

Master of Science HES-SO en Ingénierie du territoire

EXPLORATION DES LIMITES D'UTILISATION DE LA CORRÉLATION D'IMAGES DANS DES APPLICATIONS DE MESURES DE DÉFORMATIONS

Rédigé par
Julien COMTE

Sous la direction de
Prof. Michel KASSER
Dans l'institut G2C de la Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud

Experts
Dr Marco VIVIANI
Dr Bertrand CANNELLE

Yverdon-les-Bains, HES-SO // Master, 2014

Accepté par la HES SO//Master (Suisse, Lausanne) sur proposition de

Prof. Michel Kasser, conseiller de travail de Master

Lausanne, le 7 février 2014

Prof. Michel Kasser

Conseiller

André Oribasi

Responsable du Master MIT

Remerciements

L'aboutissement de cette thèse de Master est l'occasion d'adresser mes remerciements à toutes les personnes m'ayant apporté leur soutien :

- Au Prof. Michel Kasser, pour son suivi, sa disponibilité et ses précieux conseils tout au long de ce travail.
- Aux experts, Dr Bertrand Cannelle et Dr Marco Viviani, pour l'aide à l'emploi des logiciels et la proposition d'ouvrages à ausculter.
- Aux relecteurs, Laurent Glassey, Yves Guillemin, Maude Lavanchy, Eduardo Rodrigues et Daniel Rohrer, s'étant plongés courageusement dans ce document afin d'y extraire quelques coquilles ou inexactitudes.
- À mon employeur, le bureau Mosini et Caviezel SA, pour leur grande flexibilité durant mes deux années d'études et leurs encouragements pour ces six mois de thèse.
- À Martin Jeanneret, Guillaume Chapotte et Benoît Schnelli, collaborateurs scientifiques dans l'institut G2C, pour l'acquisition de mesures et la préparation du matériel informatique.
- À mes compères de K01a, Julien Brahier, Florent Lombardet, Salvatore Siciliano Silivestro, avec lesquelles j'ai partagé un bureau, une ambiance agréable et de nombreux problèmes de rédaction en \LaTeX .
- À mes colocataires, Yannick Charrotton, Jericho Moll et Julie-Charlotte Sokoloff, pour avoir supporté mes absences, mais surtout ma présence.
- Et pour terminer, je remercie mes parents et ma soeur, qui par leur simple présence m'apportent tout le soutien nécessaire.

Julien Comte

Résumé

La corrélation diachronique d'images est une technique de mesure basée sur la recherche de correspondance entre des images de différentes époques. Largement utilisée pour des mesures de déformations en laboratoire, elle permet de déterminer des déplacements à une précision du centième de pixel.

Dans le domaine de la surveillance d'ouvrages, les besoins actuels en solutions d'auscultation sont grands. La corrélation d'images, permettant des mesures «plein champ» et «sans contact» pourrait être en mesure de répondre à cette demande.

L'enjeu principal de ces recherches était donc d'évaluer quelles sont les possibilités d'adaptations des techniques de corrélation au domaine de la surveillance d'ouvrages. Moyennant un équipement à faible coût et des conditions variables de travail en extérieur, les limites d'utilisation de la corrélation d'images ont été explorées. Les possibilités de développement de cette nouvelle solution d'auscultation peuvent alors être définies.

Pour y parvenir, de nombreux essais de corrélation ont été effectués en se basant sur des ouvrages existants. En se plaçant dans des conditions de travail réalistes, chaque cas a permis de mettre en avant certaines faiblesses du système. La mise en place de techniques d'optimisation a permis de repousser ces limitations et d'évaluer le potentiel exact de cette technique de mesure.

Les résultats ont révélé que la précision du centième de pixel peut être atteinte pour des mesures de déplacements relatifs. Des essais de suivi dynamique sur un pont ont également permis d'atteindre cette précision pour la détection des déformations du tablier à l'aide de rafales d'images.

À l'issue de ces recherches, de nombreux aspects de la corrélation d'images appliquée à l'auscultation d'ouvrages ont été améliorés. Chaque étape a permis de cibler les lacunes et d'optimiser les techniques existantes. La précision attendue du centième de pixel a été atteinte et les évolutions préconisées doivent permettre de s'approcher encore plus près des besoins actuels du domaine de l'auscultation d'ouvrages.

Mots-clés : Corrélation, diachronique, image, 2D, auscultation, surveillance, déformation, ouvrage, bâtiment, MicMac, disparité, coefficient, pixel.

Abstract

Diachronic image correlation is a measurement technique based on correspondence search between two images from different epochs. Widely used for deformation measurements in laboratories, this technique is able to estimate displacements within a hundredths of a pixel precision.

In the field of infrastructures monitoring, the current needs in auscultation solutions are big. Digital image correlation that enables «full field» and «contactless» measurements could be able to respond to this demand.

The main goal of this research was to evaluate the possibilities for adapting correlation techniques for the infrastructure monitoring field. By using low-cost equipment and changing outside working conditions, this research tries to determine the limits of image correlation usage. These limits have made it possible to develop the potential of this new monitoring solution.

In order to do that, numerous correlation trials have been done based on existing infrastructures. Being in realistic working conditions, each case has made it possible to point out the system's weaknesses. Optimization techniques allowed to push back those limitations and evaluate the exact potential of this measurement technique.

Results have revealed that a hundredths of a pixel precision can be reached for relative displacements measurements. Dynamic auscultation trials on a bridge have allowed us to achieve this precision for deformation detection of the deck with bursts of images.

At the end of this research, numerous aspects of image correlation used on infrastructure monitoring have been improved. Each step has allowed us to target gaps and to optimize existing techniques. Expected precision within a hundredth of a pixel has been achieved and planned evolutions should enable us to get as close as possible from current needs in infrastructure monitoring.

Keywords : Correlation, diachronic, image, 2D, monitoring, auscultation, deformation, infrastructure, buildings, MicMac, disparity, coefficient, pixel.

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Problématique	1
1.2	Enjeux	2
1.3	Structure	2
I	Bases théoriques	3
2	Corrélation d'images	5
2.1	Principe	5
2.2	Images numériques	6
2.3	Définition mathématique	7
2.3.1	Corrélation 1D	7
2.3.2	Corrélation 2D	8
2.4	Fenêtre de corrélation (<i>subset</i>)	10
2.5	Pas de corrélation (<i>step</i>)	11
2.6	Critères de corrélation (<i>R</i>)	12
2.6.1	Changements d'intensité	12
2.6.2	Formules	13
2.7	Textures (Pattern)	14
2.8	Modes d'interpolation	14
2.9	Sources d'erreurs et limitations	16
3	Propriétés et traitement d'images	17
3.1	Formats d'images	17
3.1.1	Format JPEG	17
3.1.2	Format RAW	18
3.1.3	Format TIFF	18
3.1.4	Récapitulatif	18
3.2	Défauts et qualités des images	19
3.2.1	Bruit	19
3.2.2	Dynamique	19
3.3	Acquisition des images	21
3.3.1	Capteur	21

Table des matières

3.3.2 Images obtenues	21
3.4 Sommation d'images	21
II Tests et applications pratiques	23
4 Introduction à MicMac	25
4.1 Principes de fonctionnement	25
4.1.1 Schéma	26
4.1.2 Étapes de travail	26
4.2 Préparation des données	27
4.3 Calcul	27
4.3.1 Paramètres	27
4.3.2 Commandes	29
4.4 Résultats	29
4.4.1 Mise en valeur	30
4.5 Exemple	30
4.5.1 Données	30
4.5.2 Traitement	31
4.5.3 Résultat	32
5 Aspects visuels de surfaces en béton	35
5.1 Présentation de l'échantillon	35
5.2 Effets de la sommation d'images	36
5.2.1 Images brutes	36
5.2.2 Images additionnées	37
5.2.3 Analyse des effets	38
5.3 Influence de l'intensité lumineuse	38
5.3.1 Variation des niveaux d'intensité	39
5.4 Analyse des déplacements mesurés	40
5.5 Problèmes d'instabilité du capteur	41
6 Tour Landi	45
6.1 Description de l'ouvrage	45
6.2 Test de corrélation	46
6.3 Effets de la distorsion	47
6.3.1 Dépointage fort (280 px)	48
6.3.2 Dépointage léger (15 px)	49
6.4 Corrélation diachronique	50
6.5 Prise en compte des rotations	52
6.5.1 Transformation de Helmert	52
6.5.2 Correction avant traitement	53
6.6 Analyse des résultats	55

7 Pont autoroutier	57
7.1 Ouvrage choisi	57
7.2 Qualité de corrélation	58
7.2.1 Analyse des images	58
7.2.2 Coefficients des images brutes	58
7.2.3 Sommation d'images	59
7.3 Surveillance dynamique de l'ouvrage	59
7.3.1 Secteurs d'analyse	59
7.3.2 Traitements	60
7.3.3 Résultats	60
7.3.4 Analyses graphiques	61
7.4 Analyse des résultats	62
8 Leica MS50	65
8.1 Acquisition des images	66
8.2 Essais de corrélation	66
8.2.1 Images brutes	66
8.2.2 Images sommées	67
8.2.3 Mesures de disparités	68
8.3 Comparaison des précisions	69
8.3.1 Récapitulatif	69
8.4 Analyse des résultats	70
III Analyses et discussions	71
9 Conclusions	73
IV Annexes	77
A Fonctions MATLAB	79
A.1 Traitement des images (rgb2gray)	79
A.1.1 Principe	79
A.1.2 Schéma	80
A.1.3 Code source	80
A.2 Sommation d'images	82
A.2.1 Principe	82
A.2.2 Schéma	82
A.2.3 Code source	82
A.3 Représentation des résultats MicMac	85
A.3.1 Principe	85
A.3.2 Code source	85
A.4 Transformation de Helmert	87

Table des matières

A.4.1 Principe	87
A.4.2 Code source	88
A.5 Rotation d'images	92
A.5.1 Principe	92
A.5.2 Code source	92
B Fichiers de paramétrage MicMac	95
B.1 Déformation de poutre	95
B.2 Tour Landi	100
B.3 Pont autoroutier	105
C Analyse de configurations MicMac	107
C.1 Terme de régularisation	107
C.2 Taille de la fenêtre	109
C.3 Coefficient de corrélation minimum	111
C.4 Gamma corrélation	113
D Pont autoroutier (détail des calculs)	117
D.1 Secteurs d'analyse	117
D.1.1 Tablier	117
D.1.2 Piliers	117
D.1.3 Situation	117
D.2 Extraits de résultats	118
D.3 Tableau des écarts	119
D.4 Courbes des écarts	120
D.5 Paramètres de calcul	121
Liste des figures	128
Liste des tableaux	129
Glossaire	131
Acronymes	133
Bibliographie	136

1 Introduction

1.1 Problématique

La corrélation d'images a fait son apparition avec l'arrivée des premières images numériques, aux alentours des années 1980. En photogrammétrie, on a commencé à utiliser les techniques de corrélation pour la recherche de points homologues lors de l'apparition des scanners et la possibilité de numériser les clichés argentiques.

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 d'essais de contraintes en laboratoire. Cette technique à l'avantage de permettre des mesures «plein champ», «sans contact», et ce sur une très large gamme d'échelles de mesure. Il est possible d'analyser des déplacements sur une surface allant de quelques mm^2 jusqu'à plusieurs km^2 en fonction du type de matériel employé et la configuration du système mis en place.

Dans le domaine de l'**auscultation d'ouvrages**, on travaille aujourd'hui généralement avec des systèmes de mesure mécaniques permettant uniquement une surveillance localisée sur des points caractéristiques de l'ouvrage devant être choisi minutieusement. Lors des campagnes de mesures par relevés géométriques traditionnels, il est systématiquement nécessaire d'intervenir sur l'ouvrage pour la matérialisation et la mesure des points de surveillance. Ces campagnes sont généralement longues et coûteuses en raison des difficultés d'intervention et ne fournissent là encore qu'un ensemble de mesures ponctuelles réparties sur l'ouvrage.

Les avantages des techniques de corrélation diachronique appliquées à l'auscultation d'ouvrages semblent être en mesure d'améliorer considérablement les moyens actuels de surveillance. 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. Actuellement, de nombreux ouvrages d'art et constructions sont vieillissants et doivent 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 faible coût.

1.2 Enjeux

Les solutions de mesure par corrélation d'images sont à l'origine développées pour des applications en laboratoire dans des conditions stables et avec une instrumentation généralement haut de gamme. Selon la théorie et les expériences menées en laboratoire, les algorithmes de corrélation d'images permettent d'atteindre une **précision de mesure** de l'ordre du centième de pixel. La relation de précision étant fonction de la taille du pixel, l'adaptation du matériel et des conditions d'acquisition des images devrait permettre pour chaque ouvrage d'obtenir la précision finale souhaitée.

L'enjeu principal de ces recherches est donc d'évaluer quelles sont les **possibilités d'adaptations** des techniques de corrélation au domaine de la surveillance d'ouvrages, moyennant des conditions variables et un équipement à relativement faible coût. L'objectif est alors de définir quelles sont les **limites d'utilisation** de la corrélation d'images pour des applications de mesures de déformation d'ouvrages.

Les domaines explorés dans le cadre de ces recherches comprennent la prise en main de logiciels de corrélation ainsi que l'évaluation du matériel utilisé et son impact sur les résultats. Pour terminer, une phase de développement doit permettre l'amélioration des techniques de corrélation afin d'optimiser le processus de travail.

1.3 Structure

Le rapport présenté est composé d'une première partie théorique, suivie d'une partie pratique.

La partie théorique permet d'introduire les **notions de base** des techniques de corrélation d'images. Elle décrit les équations de corrélation ainsi que les principaux paramètres intervenant dans le processus.

Dans la partie pratique, quelques **cas d'applications** pratiques réalisés au cours du projet sont étudiés. Ces exemples présentent différentes situations basées sur quelques ouvrages sélectionnés. Les résultats sont analysés et des solutions sont mises en place ou proposées lorsqu'un problème est constaté.

Les annexes sont principalement composées des scripts (ou codes sources), destinés à l'emploi des logiciels de traitement. Elles permettent de comprendre en détail le fonctionnement des techniques développées pour optimiser le processus de corrélation. Quelques détails de calculs y sont également présentés.

Bases théoriques Partie I

2 Corrélation d'images

La corrélation d'images numériques [17] est une technique de mesure optique bidimensionnelle permettant de déterminer des disparités entre deux images. Elle est utilisée dans de nombreux domaines techniques et scientifiques où l'on en fait usage de manière très variée [3, 15]. En photogrammétrie, elle est beaucoup utilisée pour le calcul automatique de MNT par restitution stéréoscopique, où elle remplace avantageusement la reconnaissance visuelle des points homologues du terrain par un traitement numérique. En science des matériaux, elle permet de déterminer des champs de disparité et de calculer des déformations afin d'identifier les principales caractéristiques des matériaux.

Les moyens de mesure généralement utilisés en science des matériaux (jauge de déformation, extensomètre) fournissent des mesures ponctuelles sur l'objet étudié. L'avantage de la corrélation d'images est qu'elle fournit des valeurs de déplacement sur l'ensemble de la surface des matériaux sous la forme d'un champ de vecteurs. Cela permet donc de disposer d'informations sur l'entier de l'échantillon observé sans devoir définir au préalable les points déterminants et installer les dispositifs de mesures.

Dans [14, 10, 6, 9], les principes fondamentaux de la corrélation d'image unidimensionnelle et bidimensionnelle sont définis et permettent de mettre en évidence les facteurs les plus influents du processus.

Dans tous les exemples présentés par la suite, les notions d'image «référence» et d'image «déformée» sont employées. C'est entre ces deux images que les outils de corrélation sont appliqués.

2.1 Principe

La base de développement des méthodes de corrélation repose sur le principe de recherche d'éléments communs entre deux images numériques. En raison du nombre élevé de pixels présentant des valeurs identiques, il est généralement impossible de trouver la correspondance d'un seul pixel d'une image dans la seconde image. Ce phénomène, appelé **problème**

d'ouverture, oblige à analyser le voisinage du pixel afin de rechercher une correspondance unique entre les deux images. Il faut donc travailler par fenêtre de corrélation, *subset* ou encore imagette, représentant une portion d'image composée de plusieurs pixels.

Le problème d'ouverture est un cas particulier d'un phénomène plus général appelé **problème de correspondance**. Cela signifie que le caractère unique d'une portion d'image observée ne peut être garanti que lorsque celle-ci est parfaitement aléatoire. Il faut alors éviter les textures à structure répétitive pouvant être à l'origine de correspondances erronées.

En utilisant une taille de fenêtre raisonnable et une texture adaptée, la corrélation permet donc d'effectuer une mise en correspondance entre deux images et de déterminer les déplacements intervenus entre les deux instants des prises de vues.

2.2 Images numériques

15	11	11	4	4	15	11	11	4
11	11	11	4	11	15	11	11	4
11	0	0	4	11	15	11	4	0
0	0	4	4	11	11	4	0	0
0	4	4	11	11	4	0	0	11
8	8	11	11	11	4	0	11	11
8	8	11	11	4	4	11	11	15
8	8	11	11	4	4	11	15	15
4	8	8	11	11	4	4	11	15

FIGURE 2.1 – Schéma image numérique.

C'est avec l'évolution des appareils photo modernes et l'apparition des images numériques que les méthodes de corrélation ont pu se généraliser. Les technologies *Charge-Coupled Device (CCD)* et *Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS)* permettent aujourd'hui de disposer d'une grande quantité d'information en générant des images brutes stockées sous la forme de matrices 2D. Le capteur photographique transforme le flux lumineux perçu en signal numérique afin de le stocker sous forme matricielle. Chaque cellule de la matrice correspond à un pixel de l'image et sa valeur représente l'intensité lumineuse reçue par le capteur.

La représentation schématique de l'image en figure 2.1 montre la relation entre la valeur de la matrice et sa couleur correspondante. Les valeurs d'intensité lumineuse sont ici comprises dans une plage allant de 0 pour une intensité nulle à 15 pour un flux lumineux maximal. Cette plage de valeurs, correspondant à la dynamique de l'image, est détaillée dans le chapitre 3.2.2. Pour cette représentation, la plage [0 .. 15] indique qu'un pixel peut prendre 2^4 (soit 16) valeurs distinctes correspondant à une dynamique d'image de 4 bits. Dans la pratique, on travaille généralement avec une plage allant de 0 à 255, ce qui revient à une dynamique de 8 bits.

2.3 Définition mathématique

2.3.1 Corrélation 1D

Afin de bien comprendre la corrélation à deux dimensions, il est utile de bien saisir les principes de la corrélation unidimensionnelle décrits en [14] et illustrés par la figure 2.2. L'exemple présenté utilise le **traitement différentiel**, permettant de comparer les variations d'intensité entre deux signaux.

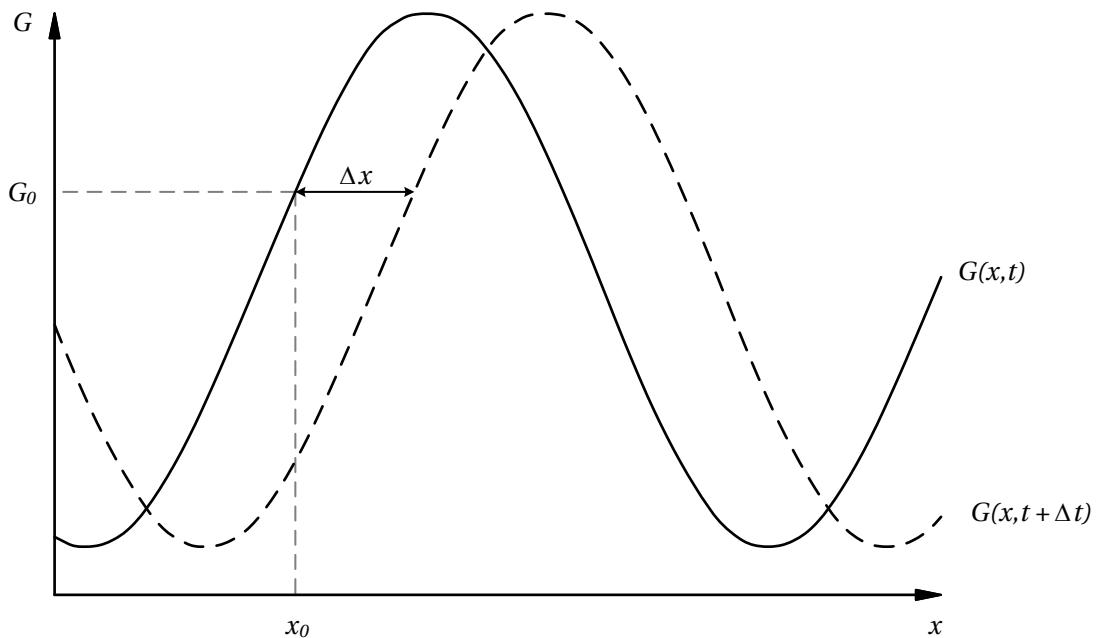


FIGURE 2.2 – Exemple de corrélation 1D.

En considérant $G(x, t)$ comme la distribution d'intensité sur un objet en fonction du temps, un déplacement suffisamment petit permet d'estimer les valeurs de gris autour d'un secteur d'intérêt par la fonction

$$G(x + \Delta x, t) = G(x, t) + \frac{\partial G}{\partial x} \Delta x \quad (2.1)$$

Si l'objet se déplace à une vitesse constante \dot{u} , un niveau de gris se déplacera de $\Delta x = \dot{u}\Delta t$ après un intervalle de temps Δt et la nouvelle distribution des niveaux devient une copie translatée de la distribution originale

$$\begin{aligned} \Delta G &= G(x, t + \Delta t) - G(x, t) \\ &= G(x - \dot{u}\Delta t, t) - G(x, t) \\ &= G(x - \Delta x, t) - G(x, t) \end{aligned} \quad (2.2)$$

Chapitre 2. Corrélation d'images

En substituant l'équation 2.1 à l'équation 2.2, on peut exprimer le changement de niveau de gris ΔG comme fonction de la pente de l'intensité comme suit :

$$\begin{aligned} G(x, t + \Delta t) - G(x, t) &= -\frac{\partial G}{\partial x} \Delta x \\ \Delta G &= -\frac{\partial G}{\partial x} \Delta x \end{aligned} \quad (2.3)$$

ce qui permet d'obtenir l'estimation du mouvement

$$\Delta x = -\frac{\Delta G}{\frac{\partial G}{\partial x}} \quad (2.4)$$

Pour de petits mouvements, le déplacement est donné par le changement d'intensité divisé par la pente de la courbe d'intensité. En substituant $\Delta x = \dot{u}\Delta t$ dans 2.4, on obtient l'estimation de la vitesse

$$\dot{u}\Delta t = -\frac{\Delta G}{\frac{\partial G}{\partial x}} \quad (2.5)$$

Finalement, en prenant la limite $\Delta t \rightarrow 0$, on obtient :

$$\frac{\partial G}{\partial t} + \dot{u} \frac{\partial G}{\partial x} = 0 \quad (2.6)$$

Ces développements constituent la base des équations de conservation du flot optique et ont été au cœur de nombreuses recherches durant les dernières décennies. Aujourd'hui, des méthodes simples de détermination de déplacements existent et permettent notamment une application aux cas de corrélation à deux dimensions.

2.3.2 Corrélation 2D

Dans les cas de recherche de correspondance à deux dimensions, le traitement différentiel des variations d'intensité est remplacé par une **minimisation des différences** de gris entre une petite fenêtre d'une image de référence et sa copie dans une image déformée.

Pour illustrer simplement le modèle mathématique, il est admis qu'aucun changement d'éclairage n'a lieu entre les deux images et que celles-ci sont uniquement affectées de translations et d'un bruit gaussien aléatoire. On note F l'image référence où est pris l'échantillon et G l'image après déplacements. Dans l'équation 2.7, on cherche à minimiser la somme des différences des niveaux de gris élevées au carré dans le voisinage de l'échantillon.

$$\bar{\mathbf{d}}_{opt} = \operatorname{argmin} \sum |G(\mathbf{x} + \bar{\mathbf{d}}) - F(\mathbf{x})|^2 \quad (2.7)$$

Le vecteur de déplacement optimal $\bar{\mathbf{d}}_{opt}$ peut être résolu en utilisant le développement en séries de Taylor du premier ordre sur la fonction de minimisation précédente

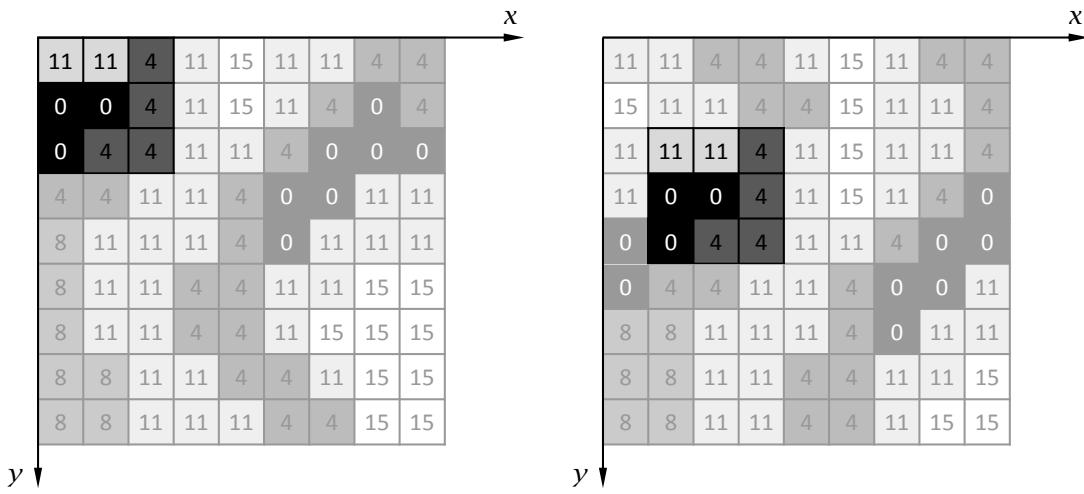
$$\chi^2(\bar{d}_x + \Delta_x, \bar{d}_y + \Delta_y) = \sum \left| G(\mathbf{x} + \bar{\mathbf{d}}) - \frac{\partial G}{\partial x} \Delta_x - \frac{\partial G}{\partial y} \Delta_y - F(\mathbf{x}) \right|^2 \quad (2.8)$$

Dans l'équation 2.8, \bar{d}_x et \bar{d}_y sont les estimations des déplacements moyens de la fenêtre, et Δ_x , Δ_y sont les résidus pour chaque itération. La linéarisation de 2.8 pour la mise à jour incrémentielle donne le système suivant

$$\begin{bmatrix} \Delta_x \\ \Delta_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum \left(\frac{\partial G}{\partial x} \right)^2 & \sum \frac{\partial G}{\partial x} \frac{\partial G}{\partial y} \\ \sum \frac{\partial G}{\partial x} \frac{\partial G}{\partial y} & \sum \left(\frac{\partial G}{\partial y} \right)^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum \frac{\partial G}{\partial x} (F - G) \\ \sum \frac{\partial G}{\partial y} (F - G) \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

L'équation 2.9 peut être employée dans le but d'améliorer à chaque itération n l'estimation du déplacement moyen en utilisant $\bar{\mathbf{d}}^{n+1} = \bar{\mathbf{d}}^n + \Delta$ jusqu'à ce que la convergence au vecteur de déplacement optimal $\bar{\mathbf{d}}_{opt}$ soit atteinte. Cette technique connue sous le nom de **méthode Lucas-Kanade** [19] est largement utilisée dans le domaine de la vision par ordinateur et sa démonstration est faite dans [8].

Dans la figure 2.3, la vignette de 3×3 pixels dans l'image *référence* se retrouve à l'identique dans l'image *déformée* moyennant deux translations. La correspondance entre les images est maximale en appliquant un déplacement dx de 1 pixel et un déplacement dy de 2 pixels.



(a) Image référence F

(b) Image déformée G

FIGURE 2.3 – Exemple de corrélation 2D.

2.4 Fenêtre de corrélation (*subset*)

Lorsque l'on cherche à analyser des déplacements entre deux images, il apparaît de manière presque systématique que ceux-ci ne sont pas constants sur l'ensemble de la zone d'étude. Cette non homogénéité dans les mouvements ne permet donc pas d'analyser globalement la correspondance entre les images, mais implique une recherche locale par fenêtres de tailles réduites. La détermination des similitudes se fait donc entre de petites portions de chaque image en répétant l'opération jusqu'à analyser les images au complet.

Cependant, comme cela a été mentionné en 2.1, la taille de la fenêtre doit être suffisamment grande afin d'éviter des erreurs liées à un éventuel problème de correspondance. Un compromis doit donc être trouvé dans le choix des dimensions de la fenêtre de corrélation.

Dans [20], des tests en laboratoire ont été effectués afin d'analyser l'influence de la taille de la fenêtre sur les mesures de déplacements. Ces analyses permettent de définir des paramètres de calcul adaptés en fonction du type de mouvement attendu. La figure 2.4 montre les résultats obtenus en faisant varier la dimension de la fenêtre pour une mesure de déplacement sur un même échantillon.

Cette étude confirme qu'en cas de mouvement non homogène il est nécessaire d'opter pour une petite fenêtre de corrélation permettant de distinguer les discontinuités des déplacements. En revanche, lorsque les mouvements attendus sont homogènes, la différence entre une petite et une grande fenêtre influence très peu la mesure de déplacement moyen. Par rapport à une petite fenêtre, une grande a pour effet de réduire l'écart-type des mesures sans modifier fondamentalement leur moyenne et permet également un filtrage des courtes longueurs d'onde spatiales.

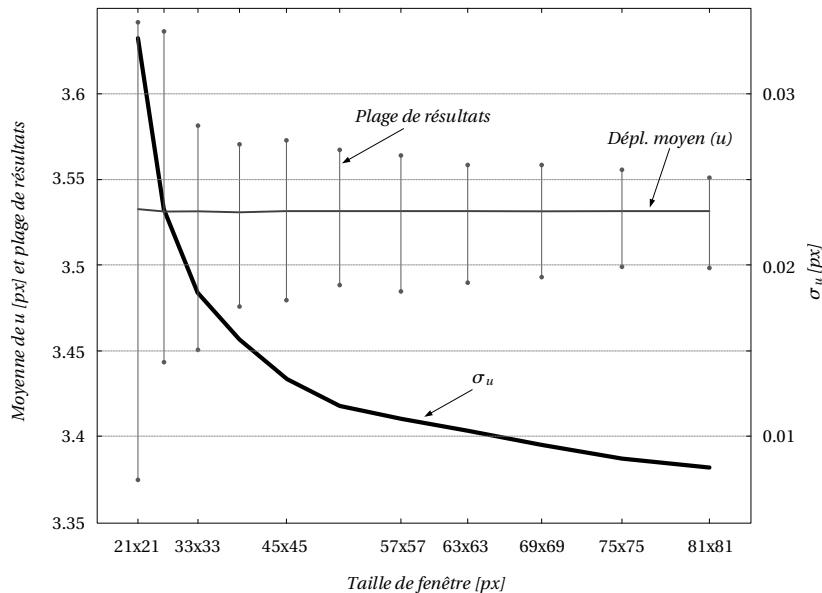


FIGURE 2.4 – Influence de la taille de fenêtre pour un mouvement homogène [20].

Le tableau 2.1 dresse un inventaire de quelques avantages et inconvénients liés au choix de la fenêtre de corrélation. Combiné aux résultats présentés en [20], ce tableau permet de définir une taille de fenêtre adaptée à chaque échantillon en fonction des déplacements attendus. Dans la suite du rapport, l'influence de ce paramètre est discutée et analysée sur la base de tests de corrélation.

Taille de fenêtre	Avantages (+)	Inconvénients (-)
Petite	Bonne descriptions des mouvements à petite longueur d'onde. Calcul rapide.	Bruit dans la mesure.
Grande	Minimisation des effets du bruit. Filtrage des courtes longueurs d'onde.	Lenteur de calcul. Pas de détection des courtes longueurs d'onde.

TABLEAU 2.1 – Résumé des caractéristiques des fenêtres.

2.5 Pas de corrélation (*step*)

Le pas de corrélation correspond au déplacement de la fenêtre de corrélation lorsqu'elle parcourt l'image. En fonction des logiciels, ce paramètre peut être utilisé de différentes manières. Dans le logiciel de corrélation employé pour ce travail (MicMac), il peut être défini entre plusieurs pixels et des valeurs sub pixel. Cela signifie que la fenêtre de corrélation se déplace d'un demi-pixel ou même d'un centième de pixel.

La figure 2.5 illustre un exemple de corrélation avec une fenêtre 5×5 pixels et un pas de 3 pixels entre les fenêtres successives.

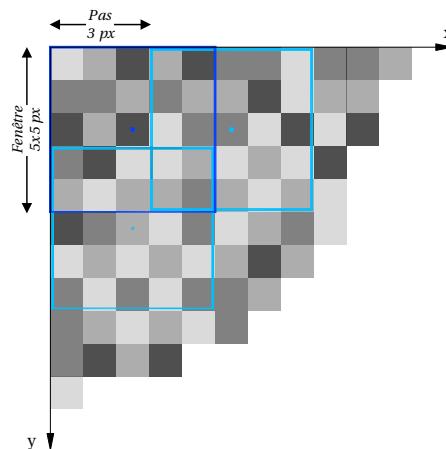


FIGURE 2.5 – Fenêtre et pas corrélation.

2.6 Critères de corrélation (R)

Afin d'évaluer le niveau de similitude entre deux images de manière automatique, il est nécessaire de disposer d'un indicateur numérique qualifiant leur ressemblance. Pour cela, il existe un critère appelé **coefficent de corrélation** qui analyse une fenêtre de l'image référence et la compare avec une fenêtre de taille identique de l'image déformée. Lorsque le coefficient atteint sa valeur maximale, on peut estimer que les deux fenêtres représentent la même portion d'image, ce qui permet d'en déduire les translations entre les images.

Dans la pratique, il existe différents critères de corrélation pouvant être classés en quatre catégories selon leur définition mathématique [9].

- Cross-correlation (CC) ; (*corrélation croisée*)
- Sum of squared differences (SSD) ; (*somme des différences au carré*)
- Sum of absolutes differences (SAD) ; (*somme des différences absolues*)
- Parametric sum of squared differences (PSSD) ; (*somme paramétrique des différences au carré*)

Les critères de corrélation les plus utilisés sont CC et SSD en raison de leur simplicité d'implémentation dans les logiciels de calcul. Une différence notable entre ces deux critères est le type de similitude du coefficient. Le C_{CC} est toujours compris dans l'intervalle [-1 .. 1] et la corrélation est maximale pour la valeur 1. En revanche, le critère C_{SSD} consistant à minimiser les carrés des différences, il indique une correspondance maximale lorsqu'il atteint 0.

2.6.1 Changements d'intensité

Lors des acquisitions d'images, il est fréquent que l'intensité lumineuse varie entre l'image de référence et l'image déformée. Celles-ci étant généralement acquises dans des configurations différentes, ces variations ne peuvent être évitées, mais doivent être prises en considération lors du processus de corrélation.

Ces changements se classent en deux types, à savoir une variation constante ou une variation d'échelle des niveaux d'intensité des images. L'échelle correspondant à un facteur multipliant chaque valeur des pixels d'une image est notée a dans le tableau 2.4 (Ex. Augmentation de la luminosité ambiante). La constante correspond à une valeur fixe ajoutée ou ôtée à chaque valeur des pixels d'une image. Elle est notée b dans le tableau 2.4 (Ex. Ombre portée sur la surface photographiée).

Afin de prendre en compte ces deux types de variations, des solutions appelées *Zero Normalized* ont été mises en place. Elles permettent de remettre à zéro la constante b et de normaliser les valeurs d'intensité afin d'éliminer un éventuel facteur a . Ces solutions donnent lieu à trois critères : ZNCC, ZNSSD et PSSD_{ab}. En raison de leur forte robustesse à ces types de variations d'intensité, leur utilisation est fortement recommandée dans la pratique.

TABLEAU 2.2 – Variations d'intensité (Échelle : $a = 0.8$).

245	240	225
239	244	222
235	225	225
196	192	180
191	195	178
188	180	180

 TABLEAU 2.3 – Variations d'intensité (Constante : $b = 6$).

245	240	225
239	244	222
235	225	225
251	246	231
245	250	228
241	231	231

L'étude présentée dans [9] démontre l'équivalence mathématique des critères ZNCC, ZNSSD et PSSD_{ab}. Il est démontré qu'il existe une relation mathématique directe entre ces critères lorsque ceux-ci sont rendus insensibles aux variations d'intensité. Cette équivalence est vérifiée par les essais en laboratoire présenté en [11] où des données semblables traitées par ZNCC et par ZNSSD donnent des résultats identiques à 0.003 pixel près.

2.6.2 Formules

Le tableau 2.4 présente le critère d'optimisation par SSD et ses fonctions relatives aux différents niveaux de robustesse. La formule, le type de robustesse ainsi que le modèle mathématique sont indiqués pour chaque niveau.

TABLEAU 2.4 – Critères d'optimisation.

Critère	Formule	Type de robustesse	Modèle
C_{SSD}	$\sum(f_i - g_i)^2$	Aucun	$\Phi = G$
C_{ZSSD}	$\sum [\bar{f}_i - \bar{g}_i]^2$	Constante	$\Phi = G + b$
C_{NSSD}	$\sum \left(\frac{f_i}{\sqrt{\sum f_i^2}} - \frac{g_i}{\sqrt{\sum g_i^2}} \right)^2$	Échelle	$\Phi = aG$
C_{ZNSSD}	$\sum \left(\frac{\bar{f}_i}{\sqrt{\sum \bar{f}_i^2}} - \frac{\bar{g}_i}{\sqrt{\sum \bar{g}_i^2}} \right)^2$	Échelle + Constante	$\Phi = aG + b$

Dans le tableau 2.4 : $\bar{f} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i$, $\bar{g} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g_i$, $\bar{f}_i = f_i - \bar{f}$, $\bar{g}_i = g_i - \bar{g}$

2.7 Textures (Pattern)

Comme indiqué en 2.1, une bonne texture est un des éléments primordiaux entrant dans le processus de corrélation. Une texture anisotrope et non répétitive permet une correspondance unique entre les images et maximise donc la qualité de corrélation.

En auscultation d'ouvrages, la texture observée est dans la plus grande partie des cas composée de béton. Ce type de surface, étudié en détail dans le chapitre 5, dispose des qualités requises et permet à lui seul d'assurer une bonne qualité de corrélation. Lorsque la texture d'un objet à corrérer ne dispose pas de ces qualités, il est possible de lui appliquer une couche de spray permettant de créer artificiellement une texture aléatoire. Cette technique est généralement utilisée lors d'essais de contraintes sur des matériaux tels que des métaux ou des plastiques trop *lisses* pour permettre une correspondance unique.

Au-delà de la simple texture présente sur un ouvrage, la qualité de la prise de vue a également une influence sur leur faculté à bien corrélérer. Par exemple, lorsque les images sont affectées d'un bruit numérique aléatoire, celui-ci fausse le calcul du critère de corrélation et réduit la précision de la recherche de correspondance. Les chapitres 3.2.1 et 3.2.2 traitent des problèmes de bruit et de dynamique des images, et décrivent des solutions d'optimisation permettant d'améliorer le processus de corrélation.



(a) Béton brut.

(b) Spray.

(c) Motif répétitif.

FIGURE 2.6 – Illustration des différents types de textures.

2.8 Modes d'interpolation

Afin de parvenir à une précision sub pixel, les logiciels de corrélation effectuent des interpolations sur la base des images originales en niveaux de gris. Ces interpolations permettent d'augmenter virtuellement la résolution des images afin de mesurer des déplacements sub pixel.

Trois modes d'interpolation sont disponibles dans les logiciels de calculs :

- Plus proche voisin
- Bi-linéaire
- Bi-cubique

Le mode d'interpolation Plus Proche Voisin (PPV) consiste à simplement reprendre dans l'image originale la valeur d'un pixel, afin de l'attribuer aux nouveaux pixels les plus proches dans l'image après redimensionnement. Cette solution à l'avantage de conserver la dynamique originale sans créer de nouvelles intensités. En revanche, sa sensibilité au bruit est grande lorsqu'on réduit une image et elle accentue les discontinuités dans les cas d'agrandissement. (Voir figure 2.7a)

L'interpolation bi-linéaire attribue à chaque point nouveau une combinaison des valeurs des 4 pixels les plus proches. Le calcul de la nouvelle valeur est basé sur un polynôme d'ordre 1. L'avantage de cette méthode est qu'elle réduit les discontinuités tout en conservant telles quelles l'intensité des pixels et la dynamique de l'image originale. (Voir figure 2.7b)

Pour terminer, l'interpolation bi-c cubique est une fonction polynomiale d'ordre 3 utilisant 16 pixels (4×4) pour déterminer les valeurs des nouveaux pixels. Cette solution offre un meilleur lissage des valeurs en réduisant les arêtes, ce qui en contrepartie a tendance à réduire la dynamique. (Voir figure 2.7c)

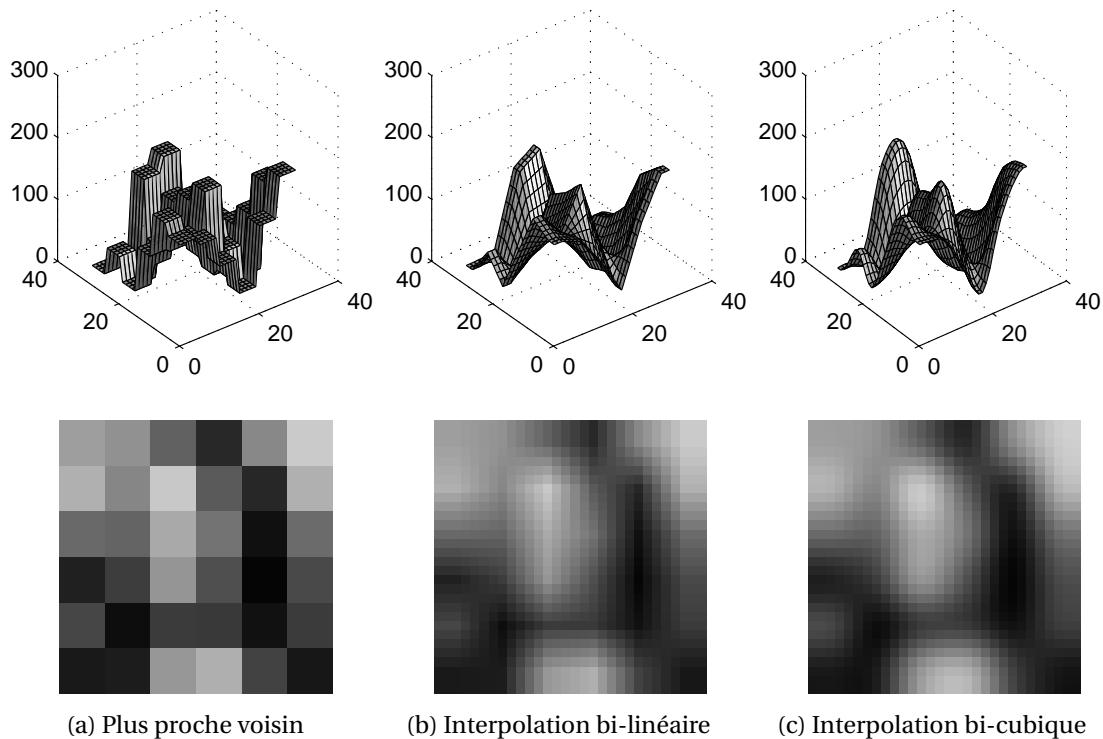


FIGURE 2.7 – Modes d'interpolation.

La figure 2.7 présente ces trois algorithmes en les appliquant à une image de 6x6 pixels afin de l agrandir à 30x30 pixels. On y remarque parfaitement les paliers de la méthode PPV générant des discontinuités ; les arêtes formées entre les faces 3D de l interpolation bi-linéaire ; ainsi que le lissage provenant du polynôme de degré trois de l interpolation bi-cubique.

2.9 Sources d'erreurs et limitations

Dans la littérature de nombreuses recherches traitent de la précision des techniques de corrélation d'images. La qualité des images revient régulièrement comme étant un élément clé. Le bruit est présenté comme pouvant être responsable d'une grande partie de la limitation de précision de mesure. Son influence est quantifiée dans [1] comme pouvant être responsable d'une erreur moyenne supérieur au dixième de pixel dans les cas les plus défavorables. Cependant, l'utilisation d'une grande fenêtre de corrélation permet toujours de limiter l'influence du bruit et d'améliorer la précision des mesures [20].

En fonction des mouvements attendus, la taille de la fenêtre peut également être à l'origine d'erreurs de corrélation. Dans [12], il est démontré qu'en cas de mouvements périodiques de faible amplitude, aucun résultat de corrélation n'est possible si la taille de la fenêtre est supérieure à celle du déplacement.

De nombreux tests ont été réalisés afin d'optimiser la taille de fenêtre à utiliser [20]. Il en ressort que le choix dépend principalement de l'homogénéité du mouvement traité. Pour un mouvement homogène, on fixe une limite inférieure pour le choix de la fenêtre afin de minimiser l'influence du bruit. À l'inverse, en cas de mouvement non homogène, on fixe une limite supérieure permettant d'éviter de manquer les déplacements de courtes longueurs d'onde. La figure 2.4 et le tableau 2.1 reprennent ces principes.

Dans [13], on s'intéresse aux erreurs systématiques liées à l'utilisation des fonctions de forme¹. Il en résulte qu'une fonction du deuxième ordre engendre moins d'erreurs systématiques qu'une fonction linéaire du premier ordre, et ce pour un niveau d'erreurs aléatoires identique.

1. La fonction de forme définit le type de transformation employée pour la recherche d'une fenêtre de l'image référence dans l'image déformée. Le premier ordre correspond à des translations uniquement et le deuxième ordre ajoute des déformations.

3 Propriétés et traitement d'images

Ce chapitre a pour objectif de définir quelques caractéristiques importantes des images numériques ayant un impact direct sur la réalisation de ce projet. Les notions purement théoriques sont développées de manière générale et les aspects pratiques seront directement basés sur le matériel utilisé lors de l'acquisition des images.

3.1 Formats d'images

En informatique, les données sont stockées sous forme numérique et l'on cherche généralement à réduire leur volume de stockage. Dans le cas des images, cela passe par une compression afin de décrire les informations tout en utilisant un minimum de données. Il est important de distinguer deux catégories intervenant dans le stockage et la représentation des images numériques, à savoir la compression **avec perte**, et la compression **sans perte**.

3.1.1 Format JPEG

Le JPEG est le format le plus répandu dans le monde de la photographie numérique. Il s'agit d'un format de **compression avec pertes** permettant d'optimiser le volume de données utilisé pour la représentation des images. La plupart des appareils photo numériques enregistrent directement les images compressées au format JPEG sans conserver les informations d'origines du capteur. Celles-ci sont généralement encodées avec une dynamique 8 bits à la sortie de l'appareil (cf. chap. 3.2.2).

La perte d'information générée par ce format se traduit par des dégradations aussi bien géométriques que radiométriques, rendant les images difficilement utilisables pour toute application de corrélation. Dans les cas traités au cours de ce projet, il est nécessaire de travailler uniquement avec des formats de compression sans perte afin d'assurer une certaine rigueur lors du traitement des images.

Chapitre 3. Propriétés et traitement d'images

3.1.2 Format RAW

Le RAW n'est pas un format d'image en tant que tel, mais définit un type de fichier généré par les appareils photo numériques. Les données RAW (signifiant brut en anglais) contiennent toutes les informations enregistrées par le capteur et ont pour principale caractéristique de ne subir **aucun traitement informatique**. Le RAW est dans l'imagerie numérique l'équivalent du négatif dans la photo argentique.

Contrairement au format JPEG, les images RAW sont généralement encodées sur 12 ou 14 bits ce qui leur confère une plus grande gamme dynamique. La conservation de cette dynamique lors de l'enregistrement est un élément essentiel dans le cadre des traitements par corrélation.

La plupart des RAW sont des formats propriétaires liés à un capteur et à son fabricant. Les images brutes ne sont en général pas visualisables et doivent être converties pour un affichage à l'écran. Lors de la conversion, les logiciels spécifiques permettent un post-traitement des images avant de les exporter vers un format classique, comme les JPEG ou le TIFF.

3.1.3 Format TIFF

Le Tagged Image File Format (TIFF) est un format d'images matricielles réputé pour sa **grande flexibilité**. Il peut être compressé avec ou sans pertes et permet un encodage sur une gamme dynamique allant de 1 à 64 bits. De plus, chaque pixel peut être composé des valeurs positives, négatives ainsi que de nombres flottants.

La compression en mode «sans perte» permet de représenter fidèlement chaque pixel acquis par le capteur photographique sans détérioration géométrique. La représentation radiométrique est liée au mode de traitement de l'image brute d'origine, mais peut être conservée au plus proche des valeurs obtenues lors de l'acquisition.

Dans les cas traités par la suite, c'est ce format qui est utilisé pour l'encodage des images, et également pour la représentation des résultats de corrélation.

3.1.4 Récapitulatif

Format	Compression :		Dynamique	Volume ¹	Remarque
	Sans perte	Avec perte			
JPEG		✓	8 / 16 bits	1 Mb	Dégradations
RAW (CR2)	✓		12 / 14 bits	12 Mb	Format non visualisable
TIFF	✓	(✓)	1 - 64 bits	20 Mb	Flexible et rigoureux

TABLEAU 3.1 – Tableau récapitulatif des formats d'images

1. Pour une image noir/blanc de 10 mégapixels

3.2 Défauts et qualités des images

Les caractéristiques intrinsèques des capteurs utilisés en photographie numérique sont à l'origine de quelques limitations dans la qualité d'acquisition des images. Parmi celles-ci, on s'intéresse particulièrement aux notions de bruit et de dynamique, car ce sont les facteurs les plus influents lors du traitement par corrélation d'images. Le bruit a pour effet de réduire les coefficients de corrélation et limiter la mise en correspondance. Une faible dynamique aplatis les textures et augmente les erreurs de correspondances multiples entre deux images.

La description mathématique de ces notions permet de mettre en évidence chacune des limitations et de déterminer comment compenser ses effets sur les images acquises. Les techniques de traitement d'images présentées dans [5] sont également décrites dans ce chapitre.

3.2.1 Bruit

Toutes les images numériques sont sujettes à un bruit, se caractérisant par la présence **d'informations parasites** superposées de manière **aléatoire** à une image originale. Si l'on considère une image propre $I(x, y)$ entachée d'un bruit $b(x, y)$, le résultat est une image bruitée $G(x, y)$ donnée par l'équation suivante :

$$G(x, y) = I(x, y) + b(x, y) \quad (3.1)$$

Le caractère du bruit présent dans une image étant aléatoire et réparti uniformément [16], on constate qu'en prenant un nombre N d'images suffisamment grand, la somme des images G_k a pour effet de réduire le bruit selon la relation $1/\sqrt{N}$. En d'autres termes, avec la sommation des images, on obtient l'équation suivante :

$$\sum_{k=1}^N G_k(x, y) = N \cdot I(x, y) + \sum_{k=1}^N b_k(x, y) \quad (3.2)$$

Où sous l'hypothèse d'un bruit aléatoire, celui-ci devient :

$$\sum_{k=1}^N b_k(x, y) \approx \frac{b(x, y)}{\sqrt{N}} \quad (3.3)$$

La figure 3.1 illustre le principe défini dans l'équation 3.1. L'objectif pour la suite du travail est d'essayer de tendre vers cette image propre afin d'améliorer les résultats de corrélation. Le chapitre 3.4 décrit les méthodes employées afin d'y parvenir.

3.2.2 Dynamique

La dynamique d'une image numérique caractérise sa capacité à représenter de multiples niveaux d'intensité lumineuse. Plus la dynamique d'une image est grande, plus il est possible d'en extraire des informations détaillées.

Chapitre 3. Propriétés et traitement d'images

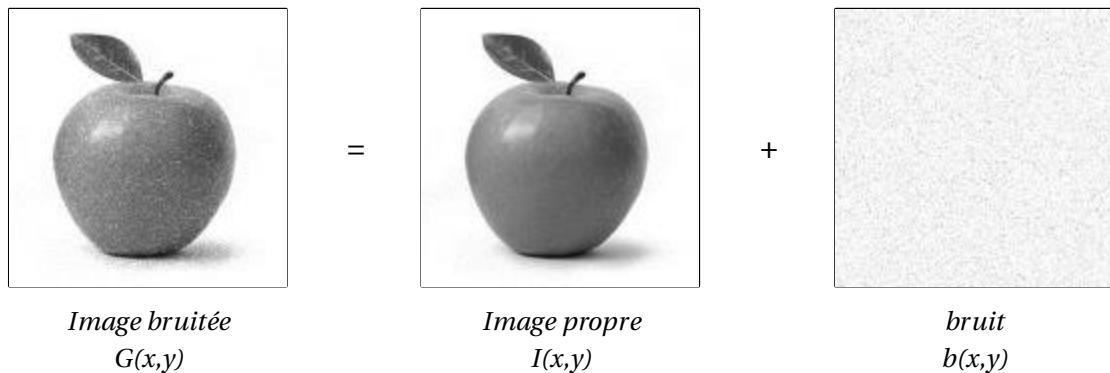


FIGURE 3.1 – Schématisation du bruit numérique.

Si l'on considère une image en niveaux de gris codée sur 8 bits, sa plage d'intensité peut varier de 0 à 255. L'augmentation de la dynamique d'une image passe donc par un agrandissement de cette plage d'intensité et un réencodage de l'image en utilisant un plus grand nombre de bits.

Pour augmenter d'un bit l'encodage d'une image, il faut multiplier par deux sa plage d'intensité alors que pour l'augmenter de deux bits, il est nécessaire de multiplier cette plage par quatre, soit 2^2 . Avec quatre images d'une scène identique, il est donc possible de gagner deux bits, correspondant à l'augmentation de la dynamique.

Nbre de bits	Relation	Plage dynamique
1	2^1	[0 .. 1]
2	2^2	[0 .. 3]
...
8	2^8	[0 .. 255]
12	2^{12}	[0 .. 4095]
16	2^{16}	[0 .. 65535]
...
n	2^n	[0 .. $2^n - 1$]

TABLEAU 3.2 – Plages dynamiques des images.

À titre d'exemple, si l'on prend des images 8 bits et que l'on souhaite obtenir une image 16 bits, il en faudra un total de 256 pour y parvenir. Ce résultat s'obtient par la relation 2^8 ou la division des plages dynamique entre 16 et 8 bits, à savoir $65536/256$. De manière similaire à ce qui a été démontré pour le bruit, on peut dire ici que l'utilisation de N images aura pour effet de multiplier la plage dynamique par la relation $\times N$.

3.3 Acquisition des images

3.3.1 Capteur

Pour la réalisation des tests pratiques, les images ont été acquises avec un *Canon EOS 400D* muni d'un objectif à focale fixe de 50 mm. Il s'agit d'un capteur de 10 mégapixels avec une dynamique de 12 bits, muni d'une cellule CCD de 5.71 µm. La taille du CCD combinée à la distance focale permet de déterminer la dimension d'un pixel sur l'image obtenue.

Exemple : L'auscultation d'un bâtiment photographié à une distance de 100 m, permet d'obtenir les données suivantes :

- ◆ Focale : $f = 50 \text{ mm}$
- ◆ Cellule CCD : $ccd = 5.71 \mu\text{m}$
- ◆ Distance : $d = 100 \text{ m}$
- ◆ Taille du pixel : $px = 11.42 \text{ mm}$

L'équation 3.4 donne alors la dimension d'un pixel du bâtiment sur l'image :

$$px = d \cdot \frac{ccd}{f} \quad (3.4)$$

3.3.2 Images obtenues

Le stockage des images obtenues se fait au format CR2, étant le format RAW propriétaire de *Canon*. Les informations sont encodées sur 12 bits [0 .. 4095] et doivent être converties au format TIFF en utilisant le logiciel *Digital Photo Professional* développé par *Canon*.

Le logiciel permettant uniquement des exports en 8 ou en 16 bits, les images ne peuvent pas être conservées avec leur dynamique originale. L'export vers une image 8 bits consiste à diviser chaque valeur par 16, puis l'arrondir à l'entier le plus proche afin de la ramener dans une plage [0 .. 255]. Cette opération entraîne par conséquent une forte baisse de dynamique. Il est donc préférable d'opter pour un réencodage sur 16 bits où chaque valeur de pixel est multipliée par 16. De cette manière, aucun arrondi ne fausse la représentation de l'image et la dynamique originale est conservée, en étant toutefois «étalée» sur une plage [0 .. 65535], ne contenant que des multiples de 16.

Les images TIFF 16 bits ainsi obtenues peuvent être directement utilisées dans les logiciels de corrélation.

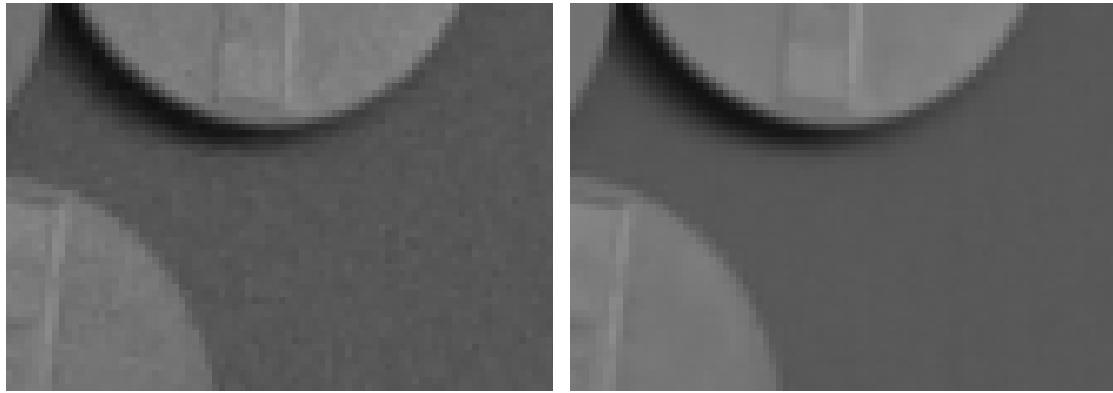
3.4 Sommation d'images

Les deux limitations dans la qualité des images numériques mentionnées en 3.2.1 et 3.2.2 peuvent être en grande partie éliminées en utilisant un nombre élevé de prises de vues d'une

même scène. En suivant cette logique, l'utilisation de N images doit permettre de multiplier la plage dynamique par N tout en divisant le bruit par \sqrt{N} .

Cette opération s'effectue en additionnant une à une les valeurs de chaque pixel des images prises en série sans mouvement. L'annexe A.2 démontre les principes de la sommation d'images et fournit le code source Matlab des fonctions développées.

La figure 3.2 illustre le gain obtenu par sommation et plus particulièrement la réduction du bruit présent dans l'image. Celui-ci est donc divisé par 4 lors d'une addition de 16 images.



(a) Image brute.

(b) Sommation de 16 images.

FIGURE 3.2 – Aperçu des effets de la sommation d'images.

Tests et applications pratiques Partie II

4 Introduction à MicMac

MicMac est un logiciel permettant la *mise en correspondance automatique dans le contexte géographique* [7], développé à l’Institut Géographique National (IGN) par le laboratoire MATIS. Il a pour objectif de réunir en un seul logiciel des solutions répondant à la majorité des problèmes de correspondance rencontrés dans le domaine de la cartographie. Les domaines d’utilisations de MicMac principalement traités par l’IGN sont les suivants [4] :

- Calcul de MNT et MNE.
- Calcul de points de liaison pour l’aérotriangulation.
- Calcul de points homologues pour la superposition d’images multi canaux.

La problématique de détection de mouvements se rapproche de la superposition d’images multi canaux, où l’on cherche à déterminer des petits déplacements avec une très bonne connaissance de leurs valeurs a priori.

4.1 Principes de fonctionnement

Le logiciel travaille sur la base des fichiers principaux indiqués dans le tableau 4.1. C’est à partir de ces données que la corrélation peut être réalisée.

Données	Contenu	Formats	Exigé
Image «référence»	État 0 - Mesure de référence	TIFF / JPEG	✓
Image «déformée»	État 1 - Mesure après mouvement	TIFF / JPEG	✓
Masque de corrélation	Dessin de la zone à traiter	TIFF	✓
Fichier de paramétrage	Configuration du calcul	XML	✓
Points homologues	Saisie manuelle pour recalage	XML	(✓) ¹
Calibration	Paramètres de correction des images	XML	-

TABLEAU 4.1 – Données MicMac en entrée.

1. Ces fichiers sont obligatoires pour le calcul, mais peuvent être laissés vierges.

Chapitre 4. Introduction à MicMac

À partir de ces données, le traitement délivre en sortie les résultats de calcul sous la forme des fichiers suivants :

Résultats	Contenu	Format
Disparités horizontales	Mesures en px des déplacements horizontaux	TIFF flottant
Disparités verticales	Mesures en px des déplacements verticaux	TIFF flottant
Coefficients de corrélation	Carte des coefficients [0 .. 255]	TIFF 8 bits

TABLEAU 4.2 – Résultats MicMac en sortie.

4.1.1 Schéma

La figure 4.1 illustre le lien entre les différents fichiers au cours de leur traitement dans MicMac. Le fichier XML de paramétrage est le noyau central du processus. Il est composé de la sélection des données à traiter, du réglage des paramètres de calcul ainsi que de la définition des fichiers résultats en sortie.



Données	Paramètres	Résultats
<ul style="list-style-type: none">- Image référence- Image déformée- Masque	<ul style="list-style-type: none">- Subset- Pas- C_{min}	<ul style="list-style-type: none">- Disparités horiz.- Disparités vert.- Coefficients de corr.

FIGURE 4.1 – Schéma de fonctionnement du logiciel MicMac.

4.1.2 Étapes de travail

La phase de traitement des données comprend les trois étapes énumérées ci-dessous et décrites dans les chapitres suivants.

- Préparation des données.
- Choix des paramètres et calcul.
- Mise en valeur des résultats.

4.2 Préparation des données

Par défaut, MicMac permet de traiter une multitude de formats d'images pour les données en entrée. Le traitement à proprement parler se fait toujours sur des fichiers TIFF et les autres formats sont automatiquement convertis. En ce qui concerne la dynamique des images, celle-ci ne pose aucune limite pour le traitement. Le logiciel peut traiter sans difficulté des images allant de 8 bits à 16 bits.

Les données à préparer sont les deux images «référence» et «déformée» que l'on souhaite corréler. Afin de faciliter le traitement et d'uniformiser les données, il a été décidé de toujours fournir des images au format TIFF en niveaux de gris, codées sur 16 bits.

Trois opérations peuvent être réalisées pour une préparation optimale des données de base :

1. **Conversion** des images au format standard TIFF et en niveaux de gris
 - Fonction *rgb2gray*
 - Voir annexe A.1
2. **Augmentation de la dynamique** d'origine
 - Fonction *Somme_Img*
 - Voir annexe A.2
3. **Saisie du masque** de corrélation
 - Utilisation de l'outil SaisieMasq intégré à MicMac

4.3 Calcul

Pour lancer le calcul de corrélation entre les images, il faut en premier lieu déterminer les paramètres de calcul optimaux en fonction du chantier et des types de déplacements attendus.

4.3.1 Paramètres

Les possibilités de paramétrage du calcul de corrélation avec MicMac sont très grandes, mais difficiles à maîtriser. Les quatre paramètres développés par la suite sont les plus importants et leur choix peut fortement influencer le résultat final du traitement.

L'annexe C présente un exemple de calcul faisant varier chacun de ces paramètres individuellement afin de comprendre leur influence.

Coefficient minimum (*CorrelMin*)

Cet attribut (C_{min}) permet d'indiquer au-dessous de quelle valeur du coefficient de corrélation la mesure de disparité doit être écartée. Pour rappel (cf. chap. 2.6), il existe différents types de

Chapitre 4. Introduction à MicMac

coefficients selon l'algorithme utilisé. MicMac utilise la corrélation croisée (CC) où les valeurs sont toujours comprises entre 0 et 1 avec une ressemblance maximale pour la valeur 1.

Ce paramètre peut être couplé à une valeur *gamma* permettant d'augmenter l'influence des coefficients les plus élevés. Les tests réalisés montrent que l'utilisation de ce facteur d'influence n'est pas avantageuse pour ce type d'application. Il est donc préférable de le conserver à 1.

Taille de la fenêtre (*SzW*)

Ce paramètre permet de définir la taille de la fenêtre de corrélation (cf. chap. 2.4). La valeur indiquée dans le fichier XML ne correspond pas à la taille de la fenêtre en pixels, mais celle-ci peut être calculée par la relation $2k + 1$ où k est la valeur de l'attribut *SzW*.

Il est important de faire varier cet attribut lorsqu'on cherche à analyser un phénomène de déformation sur un ouvrage. Le passage d'une grande à une petite fenêtre doit permettre de confirmer la régularité d'un déplacement, ou au contraire mettre en évidence d'éventuelles discontinuités. Le tableau 2.1 permet une bonne interprétation des résultats en fonction des dimensions de la fenêtre.

Terme de régularisation (*Px1Regul*)

Selon la définition issue de la documentation de MicMac, "*le terme de régularisation permet de pondérer l'attache aux données par rapport à l'a priori de régularité*". En d'autres termes, cette valeur permet d'indiquer au logiciel la régularité des disparités attendues. Une valeur élevée indiquera un champ de déplacements régulier, alors qu'une valeur faible signifiera que l'on s'attend à de fortes discontinuités de déformations.

La documentation donne quelques valeurs indicatives allant de 0.01 à 2.0 selon les cas. Elle suggère toutefois d'évaluer, pour chaque cas, l'effet de ce paramètre en faisant varier ses valeurs.

Pas de corrélation (*Px1Pas*)

C'est grâce à ce paramètre que l'on parvient à déterminer des déplacements sub pixel. Le principe de fonctionnement **multi échelles** de MicMac permet de démarrer le traitement avec un zoom arrière afin de calculer des valeurs approchées des mouvements. Une succession de traitements est ensuite réalisée afin de revenir à l'échelle originale, puis d'atteindre la dimension sub pixel recherchée.

Pour la détermination de ces déplacements fins, MicMac utilise les différents modes d'interpolation décrits dans le chapitre 2.8. Par défaut, c'est l'interpolation bi-linéaire qui est appliquée.

4.3.2 Commandes

L'intégralité du traitement MicMac peut être réalisée grâce à trois commandes à entrer dans le terminal Linux. Elles sont décrites brièvement ci-dessous.

Saisie du masque

```
mm3d SaisieMasq Nom_Image.TIF
```

Cette commande ouvre l'outil de saisie du masque intégré à MicMac. Elle permet de saisir une ou plusieurs zones pour lesquelles le traitement doit être réalisé. L'utilisation de secteurs multiples peut s'avérer intéressante, voire nécessaire, lorsque des déplacements relatifs entre deux parties de l'image doivent être analysés.

Saisie des points homologues

```
mm3d SEL ./ Nom_Image_1.TIF Nom_Image_2.TIF KH=S
```

Cette commande lance l'interface de saisie des points communs aux deux images afin d'éliminer les éventuelles translations dues à une différence dans l'orientation du capteur. Un grand nombre de points peuvent être saisis, mais il est toutefois conseillé de n'en saisir qu'une seule paire afin de réajuster les images uniquement par translations.

Lancement du calcul

```
mm3d micmac Fich_Paramétrage.XML
```

Cette commande permet d'exécuter le calcul de corrélation d'images en appliquant les paramètres définis dans le fichier XML.

Deux exemples de fichier de paramétrage XML sont disponibles en annexe B et D.5

4.4 Résultats

À la fin du traitement, MicMac génère trois fichiers principaux contenant les résultats du calcul (cf. fig. 4.1). Il s'agit des mesures de disparités horizontales (**dH**), verticales (**dV**) et des coefficients de corrélation (**R**).

Ces résultats sont représentés sous forme d'images au format **TIFF flottant**. Le contenu de chaque cellule de la matrice image est alors compris dans l'ensemble des nombres réels \mathbb{R} .

La principale particularité des fichiers résultats est l'utilisation du **système d'axe "image"** pour la représentation des disparités. Ce système a son origine à l'angle supérieur gauche de l'image avec l'axe y positif vers le bas.

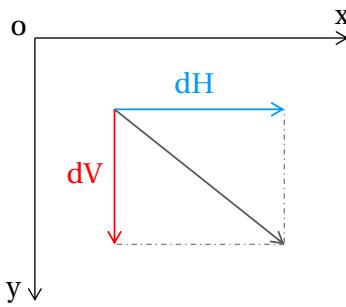


FIGURE 4.2 – Système d'axes "image".

4.4.1 Mise en valeur

La représentation graphique des résultats issus de MicMac est effectuée avec le logiciel Matlab. Les disparités mesurées sont colorées en fonction de leur grandeur. L'**échelle de coloration** s'adapte automatiquement aux déplacements mesurés et peut être ajustée manuellement selon les situations rencontrées.

Pour la carte des coefficients de corrélation, MicMac fourni des valeurs entre 0 et 255 correspondant à une image 8 bits. Ces valeurs sont ensuite rapportées sur une plage [0 .. 1] afin qu'elles correspondent aux véritables coefficients de corrélation.

L'annexe A.3 présente le code source Matlab permettant cette mise en valeur des résultats.

4.5 Exemple

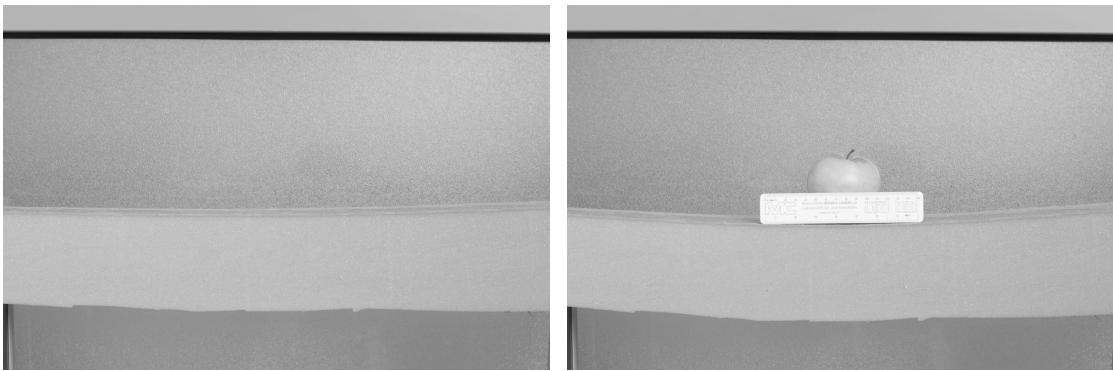
Afin d'illustrer le fonctionnement du logiciel, on présente dans ce chapitre un exemple complet de traitement, allant du paramétrage jusqu'à la mise en valeur des résultats.

4.5.1 Données

Les images choisies pour cet exemple sont issues d'un test réalisé au cours de ce travail. Il s'agit de la simulation d'un essai de charge sur une poutre. La poutre est composée de mousse et repose sur deux appuis aux extrémités. La contrainte de poids est simulée par une pomme posée au centre de la poutre.

Les figures 4.3a et 4.3b montrent les deux images avant et après déformation, où l'on peut observer l'effet de fléchissement au centre de la poutre. L'acquisition a été faite avec deux salves de 16 images assemblées par sommation. La texture de la mousse est parfaitement irrégulière et permet une excellente corrélation entre les images.

La mise à l'échelle de l'image donne une taille de pixel de 0.138 mm, ce qui permet d'estimer que la précision de mesure par corrélation devrait être inférieure au centième de millimètre. Les dimensions de la poutre visible sur les images sont de 53.7 cm par 9.2 cm.



(a) Image référence.

(b) Image déformée.

FIGURE 4.3 – Simulation d'essais de charge : images originales.

4.5.2 Traitement

La configuration du calcul MicMac pour cet exemple est particulière en raison des grandes déformations attendues. La recherche de correspondance doit en effet permettre de distinguer des mouvements allant jusqu'à 80 pixels au point de fléchissement maximum.

Le fichier de paramétrage XML est fourni en annexe B.1 et comprend les configurations particulières suivantes :

CorrelMin = 0.5 et GammaCorrel = 1

Permet de conserver uniquement les coefficients supérieurs à 0.5 sans toutefois augmenter leur influence sur le voisinage. Avec un minimum fixé à 0.5, seuls les coefficients strictement supérieurs au 0.75 sont significatifs.

Px1Regul = 0.2 et Px2Regul = 0.2

Indique que le champ de déformations attendu est irrégulier.

DeZoom = 4, PxDilat = 16 et PxPas = 2

Pour la première étape de mise en correspondance. Permet de trouver une correspondance entre les images même dans les cas de grands déplacements. Le zoom arrière de 4× permet de trouver une solution approchée, utilisée pour les étapes suivantes du traitement.

DeZoom = 1, PxDilat = 1 et PxPas = 0.2

Pour la dernière étape de mise en correspondance. Permet de rechercher les composantes sub pixel des déplacements. Le pas de 0.2 indique que la recherche de correspondance s'arrête lorsque les résidus maximums atteignent 0.1 pixel. Cet attribut peut être réduit à 0.02 afin d'atteindre une précision du centième de pixel.

SzW = 10

Défini la taille de la fenêtre utilisée. Elle est dans cet exemple conservée à 21 pixels pour toutes les étapes du traitement. Cette valeur peut être adaptée à chaque étape de calcul.

4.5.3 Résultat

Les trois fichiers résultants de MicMac sont traités par la fonction Matlab décrite en annexe A.3. Les représentations graphiques des disparités et des coefficients de corrélation sont illustrés en figure 4.4

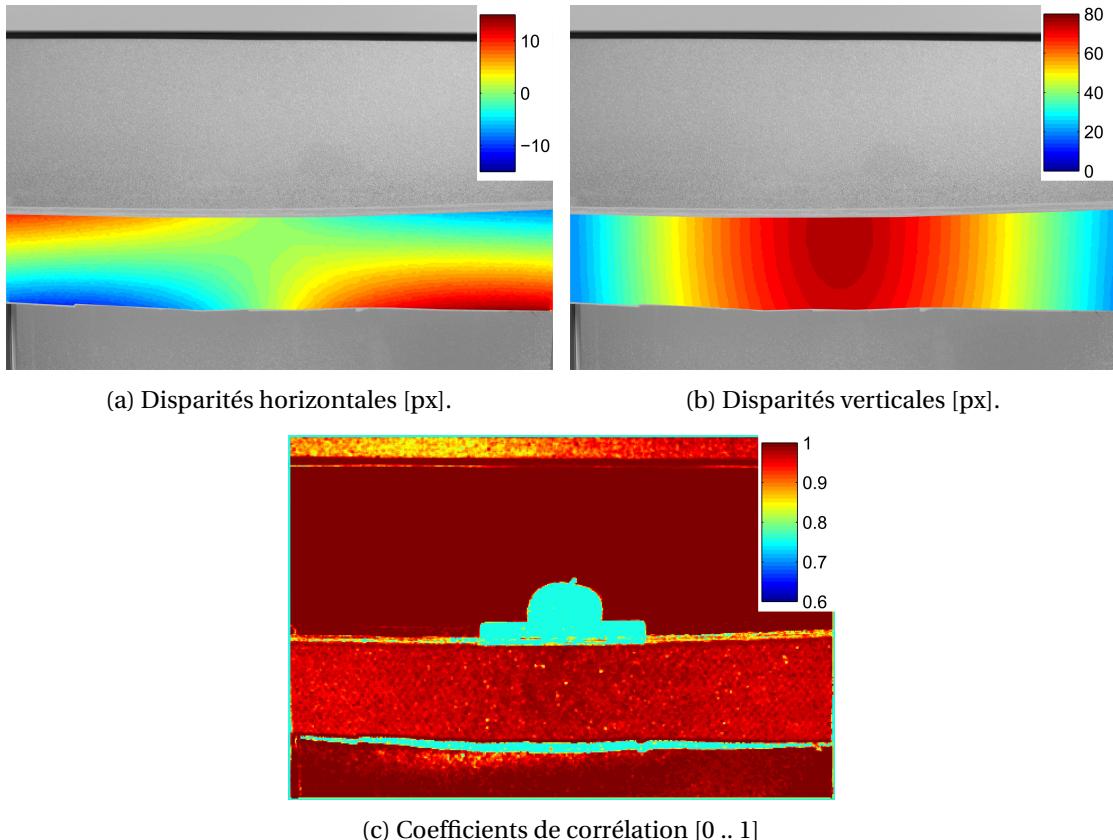


FIGURE 4.4 – Simulation d'essais de charge : résultats de corrélation.

Une première analyse des coefficients de corrélation met en évidence les différences fondamentales entre les deux images. Les objets ajoutés sur la deuxième image n'ont pas permis au logiciel de corréler ces secteurs. Leur forme est parfaitement visible sur ces représentations. Les coefficients sur la poutre sont en revanche très bons et assurent une bonne fiabilité des disparités mesurées.

Le fléchissement imposé par le poids de la pomme et les déformations subies par la poutre sont également parfaitement visibles sur les cartes de disparités. Les déformations constatées correspondent au comportement attendu avec ce type de contrainte.

Sur la composante horizontale des disparités, La partie supérieure de la poutre se contracte, avec une **compression** aux extrémités d'environ 1.2 mm de part et d'autre. Dans la partie inférieure, la poutre est en **extension** d'environ 1.9 mm à chaque extrémité. Cet effet est fortement accentué du fait que la poutre soit composée de mousse.

Pour l'analyse verticale, la déformation se traduit par des déplacements allant de 11.04 mm au centre jusqu'à être presque nulle aux extrémités. La progression parfaitement régulière le long de la poutre est un indicateur de la bonne qualité des résultats.

Autre type de représentation

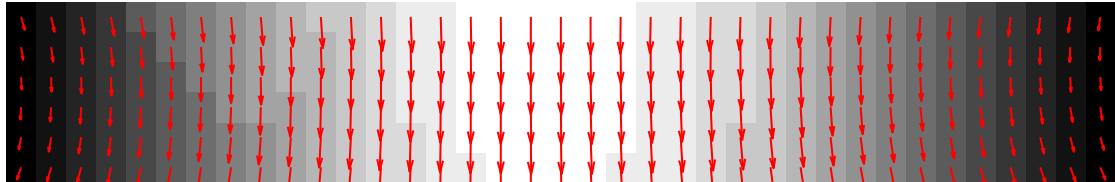


FIGURE 4.5 – Vecteurs de déplacement.

L'assemblage des deux cartes de disparités rend également possible l'analyse globale des déformations. En reprenant ces informations dans une fonction Matlab, des vecteurs de déplacements 2D peuvent être calculés et générés automatiquement (cf. fig. 4.5). Ce type de représentation permet une interprétation facilitée des deux composantes et ajoute l'information de direction du déplacement. Combinés aux cartes de disparités, les vecteurs de déplacement permettent une analyse complète du comportement de l'objet ausculté.

5 Aspects visuels de surfaces en béton

Ce chapitre présente différents tests ayant pour objectif d'évaluer la qualité de corrélation en fonction de la texture d'un objet ainsi que du mode d'acquisition des images. Pour cela, 3 séries de 20 images ont été prises par déclenchement automatique et stationnement sur trépied afin de réduire tout mouvement.

La surface photographiée est un mur en béton présentant trois bandes peintes de différentes couleurs. Lorsque l'image est transformée en niveaux gris, ces trois teintes présentent des intensités lumineuses bien marquées et sont facilement identifiables dans l'histogramme. Il est alors possible d'évaluer si la qualité de corrélation est en relation directe avec les valeurs d'intensité lumineuse de la surface étudiée.

Les trois différentes salves ont été acquises avec des réglages de temps d'obturation différents afin d'évaluer également les effets du niveau de saturation sur la qualité de corrélation. Le traitement de ces images doit permettre de déterminer si les paramètres de prise de vue sont en mesure d'améliorer la recherche de correspondance.

Enfin, les salves de 20 images doivent permettre d'analyser les effets de la sommation d'images sur ce type d'échantillon, en comparant un résultat issu d'images brutes avec un second résultat issu d'images additionnées.

5.1 Présentation de l'échantillon



FIGURE 5.1 – Mur en béton peint.

La figure 5.1 présente une section horizontale d'une image brute du mur en béton. En plus des trois teintes décrites précédemment, deux zones de béton brut se trouvent également de part et d'autre de l'image.

La qualité du béton brut de cet échantillon est comparable à ce que l'on retrouve généralement sur les ouvrages d'art tels que les ponts ou certains grands bâtiments. Elle présente une texture isotrope et donc a priori favorable à la corrélation. L'application d'une couche de peinture sur cette surface a pour effet de la rendre plus homogène et de masquer les aspérités les plus faibles.

5.2 Effets de la sommation d'images

L'objectif de ce chapitre est d'analyser le coefficient de corrélation et déterminer sa variation lorsque l'on travaille avec des images brutes ou avec une sommation d'images. Comme mentionné en 3.4, l'utilisation d'images additionnées permet de bénéficier d'une dynamique plus élevée et d'un bruit réduit. Les résultats de corrélation ainsi que les coefficients doivent alors s'en trouver fortement améliorés.

5.2.1 Images brutes

Le traitement dont le résultat est visible en figure 5.2 a été effectué à partir de deux images brutes 12 bits directement issues de l'appareil photo.

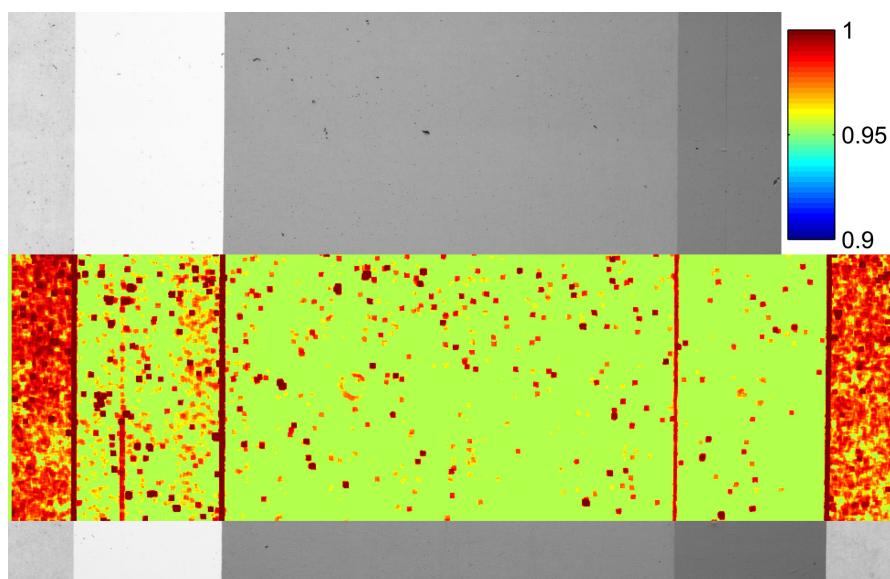


FIGURE 5.2 – Qualité de corrélation d'images brutes.

Le coefficient de corrélation est représenté par une échelle de couleur pour des valeurs comprises entre 0.9 et 1. Les paramètres de calcul micmac utilisés pour ce traitement permettent

d'estimer que le coefficient est acceptable lorsqu'il est supérieur à 0.98, soit des couleurs situées entre l'orange et le rouge.

L'analyse de la figure 5.2 permet de constater que les coefficients sont trop faibles pour toutes les surfaces peintes situées au centre de l'image. Seules quelques aspérités bien marquées ont permis une bonne recherche de correspondance malgré la peinture. Les secteurs colorés en vert ne donnent par conséquent aucune mesure de déplacement exploitable pour une précision inférieure au dixième de pixel.

Il est également intéressant de relever la présence de lignes verticales à forte corrélation situées à chaque changement d'intensité. Elles permettent de mesurer précisément les déplacements horizontaux à ces endroits. De la même manière, des lignes horizontales permettraient de fournir une mesure précise des déplacements verticaux. De telles lignes, marquant des coupures nettes sur la surface d'un ouvrage à ausculter pourraient permettre une corrélation précise également sur des textures de faible qualité.

5.2.2 Images additionnées

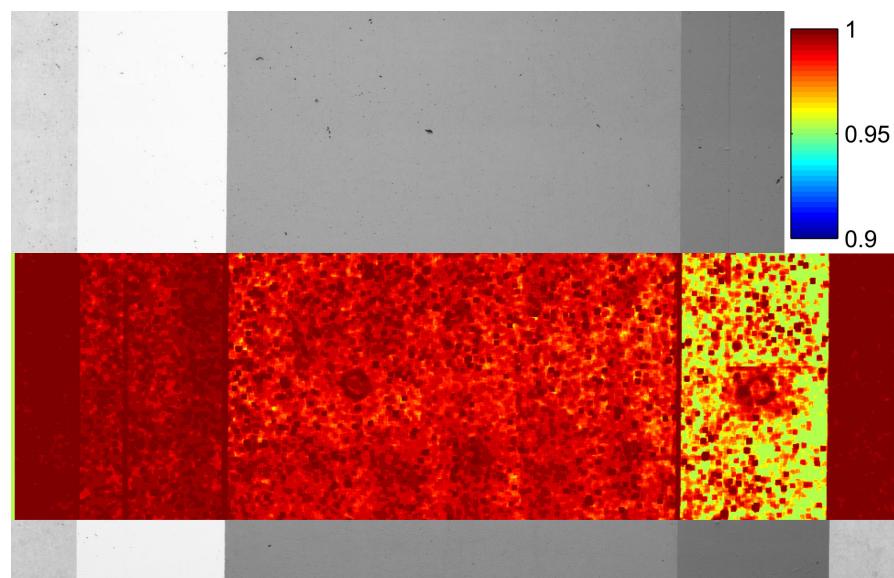


FIGURE 5.3 – Qualité de corrélation par sommation de 10 images.

À partir des images brutes issues d'une série de 20 images, deux assemblages de 10 images ont été générés. La corrélation a ensuite été effectuée entre ces deux images et représentée en figure 5.3 de la même manière que pour l'exemple précédent.

Pour ce nouveau traitement, les coefficients sont bien plus élevés, et ce même sur les bandes de béton peint. La qualité de corrélation a donc fortement augmenté grâce à la sommation d'images. Pour la bande la plus foncée, les coefficients semblent encore trop faibles et doivent être mis en relation avec les déplacements mesurés afin de déterminer leur influence sur le résultat (cf. chap. 5.4).

5.2.3 Analyse des effets

Les résultats présentés en 5.2.1, 5.2.2 et récapitulés dans la figure 5.4 démontrent clairement les effets positifs de la sommation d'image sur la qualité de corrélation. L'augmentation de la dynamique et la réduction du bruit permettent conformément aux attentes d'améliorer la recherche de correspondance entre les images et par conséquent d'augmenter la précision des mesures de déplacements.

Pour les parties composées de béton brut de part et d'autre de l'image, le coefficient est à son maximum en utilisant un assemblage de 10 images. Cela confirme le fait que les ouvrages en béton disposent d'une texture optimale pour les mesures par corrélation d'image.

Dans la pratique, il serait possible d'augmenter encore le nombre de prises de vue afin d'améliorer la qualité de la mesure. En s'assurant que le capteur reste parfaitement immobile durant l'acquisition des images, il serait possible doubler le nombre de clichés et permettre des mesures sur des textures les plus difficiles.

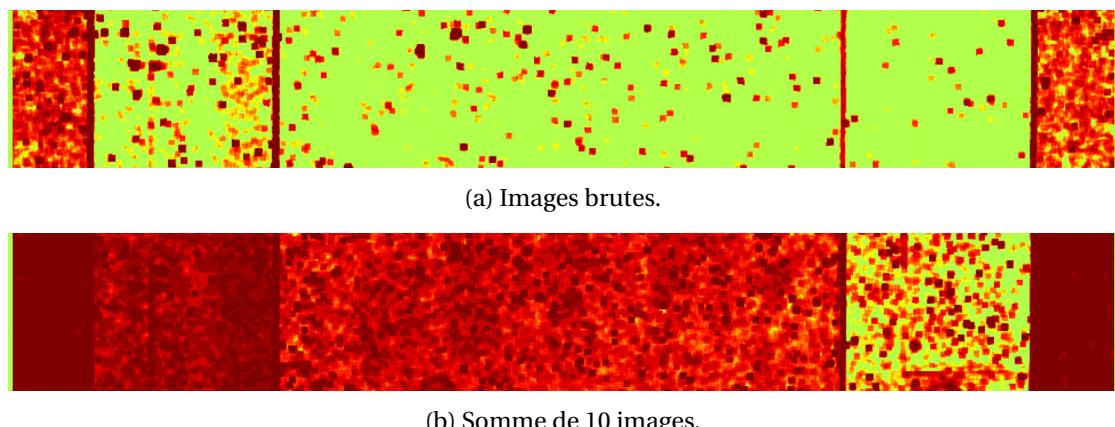


FIGURE 5.4 – Coefficients de corrélation (gain par sommation).

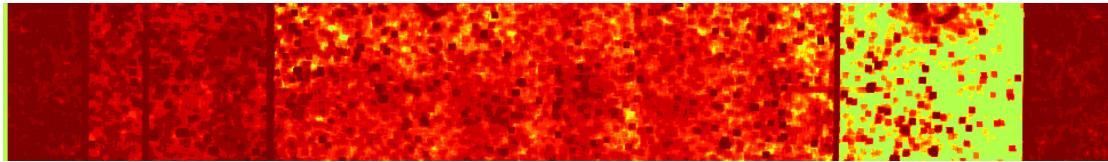
5.3 Influence de l'intensité lumineuse

Tous les tests présentés en début de chapitre indiquent que la qualité de corrélation est directement liée à l'intensité lumineuse de la portion d'image considérée. En effet, pour des textures similaires, les parties les plus claires donnent systématiquement des coefficients de corrélation plus élevés.

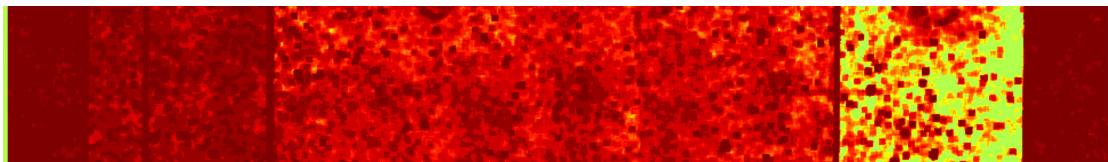
Comme il a été mentionné en début de chapitre, les trois salves d'images ont été acquises avec des temps d'obturation différents, permettant de faire varier l'intensité lumineuse perçue par le capteur photographique. Dans cette partie, deux résultats de corrélation sont comparés, entre une paire d'images ayant une intensité lumineuse élevée, et une seconde paire d'images à plus faible intensité.

5.3.1 Variation des niveaux d'intensité

Les résultats présentés en figure 5.5 montrent une légère amélioration des coefficients lorsque l'intensité lumineuse augmente. Cette augmentation n'est pas élevée, mais elle reste toutefois importante pour l'analyse les déplacements mesurés par corrélation. Elle permet en effet de réduire la dispersion des déplacements mesurés, et donc d'améliorer la lisibilité des résultats.



(a) Somme de 10 images à intensités normales.



(b) Somme de 10 images acquises en limite de saturation.

FIGURE 5.5 – Effets du niveau d'intensité lumineuse des images.

Ces résultats indiquent que les images présentant des intensités situées dans le haut de l'histogramme sont les plus favorables à la corrélation d'images. Dans la pratique, il est important de chercher systématiquement à acquérir des clichés proches de la saturation, soit dans des teintes plutôt claires. La figure 5.6 montre l'histogramme des images prises avec une intensité lumineuse élevée. La partie la plus claire du mur en béton se trouve à la limite de la saturation et offre les meilleurs résultats de corrélation.

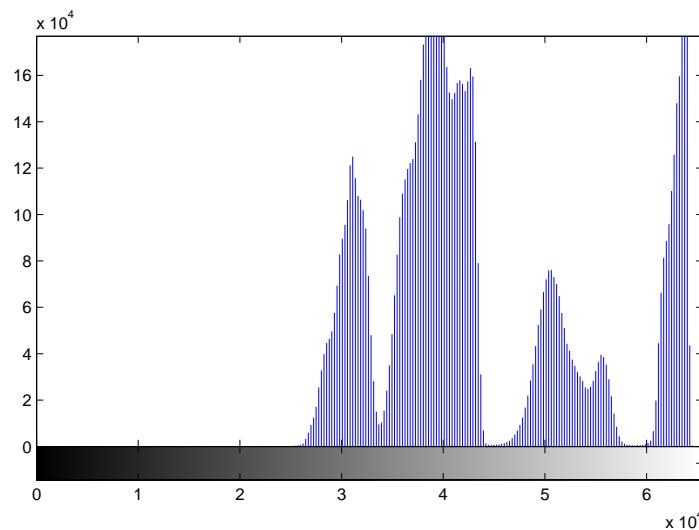


FIGURE 5.6 – Histogramme des images acquises en limite de saturation.

5.4 Analyse des déplacements mesurés

Sur la base de deux images additionnées acquises proche de la saturation, les disparités mesurées par corrélation permettent une analyse des déplacements. Ces images ayant été prises en rafale et sans aucun mouvement, le résultat de la corrélation devrait en principe fournir des déplacements nuls sur toute l'image.

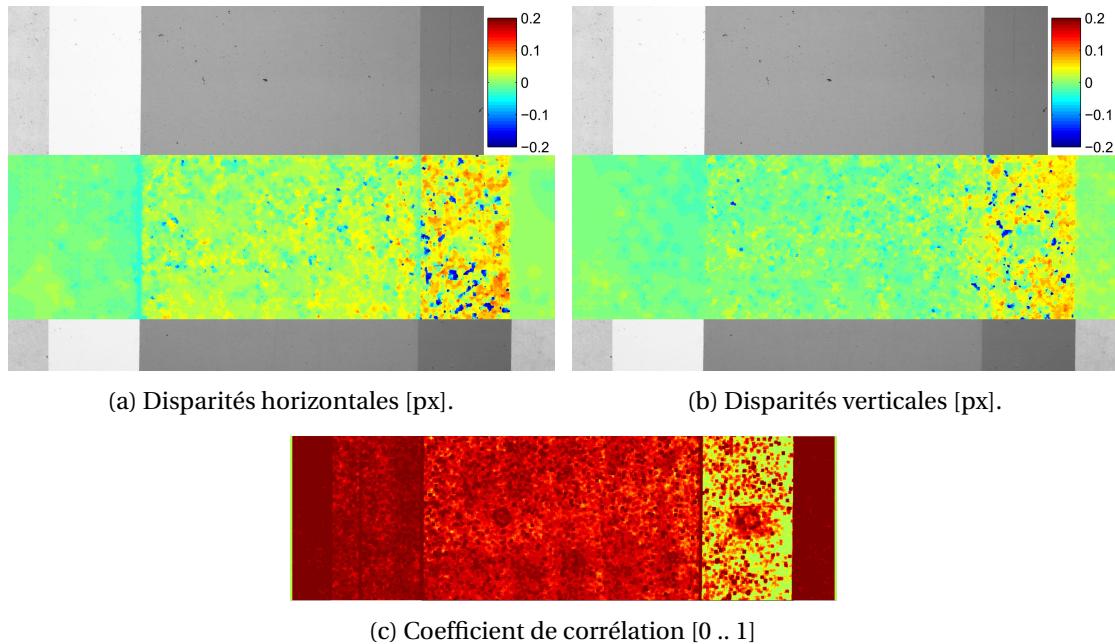


FIGURE 5.7 – Corrélation d'un assemblage d'images à forte intensité lumineuse.

Type de texture	dH [px]	dV [px]	σ [px]	R [0 .. 1]
Béton brut "gauche"	-0.007	-0.005	0.005	0.9999
Blanc	-0.007	-0.013	0.008	0.9956
Gris clair	+0.017	+0.001	0.021	0.9904
Gris foncé	+0.036	+0.030	0.046	0.9687
Béton brut "droite"	+0.006	+0.005	0.006	0.9997

TABLEAU 5.1 – Récapitulation des mesures de disparités.

En analysant les résultats présentés dans les figures 5.7a et 5.7b, il en ressort que les mesures sur les deux bandes de béton les plus foncées indiquent des déplacements horizontaux et verticaux de quelques centièmes de pixels. En revanche, toutes les autres parties du mur indiquent des déplacements nuls.

Sous l'hypothèse que le mur et le capteur sont restés parfaitement immobiles entre les prises de vue, ces déplacements peuvent être assimilés à l'imprécision de la mesure. Ils peuvent

ensuite être mis en relation avec les coefficients de corrélations. Le tableau 5.1 indique pour chaque bande de l'image les déplacements moyens (dH , dV), leur variance (σ) ainsi que le coefficient de corrélation moyen (R). Pour simplifier l'analyse, les déplacements ont été ajustés à zéros par translations sur la base des deux bandes de béton brut à gauche et à droite de l'image où la qualité de corrélation est maximale.

Le tableau 5.1 indique que la variance des déplacements mesurés est un très bon indicateur de leur précision. En effet, ceux-ci doivent être à zéro sur toute l'image, et la valeur de déplacement moyenne n'excède jamais celle de la variance. Elle peut donc servir à qualifier la précision de la mesure.

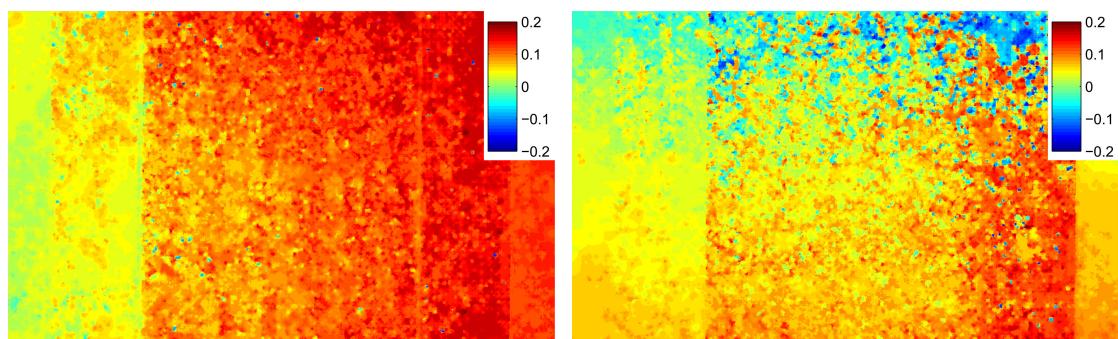
Sur cette même base, un lien peut également être effectué entre le coefficient de corrélation et la variance. Sur la base de cet exemple, il s'avère que seul un coefficient supérieur à 0.995 permet d'obtenir une précision de mesure inférieure au centième de pixel.

Il est toutefois intéressant de relever la qualité des résultats obtenus sur la partie la plus foncée du mur. Malgré la difficulté de la texture, la variance obtenue est bien inférieure au dixième de pixel.

Le fait que les déplacements moyens soient systématiquement positifs pour les couleurs plus foncées que le béton brut et négatives pour celles étant plus claires nécessiterait la réalisation de tests complémentaires. Il serait intéressant de savoir si la simple variation de la couleur d'un objet peut avoir un impact sur le signe de la mesure.

5.5 Problèmes d'instabilité du capteur

Au cours du traitement des données de ce test sur le mur de béton, un problème de stabilité du capteur photographique est apparu. Sur la première salve de 20 images, des déplacements difficilement explicable ont été constatés et ne correspondent à aucun mouvement attendu.



(a) Disparités horizontales [px].

(b) Disparités verticales [px].

FIGURE 5.8 – Effet de l'instabilité du capteur sur des images sommées.

Chapitre 5. Aspects visuels de surfaces en béton

Un premier calcul effectué sur deux sommes de 10 images indique un "étirement" de l'objet entre les deux états. Celui-ci se distingue aussi bien sur le plan horizontal que sur le plan vertical. En effet, la figure 5.8 met en évidence des déplacements horizontaux allant de 0 à 0.15 pixel de gauche à droite. De la même manière, les déplacements verticaux passent de -0.1 à 0.1 de haut en bas de l'image.

Afin de comprendre la formation de ces écarts, les images brutes ont été comparées individuellement de l'image n°1 jusqu'à la n°20. Les couples d'images 1-2, 1-10 et 1-20 sont illustrés en figure 5.9 et permettent de distinguer l'évolution du phénomène, avec les déplacements horizontaux en haut (5.9a à 5.9c) et verticaux en bas (5.9d à 5.9f).

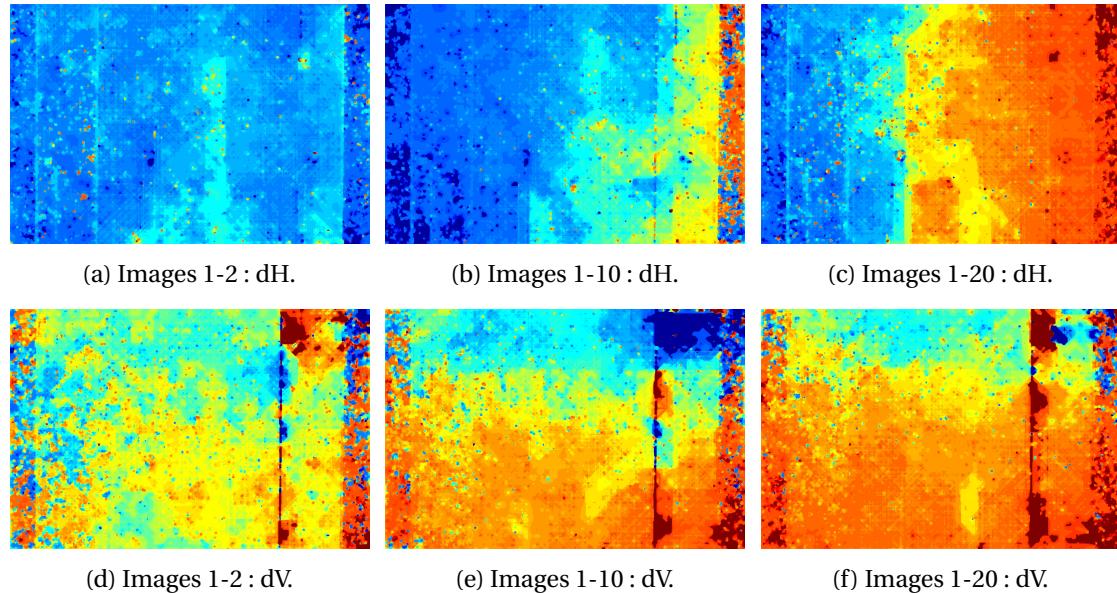


FIGURE 5.9 – Illustration d'un problème d'instabilité du capteur.

Les mouvements constatés semblent s'intensifier de manière linéaire entre les images 1 à 20. Le phénomène d'étirement est également constaté, comme c'était le cas pour les images additionnées. Ces effets pourraient être dus à une dilatation du système de lentilles ou du capteur dans le plan focal, se produisant lors de la mise en température du boîtier.

La constatation de ce type de perturbation met en avant un point sensible des techniques de corrélation sur lequel il est très difficile d'avoir le contrôle. Il est donc nécessaire pour chaque état de mesure de réaliser un grand nombre de clichés afin de **mettre en température et stabiliser le capteur** photographique. De plus, avant de procéder à la corrélation d'images additionnées entre différents états, les images d'un état doivent être comparées afin de valider leur stabilité au cours de la mesure.

5.5 Problèmes d'instabilité du capteur

Néanmoins, il faut noter qu'une dilatation de la lentille entre différents états de mesures a pour conséquence uniquement des déformations isotropes de grandes longueurs d'onde réparties sur toute la surface d'un ouvrage. La possibilité de détecter des mouvements de **courte longueur d'onde** reste alors envisageable, tout en gardant une précision de détection suffisamment grande. Il est ainsi possible d'identifier des effets de cisaillements, malgré des phénomènes thermiques inévitables.

6 Tour Landi

Ce chapitre présente le premier test pratique sur un ouvrage concret. Il permet d'évaluer les méthodes de corrélation en extérieur, présentant une atmosphère et des conditions instables. La notion de corrélation diachronique d'image permettant l'analyse multi époques d'un ouvrage est également mise en pratique.

Le déroulement de ces premiers essais pratiques a pour objectif de mettre en évidence une grande partie des limitations du système afin d'en tenir compte et d'optimiser la chaîne de traitement. Des points importants du processus tels que les effets de la distorsion ou l'impact de la répétabilité du centrage sur les mesures sont évalués.

Enfin, les quelques mouvements observés sont discutés et interprétés en relation avec la structure de l'ouvrage.

6.1 Description de l'ouvrage

Pour ce premier test pratique, l'étude se porte sur la tour LANDI située à proximité de la Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD). Cette tour est composée d'une dizaine de silos pouvant contenir plus de 1'000 tonnes de matériaux (1'364 tonnes au 12.11.2013). La façade de la tour étant composée de béton brut, elle offre une texture a priori idéale pour la recherche de correspondance.

Les images sont acquises depuis l'est de la tour à une distance horizontale d'environ 134 m. Avec une focale de 50 mm et une cellule CCD de 5.71 μm , la taille des pixels de la façade est de 15.3 mm. Selon l'hypothèse de précision de l'ordre du centième de pixel, développée en [11], la détection de discontinuités inférieures au millimètre peut être envisagée sur cet ouvrage.

La structure interne de l'ouvrage n'est pas connue précisément, mais il est probable que les successions de chargements et déchargements des silos entraînent des déformations de la façade. Les mesures diachroniques pourraient permettre de faire le lien entre les mouvements observés et l'état de remplissage des différents silos.



(a) Image brute.

(b) Système de mesure.

FIGURE 6.1 – Tour Landi : description de l’ouvrage.

6.2 Test de corrélation

Au démarrage de ce type de chantier, le premier travail à effectuer est un essai de corrélation sur des images d'une même époque. Pour cela, l'acquisition de plusieurs séries d'images espacées de quelques minutes sert à **qualifier la qualité de corrélation** offerte par la texture de l'ouvrage. Pour ce chantier, ce test est réalisé à partir de deux séries de 16 images chacune. Les images de chaque série sont ensuite assemblées par sommation et le calcul de corrélation est lancé entre les deux nouvelles images créées.

Le paramétrage du calcul MicMac doit être réglé afin d'autoriser également les coefficients les plus bas pour le traitement. Ce calcul permet alors de mettre en évidence les zones où la corrélation est mauvaise et d'estimer la qualité des prochains états de mesure.

La figure 6.2 représente le résultat du calcul en affichant uniquement les coefficients supérieurs à 0.995. En se référant au tableau 5.1 du chapitre 5.4, c'est à partir de cette valeur que l'on estime être en mesure de s'approcher d'une précision de 0.01 px.

La surface de la tour étant presque entièrement teintée de rouge ($R > 0.995$), cela indique que la texture est suffisamment irrégulière et permet une précision de corrélation tout à fait satisfaisante. Étant donné la grande proportion de correspondance élevée entre les deux images, les tests de corrélation diachronique peuvent se faire en utilisant uniquement les meilleurs secteurs. Cela permet de maximiser la précision et la fiabilité des mesures de déplacements.

Il faut toutefois s'assurer de la qualité des images acquises lors de la deuxième étape et tenter de limiter les variations d'éclairage de l'ouvrage. Les changements radiométriques entre états sont inévitables et ont pour conséquence de diminuer la qualité de corrélation entre les images.

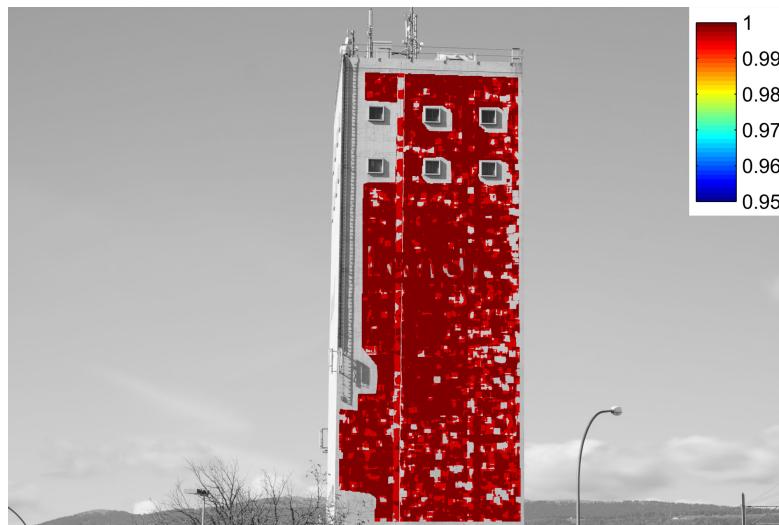


FIGURE 6.2 – Évaluation de la qualité de corrélation.

6.3 Effets de la distorsion

La distorsion présente dans tous les systèmes d'acquisition d'images est un phénomène bien connu. Le flux d'image étant perçu au travers de lentilles, leur sphéricité engendre une déformation des rayons lumineux ce qui affecte directement la géométrie finale de l'image. Cette déformation se traduit par une courbure des lignes droites et sa grandeur est proportionnelle au cube de la distance d'un point au centre de l'image.

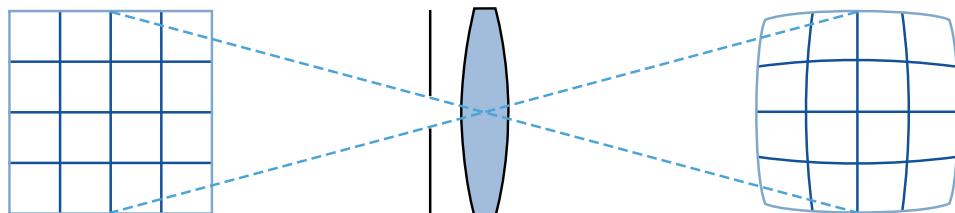


FIGURE 6.3 – Exemple de distorsion en bâillet [18].

La distorsion présente dans les images peut être corrigée en effectuant une calibration du capteur. Cette calibration permet de calculer les paramètres de distorsion et d'appliquer aux images les corrections nécessaires. Dans cette étude, l'objectif est dans un premier temps de travailler sur la base d'images non corrigées afin de rendre le processus simple et accessible à tous.

En travaillant avec des images non corrigées, l'orientation du capteur en direction de l'ouvrage photographié devient un point essentiel. En réalisant des prises de vue d'un ouvrage avec un pointé identique, c'est à chaque fois la même partie de l'image qui est utilisée. La distorsion n'a alors aucun impact sur la mise en correspondance des images.

Pour la réalisation des tests pratiques, le pointage de l'appareil photo est effectué manuellement et ne peut donc pas être reproduit de manière exacte. Pour cette raison, il est nécessaire de connaître l'influence de cette imprécision de pointé afin de **quantifier les effets** de la distorsion sur les déplacements mesurés. Les chapitres 6.3.1 et 6.3.2 présentent deux situations basées sur l'exemple de la tour Landi et permettant d'évaluer ces effets.

Bien que l'objectif utilisé pour les tests ait l'avantage de présenter très peu de distorsions (focale 50 mm, f1/8), leurs effets devraient tout de même être visibles rapidement lorsque l'on s'approche des bords de l'image.

6.3.1 Dépointage fort (280 px)

Dans le premier cas, le dépointage est choisi volontairement assez grand afin de bien distinguer les effets de distorsion. Entre les images 1 et 2, le centre s'est déplacé d'environ 280 pixels sur un axe horizontal. Avec un pixel de 15.3 mm, cela correspond à un déplacement d'environ 4.3 m (voir figure 6.4).



FIGURE 6.4 – Exemple de dépointage fort entre deux images.

En lançant un calcul de corrélation sur une partie de la tour, les cartes des disparités horizontales et verticales visibles en figure 6.5 sont obtenues. Les déplacements identifiés par le processus de corrélation vont ici jusqu'à près de 2 pixels et augmentent en fonction de leur éloignement du centre de l'image.

Les deux cartes de disparités permettent de distinguer la forme du polynôme de distorsion des images. La distorsion est également visible dans la partie centrale de l'image, là où elle est pourtant à son minimum. À cette échelle de dépointage, il est donc impossible de tirer des informations de déplacement à partir des images même en se limitant à leur partie centrale. En revanche, en observant la qualité du polynôme de distorsion, il serait tout à fait envisageable d'utiliser les outils de corrélation d'images pour établir une carte de correction des distorsions à partir de deux images uniquement.

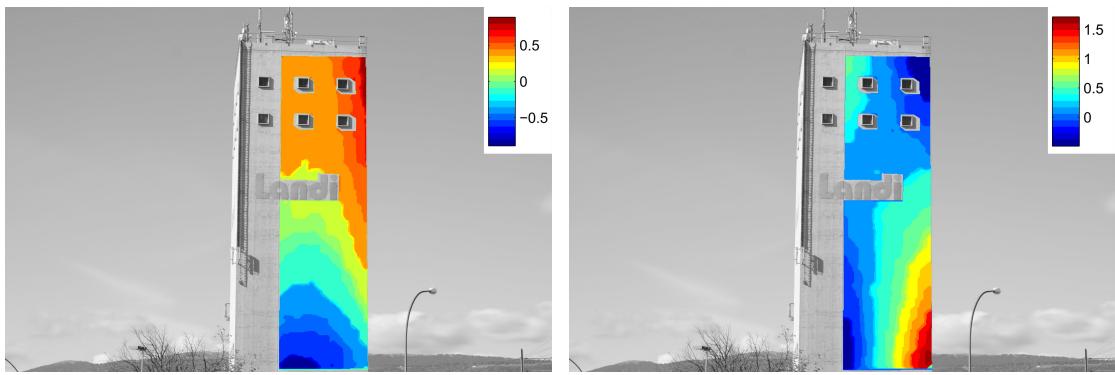


FIGURE 6.5 – Effets de la distorsion pour un dépointage de 280 pixels.

6.3.2 Dépointage léger (15 px)

En se fondant sur l'expérience réalisée au chapitre précédent, il est clair qu'un dépointage de 280 pixels ne permet pas d'exploiter les résultats de corrélation. Il faut désormais déterminer à partir de quelle valeur de dépointage la distorsion est visible et influence l'analyse des déplacements. Le même test est donc réalisé en effectuant un dépointage de 15 pixels, soit environ 23 cm. En centrant manuellement l'appareil sur un repère visuel, une précision de pointé d'une dizaine de pixels peut être facilement obtenue.

Le processus de corrélation effectué sur la base des deux images dépointées de 15 pixels indique des déplacements représentés par la figure 6.6. Une nouvelle fois, comme aucun mouvement n'a eu lieu entre les deux prises de vue, ces cartes de disparités devraient indiquer des déplacements nuls. Malgré cela, des disparités allant jusqu'à 0.1 pixel sont observées aux extrémités de l'ouvrage.

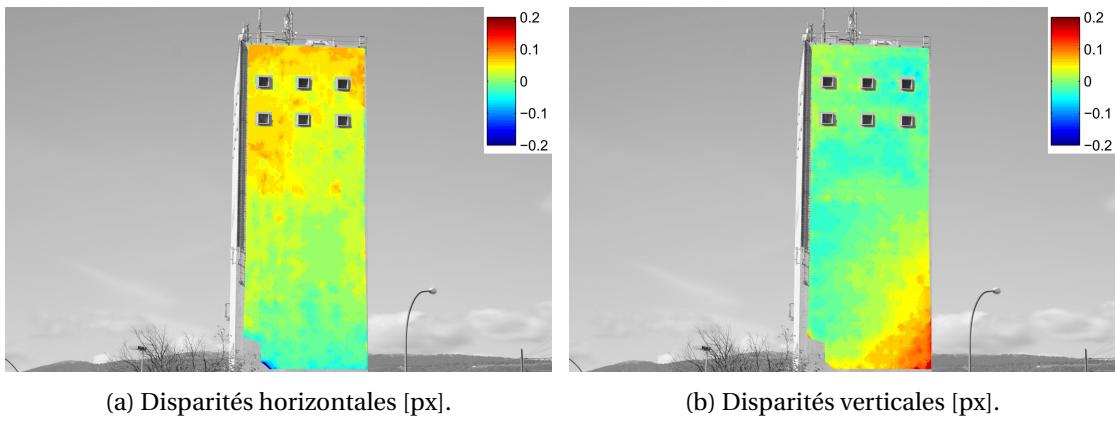


FIGURE 6.6 – Effets de la distorsion pour un dépointage de 15 pixels.

Étant donné que l'on cherche à observer des mouvements de l'ordre du centième de pixel grâce aux méthodes de corrélation, il est clair que les effets de distorsion restent trop élevés

lorsque l'on travaille en bordure d'image avec un dépointage de 15 pixels. L'utilisation de la corrélation d'images dans le but d'atteindre une telle précision passe donc obligatoirement par une **répétition de centrage très précise** ou alors une prise en compte des distorsions permettant la **correction des images** brutes avant traitement.

6.4 Corrélation diachronique

Après avoir analysé les aspects de base de la corrélation à partir d'images issues d'un état de mesure unique, un essai de corrélation diachronique, basé sur deux états de mesures est effectué. Les images utilisées pour ce test ont été acquises à **19 jours d'intervalle** avec des conditions atmosphériques et des conditions d'éclairage légèrement différentes. Le centrage du capteur pour la prise d'image a été effectué sur un point connu, à hauteur fixe et avec une précision d'orientation de ± 4 pixels.



(a) Image 1 : 17.10.2013 - 14h25 - 18°C.

(b) Image 2 : 05.11.2013 - 8h36 - 8°C.

FIGURE 6.7 – Corrélation diachronique : description des images utilisées.

La comparaison des images de la figure 6.7 met en évidence la différence d'éclairage entre les deux prises de vues. L'image 1 est éclairée par un soleil légèrement rasant ce qui a pour effet de faire ressortir les aspérités du béton. L'image 2 est quant à elle éclairée de face, ce qui a l'avantage de ne produire aucune ombre sur la surface de l'ouvrage. Cette **différence radiométrique** n'est pas favorable à la qualité de corrélation, mais les algorithmes centrés et normalisés devraient tout de même permettre une mise en correspondance convenable. La précision des déplacements mesurés doit alors être interprétée en fonction de coefficients de corrélation obtenus.

La figure 6.8 montre les coefficients résultant d'un premier calcul de corrélation où seuls ceux supérieurs à 0.95 sont affichés. Elle indique clairement que la corrélation de cette paire d'images est de moins bonne qualité, probablement en raison des variations d'éclairage de l'ouvrage.

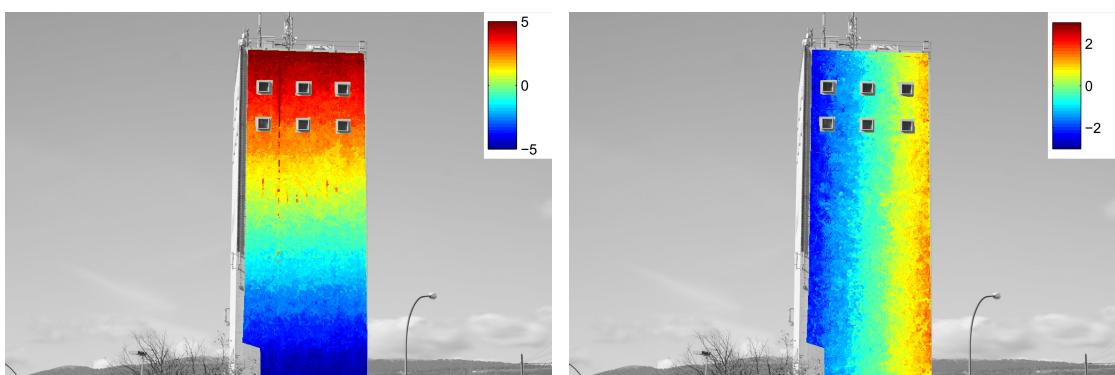
Malgré une baisse de la qualité de corrélation, les mesures de disparités entre les images doivent tout de même rendre possible la mise en évidence des mouvements de l'ouvrage. Après

plusieurs traitements et une optimisation des paramètres de calcul, les cartes de disparités dH et dV représentées en figure 6.9 sont obtenues.



FIGURE 6.8 – Analyse de la qualité de corrélation diachronique (C_{min} 0.60, Subset 5 px).

Pour analyser ces cartes de disparités, il faut tenir compte du système de coordonnées "image" ayant son origine en haut à gauche, et son axe vertical pointant vers le bas. Elles indiquent alors qu'une rotation est intervenue entre les deux états. Cette rotation n'est évidemment pas à attribuer à un mouvement de la tour, mais elle est **due à la mise en place du capteur** qui n'a pas pu être répétée de manière parfaitement rigoureuse. Sur la carte des disparités horizontales, la partie haute de la tour se déplace d'environ 5 px vers la droite et la partie basse de 5 px vers la gauche. En vertical, c'est la partie gauche qui monte de 2 px alors que la partie droite descend d'environ 2 px. Dans les deux cas, la partie centrale de la tour semble immobile. L'image a donc subi une **rotation dans le sens horaire** entre les deux états de mesure.



(a) Disparités horizontales [px].

(b) Disparités verticales [px].

FIGURE 6.9 – Carte des disparités par corrélation diachronique (C_{min} 0.97, Subset 3 px).

Les figures 6.9a et 6.9b permettent de voir l'homogénéité des mesures de disparités. Dans les deux cas, le zéro se trouve au centre de l'image et les dégradés de couleur entre les extrémités

sont toujours réguliers. Pour arriver à ce résultat, le calcul de corrélation a dû être effectué en utilisant la taille de fenêtre minimale (3×3 px) ainsi qu'un terme de régularisation très faible. Cette combinaison de paramètres est nécessaire pour limiter les perturbations dues à la rotation lors de la mise en correspondance des images. En revanche, avec ces réglages, le bruit de la mesure augmente et entraîne une **diminution de la précision** des résultats.

Ce premier test de corrélation diachronique montre que le processus est capable de détecter une rotation avec des disparités relativement homogènes, mais que le résultat du traitement rend **impossible l'interprétation visuelle** des éventuelles déformations de l'ouvrage. Dans cette étude, l'objectif est de simplifier la partie prise de vue en permettant la correction a posteriori de l'imprécision de stationnement. Il faut pour cela trouver une solution permettant de corriger ces rotations et identifier des déformations, malgré une mise en place du capteur approximative.

6.5 Prise en compte des rotations

Suite aux résultats présentés en 6.4, deux solutions sont envisagées afin de prendre en compte la rotation du capteur. Dans un premier temps, l'idée est de corriger les déplacements mesurés en appliquant une transformation de Helmert sans facteur d'échelle à l'ensemble de l'ouvrage. Ensuite, la seconde solution testée consiste à effectuer une rotation de l'image brute avant le traitement par corrélation afin d'annuler l'effet de la rotation d'origine.

6.5.1 Transformation de Helmert

Les cartes de disparités issues du traitement MicMac représentent des vecteurs de déplacement unidimensionnels pour chaque pixel de l'image d'origine. Leur combinaison permet d'obtenir des vecteurs 2D orientés. Ils forment ainsi un champ de vecteurs répartis en grille régulière avec un espacement correspondant à la taille du pixel. À partir de là, il est possible de déterminer des paramètres de transformation sur la base d'une **partie de l'ouvrage supposée stable**. L'annexe A.4 présente la fonction Matlab développée à cet effet avec une explication du code source.

Dans le cas présenté en 6.4, la détermination des paramètres est obtenue en prenant la partie basse de la tour comme zone stable. Elle fournit les paramètres de transformations suivants :

Paramètre	Valeur
Translation H :	0.7104 px
Translation V :	1.9901 px
Facteur d'échelle :	0.999984 → forcé à 1
Rotation :	0.248594°

TABLEAU 6.1 – Paramètres de transformation de Helmert.

Comme indiqué dans le tableau, le facteur d'échelle est redéfini à 1 avant d'appliquer la transformation à l'ensemble des mesures. L'erreur moyenne des résidus de la transformation permet de qualifier la précision des paramètres calculés. Pour ce traitement, une E.M. de 0.2 px est obtenue, ce qui indique que les mesures sont passablement bruitées.

En appliquant les paramètres à l'ensemble de l'ouvrage, les deux nouvelles cartes de disparités représentées en figure 6.10 sont obtenues.

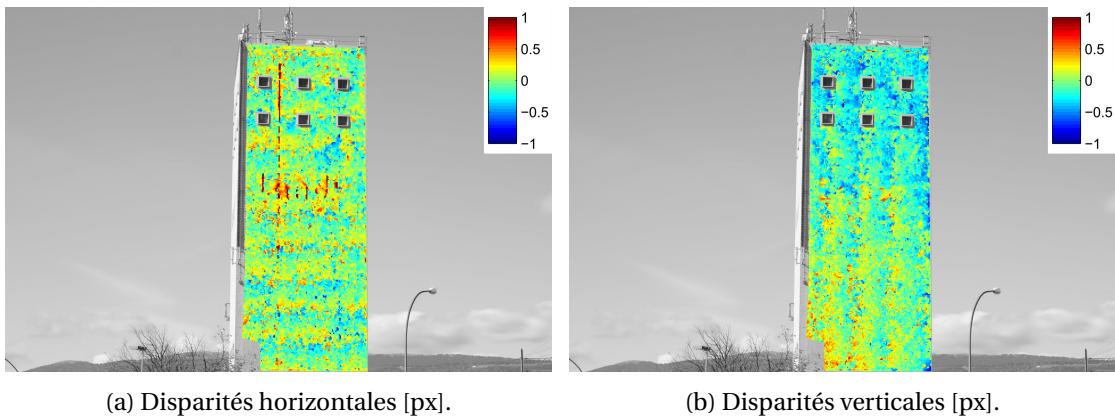


FIGURE 6.10 – Carte des disparités après transformation de Helmert.

Désormais plus aucune rotation globale n'est constatée, mais l'analyse de tout mouvement reste malgré tout très difficile. Les deux cartes de disparités semblent à présent composées de multiples couches parcourant horizontalement et verticalement le bâtiment. D'un point de vue structurel, ce type de mouvement correspondrait à des **effets de cisaillement** répartis régulièrement sur la hauteur et la largeur du bâtiment.

Cet effet de stratification est probablement dû à l'influence de la rotation de l'image sur le processus de corrélation. Comme la fenêtre est carrée et parcourt l'image parallèlement à ses axes, la rotation entre les deux images ne permet pas une bonne recherche de correspondance. Pour chiffrer cette influence, il faut noter qu'un angle de 0.2° engendre déjà un écart de 0.1 px pour une fenêtre de 30×30 px.

Afin de savoir si cet effet de cisaillement est réel ou s'il est dû à un défaut de corrélation, un nouveau test est réalisé. Pour ce traitement, une rotation est appliquée à l'image brute du second état avant de démarrer la corrélation.

6.5.2 Correction avant traitement

Comme mentionné en 6.5.1, un nouveau calcul de corrélation est effectué après avoir corrigé l'image du second état. Pour cela, l'image du premier état est conservée brute, et l'on applique au deuxième état une rotation de 0.2486°, correspondant à l'angle obtenu par la transformation de Helmert et mentionné dans le tableau 6.1. La rotation de l'image est effectuée par une fonction Matlab afin de maîtriser au mieux tous les paramètres. C'est le mode d'interpolati-

tion bi-linéaire qui est utilisé pour calculer les nouvelles valeurs de pixels sans modifier la dynamique originale de l'image.

Le traitement par corrélation après optimisation des paramètres de calcul donne les cartes de disparités représentées en figure 6.11. **L'effet de cisaillement a disparu** avec ce second traitement. Ces résultats indiquent alors que le processus de corrélation sur des images ayant subi une légère rotation ne donne aucun résultat exploitable et qu'il est nécessaire de corriger cet angle puis de lancer un second traitement.

Bien que le résultat soit désormais plus homogène, il reste dans ce calcul un effet similaire au phénomène de distorsion présenté au chapitre 6.3, et notamment une forte ressemblance avec la figure 6.6. La mesure reste toutefois passablement bruitée malgré une légère **augmentation des coefficients de corrélation** entre les deux images (voir figure 6.11c).

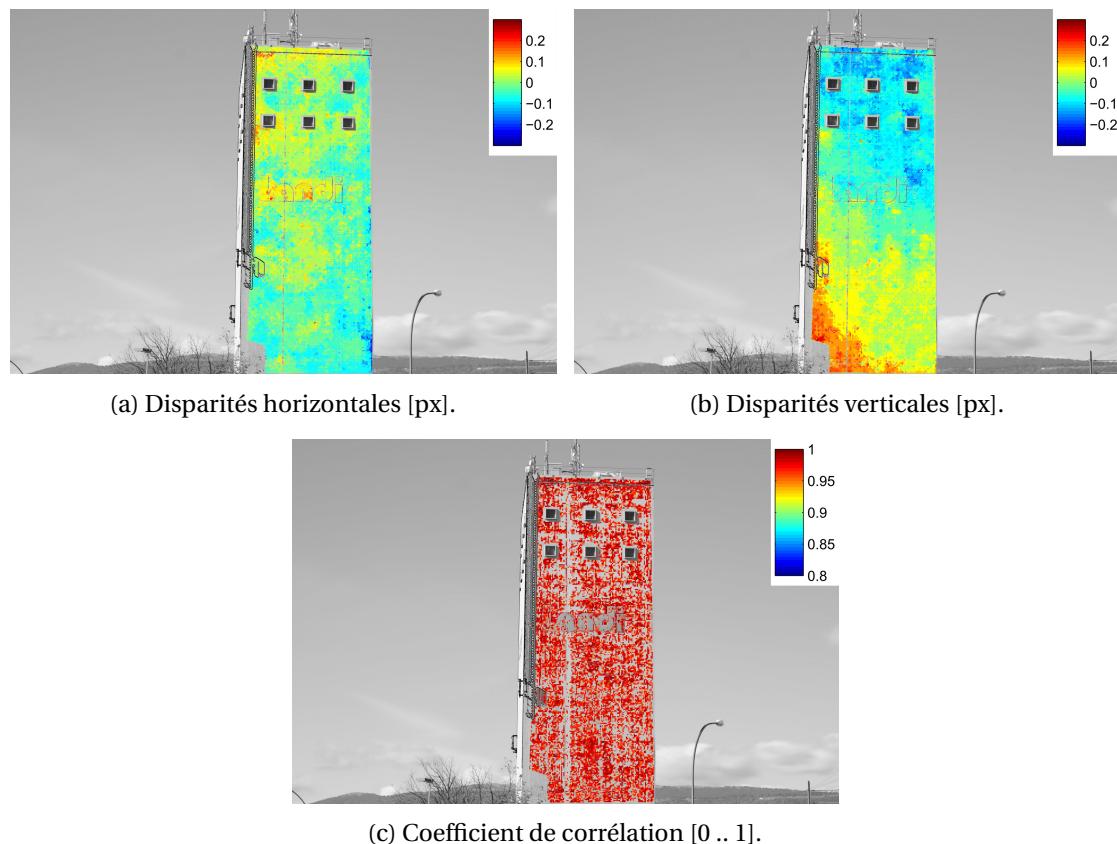


FIGURE 6.11 – Carte des disparités après correction de la rotation.

6.6 Analyse des résultats

Les essais réalisés au cours de ce chapitre démontrent les difficultés liées à la corrélation d'images en extérieur. Entre deux états de mesures, les variations d'éclairage sont inévitables et la chaîne de traitement ne permet pas corriger efficacement ces changements radiométriques. Il est alors impératif de rechercher des conditions aussi proches que possible lors de la répétition des mesures afin de limiter ces dégradations. Dans cette optique, une acquisition d'images nocturnes avec un éclairage artificiel de l'ouvrage est une possibilité à envisager.

Quand bien même les images sont acquises dans des conditions très proches, ce sont des problèmes liés à l'instabilité du système de prise de vues qui entrent en jeu. Les images obtenues souffrent alors de variations géométriques pouvant intervenir d'une image à l'autre en fonction de la température ou à cause de mouvements internes au capteur. Ces variations peuvent atteindre quelques dixièmes de pixel et ne peuvent être négligées. Une solution permettant d'atteindre une plus grande précision serait l'utilisation d'un capteur de meilleure qualité. Un mécanisme interne parfaitement stable et dont les composants ne souffrent pas de la variation des conditions ambiantes permettrait une nette amélioration du processus.

L'aspect positif de ces résultats et la faculté du processus à se contenter d'un centrage à quelques millimètres et à permettre la correction des rotations restantes *a posteriori*. Au même titre, les effets d'un pointage approximatif peuvent être facilement éliminés en tenant compte des paramètres de distorsion des images.

7 Pont autoroutier

Après les premiers essais réalisés sur la tour Landi, ce test présente l'application des techniques de corrélation sur un pont autoroutier. La surveillance de ce type d'ouvrages est très importante pour l'Office Fédéral des routes (OFROU) qui recherche de nouvelles solutions à faible coût dans ce domaine.

L'objectif de ce chapitre est donc d'évaluer les possibilités offertes par la corrélation d'image dans le domaine de l'auscultation de ponts. La précision ainsi que le type de mouvements décelables doivent permettre de qualifier l'intérêt de cette méthode pour ce type d'application.

Ce premier test d'auscultation à distance élevée doit également permettre de mettre en évidence d'éventuelles perturbations liées aux phénomènes atmosphériques. Pour terminer, le comportement statique de l'ouvrage peut être étudié grâce au traitement d'images en rafale.

7.1 Ouvrage choisi

Le choix de l'ouvrage de référence pour la réalisation des tests s'est porté sur le pont d'une bretelle autoroutière proche de la sortie "Yverdon-Sud" sur l'autoroute A1. Cet ouvrage à l'avantage d'être bien dégagé et peut être photographié depuis un point de vue stable.



FIGURE 7.1 – Vue du pont ausculté.

Le capteur a été placé à une distance de 265 m du pont et la focale de 50 mm donne une taille de pixel de 30.2 mm sur l'objet. La structure du pont est composée de béton brut et devrait offrir une texture idéale pour la recherche de correspondance unique.

7.2 Qualité de corrélation

Pour commencer, la qualité de corrélation des images brutes de l'ouvrage est évaluée, sans passer par la sommation d'images. En effet, l'utilisation de la sommation sur ce type d'ouvrage ne permettrait pas de détecter des mouvements de courte durée pouvant se produire lors du passage de véhicules lourds.

7.2.1 Analyse des images

Le chapitre 5.3 a permis de constater que la qualité de corrélation est directement liée au niveau d'intensité des images. Dans une optique d'optimisation des résultats, les images ont été acquises avec un long temps d'ouverture, et donc une intensité élevée. L'extrait d'image brute présenté à la figure 7.2 montre les effets engendrés par ce mode d'acquisition.

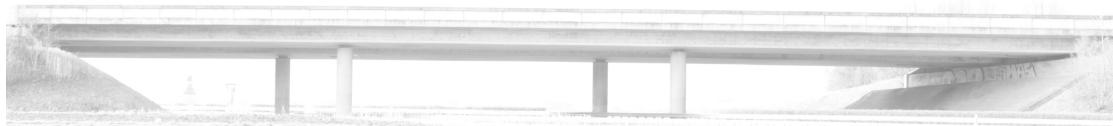


FIGURE 7.2 – Image brute de l'ouvrage.

Ce sont en premier lieu les tons très clairs sur la majeure partie de l'image qui attirent l'attention. Toutefois, la présence de quelques parties légèrement plus sombres est également constatée sur la surface de l'ouvrage. Il s'agit des deux piliers du pont, situés en arrière-plan et se trouvant à l'ombre au moment de la prise de vue. Le dessous du tablier, qui ne bénéficie que d'une part de lumière restreinte est aussi plus sombre. Ces secteurs ombragés sont donc les points sensibles pour la phase de recherche de correspondance et il est nécessaire d'en tenir compte lors de l'analyse des disparités.

7.2.2 Coefficients des images brutes

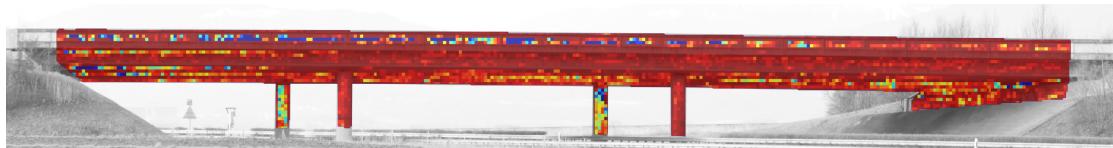


FIGURE 7.3 – Analyse de la qualité de corrélation.

La première constatation pouvant être faite à partir de la figure 7.3 concerne la qualité de corrélation qui est dans l'ensemble très bonne. Comme attendu après une première observation des images, les deux piles ombragées et le dessous du tablier ont des coefficients légèrement inférieurs au reste de l'ouvrage.

La partie supérieure du tablier connaît également quelques difficultés de corrélation. Il s'agit d'un mur de protection en béton disposé sur toute la longueur du pont. Un agrandissement sur ce mur montre que la texture est trop lisse et ne permet pas une qualité de corrélation suffisante.

7.2.3 Sommation d'images

Bien que la sommation ne soit a priori pas envisagée pour les principaux cas d'applications projetés, il est tout de même intéressant d'évaluer le gain qu'elle peut apporter. Un traitement identique à celui appliqué aux images brutes est donc effectué et fournit les résultats illustrés par la figure 7.4.



FIGURE 7.4 – Qualité de corrélation par sommation.

L'amélioration est significative pour toutes les parties qui souffrent du manque de lumière avec les images brutes. Les coefficients passent presque tous à des valeurs supérieures à 0.99 dans ces secteurs. En revanche, le mur de protection ne bénéficie d'aucune plus-value suite à l'assemblage des images. Le manque de relief dans sa texture ne semble pas en mesure d'être compensé par cette technique.

7.3 Surveillance dynamique de l'ouvrage

Pour évaluer le comportement statique de l'ouvrage, une série de traitements est effectuée sur les images brutes sans sommation. Des prises de vue instantanées sont traitées, sans moyenner d'éventuelles déformations pouvant intervenir au cours d'une acquisition en rafale.

L'annexe D présente les résultats détaillés des traitements effectués. Elle comporte les représentations graphiques et numériques des résultats obtenus.

7.3.1 Secteurs d'analyse

L'analyse des disparités des premiers traitements permet de constater que les différentes parties de la structure du pont présentent des mouvements non homogènes. En effet, les piliers, le tablier ainsi que le mur de protection ne sont pas parfaitement solidaires et leurs

comportements lors du passage de véhicules peuvent alors varier.

L'analyse MicMac a donc été effectuée en isolant les éléments de l'ouvrage que l'on souhaite ausculter. Un masque de corrélation a été créé en définissant un secteur sur toute sa longueur du tablier, et deux autres pour les piliers situés sur la face avant du pont.

À partir de ces zones de corrélation, les mesures de disparités moyennes sont calculées à partir des trois secteurs illustrés en figure 7.5.



FIGURE 7.5 – Secteurs d'analyse des mouvements.

7.3.2 Traitements

La série traitée comporte 26 images permettant de réaliser **25 traitements indépendants**. La première image est choisie comme références et les 25 suivantes sont utilisées tour à tour pour la mise en correspondance.

Les paramètres de calcul **MicMac** sont conservés à l'identique pour le traitement de chaque paire d'images. Une configuration optimale est définie sur la base de la première paire, puis appliquée aux traitements suivants. Cela permet de ne pas influencer le traitement par le choix des paramètres.

Pour le calcul des disparités moyennes, le traitement s'effectue dans **Matlab**, et permet d'obtenir pour chaque secteur des déplacements moyens ainsi que leur variance. L'analyse se fait sur un secteur de 7'500 pixels au centre du tablier et deux secteurs d'environ 3'000 pixels sur les piliers situés à l'avant de l'ouvrage. Ils sont représentés en rouge et en vert sur la figure 7.5.

7.3.3 Résultats

Pour chaque paire d'images, le traitement MicMac est effectué et les fonctions Matlab permettent de représenter graphiquement les mesures de disparités. Des valeurs moyennes ainsi que leurs variances sont extraites individuellement selon les secteurs mentionnés précédemment. Toutes les variances des mesures sur le tablier du pont sont inférieures à 0.02 px. En ce qui concerne les piliers, ils obtiennent une **variance maximale à 0.03 px** ce qui dénote la confiance à accorder aux mesures.

Les résultats détaillés de chaque traitement sont récapitulés et commentés en annexe dans le tableau D.1.

7.3.4 Analyses graphiques

Disparités

La représentation des mesures de disparités issues de MicMac permet une analyse détaillée du comportement de l'ouvrage. La figure 7.6 met en évidence l'évolution des déformations verticales le long du tablier.

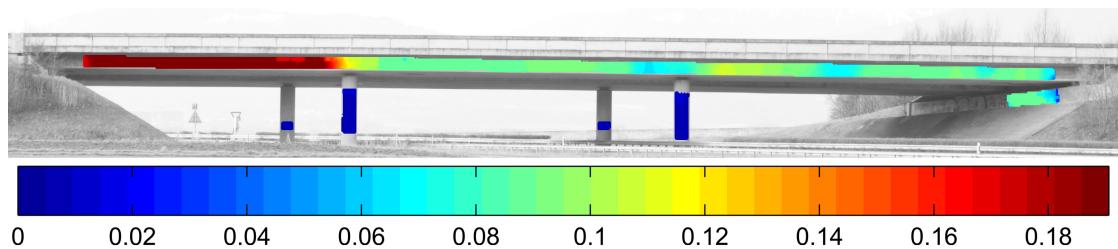


FIGURE 7.6 – Images 75-89 : Disparités verticales [px].

Entre les images 78 et 89, un abaissement général du tablier est constaté, alors que les piliers restent parfaitement fixes. Ce mouvement est plus prononcé dans la partie gauche de l'ouvrage jusqu'au premier pilier et atteint 0.2 pixel au maximum. Il s'atténue ensuite sur le reste de l'ouvrage en stagnant à des valeurs proches du dixième de pixel.

La rupture nette des déformations au droit du premier pilier est clairement identifiable sur cette représentation. Ce comportement semble tout à fait réaliste et démontre que le pilier joue son rôle de soutien de la structure.

Pour valider l'interprétation de ces résultats, il faut encore connaître précisément les charges en présence sur le pont au moment de l'acquisition des images. Le point de vue étant dans ce cas situé en contrebas, il est impossible de distinguer les véhicules et donc de mettre en relation leur présence avec des mouvements observés.

Suivi dynamique

Le graphique présenté en figure 7.7 montre l'évolution des trois secteurs analysés à chaque prise de vue. Toutes les disparités sont mesurées par rapport à la première image de la série, soit l'image de référence.

Le premier constat concerne la composante horizontale du déplacement (en bleu) qui reste très stable au cours des traitements. Comme aucun mouvement n'est a priori attendu sur cet axe, ces valeurs, et notamment leur uniformité, donnent une indication sur la fiabilité des résultats obtenus.

La courbe rouge représente quant à elle l'évolution de la composante verticale du tablier. Sa trajectoire en dents-de-scie indique de fortes perturbations à cet endroit de l'ouvrage. L'amplitude maximale de 0.5 pixel correspond à un déplacement du tablier de 15 mm. Cependant,

sur l'image dont est issue cette mesure, un mouvement vertical de plus faible amplitude est également constaté sur les piliers (courbes en vert). Ceux-ci étant supposés stables, cette mesure est à interpréter avec prudence. Une partie des déplacements peut être due à un mouvement du capteur.

Les deux courbes vertes représentent les déplacements verticaux des piliers. Hormis la mesure sur l'image 86, les disparités moyennes et leurs variances ne dépassent jamais les 0.03 pixel. Un autre élément à relever est que les courbes des piliers sont parfaitement parallèles. Sur les 25 traitements réalisés, seules deux mesures présentent des différences entre les piliers, supérieures à 0.02 pixel. Cela confirme là encore l'excellente qualité des résultats.

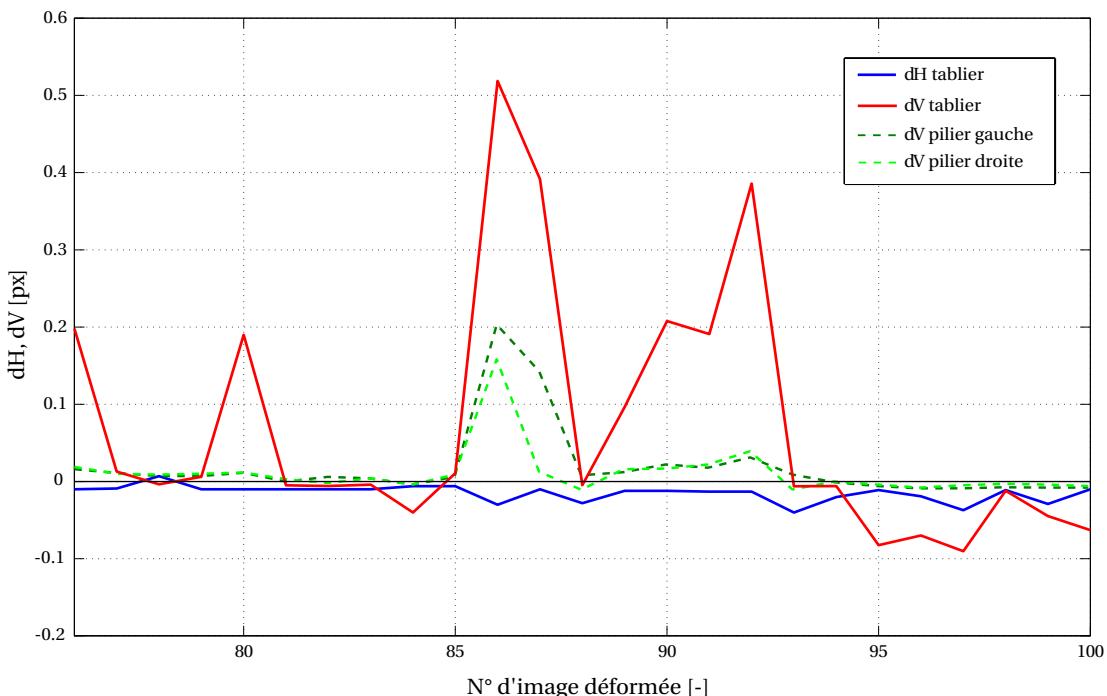


FIGURE 7.7 – Analyse du suivi dynamique de l'ouvrage : 1 px = 30.2 mm.

7.4 Analyse des résultats

Grâce aux différents tests réalisés sur la base du pont autoroutier, de nombreuses observations sur les techniques de corrélation peuvent être formulées.

Pour commencer, l'objectif initial de ce test est d'évaluer le **potentiel de corrélation** de cet ouvrage. Les résultats des essais de corrélation montrent que la texture de l'ouvrage se prête parfaitement à la mise en correspondance des images. Sur la base des images brutes, les coefficients obtenus sont tout à fait satisfaisants et permettent d'extraire des mesures de précision dans toutes les zones disposant d'une bonne luminosité.

L'excellente corrélation des images brutes a ensuite permis de procéder à des essais de mesures

dynamiques du comportement de l'ouvrage. En partant du principe que chaque image individuelle dispose d'une qualité suffisante, le traitement d'une série en rafale permet d'extraire des déplacements relatifs de haute précision en tout point de l'ouvrage.

Les essais de **suivi dynamique** présentés en figure 7.7 fournissent des résultats encourageants. Les disparités des secteurs supposés stables ne dépassant jamais deux à trois centièmes de pixel, cela laisse supposer que la précision du système atteint quelques centièmes de pixel dans ces conditions.

Les **effets atmosphériques**, mentionnés en début de chapitre n'ont en revanche pas été observés au cours du traitement. Aucun phénomène de scintillation n'a été constaté et les problèmes liés à la réfraction n'interviennent pas en auscultation dynamique. Dans les cas de surveillance à grand intervalle de temps, la réfraction ne provoque qu'une translation verticale pouvant être corrigée en début de processus.

Le système de mesure dynamique mis en place pour ce test nécessite néanmoins quelques améliorations. Au niveau du matériel, l'acquisition d'images en rafale doit être plus rapide pour permettre l'enregistrement de plusieurs images par seconde. Aujourd'hui, des appareils permettant l'acquisition de 6 à 9 images par seconde sont devenus courants, y compris sur le marché grand public. Leur utilisation permet alors de suivre les **déformations instantanées** de ce type de pont et mettre en relation les mouvements observés avec la **présence de véhicules**.

Afin de valider les traitements réalisés au cours de ce test, il serait intéressant de réaliser une nouvelle acquisition d'images couplée à un dispositif de mesure indépendant. La synchronisation des deux systèmes permettrait de définir le **potentiel** ainsi que les **limites** de la corrélation d'images. L'acquisition des images depuis un point de vue surélevé permettrait également une meilleure analyse des résultats grâce à la mise en relation des déformations avec le passage et la position des véhicules.

8 Leica MS50

Le Leica Nova MS50 est un appareil multifonctions combinant notamment des levés tachéométriques traditionnels et des mesures de nuages de points 3D. L'intérêt de cet instrument pour ce travail est qu'il est muni d'une caméra coaxiale avec un zoom optique 30x et un autofocus.

Le test réalisé a pour objectif de déterminer le potentiel de cet appareil dans les applications de corrélation d'images. Il faut pour cela évaluer la qualité des images afin de déterminer quelle précision est atteignable dans des cas concrets d'utilisation du système. La fonction tachéométrique de l'appareil permet de mesurer l'orientation de chaque image et donc la position de son centre. Il est alors possible de comparer un déplacement mesuré par corrélation avec ce même déplacement obtenu par différence angulaire.

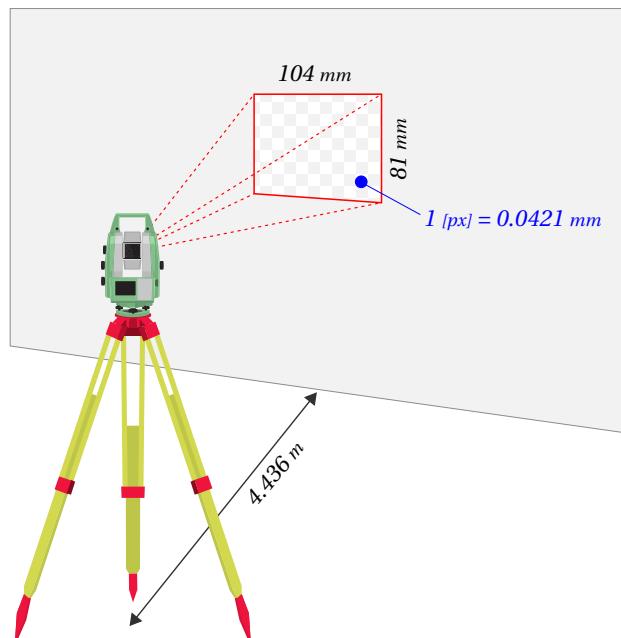


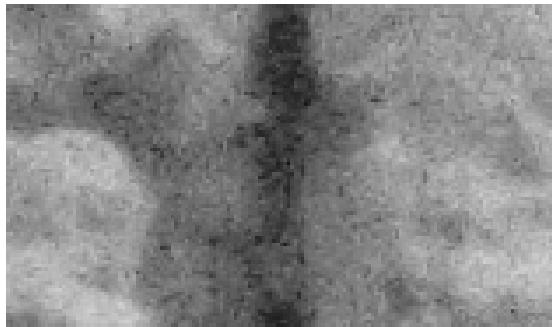
FIGURE 8.1 – Test MS50 : schéma d'acquisition. ©Leica

Trois salves de 20 images sont acquises sur un objet stable offrant une texture adaptée à la corrélation. Lors des deux premières salves, l'appareil reste immobile avec une orientation constante. La troisième série d'images est acquise avec une légère rotation de l'instrument permettant de créer un effet de déplacement de l'objet.

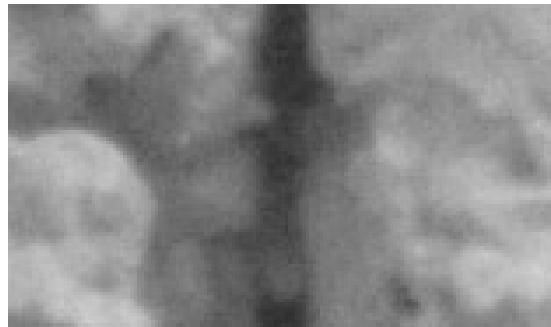
8.1 Acquisition des images

Les trois salves d'images sont prises à une distance de 4.436 m d'un mur en brique. La taille du pixel d'une image est évaluée de manière empirique à 0.0095 mm/m d'éloignement de l'objet. Dans ce cas de figure, cela correspond à une **taille de pixel de 0.04213 mm**. La résolution de 2460×1920 px, permet aux images de couvrir une zone de 10.4×8.1 cm.

L'export des images se fait uniquement au format JPEG compressé, ce qui dégrade passablement leur qualité. La sommation d'image permet une nouvelle fois d'augmenter considérablement la dynamique et de réduire le bruit. Les images de la figure 8.2 illustrent le gain obtenu en additionnant 16 images. Comme l'appareil enregistre l'orientation angulaire de chaque image, seules celles étant parfaitement stables sont utilisées pour la sommation.



(a) Extrait d'image brute.



(b) Sommation de 16 images.

FIGURE 8.2 – Gain par sommation d'images issues du MS50.

La rotation horizontale de l'appareil lors de la troisième salve d'images est mesurée à 1.66 ± 0.1 mgon. À cette distance, cela représente un **écart latéral de 0.1154 mm** qui peut ensuite être comparé aux mesures de disparités par corrélation d'images. Pour la composante verticale, l'inclinaison entre la première et la troisième salve est mesurée à 0.163 mgon ± 0.1 mgon et représente donc un **écart vertical de 0.0114 mm**.

8.2 Essais de corrélation

8.2.1 Images brutes

Pour commencer, et comme lors des précédents tests, un premier traitement est effectué afin d'analyser uniquement les coefficients de corrélation. Deux images brutes sont traitées afin

d'évaluer leur potentiel pour la recherche de correspondance. Pour ce calcul, une imagette de 11 px et un coefficient de corrélation minimum (C_{min}) de 0.60 sont utilisés.

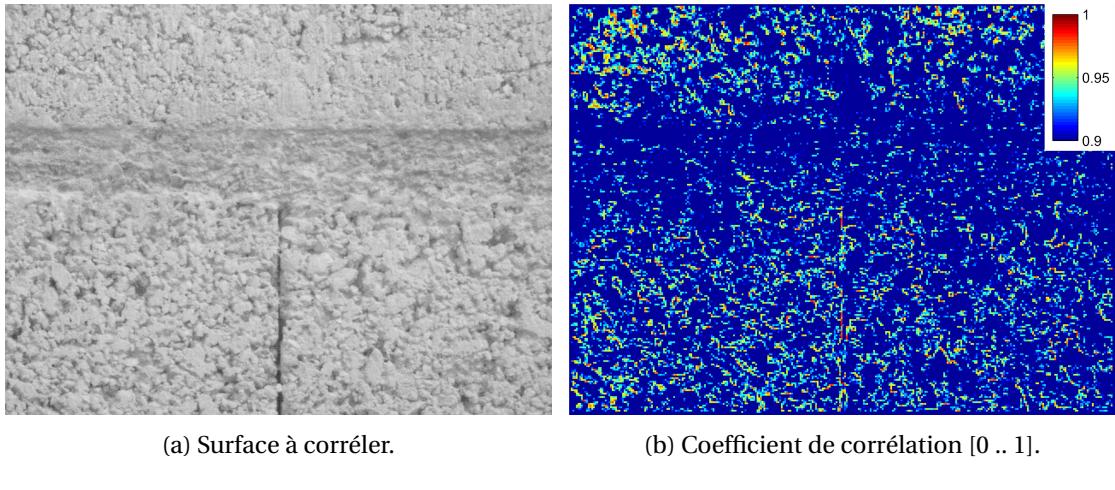


FIGURE 8.3 – Potentiel de corrélation d'images brutes : (C_{min} 0.60, *Subset* 11 px).

Le traitement illustré par la figure 8.3 indique que la quasi-totalité des coefficients est inférieure à 0.90 en corrélant les images brutes. Avec une moyenne à 0.86, quelques difficultés sont attendues dans les mesures de disparités.

8.2.2 Images sommées

Pour faire suite aux résultats obtenus sur les images brutes, le même calcul est réalisé à partir d'un assemblage de 16 images. Le traitement compare les images additionnées des salves 1 et 3 en utilisant à nouveau un C_{min} de 0.60 et une fenêtre de 11 px. Le résultat de la corrélation est représenté en figure 8.4 et indique que l'addition de 16 images combinée à la bonne texture de l'objet permet une excellente corrélation.

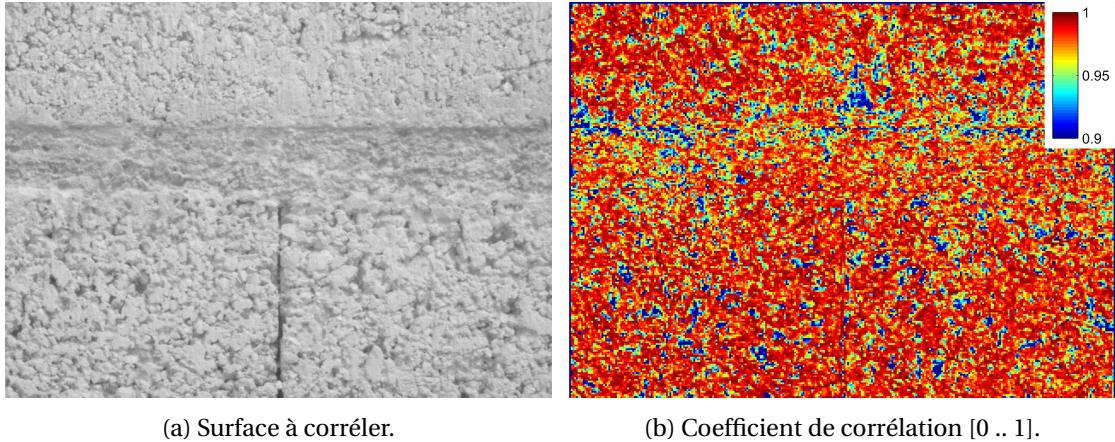


FIGURE 8.4 – Potentiel de corrélation d'images additionnées : (C_{min} 0.60, *Subset* 11 px).

L'amélioration entre les deux traitements est tout à fait significative et montre une nouvelle fois l'apport de la sommation lorsque les images sont de mauvaise qualité. Le coefficient moyen est cette fois de 0.97 et doit permettre une meilleure détermination des disparités.

8.2.3 Mesures de disparités

Les coefficients étant excellents sur l'ensemble de la surface étudiée, un deuxième traitement peut être lancé en conservant uniquement les plus élevés. Le résultat présenté en figure 8.5 est issu d'un traitement MicMac utilisant une fenêtre de 61 px, un coefficient minimum de 0.97 et un facteur de régularisation de 0.4. Ces paramètres doivent permettre de minimiser le bruit restant et d'obtenir des champs de disparités homogènes au plus proche des mouvements attendus.

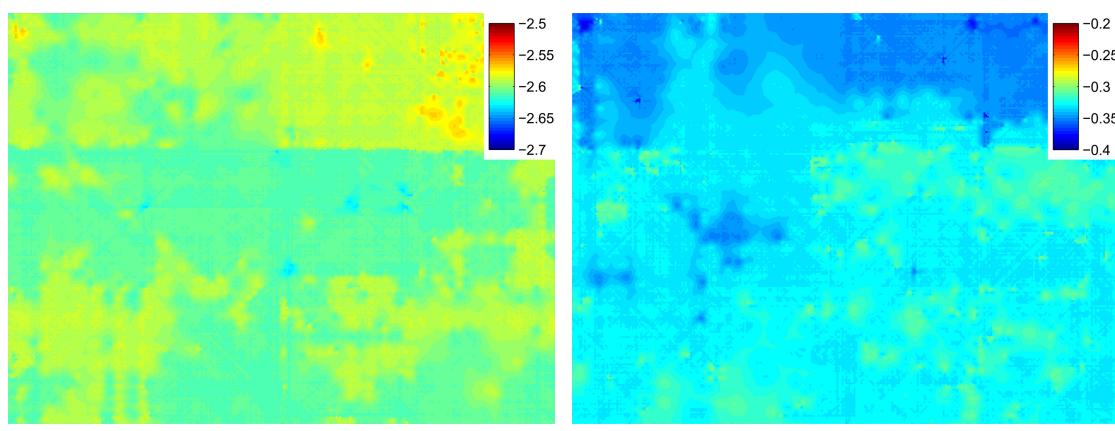


FIGURE 8.5 – Cartes des disparités MS50 : (C_{min} 0.97, Subset 61 px).

Les cartes de disparités présentées en 8.5 indiquent des déplacements horizontaux et verticaux de l'objet, respectivement vers la gauche et vers le haut. La direction de ces déplacements est en adéquation avec les rotations de l'appareil entre les deux séries d'images.

Les valeurs en pixels indiquées dans le tableau 8.1 sont calculées sur l'entier de la surface corrélée en ôtant une marge de 200 px sur les quatre côtés. Il s'agit donc d'une moyenne de 2'800'000 valeurs. Les disparités horizontales et verticales sont ensuite converties en millimètres en les multipliant par la taille du pixel afin d'être comparées à la mesure tachéométrique.

Exprimée en rapport avec la taille du pixel, la différence entre mesure tachéométrique et corrélation d'images est ici de l'ordre du **dixième de pixel**. À ce stade, il est impossible d'attribuer cet écart directement à l'une ou l'autre des méthodes de mesure. Pour analyser de manière rationnelle ces écarts, il est important de bien mettre en relation les précisions respectives de chacune des méthodes.

8.3 Comparaison des précisions

Type de mesure	dH [px]	dV [px]	R [0 .. 1]	dH [mm]	dV [mm]
Corrélation	-2.602±0.037	-0.331±0.009	0.9943	-0.1096	-0.0140
Tachéométrique	-	-	-	-0.1154	-0.0114
Différences :				0.0054 mm	-0.0035 mm
				(0.1282 px)	(0.0831 px)

TABLEAU 8.1 – Analyse des mesures de disparités MS50.

8.3 Comparaison des précisions

La précision de la mesure angulaire absolue du MS50 est indiquée par le fabricant à 0.3 mgon, soit 0.4712 mm à une distance de 100 m. Du côté du capteur photographique, la taille du pixel a été évaluée à 0.0095 mm/m, soit 0.9498 mm à 100 m.

Les tests réalisés en [11] indiquent que les techniques de corrélation permettent d'atteindre une précision allant jusqu'au centième de pixel dans des conditions optimales et au dixième de pixel dans les situations courantes. Ce dixième de pixel permet donc de réévaluer cette précision à 0.00095 mm/m, soit à 0.0950 mm à 100 m. Rapporté en valeur angulaire, cela correspond à une précision de 0.06 mgon

8.3.1 Récapitulatif

	[gons]	[mm/m]	[px]	Précision à 100 m [mm]
Précision angulaire :	3 cc	0.00471	0.5	0.4712
Résolution du capteur photographique :	6 cc	0.00950	1	0.9498
Précision par corrélation d'images :	0.6 cc	0.00095	0.1	0.0950

TABLEAU 8.2 – Comparatif des précisions de mesure du MS50.

Il est toutefois important de clarifier la notion de précision angulaire de 3 cc du MS50. Il s'agit là d'une **précision absolue** permettant de qualifier une mesure de direction sur l'entier du cercle de l'instrument. Dès lors, il est certain qu'une série de mesures angulaires, séparées de quelques cc seulement, permettra des déterminations bien plus précises que les 3 cc annoncés par le fabricant. Dans le cas pratique présenté précédemment, il est tout à fait envisageable de penser que la précision de la mesure tachéométrique est inférieure à 1 cc, et donc très proche de la mesure par corrélation d'images.

8.4 Analyse des résultats

Au vu des résultats obtenus, il est très difficile de qualifier la précision de la mesure de déplacement par corrélation. La mesure «doit» étant ici fournie par les composantes angulaires du MS50, elle n'atteint pas la précision attendue des techniques de corrélation. Ce dixième de pixel d'écart n'est donc pas à attribuer aux méthodes de corrélation, mais plutôt à la mesure tachéométrique.

Il serait intéressant de procéder à de nouvelles mesures en effectuant une série de petits déplacements angulaires et en appliquant à chaque fois le traitement par corrélation d'images. Ceci permettrait, par régression, de définir plus précisément les précisions respectives de chacune des deux méthodes.

Les mesures de directions angulaires fournies par l'instrument offrent un véritable atout pour le processus de corrélation. **L'orientation précise de chaque image** donne l'assurance de n'utiliser que les plus stables pour la sommation. Ceci à l'avantage de réduire le risque de fautes liées à des images parasites. Les composantes des directions horizontales et verticales étant affichées à 0.1 mgon, elles permettent de détecter facilement de légers mouvements de l'instrument. De plus, un mouvement dû à un enfouissement du trépied peut être mis en évidence par le compensateur de l'instrument.

Le traitement des **images brutes** sans sommation a également été effectué au cours de ce test. Il en résulte que la corrélation de ces images ne donne aucun résultat exploitable à la précision souhaitée. Les coefficients obtenus sont pratiquement tous inférieurs à 0.90 et la variance des disparités avoisine le demi-pixel. Il est toutefois intéressant de relever que les déplacements mesurés sur la base de ces images restent proches des mesures «doit» et demeurent cohérents avec leurs erreurs moyennes.

L'utilisation du MS50 dans le domaine de la **surveillance d'ouvrage** est une solution envisageable lorsque l'on tient compte de ses principales spécificités. Pour commencer, la focale très longue ainsi que le petit angle d'ouverture (1.5°) nous obligent à maintenir un certain recul par rapport à l'objet ausculté. Il est en effet nécessaire de s'éloigner à 1 km d'un objet pour obtenir une image de 24×18 m. La taille du pixel à cette distance monte alors à près de 1 cm, mais reste suffisante pour une détection millimétrique de mouvement.

Il est alors envisageable d'utiliser cet instrument pour une mesure de dilatation des joints de la culée d'un pont ou encore une mesure locale de fléchissement du tablier. La grande distance focale limite toutefois son utilisation à des **mesures locales** sur des portions réduites d'un ouvrage. Cela reste valable tant qu'il est nécessaire de réaliser des déterminations millimétriques. La possibilité d'auscultation à grande distance reste toutefois envisageable avec les MS50 à condition de trouver un compromis entre la précision souhaitée et la dimension d'une surface à ausculter.

Analyses et discussions Partie III

9 Conclusions

Les expérimentations réalisées au cours de ce projet ont mené à un grand nombre d'évolutions dans les applications pratiques de corrélation diachronique d'images. En effet, les bases théoriques existent depuis bien des années, mais leur mise en pratique dans le domaine de la surveillance d'ouvrages n'avait jusque-là pas été entreprise. Dès lors, ces recherches ont permis d'évaluer le potentiel et les lacunes des techniques actuelles appliquées aux problématiques d'auscultation. La formulation de recommandations et de pistes de recherche doit permettre l'accomplissement de cette nouvelle solution d'auscultation d'ouvrages.

ACQUISITION DES IMAGES

Le déroulement des essais entrepris et leur analyse a posteriori permettent la mise en place d'une série de recommandations afin d'optimiser les processus de corrélation.

Pour la partie prise de vue, ce projet a permis le développement de techniques d'optimisation de mise en correspondance des images. Parmi celles-ci, des acquisitions à intensité élevée ainsi que l'assemblage d'images par sommation ont démontré leur faculté à améliorer la qualité des mesures de disparités.

Les effets liés à la distorsion des images ont été mis en évidence lorsque l'orientation des images n'était pas constante. Leur comportement et leur grandeur ont été déterminés et sont à présent connus. En cas de mesures depuis un point d'observation fixe, disposant d'une orientation suffisamment stable, les effets de distorsions sont nuls. Il est alors possible de travailler avec tout type de matériel et d'utiliser des images brutes pour la corrélation. Dans des situations plus complexes, la possibilité de corriger les images de leur distorsion est envisageable. Moyennant une calibration du capteur, les images originales peuvent être corrigées et le traitement peut à nouveau se dérouler normalement.

C'est donc lors de cette étape d'acquisition des images qu'il faut prendre le plus de précautions. Bien que la prise de vue en elle-même soit rapide, elle doit être parfaitement maîtrisée sans quoi elle s'avère inutilisable ou limite la précision lors de la phase de traitement.

Chapitre 9. Conclusions

TRAITEMENTS

De nombreux traitements de corrélation d'images ont été réalisés au cours du projet. Les apprentissages successifs issus de chaque calcul ont conduit à la mise en place de solutions d'améliorations. Elles ont permis une optimisation de la chaîne de traitement et l'adaptation du logiciel MicMac aux applications d'auscultation d'ouvrage.

Les développements relatifs aux calculs MicMac combinés à la création d'outils Matlab rendent désormais les traitements accessibles et les résultats facilement exploitables. Les représentations graphiques permettent une analyse complète du comportement des ouvrages auscultés. Chaque chantier traité au cours de ces recherches a permis d'évoluer vers une plus grande maîtrise des paramètres de calcul.

La création et la mise à disposition de modèles de configurations MicMac permettent une approche simplifiée du logiciel de corrélation. La discussion des principaux paramètres et de leur influence donne de solides bases pour le démarrage de tout nouveau chantier de corrélation.

RÉSULTATS

Les traitements effectués sur les ouvrages d'art ont démontré leur très grande aptitude à la corrélation d'images. La texture en béton parfaitement anisotrope est à l'origine des excellentes mesures réalisées sur ces ouvrages. Couplées aux techniques de sommation d'images, ces textures ont permis d'atteindre une précision du centième de pixel sur des mesures en intérieur.

Pour les acquisitions en extérieur, les changements de conditions d'éclairage de l'ouvrage constituent la principale problématique. Les changements d'intensité lumineuse à la surface de l'ouvrage entraînent une importante baisse des coefficients de corrélation.

Dans les applications diachroniques à grand intervalle de temps, des déplacements dépassant le dixième de pixel ont été mesurés. Ceux-ci n'ont toutefois pas pu être confirmés par un système de mesure indépendant ou un comportement connu de l'ouvrage. Il se peut que la faible qualité de corrélation soit à l'origine de mesures de déplacements erronées. Il faut par conséquent être extrêmement attentif aux conditions de luminosité lors de ce type de chantier. L'analyse des coefficients de corrélation obtenus doit être rigoureuse afin de déterminer la confiance à accorder aux mouvements observés.

Dans les cas de corrélation à intervalle court, les variations lumineuses ont en revanche un impact réduit. Elles peuvent même être considérées nulles lorsque l'espacement entre les prises de vues est suffisamment petit.

Le traitement d'images en rafales a permis d'évaluer les possibilités de corrélérer des images brutes à intervalle réduit. La corrélation en mode «dynamique» a mis en évidence des mouve-

ments de plusieurs centièmes de pixel sur le tablier du pont autoroutier à Yverdon-les-Bains. En se basant sur la stabilité supposée des piliers, la précision atteinte par ces mesures est de l'ordre d'un à deux centièmes de pixels.

Par conséquent, la possibilité de réaliser des mesures de haute précision est confirmée par ces résultats. Le centième de pixel peut être atteint pour des mesures de déplacements relatifs entre deux images. Les mesures à grand intervalle de temps mises à part, cette affirmation est vraie aussi bien en intérieur qu'en extérieur.

POTENTIEL ET PERSPECTIVES

Les résultats obtenus permettent d'envisager avec optimisme l'application des techniques de corrélation en auscultation d'ouvrage. Avec un traitement accessible et des méthodes d'acquisition maîtrisées, l'utilisation à grande échelle de ce type de mesures n'est désormais plus inconcevable.

Au-delà de la finesse des déplacements identifiables, la possibilité de réaliser des mesures «plein champ» est également d'un grand intérêt. La génération d'un champ de vecteurs sur un ouvrage au complet permet l'analyse des cas de déformations les plus complexes. Ces techniques de mesure se distinguent également grâce leur aspect «sans contact». En auscultation d'ouvrages, la mise en place des dispositifs de mesures habituels est généralement longue et coûteuse, et ne fournit qu'une série de mesures ponctuelles. Le côté non intrusif de la corrélation a donc un avantage financier, et réduit les risques liés aux interventions sur l'ouvrage.

La faiblesse du système constatée lors des mesures diachroniques à grand intervalle de temps n'est pas irrémédiable. Bien que les essais réalisés n'aient pas été concluants, il ne faut pas pour autant fermer la porte à ce type de mesures. La précision étant étroitement liée aux conditions d'acquisition des images, les recherches doivent être menées dans cette direction. Par exemple, l'utilisation de prises de vues nocturnes avec un éclairage artificiel de l'ouvrage est une piste à étudier. La création de ce type de conditions devrait permettre de conserver un environnement local similaire entre deux états de mesures.

Les possibilités d'auscultation dynamique disposent également d'un potentiel d'évolutions élevé. En effet, les expérimentations menées ont livré des résultats particulièrement encourageants. De nouveaux essais, couplés à un dispositif de mesures indépendant permettraient de déterminer le potentiel exact de ce type de mesures. En s'approchant du centième de pixel, la précision des mesures peut atteindre le dixième de millimètre en fonction des conditions et du matériel employé. La mise en place d'un système de mesure à haute vitesse, de précision submillimétrique et à faible coût en ferait un outil indispensable dans le domaine de l'auscultation.

À l'issue de ces recherches, de nombreux aspects de la corrélation d'images appliquée à l'auscultation d'ouvrages ont été améliorés. Les méthodes d'acquisition et de traitement

Chapitre 9. Conclusions

des images sont désormais en mesure de garantir une utilisation optimale des logiciels. Les paramètres de calcul sont également maîtrisés et leur influence sur les résultats est connue. L'exploitation des mesures de disparités est rendue abordable grâce aux scripts développés à cet effet. L'analyse des déformations est dorénavant possible grâce à l'extraction de mesures dont la fiabilité et la précision sont exprimées par des indicateurs statistiques rigoureux.

En fin de compte, chaque étape de ce travail a apporté sa contribution aux solutions mises en place. Dans l'ensemble, elles ont permis de cibler les lacunes des techniques existantes et de s'approcher au plus près des besoins actuels dans le domaine de l'auscultation d'ouvrages.

Yverdon-les-Bains, le 7 février 2014

Julien Comte

Annexes Partie IV

A Fonctions MATLAB

Cette annexe présente les différentes fonctions Matlab développées au cours du projet. Elles sont présentées selon leur ordre d'apparition dans la procédure de travail.

Pour chaque script, son principe de fonctionnement est brièvement expliqué en introduction. Cette description comprend les objectifs des fonctions, les traitements effectués ainsi que les résultats fournis en sortie. Au cours du processus de travail, ces différentes fonctions apparaissent dans l'ordre suivant :

- rgb2gray : Conversion des images couleurs en niveaux de gris
- Somme_Img : Assemblage d'images brutes par sommation
- MicMac_RES : Représentation graphique des résultats MicMac
- Helmert : Calcul des paramètres de transformation pour corriger les rotations
- Rotation_Img : Rotation des images brutes

Les commentaires, affichés en vert dans les codes sources, permettent de comprendre les étapes de traitement pour chaque fonction. Toutes les informations nécessaires à leur utilisation y sont indiquées.

A.1 Traitement des images (rgb2gray)

A.1.1 Principe

Cette fonction intervient en tout début de processus afin d'optimiser les images avant leur traitement. Les logiciels de corrélation, et notamment MicMac travaillent sur la base d'images TIFF en niveaux de gris uniquement. Malheureusement, l'utilisation du logiciel *Digital Photo Professional* ne permet pas un export correct des images en niveaux de gris. En effet, celles-ci sont toujours encodées sur trois canaux de la même manière que les images couleur RGB, ce qui a pour effet de multiplier par trois la taille des fichiers. La conservation de ce volume élevé de données a pour effet de ralentir chaque étape du processus de corrélation et remplir inutilement les espaces de stockage.

La fonction *rgb2gray* permet donc d'exclure les deux canaux superflus et crée une nouvelle image au format TIFF. Cela permet de gagner 66 % d'espace de stockage sur les images d'un chantier. Pour chiffrer ce gain, sur un chantier de 48 images (3 salves de 16 images), l'économie est de près de 2 Gb de données.

A.1.2 Schéma

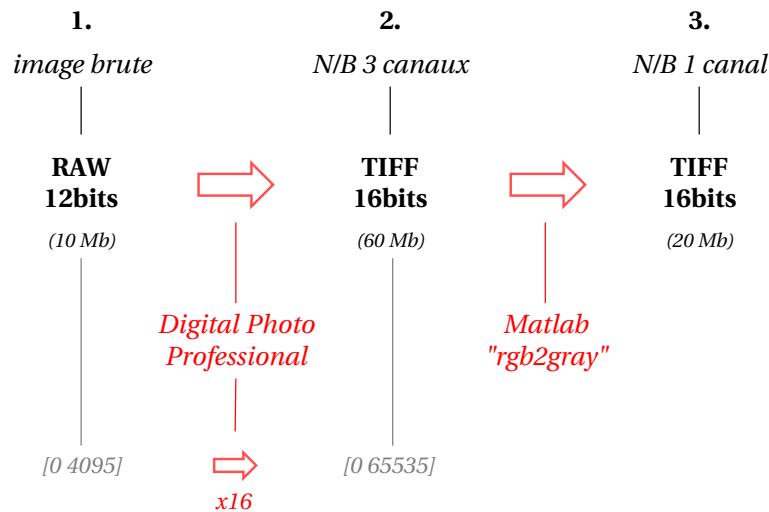


FIGURE A.1 – *rgb2gray* : conversion des images en niveaux de gris.

A.1.3 Code source

```

1 %% CONVERSION DES IMAGES 3 CANAUX EN NIVEAU DE GRIS
2
3 %-----
4 % Code etabli pour des images TIFF 16bits en niveaux de gris issues du logiciel "
5 % Digital Photo Professional".
6 %
7 %
8 % Fonctionne avec tout les formats d'images supportes par Matlab
9 %-----
10
11 clear all;
12 close all;
13
14 % Ouverture des images (ici limite aux images TIFF pour le projet)
15 [Fich,Rep,FilterIndex] = uigetfile({'*.TIF; *.TIFF; *.tif; *.tiff'},'Image a convertir',
16 % Choisir une image
17 % Definition des valeurs de depart
18 [height,width] = size(Fich);
19 TestVal = iscell(Fich);
20 i = 1;
21
22 % PLUSIEURES IMAGES A TRAITER
23 if TestVal > 0

```

A.1 Traitement des images (rgb2gray)

```
24     for i = 1:width
25         FichIncr = char(Fich(i));
26         [Chemin, Nom, Ext] = fileparts(fullfile(Rep,FichIncr));
27
28         % Conversion des images en niveaux de gris
29         I = rgb2gray( imread(fullfile(Rep,FichIncr)));
30         % Ecriture des nouvelles images avec suffixe "_Gray"
31         Output = [Chemin '\\' Nom '_Gray' '.TIF'];
32         imwrite(I , Output , 'ColorSpace','icclab','Compression','none');
33     end
34
35 % UNE SEULE IMAGE A TRAITER
36 else
37     FichIncr = char(Fich);
38     [Chemin, Nom, Ext] = fileparts(fullfile(Rep,FichIncr));
39
40     % Conversion des images en niveaux de gris
41     I = rgb2gray( imread(fullfile(Rep,FichIncr)));
42
43     % Ecriture des nouvelles images avec suffixe "_Gray"
44     Output = [Chemin '\\' Nom '_Gray' '.TIF'];
45     imwrite(I , Output , 'ColorSpace','icclab','Compression','none');
46 end
```

A.2 Sommation d'images

A.2.1 Principe

Comme mentionné dans le chapitre 3.4, il s'agit simplement d'additionner les valeurs des pixels en superposant des images issues d'une acquisition en rafale. Le traitement se fait à partir d'images TIFF 16 bits en niveaux de gris, générées par la fonction *rgb2gray*.

Le chapitre 3.3.2, a montré que les images 16 bits n'ont en fait qu'une dynamique originale de 12 bits. Pour cela, la fonction *Somme_Img* commence par diviser par 16 les valeurs de chaque pixel afin de revenir à la dynamique originale et obtenir des valeurs comprises dans la plage [0 .. 4095]. Cette opération est effectuée en boucle sur toutes les images et les valeurs sont additionnées à chaque itération. Lorsque toutes les images sont traitées, la somme est réajustée sur 16 bits en fonction du nombre d'images utilisées. Cette fonction peut être utilisée pour additionner entre 2 et 16 images, permettant ainsi d'obtenir une image résultat entre 13 et 16 bits.

A.2.2 Schéma

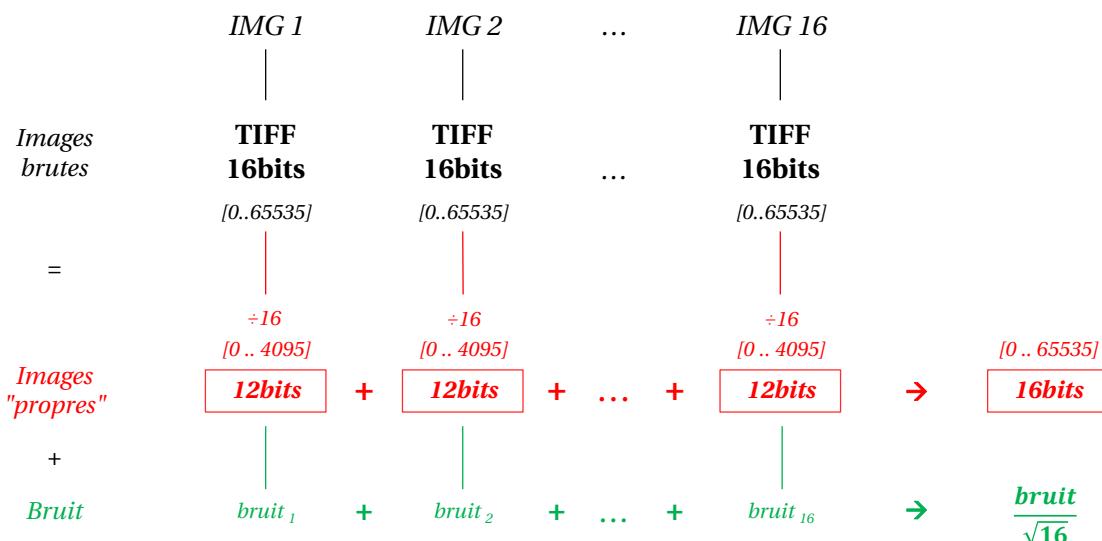


FIGURE A.2 – Sommation d'images : chaîne de traitement et résultats.

A.2.3 Code source

```

1 %% SOMMATION IMAGES
2
3 %-----
4 % Code etabli pour des images TIFF 16bits en niveaux de gris
5 %
6 % Les images utilisees pour ce projet sont issues du logiciel "Digital Photo
% Professional". Il s'agit d'une conversion du fichier CR2 vers le format TIFF.

```

```

7 %
8 % La conversion en niveau de gris d'effectue au prealable par la fonction A_rgb2Gray.m
9 %
10 % La fonction est pour l'instant limitee a l'addition de 16 images au maximum.
11 %-----
12
13 close all;
14 clear all;
15
16     % Ouverture des images
17 [Fich,Rep] = uigetfile({'*.TIF; *.TIFF; *.tif; *.tiff'},'Image a convertir','multiselect
18 ','on');
19
20 % CONDITIONS ET TESTS
21 % Verifie qu'au minimum 1 image soit selectionnee
22 if isequal(Fich,0)
23     close all;
24     clear all;
25     disp('Aucune image selectionnee')
26 else
27     % Fixe les valeurs de depart de la boucle
28     [x,NbImages] = size(Fich);
29     i = 1;
30     Sum0=0;
31
32 if NbImages > 16
33     % Limite l'utilisation de la boucle a 16 images. (16 x 12bits = 16bits)
34     close all;
35     clear all;
36     disp('Selectionnez maximum 16 images')
37
38 else
39
40
41 % BOUCLE PRINCIPALE - SOMMATION
42 while i <= NbImages
43
44     % Lecture image et incrementation variables 1 a NbImages
45     FichIncr = char(Fich(i));
46     [Chemin, Nom, Ext] = fileparts(fullfile(Rep,FichIncr));
47     I = imread(fullfile(Rep,FichIncr)) ./16;
48
49     % Addition des images lues en boucle
50     SUM = Sum0 + I;
51
52     % Redefinition des valeurs d'entree en boucle
53     Sum0 = SUM;
54     i = i+1;
55
56 end
57
58 SumImg = SUM .*(16/NbImages);
59
60
61 % ENREGISTREMENT DU RESULTAT DE LA SOMMATION
62 Nb = num2str(NbImages);
63 Output = [Chemin '\SUM_' Nb Ext];
64
65     % Ecriture du fichier image resultat avec nombre d'images utilisees

```

Chapitre A. Fonctions MATLAB

```
66     imwrite(SumImg, Output,'ColorSpace','icclab','Compression','none');  
67  
68 end  
69 end
```

A.3 Représentation des résultats MicMac

A.3.1 Principe

Comme indiqué dans le chapitre 4.4, les fichiers résultats à la sortie de MicMac ne sont pas directement exploitables. Cette fonction permet de les traiter et le mettre en forme afin qu'une **analyse visuelle** soit possible. Les trois fichiers traités sont les deux cartes de disparités et la représentation des coefficients de corrélation.

Pour les cartes de disparités, le traitement comporte trois étapes. En premier lieu, le masque de corrélation est appliquée aux images afin d'isoler la zone d'analyse. Ensuite, Il est possible de corriger des translations constantes sur l'ensemble de l'ouvrage afin de simplifier l'analyse des déformations. Pour terminer, une échelle de couleur est générée de manière automatique afin d'afficher toutes les disparités mesurées sur une seule plage.

Pour les coefficients, le traitement commence également par une application du masque, avant d'effectuer une mise à l'échelle sur une place [0 .. 1]. Ceux-ci sont ensuite également représentés par une échelle de couleur automatique.

Ces traitements permettent ensuite la génération d'un **fichier PDF de récapitulation** des résultats. Ce fichier offre un moyen de visualisation simple, synthétisant toutes les informations nécessaires à l'analyse des déformations.

Cette fonction offre également un outil **d'extraction de mesures** pour un secteur d'analyse choisi. Les valeurs moyennes des disparités, du coefficient de corrélation ainsi que leur variances y sont calculées.

A.3.2 Code source

```

1 %% REPRESENTATION DES RESULTATS MICMAC
2
3 %-----
4 % Code etabli pour la representation des resultats issus du logiciel MicMac.
5 %
6 % Les fichier suivants sont necessaires pour cette fonction :
7 %      - Px1      -> Disparites horizontales      -> TIFF flottant
8 %      - Px2      -> Disparites verticales      -> TIFF flottant
9 %      - Correl   -> Coeff de la derniere etape  -> TIFF 8 bits
10 %     - Masq     -> Masque de correlation       -> TIFF 1 bit
11 %
12 % La seconde partie du code permet de mesurer et d'analyser des deplacements par
13 % secteurs.
14 %-----
15 %% LECTURE TIFF FLOTTANT ET DEFINITION DE VARIABLES
16
17 % Nettoyage
18 clear all; close all;
19
20 % Configuration de l'echelle de coloration

```

Chapitre A. Fonctions MATLAB

```
21 CCorrMin =      0.90 ; ColorLevel =    40 ;
22
23 % Chargement des images (issues de MicMac)
24 Px1 =imread('Px1_Num8_DeZoom1_Pont2_02-C099-S13-Z20-P02-R02.tif') ;
25 Px2 =imread('Px2_Num8_DeZoom1_Pont2_02-C099-S13-Z20-P02-R02.tif') ;
26 Correl=         imread('Correl_Pont2_02-C099-S13-Z20-P02-R02_Num_7.tif') ;
27 Masq =         imread('Masq_Pont2_02-C099-S13-Z20-P02-R02_DeZoom1.tif') ;
28
29 % Correction de translation (Mise a zero sur secteur stable)
30 TransX = 0; %mean(mean(imcrop(Px1,[200 200 2000 1400])));
31 TransY = 0; %mean(mean(imcrop(Px2,[200 200 2000 1400])));
32
33 % Application du masque (limite a la zone de correlation)
34 dX = (Px1 - TransX).* Masq;
35 dY = (Px2 - TransY) .* Masq;
36 % Mise a l'echelle du coeff de correlation
37 Corr = (single(Correl).* Masq) / 255;
38
39 %% REPRESENTATION DES RESULTATS
40
41 % Plot des cartes de disparites
42 figure;
43 pl(1) = subplot(311);
44     imagesc(dX,[-0.15 0.15]); % Entre crochets la plage d'affichage
45         axis image; colorbar; title('dH'); axis off;
46 pl(2) = subplot(312);
47     imagesc(dY,[-0.15 0.15]); % Entre crochets la plage d'affichage
48         axis image; colorbar; title('dV'); axis off;
49 pl(3) = subplot(313);
50     imagesc(Corr,[CCorrMin 1]);
51         axis image; colorbar; title('R'); axis off;
52
53 % Impression des resultat en EPS + PDF
54 colormap(jet(ColorLevel)); linkaxes(pl,'xy');
55 saveas(gcf, 'MicMac_RES.eps', 'eps2c');
56 system('epstopdf MicMac_RES.eps');
57
58 %% MESURES ET INTERPRETATION DES RESULTATS
59
60 % Definition d'un secteur d'analyse
61 Crop = [830 900 2400 100];
62
63 % Mesures de deplacement et d'E.M.
64 % Deplacement Horizontaux
65 Px1crop = imcrop(Px1,Crop); % decoupage de l'image
66 dHmoy = mean(mean(Px1crop)); % calcul de la moyenne
67 dHsigma = std(Px1crop(:)); % calcul de l'E.M
68 % Deplacement Verticaux
69 Px2crop = imcrop(Px2,Crop);
70 dVmoy = mean(mean(Px2crop));
71 dVsigma = std(Px2crop(:));
72 % Coefficient de correlation
73 Rcrop = imcrop(Corr,Crop);
74 Rmoy = mean(mean(Rcrop));
75 RSigma = std(Rcrop(:));
```

A.4 Transformation de Helmert

A.4.1 Principe

L'utilisation de cette fonction intervient lorsqu'il est nécessaire de corriger une rotation entre deux prises de vues. En cas de corrélation diachronique, il sera régulièrement nécessaire d'effectuer des corrections afin de compenser une mise en place approximative du capteur.

Pour fonctionner, ce script à besoin d'un secteur supposé stable afin de calculer les paramètres de transformation. Ce calcul se fait en considérant chaque pixel du secteur fixe comme étant un point connu dans les deux systèmes (local et global). Les coordonnées globales (X, Y) correspondent à la position (i,j) du pixel dans la matrice image. Les coordonnées locales (x, y) sont calculées pour chaque point en y ajoutant les mesures de disparités correspondantes (dH_{ij}, dV_{ij}).

$$\begin{aligned}x_i &= X_i + dH_{ij} \\y_j &= Y_j + dV_{ij}\end{aligned}$$

La résolution par les **moindres carrés** démontrée dans [2] permet d'obtenir les quatre paramètres de la transformation de Helmert.

En notation matricielle, l'équation aux erreurs s'écrit :

$$\mathbf{V} = \mathbf{Ax} - \mathbf{L} \quad (\text{A.1})$$

Dans l'équation A.1, on note \mathbf{V} les résidus, \mathbf{A} les coefficients, \mathbf{x} les inconnues et \mathbf{L} les observations. Le développement des matrices donne l'équation suivante :

$$\begin{pmatrix} V_{X_i} \\ V_{Y_i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & x_i & y_i \\ 0 & 1 & y_i & -x_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_O \\ Y_O \\ a \\ b \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \end{pmatrix} \quad (\text{A.2})$$

Les matrices \mathbf{A} et \mathbf{L} sont créées dans la fonction à partir des deux paires de coordonnées locales et globales. Elles permettent la résolution des inconnues par minimisation des résidus selon le principe des moindres carrés. La matrice des poids étant négligée, le modèle mathématique s'écrit :

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{L} \quad (\text{A.3})$$

Les paramètres de transformation sont ensuite extraits de la matrice \mathbf{x} . Le facteur d'échelle

est fixé à 1, et la transformation est appliquée à l'ensemble de l'image en utilisant le même procédé. Un dernier ajustement des translations restantes est ensuite effectué de manière automatique.

Lorsque le traitement est terminé, le script Matlab génère un PDF pour la représentation des disparité après correction. Il permet la visualisation des résultats de manière similaire à la représentation classique présentée en A.3.

A.4.2 Code source

```
1 %% TRANSFORMATION HELMERT POUR CORIGER LES ROTATIONS DE PRISES DE VUE
2
3 %-----
4 % Fonction permettant la correction des disparites en cas de rotation entre les
5 % differentes prises de vue.
6 %
7 % Les fichier suivants sont necessaires pour cette fonction :
8 %     - Px1      -> Disparites horizontales      -> TIFF flottant
9 %     - Px2      -> Disparites verticales      -> TIFF flottant
10 %    - Correl   -> Coeff de la derniere etape   -> TIFF 8 bits
11 %    - Masq     -> Masque de correlation       -> TIFF 1 bit
12 %
13 % Apres calcul des parametres de transformation sur un secteur stable, ceux-ci sont
14 % appliques a l'ensemble de l'image.
15 % Aucun facteur d'echelle n'est pris en compte pour cette transformation
16 %-----
17 %
18 %% LECTURE TIFF FLOTTANT ET DEFINITION DE VARIABLES
19 %
20 % Nettoyage
21 clear all; close all;
22
23 % Configuration de l'echelle de coloration
24 CCorrMin = 0.90 ; ColorLevel = 40 ;
25
26 % Chargement des images (issues de MicMac)
27 Px1 = imread('Px1_Num8_DeZoom1_Pont2_02-C099-S13-Z20-P02-R02.tif') ;
28 Px2 = imread('Px2_Num8_DeZoom1_Pont2_02-C099-S13-Z20-P02-R02.tif') ;
29 Correl= imread('Correl_Pont2_02-C099-S13-Z20-P02-R02_Num_7.tif') ;
30 Masq = imread('Masq_Pont2_02-C099-S13-Z20-P02-R02_DeZoom1.tif') ;
31
32 % Application du masque (limite a la zone de correlation)
33 dX = (Px1 - TransX).* Masq;
34 dY = (Px2 - TransY) .* Masq;
35 % Mise a l'echelle du coeff de correlation
36 Corr = (single(Correl).* Masq) / 255;
37
38 %% HELMERT - CALCUL DES PARAMETRES SUR UN SECTEUR SUPPOSE FIXE
39 %
40 % Definition et decoupage d'un secteur d'analyse
41 Crop = [830 900 2400 100];
42 Px1crop = imcrop(Px1,Crop);
43 Px2crop = imcrop(Px2,Crop);
44 %
45 % Mesure des dimension du secteur
46 [height2,width2] = size(Px1crop);
```

```

46
47    % Creation de coordonnees a partir des matrices Px1 et Px2 (chaque centre de pixel
48    % devient un points du systeme "Global" et le systeme "Local" et obtenu a partir
49    % des composantes dH et dV
50    % Coordonnees Globales
51    X1 = (1:1:width2) ; X2 = repmat(X1,height2,1) ; Xi = X2(:) ;
52    Y1 = (1:1:height2)' ; Y2 = repmat(Y1,1,width2) ; Yi = Y2(:) ;
53
54    % Coordonnees locales
55    xi = Xi + Px1crop(:) ;
56    yi = Yi + Px2crop(:) ;
57
58    % Creation liste de coordonnees "Global" / "Local"
59    %ID = (1:1:width2*height2)';
60    %coord = [ID , Xi , Yi , xi , yi];
61
62    % CREATION DE LA MATRICE [A]
63    i = 0;
64    A = zeros(2*height2*width2,1);
65    for i = 0:2:(2*height2*width2)-2
66        j = i/2;
67        A(i+1,1) = 1; A(i+1,2) = 0; A(i+1,3) = xi(j+1,1); A(i+1,4) = yi(j+1,1);
68        A(i+2,1) = 0; A(i+2,2) = 1; A(i+2,3) = yi(j+1,1); A(i+2,4) = -xi(j+1,1);
69    end
70
71    % CREATION DE LA MATRICE [L]
72    i = 0;
73    L = zeros(2*height2*width2,1);
74    for i = 0:2:(2*height2*width2)-2
75        j= i/2;
76        L(i+1,1) = Xi(j+1,1);
77        L(i+2,1) = Yi(j+1,1);
78    end
79
80    % CALCUL DE LA MATRICE [X] PAR LES MOINDRES CARRES
81    X = inv(A' * A) * A' * L;
82
83    % Calcul de l'angle de rotation
84    Rot = atan(X(4,1)/X(3,1));
85    RotDeg = Rot / pi * 180;
86
87    % Calcul du facteur d'echelle
88    Fact = double((X(3,1)^2 + X(4,1)^2)^0.5);
89
90    % CALCUL DE LA MATRICE [V] DES RESIDUS
91    i = 0;
92    V = A * X - L;
93
94    VxCorr = zeros(2*height2,1);
95    VyCorr = zeros(2*height2,1);
96
97    for i = 0:2:(2*height2*width2)-2
98        j = i/2;
99        VxCorr(j+1,1) = V(i+1,1);
100       VyCorr(j+1,1) = V(i+2,1);
101    end
102
103    %Px1Corr = reshape(VxCorr,height2,width2);
104    %Px2Corr = reshape(VyCorr,height2,width2);

```

Chapitre A. Fonctions MATLAB

```
104
105      % Erreur moyenne des residus de la transformation
106      So = std(V);
107
108 %% HELMERT - APPLICATION DES PARAMETRES A L'ENSEMBLE DES POINTS
109
110      % Preparation des donnees
111      dXcolB = dX(:); dYcolB = dY(:);
112      [height2B, width2B] = size(dX);
113
114      % Coordonnees Globales
115      X1B = (1:1:width2B); X2B = repmat(X1B, height2B, 1); XiB = X2B(:);
116      Y1B = (1:1:height2B)'; Y2B = repmat(Y1B, 1, width2B); YiB = Y2B(:);
117
118      % Coordonnees Locales
119      xiB = XiB + dXcolB;
120      yiB = YiB + dYcolB;
121
122
123      % CALCUL DE LA MATRICE [A] NOUVELLE
124      [height3B, width3B] = size(dXcolB);
125      i = 0;
126      Ab = zeros(2*height3B, 1);
127
128      for i = 0:2:(2*height3B)-2
129          j = i/2;
130          Ab(i+1, 1) = 1; Ab(i+1, 2) = 0; Ab(i+1, 3) = xiB(j+1, 1); Ab(i+1, 4) = yiB(j+1, 1);
131          Ab(i+2, 1) = 0; Ab(i+2, 2) = 1; Ab(i+2, 3) = yiB(j+1, 1); Ab(i+2, 4) = -xiB(j+1, 1);
132      end
133
134      % CALCUL DE LA MATRICE [L] NOUVELLE
135      i = 0;
136      Lb = zeros(2*height3B, 1);
137      for i = 0:2:(2*height3B)-2
138          j = i/2;
139          Lb(i+1, 1) = XiB(j+1, 1);
140          Lb(i+2, 1) = YiB(j+1, 1);
141      end
142
143      % CALCUL DE LA MATRICE [X] NOUVELLE PAR LES MOINDRES CARRES
144      Xb = [X(1); X(2); cos(Rot); sin(Rot)];
145
146      % CALCUL DE LA MATRICE [V] DES RESIDUS NOUVELLE
147      Vb = Ab * Xb - Lb;
148      i = 0;
149
150      VxCorrB = zeros(2*height2B, 1);
151      VyCorrB = zeros(2*height2B, 1);
152      for i = 0:2:(2*height3B)-2
153          j = i/2;
154          VxCorrB(j+1, 1) = Vb(i+1, 1);
155          VyCorrB(j+1, 1) = Vb(i+2, 1);
156      end
157
158      dXdef = reshape(VxCorrB, height2B, width2B) .* Masq;
159      dYdef = reshape(VyCorrB, height2B, width2B) .* Masq;
160
161      % Erreur moyenne des residus de la transformation
```

```

162     SoB = std(Vb);
163
164 %% CORRECTION TRANSLATIONS RESTANTES APRES HELMERT
165
166 % Decoupage du secteur stable utilise pour l'Helmert
167 Px1crop2 = imcrop(dXdef,Crop);
168 Px2crop2 = imcrop(dYdef,Crop);
169
170 dXdef2 = (dXdef - mean(mean(Px1crop2))) .* Masq;
171 dYdef2 = (dYdef - mean(mean(Px2crop2))) .* Masq;
172
173
174 %% REPRESENTATION DES ECARTS APRES TRANSFO HELMERT ET TRANSLATION
175
176 % Plot des cartes de disparites
177 figure;
178 pl(1) = subplot(311);
179     imagesc(dXdef2,[-0.1 0.1]);
180     axis image; colorbar; title('dH');axis off;
181 pl(2) = subplot(312);
182     imagesc(dYdef2,[-0.1 0.1]);
183     axis image; colorbar; title('dV');axis off;
184 pl(3) = subplot(313);
185     imagesc(Corr,[CCorrMin 1]);
186     axis image; colorbar; title('R');axis off;
187
188 % Impression des resultat en EPS + PDF
189 colormap(jet(ColorLevel)); linkaxes(pl,'xy');
190 saveas(gcf, 'MicMac_RES-Helmert.eps', 'eps2c');
191 system('epstopdf MicMac_RES-Helmert.eps');

```

A.5 Rotation d'images

A.5.1 Principe

Ce script a pour objectif de corriger les rotations des images brutes avant le traitement Mic-Mac. Dans le chapitre A.4, les paramètres de transformation ont été calculés et appliqués directement aux mesures de disparités. Cette fonction se contente de récupérer l'angle de rotation calculé et de l'appliquer à l'image «déformée» du deuxième état de mesure.

Le lancement de la fonction permet de choisir une ou plusieurs images à traiter et de saisir l'angle de rotation. Cet angle doit être entré en degrés et une valeur positive correspond à une rotation dans le sens antihoraire.

La fonction de ré-échantillonnage utilise l'interpolation bi-linéaire pour le calcul des nouvelles valeurs des pixels. Les images sont ensuite automatiquement enregistrées au format TIFF dans le répertoire source.

A.5.2 Code source

```
1 %% ROTATION DES IMAGES BRUTES
2
3 %-----
4 % Cette fonction a pour but de faire pivoter les images brutes avant le traitement par
5 % correlation.
6 % Apres avoir selectionne les images a faire pivoter, on saisit l'angle de rotation en
7 % degres (positif = Anti horaire) et les nouvelles images sont crees avec un suffixe -
8 % Rot.
9 %-----
10 clear all;
11 close all;
12
13 %function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
14 [Fich,Rep,FilterIndex] = uigetfile({'*.TIF; *.TIFF; *.tif; *.tiff'},'Image a transformer
15 ','multiselect','on'); % Choisir une image
16 %Boite de dialogue
17 prompt = {'Rotation Anti-horaire [en degres]:'};      dlg_title = 'Saisir angle';
18 num_lines = 1;
19 def = {'-0.2486'};
20 answer = inputdlg(prompt,dlg_title,num_lines,def);
21 Angle = str2num(cell2mat(answer));
22 %Test des conditions
23 [height,width] = size(Fich);
24 TestVal = iscell(Fich);
25 i = 1;
26
27 if TestVal > 0          % Lorsqu'on a plus d'une image a traiter
28     for i = 1:width
29         FichIncr = char(Fich(i));
```

```

30      [Chemin, Nom, Ext] = fileparts(fullfile(Rep,FichIncr));
31      if isequal(FichIncr,0)
32          disp('Aucune image selectionnee')
33      else
34          I = imread(fullfile(Rep,FichIncr)); % LECTURE DE L'IMAGE
35          Output = [Chemin '\ Nom '-Rot'.TIF']; %NOM
36          REPETOIRE
37          Ir = imrotate(I,Angle,'bilinear','crop'); % ROTATION DE L' IMAGE
38          imwrite(Ir , Output , 'ColorSpace','icclab','Compression','none'); % ECRITURE DE L' IMAGE
39      end
40  end % UNE SEULE image a traiter
41 FichIncr = char(Fich);
42 [Chemin, Nom, Ext] = fileparts(fullfile(Rep,FichIncr));
43 if isequal(FichIncr,0)
44     disp('Aucune image selectionnee')
45 else
46     I = imread(fullfile(Rep,FichIncr)); % LECTURE DE L'IMAGE
47     Output = [Chemin '\ Nom '-Rot'.TIF']; %NOM
48     REPETOIRE
49     Ir = imrotate(I,Angle,'bilinear','crop'); % ROTATION DE L' IMAGE
50     imwrite(Ir , Output , 'ColorSpace','icclab','Compression','none'); % ECRITURE DE L' IMAGE
51 end
51 end

```


B Fichiers de paramétrage MicMac

Cette annexe présente quelques modèles de fichiers de configuration MicMac. Il s'agit de jeux de paramètres utilisés dans les calculs précédents, permettant la reproduction et l'analyse des traitements.

Pour plus de simplicité, les paramètres les plus importants du traitement sont regroupés en début de fichier. La balise `<DicLoc>` indique le début de cette définition des paramètres. Le nom du chantier est à chaque fois composé des valeurs numériques des paramètres utilisés. Cela permet d'identifier la provenance ainsi que les réglages des fichiers résultats.

B.1 Déformation de poutre

Ce fichier contient les paramètres de calcul utilisés pour les mesures de déformations sur la poutre. Il a pour particularité de permettre la détection de déformations allant jusqu'à 100 pixels.

Le traitement débute par un `DeZoom de 4` afin de trouver les valeurs approchées des grands déplacements.

La dernière étape de calcul permet la détection des disparités supérieures à 0.1 pixel.

Code source

```
1 <?xml version="1.0" ?>
2 <ParamMICMAC>
3
4 <DicLoc> <!-- Reglage des principaux parametres de correlation -->
5   <Symb> DirMEC=MEC-Resultat-C050-1-S10-Z10-P02-R02 </Symb>
6   <Symb> Chantier=Mousse-C050-1-S10-Z10-P02-R02 </Symb>
7
8   <Symb> CorrelMin=0.5      </Symb>      <!-- Coefficient de correlation MIN
9     -->
  <Symb> GammaCorrel=1      </Symb>      <!-- Influence des zone a forte
```

Chapitre B. Fichiers de paramétrage MicMac

```
correlation -->
10 <Symb> SzW=10      </Symb>      <!-- Taille de la fenetre -->
11
12 <Symb> SzSinCard=10.0    </Symb>      <!-- Finesse de recherche du pic de
13   correlation -->
14 <Symb> SzAppodSinCard=10.0  </Symb>
15
16 <Symb> Px1Regul=0.2 </Symb>      <!-- Terme de regularisation -->
17 <Symb> Px2Regul=0.2 </Symb>
18
19 <Symb> Purge=true </Symb>
20 </DicoLoc>
21
22 <Section_Terrain>
23   <IntervParalaxe>
24     <Px1IncCalc> 2.0 </Px1IncCalc> <!-- Erreur moyenne a craindre sur
25       la parallaxe entre les images -->
26     <Px2IncCalc> 2.0 </Px2IncCalc>
27     <Px1Moy> 0.0 </Px1Moy>      <!-- VOIR CH. 23.1.1.1 -->
28     <Px2Moy> 0.0 </Px2Moy>
29   </IntervParalaxe>
30   <Planimetrie>
31     <MasqueTerrain>
32       <MT_Image> REF_SUM-16_Gray_Masq.tif </MT_Image>
33       <MT_Xml> REF_SUM-16_Gray_Masq.xml </MT_Xml>
34     </MasqueTerrain>
35   </Planimetrie>
36 </Section_Terrain>
37
38 <!-- Parametres lies a la prise de vue, independamment de son exploitation
39   par le correleur -->
40 <Section_PriseDeVue>
41   <GeomImages> eGeomImage_Hom_Px </GeomImages> <!-- VOIR CH. 22.2.2 -->
42   <Images>
43     <Im1> REF_SUM-16_Gray.tif </Im1>
44     <Im2> DEF_SUM-16_Gray.tif </Im2>
45   </Images>
46   <NomsGeometrieImage>
47     <PatternSel> .* </PatternSel> <!-- VOIR CH. 22.3.1 -->
48     <PatNameGeom> GridDistId </PatNameGeom>
49   </NomsGeometrieImage>
50   <FCND_CalcHomFromIII2> NKS-Assoc-CplIm2Hom@-Man@xml </
51     FCND_CalcHomFromIII2>
52 </Section_PriseDeVue>
53
54 <Section_MEC>
55   <EtapeMEC>
56     <DeZoom> -1 </DeZoom> <!-- le seul fils obligatoire a toutes
57       les etapes-->
```

```

56      ${SzW}    </SzW>  <!-- taille de la fenetre de
57      correlation 10 = 21x21 // 20 = 41x41 -->
58      <AlgoRegul>    eAlgo2PrgDyn    </AlgoRegul>
59
60      <CorrelMin>  ${CorrelMin} </CorrelMin>
61      <GammaCorrel> ${GammaCorrel} </GammaCorrel>
62      <DynamiqueCorrel> eCoeffGamma </DynamiqueCorrel> <!-- Pour activer la
63          prise en compte de GammaCorrel -->
64
65      <!--Ces valeurs correspondent aux termes de regularisation -
66          permettent de ponderer l'attache aux donnees par rapport a l'a
67          priori de regularite (plus ils sont forts, plus on impose un
68          resultat regulier). Si le champ recherche est considere tres
69          regulier (fonction basse frequence, faible amplitude) -->
70      <Px1Regul>  ${Px1Regul}    </Px1Regul> <!-- Voir CH. 11.2.2.2 -->
71      <Px2Regul>  ${Px2Regul}    </Px2Regul>
72      <Px1Pas>    1    </Px1Pas>
73      <Px2Pas>    1    </Px2Pas>
74
75      <!--parametre de dilatation des nappes en profondeur; les parametres
76          de dilatation fixent l intervalle qui doit etre explore a partir de
77          la prediction de l etape precedente param sensible pour le
78          comportement de l'algorithme car il conditionne les parties de l'
79          espace de la scene exploree ou non a la resolution suivante -->
80      <Px1DilatAlti> 2    </Px1DilatAlti>
81      <Px1DilatPlani> 2    </Px1DilatPlani>
82      <Px2DilatAlti> 2    </Px2DilatAlti>
83      <Px2DilatPlani> 2    </Px2DilatPlani>
84
85      <ModulationProgDyn Portee="Globale">    <!-- obligatoire si le mode
86          algorithmique choisi est eAlgo2PrgDyn -->
87      <EtapeProgDyn>
88          <ModeAgreg> ePrgDAgrSomme    </ModeAgreg>
89          <NbDir>    4        </NbDir>
90      </EtapeProgDyn>
91          <!--
92          <Px1PenteMax > 0.01 </Px1PenteMax>
93          <Px2PenteMax > 0.01 </Px2PenteMax> -->
94      </ModulationProgDyn>
95
96      <!--
97      <ModeInterpolation> eInterpolMPD </ModeInterpolation> -->
98      <ModeInterpolation>    eInterpolSinCard </ModeInterpolation> <!--
99          voir CH. 24.4.2 -->
100     <SzSinCard>    ${SzSinCard}    </SzSinCard>
101     <SzAppodSinCard> ${SzAppodSinCard} </SzAppodSinCard> <!-- Voir CH.
102         11.3.4.1 -->
103     <GenImagesCorrel> true    </GenImagesCorrel> <!--false par defaut,
104         sauf pour derniere etape-->
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
679
680
681
682
683
684
685
686
687
687
688
689
689
690
691
692
693
694
695
696
697
697
698
699
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
709
710
711
712
713
714
715
716
717
717
718
719
719
720
721
722
723
724
725
726
727
727
728
729
729
730
731
732
733
734
735
736
737
737
738
739
739
740
741
742
743
744
745
746
746
747
748
748
749
749
750
751
752
753
754
755
756
756
757
758
758
759
759
760
761
762
763
764
765
766
766
767
768
768
769
769
770
771
772
773
774
775
776
776
777
778
778
779
779
780
781
782
783
784
785
786
786
787
788
788
789
789
790
791
792
793
794
795
796
796
797
797
798
798
799
799
800
801
802
803
804
805
806
806
807
808
808
809
809
810
811
812
813
814
815
815
816
816
817
817
818
818
819
819
820
821
822
823
824
825
825
826
826
827
827
828
828
829
829
830
831
832
833
834
835
835
836
836
837
837
838
838
839
839
840
841
842
843
844
845
845
846
846
847
847
848
848
849
849
850
851
852
853
854
855
855
856
856
857
857
858
858
859
859
860
861
862
863
864
865
865
866
866
867
867
868
868
869
869
870
871
872
873
874
875
875
876
876
877
877
878
878
879
879
880
881
882
883
884
885
885
886
886
887
887
888
888
889
889
890
891
892
893
893
894
894
895
895
896
896
897
897
898
898
899
899
900
901
902
903
903
904
904
905
905
906
906
907
907
908
908
909
909
910
911
912
913
913
914
914
915
915
916
916
917
917
918
918
919
919
920
920
921
921
922
922
923
923
924
924
925
925
926
926
927
927
928
928
929
929
930
930
931
931
932
932
933
933
934
934
935
935
936
936
937
937
938
938
939
939
940
940
941
941
942
942
943
943
944
944
945
945
946
946
947
947
948
948
949
949
950
950
951
951
952
952
953
953
954
954
955
955
956
956
957
957
958
958
959
959
960
960
961
961
962
962
963
963
964
964
965
965
966
966
967
967
968
968
969
969
970
970
971
971
972
972
973
973
974
974
975
975
976
976
977
977
978
978
979
979
980
980
981
981
982
982
983
983
984
984
985
985
986
986
987
987
988
988
989
989
990
990
991
991
992
992
993
993
994
994
995
995
996
996
997
997
998
998
999
999
1000
1000
1001
1001
1002
1002
1003
1003
1004
1004
1005
1005
1006
1006
1007
1007
1008
1008
1009
1009
1010
1010
1011
1011
1012
1012
1013
1013
1014
1014
1015
1015
1016
1016
1017
1017
1018
1018
1019
1019
1020
1020
1021
1021
1022
1022
1023
1023
1024
1024
1025
1025
1026
1026
1027
1027
1028
1028
1029
1029
1030
1030
1031
1031
1032
1032
1033
1033
1034
1034
1035
1035
1036
1036
1037
1037
1038
1038
1039
1039
1040
1040
1041
1041
1042
1042
1043
1043
1044
1044
1045
1045
1046
1046
1047
1047
1048
1048
1049
1049
1050
1050
1051
1051
1052
1052
1053
1053
1054
1054
1055
1055
1056
1056
1057
1057
1058
1058
1059
1059
1060
1060
1061
1061
1062
1062
1063
1063
1064
1064
1065
1065
1066
1066
1067
1067
1068
1068
1069
1069
1070
1070
1071
1071
1072
1072
1073
1073
1074
1074
1075
1075
1076
1076
1077
1077
1078
1078
1079
1079
1080
1080
1081
1081
1082
1082
1083
1083
1084
1084
1085
1085
1086
1086
1087
1087
1088
1088
1089
1089
1090
1090
1091
1091
1092
1092
1093
1093
1094
1094
1095
1095
1096
1096
1097
1097
1098
1098
1099
1099
1100
1100
1101
1101
1102
1102
1103
1103
1104
1104
1105
1105
1106
1106
1107
1107
1108
1108
1109
1109
1110
1110
1111
1111
1112
1112
1113
1113
1114
1114
1115
1115
1116
1116
1117
1117
1118
1118
1119
1119
1120
1120
1121
1121
1122
1122
1123
1123
1124
1124
1125
1125
1126
1126
1127
1127
1128
1128
1129
1129
1130
1130
1131
1131
1132
1132
1133
1133
1134
1134
1135
1135
1136
1136
1137
1137
1138
1138
1139
1139
1140
1140
1141
1141
1142
1142
1143
1143
1144
1144
1145
1145
1146
1146
1147
1147
1148
1148
1149
1149
1150
1150
1151
1151
1152
1152
1153
1153
1154
1154
1155
1155
1156
1156
1157
1157
1158
1158
1159
1159
1160
1160
1161
1161
1162
1162
1163
1163
1164
1164
1165
1165
1166
1166
1167
1167
1168
1168
1169
1169
1170
1170
1171
1171
1172
1172
1173
1173
1174
1174
1175
1175
1176
1176
1177
1177
1178
1178
1179
1179
1180
1180
1181
1181
1182
1182
1183
1183
1184
1184
1185
1185
1186
1186
1187
1187
1188
1188
1189
1189
1190
1190
1191
1191
1192
1192
1193
1193
1194
1194
1195
1195
1196
1196
1197
1197
1198
1198
1199
1199
1200
1200
1201
1201
1202
1202
1203
1203
1204
1204
1205
1205
1206
1206
1207
1207
1208
1208
1209
1209
1210
1210
1211
1211
1212
1212
1213
1213
1214
1214
1215
1215
1216
1216
1217
1217
1218
1218
1219
1219
1220
1220
1221
1221
1222
1222
1223
1223
1224
1224
1225
1225
1226
1226
1227
1227
1228
1228
1229
1229
1230
1230
1231
1231
1232
1232
1233
1233
1234
1234
1235
1235
1236
1236
1237
1237
1238
1238
1239
1239
1240
1240
1241
1241
1242
1242
1243
1243
1244
1244
1245
1245
1246
1246
1247
1247
1248
1248
1249
1249
1250
1250
1251
1251
1252
1252
1253
1253
1254
1254
1255
1255
1256
1256
1257
1257
1258
1258
1259
1259
1260
1260
1261
1261
1262
1262
1263
1263
1264
1264
1265
1265
1266
1266
1267
1267
1268
1268
1269
1269
1270
1270
1271
1271
1272
1272
1273
1273
1274
1274
1275
1275
1276
1276
1277
1277
1278
1278
1279
1279
1280
1280
1281
1281
1282
1282
1283
1283
1284
1284
1285
1285
1286
1286
1287
1287
1288
1288
1289
1289
1290
1290
1291
1291
1292
1292
1293
1293
1294
1294
1295
1295
1296
1296
1297
1297
1298
1298
1299
1299
1300
1300
1301
1301
1302
1302
1303
1303
1304
1304
1305
1305
1306
1306
1307
1307
1308
1308
1309
1309
1310
1310
1311
1311
1312
1312
1313
1313
1314
1314
1315
1315
1316
1316
1317
1317
1318
1318
1319
1319
1320
1320
1321
1321
1322
1322
1323
1323
1324
1324
1325
1325
1326
1326
1327
1327
1328
1328
1329
1329
1330
1330
1331
1331
1332
1332
1333
1333
1334
1334
1335
1335
1336
1336
1337
1337
1338
1338
1339
1339
1340
1340
1341
1341
1342
1342
1343
1343
1344
1344
1345
1345
1346
1346
1347
1347
1348
1348
1349
1349
1350
1350
1351
1351
1352
1352
1353
1353
1354
1354
1355
1355
1356
1356
1357
1357
1358
1358
1359
1359
1360
1360
1361
1361
1362
1362
1363
1363
1364
1364
1365
1365
1366
1366
1367
1367
1368
1368
1369
1369
1370
1370
1371
1371
1372
1372
1373
1373
1374
1374
1375
1375
1376
1376
1377
1377
1378
1378
1379
1379
1380
1380
1381
1381
1382
1382
1383
1383
1384
1384
1385
1385
1386
1386
1387
1387
1388
1388
1389
1389
1390
1390
1391
1391
1392
1392
1393
1393
1394
1394
1395
1395
1396
1396
1397
1397
1398
1398
1399
1399
1400
1400
1401
1401
1402
1402
1403
1403
1404
1404
1405
1405
1406
1406
1407
1407
1408
1408
1409
1409
1410
1410
1411
1411
1412
1412
1413
1413
1414
1414
1415
1415
1416
1416
1417
1417
1418
1418
1419
1419
1420
1420
1421
1421
1422
1422
1423
1423
1424
1424
1425
1425
1426
1426
1427
1427
1428
1428
1429
1429
1430
1430
1431
1431
1432
1432
1433
1433
1434
1434
1435
1435
1436
1436
1437
1437
1438
1438
1439
1439
1440
1440
1441
1441
1442
1442
1443
1443
1444
1444
1445
1445
1446
1446
1447
1447
1448
1448
1449
1449
1450
1450
1451
1451
1452
1452
1453
1453
1454
1454
1455
1455
1456
1456
1457
1457
1458
1458
1459
1459
1460
1460
1461
1461
1462
1462
1463
1463
1464
1464
1465
1465
1466
1466
1467
1467
1468
1468
1469
1469
1470
1470
1471
1471
1472
1472
1473
1473
1474
1474
1475
1475
1476
1476
1477
1477
1478
1478
1479
1479
1480
1480
1481
1481
1482
1482
1483
1483
1484
1484
1485
1485
1486
1486
1487
1487
1488
1488
1489
1489
1490
1490
1491
1491
1492
1492
1493
1493
1494
1494
1495
1495
1496
1496
1497
1497
1498
1498
1499
1499
1500
1500
1501
1501
1502
1502
1503
1503
1504
1504
1505
1505
1506
1506
1507
1507
1508
1508
1509
1509
1510
1510
1511
1511
1512
1512
1513
1513
1514
1514
1515
1515
1516
1516
1517
1517
1518
1518
1519
1519
1520
1520
1521
1521
1522
1522
1523
1523
1524
1524
1525
1525
1526
1526
1527
1527
1528
1528
1529
1529
1530
1530
1531
1531
1532
1532
1533
1533
1534
1534
1535
1535
1536
1536
1537
1537
1538
1538
1539
1539
1540
1540
1541
1541
1542
1542
1543
1543
1544
1544
1545
1545
1546
1546
1547
1547
1548
1548
1549
1549
1550
1550
1551
1551
1552
1552
1553
1553
1554
1554
1555
1555
1556
1556
1557
1557
1558
1558
1559
1559
1560
1560
1561
1561
1562
1562
1563
1563
1564
1564
1565
1565
1566
1566
1567
1567
1568
1568
1569
1569
1570
1570
1571
1571
1572
15
```

Chapitre B. Fichiers de paramétrage MicMac

```
94      <!--l'optimisation se fait sur des images dalles qui agrege la
95      correlation sur des carres de 5x5 pixels. Il est utile pour gagner
96      du temps et de la robustesse si on sait que le champs a calculer
97      est tres regulier. Ce n'est pas obligatoire a le changer a chq
98      DeZoom; ca peut etre utile d'avoir des regroupement de plus en plus
99      important quand les images sont de plus en plus resolues -->
100     <SsResolOptim>      8    </SsResolOptim>
101
102
103     <!-- GENERATION DES IMAGES 8BITS -->
104     <!--
105     <Gen8Bits_Px1>      true      </Gen8Bits_Px1>
106     <Gen8Bits_Px2>      true      </Gen8Bits_Px2>
107     -->
108   </EtapeMEC>
109
110   <EtapeMEC>
111     <DeZoom>      4    </DeZoom> <!-- Param OK pour des deplacement
112     superieurs a 64 px. Limite a definir...-->
113     <Px1DilatAlti>  16  </Px1DilatAlti>
114     <Px1DilatPlani> 16  </Px1DilatPlani>
115     <Px2DilatAlti>  16  </Px2DilatAlti>
116     <Px2DilatPlani> 16  </Px2DilatPlani>
117     <Px1Pas>        2   </Px1Pas>
118     <Px2Pas>        2   </Px2Pas>
119   </EtapeMEC>
120
121   <EtapeMEC>
122     <DeZoom>      2    </DeZoom> <!-- Param OK pour des deplacement jusqu'a
123     64 px -->
124     <Px1DilatAlti> 16  </Px1DilatAlti>
125     <Px1DilatPlani> 16  </Px1DilatPlani>
126     <Px2DilatAlti> 16  </Px2DilatAlti>
127     <Px2DilatPlani> 16  </Px2DilatPlani>
128     <Px1Pas>        1   </Px1Pas>
129     <Px2Pas>        1   </Px2Pas>
130   </EtapeMEC>
131
132   <EtapeMEC>
133     <DeZoom>      1    </DeZoom>
134     <ModeInterpolation> eInterpolBiLin </ModeInterpolation>
135     <Px1DilatAlti> 1    </Px1DilatAlti>
136     <Px1DilatPlani> 1    </Px1DilatPlani>
137     <Px2DilatAlti> 1    </Px2DilatAlti>
138     <Px2DilatPlani> 1    </Px2DilatPlani>
139     <Px1Pas>        1   </Px1Pas>
140     <Px2Pas>        1   </Px2Pas>
141   </EtapeMEC>
142
143   <EtapeMEC>
144     <DeZoom>      1    </DeZoom>
145     <ModeInterpolation> eInterpolBiLin </ModeInterpolation>
146     <Px1DilatAlti> 1    </Px1DilatAlti>
```

```

139      <Px1DilatPlani> 1      </Px1DilatPlani>
140      <Px2DilatAlti> 1      </Px2DilatAlti>
141      <Px2DilatPlani> 1      </Px2DilatPlani>
142      <Px1Pas>    0.5      </Px1Pas>
143      <Px2Pas>    0.5      </Px2Pas>
144  </EtapeMEC>
145
146  <EtapeMEC>
147      <DeZoom>    1      </DeZoom>
148      <ModeInterpolation> eInterpolBiLin </ModeInterpolation>
149      <Px1DilatAlti> 1      </Px1DilatAlti>
150      <Px1DilatPlani> 1      </Px1DilatPlani>
151      <Px2DilatAlti> 1      </Px2DilatAlti>
152      <Px2DilatPlani> 1      </Px2DilatPlani>
153      <Px1Pas>    0.2      </Px1Pas>
154      <Px2Pas>    0.2      </Px2Pas>
155  </EtapeMEC>
156
157  <EtapeMEC>
158      <DeZoom>    1      </DeZoom>    <!-- VOIR CH. 5.3.2 -->
159      <AlgoRegul>   eAlgoDequant </AlgoRegul>    <!--algo de
160          dequantification; 'reparation' des artefacts de quantification -->
161      <Px1Pas>    1.0      </Px1Pas>
162      <Px2Pas>    1.0      </Px2Pas>    <!--oblige de mettre 1 si
163          eAlgoDequant, car la notion de pas n'est pas pertinente pour un
164          resultats en point flottant-->
165  </EtapeMEC>
166
167  <Section_MEC>
168
169  <Section_Results>
170      <GeomMNT>     eGeomPxBiDim    </GeomMNT>
171  </Section_Results>
172
173  <Section_WorkSpace>
174      <WorkDir>    ThisDir </WorkDir>
175      <TmpPyr>      Pyram/ </TmpPyr>
176      <TmpMEC>      ${DirMEC}/ </TmpMEC>
177      <TmpResult>   ${DirMEC}/ </TmpResult>
178      <ByProcess>   16 </ByProcess>
179      <NomChantier> ${Chantier} </NomChantier>
180      <PurgeMECResultBefore> ${Purge} </PurgeMECResultBefore>
181  </Section_WorkSpace>
182
183  <Section_Vrac>
184  </Section_Vrac>
185
186
187  </ParamMICMAC>

```

B.2 Tour Landi

Il s'agit là des réglages utilisés pour le premier essai de corrélation diachronique sur la tour Landi (cf. chap. 6.4 et fig. 6.9). Ils comportent une fenêtre petite et un terme de régularisation très faible afin de bien identifier le phénomène de rotation sur les images.

Le traitement recherche cette fois une précision de mesure de disparités allant jusqu'au centième de pixel.

Code source

```
1 <?xml version="1.0" ?>
2 <ParamMICMAC>
3
4 <DicoLoc> <!-- Reglage des principaux parametres de correlation -->
5   <Symb> DirMEC=MEC-Resultat-C097-S01-Z20-P02-R001 </Symb>
6   <Symb> Chantier=Landi2_Dia-C097-S01-Z20-P02-R001 </Symb>
7
8   <Symb> CorrelMin=0.97    </Symb>      <!-- Coefficient decorrelation MIN
9     -->
10  <Symb> GammaCorrel=1     </Symb>      <!-- Influence des zone a forte
11    correlation -->
12
13  <Symb> SzW=1           </Symb> <!-- Taille de la fenetre -->
14
15  <Symb> SzSinCard=20.0   </Symb> <!-- Finesse de recherche du pic de
16    correlation -->
17  <Symb> SzAppodSinCard=20.0 </Symb>
18
19  <Symb> Px1Regul=0.01    </Symb> <!-- Terme de regularisation -->
20  <Symb> Px2Regul=0.01    </Symb>
21
22 </DicoLoc>
23
24 <Section_Terrain>
25   <IntervParalaxe>
26     <Px1IncCalc> 2.0 </Px1IncCalc> <!-- Erreur moyenne a craindre
27       sur la parallaxe entre les images -->
28     <Px2IncCalc> 2.0 </Px2IncCalc>
29     <Px1Moy > 0.0 </Px1Moy> <!-- VOIR CH. 23.1.1.1 -->
30     <Px2Moy > 0.0 </Px2Moy>
31   </IntervParalaxe>
32   <Planimetrie>
33     <MasqueTerrain>
34       <MT_Image> Lan02-04_SUM-16_8Bits_Masq.tif </MT_Image>
35       <MT_Xml> Lan02-04_SUM-16_8Bits_Masq.xml </MT_Xml>
36     </MasqueTerrain>
37   </Planimetrie>
```

```

36      </Section_Terrain>
37
38
39  <!-- **** Parametres lies a la prise de vue, independamment de son exploitation par le
40  Parametres lies a la prise de vue, independamment de son exploitation par le
41  correleur -->
42      <Section_PriseDeVue>
43          <GeomImages> eGeomImage_Hom_Px </GeomImages> <!-- VOIR CH. 22.2.2 -->
44          <Images>
45              <Im1> Lan02-04_SUM-16.tif </Im1>
46              <Im2> Lan01-01-D_SUM-16.tif </Im2>
47          </Images>
48
49          <NomsGeometrieImage>
50              <PatternSel> .* </PatternSel> <!-- VOIR CH. 22.3.1 -->
51              <PatNameGeom> GridDistId </PatNameGeom>
52          </NomsGeometrieImage>
53          <FCND_CalcHomFromIII2> NKS-Assoc-CplIm2Hom@-Man@xml </
54              <FCND_CalcHomFromIII2>
55      </Section_PriseDeVue>
56
57  <Section_MEC>
58      <EtapeMEC>
59          <DeZoom > -1 </DeZoom> <!-- le seul fils obligatoire a toutes
60          les etapes-->
61          <SzW> ${SzW} </SzW> <!-- taille de la fenetre de
62          correlation 10 = 21x21 // 20 = 41x41 -->
63          <AlgoRegul> eAlgo2PrgDyn </AlgoRegul>
64
65          <CorrelMin> ${CorrelMin} </CorrelMin>
66              <GammaCorrel> ${GammaCorrel} </GammaCorrel>
67              <DynamiqueCorrel> eCoeffGamma </DynamiqueCorrel> <!-- Pour
68                  activer la prise en compte de GammaCorrel -->
69
70          <!--Ces valeurs correspondent aux termes de regularisation -
71          permettent de ponderer l'attache aux donnees par rapport a l'a
72          priori de regularite (plus ils sont forts, plus on impose un
73          resultat regulier). Si le champ recherche est considere tres
74          regulier (fonction basse frequence, faible amplitude) -->
75          <Px1Regul> ${Px1Regul} </Px1Regul> <!-- Voir CH. 11.2.2.2 -->
76          <Px2Regul> ${Px2Regul} </Px2Regul>
77          <Px1Pas> 1 </Px1Pas>
78          <Px2Pas> 1 </Px2Pas>
79
80          <!--parametre de dilatation des nappes en profondeur; les parametres
81          de dilatation fixent l intervalle qui doit etre explore a partir de
82          la prediction de l etape precedente param sensible pour le
83          comportement de l'algorithmie car il conditionne les parties de l'

```

Chapitre B. Fichiers de paramétrage MicMac

```
        espace de la scene exploree ou non a la resolution suivante -->
76    <Px1DilatAlti> 2      </Px1DilatAlti>
77    <Px1DilatPlani> 2     </Px1DilatPlani>
78    <Px2DilatAlti> 2     </Px2DilatAlti>
79    <Px2DilatPlani> 2    </Px2DilatPlani>
80
81    <ModulationProgDyn Portee="Globale">    <!-- obligatoire si le mode
82        algorithme choisi est eAlgo2PrgDyn-->
83        <EtapeProgDyn>
84            <ModeAgreg>          ePrgDAgrSomme   </ModeAgreg>
85            <NbDir>           4             </NbDir>
86        </EtapeProgDyn>
87        <!--
88            <Px1PenteMax > 0.01 </Px1PenteMax>
89            <Px2PenteMax > 0.01 </Px2PenteMax> -->
90    </ModulationProgDyn>
91
92    <!--
93    <ModeInterpolation> eInterpolMPD </ModeInterpolation> -->
94    <ModeInterpolation>      eInterpolSinCard </ModeInterpolation> <!--
95        voir CH. 24.4.2 -->
96    <SzSinCard>      ${SzSinCard}      </SzSinCard>
97    <SzAppodSinCard>${SzAppodSinCard}</SzAppodSinCard> <!-- Voir CH.
98        11.3.4.1 -->
99    <GenImagesCorrel>  true       </GenImagesCorrel> <!--false par defaut,
100        sauf pour derniere etape-->
101
102    <!--l'optimisation se fait sur des images dalles qui agrege la
103        correlation sur des carres de 5x5 pixels. Il est utile pour gagner
104        du temps et de la robustesse si on sait que le champs a calculer
105        est tres regulier. Ce n'est pas obligatoire a le changer a chq
106        DeZoom; ca peut etre utile d'avoir des regroupement de plus en plus
107        important quand les images sont de plus en plus resolues -->
108    <SsResolOptim>     8      </SsResolOptim>
109
110    <!-- GENERATION DES IMAGES 8BITS -->
111    <!--
112        <Gen8Bits_Px1>      true      </Gen8Bits_Px1>
113        <Gen8Bits_Px2>      true      </Gen8Bits_Px2>
114    -->
115    </EtapeMEC>
116
117    <EtapeMEC>
118        <DeZoom>      2      </DeZoom>
119        <Px1DilatAlti> 4      </Px1DilatAlti>
120        <Px1DilatPlani> 4     </Px1DilatPlani>
121        <Px2DilatAlti> 4     </Px2DilatAlti>
122        <Px2DilatPlani> 4    </Px2DilatPlani>
123        <Px1Pas>       1      </Px1Pas>
124        <Px2Pas>       1      </Px2Pas>
125    </EtapeMEC>
126
127
```

```

118 <EtapeMEC>
119     <DeZoom>    1   </DeZoom>
120         <ModeInterpolation> eInterpolBiLin </ModeInterpolation>
121         <Px1DilatAlti> 2   </Px1DilatAlti>
122         <Px1DilatPlani> 2   </Px1DilatPlani>
123         <Px2DilatAlti> 2   </Px2DilatAlti>
124         <Px2DilatPlani> 2   </Px2DilatPlani>
125         <Px1Pas>    0.8   </Px1Pas>
126         <Px2Pas>    0.8   </Px2Pas>
127     </EtapeMEC>
128
129 <EtapeMEC>
130     <DeZoom>    1   </DeZoom>
131         <ModeInterpolation> eInterpolBiLin </ModeInterpolation>
132         <Px1DilatAlti> 1   </Px1DilatAlti>
133         <Px1DilatPlani> 2   </Px1DilatPlani>
134         <Px2DilatAlti> 1   </Px2DilatAlti>
135         <Px2DilatPlani> 2   </Px2DilatPlani>
136         <Px1Pas>    0.4   </Px1Pas>
137         <Px2Pas>    0.4   </Px2Pas>
138     </EtapeMEC>
139
140 <EtapeMEC>
141     <DeZoom>    1   </DeZoom>
142         <ModeInterpolation> eInterpolBiLin </ModeInterpolation>
143         <Px1DilatAlti> 1   </Px1DilatAlti>
144         <Px1DilatPlani> 2   </Px1DilatPlani>
145         <Px2DilatAlti> 1   </Px2DilatAlti>
146         <Px2DilatPlani> 2   </Px2DilatPlani>
147         <Px1Pas>    0.2   </Px1Pas>
148         <Px2Pas>    0.2   </Px2Pas>
149     </EtapeMEC>
150
151 <EtapeMEC>
152     <DeZoom>    1   </DeZoom>
153         <ModeInterpolation> eInterpolBiLin </ModeInterpolation>
154         <Px1DilatAlti> 1   </Px1DilatAlti>
155         <Px1DilatPlani> 2   </Px1DilatPlani>
156         <Px2DilatAlti> 1   </Px2DilatAlti>
157         <Px2DilatPlani> 2   </Px2DilatPlani>
158         <Px1Pas>    0.1   </Px1Pas>
159         <Px2Pas>    0.1   </Px2Pas>
160     </EtapeMEC>
161
162 <EtapeMEC>
163     <DeZoom>    1   </DeZoom>
164         <ModeInterpolation> eInterpolBiLin </ModeInterpolation>
165         <Px1DilatAlti> 1   </Px1DilatAlti>
166         <Px1DilatPlani> 2   </Px1DilatPlani>
167         <Px2DilatAlti> 1   </Px2DilatAlti>
168         <Px2DilatPlani> 2   </Px2DilatPlani>
169         <Px1Pas>    0.05  </Px1Pas>

```

Chapitre B. Fichiers de paramétrage MicMac

```
170      <Px2Pas>    0.05    </Px2Pas>
171  </EtapeMEC>
172
173  <EtapeMEC>
174      <DeZoom>    1    </DeZoom>
175      <ModeInterpolation> eInterpolBiLin </ModeInterpolation>
176      <Px1DilatAlti> 1    </Px1DilatAlti>
177      <Px1DilatPlani> 2    </Px1DilatPlani>
178      <Px2DilatAlti> 1    </Px2DilatAlti>
179      <Px2DilatPlani> 2    </Px2DilatPlani>
180      <Px1Pas>    0.02    </Px1Pas>
181      <Px2Pas>    0.02    </Px2Pas>
182  </EtapeMEC>
183
184  <EtapeMEC>
185      <DeZoom >   1    </DeZoom>  <!-- VOIR CH. 5.3.2 -->
186      <AlgoRegul>  eAlgoDequant  </AlgoRegul>  <!--algo de
187          dequantification; 'reparation' des artefacts de quantification -->
188
189      <Px1Pas>    1.0    </Px1Pas>
190      <Px2Pas>    1.0    </Px2Pas>  <!--oblige de mettre 1 si
191          eAlgoDequant, car la notion de pas n'est pas pertinente pour un
192          resultats en point flottant-->
193  </EtapeMEC>
194
195 </Section_MEc>
196
197 <Section_Results >
198     <GeomMNT>      eGeomPxBiDim    </GeomMNT>
199 </Section_Results>
200
201 <Section_WorkSpace >
202     <WorkDir >  ThisDir </WorkDir>
203     <TmpPyr>        Pyram/  </TmpPyr>
204     <TmpMEC>        ${DirMEC}/  </TmpMEC>
205     <TmpResult>    ${DirMEC}/  </TmpResult>
206     <ByProcess>    64  </ByProcess>
207     <NomChantier> ${Chantier} </NomChantier>
208     <PurgeMECResultBefore> ${Purge} </PurgeMECResultBefore>
209
210 </Section_WorkSpace>
211
212 <Section_Vrac>
213 </Section_Vrac>
214
215 </ParamMICMAC>
```

B.3 Pont autoroutier

Les fichier de paramétrage MicMac est fourni dans l'annexe D.5 à la suite des détails de calcul.

Il est configuré pour ne conserver que les coefficients supérieurs a 0.98 avec une recherche très fine du pic de corrélation.

La précision recherchée est à nouveau le centième de pixel.

C Analyse de configurations MicMac

Ce chapitre a pour objectif d'évaluer l'influence des paramètres de calcul sur les résultats d'un traitement par corrélation d'images. Pour cela, un jeu de données unique est traité en faisant varier individuellement chaque paramètre de calcul.

Les traitements sont réalisés sur des images issues d'essais en laboratoire sur deux blocs de béton. Le premier bloc est supposé fixe et le second subit une translation d'axe horizontal entre les images. On cherche à mesurer par corrélation d'images le déplacement horizontal relatif entre les deux blocs.

L'analyse se fait en premier lieu sur la base des représentations graphiques des disparités et des résultats de corrélation obtenus. Les déplacements relatifs sont également comparés afin de quantifier en pixels l'influence exacte de ces configurations.

C.1 Terme de régularisation

Comme mentionné en 4.3.1, ce terme indique le niveau de régularité des disparités recherchées. Le mouvement étant ici relativement homogène, on considère 0.5 comme étant une bonne valeur de départ.

Pour ce test, ce paramètre a été défini entre **0.01** et **4** pour analyser son influence sur les résultats. Dans le tableau C.1, le déplacement relatif, la variance ainsi que les paramètres de calcul sont indiqués.

Les déplacements mesurés varient de 0.006 pixel au maximum entre la valeur haute et la valeur basse. Ce paramètre influence donc très peu la valeur moyenne des disparités lorsque les déplacements sont homogènes. En revanche, la variance des mesures diminue considérablement lorsqu'on augmente l'a priori de régularité des données.

Le comportement des deux indicateurs observés est conforme aux attentes liées à ce type de données à traiter. En cas de mouvements non homogènes, un traitement avec un terme

Chapitre C. Analyse de configurations MicMac

de régularisation élevé aurait pour conséquence de filtrer les courtes longueur d'onde. Cela se traduirai par une augmentation des variances et générerais des artefacts de corrélation, visibles sur les cartes de disparités.

Cmin	Gamma	Regul	Subset [px]	dH [px]	Variance [px]
97	1	0.01	41	0.0723	0.0200
97	1	0.05	41	0.0742	0.0150
97	1	0.2	41	0.0745	0.0085
97	1	0.5	41	0.0763	0.0072
97	1	1	41	0.0739	0.0055
97	1	2	41	0.0716	0.0050
97	1	4	41	0.0772	0.0045

TABLEAU C.1 – Influence du terme de régularisation

Sur le graphique C.1, on peut observer que la courbe des variances tend rapidement vers des valeurs inférieures au centième de pixel. Les cartes de disparités de la figure C.2 mettent également en évidence ce comportement. Le bruit dans les mesures peut en effet être observé sur les deux premières figures et se réduit au fil des traitements.

La figure C.2f montre quelques effets de bord d'un terme de régularisation trop élevé, où les angles des cubes commencent à fournir des valeurs aberrantes. Comme seules les parties centrales des cubes sont analysées dans ces traitements, cela n'influence pas les mesures de déplacements relatifs ni leur variances.

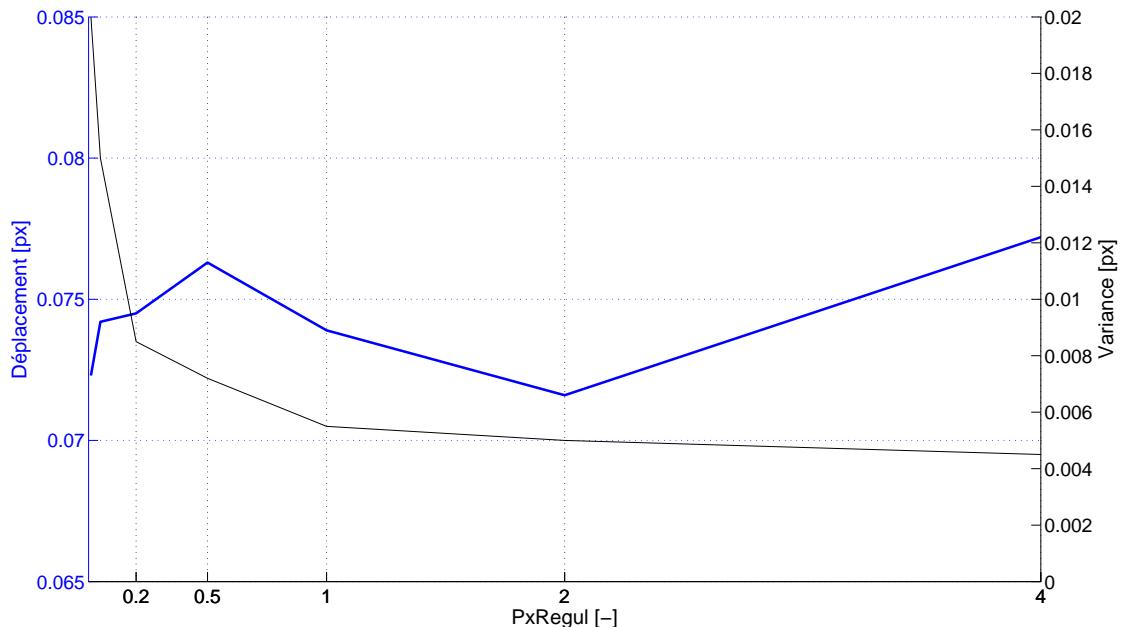


FIGURE C.1 – Graphique : Influence du terme de régularisation.

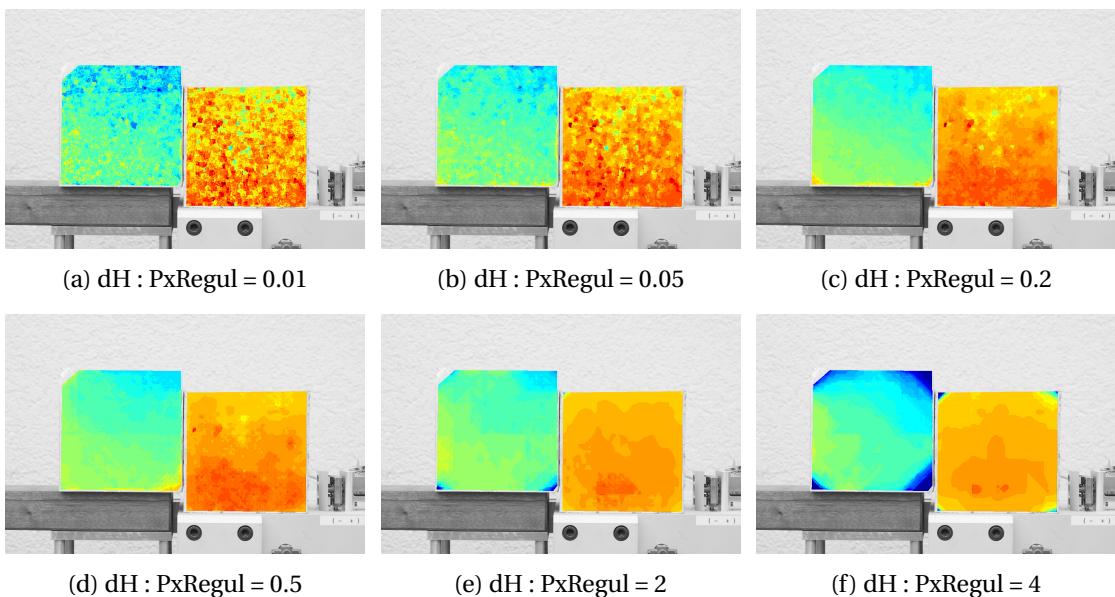


FIGURE C.2 – Cartes de disparités : Influence du terme de régularisation.

Le choix de 0.5 comme paramètre de départ est donc acceptable et peut être conservé. Bien le traitement effectué avec une valeur de 1 semble très légèrement préférable, les deux traitements fournissent des résultats très proches et des variances inférieures au centième de pixel.

C.2 Taille de la fenêtre

Pour ces traitements, la taille de la fenêtre a été définie avec des valeurs comprises de 3×3 jusqu'à 101×101 pixels. Comme les disparités sont supposées homogènes, une grande fenêtre devrait permettre une diminution du bruit ainsi qu'un filtrage des courtes longueurs d'onde (cf. tableau 2.1).

Pour rappel, une valeur de 10 correspond à une fenêtre de 21×21 pixels, selon la relation $2k + 1$ où k est la valeur de l'attribut *Subset*.

Les mesures du déplacement relatif varient de ± 0.02 px pour des petites fenêtres puis se stabilise à partir d'une fenêtre de 21×21 px. Les valeurs ne diffèrent ensuite plus que de quelques millièmes de pixel (cf. figure C.3).

Les variances suivent une courbe descendante entre 0.01 px et 0.005 px. Leur très faible valeur pour la fenêtre de 3×3 px est surprenante mais confirmée par la figure C.4a. En effet, malgré la petite fenêtre de corrélation utilisée, il n'y a que très peu de bruit dans les mesures de disparités.

Il faut toutefois rester prudent avec l'importance donnée à ces variances. Bien que les petites fenêtre semblent donner des résultats peu bruités, les disparités moyennes peuvent tout de

Chapitre C. Analyse de configurations MicMac

même être passablement éloignées des traitements utilisant de plus grandes fenêtre.

Cmin	Gamma	PxRegul	Subset [px]	dH [px]	Variance [px]
97	1	0.5	3	0.0613	0.0100
97	1	0.5	11	0.0834	0.0095
97	1	0.5	21	0.0763	0.0073
97	1	0.5	31	0.0755	0.0069
97	1	0.5	41	0.0763	0.0072
97	1	0.5	61	0.0757	0.0065
97	1	0.5	81	0.0764	0.0060
97	1	0.5	101	0.0778	0.0052

TABLEAU C.2 – Influence de la taille de la fenêtre

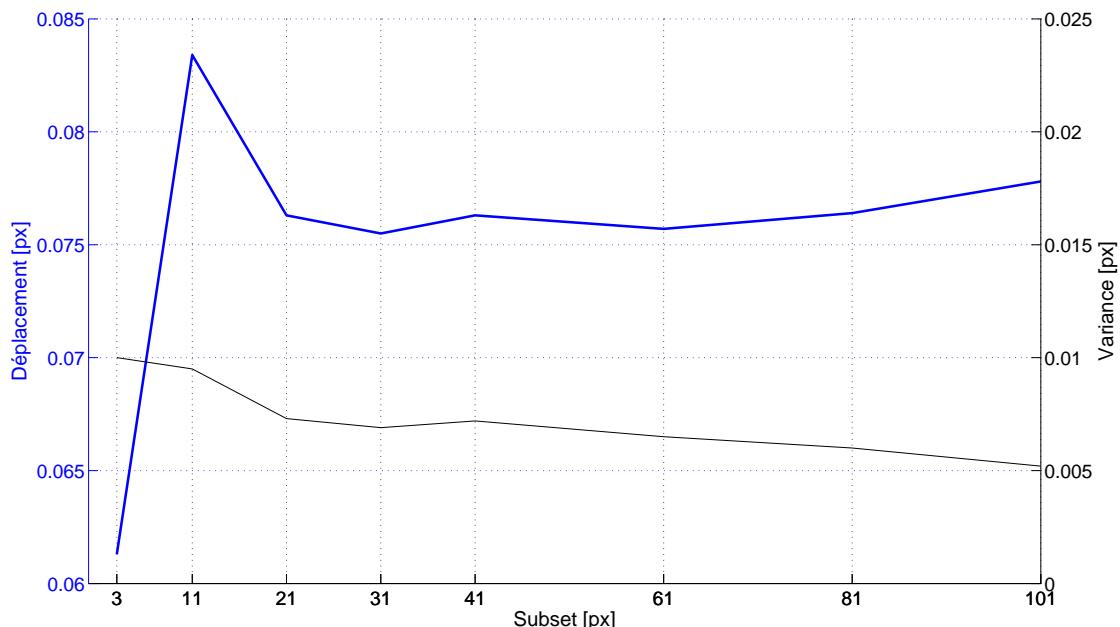


FIGURE C.3 – Graphique : Influence de la taille de la fenêtre.

L'abaissement de la courbes des variances peut également être visible par l'analyse des cartes de disparités de la figure C.4. À partir d'une fenêtre de 21 px, le bruit devient très faible et les couleurs restent uniformes. Il faut noter la présence de quelques effets de bord apparaissant à partir des fenêtres de 61 px. En effet, les bordures des blocs fournissent des valeurs aberrantes qui pourraient fausser les mesures des déplacements moyens.

Les déplacements relatifs n'évoluant plus à partir de 21 px, il est judicieux de choisir cette taille de fenêtre pour les traitements. De cette manière, il est possible d'obtenir des mesures très faiblement bruitées tout en préservant la possibilité de détecter les courtes longueurs d'onde.

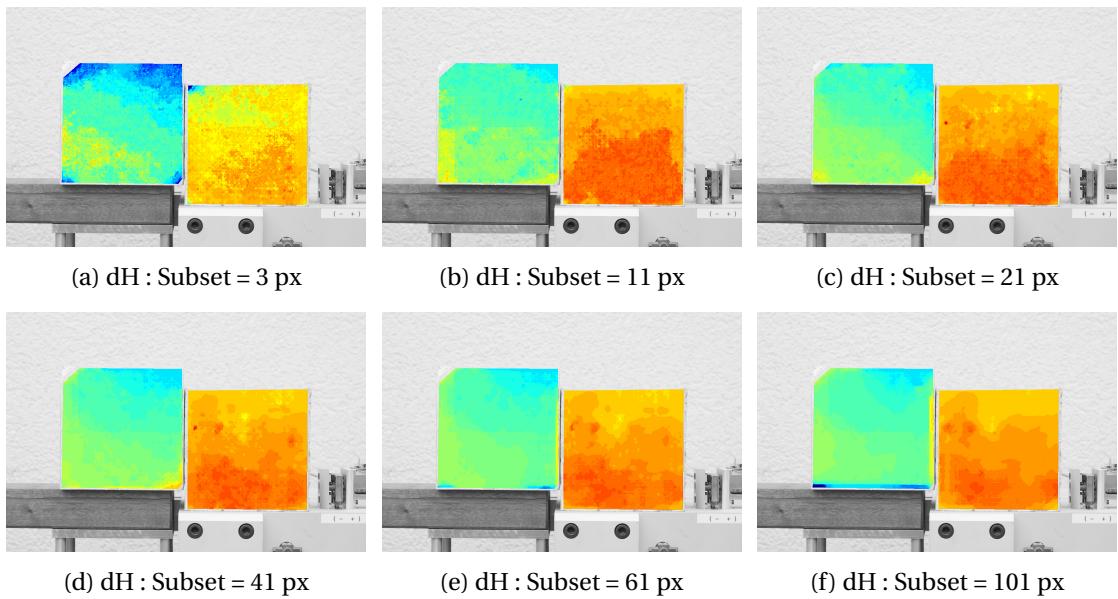


FIGURE C.4 – Cartes de disparités : Influence de la taille de la fenêtre.

C.3 Coefficient de corrélation minimum

Pour ces mesures, le coefficient de corrélation minimum a été défini avec des valeurs situées entre 0.1 et 0.99. Comme indiqué dans les tests réalisés au cours du projet, un traitement utilisant une faible valeur C_{min} permet de prendre en compte tous les coefficients et déterminer la qualité de corrélation globale des images.

Pour l'analyse de ces résultats, une colonne est ajoutée au tableau C.3 contenant le coefficient de corrélation moyen de chaque traitement.

Cmin	Gamma	PxRegul	Subset [px]	dH [px]	Variance [px]	Cmoy
0.1	1	0.5	41	0.0743	0.0071	0.991
0.5	1	0.5	41	0.0743	0.0071	0.991
0.8	1	0.5	41	0.0743	0.0071	0.991
0.9	1	0.5	41	0.0743	0.0071	0.991
0.95	1	0.5	41	0.0744	0.0073	0.991
0.96	1	0.5	41	0.0752	0.0073	0.991
0.97	1	0.5	41	0.0763	0.0072	0.992
0.98	1	0.5	41	0.6253	0.5000	0.993
0.99	1	0.5	41	0.8987	0.5000	0.996

TABLEAU C.3 – Influence du coefficient minimum

Chapitre C. Analyse de configurations MicMac

L'analyse du graphique de la figure C.5 montre que les résultats n'évoluent pas entre les valeurs 0.1 et 0.95 de C_{min} . Ceci s'explique car les coefficients de corrélation entre ces deux images sont tous excellents. La bonne texture du béton permet d'obtenir une moyenne supérieure à 0.99 dès le premier traitement.

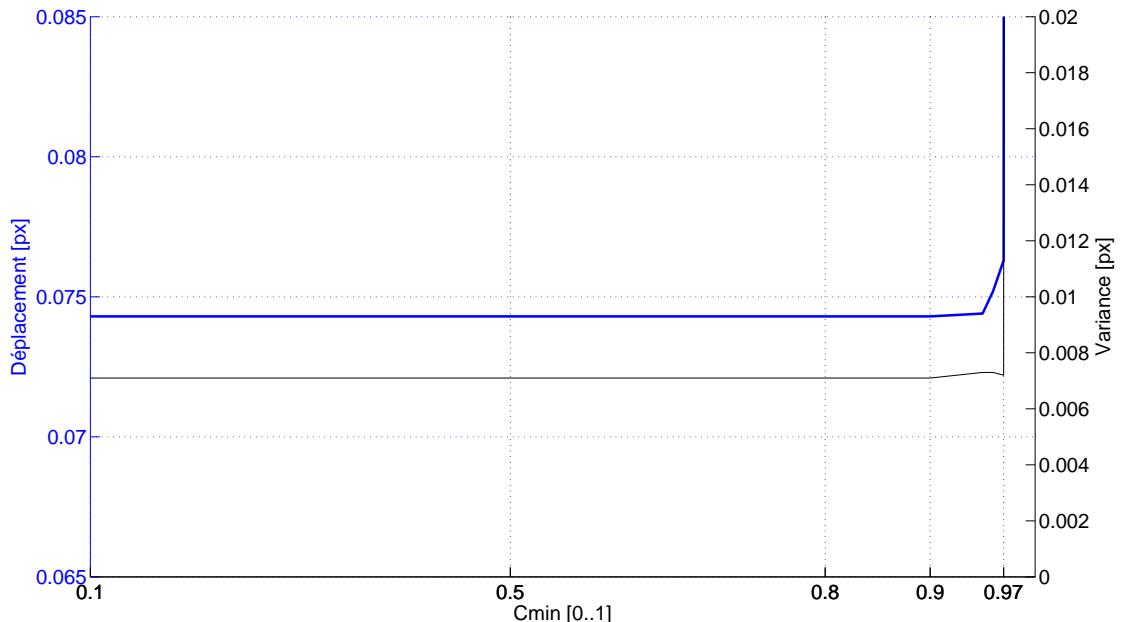


FIGURE C.5 – Graphique : Influence du coefficient minimum.

L'utilisation du logiciel a permis de définir de manière empirique que pour filtrer tous les coefficients inférieurs à 0.99, il ne faudrait pas définir un C_{min} supérieur à 0.98, en suivant la relation :

$$C_{min} \leq 2 \cdot C_{moy} - 1 \quad (\text{C.1})$$

À partir de 0.95, les mesures de déplacements sont légèrement influencées par ce paramètre. Ceux-ci ne varient en effet que de quelques millièmes de pixel, et cela s'explique par le fait que les coefficients sont très homogènes avec notamment une variance inférieure à 0.005. En revanche, lorsque l'on atteint 0.98 pour la valeur de C_{min} , les mesures de disparités ne fournissent plus aucun résultat exploitable. La limite devient en effet trop restrictive et le logiciel élimine la presque totalité des observations. La figure C.6f illustre parfaitement ces faits avec la zone centrale d'un bloc ne disposant plus de mesures de disparités en suffisance.

L'analyse des cartes de disparités de la figure C.6 montre également l'équivalence des traitements pour les valeurs de C_{min} entre 0.10 et 0.97. Ce jeu de données peut donc tout à fait être traité avec une limite à 0.10 sans aucune influence sur le résultat final. Malheureusement, la plupart des images ne permettent pas une qualité de corrélation aussi élevée. Il est donc primordial de toujours filtrer les coefficients les plus bas. L'influence de secteurs présentant de faibles coefficients peut fortement dégrader son voisinage et rendre impossible l'analyse des disparités.

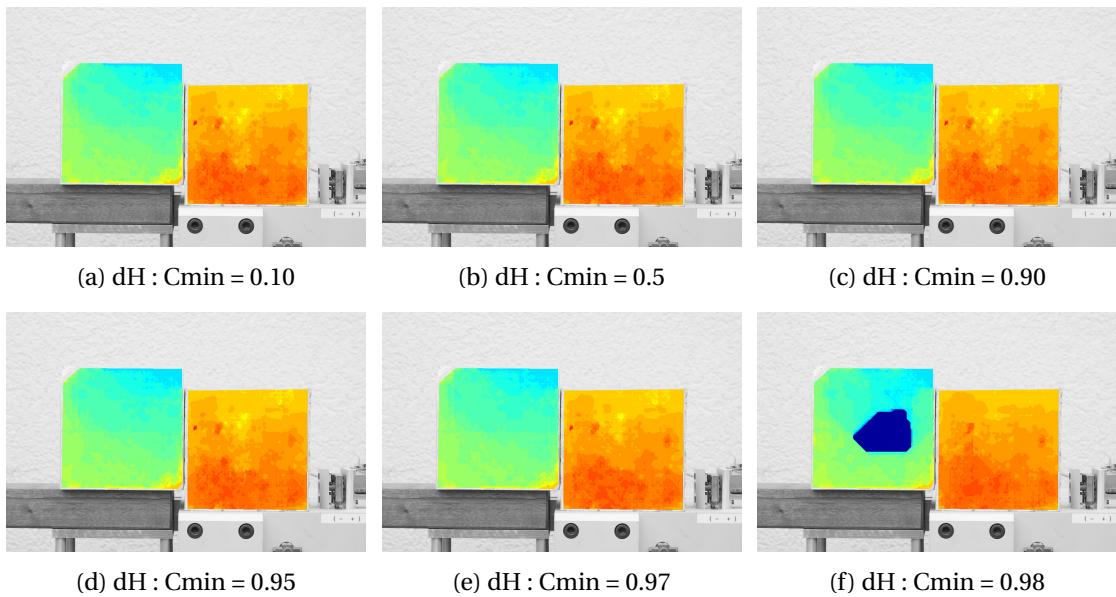


FIGURE C.6 – Cartes de disparités : Influence du coefficient minimum.

C.4 Gamma corrélation

Les traitements ont été effectués en faisant varier le paramètre gamma entre 0.5 et 3. Cet attribut permet de déterminer l'influence à donner aux coefficients les plus proches de 1. Un gamma de 1 attribue donc une importance identique à toutes les mesures, peu importe leur coefficient.

Cmin	Gamma	PxRegul	Subset [px]	dH [px]	Variance [px]
0.97	0.5	0.5	41	0.0730	0.0065
0.97	1	0.5	41	0.0763	0.0072
0.97	1.5	0.5	41	0.0761	0.0068
0.97	2	0.5	41	0.0767	0.0069
0.97	3	0.5	41	0.3773	0.0388

TABLEAU C.4 – Influence du "Gamma corrélation"

Les résultats des traitements sont uniformes pour tous les gamma inférieurs à 2. Les mesures de déplacements relatifs ainsi que leur variance n'évoluent que de quelques millièmes de pixels entre les quatre premiers traitements. Le tableau C.4 et la figure C.7 montrent parfaitement l'évolution des mesures et l'influence de ce paramètre gamma.

Lorsque le paramètre gamma dépasse la valeur de 2, les mesures ne sont plus exploitables et les variances augmentent fortement. La figure C.8e montre parfaitement les effets créés par un gamma trop élevé. Pour les autres résultats, l'analyse visuelle des représentations graphiques de la figure C.8 ne présente aucune différence significative.

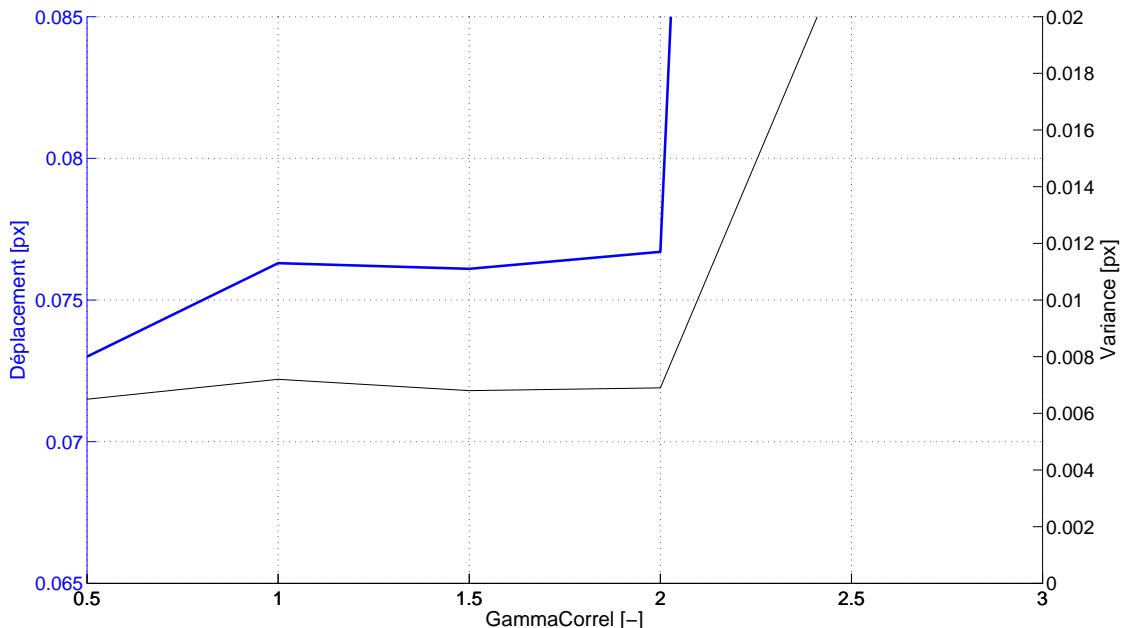


FIGURE C.7 – Graphique : influence du "Gamma corrélation".

Une nouvelle fois, le comportement des mesures avec l'évolution de ce paramètre peut être expliqué par l'homogénéité des disparités et la bonne qualité de corrélation des images. Comme cela a été mentionné en C.3, ce jeu de données offre des coefficients très élevés avec une variance très faible. Il est donc normal que le paramètre gamma ait peu d'influence sur les résultats. En revanche, il est également naturel que lorsqu'il prend des valeurs trop élevées, le traitement doit accorder une grande importance à un très petit nombre de mesures proches de 1. Ceci est à l'origine des valeurs aberrantes apparues lors du dernier traitement.

Ce paramètre doit donc être utilisé avec prudence lors des traitements. Il peut permettre d'améliorer légèrement un calcul avec quelques secteurs à faibles coefficients, mais son influence doit toujours être parfaitement maîtrisée. Il est donc toujours préférable d'exclure les secteurs problématiques en utilisant un masque de corrélation. Le traitement peut alors cibler les secteurs d'intérêts afin d'y effectuer des mesures de qualité.

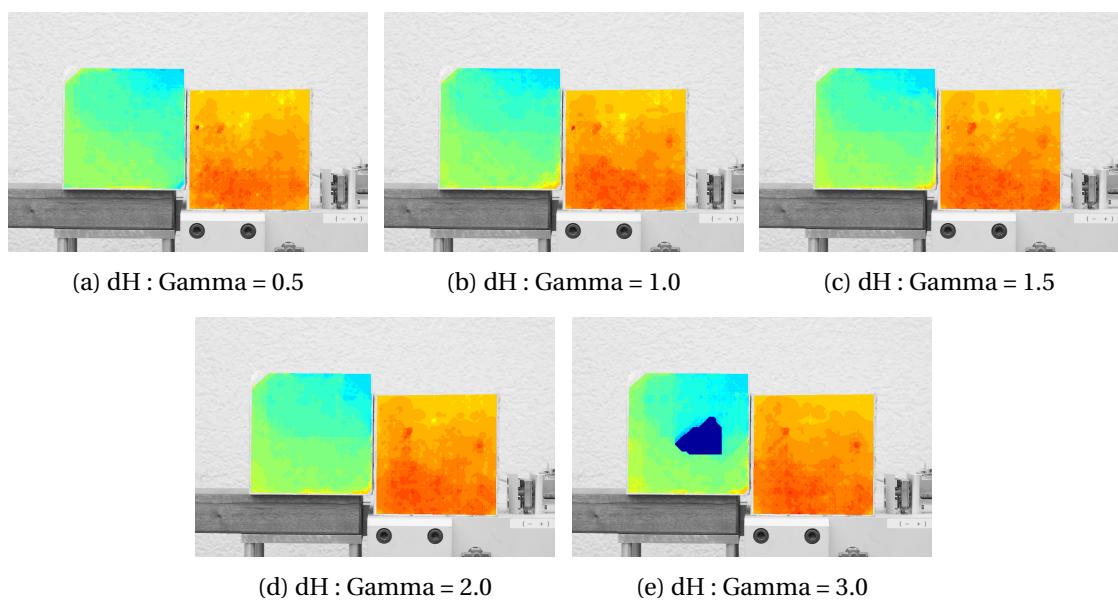


FIGURE C.8 – Cartes de disparités : Influence du "gamma corrélation".

D Pont autoroutier (détail des calculs)

D.1 Secteurs d'analyse

D.1.1 Tablier

Surface d'environ 7'500 pixels englobant le tablier sur toute sa hauteur. Ce secteur a été placé entre les quatre piliers dans une partie où les déplacements constatés restent très homogènes au cours des traitements.

Selon la théorie énoncée en [11], la précision de détermination d'un mouvement par corrélation doit s'approcher du rapport $1/\sqrt{\text{Nombre de pixels}}$. Il est donc possible dans ce cas atteindre une précision proche du centième de pixel pour ce secteur.

D.1.2 Piliers

Les deux piliers sont analysés uniquement sur leur partie basse, offrant les résultats les plus homogènes. L'analyse se fait dans les deux cas un secteur d'environ 3'000 pixels, devant permettre d'atteindre une précision de quelques centièmes de pixels.

D.1.3 Situation

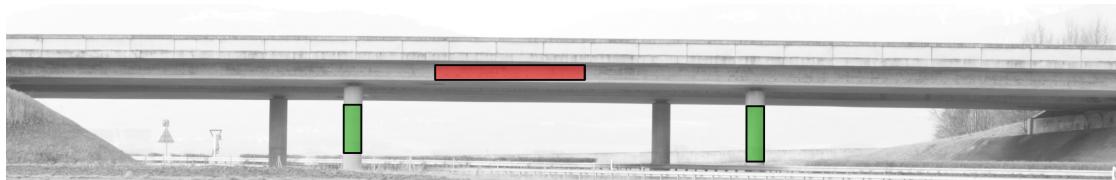


FIGURE D.1 – Secteurs d'analyse des mouvements.

D.2 Extraits de résultats

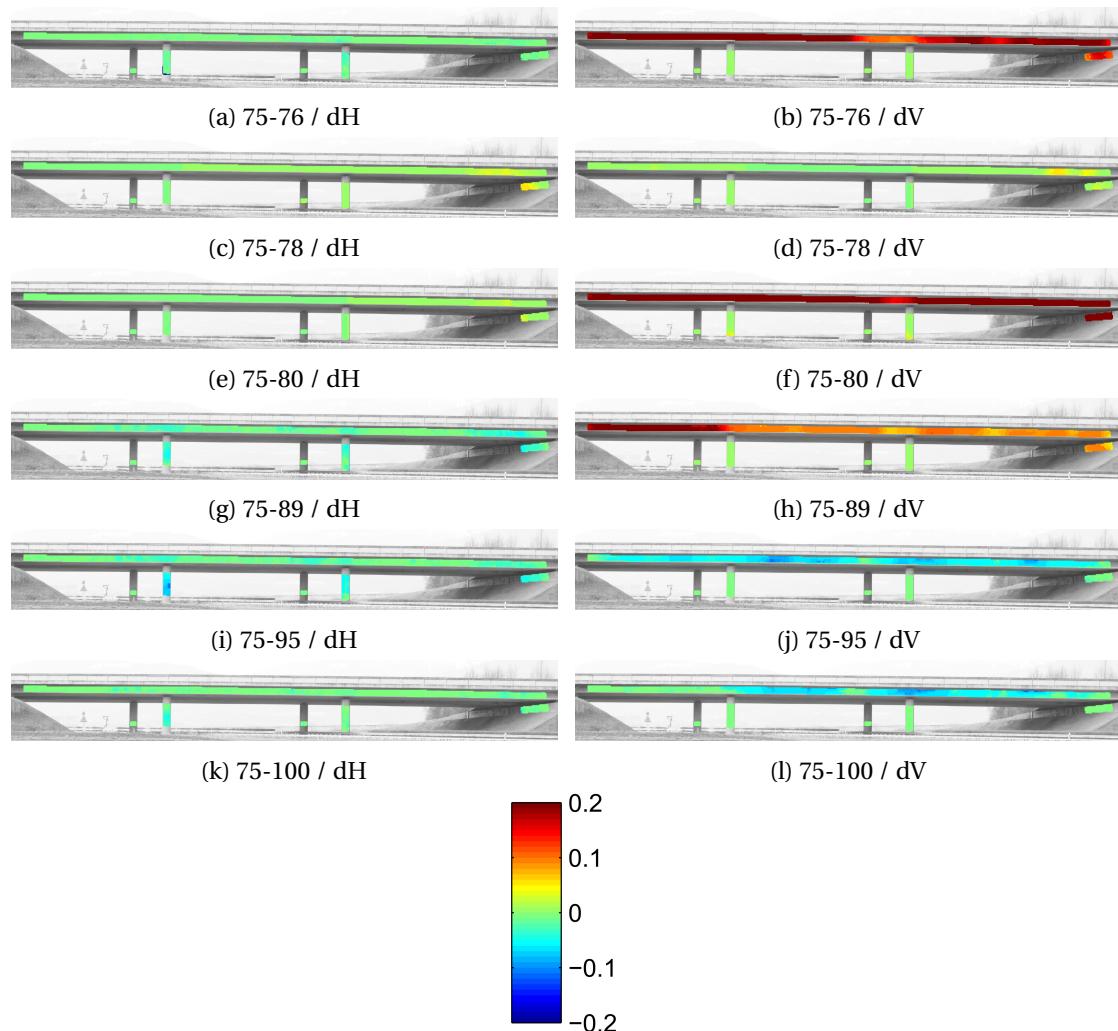


FIGURE D.2 – Extraits de corrélation : (C_{min} 0.98, Sub. 27 px, Regul. 0.2).

D.3 Tableau des écarts

Le tableau D.1 récapitule les mesures de disparités horizontales et verticales pour tous les traitements effectués. L'ajout des variances fait office d'indicateur de fiabilité des disparités moyennes.

La colonne "intervalle" indique le temps écoulé entre les deux images traitées. Le pilier 1 se trouve à gauche (cf. figure D.1) et le pilier 2 à droite. Il semble que la période entre les images 86 à 92 soit la plus mouvementée au niveau du tablier. Quelques mouvements sont également détectés sur les piliers, et couplés à une augmentation des variances sur le premier pilier.

Images	Intervalle [s]	dH Tablier		dV Tablier		dV Pilier 1		dV Pilier 2	
		[px]	var.	[px]	var.	[px]	var.	[px]	var.
75-76	1	-0.01	± 0.00	0.19	± 0.00	0.01	± 0.00	0.01	± 0.00
75-77	2	-0.01	± 0.00	0.02	± 0.01	0.01	± 0.00	0.01	± 0.00
75-78	5	0.01	± 0.00	-0.01	± 0.00	0.01	± 0.00	-0.01	± 0.01
75-79	11	-0.01	± 0.00	0.01	± 0.00	0.01	± 0.00	0.01	± 0.00
75-80	14	-0.01	± 0.00	0.19	± 0.00	0.01	± 0.01	0.01	± 0.01
75-81	21	-0.01	± 0.00	-0.01	± 0.00	-0.01	± 0.00	-0.01	± 0.00
75-82	22	-0.01	± 0.00	-0.01	± 0.00	-0.01	± 0.00	-0.01	± 0.00
75-83	23	-0.01	± 0.00	-0.01	± 0.00	-0.01	± 0.00	-0.01	± 0.00
75-84	26	-0.01	± 0.00	-0.05	± 0.00	-0.01	± 0.00	-0.01	± 0.00
75-85	30	-0.01	± 0.00	0.01	± 0.00	0.01	± 0.00	0.01	± 0.00
75-86	33	-0.03	± 0.01	0.52	± 0.02	0.20	± 0.02	0.16	± 0.02
75-87	36	-0.01	± 0.00	0.39	± 0.00	0.13	± 0.03	0.01	± 0.01
75-88	46	-0.03	± 0.01	-0.01	± 0.00	0.01	± 0.00	-0.01	± 0.00
75-89	46	-0.01	± 0.00	0.01	± 0.00	0.01	± 0.00	0.01	± 0.00
75-90	47	-0.01	± 0.00	0.21	± 0.01	0.02	± 0.02	0.02	± 0.01
75-91	53	-0.01	± 0.01	0.19	± 0.00	0.01	± 0.01	0.02	± 0.02
75-92	54	-0.01	± 0.01	0.39	± 0.00	0.03	± 0.02	0.03	± 0.03
75-93	60	-0.04	± 0.01	-0.01	± 0.00	0.01	± 0.00	-0.01	± 0.00
75-94	67	-0.02	± 0.01	-0.01	± 0.00	-0.01	± 0.00	0.00	± 0.00
75-95	68	-0.01	± 0.00	-0.08	± 0.01	-0.01	± 0.00	-0.01	± 0.00
75-96	77	-0.02	± 0.01	-0.07	± 0.01	-0.01	± 0.00	-0.01	± 0.00
75-97	78	-0.04	± 0.01	-0.09	± 0.01	-0.01	± 0.00	-0.01	± 0.00
75-98	79	-0.01	± 0.00	-0.01	± 0.00	-0.01	± 0.00	-0.01	± 0.00
75-99	85	-0.03	± 0.01	-0.05	± 0.01	-0.01	± 0.00	-0.01	± 0.00
75-100	95	-0.01	± 0.00	-0.07	± 0.00	-0.01	± 0.00	-0.01	± 0.00

TABLEAU D.1 – Tableau des écarts et variances.

D.4 Courbes des écarts

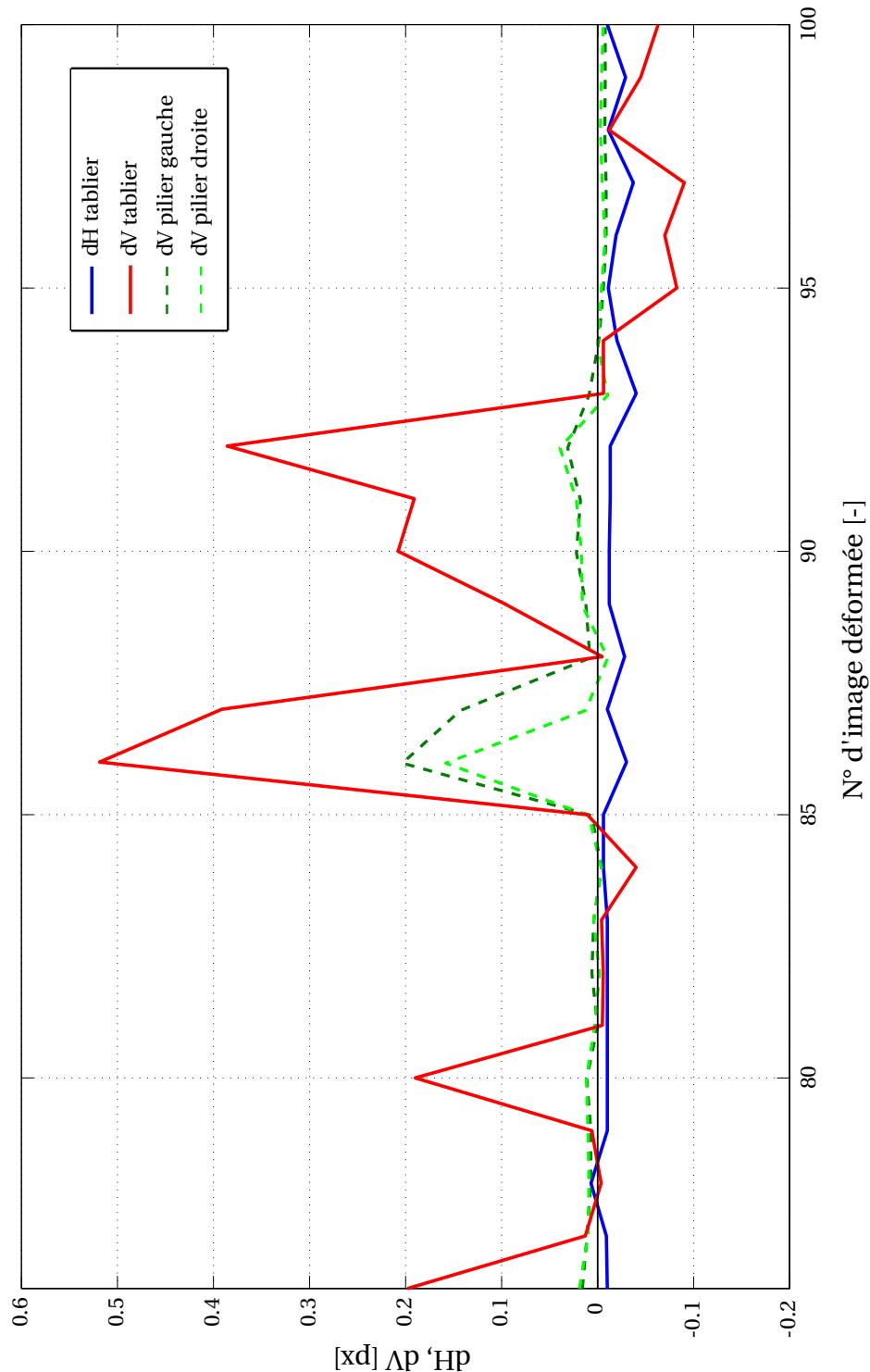


FIGURE D.3 – Courbes des disparités mesurées.

D.5 Paramètres de calcul

```

1  <?xml version="1.0" ?>
2  <ParamMICMAC>
3
4  <DicoLoc>
5      <Symb> DirMEC=MEC-Resultat-75-76-C098-S13-Z20-P02-R02 </Symb>
6      <Symb> Chantier=Pont2_05-75-76-C098-S13-Z20-P02-R02 </Symb>
7
8      <Symb> CorrelMin=0.98 </Symb>    <!-- Coefficient decorrelation MIN -->
9      <Symb> GammaCorrel=1     </Symb>    <!-- Influence des zone e forte
10     correlation -->
11     <Symb> SzW=13          </Symb>
12
13     <Symb> SzSinCard=20.0   </Symb>
14     <Symb> SzAppodSinCard=20.0 </Symb>
15
16     <Symb> Px1Regul=0.2   </Symb>
17     <Symb> Px2Regul=0.2   </Symb>
18
19     <Symb> Purge=true   </Symb>
20
21 </DicoLoc>
22
23     <Section_Terrain>
24         <IntervParalaxe>
25             <!-- Incertitude en Paralaxe -->
26             <Px1IncCalc> 2.0 </Px1IncCalc> <!-- Erreur moyenne e craindre
27                 sur la parallaxe entre les images -->
28             <Px2IncCalc> 2.0 </Px2IncCalc>
29             <Px1Moy > 0.0 </Px1Moy> <!-- VOIR CH. 23.1.1.1 -->
30             <Px2Moy > 0.0 </Px2Moy>
31         </IntervParalaxe>
32         <Planimetrie>
33             <MasqueTerrain>
34                 <MT_Image> 01.SUM_16a_8Bits_Masq.tif </MT_Image>
35                 <MT_Xml> 01.SUM_16a_8Bits_Masq.xml </MT_Xml>
36             </MasqueTerrain>
37         </Planimetrie>
38     </Section_Terrain>
39
40 <!-- **** Parametres lies a la prise de vue, independamment de son exploitation par
41     le correleur -->
42     <Section_PriseDeVue>
43         <GeomImages> eGeomImage_Hom_Px </GeomImages> <!-- VOIR CH. 22.2.2 -->
44             <Images>
45                 <Im1> IMG_0075_16Bits_Gray.TIF </Im1>
46                 <Im2> IMG_0076_16Bits_Gray.TIF </Im2>
47             </Images>

```

Chapitre D. Pont autoroutier (détail des calculs)

```
47
48      <NomsGeometrieImage>
49          <PatternSel>    .*      </PatternSel>  <!-- VOIR CH. 22.3.1 -->
50          <PatNameGeom>   GridDistId      </PatNameGeom>
51      </NomsGeometrieImage>
52  <FCND_CalcHomFromIII2>  NKS-Assoc-CplIm2Hom@-Man@xml      </
53      <FCND_CalcHomFromIII2>
54  </Section_PriseDeVue>
55
56 <Section_MEC>
57     <!--  <ChantierFullImage1> true </ChantierFullImage1>
58     <ProportionClipMEC> 3000 1500 4500 4000 </ProportionClipMEC>
59     <ClipMecIsProp> false </ClipMecIsProp>
60     -->
61 <EtapeMEC>
62     <DeZoom > -1      </DeZoom>   <!-- le seul fils obligatoire a
       toutes les etapes-->
63     <SzW>      ${SzW}  </SzW>      <!-- taille de la fenetre de
       correlation 10 = 21x21 // 20 = 41x41 -->
64     <AlgoRegul> eAlgo2PrgDyn    </AlgoRegul>
65
66
67     <CorrelMin>  ${CorrelMin} </CorrelMin>
68     <GammaCorrel>  ${GammaCorrel} </GammaCorrel>
69     <DynamiqueCorrel> eCoeffGamma </DynamiqueCorrel>
70
71     <!--Ces valeurs correspondent aux termes de regularisation -
       permettent de ponderer l'attache aux donnees par rapport a l'a
       priori de regularite (plus ils sont forts, plus on impose un
       resultat regulier). Si le champ recherche est considere tres
       regulier (fonction basse frequence, faible amplitude) -->
72     <Px1Regul>  ${Px1Regul}    </Px1Regul> <!-- Voir CH. 11.2.2.2 -->
73     <Px2Regul>  ${Px2Regul}    </Px2Regul>
74     <Px1Pas>    1    </Px1Pas>
75     <Px2Pas>    1    </Px2Pas>
76
77     <!--parametre de dilatation des nappes en profondeur; les parametres
       de dilatation fixent l intervalle qui doit etre explore a partir de
       la prediction de l etape precedente param sensible pour le
       comportement de l'algorithme car il conditionne les parties de l'
       espace de la scene exploree ou non a la resolution suivante -->
78     <Px1DilatAlti> 2  </Px1DilatAlti>
79     <Px1DilatPlani> 2  </Px1DilatPlani>
80     <Px2DilatAlti> 2  </Px2DilatAlti>
81     <Px2DilatPlani> 2  </Px2DilatPlani>
82
83     <ModulationProgDyn Portee="Globale">    <!-- obligatoire si le mode
       algorithme choisi est eAlgo2PrgDyn-->
84         <EtapeProgDyn>
85             <ModeAgreg>      ePrgDagrSomme    </ModeAgreg>
86             <NbDir>        4            </NbDir>
```

```

87 </EtapeProgDyn>
88 <!--
89 <Px1PenteMax > 0.01 </Px1PenteMax>
90 <Px2PenteMax > 0.01 </Px2PenteMax> -->
91 </ModulationProgDyn>

92
93 <!-- <ModeInterpolation> eInterpolMPD </ModeInterpolation> -->
94 <ModeInterpolation> eInterpolSinCard </ModeInterpolation> <!--
95 voir CH. 24.4.2 -->
96 <SzSinCard> ${SzSinCard} </SzSinCard>
97 <SzAppodSinCard> ${SzAppodSinCard} </SzAppodSinCard> <!-- Voir CH.
98 11.3.4.1 -->
99 <GenImagesCorrel> true </GenImagesCorrel> <!--false par defaut, sauf
100 pour derniere etape-->

101 <!--l'optimisation se fait sur des images dalles qui agrege la
102 correlation sur des carres de 5x5 pixels.
103 Utile pour gagner du temps et de la robustesse si on sait que le
104 champs a calculer est tres regulier.
105 Ce n'est pas obligatoire a le changer a chq DeZoom; ca peut etre
106 utile d'avoir des regroupement de plus en plus important quand les
107 images sont de plus en plus resolues -->
108 <SsResolOptim> 8 </SsResolOptim>

109 <!-- GENERATION DES IMAGES 8BITS -->
110 <!--
111 <Gen8Bits_Px1> true </Gen8Bits_Px1>
112 <Gen8Bits_Px2> true </Gen8Bits_Px2>
113 -->
114 </EtapeMEC>

115 <EtapeMEC>
116 <DeZoom> 2 </DeZoom>
117 <Px1DilatAlti> 4 </Px1DilatAlti>
118 <Px1DilatPlani> 4 </Px1DilatPlani>
119 <Px2DilatAlti> 4 </Px2DilatAlti>
120 <Px2DilatPlani> 4 </Px2DilatPlani>
121 <Px1Pas> 1 </Px1Pas>
122 <Px2Pas> 1 </Px2Pas>
123 </EtapeMEC>

124 <EtapeMEC>
125 <DeZoom> 1 </DeZoom>
126 <ModeInterpolation> eInterpolBiLin </ModeInterpolation>
127 <Px1DilatAlti> 2 </Px1DilatAlti>
128 <Px1DilatPlani> 2 </Px1DilatPlani>
129 <Px2DilatAlti> 2 </Px2DilatAlti>
130 <Px2DilatPlani> 2 </Px2DilatPlani>
131 <Px1Pas> 0.8 </Px1Pas>
132 <Px2Pas> 0.8 </Px2Pas>
133 </EtapeMEC>

```

Chapitre D. Pont autoroutier (détail des calculs)

```
132 <EtapeMEC>
133     <DeZoom>      1    </DeZoom>
134     <ModeInterpolation> eInterpolBiLin </ModeInterpolation>
135     <Px1DilatAlti> 1      </Px1DilatAlti>
136     <Px1DilatPlani> 2      </Px1DilatPlani>
137     <Px2DilatAlti> 1      </Px2DilatAlti>
138     <Px2DilatPlani> 2      </Px2DilatPlani>
139     <Px1Pas>      0.4    </Px1Pas>
140     <Px2Pas>      0.4    </Px2Pas>
141 </EtapeMEC>
142
143 <EtapeMEC>
144     <DeZoom>      1    </DeZoom>
145     <ModeInterpolation> eInterpolBiLin </ModeInterpolation>
146     <Px1DilatAlti> 1      </Px1DilatAlti>
147     <Px1DilatPlani> 2      </Px1DilatPlani>
148     <Px2DilatAlti> 1      </Px2DilatAlti>
149     <Px2DilatPlani> 2      </Px2DilatPlani>
150     <Px1Pas>      0.2    </Px1Pas>
151     <Px2Pas>      0.2    </Px2Pas>
152 </EtapeMEC>
153
154 <EtapeMEC>
155     <DeZoom>      1    </DeZoom>
156     <ModeInterpolation> eInterpolBiLin </ModeInterpolation>
157     <Px1DilatAlti> 1      </Px1DilatAlti>
158     <Px1DilatPlani> 2      </Px1DilatPlani>
159     <Px2DilatAlti> 1      </Px2DilatAlti>
160     <Px2DilatPlani> 2      </Px2DilatPlani>
161     <Px1Pas>      0.1    </Px1Pas>
162     <Px2Pas>      0.1    </Px2Pas>
163 </EtapeMEC>
164
165 <EtapeMEC>
166     <DeZoom>      1    </DeZoom>
167     <ModeInterpolation> eInterpolBiLin </ModeInterpolation>
168     <Px1DilatAlti> 1      </Px1DilatAlti>
169     <Px1DilatPlani> 2      </Px1DilatPlani>
170     <Px2DilatAlti> 1      </Px2DilatAlti>
171     <Px2DilatPlani> 2      </Px2DilatPlani>
172     <Px1Pas>      0.05   </Px1Pas>
173     <Px2Pas>      0.05   </Px2Pas>
174 </EtapeMEC>
175
176 <EtapeMEC>
177     <DeZoom>      1    </DeZoom>
178     <ModeInterpolation> eInterpolBiLin </ModeInterpolation>
179     <Px1DilatAlti> 1      </Px1DilatAlti>
180     <Px1DilatPlani> 2      </Px1DilatPlani>
181     <Px2DilatAlti> 1      </Px2DilatAlti>
182     <Px2DilatPlani> 2      </Px2DilatPlani>
183     <Px1Pas>      0.02   </Px1Pas>
```

```

184      <Px2Pas>    0.02    </Px2Pas>
185  </EtapeMEC>
186
187  <EtapeMEC>
188      <DeZoom >    1        </DeZoom>    <!-- VOIR CH. 5.3.2 -->
189      <AlgoRegul> eAlgoDequant    </AlgoRegul>    <!--algo de
190          dequantification; 'reparation' des artefacts de quantification -->
191      <Px1Pas>    1.0      </Px1Pas>
192      <Px2Pas>    1.0      </Px2Pas>    <!--oblige de mettre 1 si
193          eAlgoDequant, car la notion de pas n'est pas pertinente pour un
194          resultats en point flottant-->
195
196  </EtapeMEC>
197
198 </Section_MEC>
199
200
201
202 <Section_Results >
203     <GeomMNT>      eGeomPxBiDim    </GeomMNT>
204
205 </Section_Results>
206
207
208 <Section_WorkSpace >
209     <WorkDir >  ThisDir </WorkDir>
210     <TmpPyr>       Pyram/   </TmpPyr>
211     <TmpMEC>       ${DirMEC}/  </TmpMEC>
212     <TmpResult>    ${DirMEC}/  </TmpResult>
213     <ByProcess>    16   </ByProcess>
214     <NomChantier> ${Chantier} </NomChantier>
215     <PurgeMECResultBefore> ${Purge} </PurgeMECResultBefore>
216
217     <!--
218     <NbCelluleMax>    8e7      </NbCelluleMax>
219     <SzRecouvrtdalles> 200      </SzRecouvrtdalles>
220     <SzDalleMin>      2000     </SzDalleMin>
221     -->
222
223 </Section_WorkSpace>
224
225
226 <Section_Vrac>
227 </Section_Vrac>
228
229
230 </ParamMICMAC>

```


Liste des figures

2.1 Schéma image numérique	6
2.2 Exemple de corrélation 1D	7
2.3 Exemple de corrélation 2D	9
2.4 Influence de la taille de fenêtre pour un mouvement homogène	10
2.5 Fenêtre et pas corrélation	11
2.6 Illustration des différents types de textures	14
2.7 Modes d'interpolation	15
3.1 Schématisation du bruit numérique	20
3.2 Aperçu des effets de la sommation d'images	22
4.1 Schéma de fonctionnement du logiciel MicMac	26
4.2 Système d'axes "image"	30
4.3 Simulation d'essais de charge : images originales	31
4.4 Simulation d'essais de charge : résultats de corrélation	32
4.5 Vecteurs de déplacement	33
5.1 Mur en béton peint	35
5.2 Qualité de corrélation d'images brutes	36
5.3 Qualité de corrélation par sommation de 10 images	37
5.4 Coefficients de corrélation (gain par sommation)	38
5.5 Effets du niveau d'intensité lumineuse des images	39
5.6 Histogramme des images acquises en limite de saturation	39
5.7 Corrélation d'un assemblage d'images à forte intensité lumineuse	40
5.8 Effet de l'instabilité du capteur sur des images sommées	41
5.9 Illustration d'un problème d'instabilité du capteur	42
6.1 Tour Landi : description de l'ouvrage	46
6.2 Évaluation de la qualité de corrélation	47
6.3 Exemple de distorsion en barillet	47
6.4 Exemple de dépointage fort entre deux images	48
6.5 Effets de la distorsion pour un dépointage de 280 pixels	49
6.6 Effets de la distorsion pour un dépointage de 15 pixels	49
6.7 Corrélation diachronique : description des images utilisées	50

Liste des figures

6.8 Analyse de la qualité de corrélation diachronique	51
6.9 Carte des disparités par corrélation diachronique	51
6.10 Carte des disparités après transformation de Helmert	53
6.11 Carte des disparités après correction de la rotation	54
7.1 Vue du pont ausculté	57
7.2 Image brute de l'ouvrage	58
7.3 Analyse de la qualité de corrélation	58
7.4 Qualité de corrélation par sommation	59
7.5 Secteurs d'analyse des mouvements	60
7.6 Images 75-89 : Disparités verticales	61
7.7 Analyse du suivi dynamique de l'ouvrage	62
8.1 Test MS50 : schéma d'acquisition.	65
8.2 Gain par sommation d'images issues du MS50	66
8.3 Potentiel de corrélation d'images brutes	67
8.4 Potentiel de corrélation d'images additionnées	67
8.5 Cartes des disparités MS50	68
A.1 rgb2gray : conversion des images en niveaux de gris	80
A.2 Sommation d'images : chaîne de traitement et résultats	82
C.1 Graphique : Influence du terme de régularisation	108
C.2 Cartes de disparités : Influence du terme de régularisation	109
C.3 Graphique : Influence de la taille de la fenêtre	110
C.4 Cartes de disparités : Influence de la taille de la fenêtre	111
C.5 Graphique : Influence du coefficient minimum	112
C.6 Cartes de disparités : Influence du coefficient minimum	113
C.7 Graphique : influence du "Gamma corrélation"	114
C.8 Cartes de disparités : Influence du "gamma corrélation"	115
D.1 Secteurs d'analyse des mouvements	117
D.2 Extraits de résultats de corrélation	118
D.3 Courbes des disparités mesurées	120

Liste des tableaux

2.1	Résumé des caractéristiques des fenêtres	11
2.2	Variations d'intensité (Échelle)	13
2.3	Variations d'intensité (Constante)	13
2.4	Critères d'optimisation	13
3.1	Tableau récapitulatif des formats d'images	18
3.2	Plages dynamiques des images	20
4.1	Données MicMac en entrée	25
4.2	Résultats MicMac en sortie	26
5.1	Récapitulation des mesures de disparités	40
6.1	Paramètres de transformation de Helmert	52
8.1	Analyse des mesures de disparités MS50	69
8.2	Comparatif des précisions de mesure du MS50	69
C.1	Influence du terme de régularisation	108
C.2	Influence de la taille de la fenêtre	110
C.3	Influence du coefficient minimum	111
C.4	Influence du "Gamma corrélation"	113
D.1	Tableau des écarts et variances	119

Glossaire

aérotriangulation	L'objectif de l'aérotriangulation est de déterminer pour chaque photo la position exacte de la caméra au moment de la prise de vue aérienne. À l'aide de cette position, on peut déterminer l'orientation des images, créer des modèles stéréoscopiques et lire correctement les coordonnées indiquées dans les modèles.	25
anisotrope	L'anisotropie d'un matériau caractérise sa propriété à varier en fonction de sa direction. Les matériaux composites sont la plupart du temps anisotropes par opposition aux matériaux métalliques qui sont isotropes.	14, 74
corrélation	En mathématique, la corrélation caractérise la relation statistique entre deux variables. Elle indique de manière numérique le niveau de ressemblance entre deux objets.	1, 5, 7, 12
CR2	Format propriétaire de la marque <i>Canon</i> permettant le stockage des images brutes issues du capteur photographique.	18, 21
diachronique	Terme composé à l'aide du Grec <i>dia</i> “à travers” et <i>chros</i> “temps”. On l'utilise pour définir l'évolution d'un fait à travers le temps.	1, 50
échantillon	Ce terme est utilisé afin de désigner la partie d'un ouvrage étant étudiée par corrélation. Il est supposé être représentatif et doit permettre l'analyse du comportement de l'ouvrage.	35
Helmert	Transformation similitude permettant de passer d'un système de coordonnées à un autre en minimisant les résidus par moindres carrés. Elle est composée de deux translations, d'une rotation et d'un facteur d'échelle.	52, 53, 87

Acronymes

CC	Cross-correlation	12, 28
CCD	Charge-Coupled Device	6, 21, 45
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor	6
HEIG-VD	Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud	45
IGN	Institut Géographique National	25
JPEG	Joint Photographic Experts Group	17, 18, 66
MATIS	Méthodes d'Analyses pour le Traitement d'Images et la Stéréorestitution	25
MNE	Modèle Numérique d'Elévation	25
MNT	Modèle Numérique de Terrain	5, 25
OFROU	Office Fédéral des routes	57
PPV	Plus Proche Voisin	15, 16
PSSD	Parametric sum of squared differences	12
SAD	Sum of absolutes differences	12
SSD	Sum of squared differences	12, 13
TIFF	Tagged Image File Format	18, 21, 79, 80, 92
XML	Extensible Markup Language	25, 26, 29

Bibliographie

- [1] M. BORNERT AND F. HILD, *Mesure des champs cinématiques par corrélation d'images numériques*, Atelier Photomécanique, juillet 2004.
- [2] P.-H. CATTIN, *Méthodes d'estimation*, 2008, ch. Transformations de coordonnées.
- [3] M. DEBELLA-GILO AND A. KÄÄB, *Sub-pixel precision image matching for measuring surface displacements on mass movements using normalized cross-correlation*, Remote Sensing of Environment, (2011), pp. 130–142.
- [4] M. P. DESEILLIGNY, *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, (2007).
- [5] FOAD, *Notions de traitement et d'analyse d'image*, Chap. 3.2. / www.foad.refer.org / Consulté le 22.11.2013.
- [6] F. HILD, *Mesure de champs de déplacement par corrélation d'images et application en mécanique des solides*, Notes de cours IPSI, Septembre 2003.
- [7] IGN, *Logiciel MicMac*. / www.micmac.ign.fr / Consulté le 10.11.2013.
- [8] B. D. LUCAS AND T. KANADETHOR, *An iterative image registration technique with an application to stereo vision*, in Proceedings of Imaging Understanding Workshop, 1981, pp. 121–130.
- [9] B. PAN, *Recent progress in digital image correlation*, in Experimental Mechanics, 2011.
- [10] B. PAN, K. QUIAN, H. XIE, AND A. ASUNDI, *Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement : a review*, in Measurement Science and Technology, I. Publishing, ed., 2009.
- [11] M. PROT, *Corrélation diachronique d'images pour l'auscultation d'ouvrages*, 2013.
- [12] L. ROBERT AND B. WATTRISSE, *Evaluation d'erreurs de mesure par corrélation d'images numériques : méthodologie et résultats*, 19ème Congrès Français de Mécanique, 2009.
- [13] H. W. SCHREIER AND M. A. SUTTON, *Experimental Mechanics*, vol. 42, 2002, ch. Systematic Errors in Digital Image Correlation Due to Undermatched Subset Shape Functions, pp. 303–310.
- [14] M. A. SUTTON, J.-J. ORTEU, AND H. W. SCHREIER, *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*, 2009.

Bibliographie

- [15] S.-H. TUNG, M.-H. SHIH, AND W.-P. SUNG, *Development of digital image correlation method to analyse crack variations of masonry wall*, Sadhana, 33 Part 6 (2008), pp. 767–779.
- [16] WIKIPÉDIA, *Bruit numérique*. / www.wikipedia.org / Consulté le 22.11.2013.
- [17] ———, *Corrélation d'images*. / www.wikipedia.org / Consulté le 18.11.2013.
- [18] ———, *Distorsion optique*. / www.wikipedia.org / Consulté le 06.12.2013.
- [19] ———, *Méthode Lucas-Kanade*. / www.wikipedia.org / Consulté le 13.12.2013.
- [20] S. YAOFENG AND J. H. PANG, *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, ch. Study of optimal subset size in digital image correlation of speckle pattern images, p. 967–974.