

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

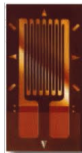
Objectifs pour le mécanicien expérimental

- 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

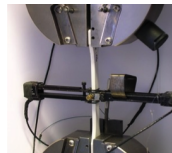
Mesures en un point



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...

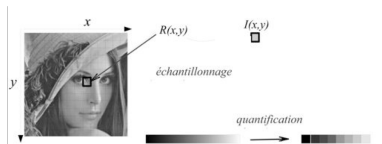
Qu'est-ce qu'une image numérique ?

- 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



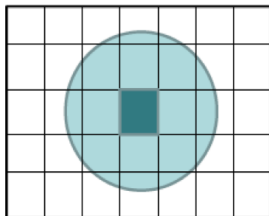
Vocabulaire

- **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

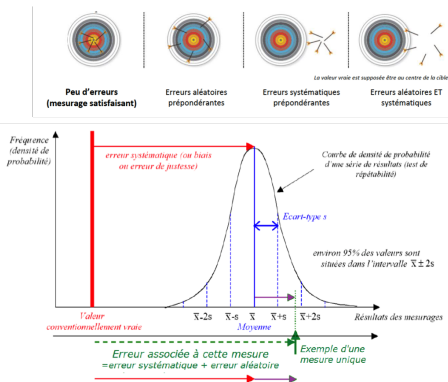
Performances métrologiques

- **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
 ↔ ↔



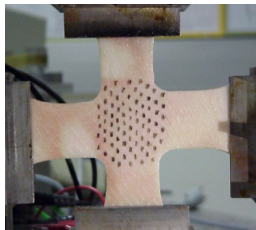
Caractérisation des incertitudes de mesure



- 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

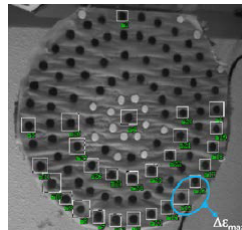
- Taches disposées sur la surface de la pièce étudiée au cours de la sollicitation
- Calcul du centre géométrique de la tache pondérée par l'intensité des niveaux de gris.
- Déplacement calculé par différence entre les positions des taches entre deux configurations
- 4 taches minimum pour calculer les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

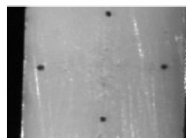
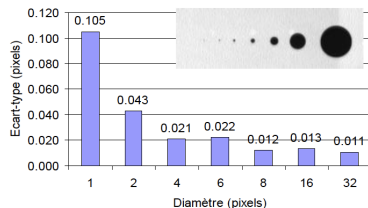


Séchage d'une rondelle de peuplier [Moutou Pitti et al]

- 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}



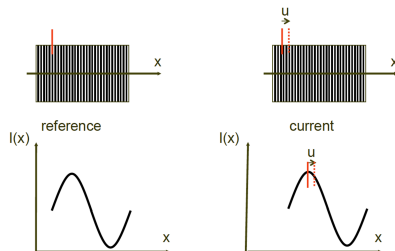
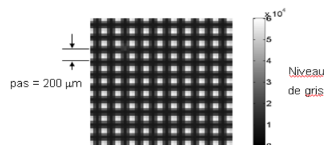
$seuil_1$



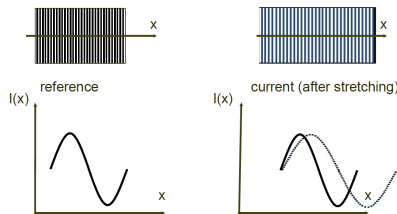
$seuil_2 < seuil_1$

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)



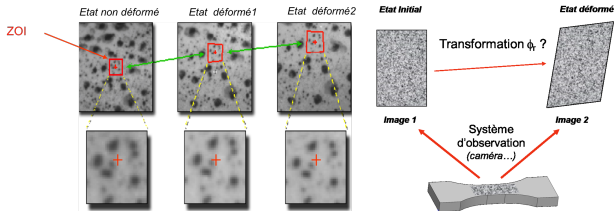
$$u = -\frac{p}{2\pi} \Delta\Phi$$



Déformation proportionnelle au changement de dérivation 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

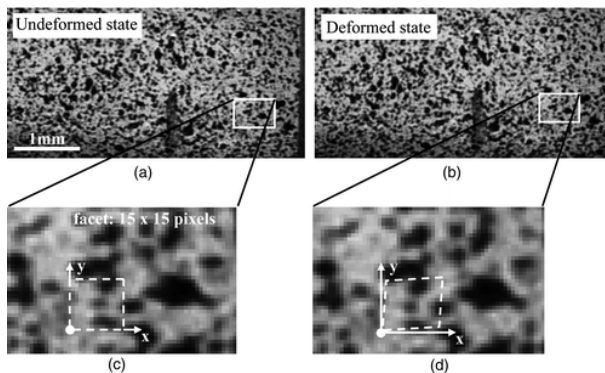
- Données de type "champ" de déplacement
- Méthode sans contact applicable à des géométries diverses
- Peut être utilisée pour des conditions de chargement très nombreuses, allant des petites déformations jusqu'à de très forts niveaux de déformation

Spécificités techniques

Taille du champ mesuré	du cm^2 au m^2
Résolution en déplacement	0.01 pixels
Résolution en déformation	100 μdef
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)

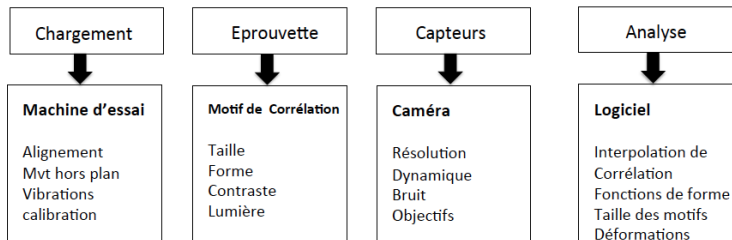


<http://ascelibrary.org/cms/attachment/6020/59765/figure3.gif>

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

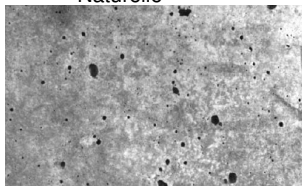


Texture origine du contraste

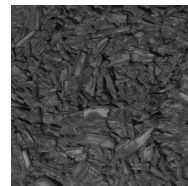


CLT, Woodeum

Naturelle

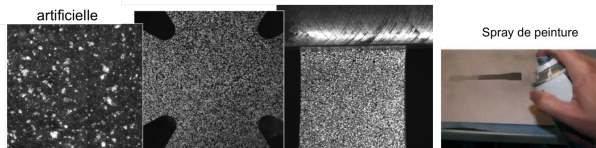


béton



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

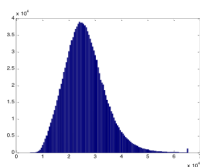
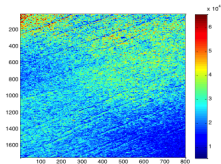
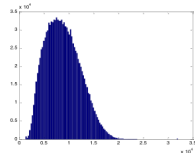
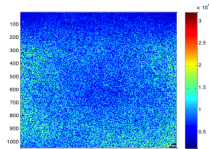


[Hild et al, 2010, colloque mécatat, Aussois]

Eclairage

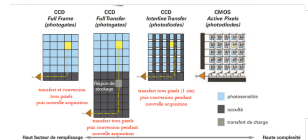
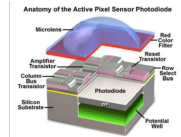
Réglage éclairage/moucheti

- 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.

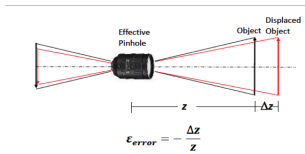
Sources d'erreurs en corrélation 2D : Mouvements hors plan

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.

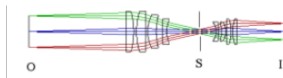
Estimation de l'erreur en déformation par l'optique géométrique



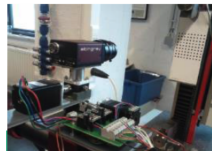
Exemple
 $Z=200\text{mm}$
 $\Delta z=0.41\text{ mm}$
 $\Delta \epsilon = -0.41/200=-0.002$

Solutions

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

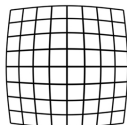


- Contrôle automatique de la perpendicularité

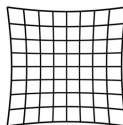


[DIC correlation group, P. Lava, 2013]

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



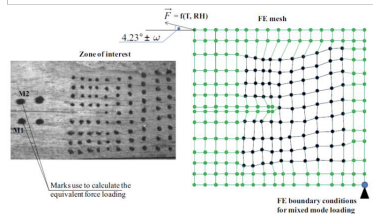
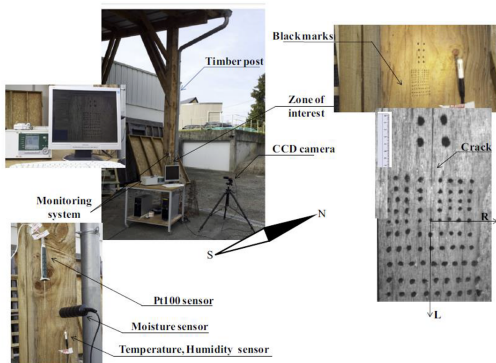
Zoom lens



C-mount

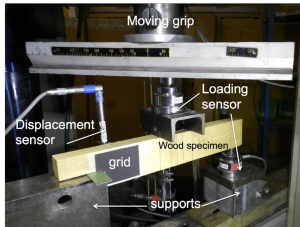
[DIC correlation group, P. Lava, 2013]

Bois de construction : fissuration en mode mixte (Marqueurs)

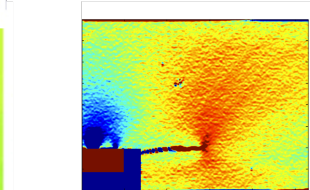
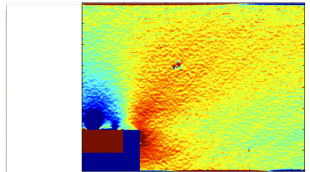
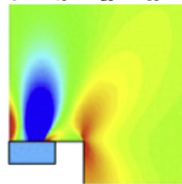
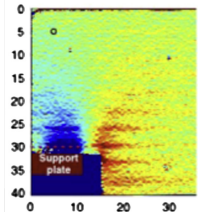
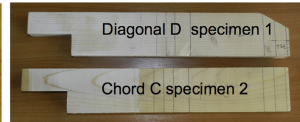
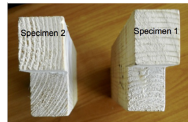


[J.-C. Dupré, Ecole science du bois, Egletons, 2019]

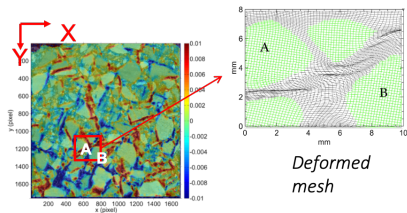
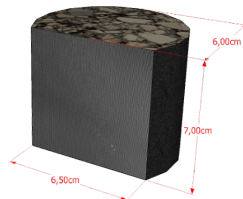
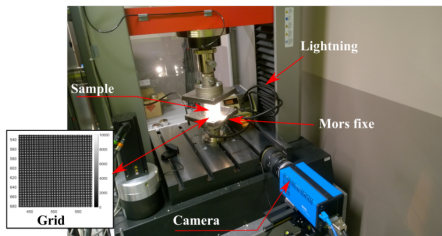
Structures bois (Grille)



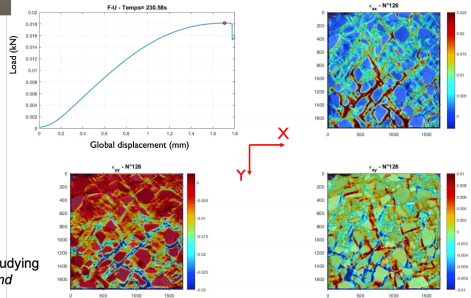
TOUSSAINT E., FOURNELY E., MOUTOU
 PITTI R., GREDIAC M.,
*Studying the mechanical behavior of notched wood
 beams using full-field measurements*
 Engineering Structures, 113, 277-286, 2016



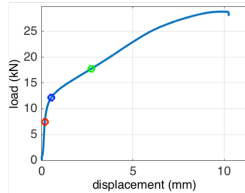
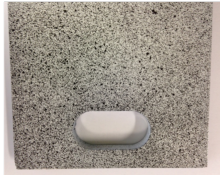
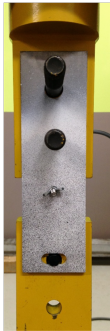
Enrobé bitumineux (Grille)



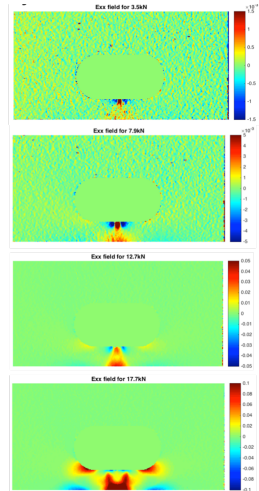
Teguedi, M. C., Blaysat, B., Toussaint, E., Moreira, S., Liandrat, S., & Grédiac, M. (2016). 'Applying a full-field measurement technique for studying the local deformation in reclaimed asphalt pavements'. *Construction and Building Materials*, 121, 547-558.



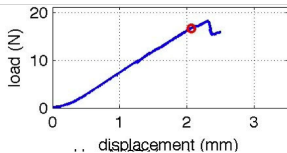
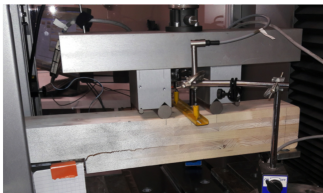
Assemblage métal (DIC)



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

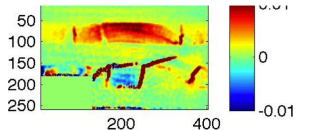
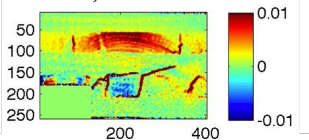
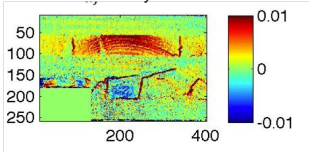


Structures bois (DIC)

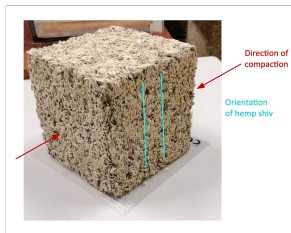


Flexion 4 points CLT

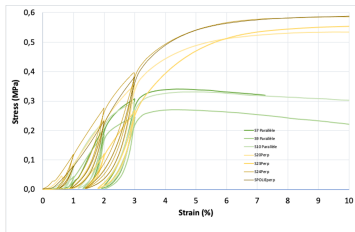
Base de dérivation
Pour le calcul des
déformations

 ϵ_{xy}


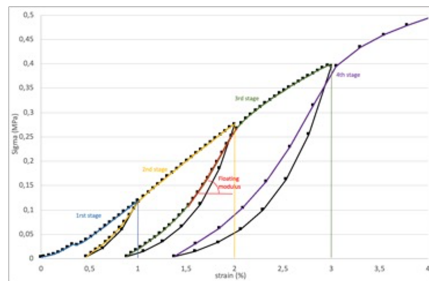
Béton végétal (DIC) Comportement global



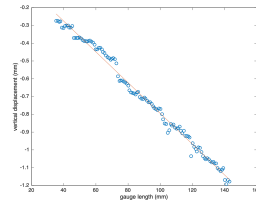
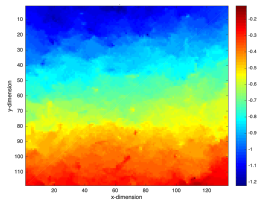
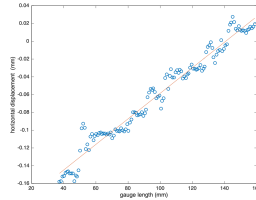
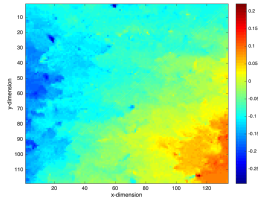
Influence de l'orientation du cube sur la réponse globale



Détermination du module flottant à partir des mesures globales



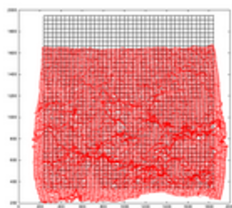
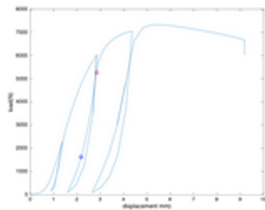
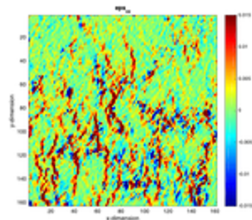
Béton végétal (DIC) Comportement global



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

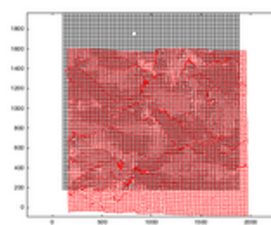
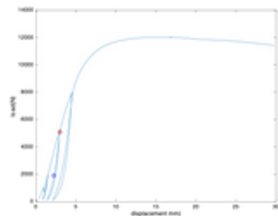
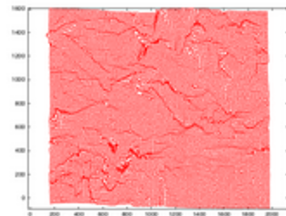
Béton végétal (DIC) Comportement local

Eprouvette parallèle

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

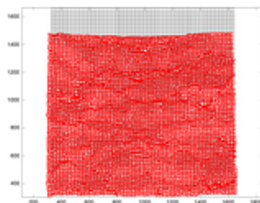
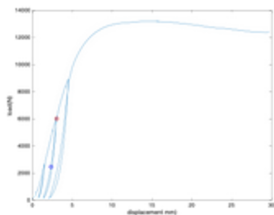
Béton végétal (DIC) Comportement local

Eprouvette perpendiculaire

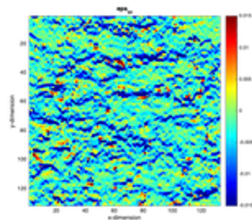
**lateral movement****Localization of the strain mechanisms at the aggregate scale**

Béton végétal (DIC) Comportement local

Eprouvette perpendiculaire

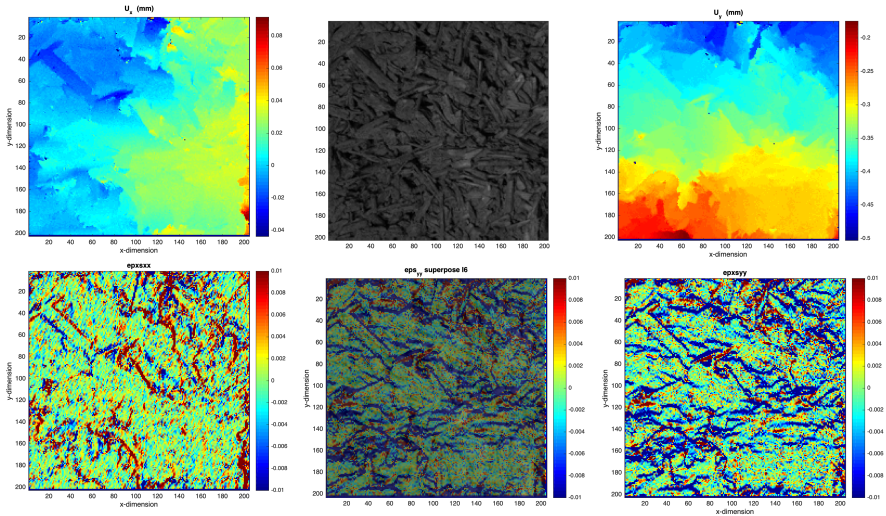


non uniform loading

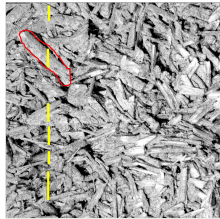


Localization of high strain zones at the boundaries between aggregates

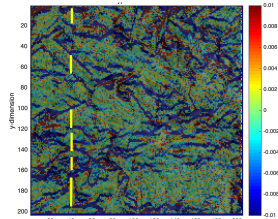
Béton végétal (DIC) Comportement local



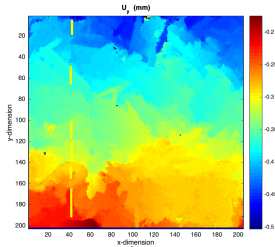
Béton végétal (DIC) Comportement local



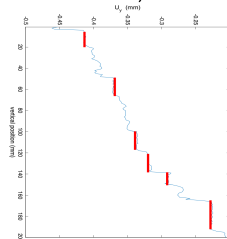
a)



b)

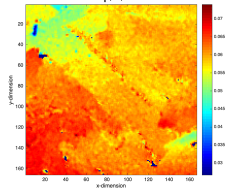
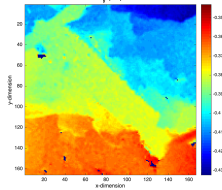
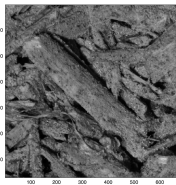
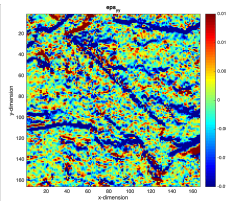
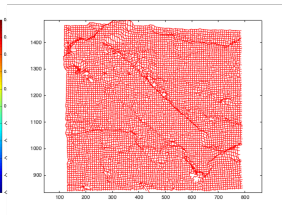
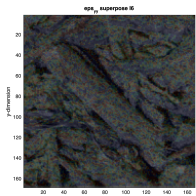


c)



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