_{xx}$  par CIN

Pour aller plus loin, des jauges virtuelles sont désormais définies sur toute la hauteur de l'éprouvette en utilisant le maillage décrit à la Figure 5. En calculant l'élongation  $\epsilon_{xx}$  pour chacune de ces jauges, on peut alors tracer l'évolution du profil de déformation au centre de l'éprouvette comme une fonction de la hauteur de la poutre et de la force appliquée (Figure 8).

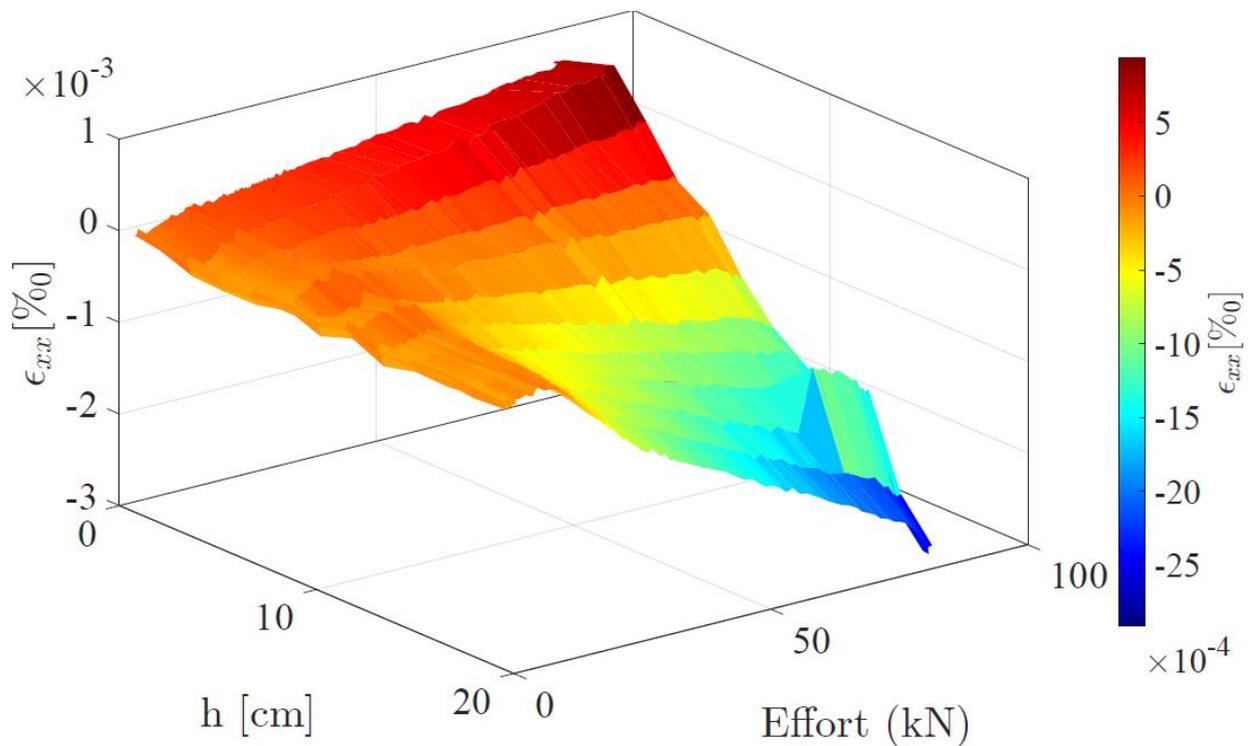


Figure 8 : Evolution du profil de déformation au centre de l'éprouvette au cours de l'essai

De ces mesures par CIN, et en faisant une interpolation linéaire, il est possible de déduire une estimation plus fine de la position de l'axe neutre au cours de l'essai (Figure 9).

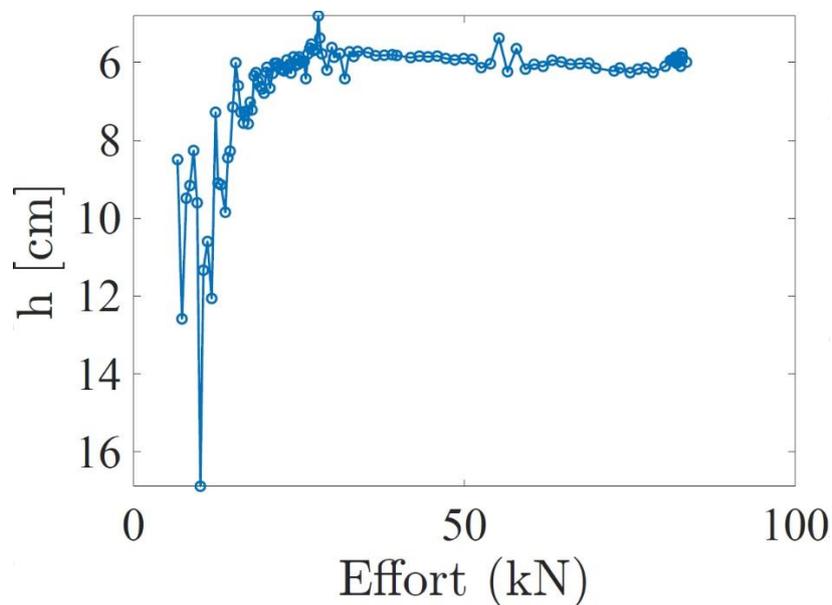


Figure 9 : Evolution de la position de l'axe neutre au cours de l'essai

### 3 - Conclusion

La mesure par CIN s'est révélée efficace pour analyser l'évolution des champs de déplacement au centre d'une poutre en béton armé soumise à un essai de flexion quatre points. Cette méthode non-intrusive offre l'avantage d'automatiser l'acquisition des données et d'accroître la densité des mesures des déformations. Elle permet ainsi de mieux caractériser l'évolution temporelle de l'axe neutre. Toutefois, la configuration actuelle de la caméra engendre des incertitudes assez importantes dans la mesure des déformations, notamment en phase linéaire. Une amélioration de la précision pourrait être obtenue en optimisant le dispositif, par exemple en utilisant une caméra avec un champ de vision plus restreint. Cette optimisation pourrait, à terme, réduire significativement les incertitudes et offrir une alternative robuste aux mesures par déformètre.

### Références

- [1] H. Horsin Molinaro, X. Jourdain, Fabrication d'une poutre en béton armé (2018). URL : [https://sti.eduscol.education.fr/si-ens-paris-saclay/ressources\\_pedagogiques/fabrication-dune-poutre-en-beton-arme](https://sti.eduscol.education.fr/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/fabrication-dune-poutre-en-beton-arme)
- [2] A. Asselin, B. Bodnar, M. Briat, C. Chambreuil, X. Jourdain, H. Horsin Molinaro, Etude théorique d'une poutre en flexion 4 points (2020). URL : [https://sti.eduscol.education.fr/si-ens-paris-saclay/ressources\\_pedagogiques/etude-theorique-dune-poutre-en-flexion-4-points](https://sti.eduscol.education.fr/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/etude-theorique-dune-poutre-en-flexion-4-points)
- [3] A. Asselin, B. Bodnar, M. Briat, C. Chambreuil, X. Jourdain, H. Horsin Molinaro, Cassage d'une poutre en béton armé, Cement and Concrete Research (2020). URL : [https://sti.eduscol.education.fr/si-ens-paris-saclay/ressources\\_pedagogiques/cassage-dune-poutre-en-beton-arme](https://sti.eduscol.education.fr/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/cassage-dune-poutre-en-beton-arme)
- [4] F. Hild, H. Horsin Molinaro, Présentation générale de la corrélation d'images numériques (2015). URL : [https://sti.eduscol.education.fr/si-ens-cachan/ressources\\_pedagogiques/principe-de-la-correlation-dimages-numeriques](https://sti.eduscol.education.fr/si-ens-cachan/ressources_pedagogiques/principe-de-la-correlation-dimages-numeriques)
- [5] H. Leclerc, J. Neggers, F. Mathieu, F. Hild, S. Roux, Correli 3.0, Iddn. Fr 1 (000) (2015).