

Algorithme de corrélation d'images numériques adapté aux structures type treillis

Cette ressource retrace l'exploitation des prises de vues réalisées durant les essais de résistance des maquettes de ponts ferroviaires dans le cadre du projet Move Your Bridge. Les détails de ce projet sont présentés dans la ressource « *Move Your Bridge : défi étudiant* » [1].



Figure 1 : Les six maquettes de ponts ferroviaires lors des essais de résistance

1 – Introduction

Les prises de vue sont réalisées afin d'observer finement le déplacement des ponts sous charge. Le principe est le même que pour de la corrélation d'images numériques (CIN) avec une approche globale (le champ cherché est continu sur l'ensemble de la structure), voir la ressource « *Présentation générale de la corrélation d'images numériques* » [2].

La spécificité est ici que le déplacement sur chaque poutre constituant le treillis est directement décrit pas la solution théorique d'un problème « poutre » (RdM). La continuité du déplacement sur l'ensemble du treillis est assurée par le fait que les différentes poutres liées à un même nœud ont le même déplacement en ce nœud (2 translations et une rotation dans le plan). La présence de la rotation fait que les poutres peuvent se déformer en traction/compression mais aussi en flexion. Le problème à résoudre est donc le même que celui de la simulation d'un treillis ou d'un portique (voir ressource « *Exemple de diagnostic d'une simulation : déformations d'un portique* » [3]) sauf qu'ici se sont les images qui vont permettre de trouver le déplacement.

L'avantage d'utiliser une cinématique (c'est à dire un déplacement correspondant à un modèle particulier) de type « treillis » (discrétisation de la structure par élément poutre) par rapport à une cinématique plus classique de type « élément finis » (discrétisation par élément triangulaire ou quadrangulaire), c'est qu'il n'y a plus qu'un seul élément pour une seule poutre, et non plusieurs triangles/quadrangles. En conséquence, le nombre d'inconnues à identifier est très limité (3 inconnues par nœud) et le calcul devient donc plus rapide.

Mais en plus d'être plus rapide, il est aussi plus précis : l'ensemble des pixels correspondant à une poutre et de celles adjacentes contribue à la mesure des déplacements aux nœuds de cette poutre. Il y a donc beaucoup d'informations pour peu d'inconnues. C'est particulièrement intéressant pour des structures faites de poutres car celles-ci étant fines, il y a peu de pixels dans leur largeur et un algorithme utilisant des triangles doit utiliser beaucoup de petits triangles et peut avoir des difficultés (temps de calcul, incertitude). Le défaut d'un algorithme type « treillis » est bien sûr que le résultat n'a de sens ... que si la structure se déforme bien selon un modèle de treillis (pas de poutre trop courte, pas de rupture locale de poutre, etc.)

2 – Réalisation des essais

Les ponts sont recouverts d'un « mouchetis » de peinture noir et blanc comme pour les autres algorithmes de CIN (figure 2). Ils sont ensuite installés sous le vérin de chargement (figure 3) qui va répartir la charge sur les 2 voies de chemin de fer, comme si 8 wagons étaient présents.



Figure 2 : Mouchetis de peinture nécessaire à la corrélation d'images numériques



Figure 3 : Mise en place d'une maquette

Les photos de CIN sont prises perpendiculairement au pont, de face, avec un appareil photo numérique 15Mpix de milieu de gamme, dont le déclenchement est réalisé par le programme pilotant le vérin hydraulique. La charge est appliquée lentement (0,015 mm/s) et une photo est prise toutes les 10 secondes. Un pixel correspond environ à 0,3 mm sur le pont.

3 – Résultats pont bleu

Le pont bleu est un pont dont le tablier est suspendu à arche. En début d'essai (photo 6, prise à 179 N, environ 1/3 du déplacement maximal appliqué), le champ de déplacement mesuré ressemble à celui de la figure 4 :

- selon la verticale, le pont est clairement soumis à de la flexion, avec un déplacement relatif vers le bas au milieu par rapport aux 2 extrémités (un léger mouvement de corps rigide apparaît, peut-être dû à un mouvement de l'appareil photo, car on voit que les 2 extrémités remontent un peu en valeur absolue).
- Selon l'horizontale, le pont est aussi clairement soumis à de la flexion : les 2 extrémités s'écartent.

Photo 6, déplacement horizontal (mm)

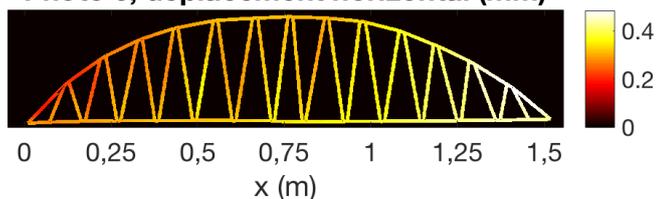


Photo 6, déplacement vertical en mm

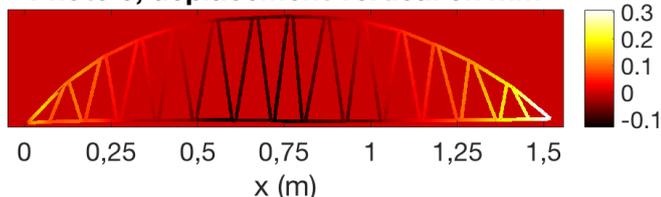


Figure 4 : Exploitation de la photo 6 du début d'essai du pont bleu

En fin d'essai (photo 31, prise à 492N, juste avant la chute d'effort), le champ de déplacement mesuré ressemble à celui de la figure 5 :

- selon la verticale, le pont est toujours clairement soumis à de la flexion. Cette fois-ci l'amplitude est bien plus importante (presque 4 mm).
- Selon l'horizontale, un étrange mouvement apparaît : alors que les 2 extrémités s'écartent, les parties droites et gauches semblent se rapprocher au centre en haut de l'arche !

Photo 31, déplacement horizontal (mm)

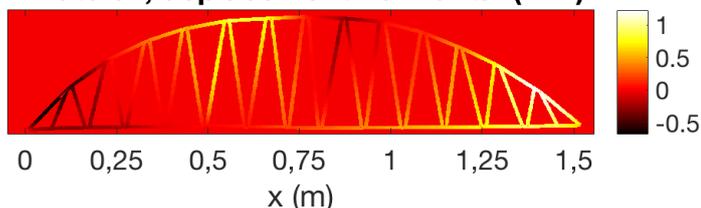


Photo 31, déplacement vertical en mm

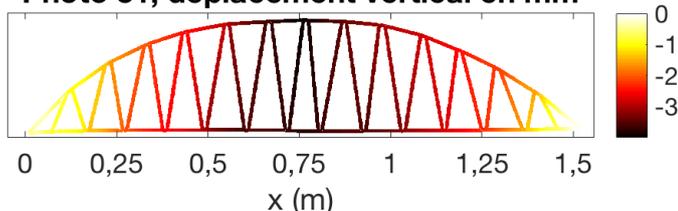


Figure 5 : Exploitation de la photo 31 de fin d'essai du pont bleu

Ce déplacement mesuré est-il juste ? Si l'on regarde le pont d'un autre point de vue, on voit qu'en fait il est en train de se voiler (figure 6) ! Vu de face, ce mouvement hors-plan est traduit par un rapprochement vers le centre comme sur la figure 5. On peut alors se demander quand ce mouvement (qui est une instabilité qui va amener à la rupture du pont) est apparu. En observant l'ensemble des résultats on peut deviner qu'il apparaît peu après l'image 6. Si maintenant on regarde la courbe d'effort (figure 7) et que l'on représente les instants correspondant aux images 6 et 31, on se rend compte que l'instabilité est apparue très tôt pendant l'essai, et correspond au moment où la raideur du pont commence à diminuer (la pente de la courbe change peu après l'image 6).

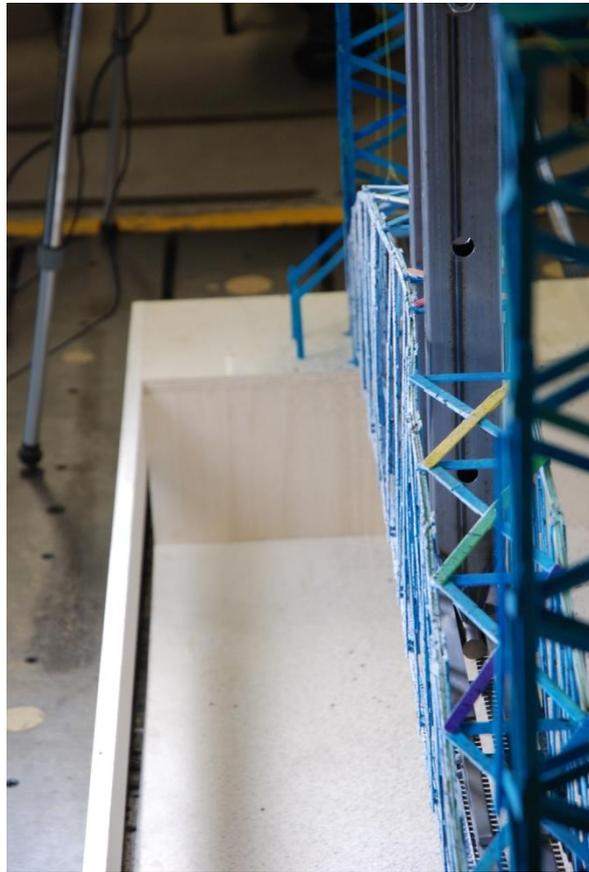


Figure 6 : Phénomène de voilage lors de l'essai

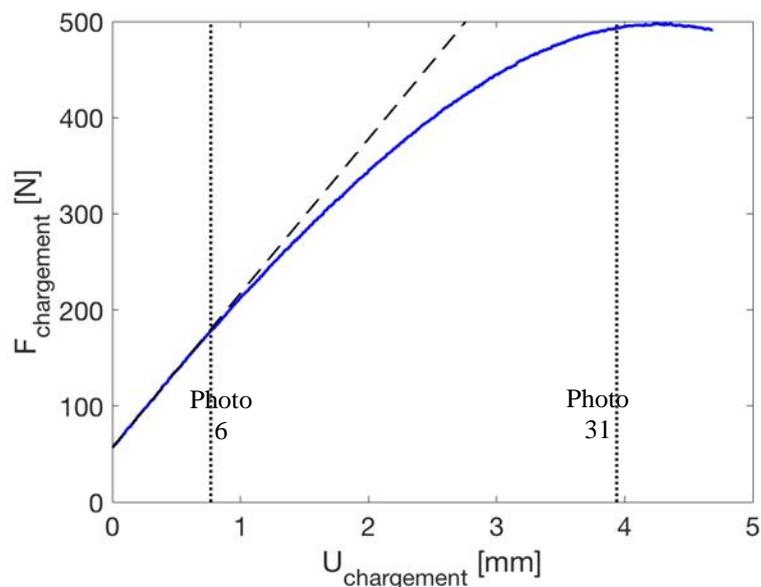


Figure 7 : Courbe d'effort de l'essai sur le pont bleu, positionnement des photos 6 et 31

4 – Résultats pont jaune

Le pont jaune est de type « Warren » (structure basse avec des poutres de contreventement en W). La courbe force-déplacement (figure 8) est très différente de celle du pont bleu : son comportement est linéaire presque jusqu'à rupture. Le changement de pente progressif en fin d'essai indique que la ruine a encore une fois lieu à cause d'un déversement (le pont se voile) et non une rupture brusque de l'un des éléments.

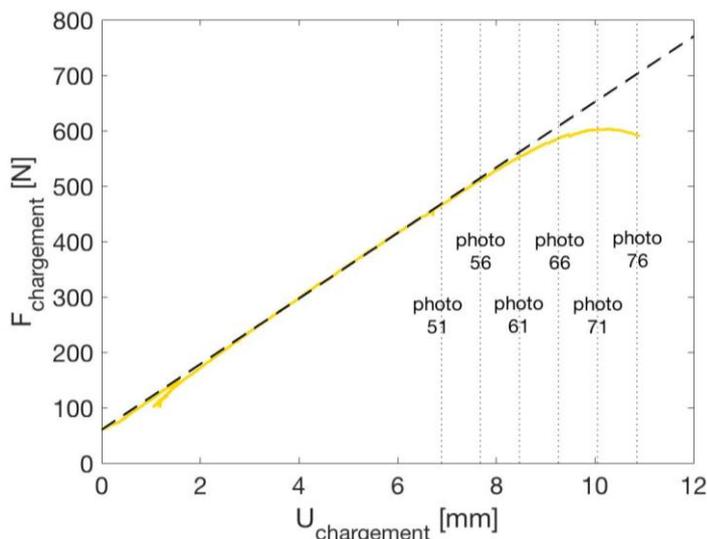


Figure 8 : Courbe d'effort de l'essai sur le pont jaune, positionnement des photos 51 à 76

Si l'on regarde son déplacement vers le milieu de l'essai (à la photo 46, figure 9) et en post-pic (photo 76, figure 10), il n'y a pourtant pas de différence significative de visible. On observe dans les deux cas une flexion globale vers le bas (déplacement vertical négatif) lié à une rotation des 2 extrémités (le déplacement horizontal est vers la droite sur le haut de la partie gauche et quasi au niveau de l'appui, tandis qu'il est vers la gauche sur la partie droite, et toujours quasi nul au niveau de l'appui).

Photo 46, déplacement horizontal (mm)



Photo 46, déplacement vertical (mm)



Figure 9 : Exploitation de la photo 46 de milieu d'essai du pont jaune

Photo 76, déplacement horizontal (mm)



Photo 76, déplacement vertical (mm)

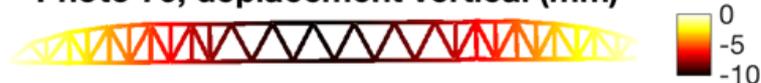


Figure 10 : Exploitation de la photo 76 de fin d'essai (post-pic) du pont jaune

Le changement de comportement amenant à la ruine peut néanmoins être observé en étudiant les variations de déplacement au cours du temps (soit la différence de déplacement entre 2 instants successifs). La figure 11 présente cette variation par saut de 5 images. On voit alors que le comportement à partir de l'image 66 est effectivement différent, traduisant un changement de mode de déformation (l'apparition du déversement).

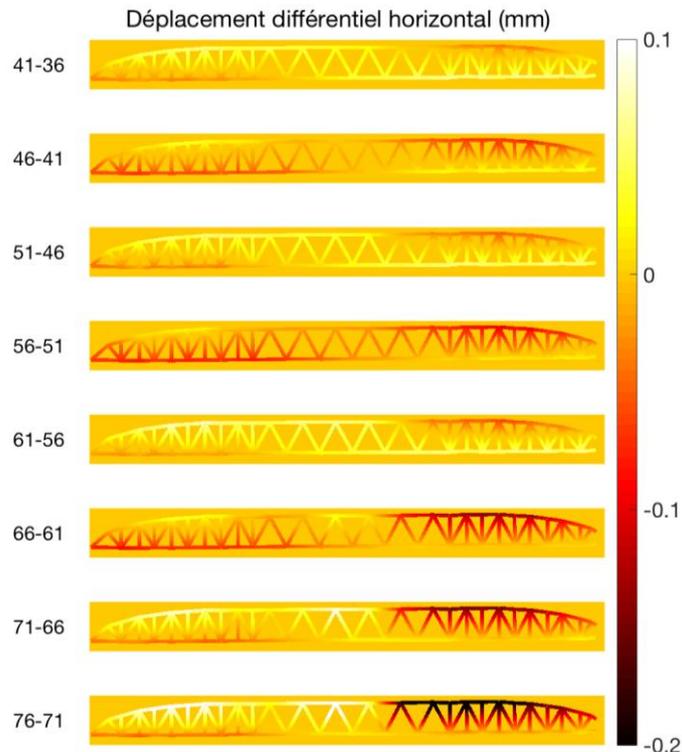


Figure 11 : Comportement du pont jaune lors de l'essai par saut de 5 photos

5 – Quelques conclusions

Selon la structure des ponts, leur résistance mais aussi leur mode de ruine peuvent varier. Observer les grandeurs globales (par exemple, force globale, déplacement imposé par le vérin ...) permet de connaître les charges limites, mais pas forcément de comprendre le scénario de la ruine.

Utiliser des mesures de champs permet de mieux comprendre ce scénario, en voyant que certaines zones se déplacent plus que d'autres par exemple. La mesure de champs sur des structures élancées comme des ponts est cependant difficile car ils font souvent apparaître des mouvements hors-plan, et ceux-ci apparaissent comme un mouvement dans le plan si l'on utilise une seule caméra. Le fait que cette perturbation n'a pas la même « signature » que la déformation jusque là observée permet d'alerter sur l'apparition du phénomène. Néanmoins pour quantifier le déplacement hors-plan, il faudrait utiliser une mesure de champ avec au minimum deux caméras, comme de la stéréocorrélation d'images par exemple.

Références :

[1]: Move Your Bridge : défi étudiant, X. Jourdain, M. Poncelet, H. Horsin Molinaro, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/move-your-bridge-defis-etudiants

[2]: Présentation générale de la corrélation d'images numériques, F. Hild, H. Horsin Molinaro, S. Roux, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-cachan/ressources_pedagogiques/principe-de-la-correlation-dimages-numeriques

[3]: Exemple de diagnostic d'une simulation : déformations d'un portique, L. Gendre, R. Poirée, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/exemple-de-diagnostic-dune-simulation-deformations-du-portique