



HAL
open science

Optimisation de la dérivation en fonction de la Résolution et de la Résolution Spatiale sur les déformations

Rebecca Berge-Gras, Jérôme Molimard

► **To cite this version:**

Rebecca Berge-Gras, Jérôme Molimard. Optimisation de la dérivation en fonction de la Résolution et de la Résolution Spatiale sur les déformations. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. hal-03391306

HAL Id: hal-03391306

<https://hal.science/hal-03391306>

Submitted on 21 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Optimisation de la dérivation en fonction de la Résolution et de la Résolution Spatiale sur les déformations

R. BERGE-GRAS^{a, b}, J. MOLIMARD^{a, c}

^aCentre SMS, ^bUMR CNRS 5513 et ^cUMR CNRS 5146,
École des Mines de Saint-Étienne, 158 Cours Fauriel, 42023 Saint-Etienne Cedex 2

Résumé : Dans beaucoup de méthodes optiques de champs, la donnée extraite est un déplacement, alors que l'utilisateur final est intéressé par la déformation, ce qui nécessite filtrage et dérivation des champs de déplacements. Il est usuel de vouloir garder la meilleure résolution spatiale donnée avec comme objectif une résolution inférieure à une valeur seuil. Cette présentation a pour objet l'optimisation des champs de déformations selon le critère énoncé pour différents types d'opérateurs.

Abstract : In many optical full-field methods, the data extracted is a displacement while the user is interested in strains, which requires filtering and derivation of displacement fields. It is common to aim a resolution lower than a threshold value, keeping the spatial resolution as small as possible. This presentation deals with the optimization of strain fields according to the criterion for different types of operators.

Mots-clés : Méthode optique de champs, résolution, résolution spatiale

1 Introduction

Les méthodes optiques de champs sont particulièrement adaptées à l'analyse de structures soumises à des champs non uniformes. Mais alors, en fonction de la **résolution spatiale** et de la **résolution**, il sera possible ou non d'observer des hétérogénéités liées à la variabilité du matériau. On comprend tout l'intérêt de l'**estimation a priori** des propriétés métrologiques d'une méthode optique de champs, afin de choisir au mieux la méthode et les conditions de sa mise en œuvre dans un contexte donné.

Dans une période récente, un travail important a été réalisé pour clarifier ces notions métrologiques. Il convient en premier lieu de bien décrire les méthodes et de les classer correctement [1] puis de donner des définitions [2]. Aux Etats-Unis, le groupe « Advanced apparatus and test methods » de l'ASME a proposé un premier document avec un ensemble de définitions relatives aux méthodes optiques de champs, qui a donné lieu à la norme ASTM E2208-02 (2005) [3]. Les utilisateurs des méthodes optiques de champs disposent désormais de travaux permettant de déterminer les principales sources d'erreur ([3], [4], [5]), et leur propagation au travers des opérateurs de base [6][7][8]. Des travaux proposent également des procédures d'inter-comparaison entre méthodes optiques de champs, soit sur la base d'essais simulés [9][10], soit sur la base d'essais de référence [4]. Cependant, peu de travaux concernent encore l'utilisation des grandeurs métrologiques et en particulier leur évolution lors de l'utilisation des deux opérateurs principaux utilisés par les mécaniciens que sont la dérivation et le filtrage des hautes fréquences [11] [12]. Ce travail propose une démarche visant à mieux appréhender ces opérateurs en particulier pour les méthodes interférentielles (Interférométrie de Speckle, Interférométrie sur Réseau) ou géométriques (Méthode de la Grille, Corrélation d'Images, Projection de Franges).

Dans un premier temps, il est nécessaire de choisir une **définition de chacune de ces grandeurs**, sur des bases bien fondées propres aux études mécaniques. Ensuite, le passage des champs de déplacements aux champs de déformations nécessite la dérivation de données expérimentales et souvent un filtrage. **Le choix du couple longueur de dérivation/ longueur de filtrage** peut être posé comme suit : comment obtenir une résolution inférieure à une valeur seuil, définie par l'utilisateur, tout en assurant une résolution spatiale minimale.

2 Définition des principales grandeurs métrologiques nécessaires

2.1 Résolution

Dans sa norme [3], l'ASTM définit la résolution comme « *smallest change in the physical property than can be reliably measured* ». La résolution n'a donc de sens que dans un cadre probabiliste ; elle est définie par deux grandeurs : une valeur pour un niveau de probabilité donné. Dans le cas des mesures bidimensionnelles, chaque carte contient de quelques 10^{+2} à quelques 10^{+7} résultats statistiquement indépendants, selon la méthode et le matériel à disposition. La comparaison de cartographies successives donne donc un estimateur de la résolution.

Deux termes ont été identifiés comme contributeurs principaux au bruit de mesure, dont la résolution est une quantification :

- la chaîne d'acquisition : le bruit électronique, photonique, la discrétisation de l'information en niveau de gris, la présence de perturbations sur l'éprouvette (thermiques ou mécaniques) ;
- la qualité du codage de la surface : homogénéité des mouchetis/grilles, tâches de diffraction pour les méthodes interférométriques.

Pour estimer ces deux contributions, plusieurs stratégies existent. Un test de répétabilité donne une estimation réaliste de la première. La seconde est plus difficile à atteindre. La stratégie adoptée dépend de la méthode envisagée ; on peut le plus souvent utiliser un déplacement de corps rigide et analyser la composante haute fréquence du résultat : on obtient alors l'ensemble des deux contributions (chaîne d'acquisition et codage de la surface) puis les séparer au besoin dans un souci d'optimisation de la méthode optique.

2.2 Résolution spatiale

La définition de la résolution spatiale ne fait pas l'objet d'un consensus actuellement. Parmi les définitions proposées, la plus intuitive est probablement « *la plus courte distance séparant deux points pour lesquels deux mesurages indépendants peuvent être faits* » [2]. Cependant, cette définition peut être prise à défaut, notamment pour les méthodes d'extraction de phase par transformée de Fourier. Aussi, dans [13], nous proposons la définition suivante : « *la distance au-delà de laquelle un phénomène local a un effet négligeable sur les mesures voisines* ». La résolution spatiale est donc liée à un degré d'interaction, comme la résolution. Enfin, l'ASTM [3] a proposé la définition suivante de la résolution spatiale : « *Spatial resolution for the encoded data: one-half of the highest frequency component contained in the frequency band of the encoded data* ». L'approche proposée est une approche duale de la précédente, avec un degré d'interaction (sous forme de fréquence de coupure) défini *a priori*. La seconde définition ne fixant pas de degré d'interaction *a priori*, c'est elle qui sera utilisée ici.

L'estimation de la résolution spatiale peut être réalisé au moins de deux manières :

- en écrivant la fonction d'auto-corrélation d'un bruit blanc ayant subi les opérateurs à tester ; l'analyse repose sur l'approximation du lieu des points auto-corrélés à plus de 50 % par une ellipse, et la détermination de ses grandeurs caractéristiques.
- En utilisant des champs sinusoïdaux de référence : cette solution, proposée par le GDR 2519 « Méthode de champs et identification en mécanique du solide », a été mise au point pour des méthodes d'extraction de déplacement par corrélation d'images [9] ou méthodes de grille [10]. Cette méthode permet de définir en particulier un seuil de discrimination, au delà duquel un événement (un déplacement le plus souvent) est visible, même si son intensité est entachée d'une erreur importante, et un seuil à 10 % d'erreur, correspondant à l'étalement minimal d'un événement pour que l'erreur systématique sur son intensité soit inférieure à 10 %.

3 Effets d'un post-traitement sur les paramètres métrologiques

3.1 Introduction

La dérivation d'un signal change notablement ses qualités métrologiques : l'utilisation de points différents induit une dégradation de la résolution spatiale et le bruit augmente. A l'opposé, le filtrage spatial est utilisé pour faire diminuer ce bruit, au prix d'une dégradation de la résolution spatiale.

L'effet de ces deux outils doit être bien compris de manière à minimiser résolution et résolution spatiale sur la grandeur dérivée. Évidemment, la discussion présentée ici perd de son intérêt si la dérivation effectuée est une dérivation optique (interférométrie différentielle), ce qui souligne l'un des intérêts principaux de cette technique.

3.2 Influence d'un opérateur linéaire sur la résolution

Si un opérateur linéaire est utilisé, la variable de sortie g en chaque point (i, j) est liée aux variables d'entrée $u(i, j)$ sur une longueur $2m+1$ par un opérateur matriciel A . Alors, on peut montrer que la variance sur la variable de sortie g est liée à la variance sur la variable d'entrée u selon la relation (1). Ainsi, le bruit pour un filtre Gaussien ou pour une dérivation est donné dans le tableau 1.

$$V(g(i, j)) = (A)(A)^t V(u(i, j)) \tag{1}$$

$\sigma_{\bar{u}} = \sigma_u \sqrt{\sum_{-m}^m \left\{ e^{-\left(\frac{k}{m}\right)^2} \right\}^2 / \left\{ \sum_{-m}^m e^{-\left(\frac{k}{m}\right)^2} \right\}^2}$	$\sigma_g = \frac{\sigma_u}{\Delta x} \sqrt{\frac{2p+1}{(2p+1) \sum_{k=-p}^p x(i+k, j)^2 - \left(\sum_{k=-p}^p x(i+k, j) \right)^2}}$
Filtre Gaussien sur une zone $[-2\sigma, 2\sigma]$, $2m+1$ points.	dérivation par approximation linéaire aux moindres carrés, $2p+1$ points.

Tableau 1 : Estimation des résolutions après filtre Gaussien ou dérivation.

Les relations du Tableau 1 permettent donc d'estimer les résolutions pour un signal filtré **ou** dérivé. Mais si les deux opérateurs sont combinés, les coefficients d'inter-corrélation doivent être pris en compte, soit, pour des opérateurs bidimensionnels :

$$\begin{aligned} \{g(i, j)\} &= A_{\text{dérivation}}(p, q) \cdot A_{\text{filtrage}}(m, n) \cdot \{u(i, j)\} \\ &= A(m, n, p, q) \cdot \{u(i, j)\} \end{aligned} \tag{2}$$

La figure 1 indique que les longueurs sur lesquelles doivent être faits le filtrage (paramètre m et n) et la dérivation (paramètres p et q) agissent de manière sensiblement identique sur la résolution (opérateurs 1D).

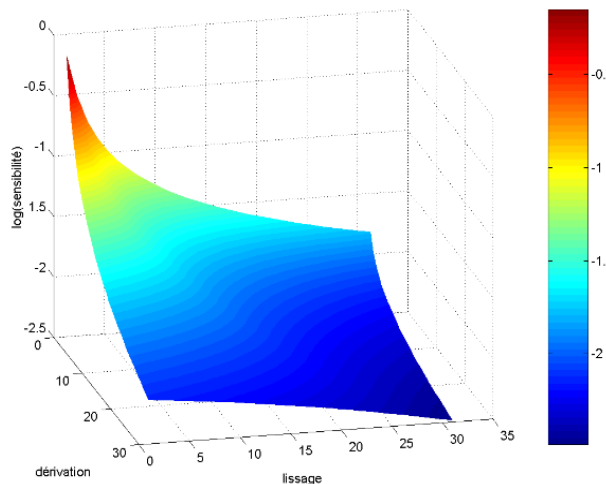


FIG 1 - Résolution en fonction des longueurs de dérivation et de lissage (lissage par fonction Gaussienne 1D, par approximation linéaire au sens des moindres carrés, 1D).

3.3 Effet d'un opérateur linéaire sur la résolution spatiale

L'utilisation d'un opérateur linéaire a pour effet de dégrader la résolution spatiale. En considérant une résolution spatiale négligeant 5 % des interactions, un filtre Gaussien aura donc une résolution

spatiale définie sur un rayon de 2σ dans le cas unidirectionnel. La dérivation est un cas un peu plus délicat à traiter car l'influence des points augmente avec la distance au point central. Un rayon en deçà duquel les points sont influents ne peut donc plus être défini. En effectuant une simulation sur une fonction Dirac en 2D et en éliminant les 5 % des points les moins influents, la zone des points où le Dirac s'est propagé (lieu de la résolution spatiale) correspond à deux lobes pour une dérivation selon l'axe horizontal puis un filtrage (figure 2). Dans le cas général, il n'existe pas à notre connaissance de relation donnant la résolution spatiale suite à l'application de plusieurs opérateurs en fonction de la résolution spatiale de chacun d'eux. La détermination de la résolution spatiale pour le couple filtrage/dérivation se fera donc sur la base de l'analyse de numérique décrite ci-dessus.

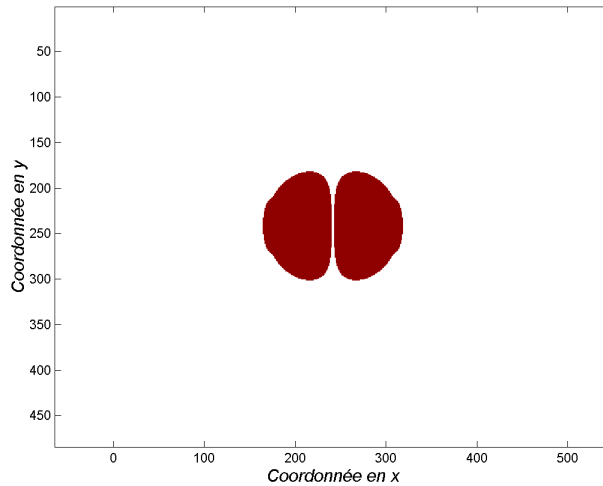


FIG 2 - Zone affectée par la fonction Dirac après filtrage et dérivation (différenciation sur 17 pixels, filtrage Gaussien $\sigma = 25$ pixels)

3.4 Optimisation du couple filtrage/dérivation

L'influence des opérateurs de filtrage passe-bas et de dérivation est définie par la demi-largeur du noyau de convolution de chacun. Pour le filtrage passe-bas, la demi-largeur est définie conventionnellement comme deux fois l'écart-type de la Gaussienne. Celle-ci donc est paramétrée par deux écarts-types (pour chaque direction du plan) et une rotation. Cette possibilité n'est pas utilisée dans ce cadre, où seul un filtrage isotrope est considéré. Pour la dérivation, la dérivée est estimée par approximation au sens des moindres carrés d'une fonction polynomiale. Les paramètres de l'opérateur de dérivation sont donc les deux dimensions du noyau et l'ordre du polynôme (ici linéaire).

Atténuation du bruit

D'après la relation (1), la résolution sur la dérivée d'un signal peut s'écrire sous la forme :

$$\sigma\left(\frac{\partial U}{\partial y}\right) = \frac{C_{sens}}{\delta y} \sigma(U) \quad (3)$$

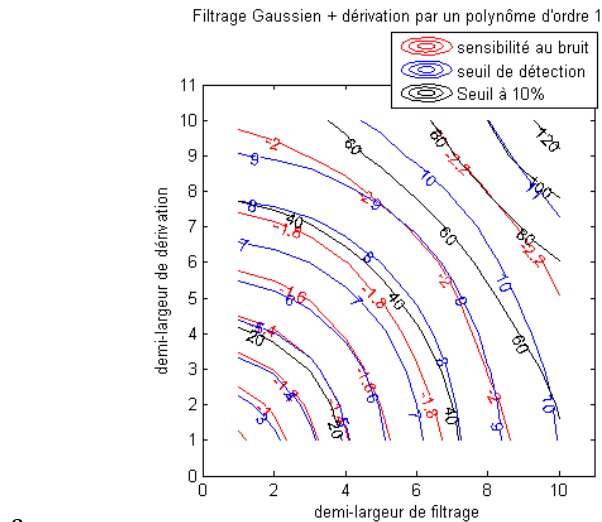
où δy une longueur de référence (typiquement la taille apparente d'un pixel dans l'espace image) et C_{sens} un coefficient de sensibilité au bruit. L'évolution de $\log_{10}(C_{sens})$ est présentée figure 3a. On constate que les courbes d'iso-atténuation sont circulaires, ce qui signifie que l'efficacité de chacun des deux opérateurs sur la réduction du bruit est sensiblement la même. La ligne d'atténuation de 10^{-2} correspond à une demi-largeur de filtrage ou de dérivation de 8 à 9 pixels.

Résolution spatiale

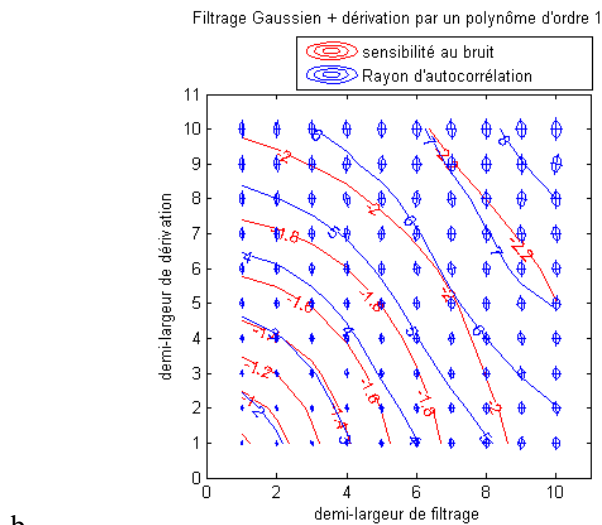
Le seuil de détection d'un événement et la limite à 10 % d'erreur sont présentés figure 3a. L'influence de chaque opérateur reste là encore sensiblement la même. Les seuils de détection trouvés varient de 3 à 12 pixels. La limite à 10 % d'erreur peut atteindre plus de 100 pixels : cela signifie que, s'il est facile de voir un événement, il est en revanche beaucoup plus difficile d'assurer que son intensité est correcte.

La figure 3b présente les résultats obtenus en écrivant la fonction d'auto-corrélation. Les ellipses représentent symboliquement l'excentricité et l'orientation de la zone affectée par le filtrage et la dérivation déjà illustrée Figure 2 ; le rayon moyen des ellipses est donné par les courbes. On remarque que les valeurs trouvées sont proches des valeurs obtenues pour le seuil de détection. Toutefois la forme des courbes est sensiblement différente : c'est l'effet de l'anisotropie de l'opérateur dérivation, observable avec cette approche, contrairement à la précédente.

Sur la base des cartographies de la figure 3, il est possible de déterminer les couples largeur de filtrage / largeur de dérivation optimaux. Pour une atténuation du bruit d'un facteur 100, le seuil de détection moyen est proche de 9 pixels et le seuil à 10 % d'erreur proche de 50 pixels. On observe qu'on obtient un rayon moyen le plus petit possible lorsque le filtrage est le plus large possible et la dérivation la plus faible possible. Ceci conduit à une forme des ellipses la plus circulaire possible.



a.



b.

FIG 3 - Effet du filtrage et de la dérivation
 a. analyse par champs sinusoïdaux de référence,
 b. fonction d'auto-corrélation

Cette analyse est sensiblement différente de celle déjà proposée en 2005 [14]. On note que l'étude avait alors porté sur des outils de filtrage / dérivation unidirectionnels. Une étude identique a été menée sur une dérivation par polynôme de degré 2. Les résultats sont très proches de ceux-ci : la dérivation d'ordre supérieur n'apportant pas d'amélioration sur la résolution spatiale, elle sera réservée aux situations avec des gradients de déformation locaux importants.

4 Conclusions

Ce travail a porté sur l'utilisation des deux principales grandeurs métrologiques que sont la résolution et la résolution spatiale. Il avait pour but d'optimiser, en fonction de l'objectif visé (quantitatif ou qualitatif), le couplage filtrage/dérivation de champ de mesures en fonction de la résolution et de la résolution spatiale. Nous avons montré que l'influence des tailles de dérivation et de filtrage est quasiment la même sur chaque indicateur ; un filtrage large avec une faible dérivation conduit toutefois à des résultats plus intéressants au regard de la fonction d'auto-corrélation.

La résolution spatiale a été déterminée de 2 manières : par une fonction d'auto-corrélation ou par la détection d'un seuil. La différence entre ces deux estimations réside dans le fait que pour la première, nous obtenons la taille d'un ensemble de points corrélés entre eux à plus de 50 %, alors que dans la deuxième nous obtenons la taille détectable d'un ensemble de points, ce qui permet de connaître l'erreur commise sur l'intensité lue. L'utilisateur doit donc choisir sa façon de définir la résolution spatiale. De même, il doit fixer la valeur seuil de la résolution pour optimiser la résolution spatiale.

Références

- [1] Y. Surrel, *Les techniques optiques de mesure de champs : essai de classification*, Colloque Photomécanique, Albi (2004).
- [2] Y. Surrel, *Some metrological issues in optical full-field techniques*, Proc. SPIE Vol. 4777, 220-231 (2002).
- [3] *Standard guide for evaluating non-contacting optical strain measurement systems*, norme ASTM E2208-02 (2002).
- [4] S.P.O.T.S. *Standardisation Project for Optical Techniques of Strain Measurement*, session 15, Proceedings of International Conference on Experimental Mechanics, Bari, (2004).
- [5] YQ Wang, MA Sutton, HA Bruck, HW Schreier, Quantitative Error Assessment in Pattern Matching: Effects of Intensity Pattern Noise, Interpolation, Strain and Image Contrast on Motion Measurements, Strain, volume 4, Issue 2, 160-178 (2009).
- [6] R. Cordero, J. Molimard, A. Martinez, F. Labbé, Uncertainty Analysis of Temporal Phase-Stepping Algorithms for Interferometry, optics communications, 275, 144-155 (2007).
- [7] Y. Surrel, *Additive noise effect in digital phase detection*, Applied Optics, 36, 271-276 (1997).
- [8] X. Fayolle, S. Calloch, F. Hild, Controlling testing machines with digital image correlation, Experimental Techniques, 31, 3, 57-63 (2007).
- [9] M. Bornert, F. Brémand, P. Doumalin, J.C. Dupré, M. Fazzini, M. Grédiac, F. Hild, S. Mistou, J. Molimard, J.J. Orteu, L. Robert, Y. Surrel, P. Vacher, B. Wattrisse, *Assessment of Digital Image Correlation measurement errors: methodology and results*, Experimental mechanics, (2009) en ligne.
- [10] J. Molimard, C. Badulescu, M. Bornert, J.C. Dupré, S. Equis, M. Grédiac, P. Picart, R. Rotinat, V. Valle, *Caractérisation métrologique des méthodes de décodage d'images à porteuses spatiales*, XIX^{ème} Congrès Français de Mécanique, 24-28 août 2009, Marseille, France.
- [11] R. Cordero, *The uncertainty of experimental derivatives: application to strain measurement*, Measurement Science and Technology, vol. 15, 2381-2388 (2004).
- [12] R. R. Cordero, J. Molimard, F. Labbé, A. Martínez, *Strain maps obtained by phase-shifting interferometry: An uncertainty analysis*, Optics Communications, 281, 8, 2195-2206 (2008).
- [13] J. Molimard, M. Querry, P. Vergne, I. Krupka, M. Hartl, *Calculation of pressure distribution in EHD point contacts from experimentally determined film thickness*, Tribology International, Volume 38, Issue 4, 391-401 (2005).
- [14] J. Molimard, A. Vautrin, Traitement fréquentiel d'un signal aléatoire : première approche, présentée au congrès MTOI, Marseille Nov. 2005.