

Quelques exemples de mesures de champs de déplacement par corrélation d'images en grandes et très grandes déformations.

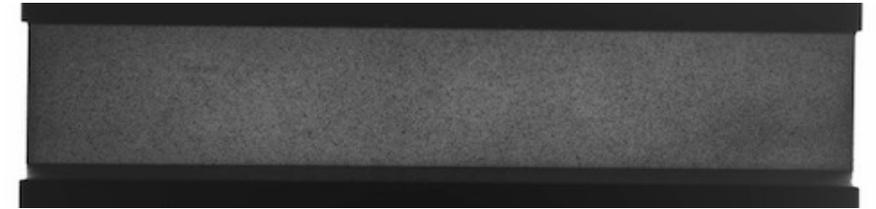
Michel CORET – GeM UMR 6183

Semaine des GT

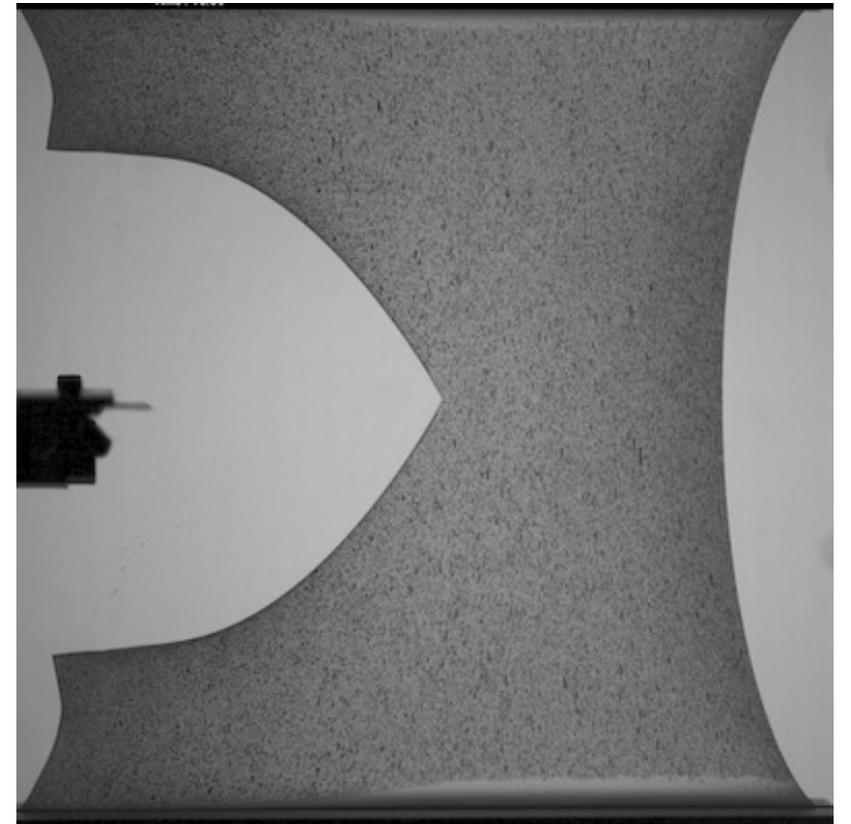
13 juin 2023

Contexte

- Les mesures de champ sont couramment employées, mais souvent pour des déformations faibles ou modérées.
- La DIC est elle utilisable pour de grandes déformations ?
- Objectif de la présentation : donner un retour d'expériences



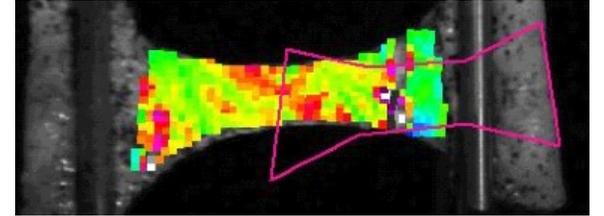
État initial



État déformé

Plan

1. **Endommagement et rupture de la peau (50%)**



2. Membrane élastomère sous chargement complexe (100%)

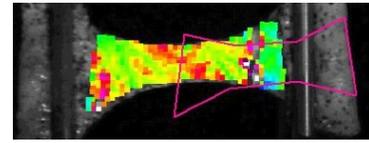
3. Rupture Dynamique d'un PU (300%)

4. Des déformations encore plus grandes...

Long time ago...

Endommagement et rupture de la peau

(Thèses C. Jacquemoud/2007- A. Brunon/2012)

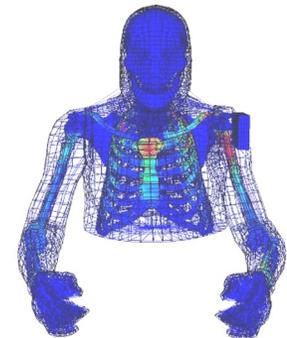


- Caractérisation mécanique de la peau sous chargement dynamique

- Pourquoi :

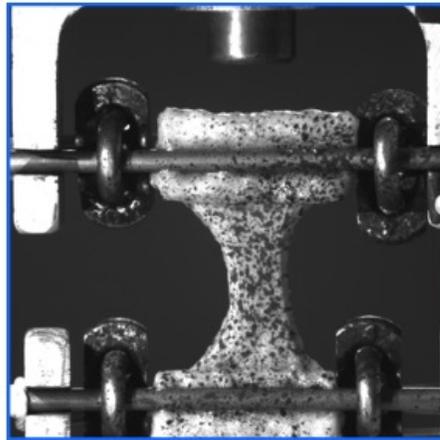


- Objectif final : Prédiction des lésions induites lors d'un accident
 - Verrou : L.d.C de la peau sous sollicitation mécanique sévère



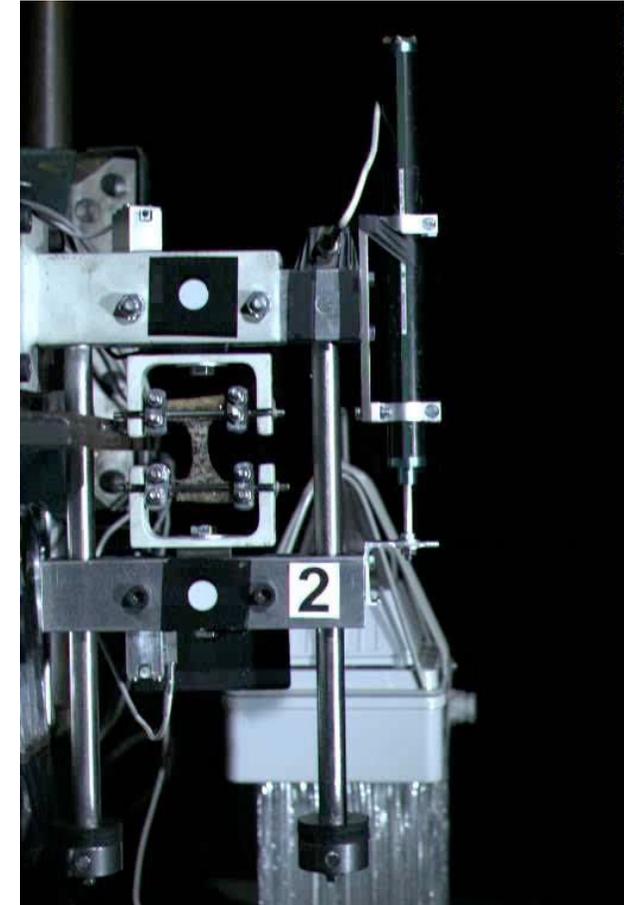
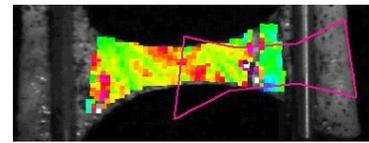
Méthodologie : Chargement

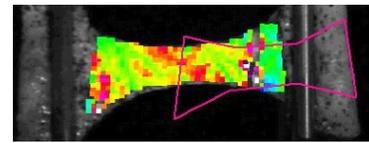
- Traction quasi-statiques et dynamique



10 mm

- Échantillon : peau humaine





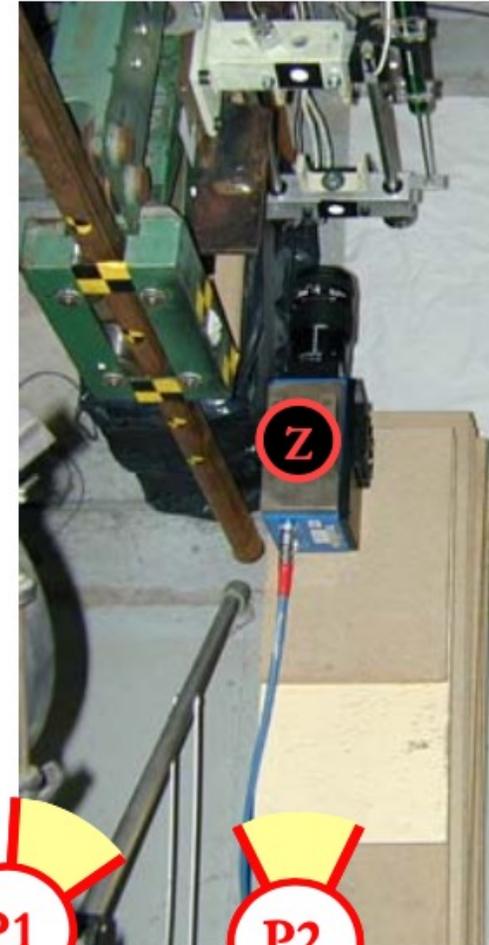
Méthodologie : Imagerie

Quasi-statique

- Caméra : Hamamatsu
- Objectif télécentrique
- Résolution : 1000x1004 px
- Fréquence : 1 i/s

Dynamique

- Caméra rapide : SpeedCam VISARIO
- Objectif Nikon 35-70
- Résolution : 1024x768 px
- Fréquence : 1000 i/s



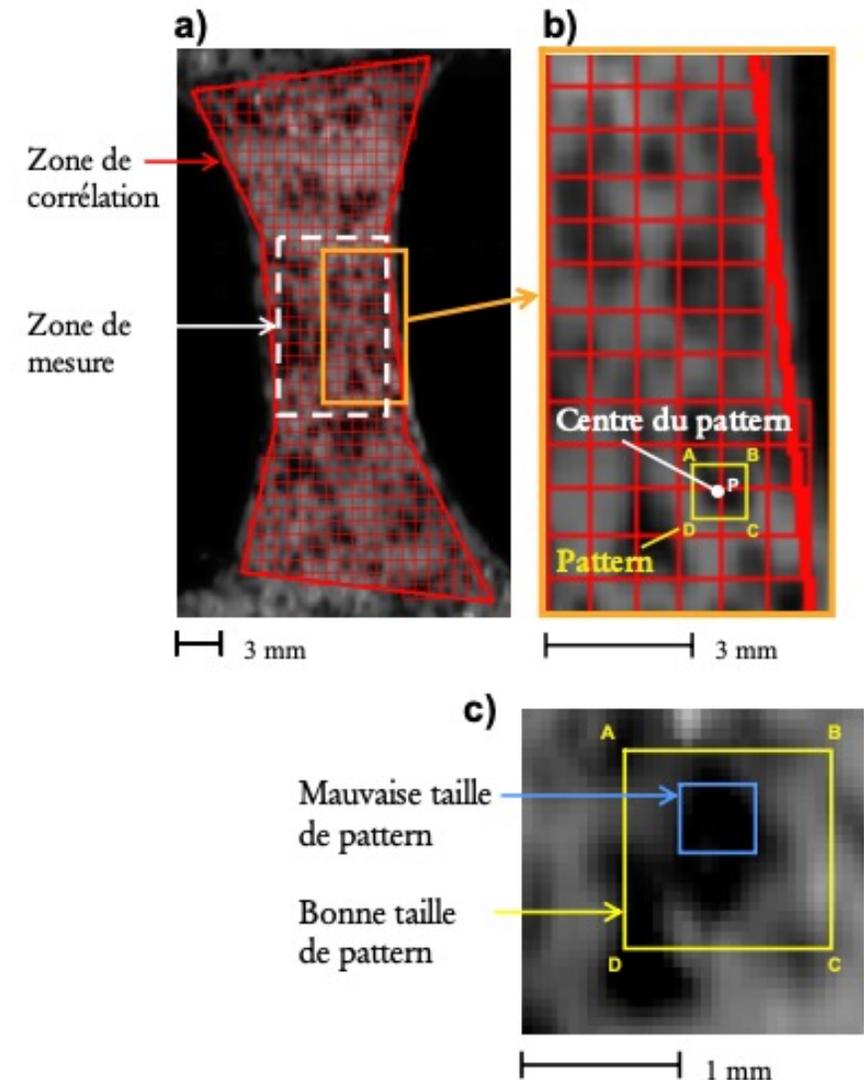
Méthodologie : DIC

Logiciel

- Icasoft – F. Morestin Insa-Lyon
- Méthode locale
- Version incrémentale

Corrélation

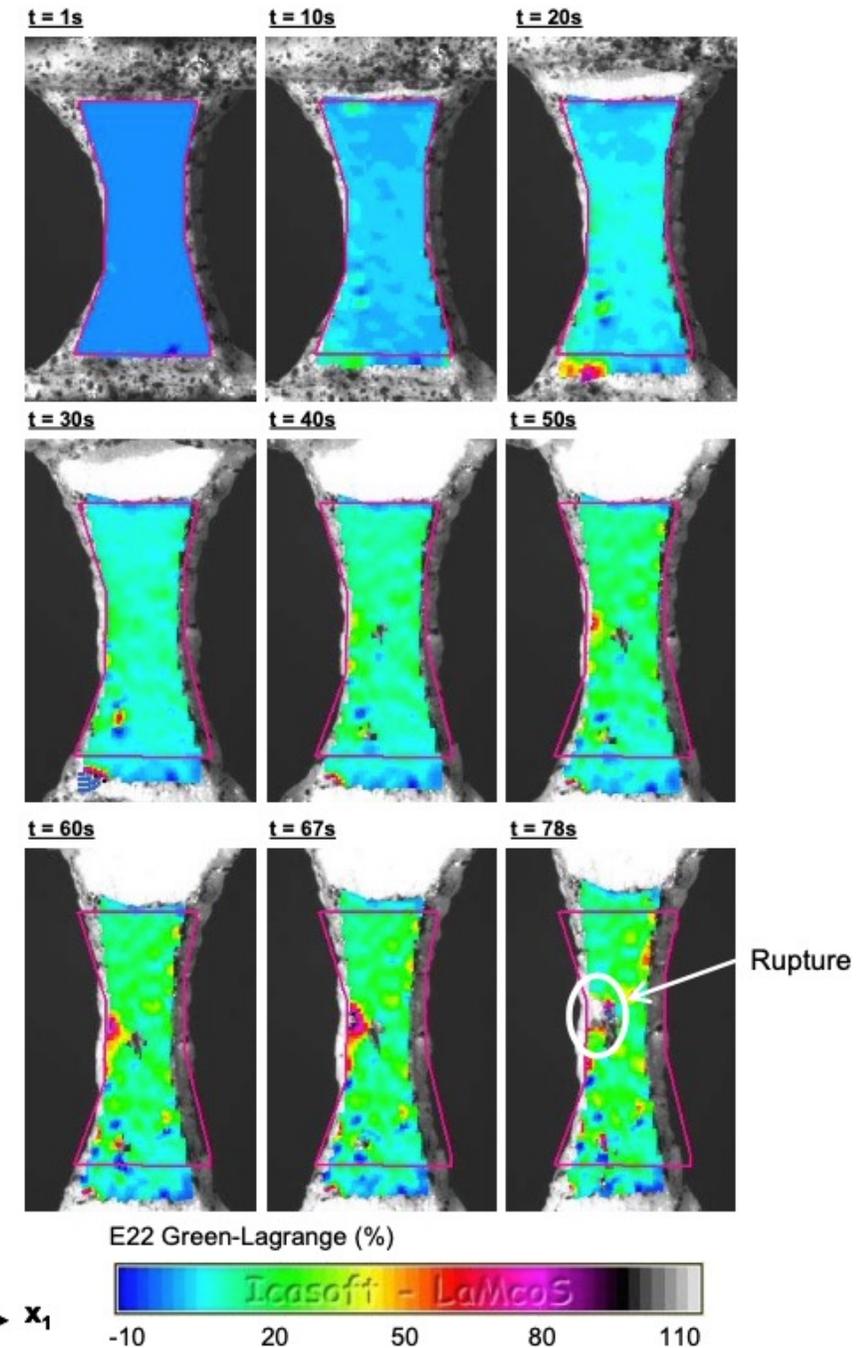
- Mouchetis : mascara waterproof
- Pixel size : $0.08 \times 0.08 \text{ mm}^2$
- Subset size : $25 \times 25 \text{ px}^2$
- Grid step : ?

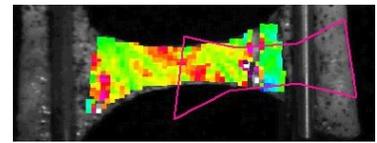


Résultats

- Corrélation avec 78 images
- Environ 300 subsets
- Déformation de Green Lagrange 22

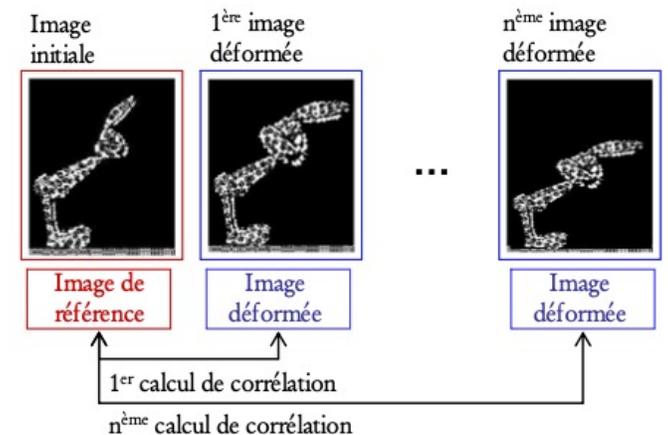
Green-Lagrange	Lambda = l/l_0	Epsilon
100 %	1.75	75%

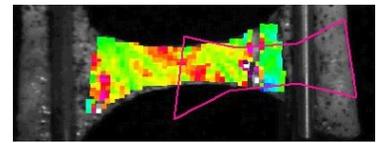




Discussion DIC

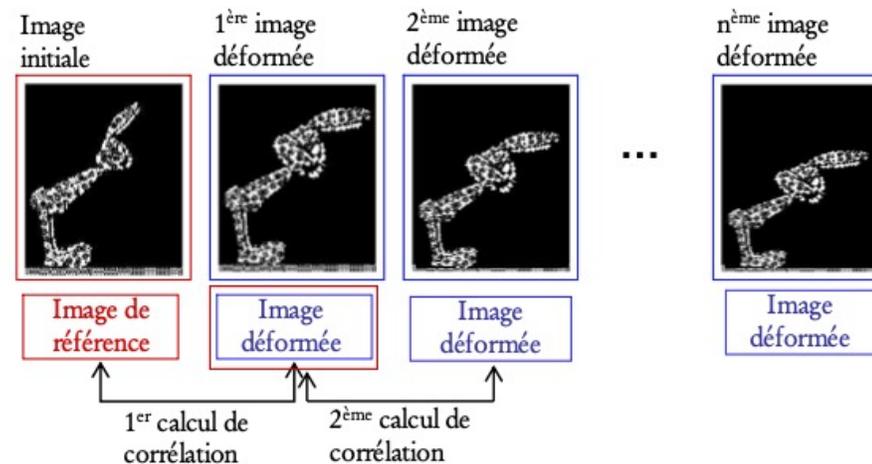
- Un mouchetis un peu grossier et irrégulier
- Peu de subset
- Peu d'images
- Des variations de niveau de gris induits par suintement
- La corrélation par rapport à l'image initiale ne fonctionnait pas.





Discussion DIC

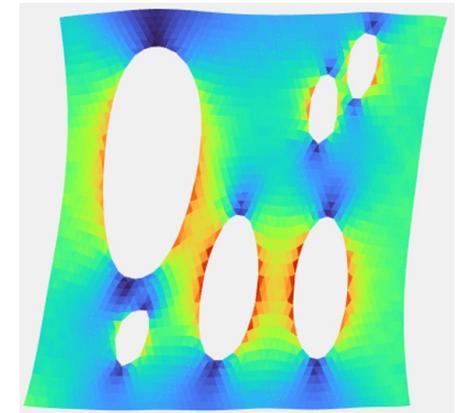
- F. Morestin a développé une version incrémentale de la corrélation



- Ça a fonctionné, mais...
 - Beaucoup de projections qui affectent la précision
 - Si la corrélation ne donne pas de résultat à l'image n, c'est fichu pour les images suivantes

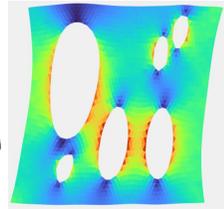
Plan

1. Endommagement et rupture de la peau (50%)
- 2. Membrane élastomère sous chargement complexe (100%)**
3. Rupture Dynamique d'un PU (300%)
4. Des déformations encore plus grandes...



Membrane élastomère sous chargement complexe

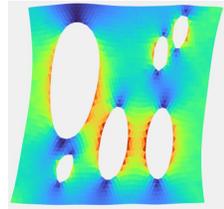
(Thèse M. Dalematt/2019, L. Costecalde)



- Modélisation du comportement hyper-élastique
 - **Pourquoi** : des lois sont constamment développées

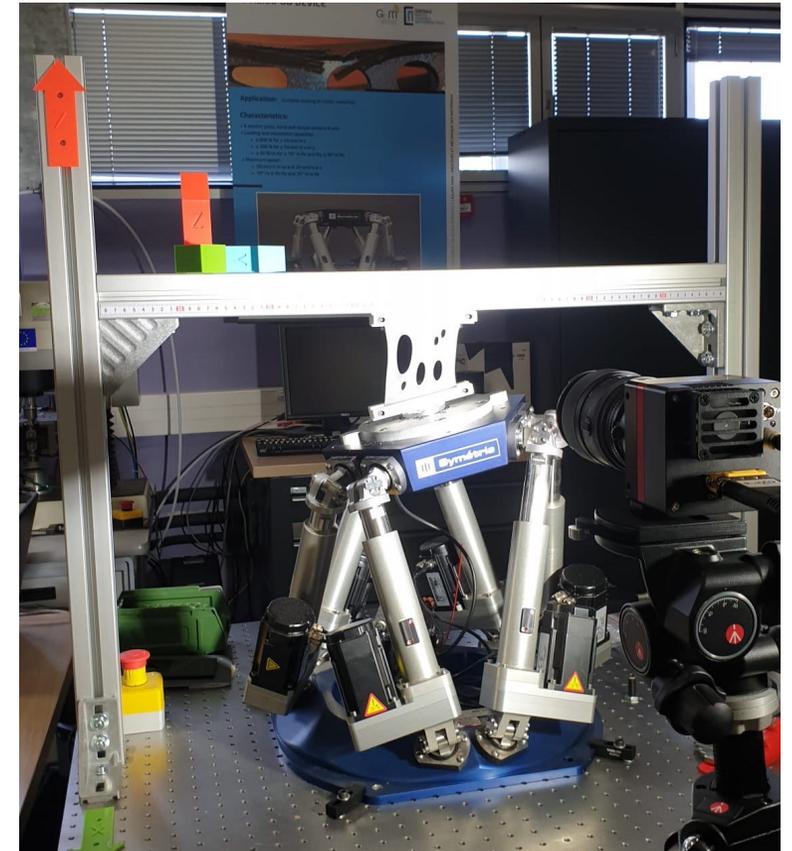
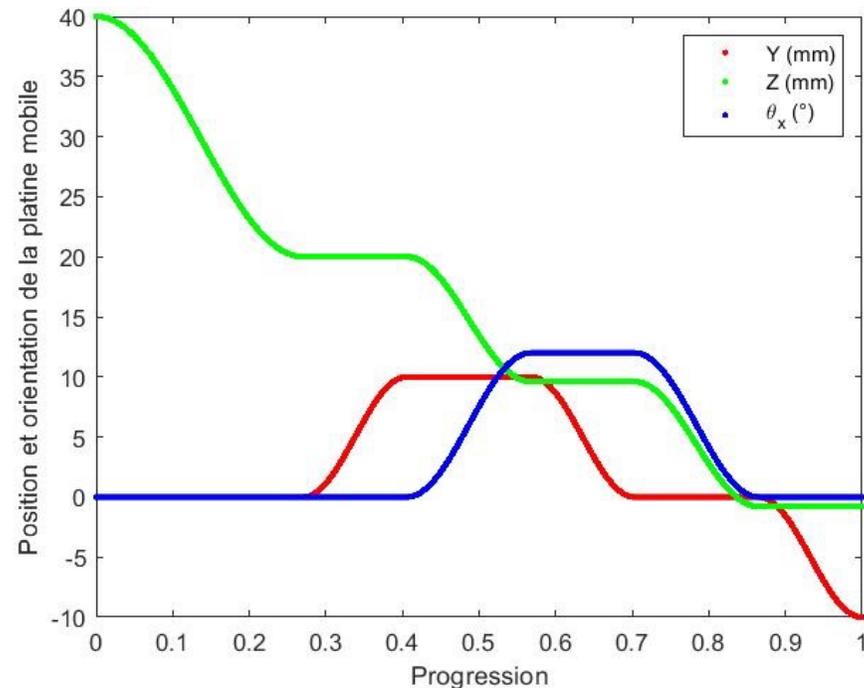
*He, H., Zhang, Q., Zhang, Y., Chen, J., Zhang, L., & Li, F. (2022). A comparative study of **85 hyperelastic constitutive models** for both unfilled rubber and highly filled rubber nanocomposite material. Nano Materials Science, 4(2), 64-82.*

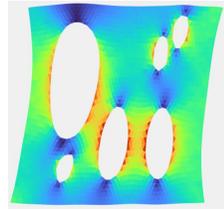
- **Objectif final** : outrepasser le développement de lois paramétriques longues et complexes à développer et identifier
- **Verrou** : générer des bases de données de champs de déformation *complexes* et mesurer des contraintes sans loi...(Data Driven Identification)



Méthodologie : Chargement

- Chargement plan d'une membrane à trou par un hexapode
- Pilotage en déplacement et rotation plane

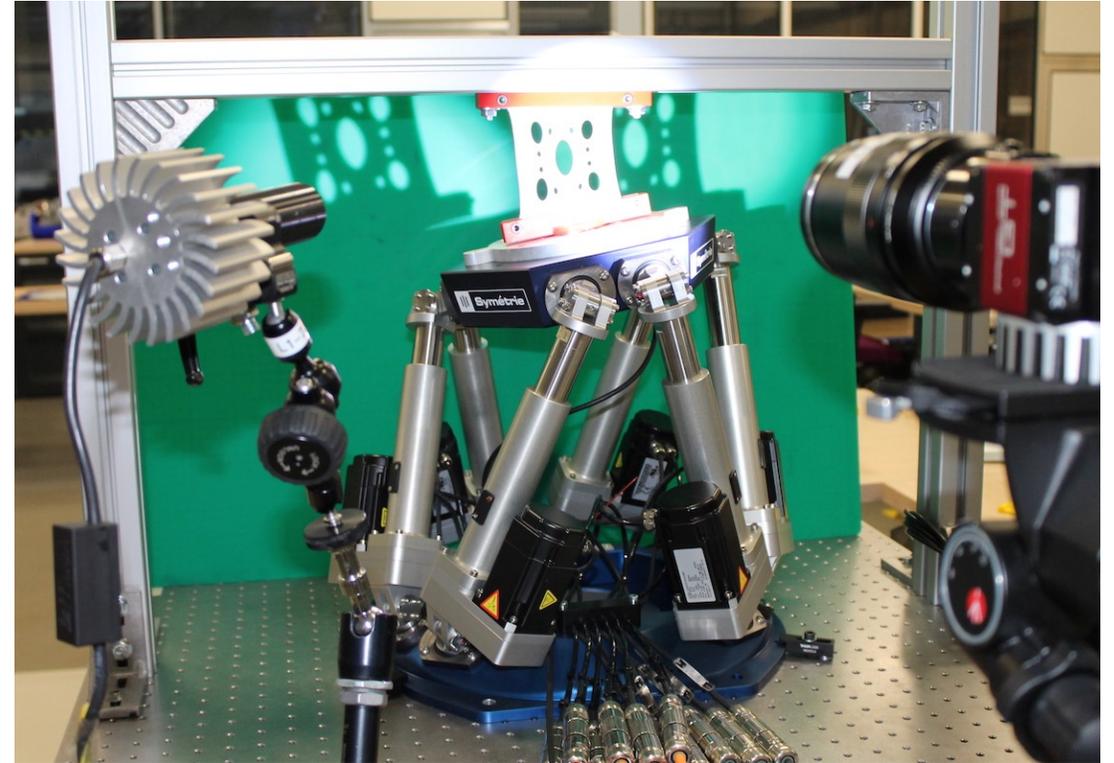


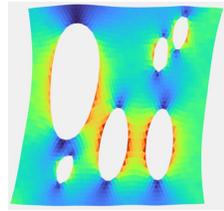


Méthodologie : imagerie

- Caméra AVT GT6600 29Mpx
- Objectif macro Zeiss 100mm
- Éclairage Led
- Fréquence : 1 i/s

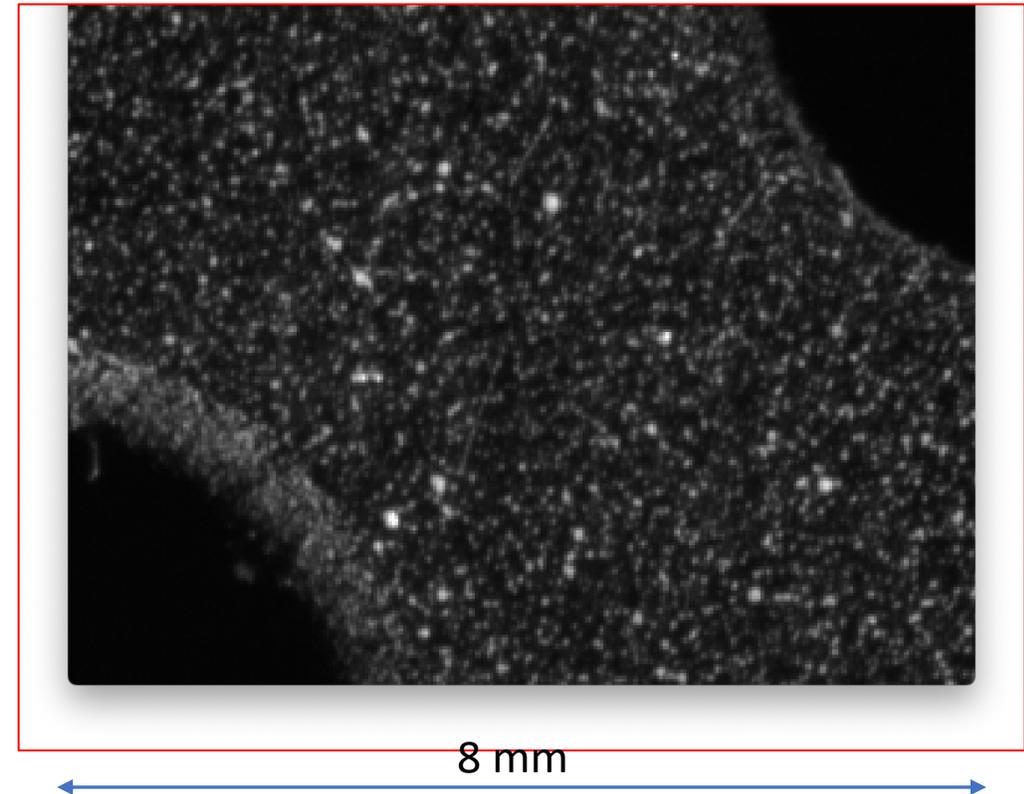
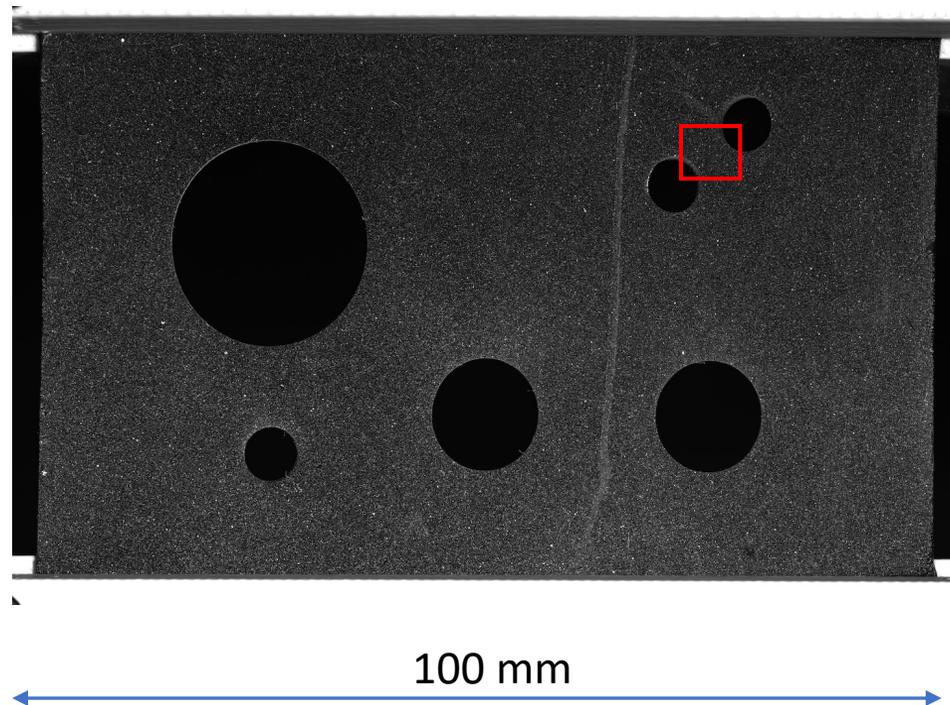
- Éprouvette SBR fourniture Michelin
- 100x80x2mm³



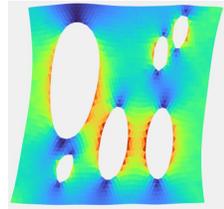


Méthodologie : speckle

- Mouchetis : peinture blanche en spray
- Pixel size : $0.02 \times 0.02 \text{ mm}^2$



Méthodologie : DIC

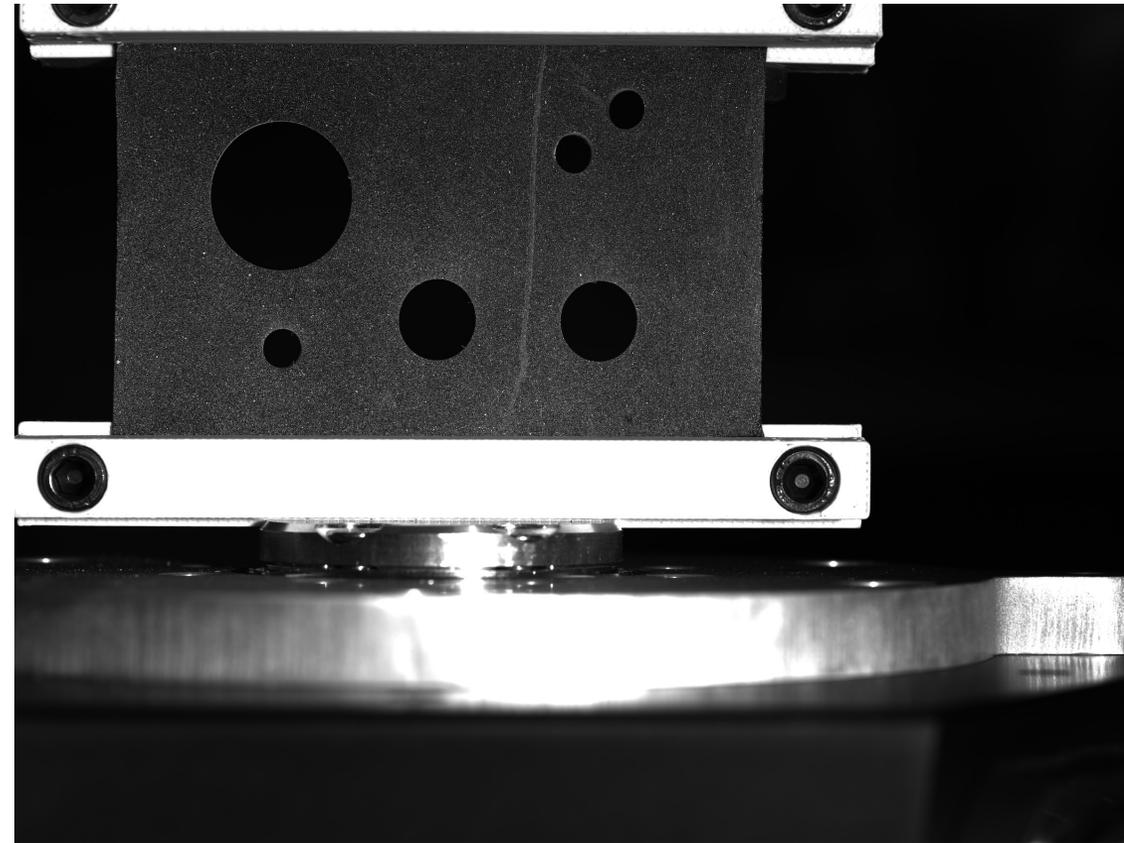


Logiciel

- Ufreckle – J. Réthoré - CNRS
- Méthode globale – FEM

Corrélation

- Element type : unstructured T3
- Element size : approx 80 px
- Coarse grainig : 5 scales
- Explicit prediction
- Convergence limit 10^{-3}
- Local normalisation
- 500 images



Résultats :

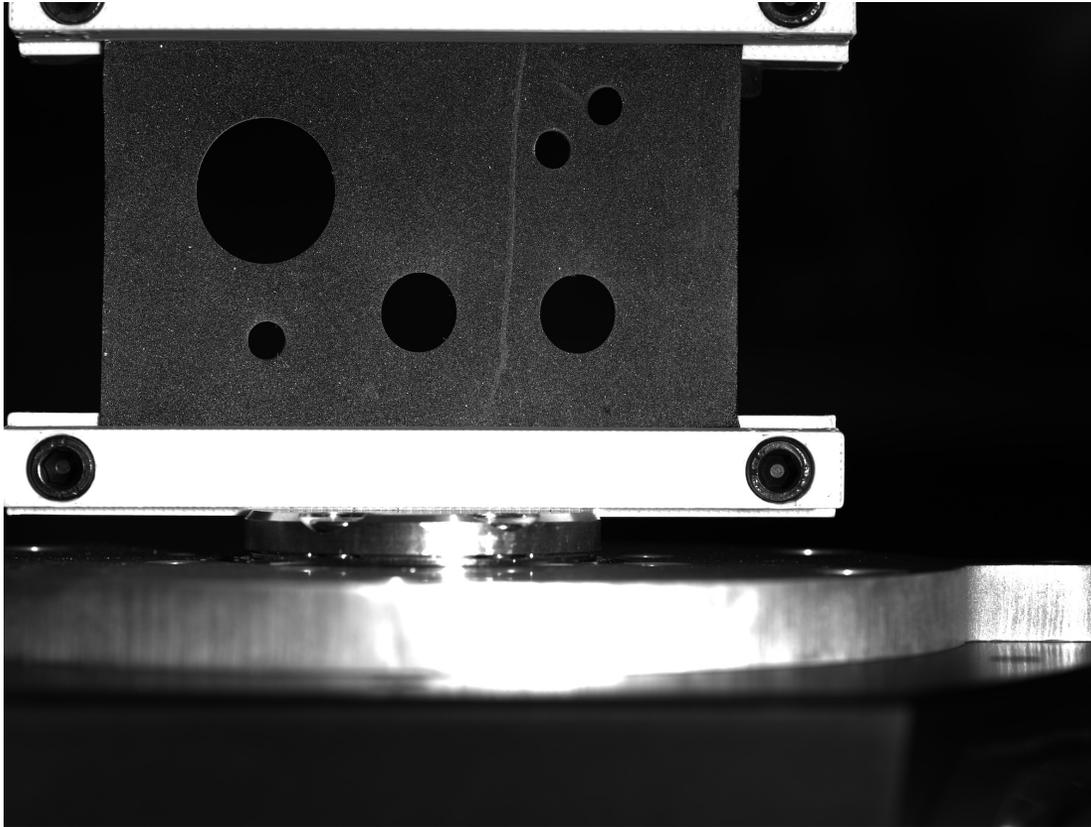
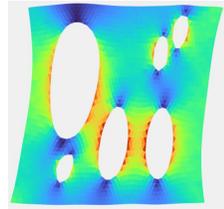


Image de l'état de référence

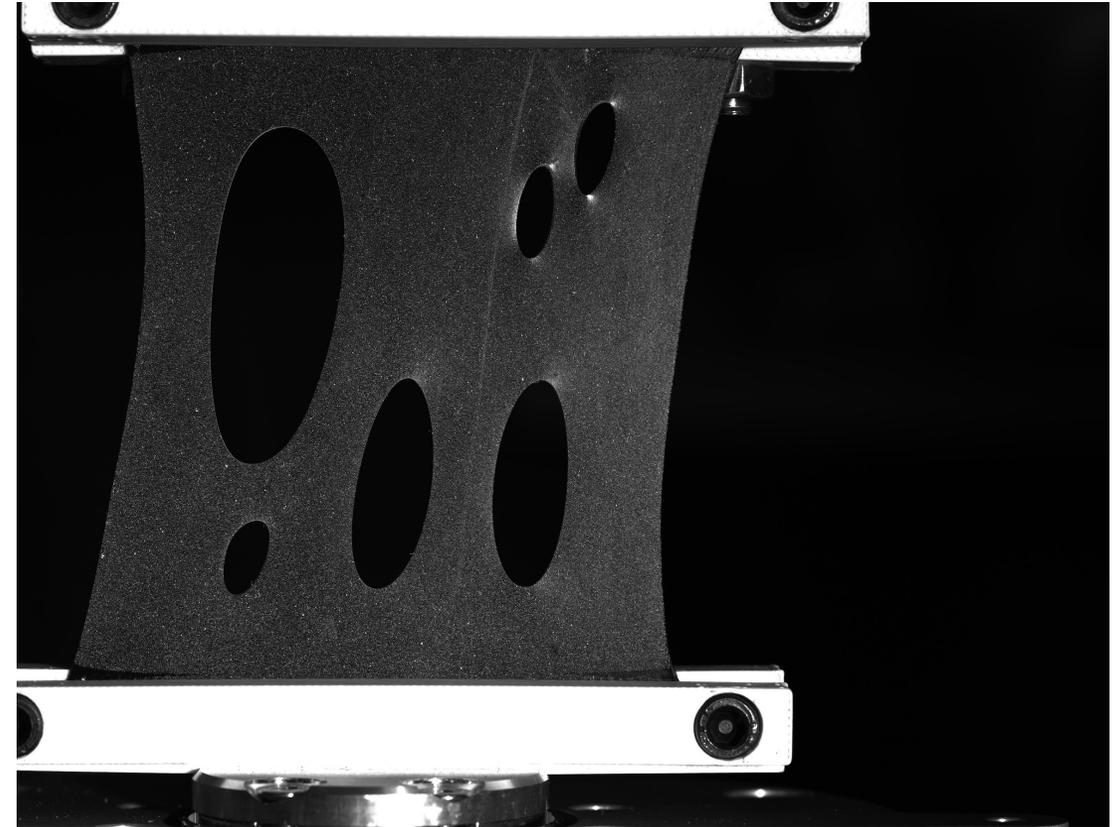
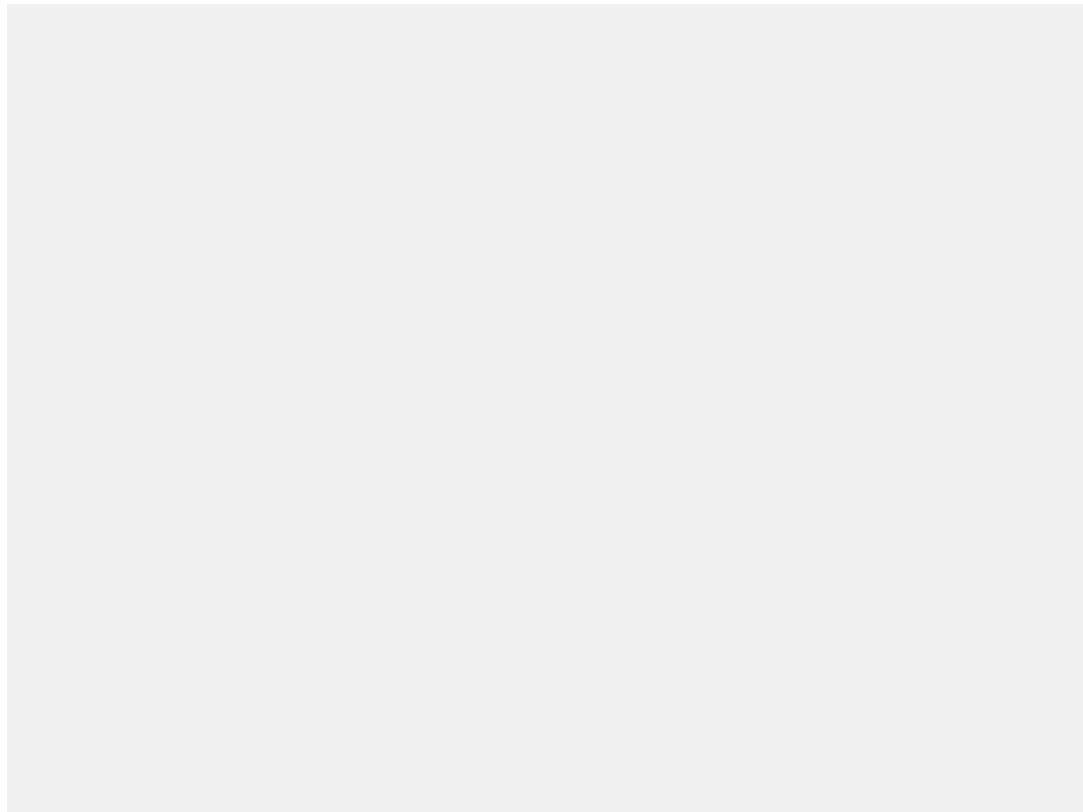
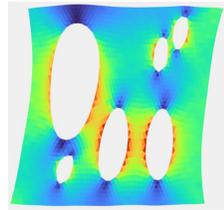
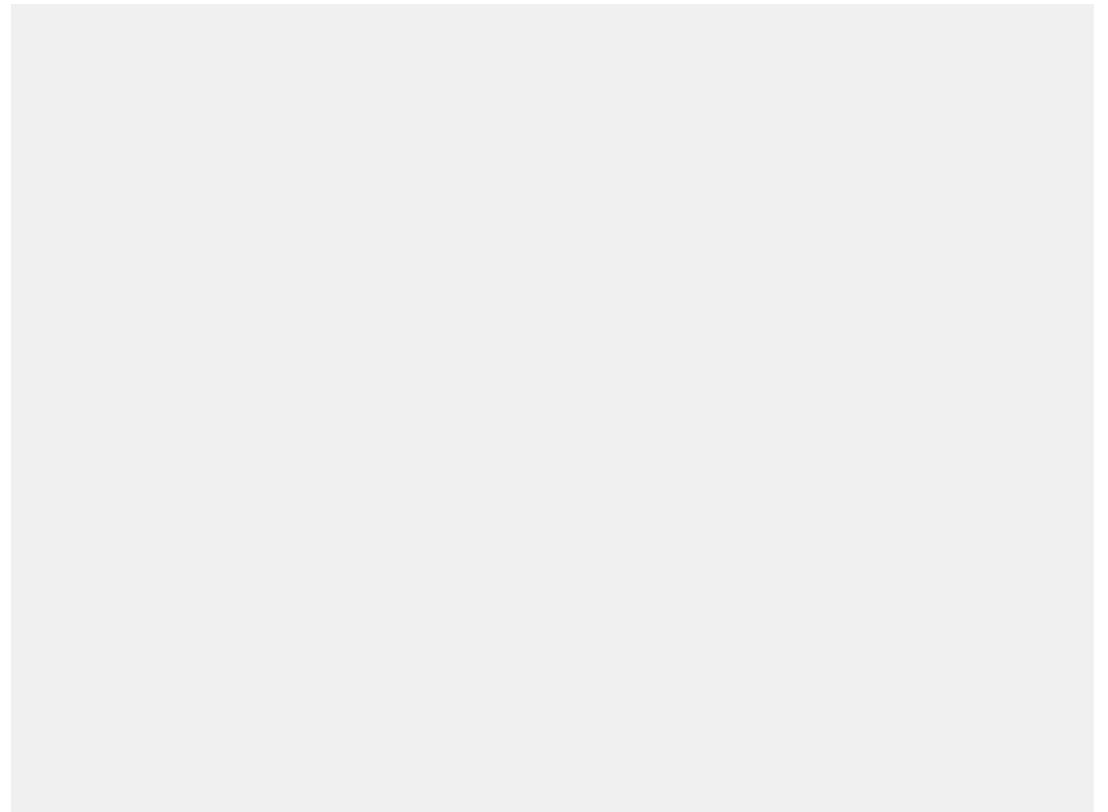


Image en fin d'essai

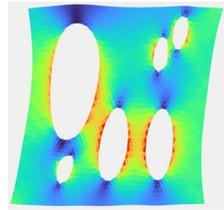
Résultats :



Déplacements nodaux

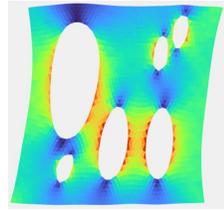


Amplitude des déformations (epsilon)



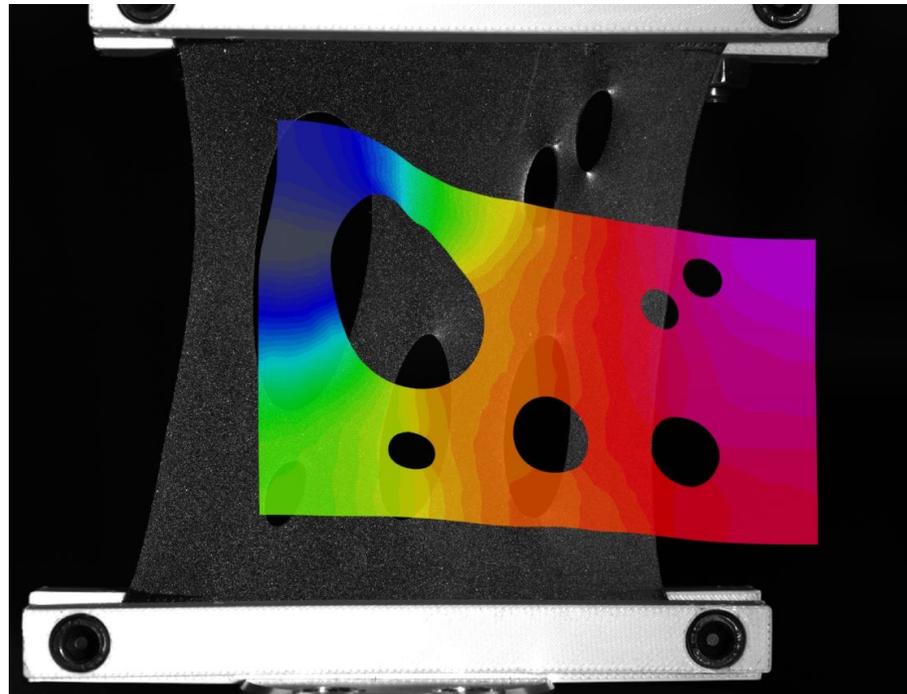
Discussion DIC : ce qui fonctionne ici

- On arrive a calculer les champ de déplacement par DIC avec une analyse qui prend toujours la 1^{ère} image comme référence
- La prédiction du champ est explicite (Ufr initialise le champ de déplacement avec le même incrément que celui de l'image précédente.)
- En comparaison du 1^{er} exemple :
 - Beaucoup plus de points de mesure (de qq Mpx à 30 Mpx)
 - Beaucoup plus d'images (500 contre 78)
 - Une approche multiéchelle (par coarse graining)
 - Normalisation locale des niveaux de gris
 - Mais un mouchetis un peu grossier

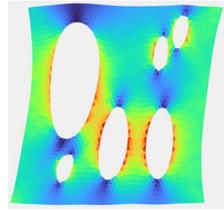


Discussion DIC : ce qui ne fonctionne pas

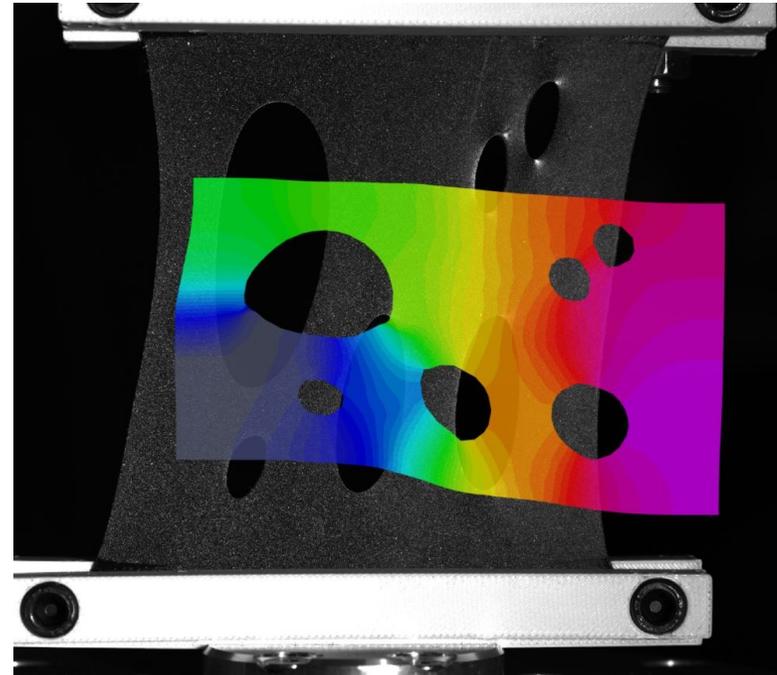
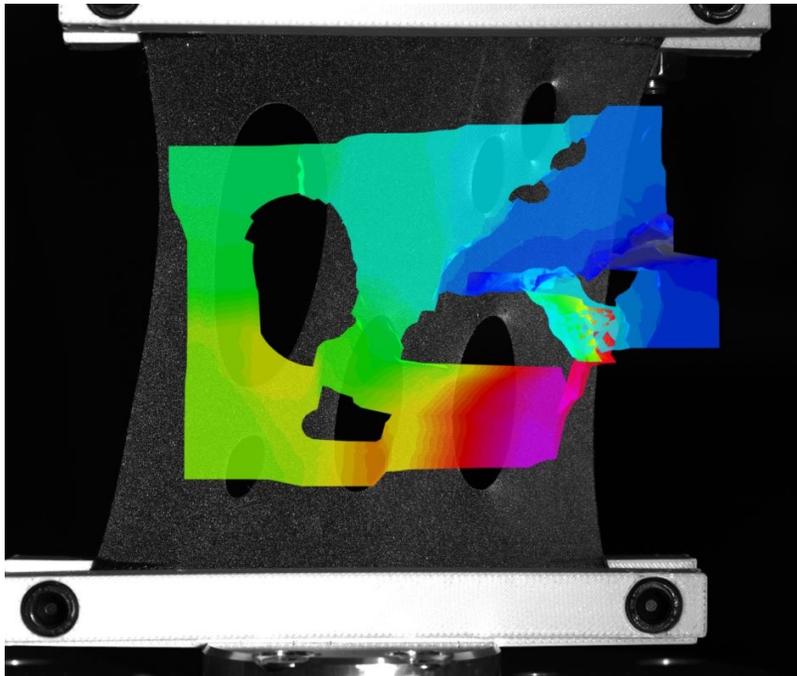
- Les régularisations n'ont pas fonctionné
 - Régularisation de type déformation (40px)



Discussion DIC

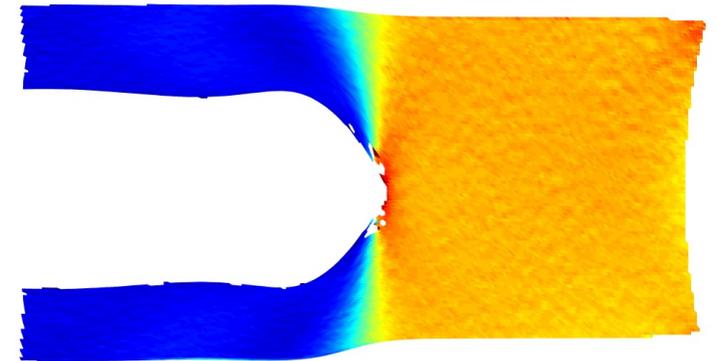


- Les régularisations n'ont pas fonctionné
 - Régularisation de type médian(1 px et 40px)



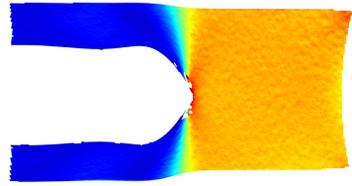
Plan

1. Endommagement et rupture de la peau (50%)
2. Membrane élastomère sous chargement complexe (100%)
- 3. Rupture Dynamique d'un PU (300%)**
4. Des déformations encore plus grandes...

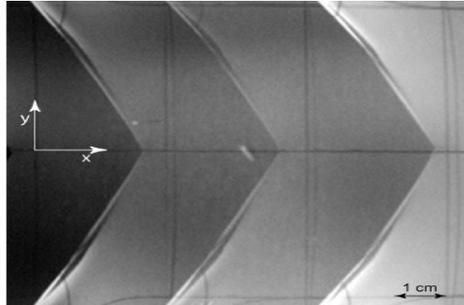


Rupture Dynamique d'un PU

(Thèse T. Corre/2018, V. Kamasamudram/2021)

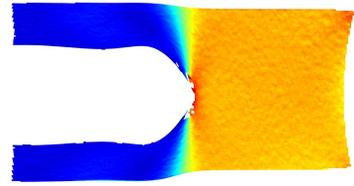


- Étude de la déchirure d'une membrane
 - **Pourquoi** : Les analyses reposent sur des quantités globales (vitesse de pointe & élongation)



- **Objectif final** : Prédiction de la vitesse et de la direction d'une fissure se propageant dans une membrane prétendue
- **Verrous** : mesures en grandes déformations et grande vitesse de déformation, théorie peu développée

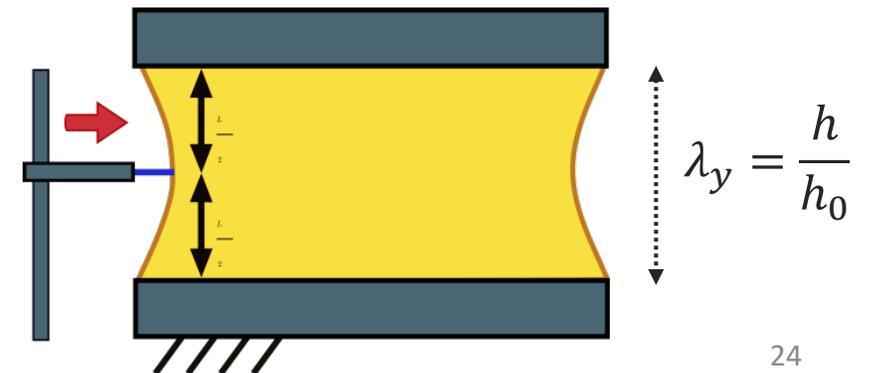
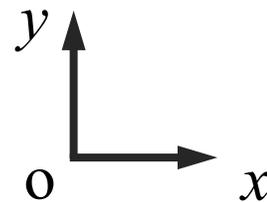
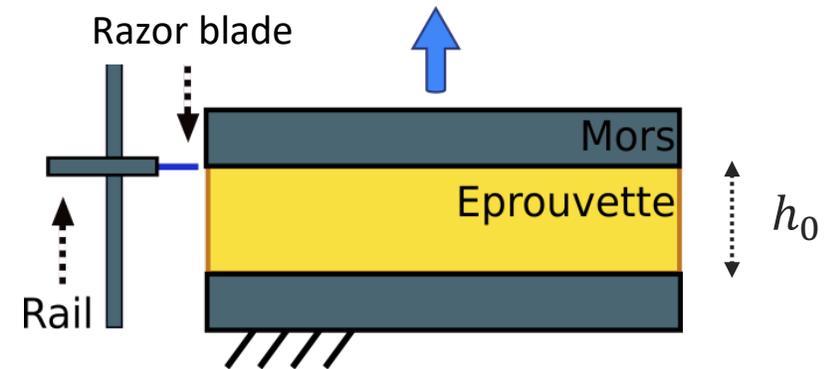
Méthodologie : chargement

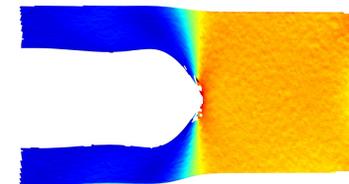


- Pur shear specimen of PU
 - 200 x 40 x 3 mm³
 - Classical fracture specimen
 - Large propagation
- Elongations at the center of specimen:
 - Horizontaly : $\lambda_x = 1$
 - Vertically : λ_y imposed

2 stages protocol

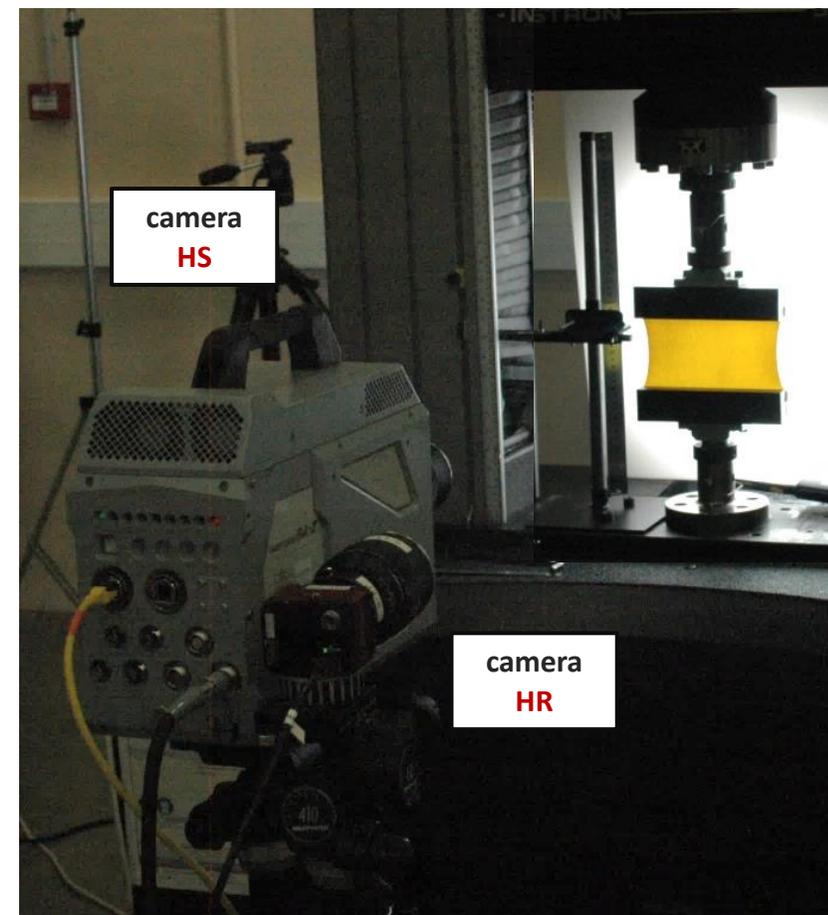
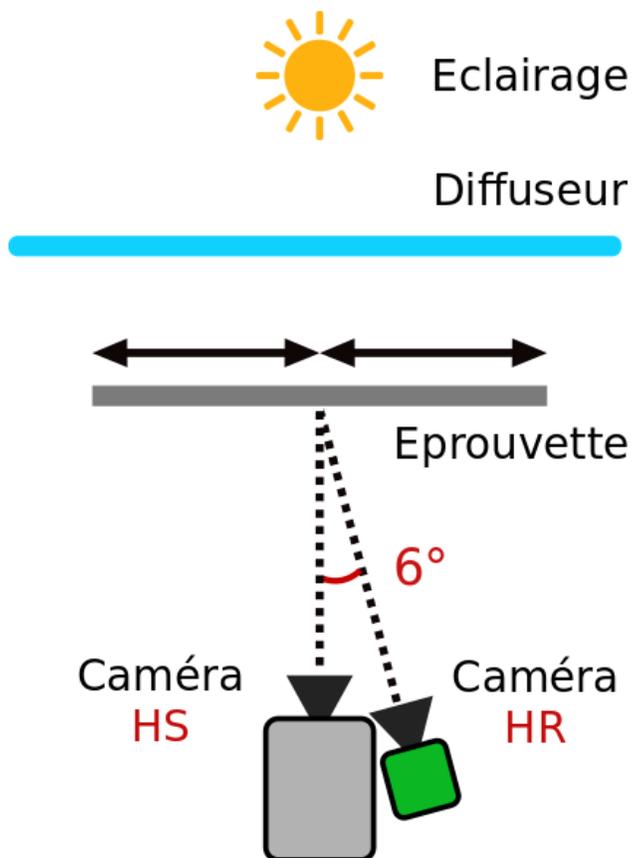
Quasi-static loading



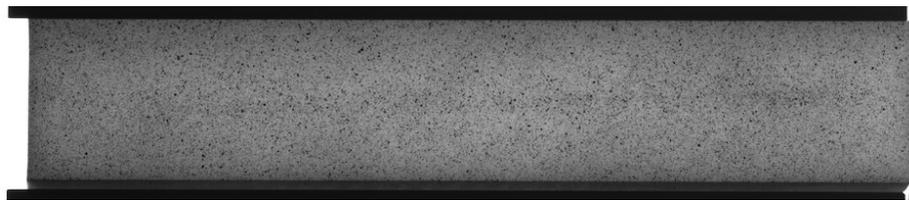
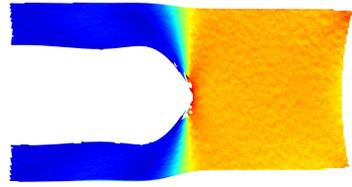


Méthodologie : imagerie

- Une caméra rapide
Photron SAZ - 1Mpx
 - 25 000 Hz
 - Obturation 1/200 000 s
- Caméra AVT GT6600
29Mpx
- Objectifs macro Zeiss
100mm
- Éclairage par transmission



Exemple : Essai 250% de deformation

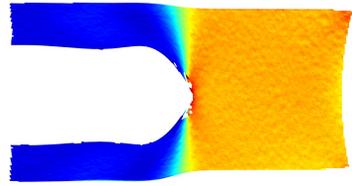


État initial

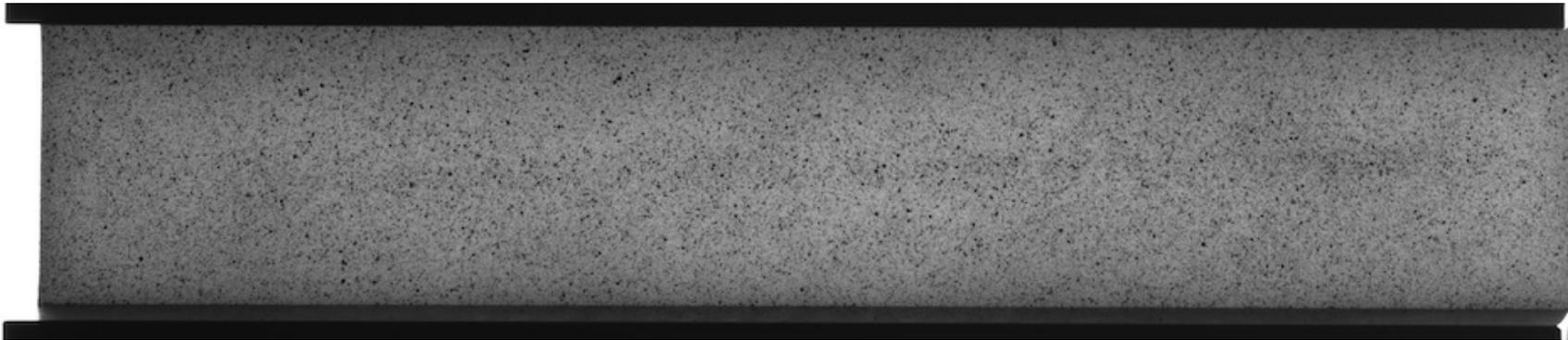


État déformé
(rupture vitesse /1000)

Méthodologie : Mouchetis

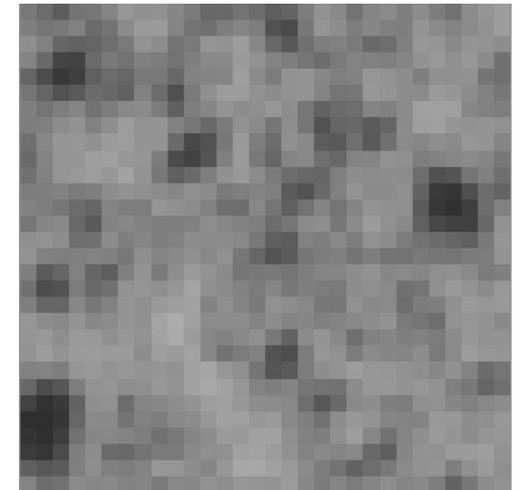


- Mouchetis : spray peinture noire (juste avant l'essai)
 - Vue par la caméra **haute résolution**

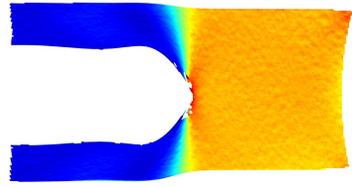


2600 x 600 px

Pixel size = 0.04 mm



30 x 30 px



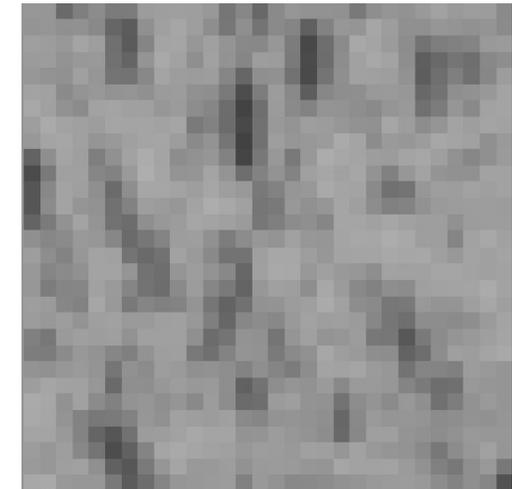
Méthodologie : Mouchetis

- Mouchetis : spray peinture noire (juste avant l'essai)
 - Vue par la **caméra rapide**

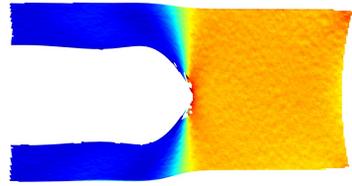


Pixel size = 0.2 mm

950 x 700 px



30 x 30 px



Méthodologie : DIC

Logiciel

- VIC (V6) – Correlated-Solution
- Méthode locale

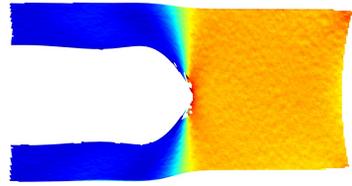
Paramètres corrélation caméra haute résolution

- Subset size : 25 px
- Grid step : 7 px
- Interpolant : Bi-cubic Spline
- Criteria : ZNSSD

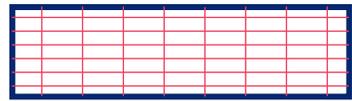
Paramètres corrélation caméra rapide

- Subset size : 17 px
- Grid step : 4 px
- Interpolant : Bi-cubic Spline
- Criteria : ZNSSD

Lien entre les caméras



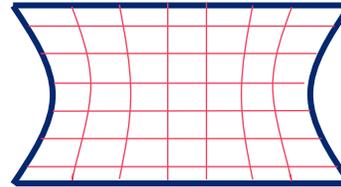
Charge (~ 1 - 6 min)



grille HR



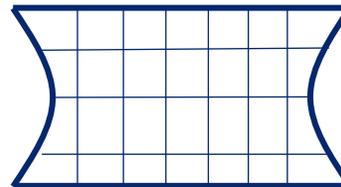
Même
« instant »



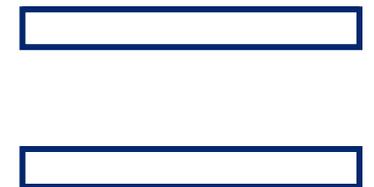
Caméra haute résolution
29 MPx (HR)



Caméra rapide
1 MPx (HS)

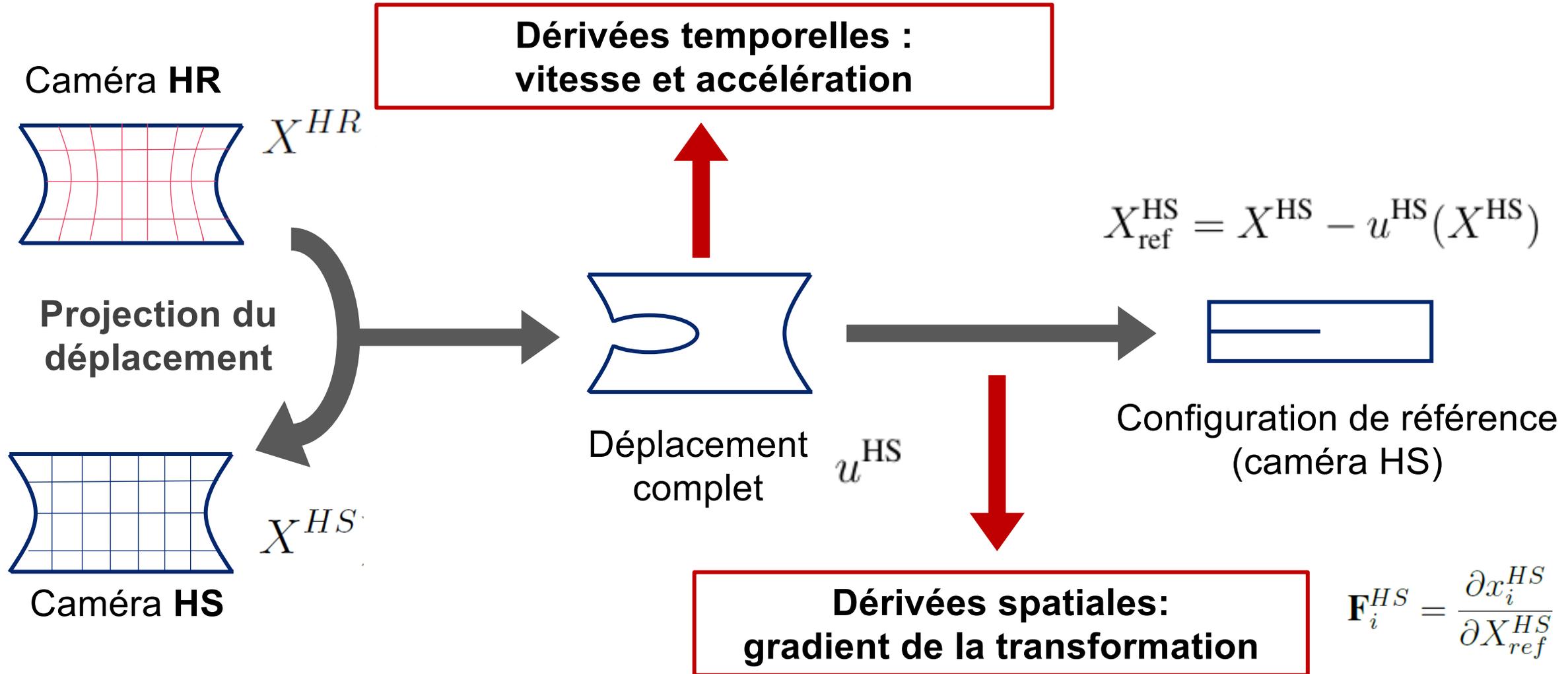
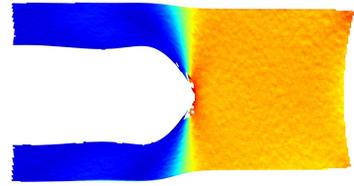


Grille HS

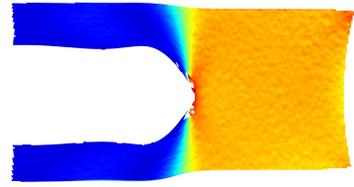


Propagation
(~ 10 ms)

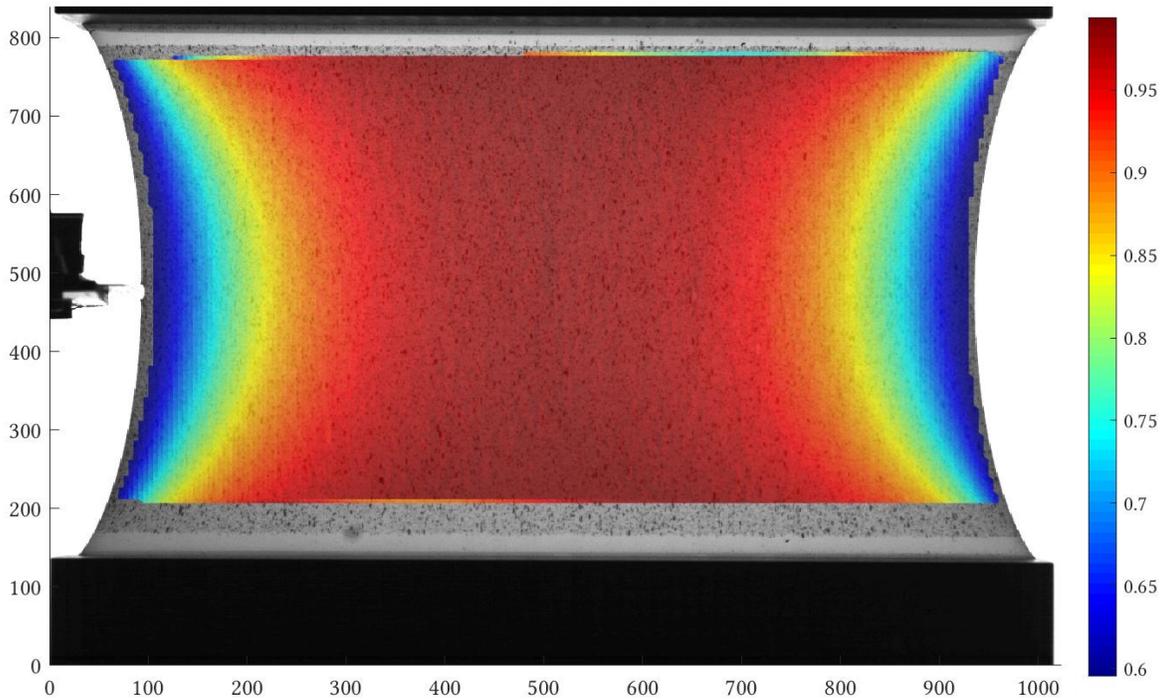
Mesure de champs



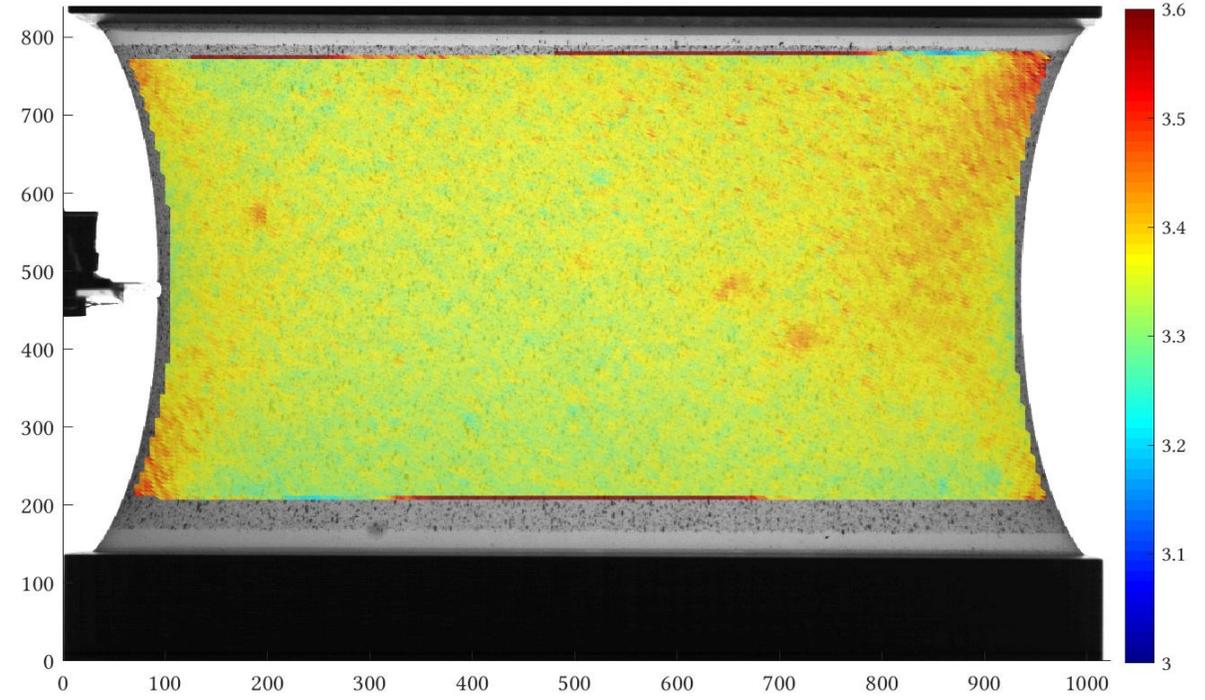
Résultats en fin de pré-chargement



- Élongation



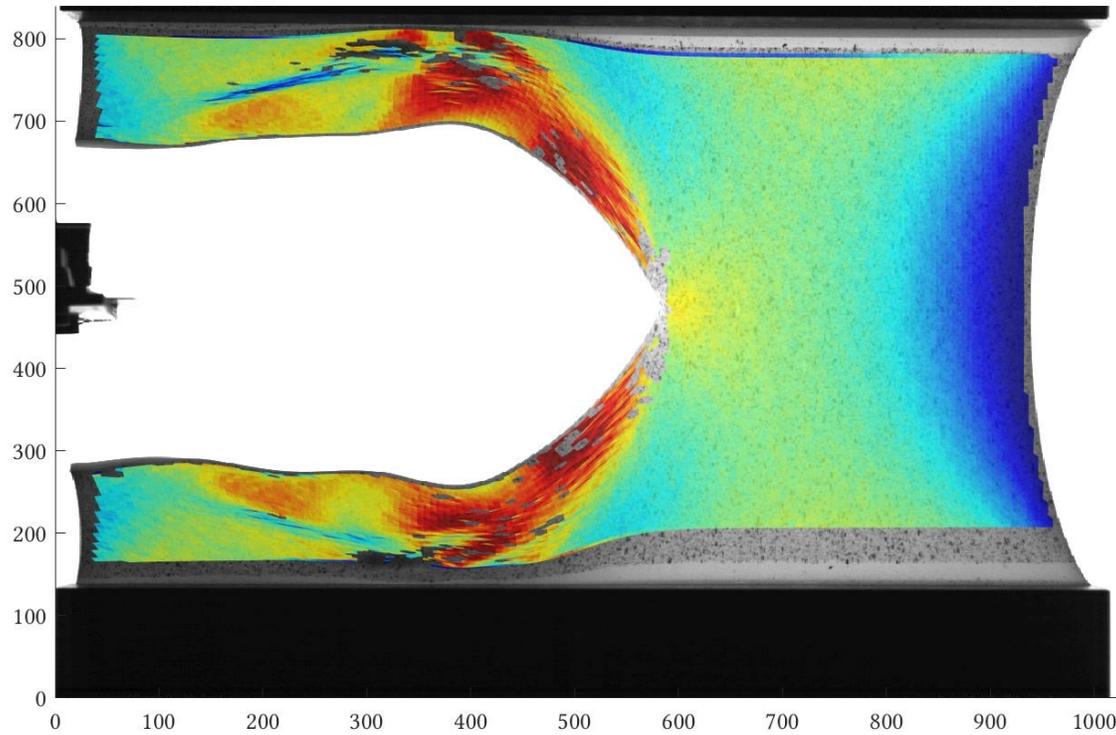
Élongation horizontale = 1



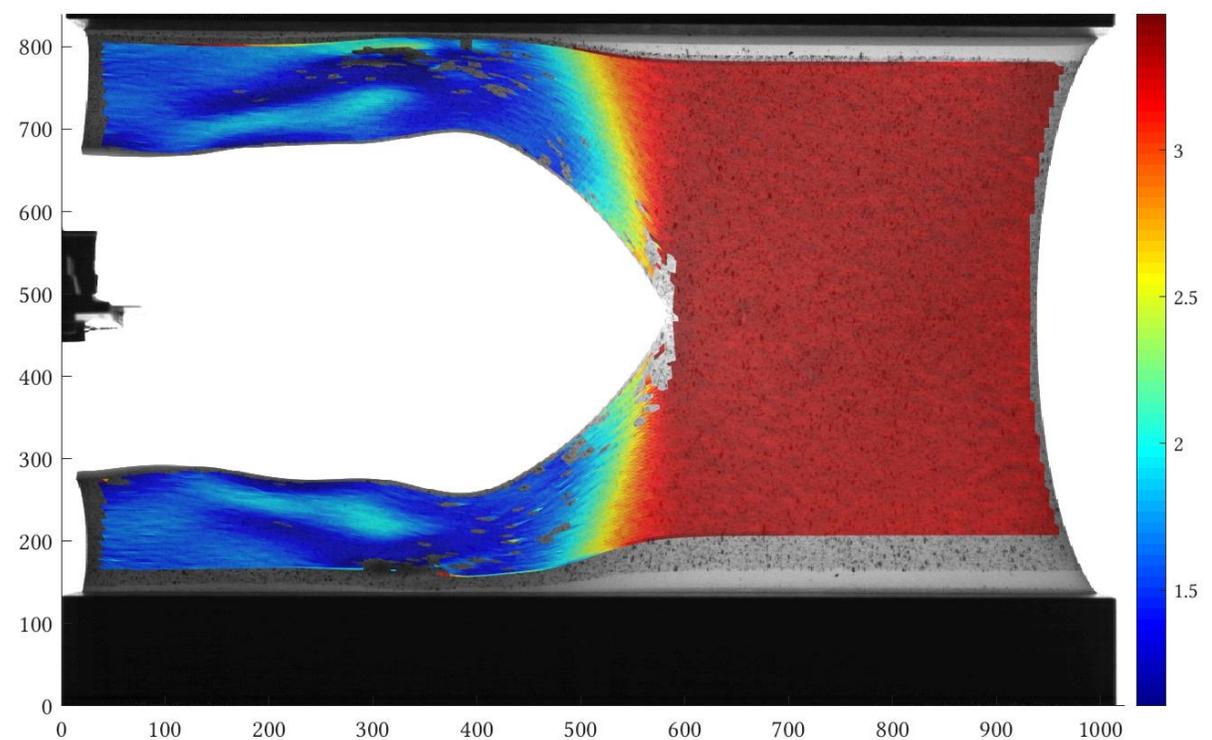
Élongation verticale = 3.5

Résultats pendant la rupture

- Élongations



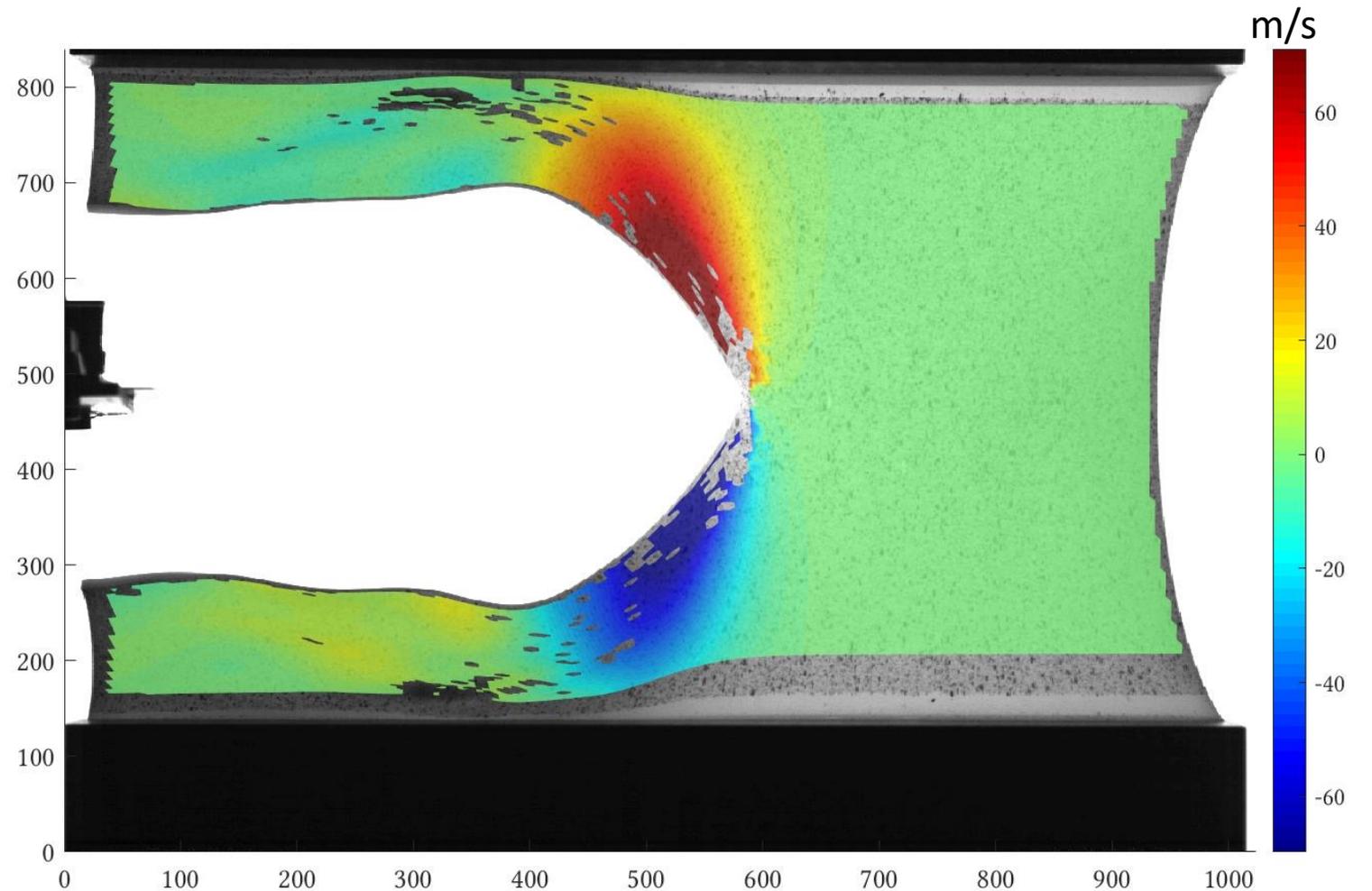
Élongation horizontale = 1



Élongation verticale = 3.5

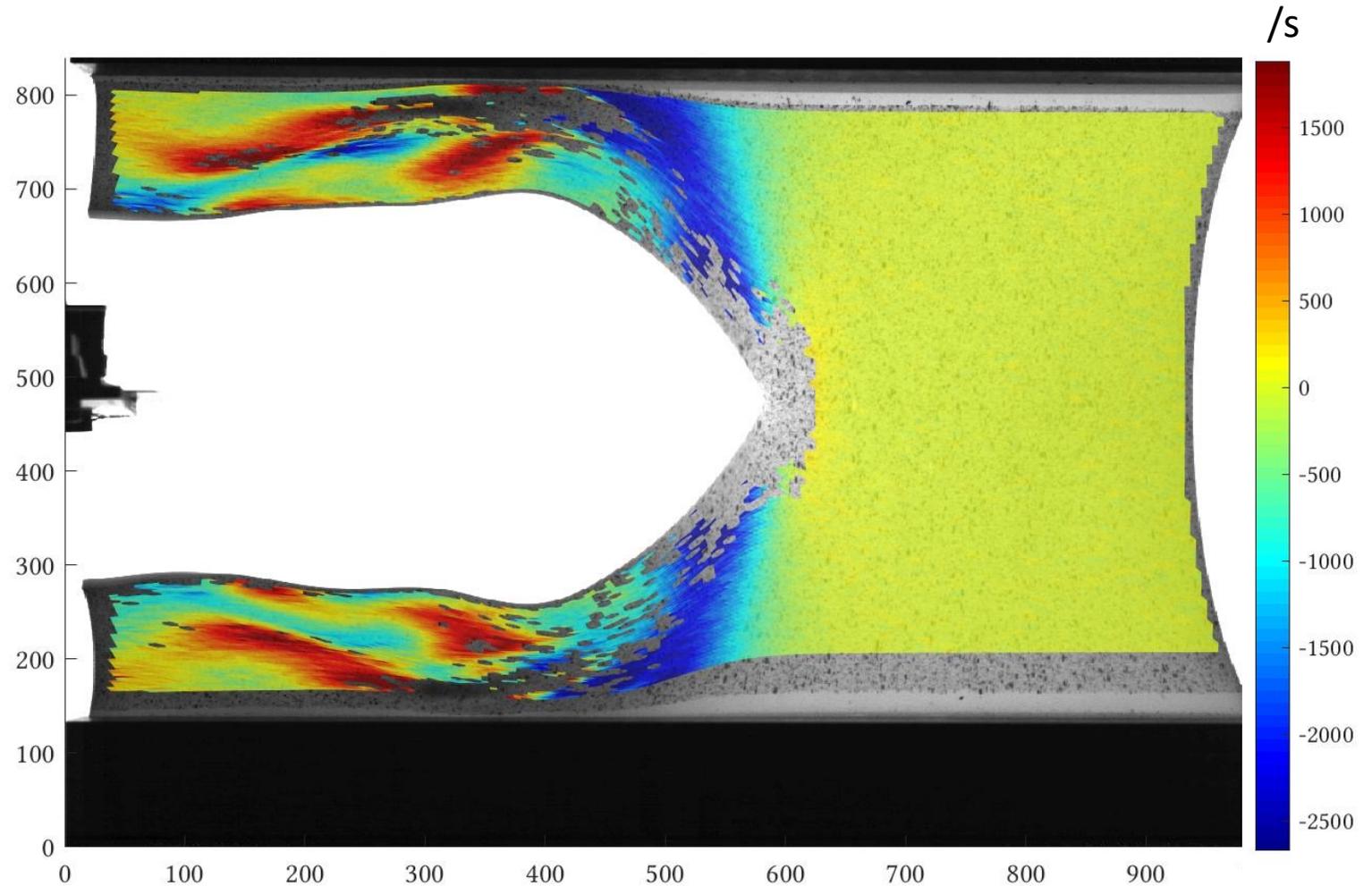
Résultats pendant la rupture

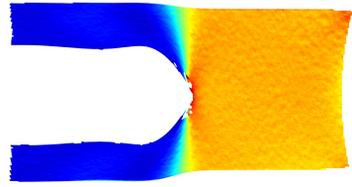
- Vitesse verticale



Résultats pendant la rupture

- Taux de déformation D_{22}





Discussion DIC

- Good... : Avec notre méthode et nos paramètres, on arrive à mesurer des champs jusqu'à environ 200-250% et en dynamique.

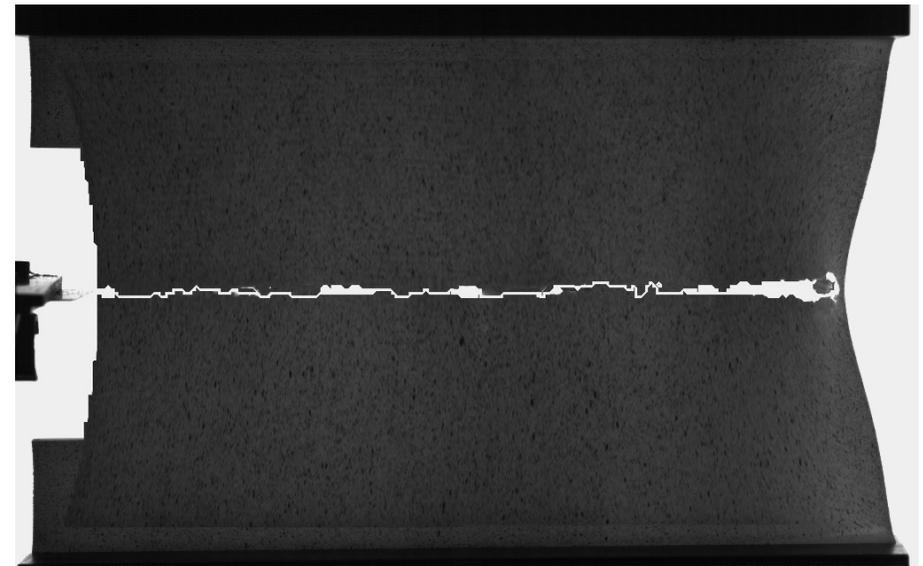
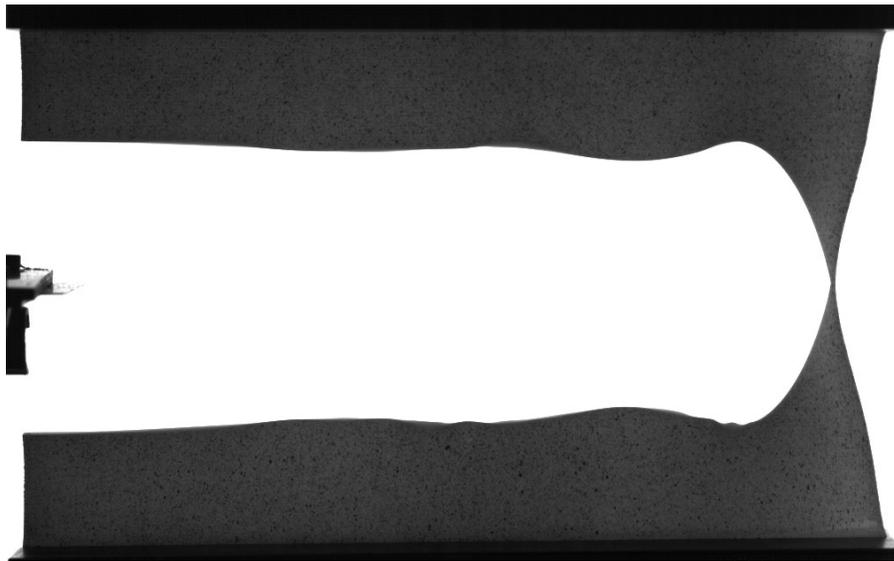
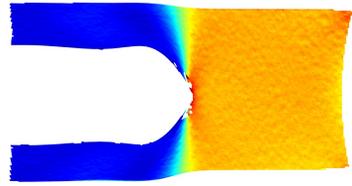


Image ramenée dans la configuration de référence (Merci JF Witz)



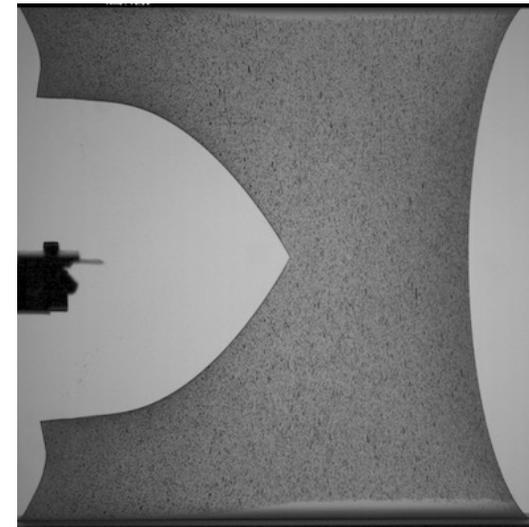
Discussion DIC

- Not good...**X** : pour les déformations plus grande $> 300\%$ on arrive pas à mesurer de champ...
 - Pas assez de résolution ?
 - Plus assez d'images ?
 - Speckle trop flou ?
 - ...?



Plan

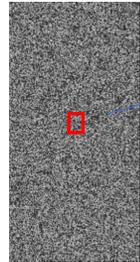
1. Endommagement et rupture de la peau (50%)
2. Membrane élastomère sous chargement complexe (100%)
3. Rupture Dynamique d'un PU (300%)
4. Des déformations encore plus grandes...



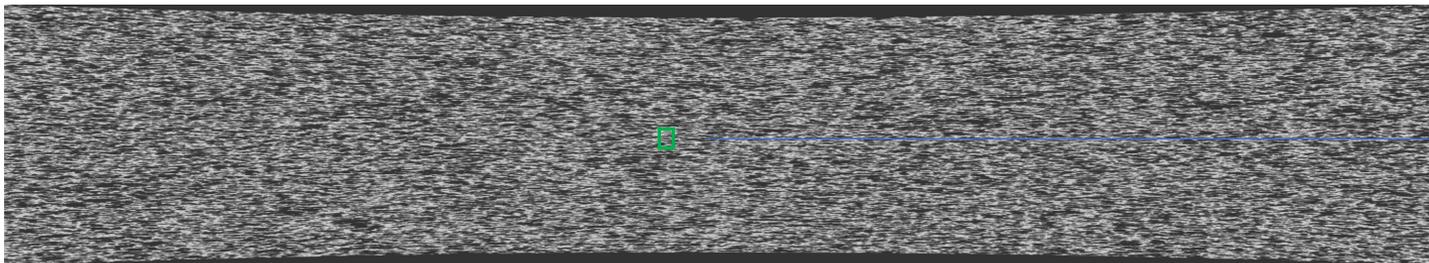
1000 % ?

- Un cas test *in-silico* – Images B. Blaysat

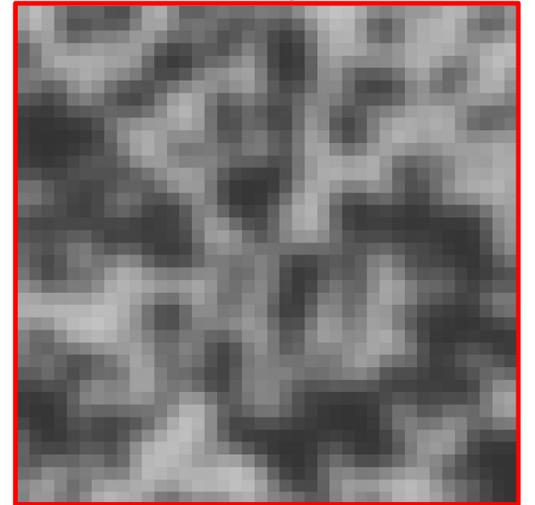
État de référence (1000 x 500 px)



État déformé : (1000 x 5500 px)



Zoom 40x40 px



Zoom 40x40 px



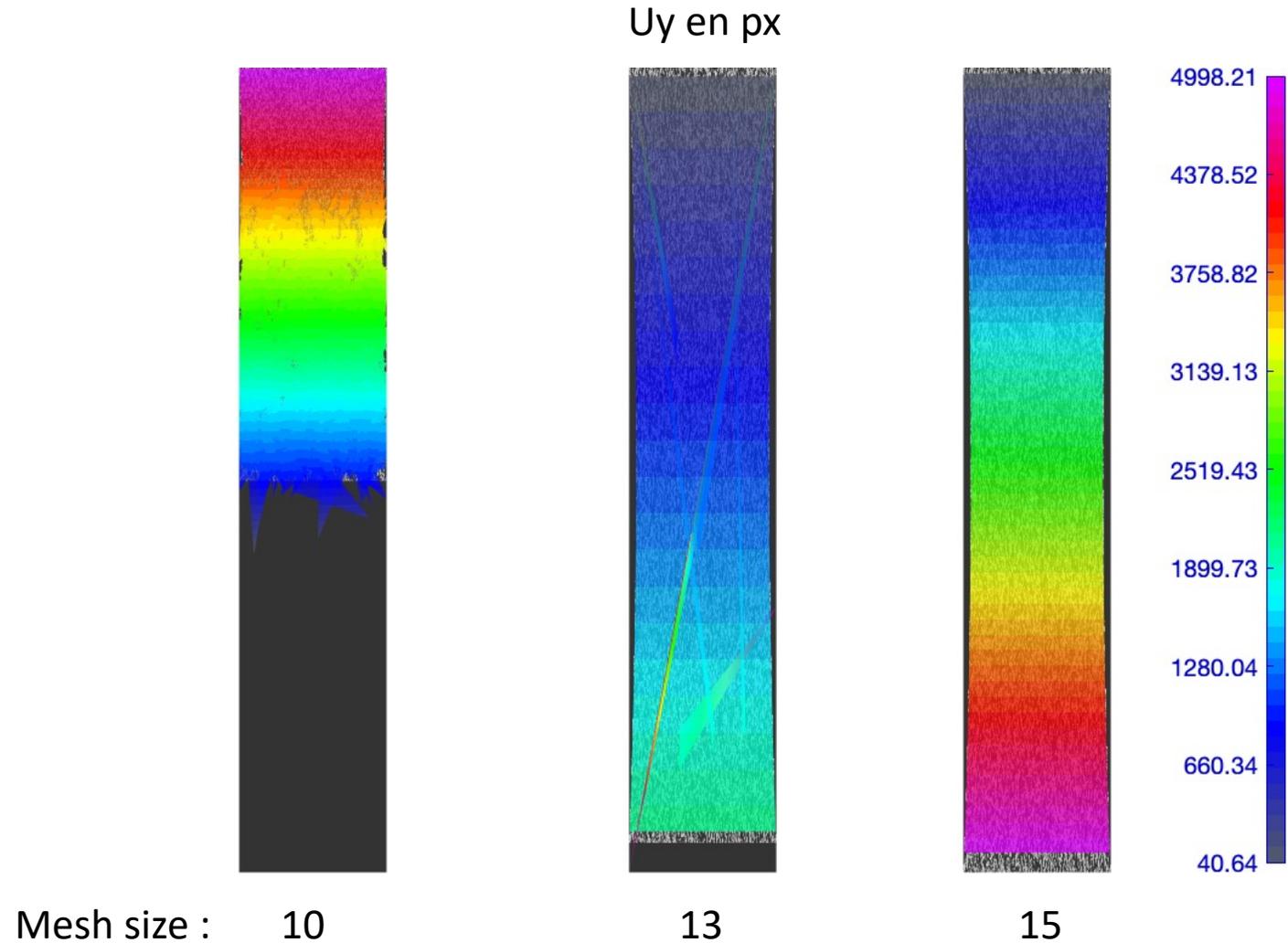
1000 % : DIC parameters

Logiciel

- Ufreckles – J. Réthoré – CNRS
- Méthode globale

Paramètres corrélation caméra haute résolution

- Elements : structured Q4
- Mesh size : ~~10, 13~~, 15, 20, 40
- Coarse grainig : 5 scales
- Explicit prediction
- Convergence limit 10^{-3}
- 500 images



1000 % : DIC parameters

Logiciel

- Ufreckles – J. Réthoré – CNRS
- Méthode globale

Paramètres corrélation caméra haute résolution

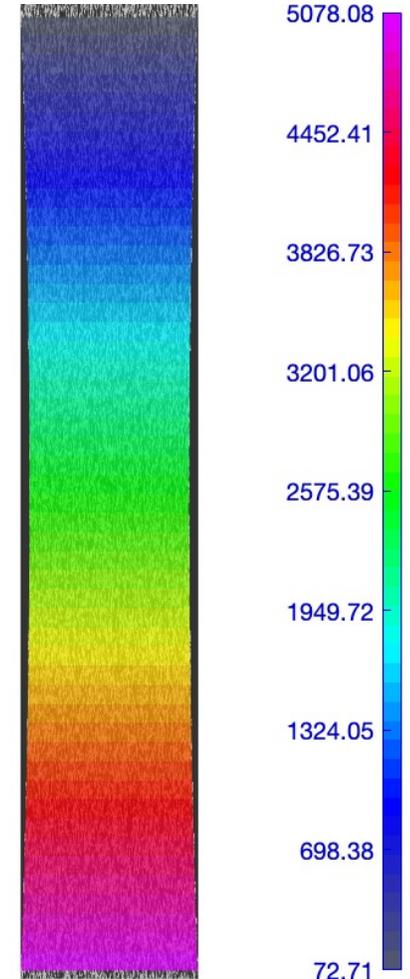
- Elements : structured Q4
- Mesh size : **15**
- Coarse grainig : 3, 4 scales
- Explicit prediction
- Convergence limit 10^{-3}
- 500 images

Uy en px



Coarse grainig :

3 scales



4 scales

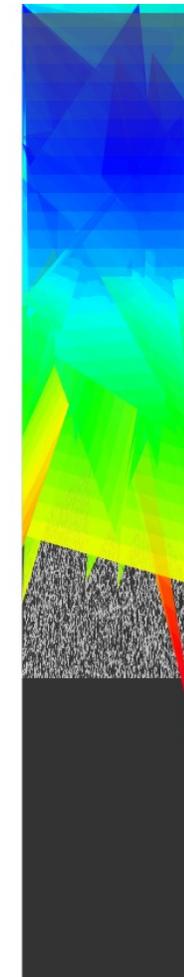
1000 % : DIC parameters

Logiciel

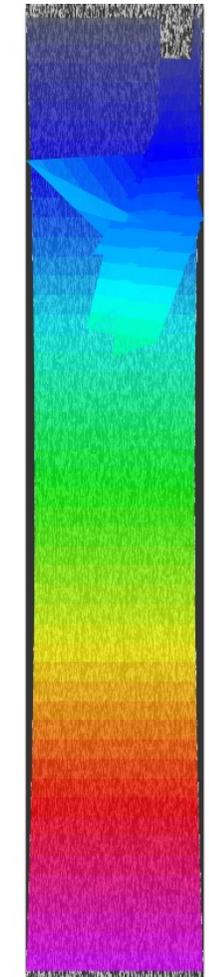
- Ufreckles – J. Réthoré – CNRS
- Méthode globale

Paramètres corrélation caméra haute résolution

- Elements : structured Q4
- Mesh size : **20**
- Coarse grainig : 4 scales
- Explicit prediction
- Convergence limit 10^{-3}
- **50 ou 500 images**



Nombre d'images : 50

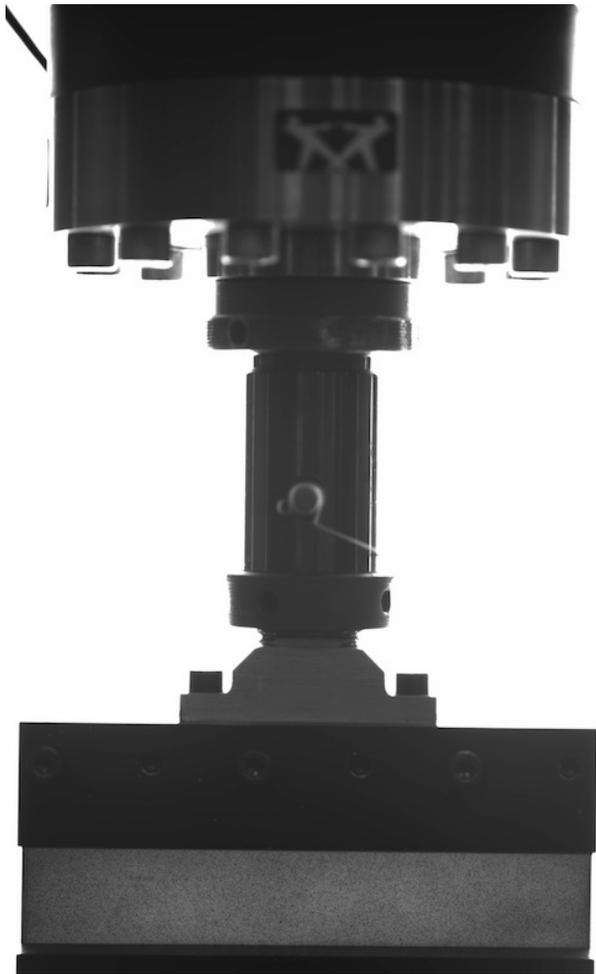


500



Essai réel : Pure-shear jusqu'à environ 500%

- Caméra Vieworks 47Mpx
- Objectifs macro Zeiss 100mm
- Peinture en spray noire
- Éclairage arrière par transmission
- 360 images
- Pixel size : 0.04 mm



État de référence



État déformé 43

Méthodologie : DIC

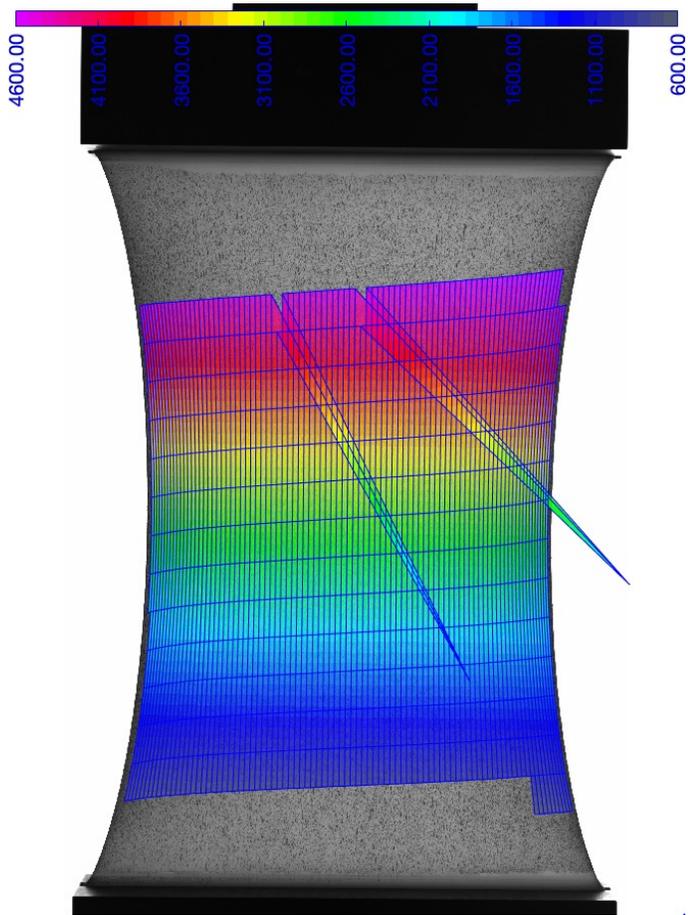
Logiciel

- Ufreckles – J. Réthoré – CNRS
- Méthode globale

Paramètres corrélation caméra haute résolution

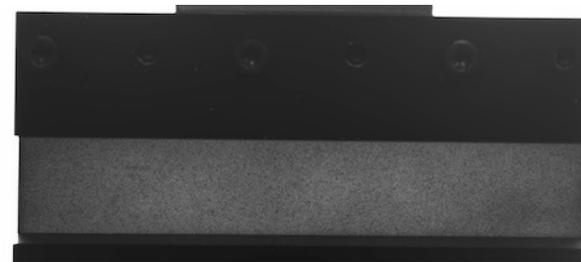
- Elements : structured Q4
- Mesh size : ~~30~~, 40, 50
- Coarse grainig : 5 scales
- Explicit prediction
- Convergence limit 10^{-3}
- Pas de régularisation

Essai réel : Résultat

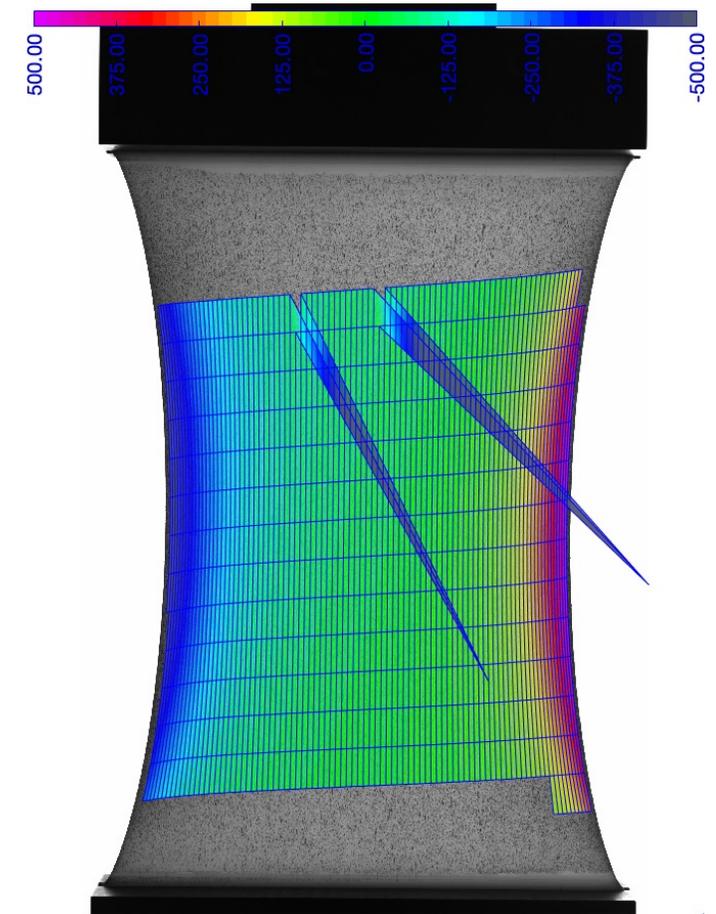


Ux (px)

- Champ de déplacement
- Écart(Discrepancy) : 12%



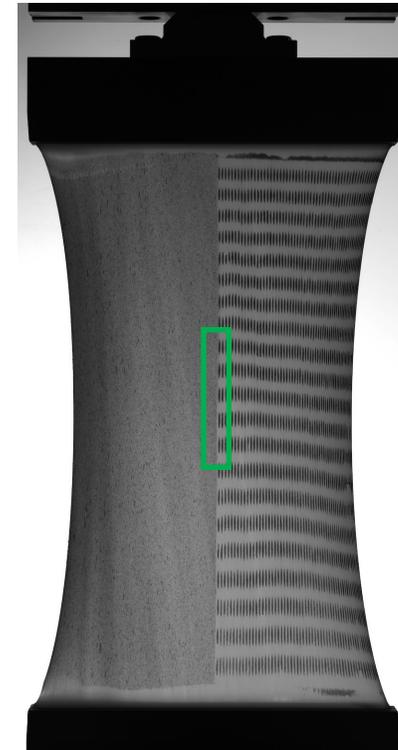
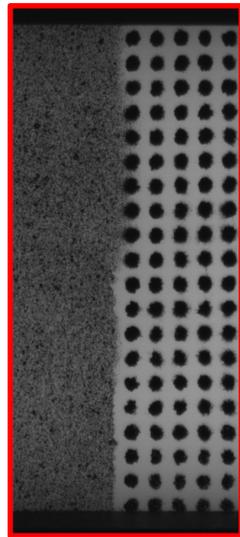
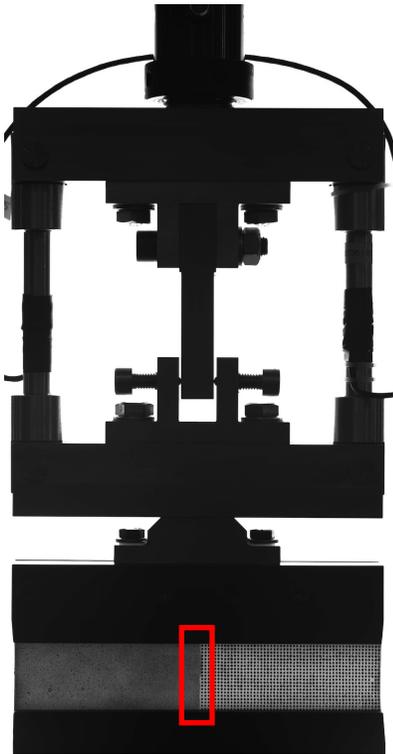
État de référence



Uy (px)

Essai réel : À continuer...

- Les images sont disponibles sur Zenodo : *DIC performance for huge strains: The X-Strain DIC Challenge* (GeM/ECN batch images) <https://zenodo.org/record/4264960> (Avec B. Blaysat et JF Witz)



Quelques conclusions

- Dans les cas présentés, la DIC fonctionne plutôt bien si :
 - Beaucoup d'images (de 1 à 2% de def max entre images)
 - Le coarse graining des approches globales est nécessaire
 - Il faut accepter des écarts de reconstruction bien supérieurs à ce que l'on a en petites déformations. (l'écart ou discrepancy passe de qq % à 10/11/12 %)
 - Les essais sur les très grandes déformations ont été réalisés sur des images pour lesquels les champs de déformation sont `simples' (très homogènes et chargements proportionnels)

Quelques conclusions

- Mais :
 - Pas de résultats ou d'étude plus globale sur la précision de la méthode
 - Quid d'essais plus compliqués avec des champs qui varient dans l'espace et dans le temps ?
 - Quel mouchetis est le plus adapté ? Un 'bon mouchetis' sur l'image de référence est-il suffisant ?
- Beaucoup de choses à rester...
 - Différentes méthodes d'initialisations (Disflow, SIFT... ?)
 - Quelle régularisation en grande déformation ?

Merci pour votre attention.



Inscription : <https://groupes.renater.fr/sympa/info/photomeca>