

# Les mesures de champs : un outil de mécanique expérimentale. Application à la caractérisation des bétons végétaux

E. Toussaint

Institut Pascal



GdR MBS  
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS

## Objectifs pour le mécanicien expérimental

- Mesurer des déplacements pour des éprouvettes, des structures, des assemblages.... sous sollicitations (mécaniques, thermiques..) à différents stades du chargement ;
- En déduire des déformations (gradients, fissures, modèles de comportement..., identification paramètres, comparaison simulations numériques, etc....)

## Atouts des mesures sans contact

- Exploitation d'images numériques acquises par moyens optiques
- Qualité des moyens d'acquisition, coût de plus en plus modeste
- Imagerie sans contact, facile à mettre en oeuvre
- Large gamme d'échelles d'espace et de temps
  - échelles nanométriques (microscopie à force atomique) à géophysiques (images satellite)
  - caméra rapides ou ultra-rapides (micro-seconde)
- Systèmes multicaméras : déplacements tridimensionnels en surface (2D1/2)
- Tomographie, résonance magnétique nucléaire : déplacements (3D) tridimensionnels en volume

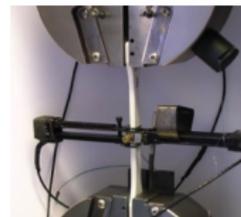
## Mesures en un point



Jauge d'extensomètre



Capteur LVDT



Extensomètre



Déplacement de traverse

## Mesures de champs sans contact



Lampe

Caméra

Pilotage  
caméraImages  
avant et  
pendant  
déformationChamps de  
déplacement  
et de  
déformation

## Qu'est-ce qu'une image ?

- Représentation bidimensionnelle d'un objet
- Prise à un instant donné
- Sous un grandissement donné



=> évolution dans le plan d'une grandeur : intensité lumineuse, température, etc...

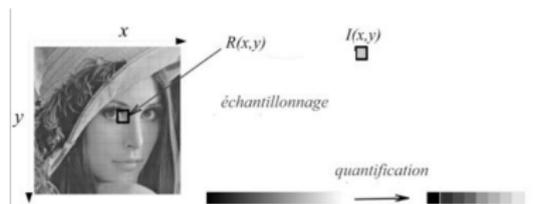
## Qu'est-ce qu'une image numérique ?

- Image : ensemble d'unités élémentaires (**pixels**) qui forment une image
  - Nombre de pixels
  - Etendue des teintes de niveaux de gris (**dynamique de l'image**)
- Images binaires (noir ou blanc)
- Images en teintes de gris (dépend du codage de la caméra : 8 bits ( $256 = 2^8$  niveaux de gris); 12 bits ( $4096 = 2^{12}$  niveaux de gris); 16 bits ( $65536 = 2^{16}$  niveaux de gris));



## Echantillonnage/quantification

- Echantillonnage : discrétisation spatiale (association à une zone rectangulaire  $R(x,y)$  une valeur unique de niveaux de gris  $I(x,y)$ ) => prélever les valeurs d'un signal à intervalles définis, généralement réguliers. On obtient une suite de valeurs discrètes.
- Quantification : limitation du nombre de valeurs différentes que peut prendre  $I(x,y)$



Échantillonnage



Quantification



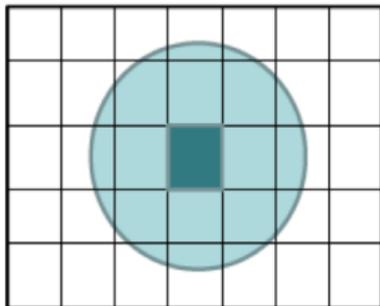
## Vocabulaire

- **Mesurande** : grandeur que l'on veut mesurer (déplacement, déformation, pente...)
- **Résultat de mesure** : ensemble des valeurs attribuées à un mesurande
- **Valeur mesurée** : valeur d'une grandeur représentant un résultat de mesure

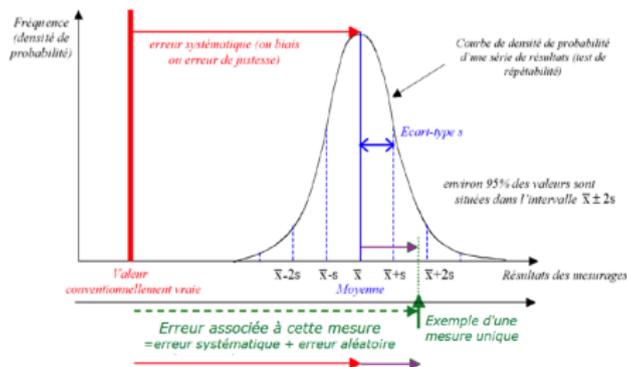
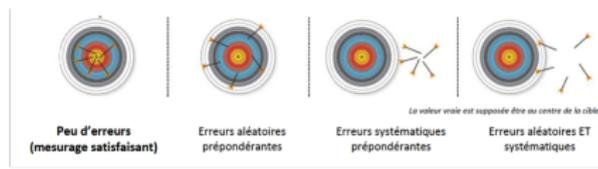
## Performances métrologiques

- **Résolution** : plus petite valeur du mesurande qui sort du bruit de mesure
- **Résolution spatiale** : plus petite distance entre deux points de mesure indépendants.
- **Finesse** : distance entre 2 points où une mesure est effectuée

finesse      résolution spatiale  
↔      ↔



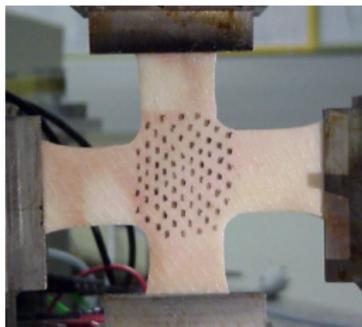
## Caractérisation des incertitudes de mesure



- Erreur en déplacement :  $\Delta u_{ij} = u_{ij}^{mesure} - u_{ij}^{impose}$
- Erreur systématique (ou biais ou erreur de justesse, "accuracy") :  $\Delta u = \frac{\sum \Delta u_{ij}}{n}$
- Erreur aléatoire (ou erreur de fidélité, "precision") :  $\sigma_u = \sqrt{\frac{n \sum \Delta u_{ij}^2 - (\sum \Delta u_{ij})^2}{n(n-1)}}$

## Suivi de marqueurs

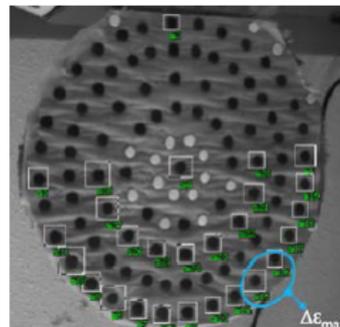
- Taches disposées sur la surface de la pièce étudiée au cours de la sollicitation
- Calcul du centre géométrique de la tache pondérée par l'intensité des niveaux de gris.
- Déplacement calculé par différence entre les positions des taches entre deux configurations
- 4 taches minimum pour calculer les composantes du gradient de la transformation
- 2 taches minimum pour calculer le gradient dans la direction des taches



traction biaxiale sur peau de porc [Doumalin et al]



Système d'ancrage du peuplier [Doumalin et al]

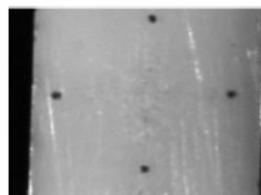
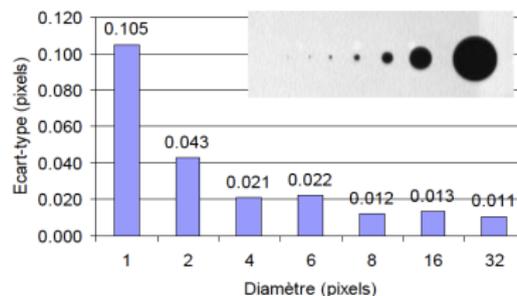


Séchage d'une rondelle de peuplier [Moutou Pitti et al]

- Méthode applicable aussi au 2D1/2 avec 2 caméras
- Mesure de position

## Suivi de marqueurs

- Taille du marqueur :  $r$ , suffisamment grand ( $>5$  pixels)
- Taille de la zone de recherche  $d=nr$ , suffisamment grand ( $>$  déplacement du motif ;  $n > 3$ )
- Niveau de seuillage :  $I_{seuil}$



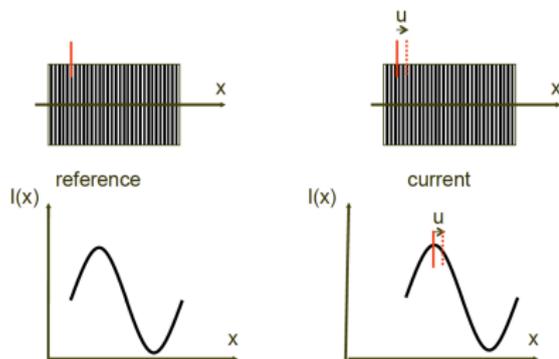
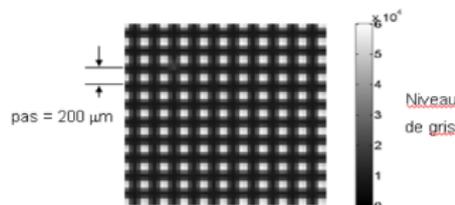
$seuil_1$



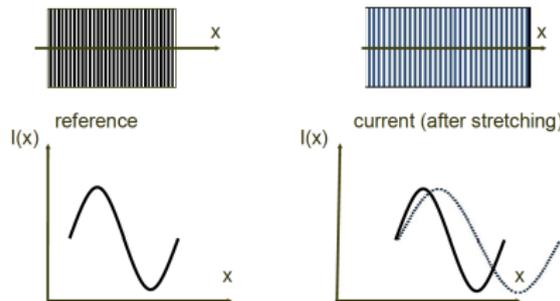
$seuil_2 < seuil_1$

## Méthode de la grille : méthode avec codage régulier de la surface

- Dépôt d'un **motif régulier** de traits parallèles équidistants et contrastés (grille)
- La grille (se déformant avec le substrat) joue le rôle d'une « porteuse » dont on étudie la modulation de phase
- Mesure de déplacement/déformation
- pas :  $p$  le + petit possible (résolution spatiale)



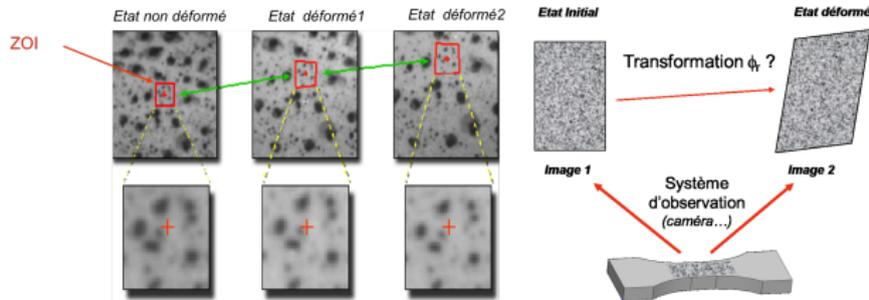
$$u = -\frac{p}{2\pi} \Delta\Phi$$



Déformation proportionnelle au changement de dérivée de fréquence/phase

## Méthodes avec codage aléatoire de la surface : Corrélation d'Images Numériques (DIC)

- Mise en correspondance de deux images numériques par sous-domaines (ZOI)
- Détermination du degré de ressemblance des niveaux de gris de chaque ZOI.
- Détermination de la position finale de chaque ZOI qui peut se déplacer et se déformer
- Nécessité de disposer d'une répartition aléatoire de niveaux de gris (motifs naturels ou artificiels)



- Taille mouchetis :  $r$  (résolution spatiale), 2 à 3 pixels
- Taille du motif de corrélation (résolution spatiale) :  $d=nr$  ( $n=2$  à  $3$ )
- Type de fonction de forme : transformation polynomiale, (constante, bilinéaire, bi-cubique...), spline, EF
- Forme du critère de corrélation

## Avantages des méthodes

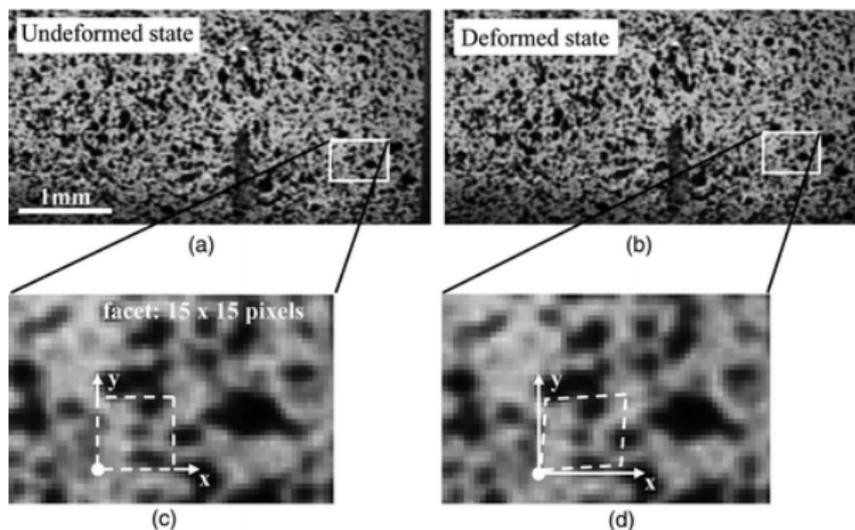
- Données de type "champ" de déplacement
- Méthode sans contact applicable à des géométries diverses
- Peut être utilisée pour des conditions de chargement très nombreuses, allant des petites déformations jusqu'à de très forts niveaux de déformation

## Spécificités techniques

Taille du champ mesuré	du $cm^2$ au $m^2$
Résolution en déplacement	0.01 pixels
Résolution en déformation	100 $\mu def$
Caméras	0.3 Mpixels à 16 Mpixels
Vitesse de mesure	1 fps à 1M fps

## Principes généraux

- Acquérir deux images d'une même zone à deux états mécaniques
- Associer les points homologues en se basant sur la « ressemblance » de leur voisinage
- En déduire le champ de déplacement, puis par dérivation discrète, le champ de déformation
- **Objectif** : déterminer le déplacement moyen d'une zone d'intérêt (« imagette » ou ZOI)

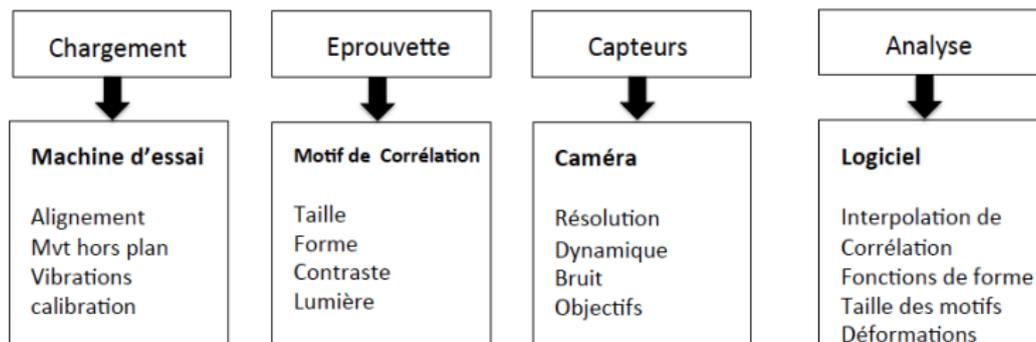


<http://asc.library.org/cms/attachment/6020/59765/figure3.gif>

## Besoins pour la corrélation

- Contraste d'image à l'échelle de la mesure qui accompagne le mouvement matériel (conservation du flux optique)
- Critère de ressemblance entre deux voisinages de points matériel "domaine et coefficient de corrélation"
- Description du mouvement local sur le voisinage
- Post-traitement : calcul des déformations, identification inverse de paramètres matériaux...

### Espace de mesure

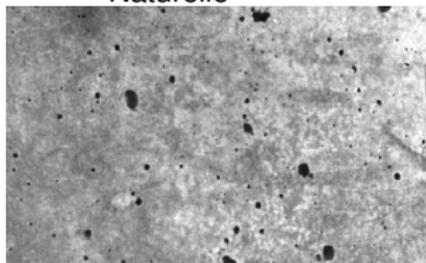


## Texture origine du contraste

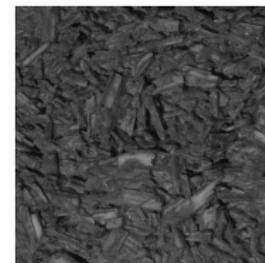


CLT, Woodeum

### Naturelle

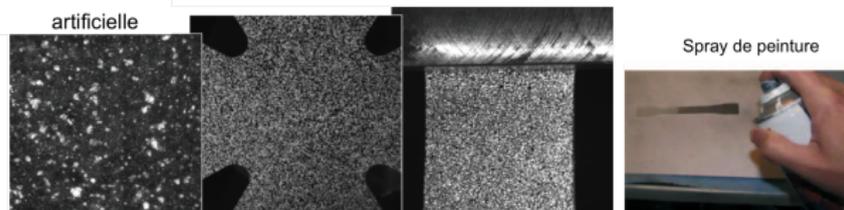


béton



béton végétal

- texture : signature de chaque élément de surface ;
- niveaux de gris : grande dynamique, pas de saturation ;
- forts contrastes d'un pixel à un autre : meilleure sensibilité aux faibles déplacements

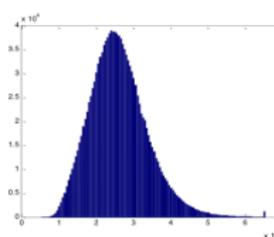
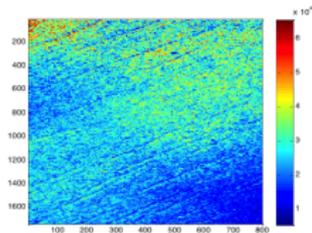
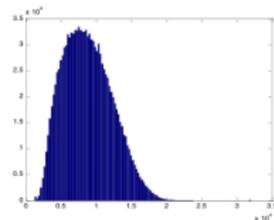
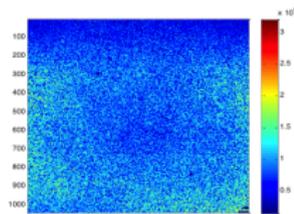


[Hild et al, 2010, colloque mécatat, Aussois]

## Eclairage

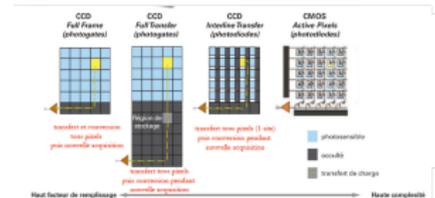
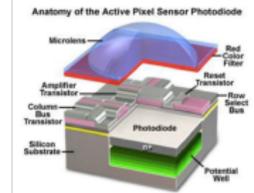
### Réglage éclairage/moucheti

- Marquage tel que toute la dynamique des images soit présente dans chaque domaine de corrélation
- Régler le système de numérisation (gain et exposition) de façon à utiliser toute la dynamique des images
- Vérifier par histogramme des niveaux de gris aussi large que possible mais sans saturation



## Choix de l'appareil photo

- Appareil photo classique sans autofocus ou avec autofocus débrayable ;
- Appareil reflex (vibrations possibles lors du mouvement du miroir) ;
- Caméra numérique (capteur CCD ou CMOS) ;
- Microscope optique, électronique ;
- Scanner...



[B. Watrresse, Ecole science du bois, Egletons, 2019]

## Quelques règles

- Déclenchement de la prise d'images à distance (sans toucher l'appareil photo)
- Privilégier une dynamique maximum en terme de pixels ;
- Faire des tests de stabilité des niveaux de gris en enregistrant deux fois la même image dans les mêmes conditions ;
- Eviter les fortes compressions jpg. Privilégier le format .tif ;
- Objectifs de bonne qualité et nettoyés.

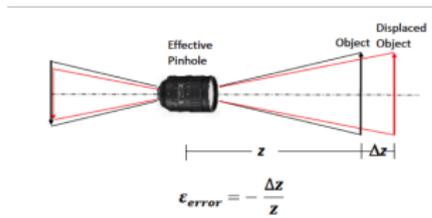
## Sources d'erreurs en corrélation 2D : Mouvements hors plan

## Hypothèses

- Eprouvettes planes soumises à des déformations dans le plan
- Alignement perpendiculaire de la caméra par rapport à la surface de l'éprouvette

Non respect → Mouvements hors plans et déformations artificielles.

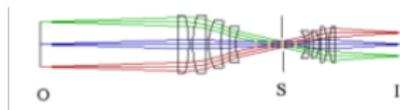
## Estimation de l'erreur en déformation par l'optique géométrique



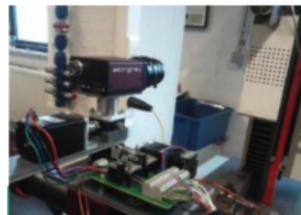
Exemple  
 $Z=200\text{mm}$   
 $\Delta z=0.41\text{ mm}$   
 $\Delta \epsilon = -0.41/200=-0.002$

## Solutions

- Objectif télécentrique : la taille de l'objet vu par la caméra ne dépend pas de sa position

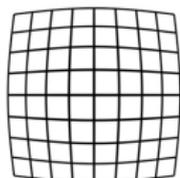


- Contrôle automatique de la perpendicularité

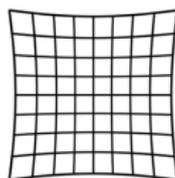


[DIC correlation group, P. Lava, 2013]

## Sources d'erreurs en corrélation 2D : distorsion



Barrel Distortion



Pincushion Distortion

## Solutions

- Translater et pivoter une grille dont on connaît les dimensions
- Détecter les erreurs de positionnement
- Trouver les paramètres de correction

## Causes possibles de la distorsion

- Focale courte (grand angulaire) => distorsion en barillet
- Focale longue (téléobjectifs) => distorsion en coussinet
- Mise au point
- Emplacement du diaphragme



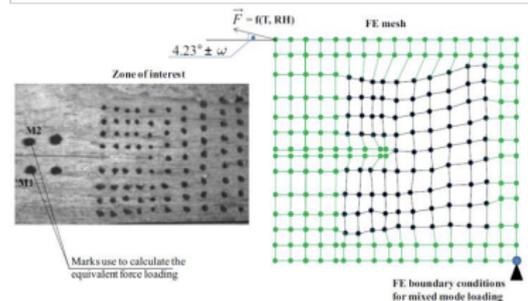
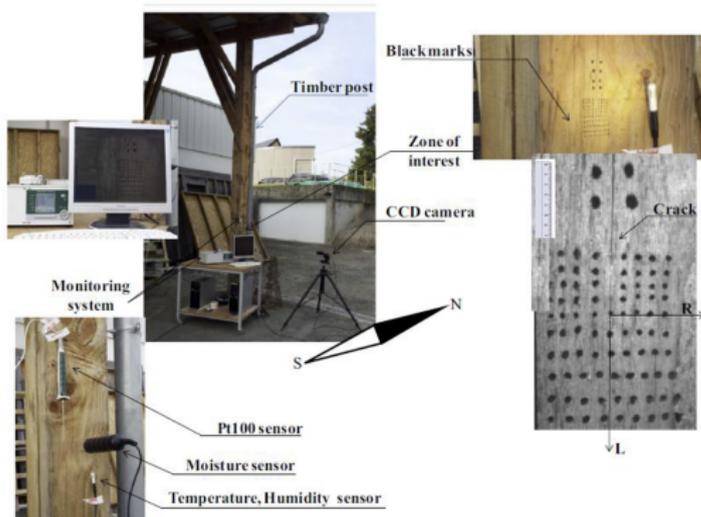
Zoom lens



C-mount

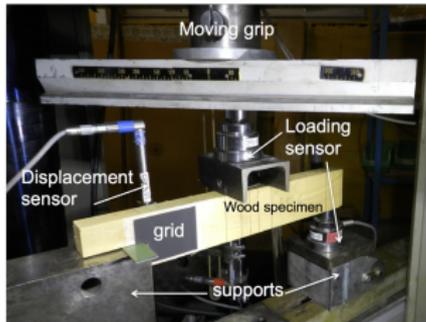
[DIC correlation group, P. Lava, 2013]

## Bois de construction : fissuration en mode mixte (Marqueurs)

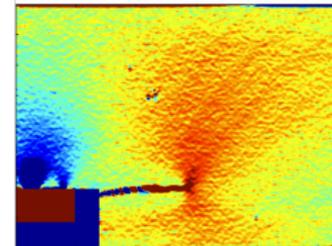
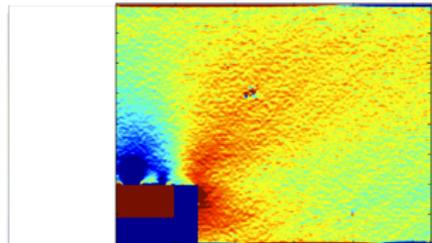
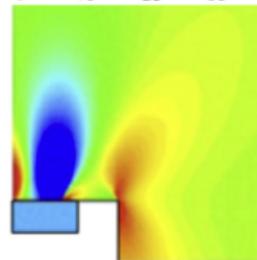
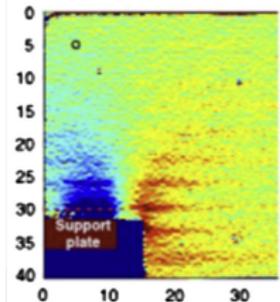
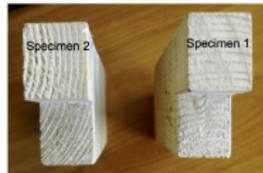


[J.-C. Dupré, Ecole science du bois, Egletons, 2019]

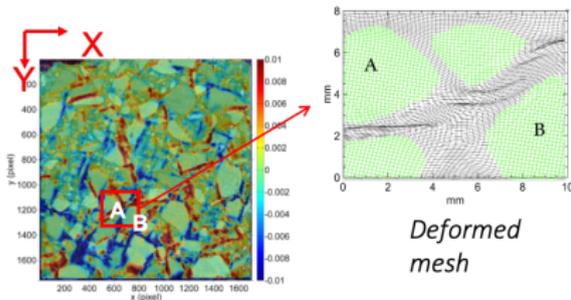
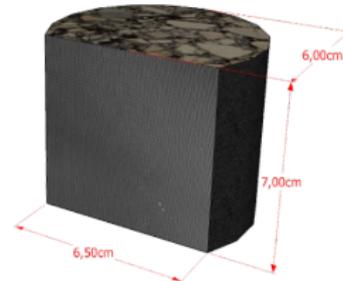
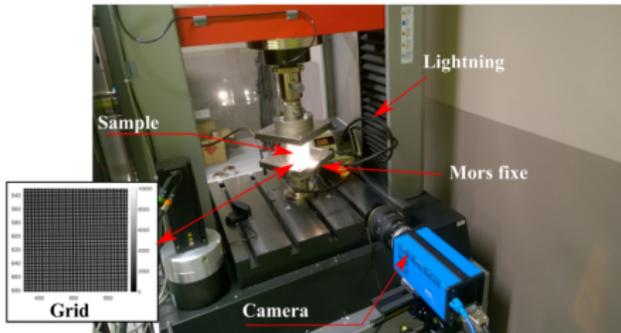
## Structures bois (Grille)



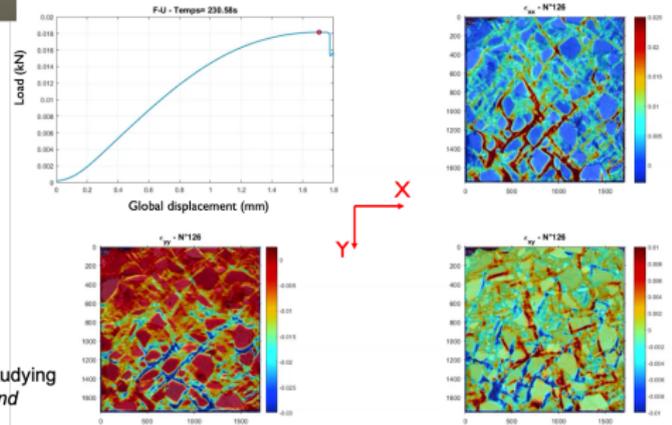
TOUSSAINT E., FOURNELY E., MOUTOU  
PITTI R., GREDIAC M.,  
*Studying the mechanical behavior of notched wood  
beams using full-field measurements*  
Engineering Structures, 113, 277-286, 2016



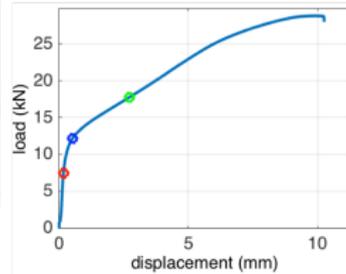
## Enrobé bitumineux (Grille)



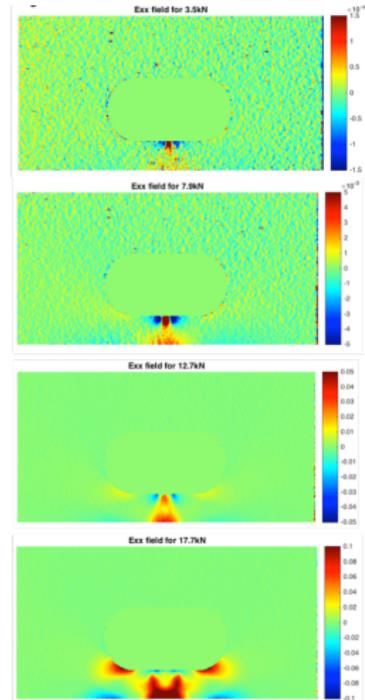
Teguedi, M. C., Blaysat, B., Toussaint, E., Moreira, S., Liandrat, S., & Grédiac, M. (2016). 'Applying a full-field measurement technique for studying the local deformation in reclaimed asphalt pavements'. *Construction and Building Materials*, 121, 547-558.



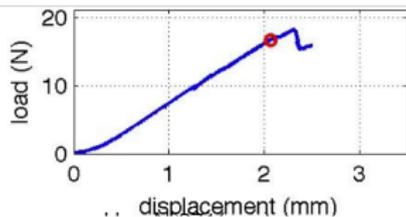
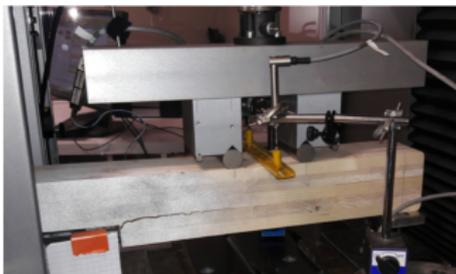
## Assemblage métal (DIC)



CAVENE E., DURIF S., BOUCHAÏR A., TOUSSAINT E.  
*Experimental study of slotted hole bolted cover-plate connection using full field measurement*  
Structures, 2020, 23, 573-587

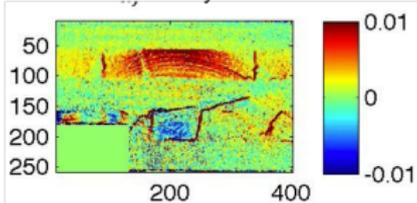


## Structures bois (DIC)

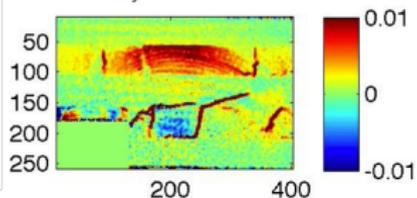


## Flexion 4 points CLT

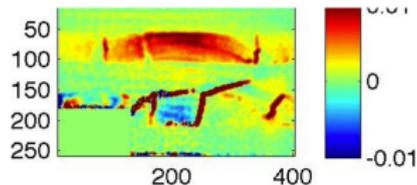
Base de dérivation  
Pour le calcul des  
déformations

 $\epsilon_{xy}$ 


3

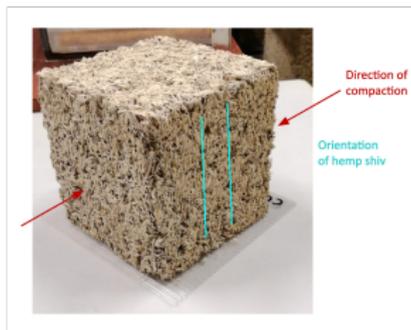


5

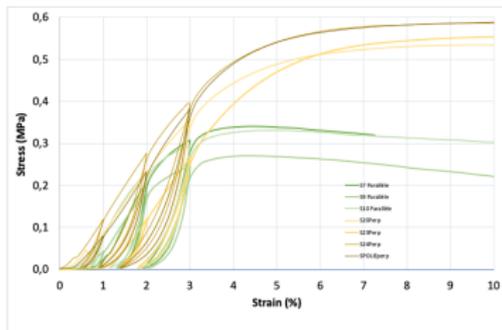


7

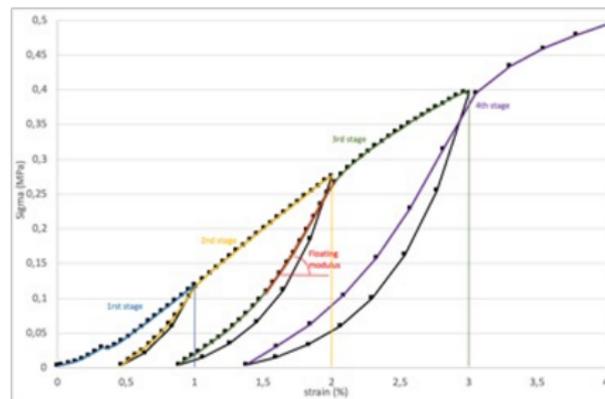
## Béton végétal (DIC) Comportement global



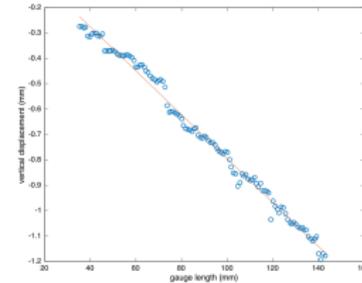
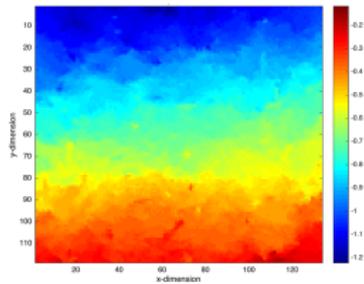
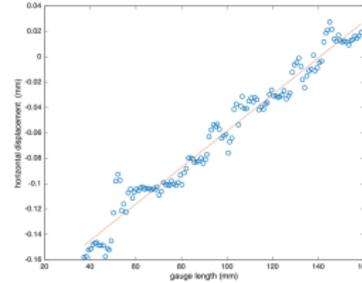
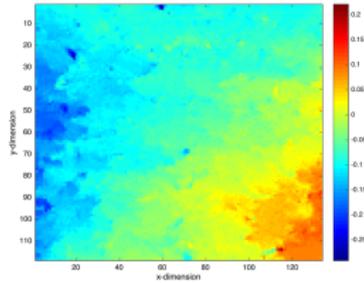
Influence de l'orientation du cube sur la réponse globale



Détermination du module flottant à partir des mesures globales



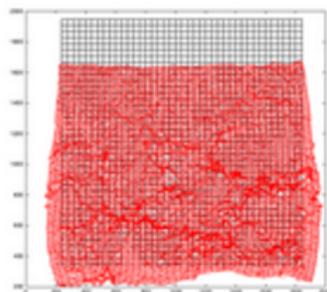
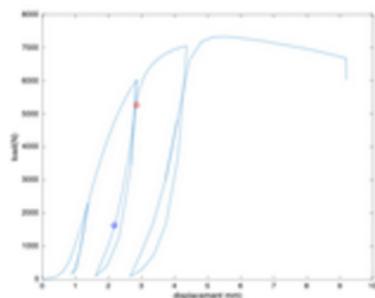
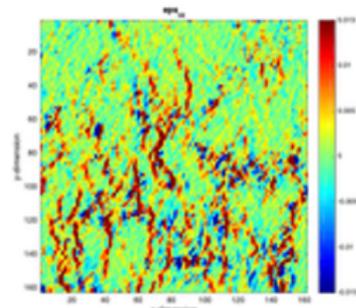
## Béton végétal (DIC) Comportement global



	E courbe globale (MPa)	E moyen CIN (MPa)	$\nu$ CIN
Direction parallèle	$27.5 \pm 3,8$	$44.0 \pm 3.3$	*
Direction perpendiculaire	$25.8 \pm 2.5$	$33.6 \pm 3,8$	$0.19 \pm 0,04$

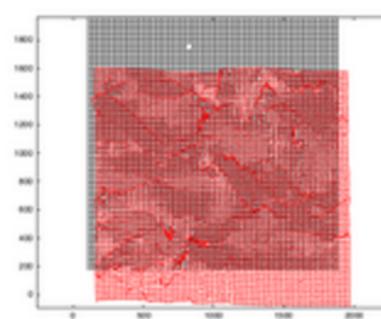
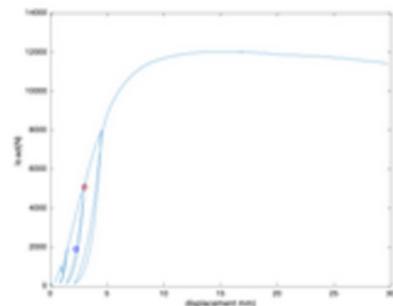
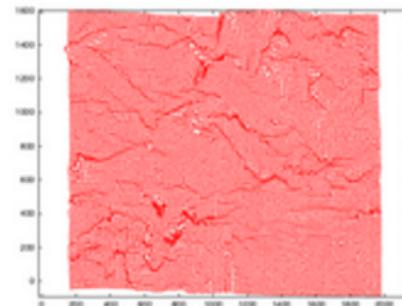
## Béton végétal (DIC) Comportement local

## Eprouvette parallèle

**barrel distorsion****Localization of high strain zones at the boundaries between aggregates**

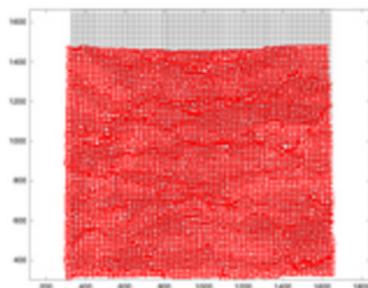
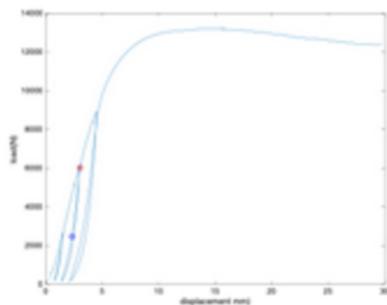
## Béton végétal (DIC) Comportement local

Eprouvette perpendiculaire

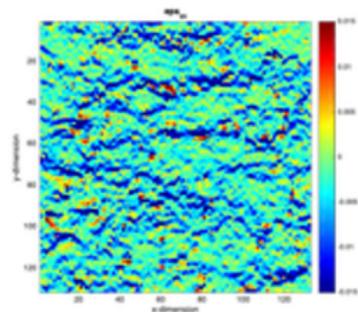
**lateral movement****Localization of the strain mechanisms at the aggregate scale**

## Béton végétal (DIC) Comportement local

### Eprouvette perpendiculaire

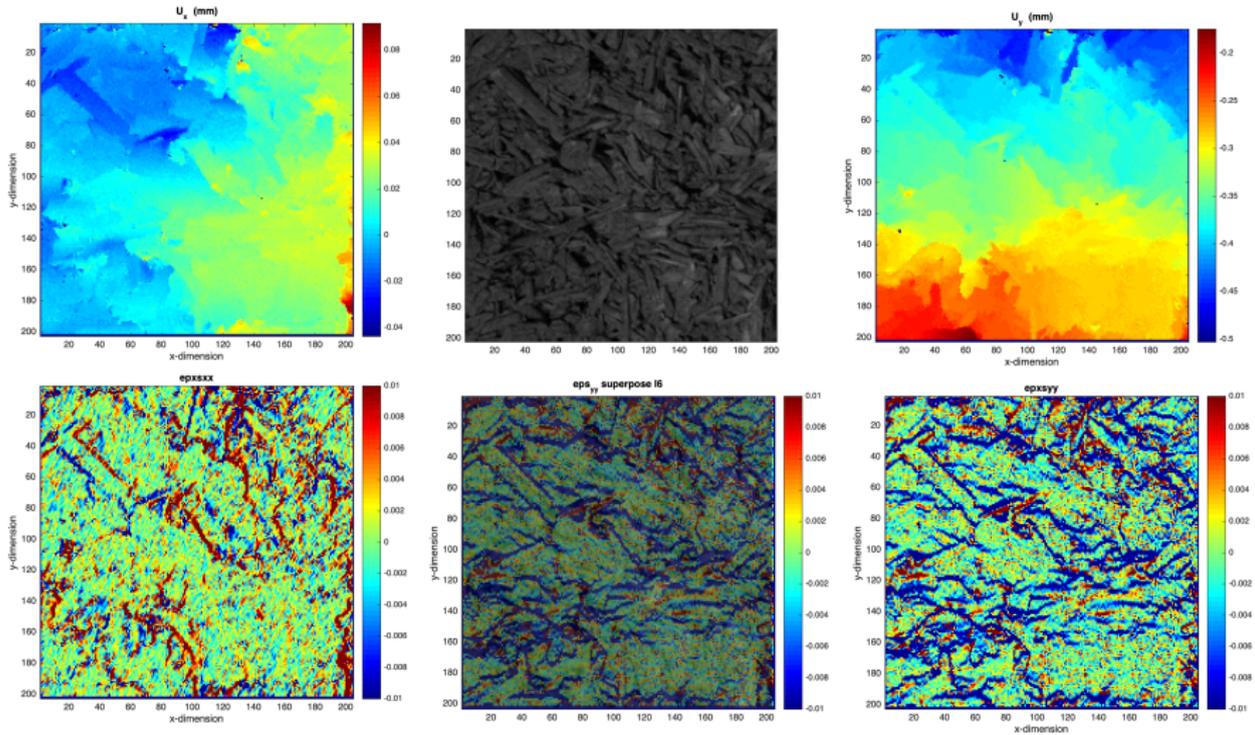


**non uniform loading**

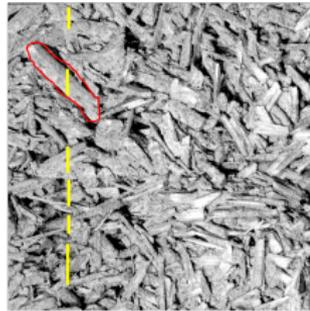


**Localization of high strain zones at the boundaries between aggregates**

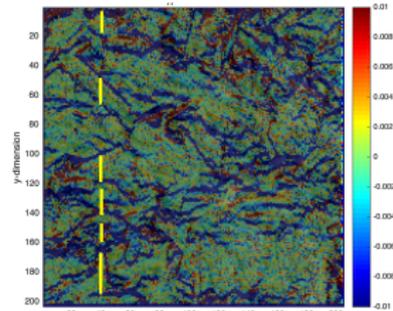
## Béton végétal (DIC) Comportement local



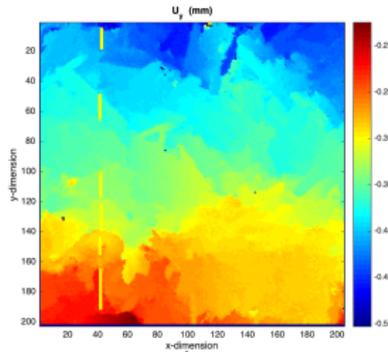
# Béton végétal (DIC) Comportement local



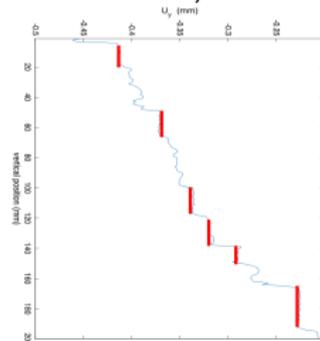
a)



b)

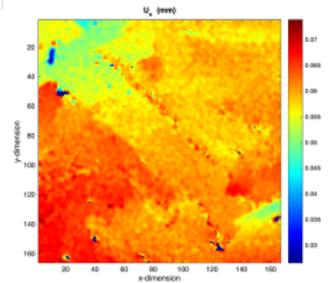
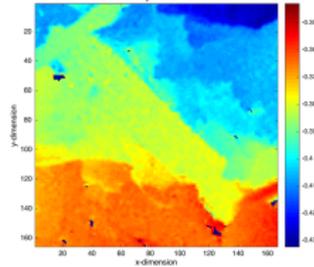
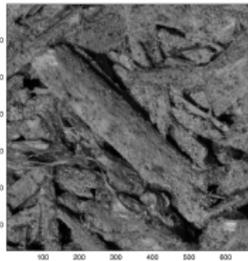
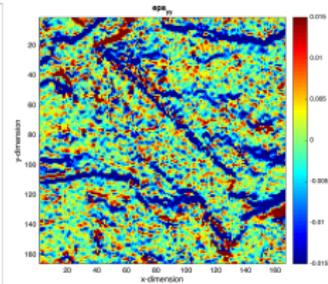
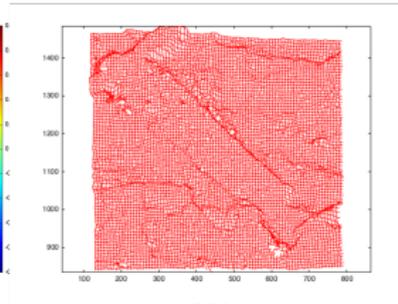
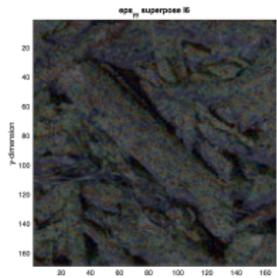


c)



d)

# Béton végétal (DIC) Comportement local



## Quelques références bibliographiques

- Mesures de champs de déplacement par corrélation d'images et applications en mécanique des solides, F. Hild, notes de cours ISPI, 2003, Cachan
- Mesure des champs cinématiques par corrélation d'images numériques, M. Bornert, LMS, Ecole Polytechnique, F. Hild, LMT, ENS Cachan, Atelier Photomécanique 6 -12 juillet 2004, Saint-Étienne
- Evaluation d'erreurs de mesure par corrélation d'images numériques : méthodologie et résultats, L. Robert , B. Wattrisse, 19ème Congrès Français de Mécanique Marseille, 24-28 août 2009
- Quelques méthodes mathématiques pour le traitement d'images, M. Bergounioux, cel-00125868, version 4 - 4 Jan 2009
- La Correlation d'images : un outil de mécanique expérimentale, G. Besnard, F. Hild, H. Leclerc, J.-N. Périé, J. Réthoré, S. Roux, LMT-Cachan, LaMCoS / INSA Lyon, ICA / Université de Toulouse, Colloque National - Mecamat - 11 Janvier 2010
- Assessment of Digital Image Correlation Measurement Accuracy in the Ultimate Error Regime: Main Results of a Collaborative Benchmark, F. Amiot, M. Bornert, P. Doumalin, J. -C. Dupré, M. Fazzini, J. -J. Orteu, C. Poilâne, L. Robert, R. Rotinat, E. Toussaint, B. Wattrisse and J. S. Wienin, STRAIN, 2013
- Mesures en mécanique par méthodes optiques, Fabrice BRÉMAND, Mario COTTRON, Pascal DOUMALIN, Jean-Christophe DUPRÉ, Arnaud GERMANEAU, Valéry VALLE, Techniques de l'Ingénieur, R 1 850v2
- Studying the mechanical behavior of notched wood beams using full-field measurements, Toussaint E., Fournely E., Moutou Pitti R., Grédiac M., Engineering Structures, 113, 277-286, 2016
- Strain measurements and analyses around the bolt holes of structural steel plate connections using full-field measurements, Toussaint E., Durif S., Bouchaïr A., Grédiac M., Engineering Structures, 131, 148-162, 2017
- Experimental study of slotted hole bolted cover-plate connection using full field measurement, Cavene E., Durif S., Bouchaïr A, Toussaint E. Structures, 2020, 23, 573-587