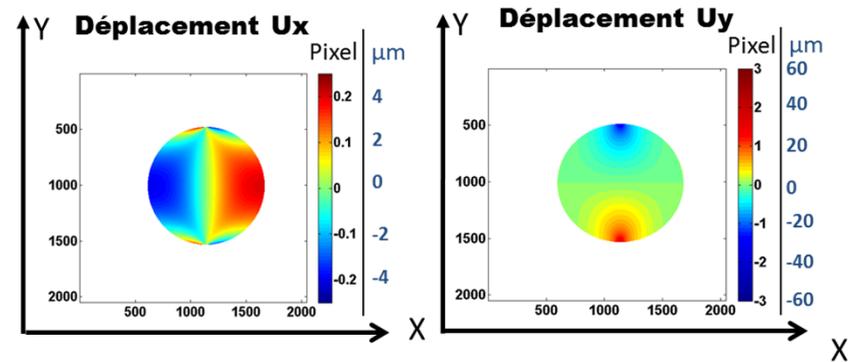
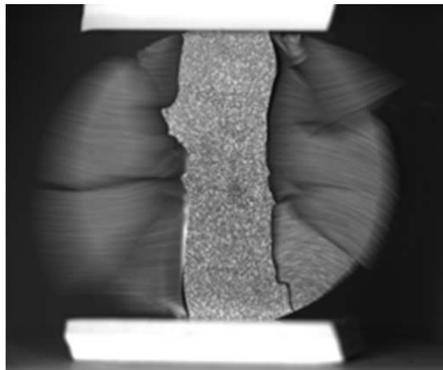


Mesures de champs cinématiques par corrélation d'images

Camille GAZEAU



En collaboration avec :



J. Gillibert, S. Kaligora, E. Blond

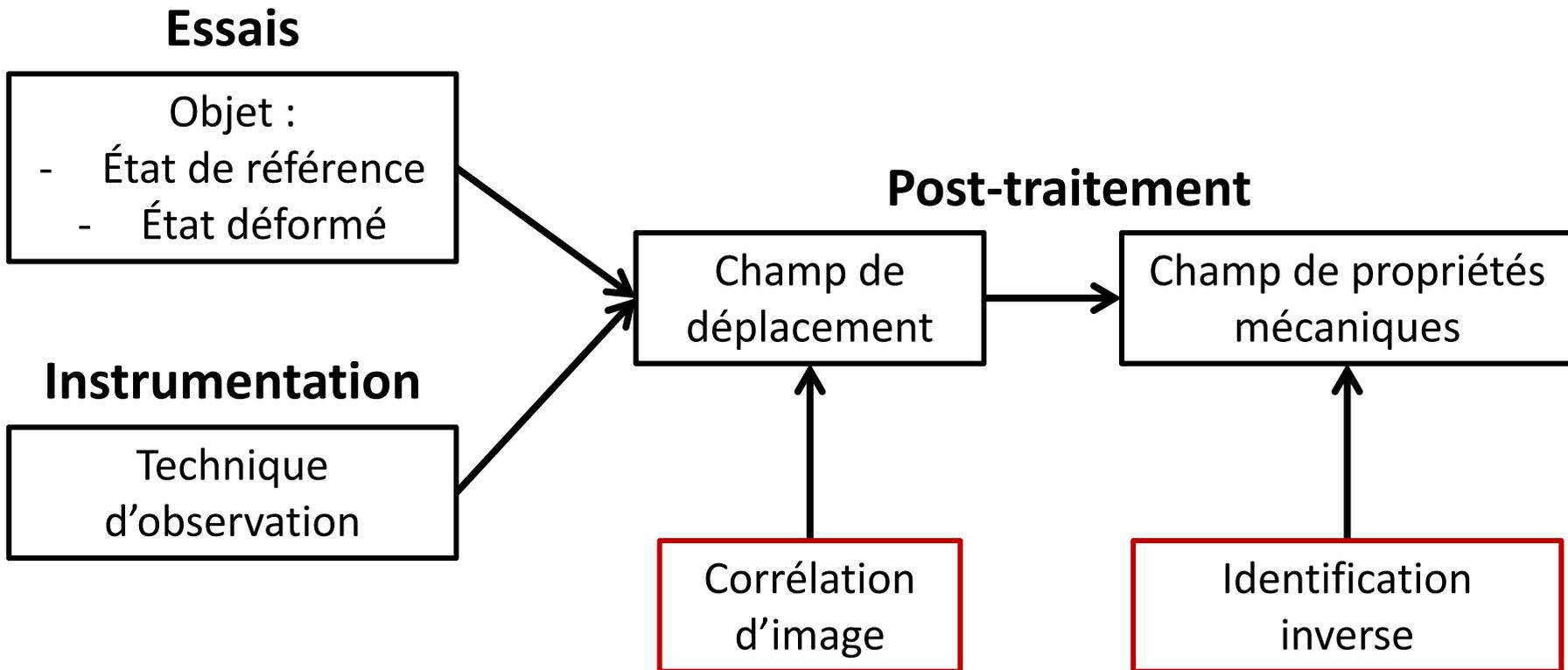


M. François



S. Brassamin, D. Zanghi, A. Coulon, E. De Bilbao

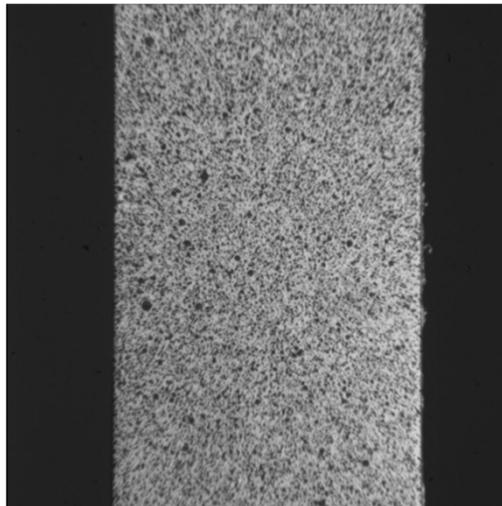
Problème d'identification des propriétés mécaniques



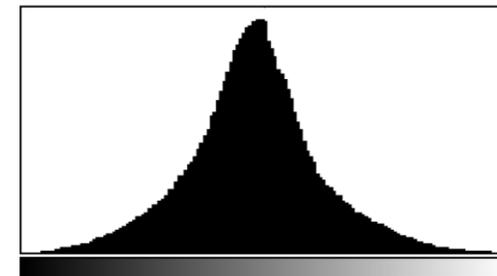
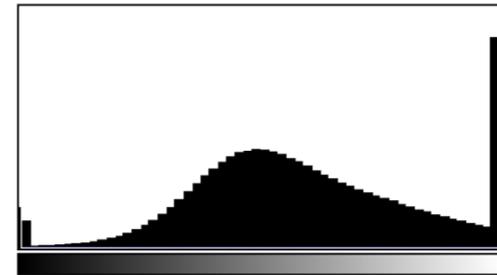
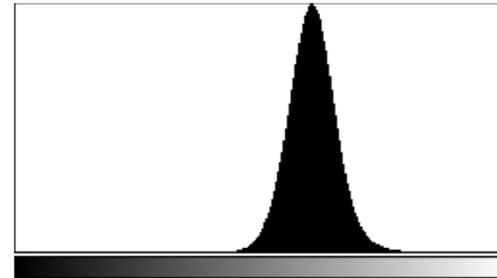
M. Grediac and F. Hild, Full-Field Measurements and Identification in Solid Mechanics, Wiley, 2013.

Précautions expérimentales

- ✓ Avoir une image riche en niveau de gris
→ Réalisation d'un mouchetis riche et aléatoire



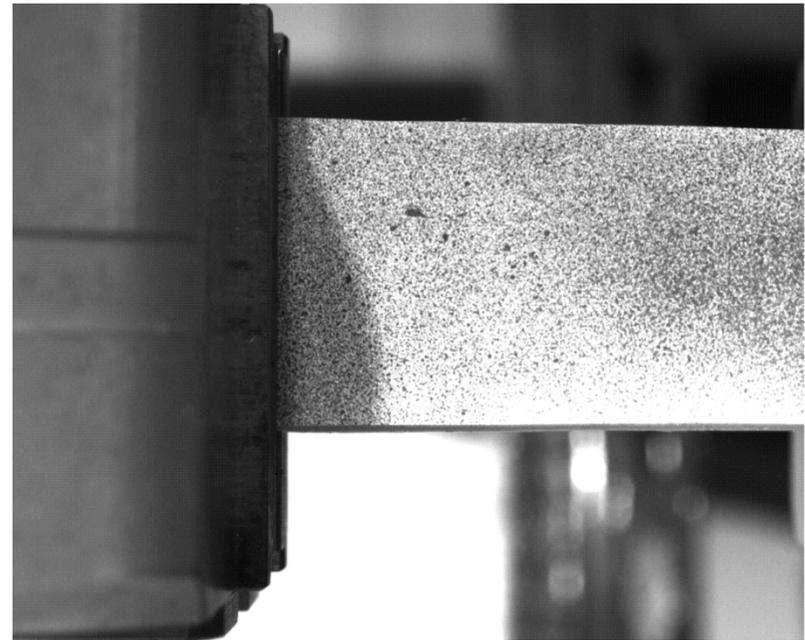
Influences :



Précautions expérimentales

- ✓ Avoir une image riche en niveau de gris
- L'éclairage

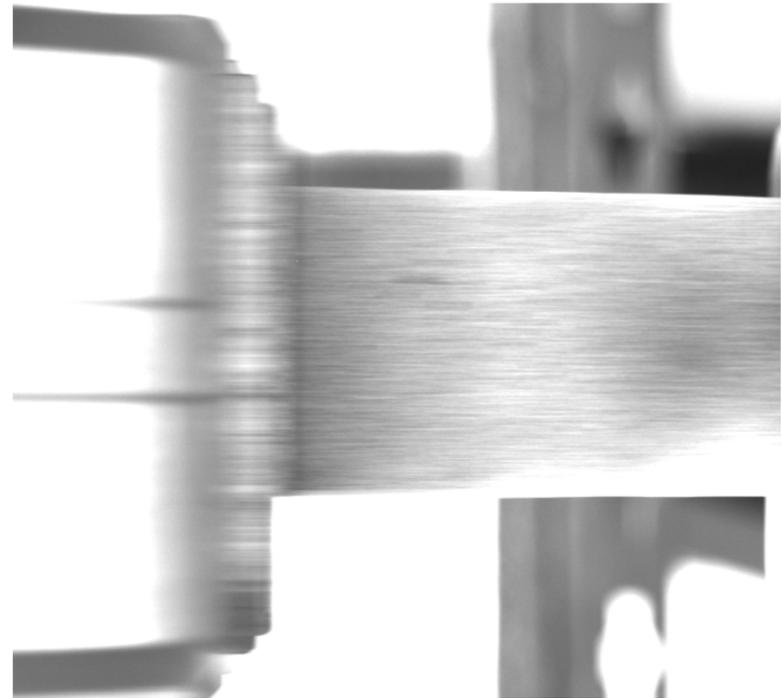
Influences :



Précautions expérimentales

- ✓ Avoir une image riche en niveau de gris
- ✓ L'éclairage
- Temps d'exposition de la caméra

✓ Influences :



Précautions expérimentales

- ✓ Avoir une image riche en niveau de gris
- ✓ L'éclairage
- ✓ Temps d'exposition de la caméra
- Déplacement hors plan de l'objet
- Orientation de la caméra

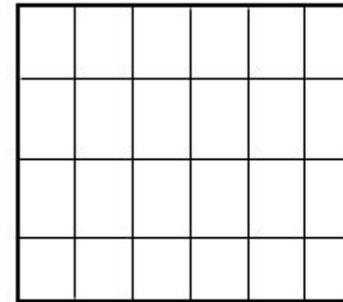
✓ Influences :



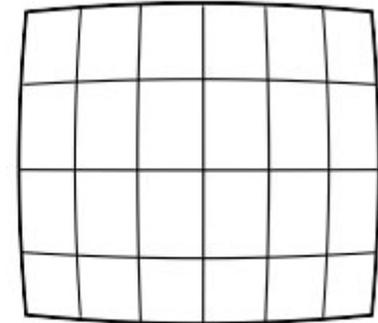
Précautions expérimentales

- ✓ Avoir une image riche en niveau de gris
- ✓ L'éclairage
- ✓ Temps d'exposition de la caméra
- ✓ Déplacement hors plan de l'objet
- ✓ Orientation de la caméra
- La distorsion de l'image

✓ Influences :



objectif sans distorsion



objectif avec distorsion

Corrélation d'images

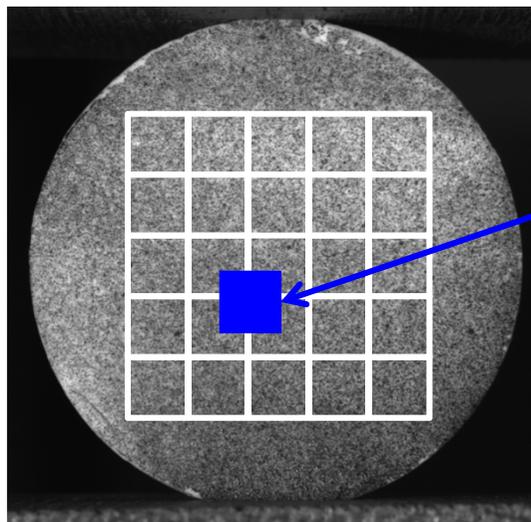


Image de référence

Zone
d'intérêt
(ZOI)

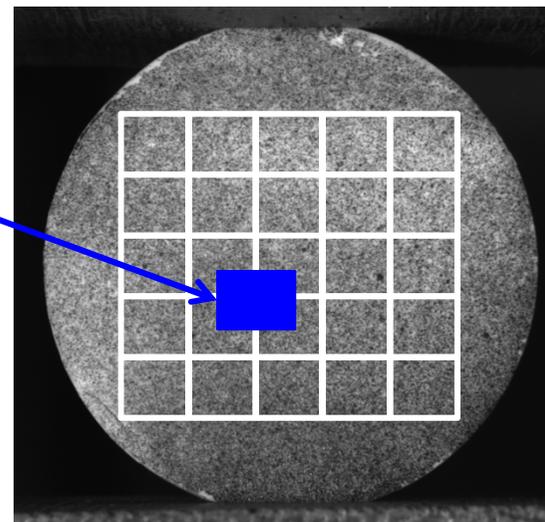


Image déformée

$$\downarrow$$
$$f(\underline{M}_i)$$

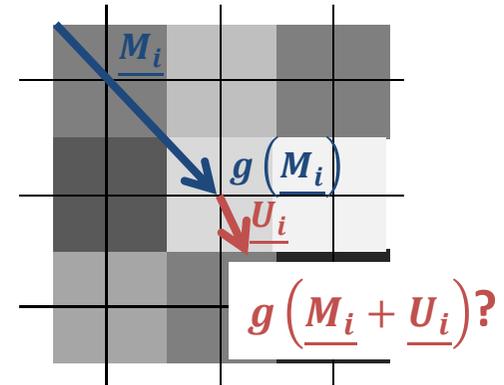
Conversion en niveau de gris

$$\downarrow$$
$$g(\underline{N}_i) = g(\underline{M}_i + \underline{U}_i(\underline{M}_i)) = g(\varphi(\underline{M}_i))$$

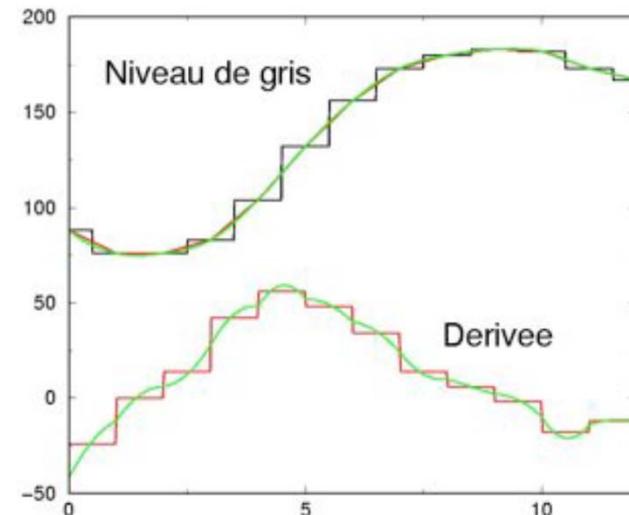
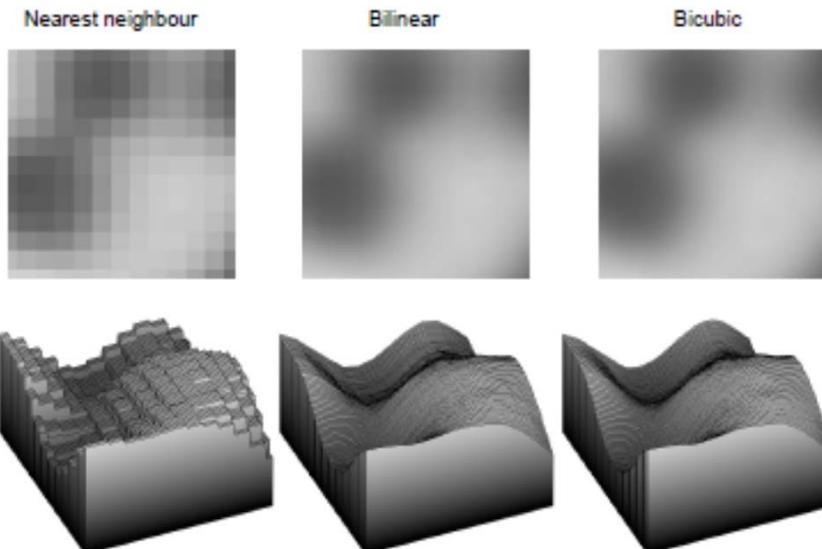
Objectif : Obtenir \underline{U}_i ?

Influence de l'interpolation

- ✓ Que vaut $g(\underline{M}_i + \underline{U}_i(\underline{M}_i))$?
 - À cause de la numérisation, g n'est connu exactement qu'aux points x de la grille.



- ✓ Utilisation d'une interpolation pour avoir des déplacements à l'échelle subpixel



Algorithme de minimisation

- ✓ Hypothèse de la conservation du flux optique :

$$f(\underline{M}_i) = g(\underline{N}_i) = g(\underline{M}_i + \underline{U}_i(\underline{M}_i))$$

- ✓ En réalité, on a du bruit du capteur ou de la variation de l'éclairage, donc on cherche le vecteur déplacement \underline{U}_i par une minimisation du coefficient de corrélation.

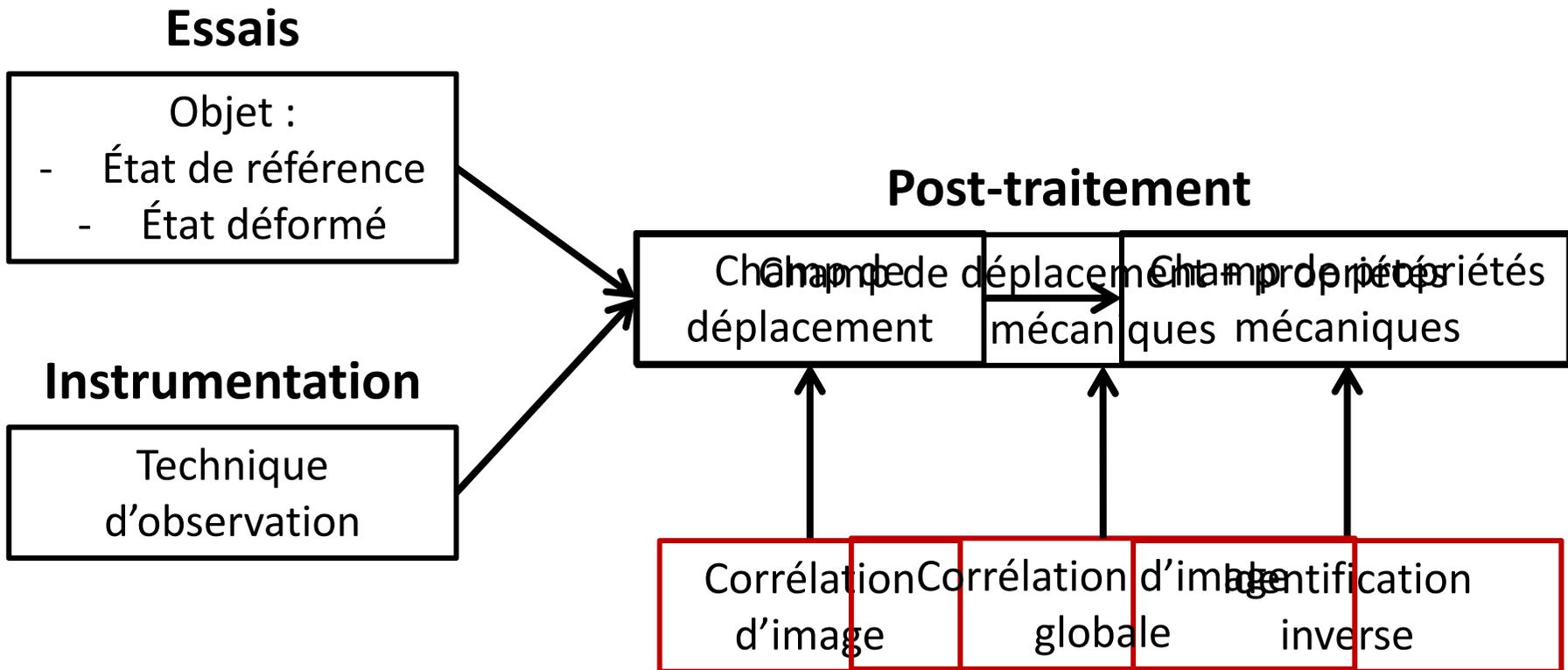
- ✓ 3 formes possibles du coefficient de corrélation :

Différence finie	Relation des moindres carrés	Produit scalaire
$\varepsilon = \sum_{i \in ZOI} f(\underline{M}_i) - g(\varphi(\underline{M}_i))$	$\varepsilon = \sum_{i \in ZOI} \left(f(\underline{M}_i) - g(\varphi(\underline{M}_i)) \right)^2$	$\varepsilon = \sum_{i \in ZOI} f(\underline{M}_i) \cdot g(\varphi(\underline{M}_i))$
	Corréli de F. Hild	7D de P. Vacher
	Adapter aux petites déformations	Adapter aux grandes déformations ou aux milieux discontinues

Brémand et al., Technique de l'ingénieur, 2011, R 1 850 v2.

→ Utilisation d'algorithme d'optimisation : Newton-Raphson ou Levenberg-Marquart

Problème d'identification des propriétés mécaniques : Corrélation d'image globale



M. Grediac and F. Hild, Full-Field Measurements and Identification in Solid Mechanics, Wiley, 2013.

Corrélation d'image globale

✓ Hypothèse sur le déplacement des facettes de corrélation.

- Supposition d'une loi de comportement : élastique linéaire, ...
- Utilisation d'une simulation éléments finis pour calculer le déplacement théorique des facettes.

$$\underline{u}_i(\underline{M}_i) = \sum a_i \underline{\varphi}_i(\underline{M}_i)$$

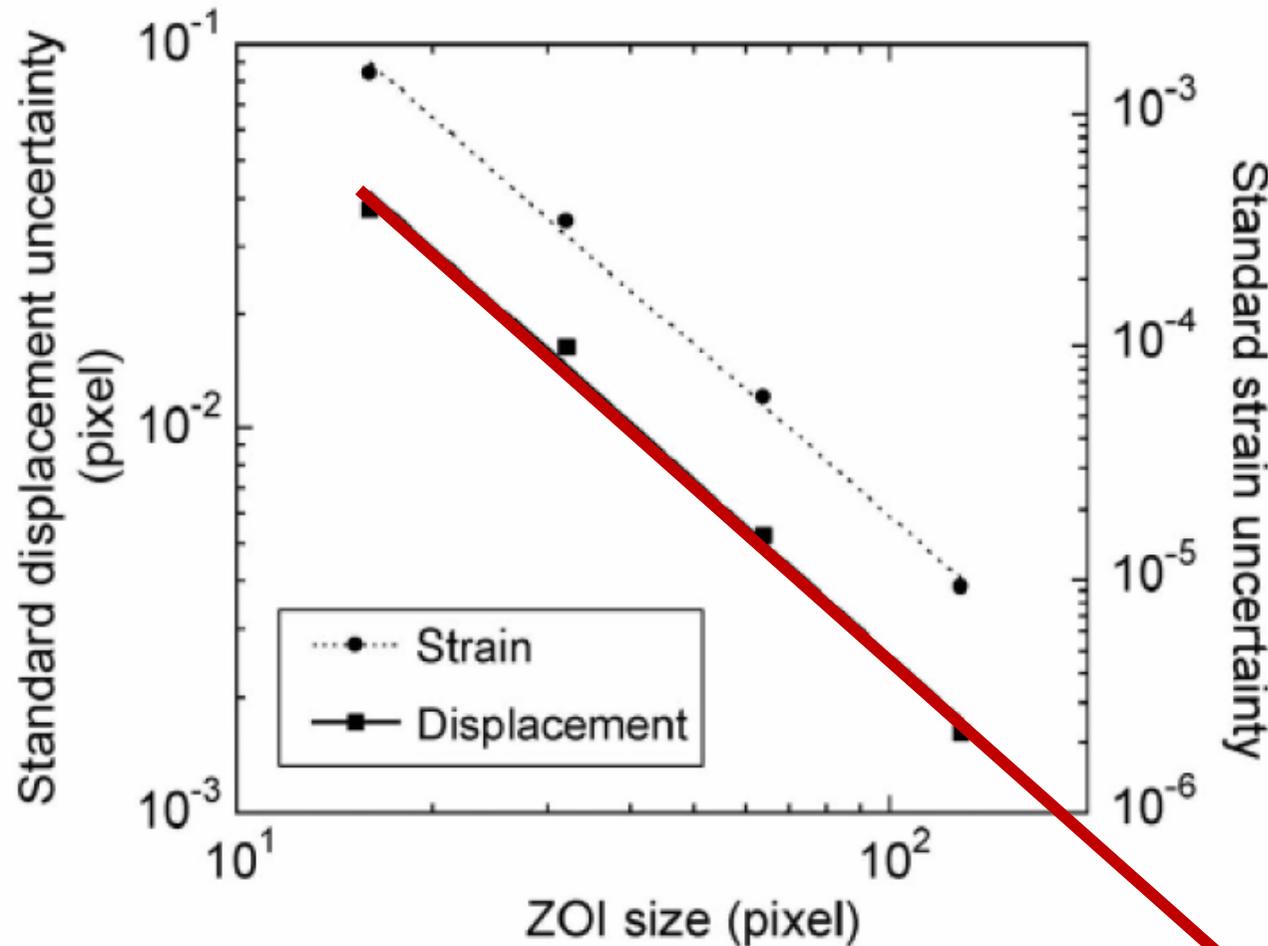
Hild et al., Strain, 2006 (42) 69-80.

✓ Problème de minimisation devient un problème linéaire

$$M_{ij} a_j = b_j$$

- Temps de calcul réduit
- Moins de problème de divergence
- Gain en précision de mesure

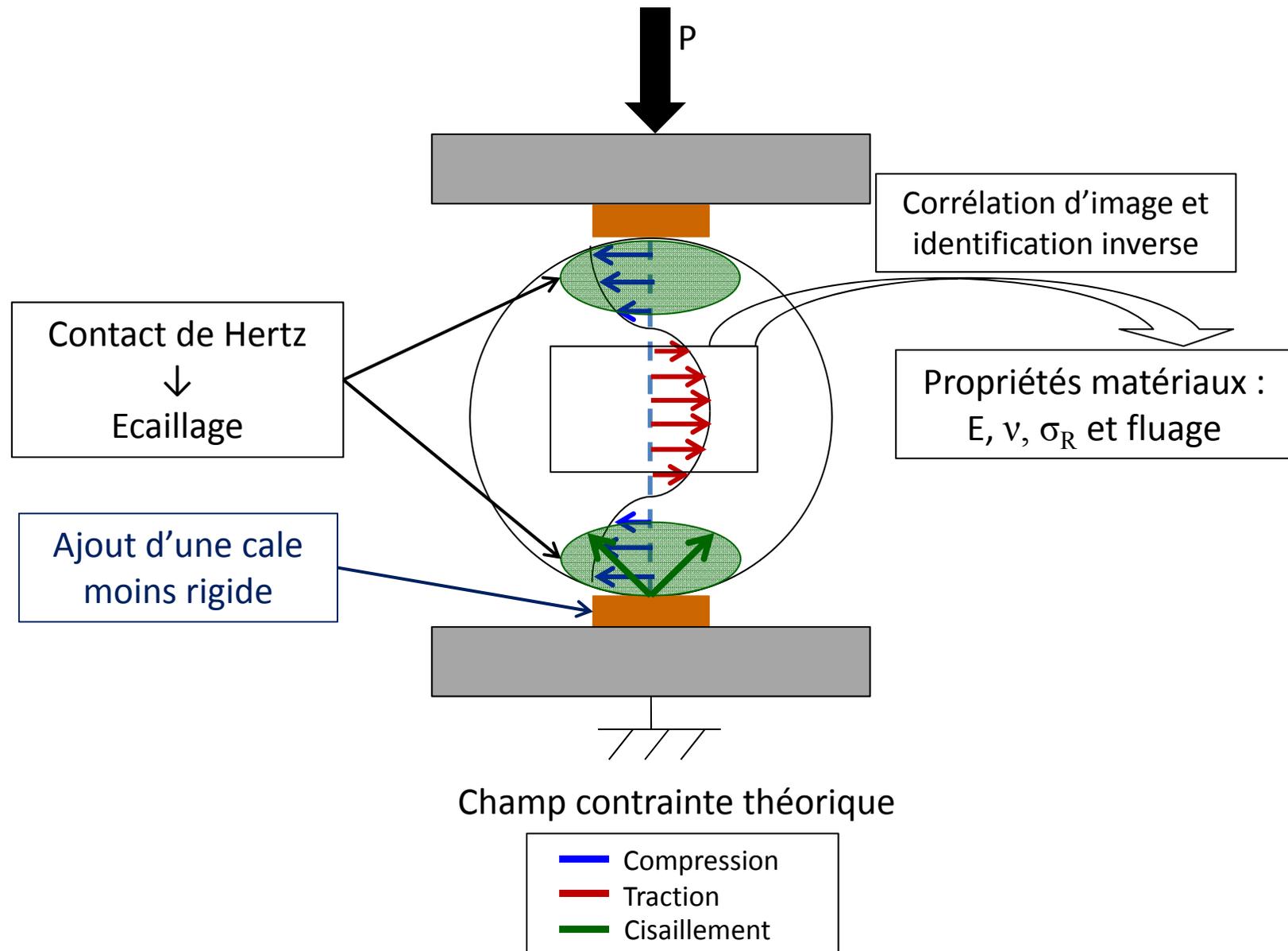
Incertitudes sur les déplacements et les déformations



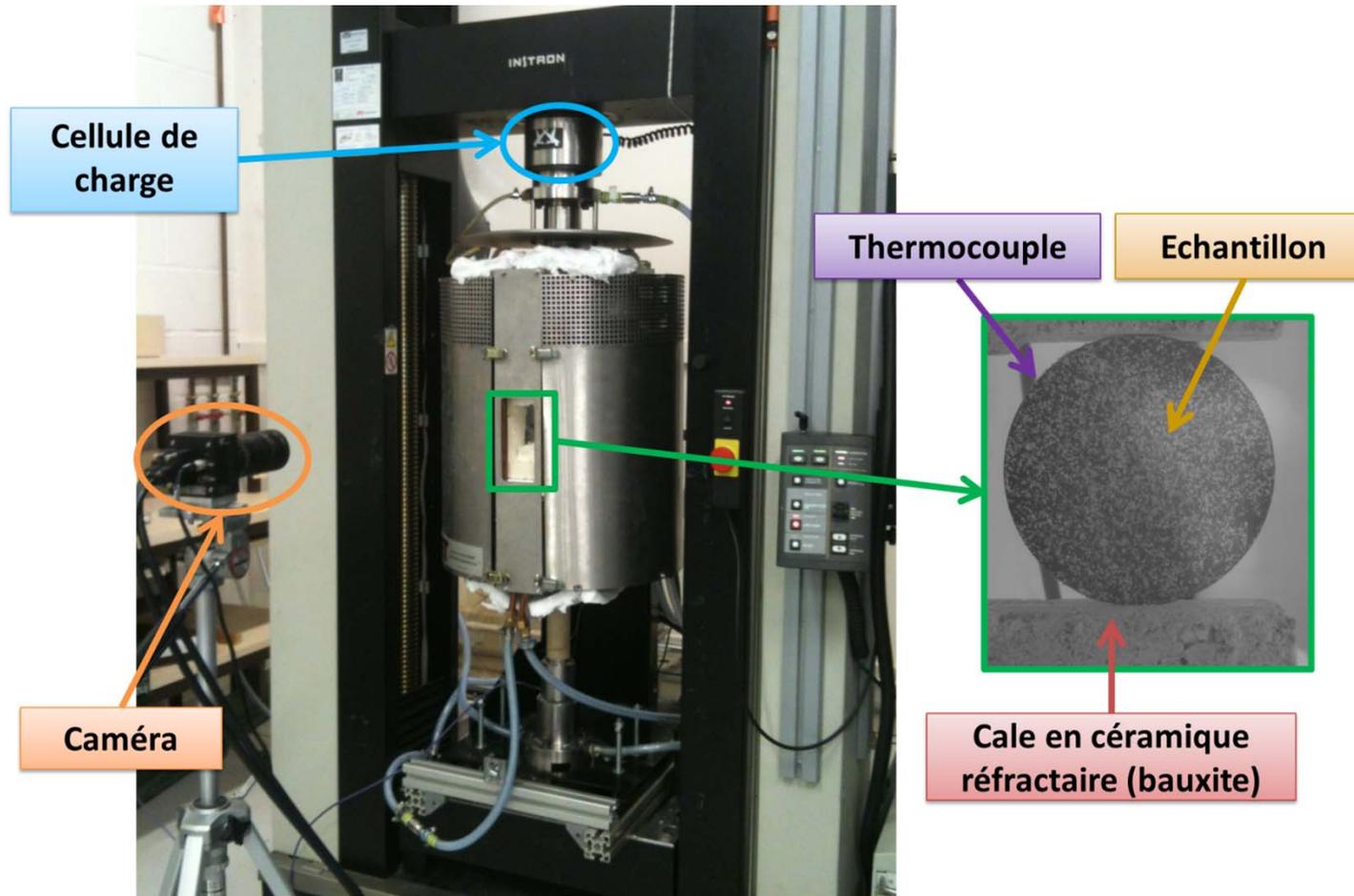
Hild et al., Strain, 2006 (42) 69-80.

Plus la taille de la facette est élevée, plus l'incertitude est faible.
→ Idéale, 1 seule facette

Préliminaire : Essai de compression diamétrale



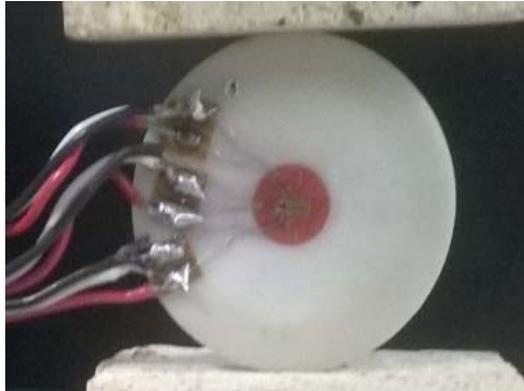
Dispositif expérimental



Four avec une fenêtre de visualisation

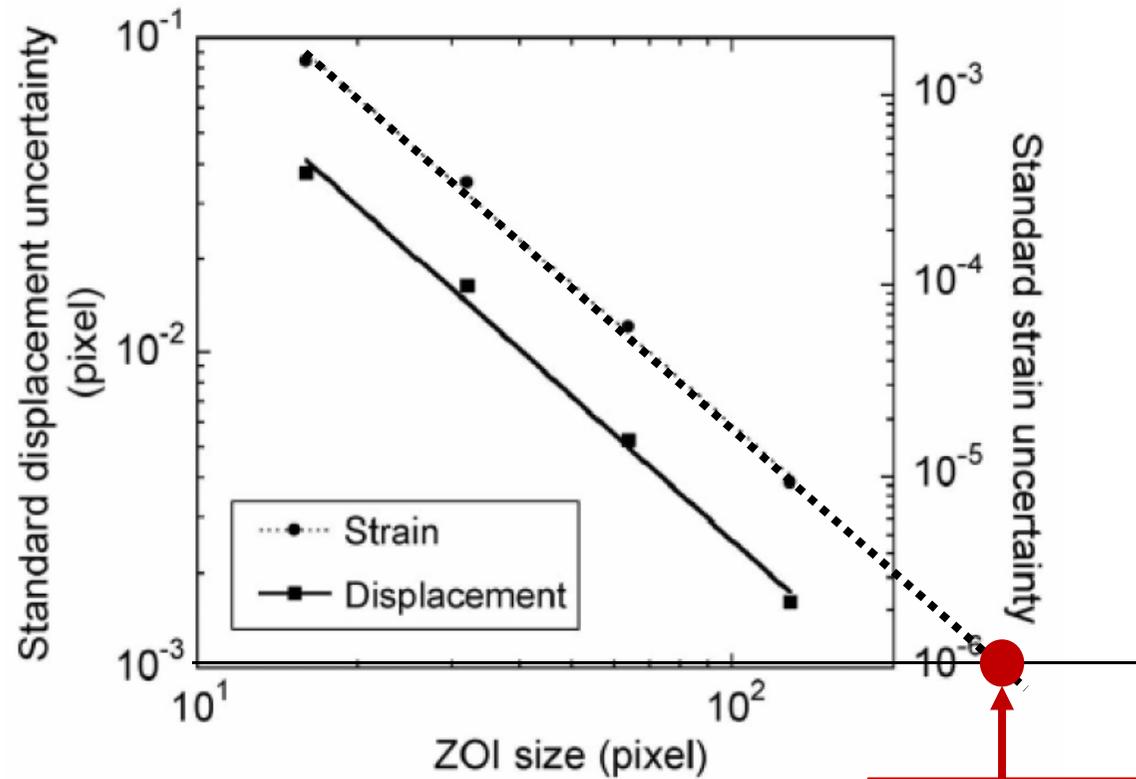
Test préliminaire

Expérience



Déformations mesurées :
 10^{-5} à $1 \cdot 10^{-4}$

Déplacements \approx **$0,05 \mu\text{m}$**

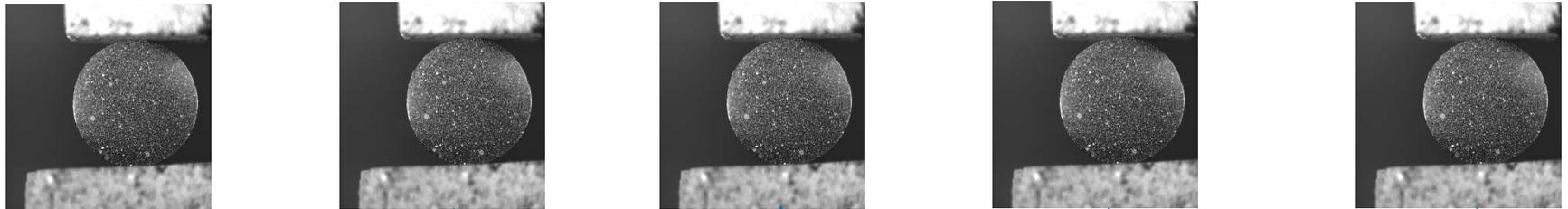


Hild et al., Strain, 2006 (42) 69-80.

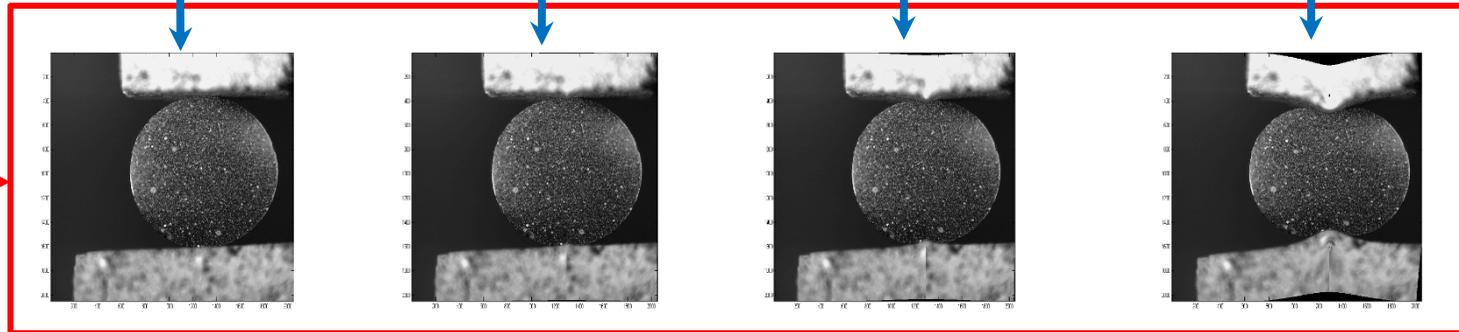
Incertitude acceptable

→ Méthode de corrélation d'image globale sur l'ensemble de l'échantillon

Corrélation d'image globale (I-DIC)



$\underline{u}(F, E_0, \nu_0)$



Déformé numériquement

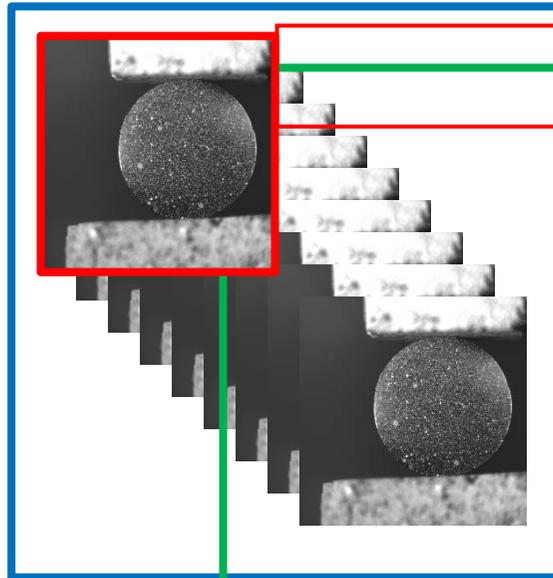
Ici, champ de déplacement

$$U(Z) = -\frac{F}{2\pi Ee} \left(2(1-\nu) \frac{Z}{R} + (\nu-3) \log \left(\frac{R+Z}{R-Z} \right) + (1+\nu) \left(\frac{R+Z}{R+\bar{Z}} - \frac{R-Z}{R-\bar{Z}} - \log \left(\frac{R+\bar{Z}}{R-\bar{Z}} \right) \right) \right)$$

Hypothèse :
Loi de comportement + chargement
→ Champ de déplacement

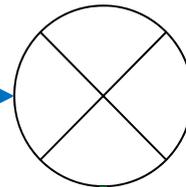
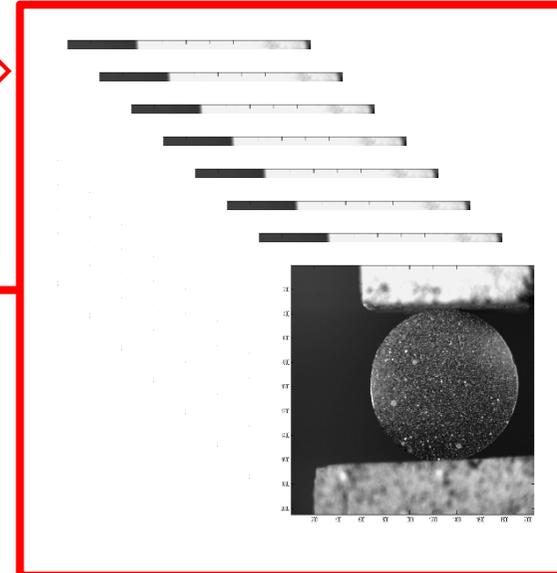
Corrélation d'image globale (I-DIC)

Images réelles



$f(F, E_0, \nu_0)$

Images théoriques



Non

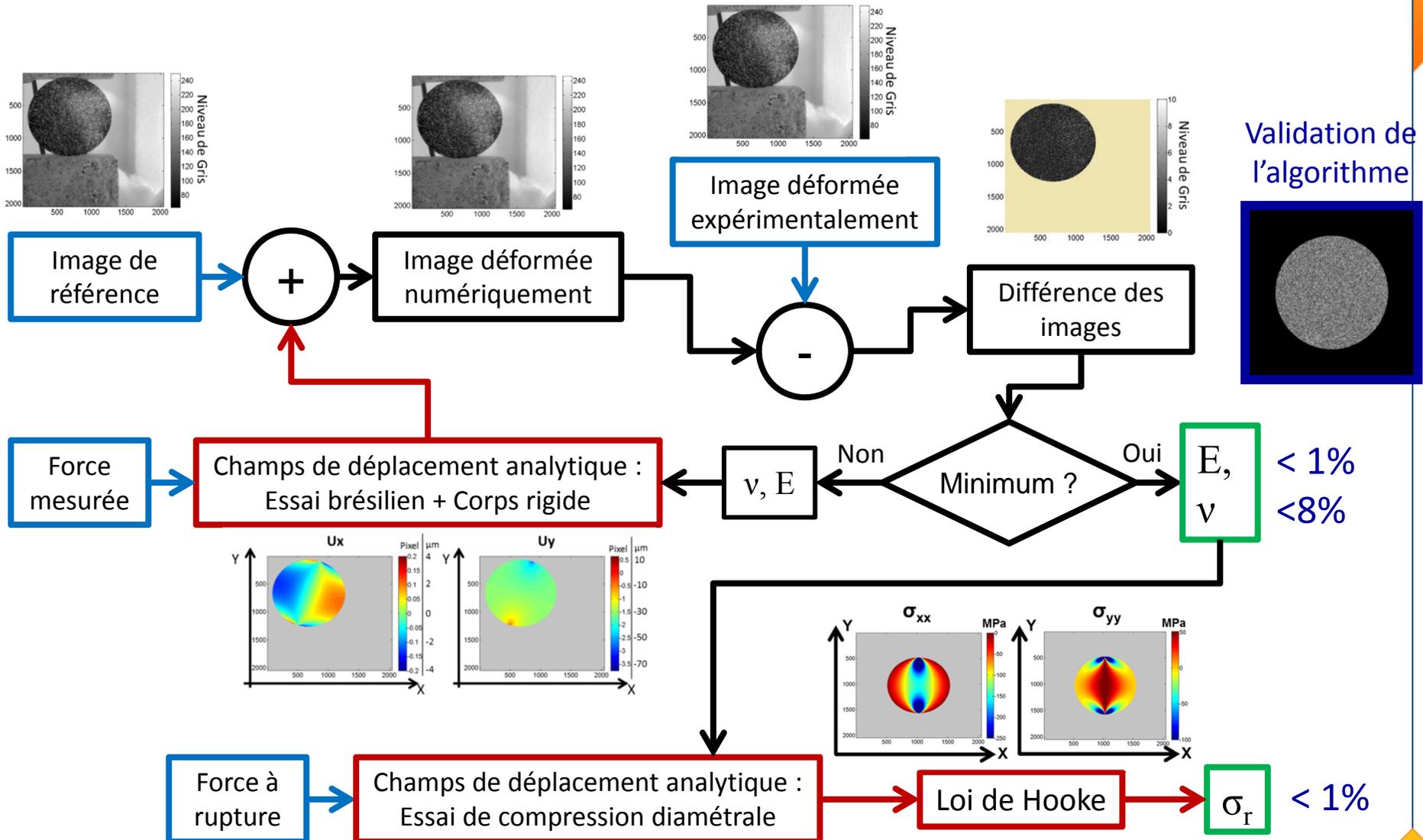
$$\sum_{image} \sqrt{\sum_{pixel} (Im_{real} - Im_{theoretical})^2} \leq Criteria$$

Oui, $E = \dots$

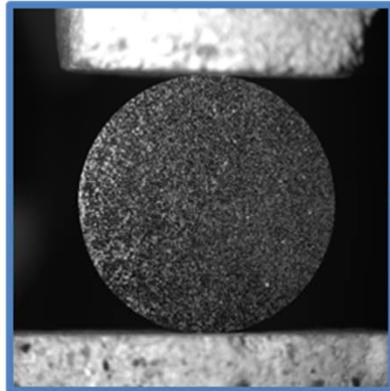
$\nu = \dots$

Algorithme de post-traitement : Méthode I-DIC

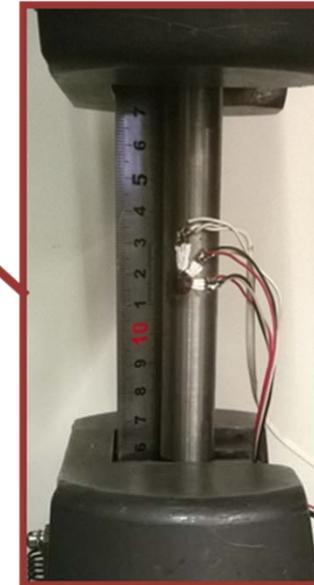
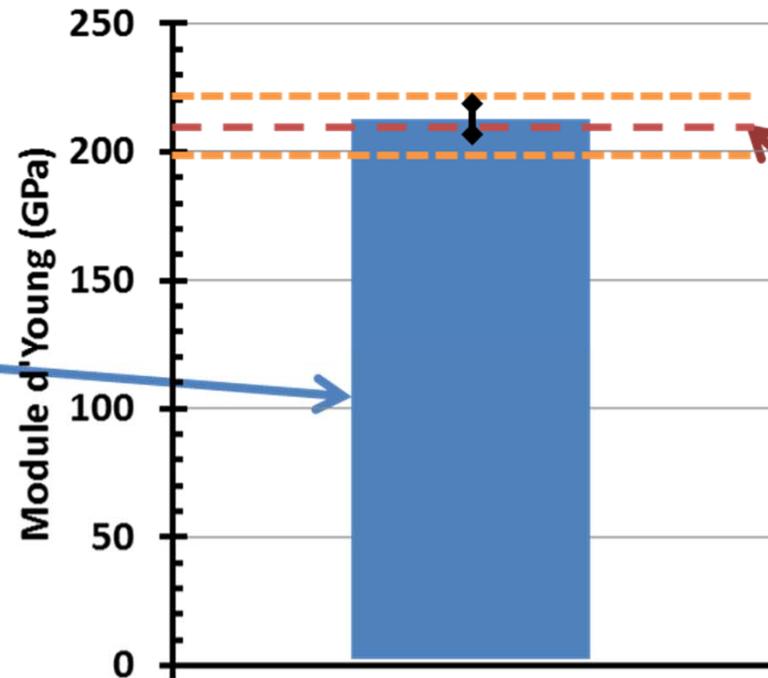
Programme développé sur la base de DigImCo en collaboration avec M. François de l'institut



Validation du protocole expérimental et procédure de post-traitement à 20°C



Essai brésilien
Acier, 20°C



Traction
Acier, 20°C

Moins de 1% sur le module d'Young
Moins de 8% sur le coefficient de Poisson

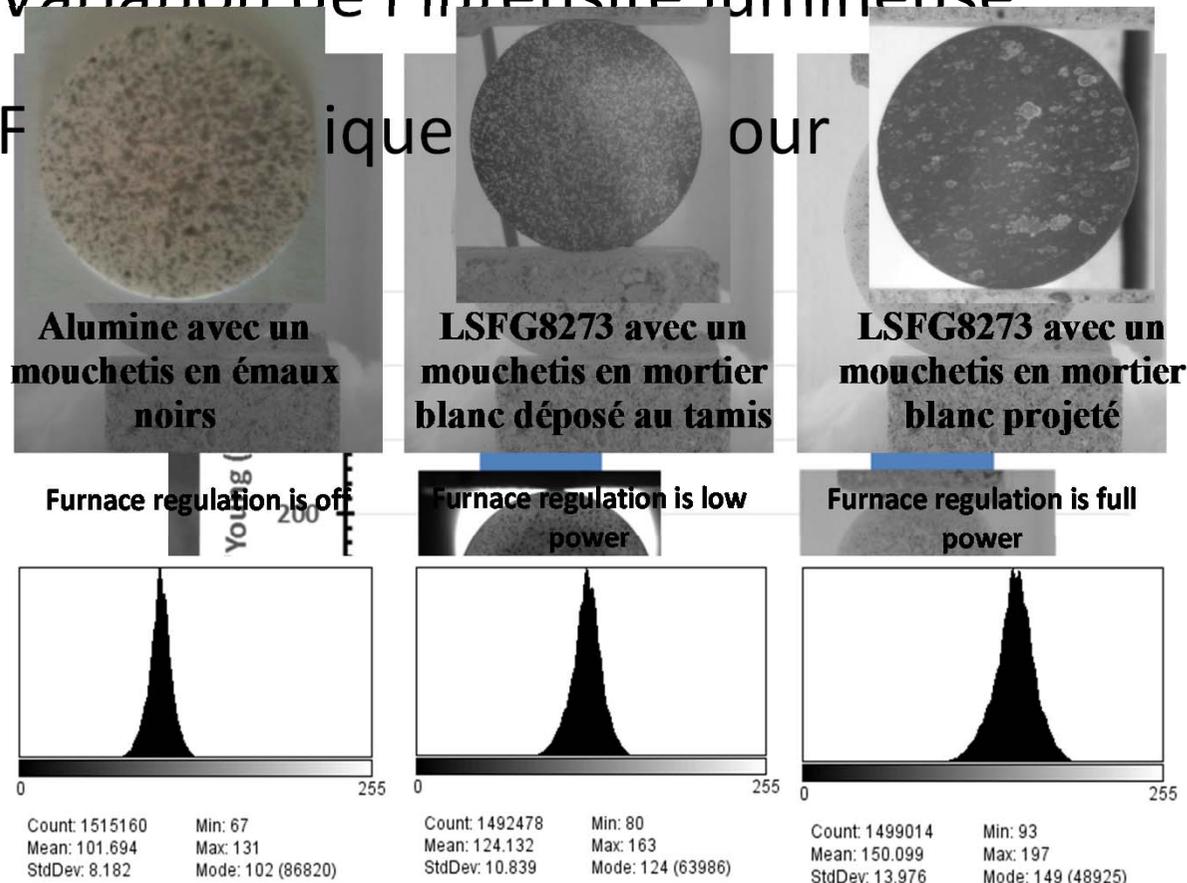
Adaptation du protocole expérimental à haute température

- Stabilité du mouchetis à haute température

→ Développer avec l'aide de M.-L. Bouchetou 

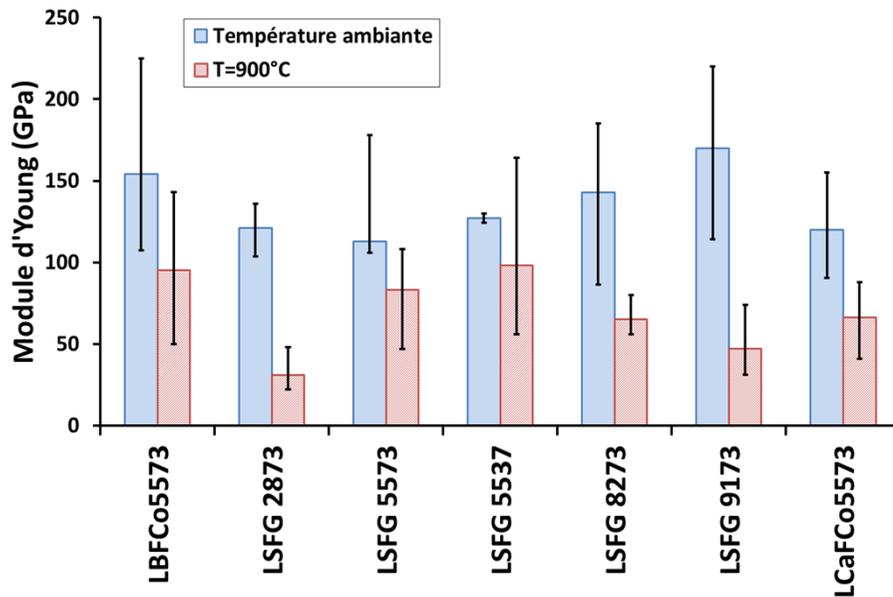
- Variation de l'intensité lumineuse

- Fabrication pour



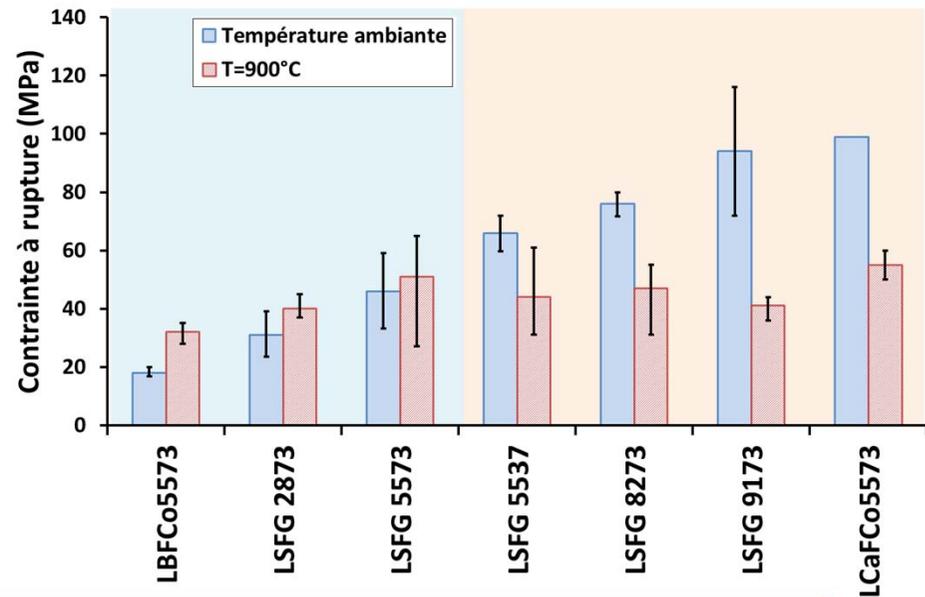
Gazeau et al., *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2015 (35) 3853-3861.

Comparaison entre les différentes compositions



Diminution du module d'Young à 900°C

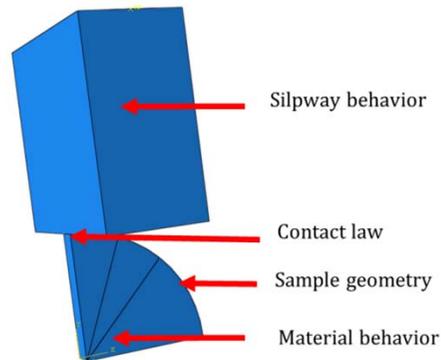
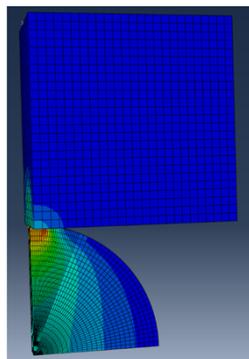
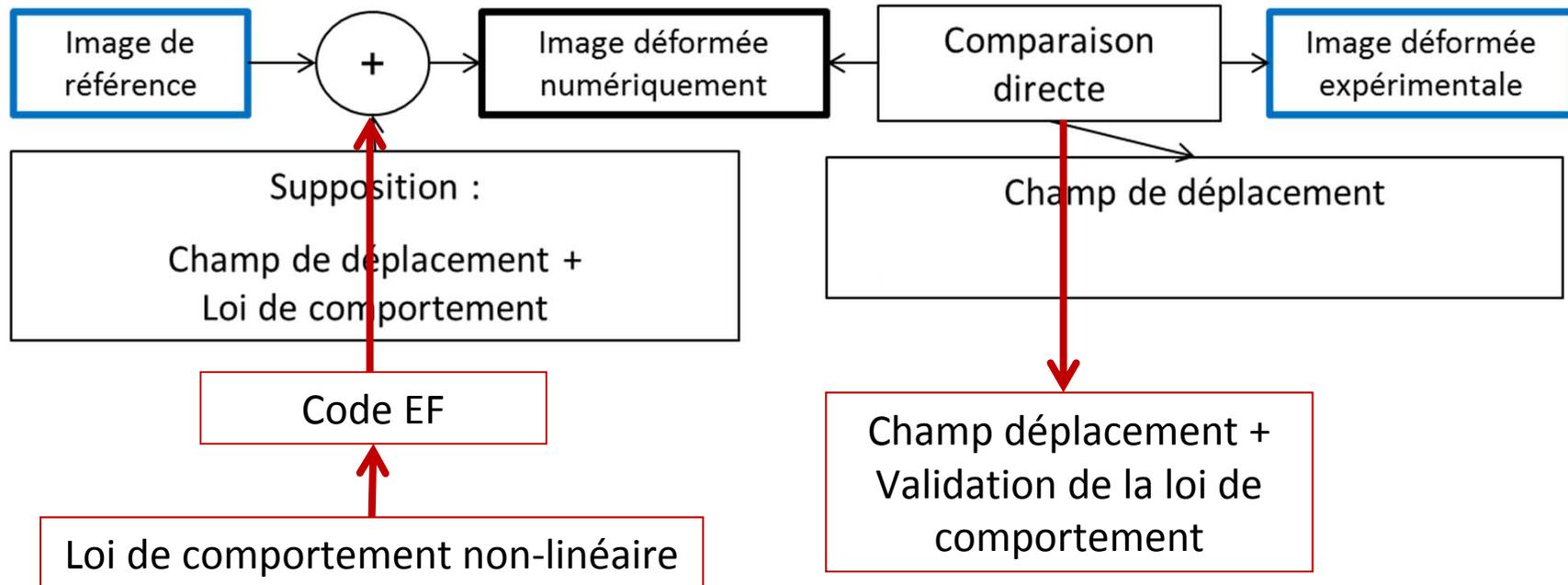
Deux catégories d'évolution de la contrainte à rupture avec la température



Propriétés élastiques à température ambiante non représentatives de celles à 900°C

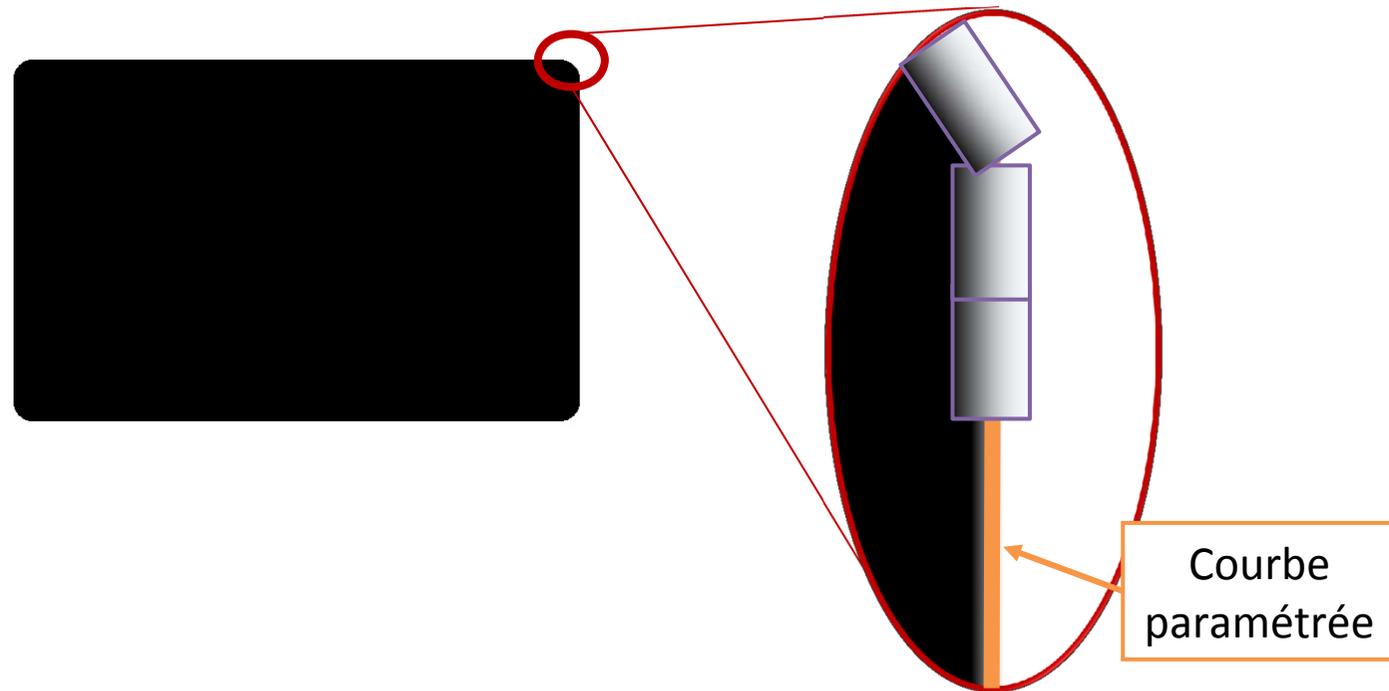
Perspectives

Méthode I-DIC



Adaptation de la méthode I-DIC pour la détection de contour par corrélation d'images virtuelles

- ✓ Problématique de la détection de contour

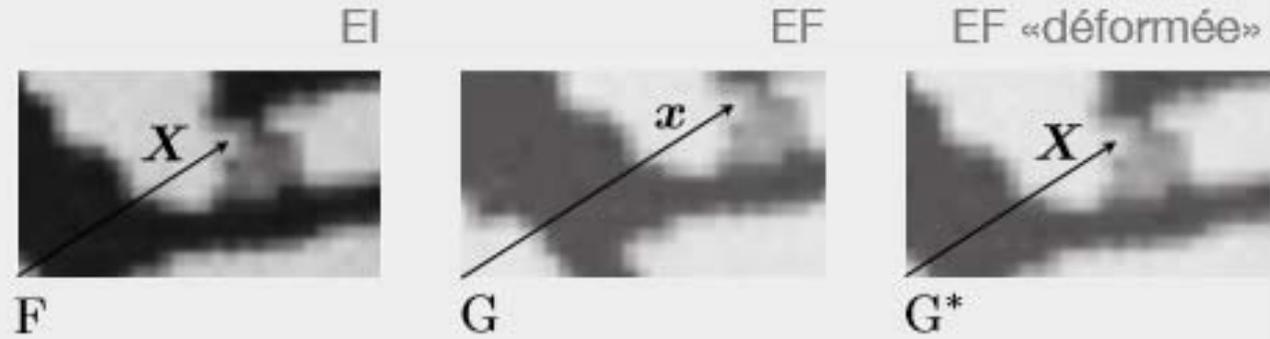


- ✓ Utilisation d'une image virtuelle que l'on vient positionner au niveau du contour sur une courbe paramétrée

Problème à résoudre commun VIC-DIC

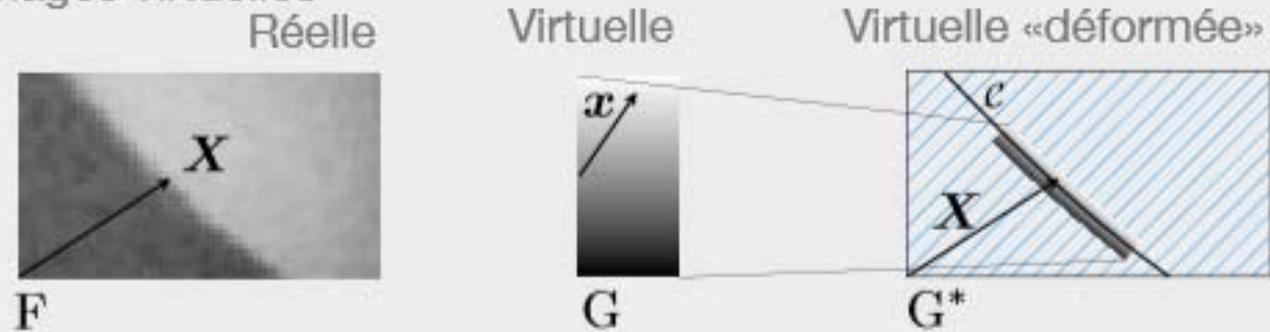
- **DIC** Corrélation d'images

Une image EI
 Une image EF
 Une base de
 champs de
 position (ou dép.)



- **VIC** Corrélation d'images virtuelles

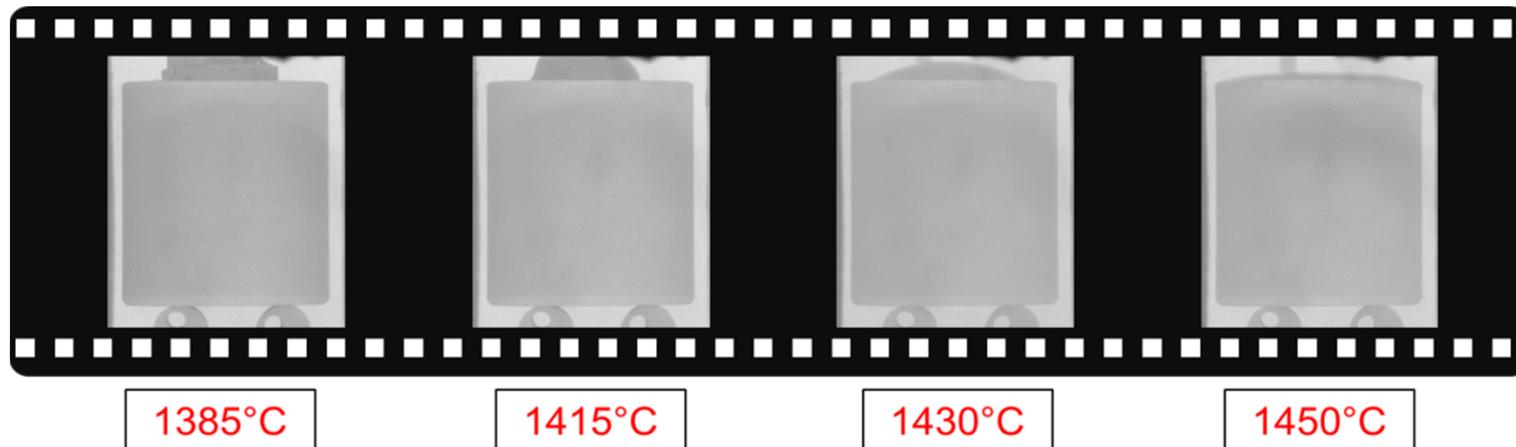
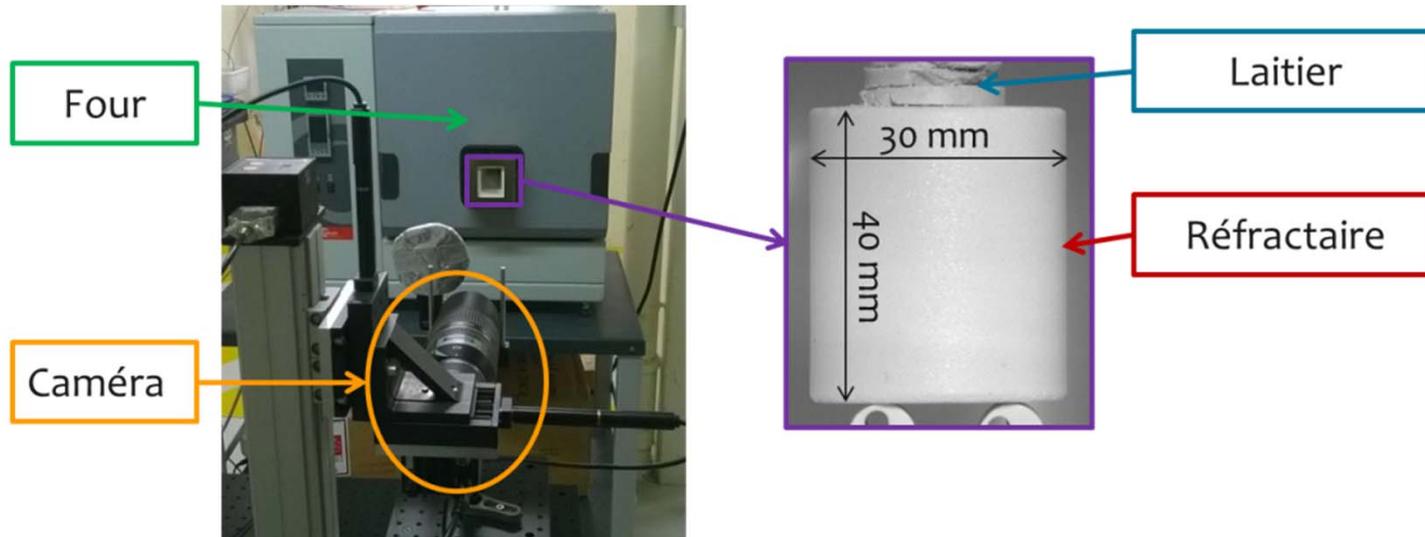
Une image
 Une base de
 courbes



Soit : $\vec{x} = \vec{x}(\vec{X}; \lambda_1, \dots, \lambda_n)$ champ 2D (DIC) ou $\sim 1D$ (VIC)

Semin et al., *Euro. Phys. J.*, 2011 (56) 1-10.

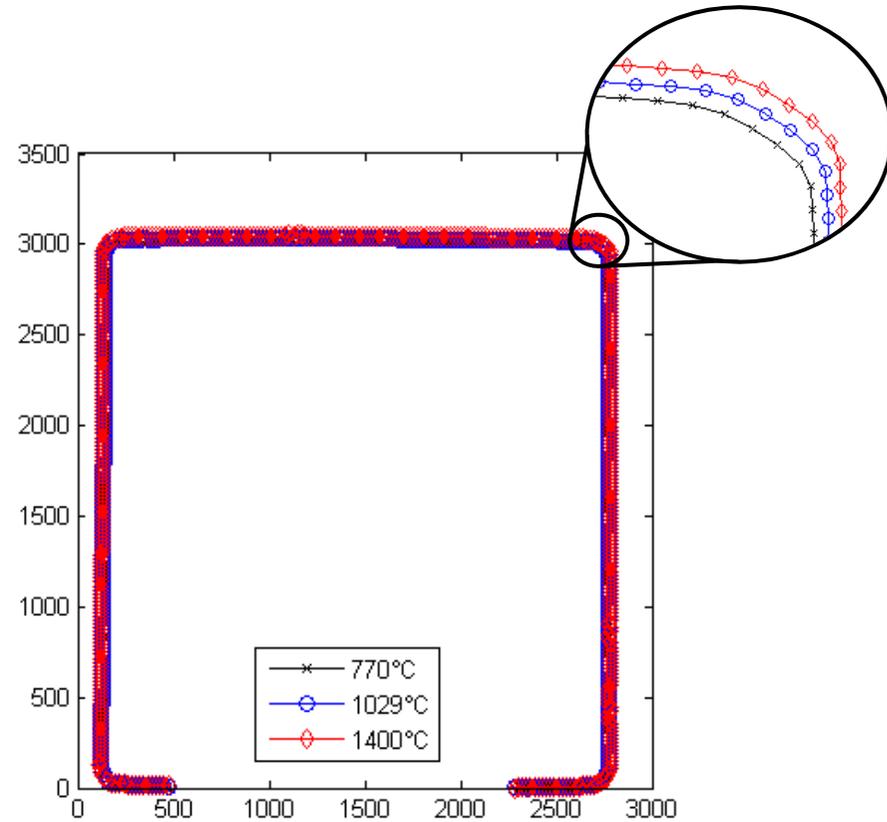
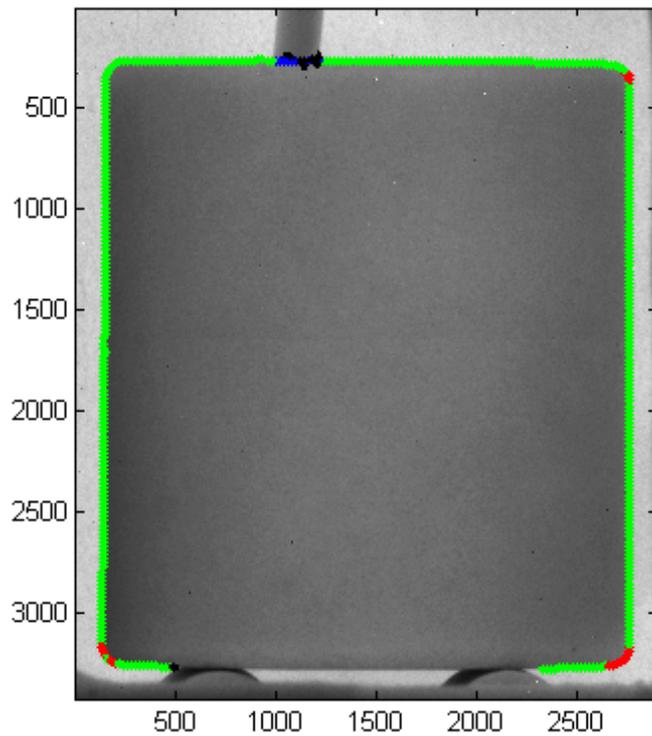
Etude de la déformation des réfractaires sous l'effet de la corrosion par un laitier à 1450°C



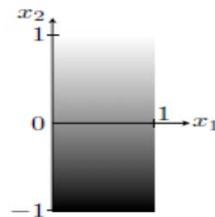
Mise en place de l'algorithme de post-traitement s'appuyant sur la VIC
en collaboration avec M. François de l'institut

Etat actuel de l'algorithme de post-traitement

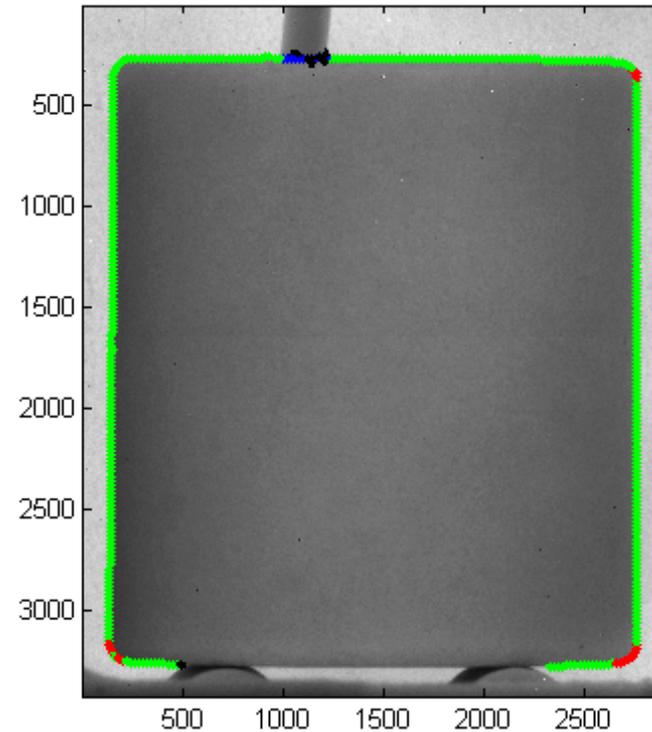
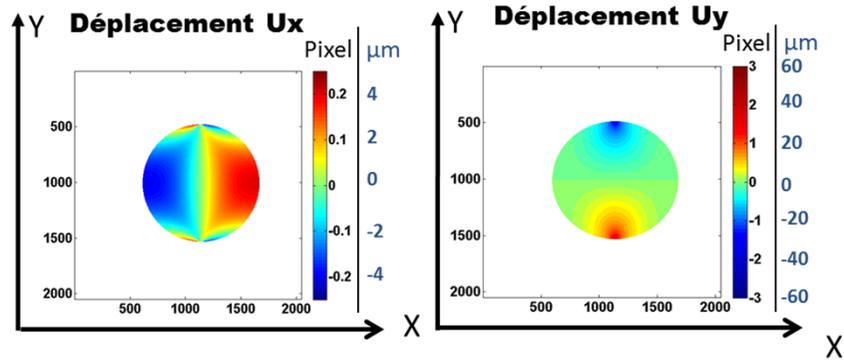
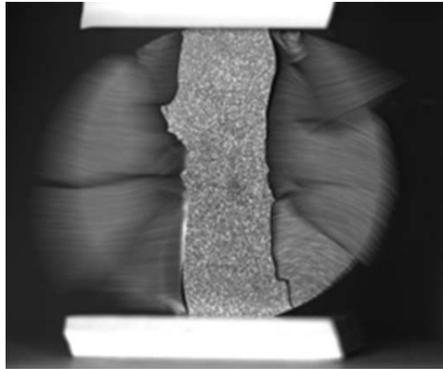
- ✓ Adapter le programme Funambule de Marc François du GeM



Détection grossière du contour à l'aide d'un motif virtuel en niveau de gris

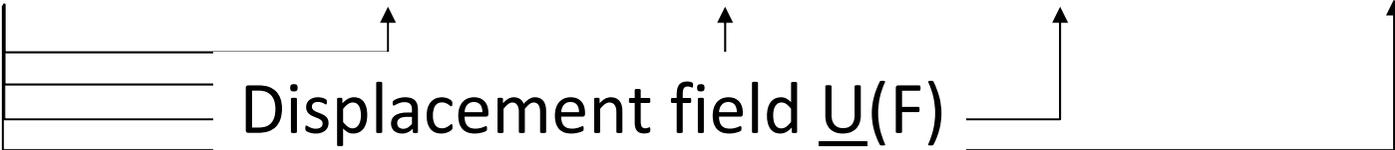
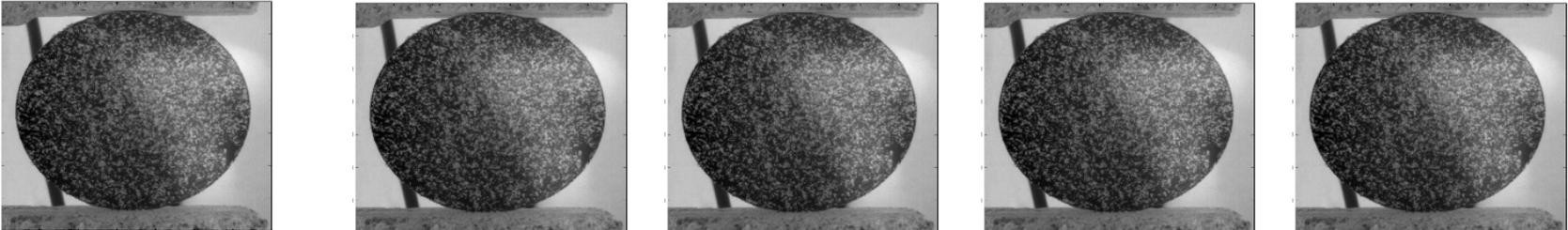


Merci pour votre attention

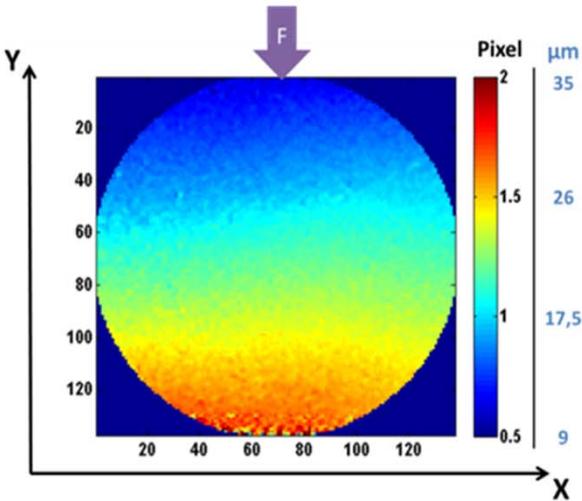


*Remerciements à Marc, Jean, Éric et Selom pour
leur collaboration*

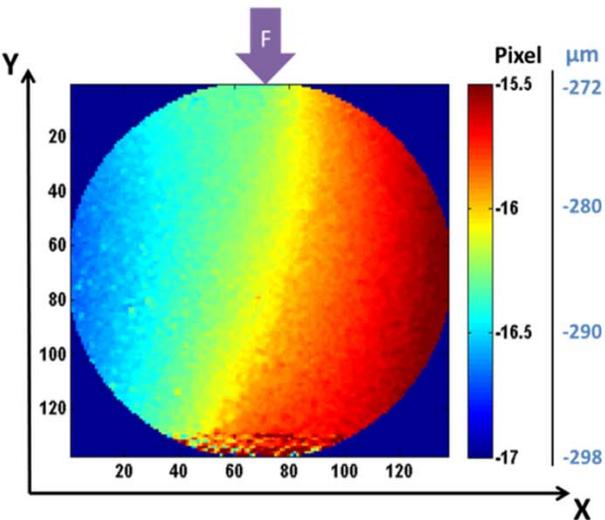
Corrélation d'image avec 7D



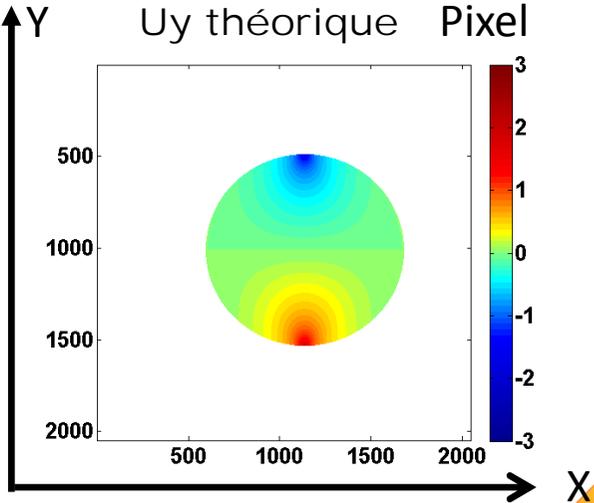
Champ déplacement U_x



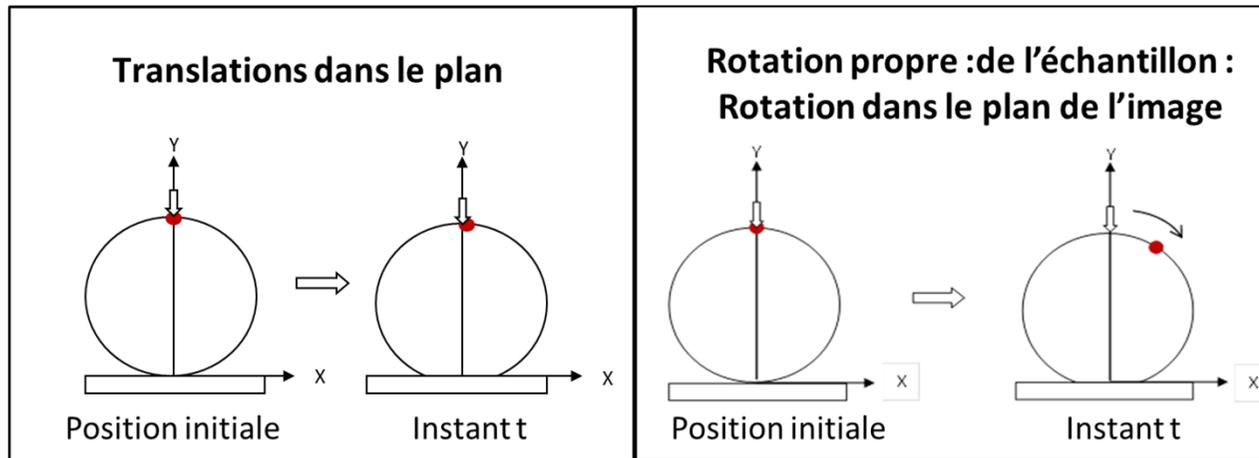
Champ déplacement U_y



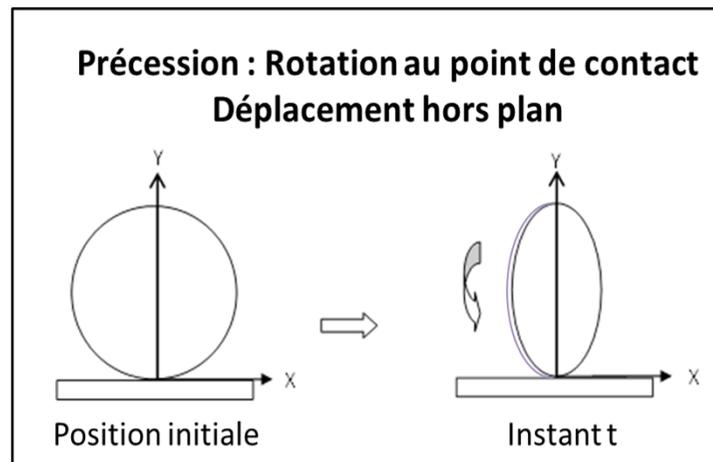
U_y théorique Pixel



Perturbation aux cours de l'essai



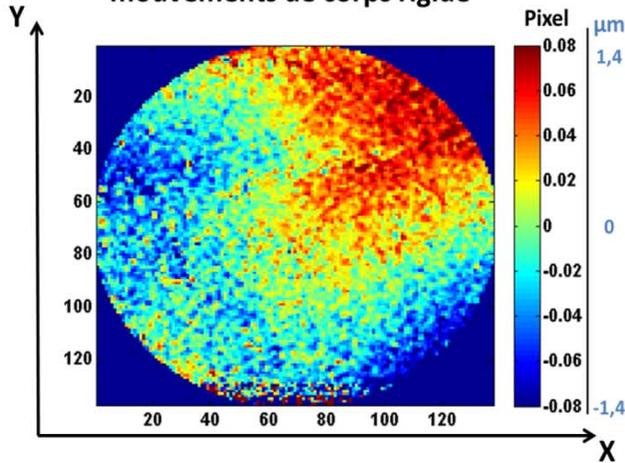
→ **Mouvements sont corrigés par une procédure Matlab**



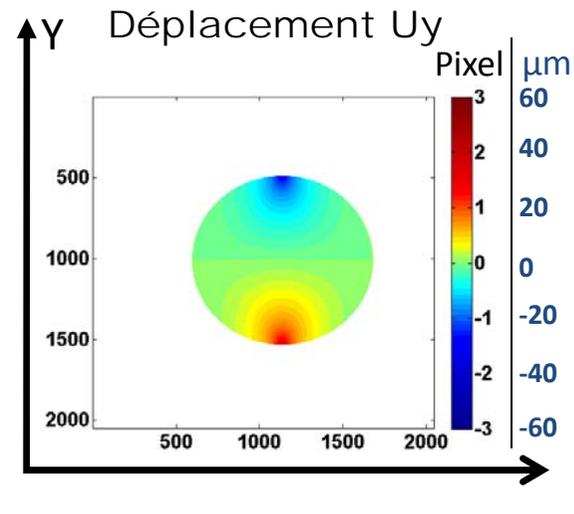
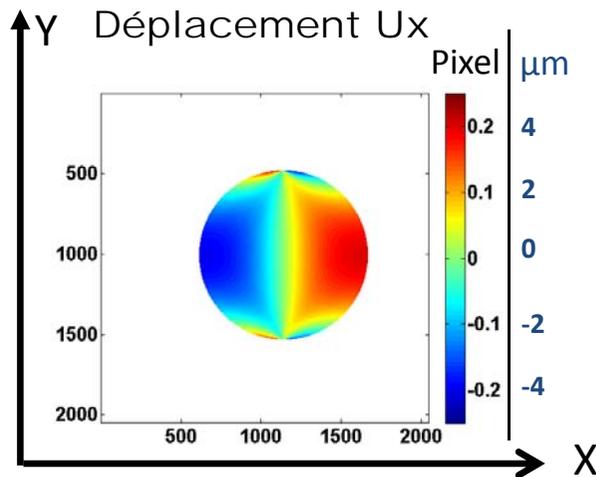
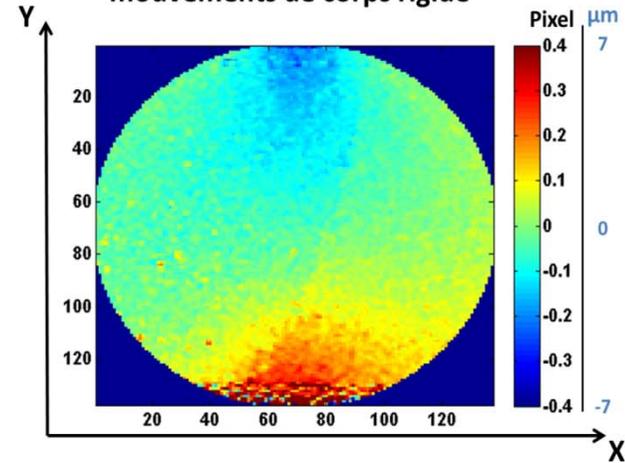
→ **Mouvements à supprimer expérimentalement car difficile à corriger numériquement.**

Sans perturbation

Champ déplacement U_x sans les mouvements de corps rigide



Champ déplacement U_y sans les mouvements de corps rigide



Déplacement trop faible

→ Impossible de post-traiter avec la corrélation d'image classique « DIC »