

Utilisation de la corrélation diachronique d'images pour la métrologie de ponts.

MICHEL KASSER¹

Résumé: La corrélation diachronique d'images est une technique de mesure basée sur la recherche de différences géométriques, même minimes, entre des images prises à différentes époques. Ces images sont soit prises depuis des points différents et orthorectifiées, soit simplement prises depuis une même station. Déjà utilisée pour des mesures de déformations tectoniques, ou aussi sur des tests de matériaux en laboratoire, elle permet de déterminer des cisaillements dans l'image avec une précision de l'ordre du centième de pixel, voire mieux, avec un simple appareil photo.

Dans le domaine de la surveillance de ponts, les besoins actuels en solutions d'auscultation très économiques sont grands. La corrélation diachronique d'images, permettant des mesures sans contact, sans pose de repères, et à faible coût, est en mesure de répondre au moins en partie à cette demande.

L'enjeu principal des recherches menées à la HEIG-VD a été d'évaluer quelles sont les possibilités d'adaptations de ces techniques au domaine de la surveillance de tabliers de ponts, et leurs limitations. Les résultats ont révélé que la précision recherchée du centième de pixel peut aussi être atteinte pour de telles mesures de flexion. Finalement des essais ont permis de quantifier les pertes de précision liées à la réfraction sur longues distances qui, dans certains cas, restent très faibles.

1 Introduction

La corrélation d'images a fait son apparition avec l'arrivée des premières images spatiales numériques destinées à être exploitées en stéréo, dans les années 1980 (Spot 1). En corrélation diachronique, la mesure de correspondance entre des images issues de différentes époques permet la détermination d'un champ de déplacements. Son utilisation s'est largement développée dans les milieux de la recherche sur les matériaux pour la réalisation de tests sous contraintes en laboratoire, mais aussi et d'abord pour des études de déformations tectoniques co-sismiques, ou des mouvements de versants instables. Cette technique à l'avantage de permettre des mesures sur toute la surface, sans contact, et ce sur une très large gamme d'échelles de mesure. Il est ainsi possible d'analyser des déplacements sur une surface allant de quelques mm² jusqu'à plusieurs centaines de km² en fonction du type de matériel employé et de la configuration du système mis en place.

Dans le domaine de l'auscultation de ponts, on travaille aujourd'hui généralement avec des outils de topométrie très précis permettant uniquement une surveillance localisée sur des points caractéristiques de l'ouvrage, minutieusement choisis. Ces campagnes sont donc longues et coûteuses en raison des difficultés d'intervention et ne fournissent qu'un ensemble de mesures ponctuelles réparties sur l'ouvrage. Et en général il est difficile, ou en tous cas coûteux, d'atteindre une précision millimétrique. En outre, ces mesures s'étendent sur un temps important (plusieurs

¹ HEIG-VD, Laboratoire G2C, Route de Cheseaux 1, CH-1401 Yverdon-les-bains, Suisse,
E-Mail: michel.kasser@heig-vd.ch

heures), ce qui complique le travail puisque pendant ce temps la température change, et donc les dimensions du pont également.

Les avantages des techniques de corrélation diachronique appliquées à l'auscultation d'ouvrages sont importants. La possibilité de disposer d'un champ de vecteurs sur l'ensemble d'un ouvrage sans contact correspond entièrement aux besoins actuels où l'on cherche à limiter les coûts et réduire la durée des interventions. Aujourd'hui, de nombreux ponts sont vieillissants et devraient faire l'objet d'auscultations régulières. Il en ressort donc une forte demande de surveillance et un intérêt grandissant pour des solutions d'auscultation à très faible coût.

L'enjeu principal de ces recherches est donc d'évaluer quelles sont les possibilités d'adaptations des techniques de corrélation à ce domaine précis de la surveillance de ponts, moyennant des conditions d'environnement très variables. Il convient donc de recenser quelles sont les limites d'utilisation dans les conditions courantes, et en particulier jusqu'à quelle distance du pont on peut acquérir les images.

2 Principes de la corrélation diachronique d'images

La corrélation diachronique d'images est une recherche des déformations entre deux images prises à différentes époques. En considérant un centrage et une orientation identique de la prise de vue aux deux époques, la corrélation permet de déterminer les changements intervenus entre les images. L'image référence correspond à l'état initial et les traitements mesurent les déplacements (disparités) par rapport l'image déformée, dans un état ultérieur.

Pour cela, les algorithmes de corrélation recherchent la correspondance maximale entre des petites portions d'images appelées imagettes. Lorsque le pic de corrélation est identifié, les déformations entre les deux images sont obtenues. La qualité de la corrélation dépend beaucoup de la qualité radiométrique et de la dynamique des images. La présence de bruit a pour effet de réduire la qualité de la corrélation entre les images, et les appareils récents offrent souvent un excellent rapport signal/bruit.

Par ailleurs, il faut que la texture de l'objet photographié soit adaptée, les structures périodiques posent ainsi toujours d'importants problèmes. Par contre, les surfaces anisotropes telles que le béton brut sont généralement satisfaisantes, surtout si la surface est exposée aux intempéries depuis longtemps.

3 Contraintes et limites du système

3.1 Effets thermiques

Les variations dimensionnelles du capteur et de l'optique avec la température rendent impossible la détection de changements ayant un effet isotrope sur l'image : on doit considérer que de telles déformations ne sont pas mesurables avec cette technique. Dans ces conditions, une instabilité de la distance focale, qui engendrerait le même problème, n'a pas à être combattue, ce qui permet de travailler avec tous les appareils photo courants.

3.2 Effets de la distorsion

La distorsion parfois très importante présente dans tous les systèmes d'acquisition d'images est un phénomène et bien connu des photogrammètres. Autrefois ils la corrigeaient en la mesurant au préalable (étalonnage), et maintenant grâce à l'abondance en points de liaison il est classique de résoudre comme des inconnues supplémentaires tous les paramètres d'orientation interne, qui incluent ceux liés à la distorsion.

Celui-ci implique que l'ouvrage ausculté n'est pas représenté par la même portion des deux images. La distorsion étant unique en chaque point de l'image, la mise en correspondance fait apparaître des différences de distorsion, dont l'importance fait disparaître les déformations effectives. Nous avons cherché à savoir s'il était possible de se passer de mesurer cette distorsion dans un cas concret.

La distorsion parfois très importante présente dans tous les systèmes d'acquisition d'images est un phénomène et bien connu des photogrammètres. Autrefois ils la corrigeaient en la mesurant au préalable (étalonnage), et maintenant grâce à l'abondance en points de liaison il est classique de résoudre comme des inconnues supplémentaires tous les paramètres d'orientation interne, qui incluent ceux liés à la distorsion. Pour un appareil courant non étalonné, lorsque le pointage de l'appareil n'est pas parfaitement identique entre les deux prises de vues, cela se traduit certes par une translation entre les images, qui est corrigée lors du traitement, mais les effets dus à la distorsion non corrigée des images sont directement fonction du dépointage. Celui-ci implique que l'ouvrage ausculté n'est pas représenté par la même portion des deux images. La distorsion étant unique en chaque point de l'image, la mise en correspondance fait apparaître des différences de distorsion, dont l'importance masque alors les déformations effectives. Nous avons cherché à savoir s'il était possible de se passer de mesurer cette distorsion dans un cas concret.

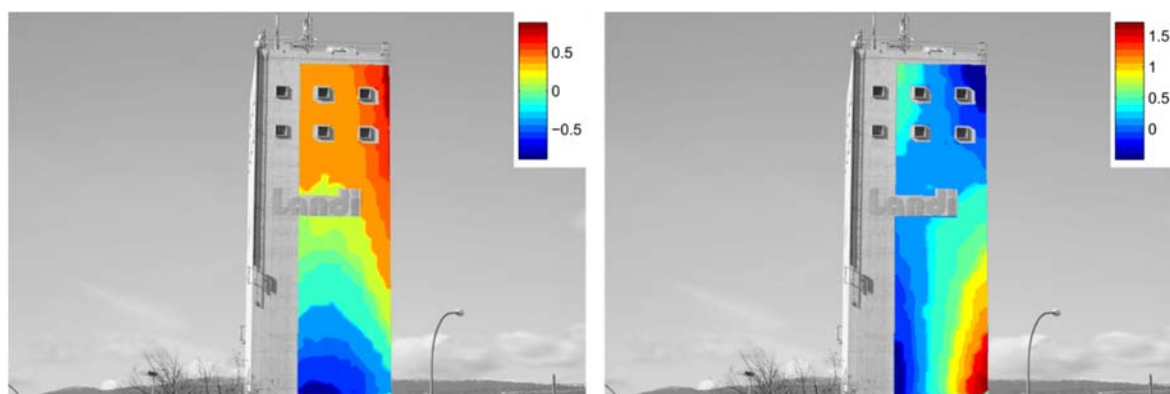


Fig. 1: Effets sur la composante horizontale (à gauche) et verticale (droite) d'un dépointage de 280 pixels, qui engendre un fort effet dû à la distorsion de l'optique. Couleurs exprimées en pixels (1 pixel = 15 mm).

La figure 1 montre les effets présents lorsque le point visé par l'appareil (Canon, focale 50 mm) est modifié de 280 pixels. Ces déplacements erronés atteignent près de 2 px aux extrémités de l'ouvrage. Les tests réalisés ont permis de définir qu'un dépointage de 15 pixels provoque encore des effets allant jusqu'à 0.1 pixel.

Les moyens de mise en place du capteur permettent d'atteindre facilement un dépointage inférieur à 5 px. Sachant que la distorsion augmente avec l'éloignement du centre de l'image, le centième de pixel peut alors être atteint en n'utilisant que leur partie centrale. Mais pour des cas où le

pointage précis est difficile à reproduire, il est finalement préférable de mesurer puis corriger la distorsion, ce qui permet alors aussi de travailler avec des images issues d'appareils différents si besoin est.

3.3 Effets de rotation (mise en station)

En corrélation diachronique, l'appareil doit être centré de la même manière entre les deux états de mesure. En planimétrie, les embases permettent un centrage de l'appareil amplement suffisant pour ces applications. Par contre, pour la mise à l'horizontale, même une très légère inclinaison du capteur influence directement les mesures de disparités entre les images.

La figure 2 montre les résultats de corrélation d'une paire d'images acquises avec une mise à l'horizontale approximative (± 0.2 gons). L'interprétation des disparités de la tour indique une rotation du bâtiment dans le sens horaire. Le défaut d'horizontalité est très visible et, sans corrections, rend l'analyse des déformations impossible.

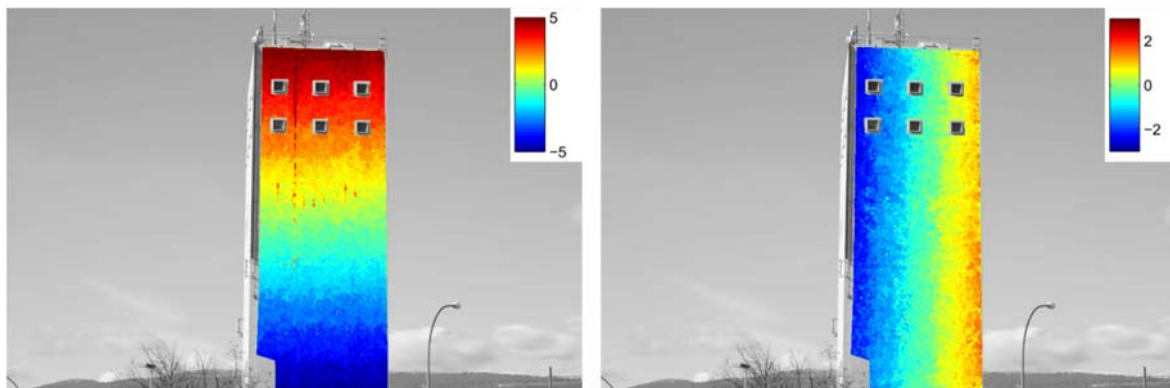


Fig. 2: Composantes horizontale (à gauche) et verticale (droite) de la corrélation entre deux images, avec une rotation de l'appareil entre les deux acquisitions, les couleurs sont exprimées en pixels (1 pixel = 15 mm)

Un point important à noter est que l'on ne corrige que très imparfaitement cet artefact par un calcul normal, car c'est directement la corrélation entre deux imagerie dont l'une a subi une petite rotation qui est dégradée. La solution la plus efficace consiste donc à recalculer, par re-échantillonnage, une des images en supprimant la rotation d'ensemble, et seulement ensuite à appliquer la corrélation diachronique. Dans ces conditions, on parvient à atteindre la précision de 0.01 pixel.

3.4 Dynamique des images

La dynamique des images est un élément essentiel de la qualité de la corrélation. Il faut donc régler l'acquisition d'image pour que l'histogramme soit le plus proche possible de la saturation, sans l'atteindre bien entendu : c'est ainsi que l'image présente le meilleur rapport signal/bruit (Fig. 3). Mais même ainsi, le coefficient de corrélation peut rester insuffisant sur certaines surfaces très unies. La notion de surface unie (radiométrie constante, donc corrélation impossible) est directement liée à la dynamique : avec 12 bits significatifs, on n'observe presque aucune surface unie, là où avec 7 bits on en trouve beaucoup. Cela signifie-t-il qu'on ne peut pas traiter des surfaces unies avec un appareil courant à faible dynamique ? Non, car il est souvent possible,

lorsque l'objet ne se déforme que très lentement, d'effectuer une sommation d'images acquises en rafale.

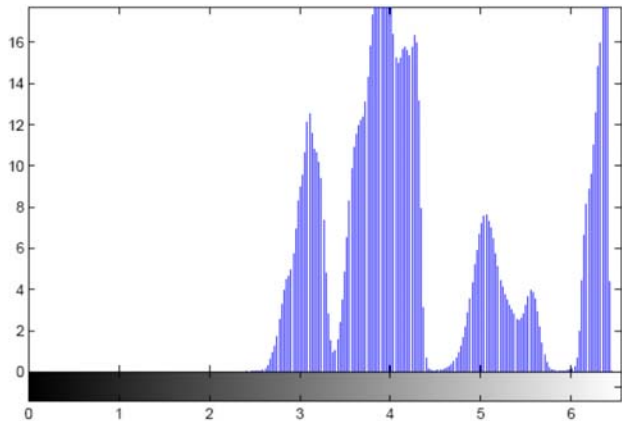


Fig. 3: Un histogramme d'image optimal, s'approchant autant que possible de la saturation sans l'atteindre.

En effet si rien ne bouge pendant les acquisitions successives, pour chaque pixel de l'image on peut sommer les valeurs obtenues dans les images successives. Pour 2 images, on augmente ainsi de 1 bit significatif la dynamique de l'image, ou encore pour $64 = 2^6$ images sommées on l'augmente de 6 bits. Cette technique permet de résoudre à peu près toutes les situations, hormis celles où l'objet est susceptible de bouger pendant les acquisitions (Fig. 4). Dans ce type de traitement d'image, le signal augmente en fonction du nombre N d'images sommées, alors que le bruit, réputé Gaussien, ne croît qu'en $N^{1/2}$, donc le rapport signal/bruit est amélioré lui aussi en $N^{1/2}$.

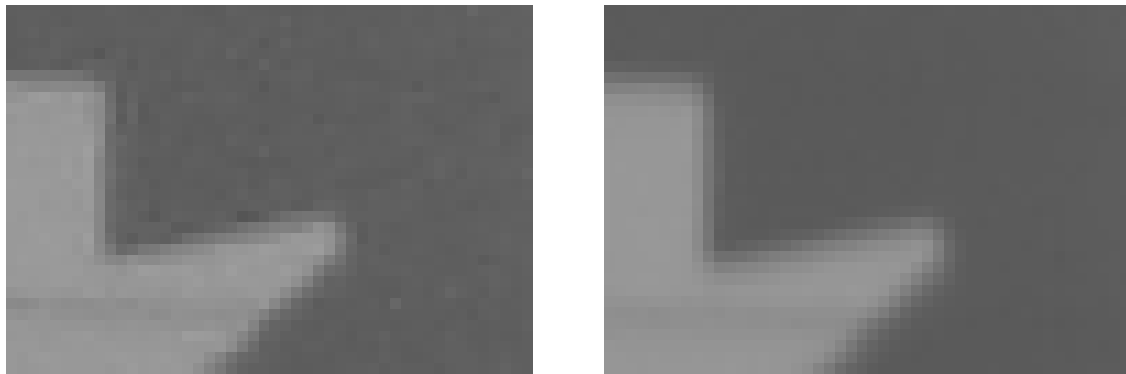
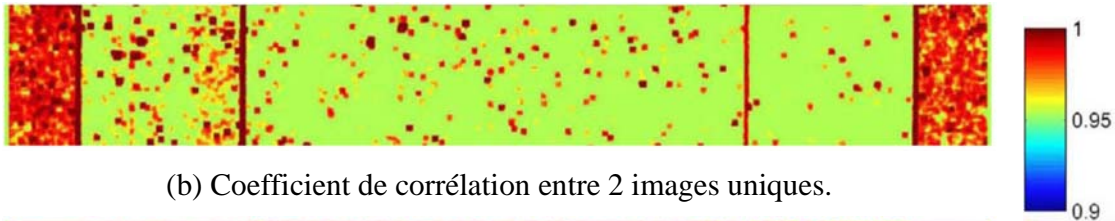


Fig. 4: Exemple de sommation d'images : à gauche une image normale, à droite la somme de 16 images, montrant la réduction considérable du bruit.

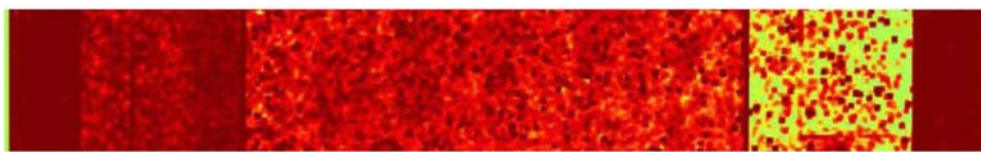
Comme exemple, celui d'un mur en béton peint, avec certaines surfaces très unies (Fig. 5).



(a) Image du mur peint.



(b) Coefficient de corrélation entre 2 images uniques.



(c) Coefficient de corrélation entre 2 images, chacune étant somme de 10 images.

Fig. 5: En (a), l'image du mur, en (b) est représenté le coefficient de corrélation entre deux images successives, avec de larges zones où ce coefficient est inférieur à 0.96, seuil qui correspond à des corrélations satisfaisantes. En (c), avec une sommation de 10 images, le coefficient devient satisfaisant à peu près partout.

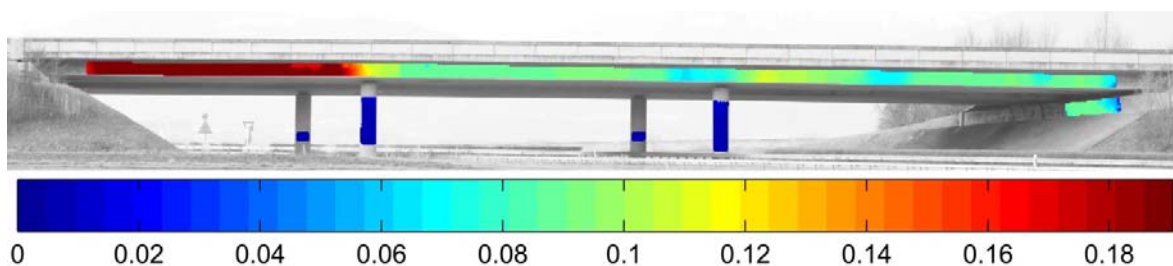
Néanmoins, on observe généralement que, sur les surfaces en béton naturel, le coefficient de corrélation est satisfaisant avec une seule image pour des appareils photo récents, qui ont souvent plus de 10 bits significatifs. C'est ainsi que le pont ci-dessous a permis une corrélation satisfaisante pour des images uniques malgré un éclairage médiocre (contre-jour), ce qui permet de mesurer sa flexion en situation dynamique (Fig. 6).



(a) Acquisition des images.



(b) Exemple d'image traitée.



(c) Résultat de la corrélation sur le tablier et les piles de pont.

Fig. 6: Pont autoroutier et les déplacements verticaux observés à l'occasion du passage d'un véhicule, les couleurs sont exprimées en pixels (1 pixel = 3 cm).

3.5 Effets de la réfraction à grande distance

Afin de répondre à des situations de terrain particulières, il est important de voir s'il est possible de mesurer à des distances importantes, par exemple lorsqu'aucun site proche ne peut être trouvé pour observer le tablier du pont sous un angle satisfaisant. Les effets de la réfraction sont en effet très largement visibles à de telles distances.

Les essais menés ont porté sur une distance de 650 m. Le traitement des images, avec le logiciel Open Source MicMac, a été fait toujours sur le principe suivant : une translation générale strictement verticale est appliquée de manière à annuler le déplacement vertical apparent au niveau des culées, et la comparaison est faite sur toute la surface latérale visible du tablier.

À titre indicatif, avec des conditions normales du coefficient de réfraction k (0.12), le déplacement de l'image est de l'ordre de 3 pixels. Mais on observe couramment qu'à proximité du sol, les valeurs de k peuvent varier dans une très large gamme (de +10 à -10).

Fondamentalement, si cette déviation se fait dans un plan vertical avec une atmosphère bien stratifiée, ce phénomène n'est pas gênant puisqu'il entraîne une translation verticale d'ensemble

de l'image, qui est ensuite évacuée par le calcul. Mais près du sol les gradients thermiques sont plutôt perpendiculaires aux surfaces, et donc pas nécessairement verticaux. Et surtout on peut observer, en périodes de forts échanges de chaleur, des phénomènes de turbulences qui provoquent une forme d'instabilité de l'image, bien connue des topographes. Intuitivement, on peut donc s'attendre à une importante dégradation des résultats de la corrélation diachronique. À noter tout de même que, si le point de vue est bien choisi, la visée peut rester constamment à plusieurs mètres au-dessus du sol (typiquement 5 m pour des ponts sur autoroute, cas de nos essais), ce qui permet de rester loin des zones à réfraction anormale, généralement proches du sol.

Afin de comparer des situations équivalentes, les tests ont été menés sur des situations où aucune charge n'était sur le pont, et nous avons cherché à voir de combien on s'écartait de valeurs nulles sur les déplacements verticaux. Une moyenne glissante a été effectuée sur une fenêtre 100 px x 100 px, soit environ 1 m². Les résultats présentés correspondent à une seule série de mesures, par temps estival chaud donc pas particulièrement favorable. Leur valeur statistique est faible puisque l'opération n'a été menée qu'une seule fois. Mais il faut en retenir la précision obtenue, entre 0.01 et 0.02 px d'écart-type, soit dans ce cas entre 0.1 et 0.2 mm.

Il est donc certain que dans des conditions météorologiques a priori favorables (p. ex. temps nuageux, ou vent soutenu, etc.) ce résultat est reproductible, ce qui représente une performance métrologique remarquable en termes de précision, de simplicité et de coût.

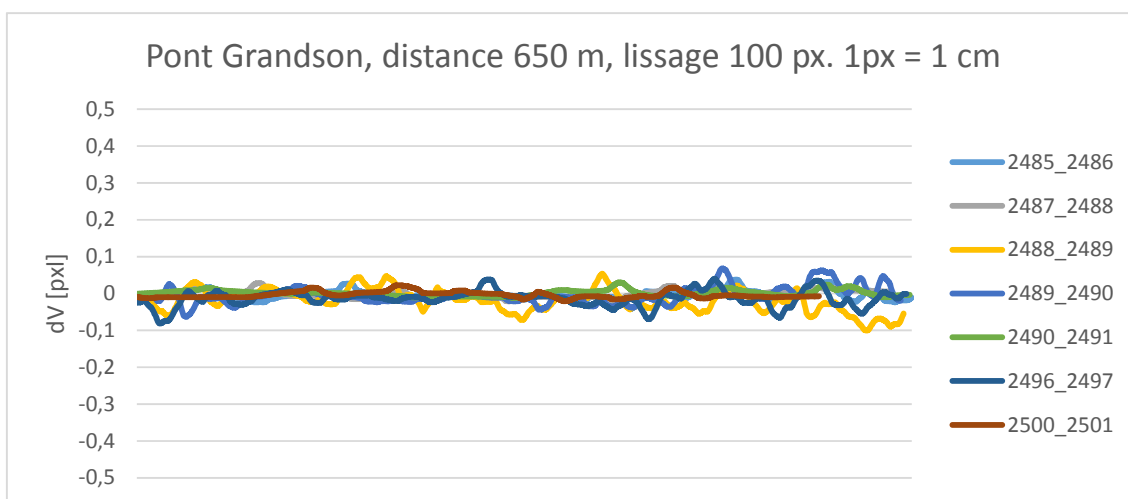


Fig. 7: Résultats de corrélations diachroniques successives sur un pont réputé parfaitement immobile, depuis une distance de 650 m (1 px = 1 cm), avec une moyenne glissante effectuée sur 1 m² de surface apparente du tablier. La déformation mesurée ainsi présente un écart-type de l'ordre de 0.01 px, soit 0.1 mm.

4 Conclusions

Les résultats obtenus permettent de bien définir les performances et les limitations de la corrélation diachronique pour le suivi des déformations de ponts. Au-delà de la finesse des déplacements identifiables, la possibilité de réaliser des mesures sans contact et sans pose de cibles est très économique et d'un grand intérêt. Quelques éléments limitants sont maintenant bien identifiés :

Premier point : on ne sait finalement détecter, avec ce procédé, que des déformations dans le plan perpendiculaire à l'axe optique, et non isotropes à l'intérieur de ce plan. Mais ceci est pleinement satisfaisant pour la plupart des ponts, où l'on va rechercher des flexions, des cisaillements, des ouvertures de fissures, etc., et où aucune déformation à caractère isotrope ne présente généralement d'intérêt. L'observation peut être envisagée même à des distances très importantes de l'ouvrage surveillé, puisqu'on dispose aujourd'hui d'une gamme considérable de focales pour les appareils photo courants, y compris de très longues focales, et puisque nous avons pu voir que la réfraction peut ne pas dégrader les résultats, au moins dans des situations météo favorables.

Par ailleurs, des problèmes liés aux changements d'éclairage pourraient apparaître, mais ce phénomène n'a pas encore été observé durant nos expérimentations. Au pire, ces problèmes pourraient alors être réglés par l'utilisation de prises de vue nocturnes, puisqu'un éclairage artificiel peut être très reproductible.

Nous avons également noté que la partie étudiée ne devait pas être masquée partiellement par un élément aléatoire comme des arbres, sauf à compliquer beaucoup le traitement (en détournant manuellement ces éléments).

En outre, il est généralement recommandé de travailler avec des optiques dont la distorsion est étalonnée. Mais avec des protocoles de mesures assurant une bonne répétitivité du pointage, cette exigence peut être contournée. Ainsi, une simple webcam pourrait-elle devenir un instrument de mesure ultra-précis.

En s'approchant du centième de pixel, la précision des mesures peut atteindre le dixième de millimètre dans de bonnes conditions d'acquisition. La mise en place d'un système de mesure d'une telle précision, à haute vitesse (les appareils courants offrent des rafales allant jusqu'à 10 images/s en pleine résolution, ce qui est considérablement meilleur que l'exploitation d'une video) et à faible coût devrait donc en faire sous peu un outil indispensable dans le monde de l'auscultation.

5 Bibliographie

- COMTE, J. & KASSER, M., 2014: Performances et limitations de la corrélation diachronique d'images pour les ouvrages d'art. *Géomatique Suisse* **11**, 488-492.
- DESEILLIGNY, M.P., 2007: Micmac, un logiciel pour la mise en correspondance automatique d'images dans le contexte géographique. *Bulletin d'Information Scientifique et Technique de l'IGN n°77*.
- VAN PUymbroeck, N., MICHEL, R., BINET, R., AVOUAC, J.P. & TABOURY, J., 2000: Measuring earthquakes from optical satellite images. *Applied Optics* **39** (20), 3486-3494.