Institut de Chimie des Milieux et Matériaux de Poitiers
IC2MP
UMR 7285

INSTITUT P

Journée technique CFMR/AGAP Qualité

DE LA GÉOPHYSIQUE A LA GEOTECHNIQUE

Le 02 Juin 2016, CNAM Paris

Suivi optique du comportement mécanique des ouvrages souterrains

(Projets financés par l'ANDRA, GNR TRASSE, NEEDS Mipor)

S. HEDAN[a], V. VALLE[b], P. COSENZA[a]

[a]. *Université de Poitiers, CNRS UMR 7285 IC2MP, HydrASA, Poitiers Cedex*
[b]. *Université de Poitiers, CNRS UPR 3346 Institut PPRIME, Poitiers Cedex*

Université de Poitiers 1431

cnrs dépasser les frontières

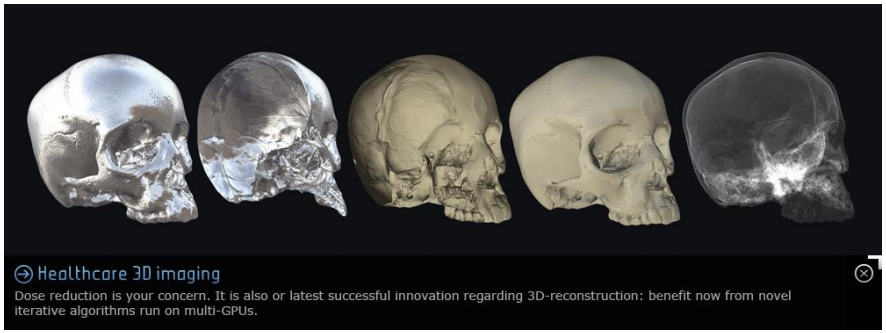
ENSIP INGÉNIERIE pour la PROTECTION de L'ENVIRONNEMENT POITIERS

ANDRA French national radioactive waste management agency

IRSN INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Définition

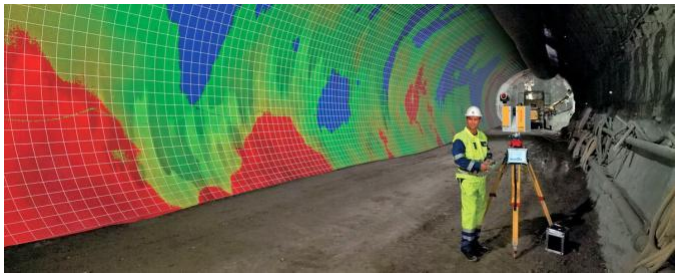
Scanner 3D (Médical)



→ Volume

Extrait : http://www.digisens3d.com/images/slide2.jpg

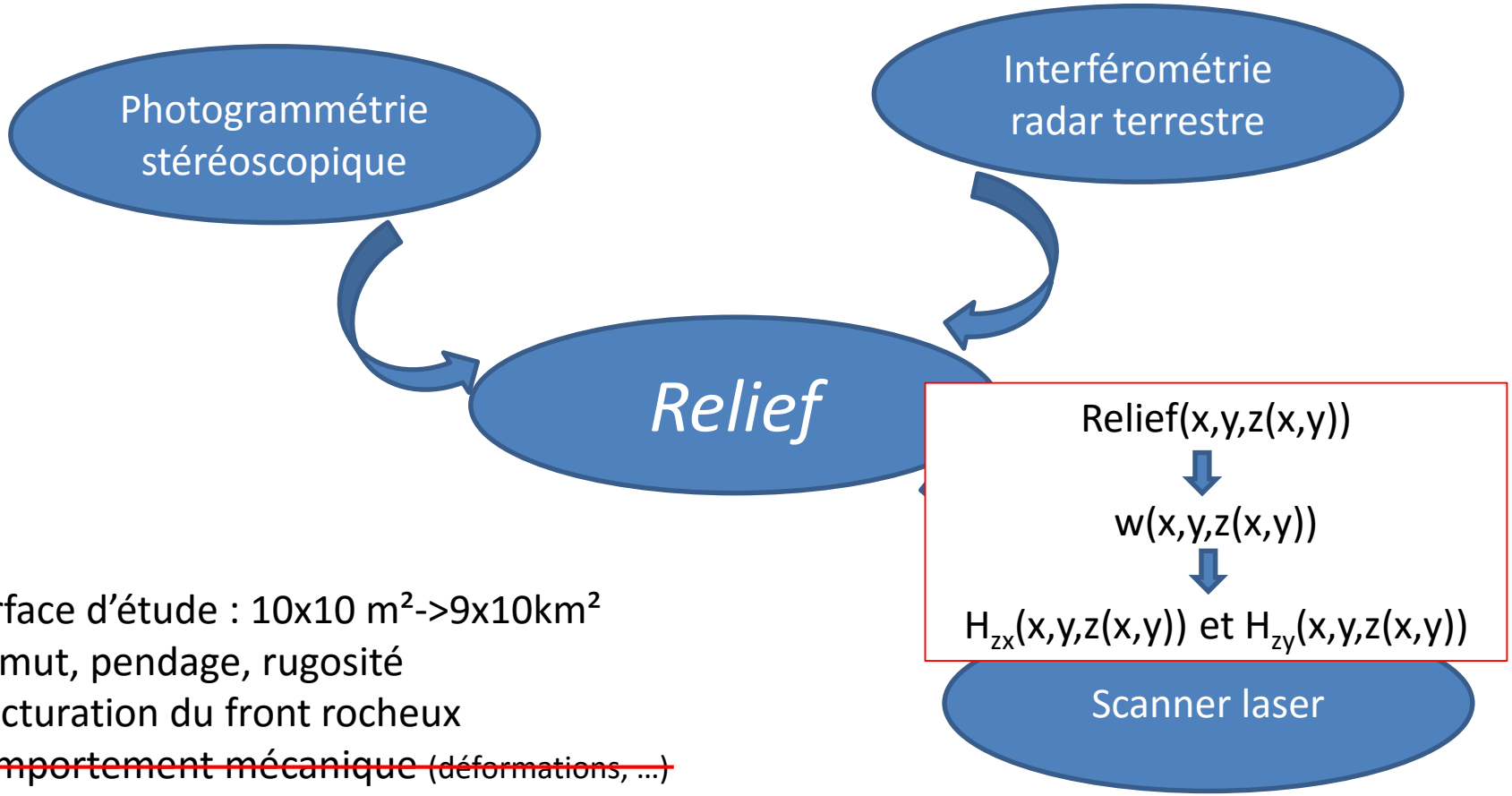
Scanner 3D (laser)



→ Relief d'une surface

Etat de l'art de suivis optiques sur des fronts rocheux

Contrôle de stabilité des ouvrages dans les zones à risques ⇒ Reconnaissance « automatique » des fronts rocheux

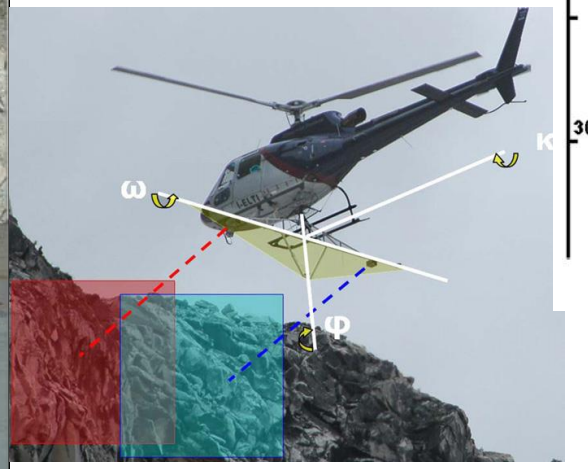


Surface d'étude : 10x10 m²->9x10km²
Azimut, pendage, rugosité
Fracturation du front rocheux
~~Comportement mécanique (déformations, …)~~

Photogrammétrie stéréoscopique

Données extraites de Gaich et al, 2008

grandeur	valeur
Erreur de mesure	2 à 3cm
Distance de vue	10 à 1000 m
Résolution (image de 10m de haut)	4mm/pixel



(Firpo et al, 2011)

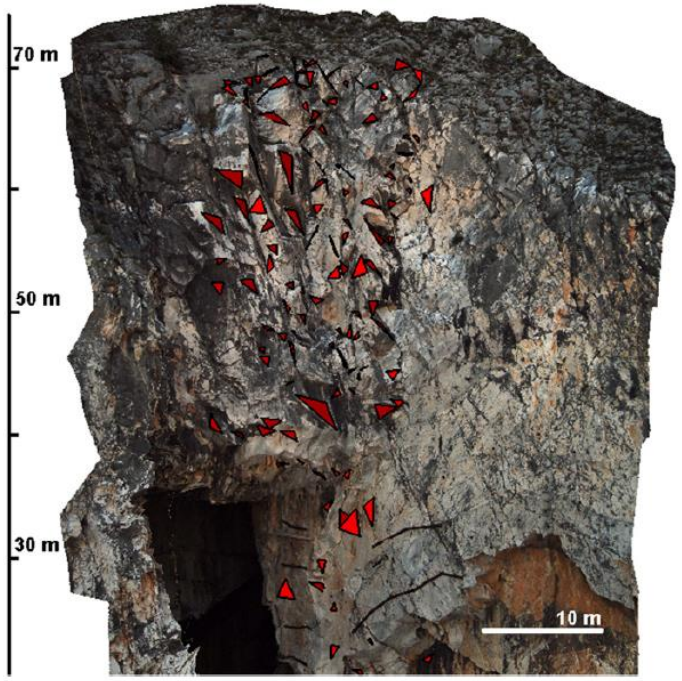


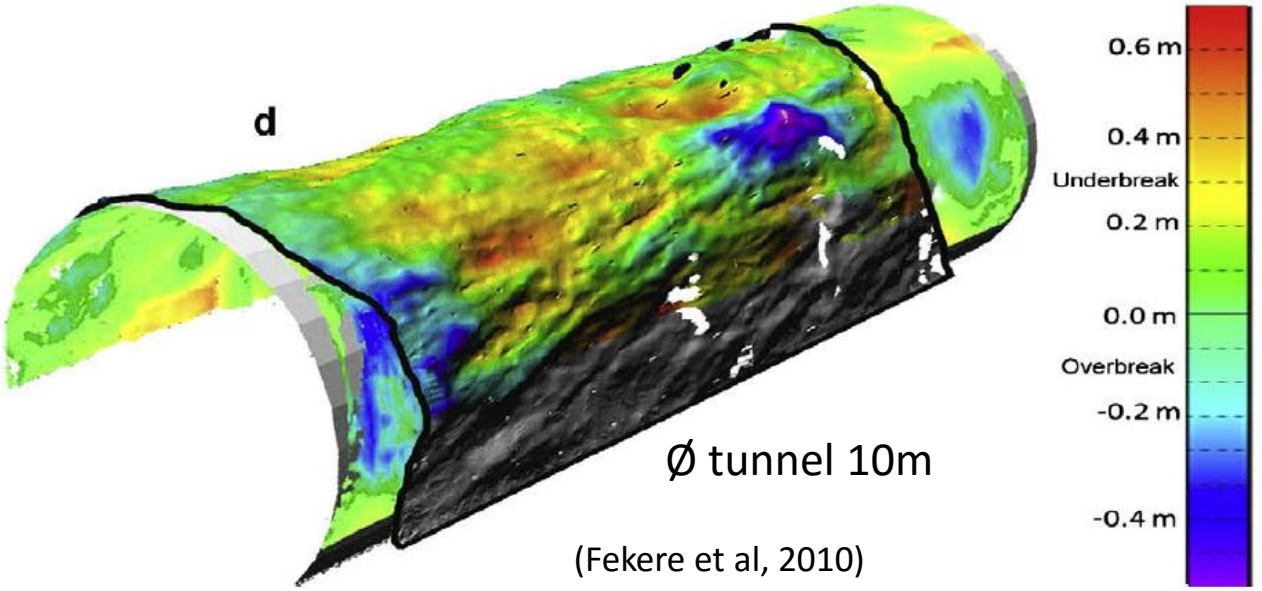
Fig. 4. Stereorestitution of joints by coplanar triangles.

(Firpo et al, 2011)

Données extraites de Fekete et al, 2010

grandeur	valeur
Erreur sur la position	6mm
Erreur sur la distance	<4mm
Distance de vue	>25m
Tps acquisition	7min

Scanner laser

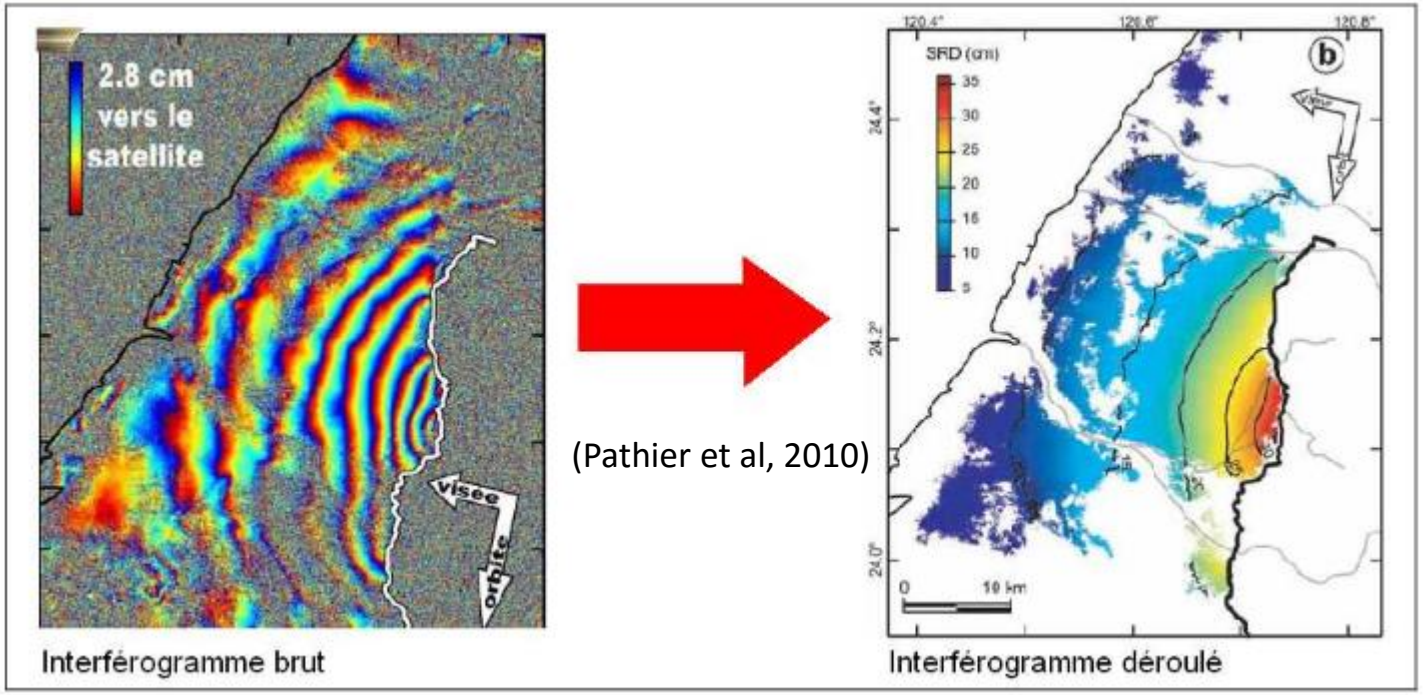


Ø tunnel 10m

(Fekere et al, 2010)

grandeur	valeur
Erreur de mesure	0,75m (Rodelsperger et al, 2010)
Distance de vue	300 m-> XX km (satellite)
surface	200x200 m² -> 90x100 km²

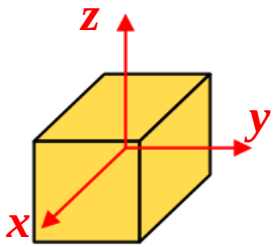
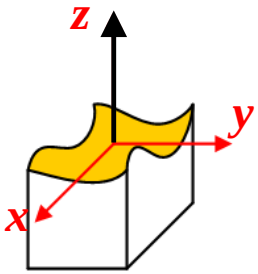
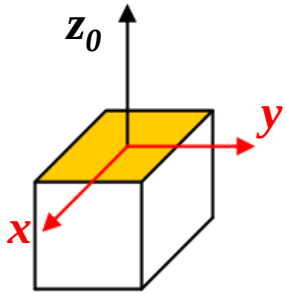
Interférométrie radar terrestre



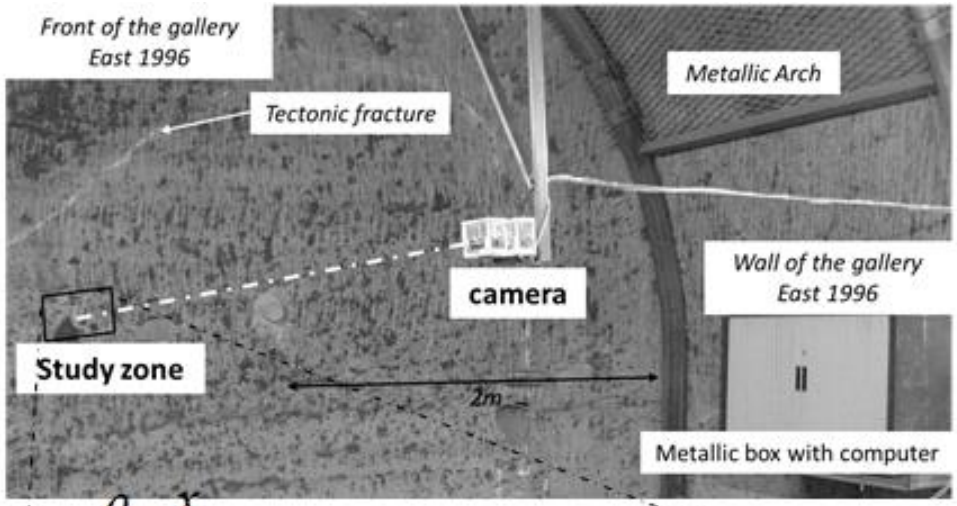
Extrait : http://www.ineris.fr/centredoc/drs-13-126021-00968b-rapport-radar-unique-1382348416.pdf

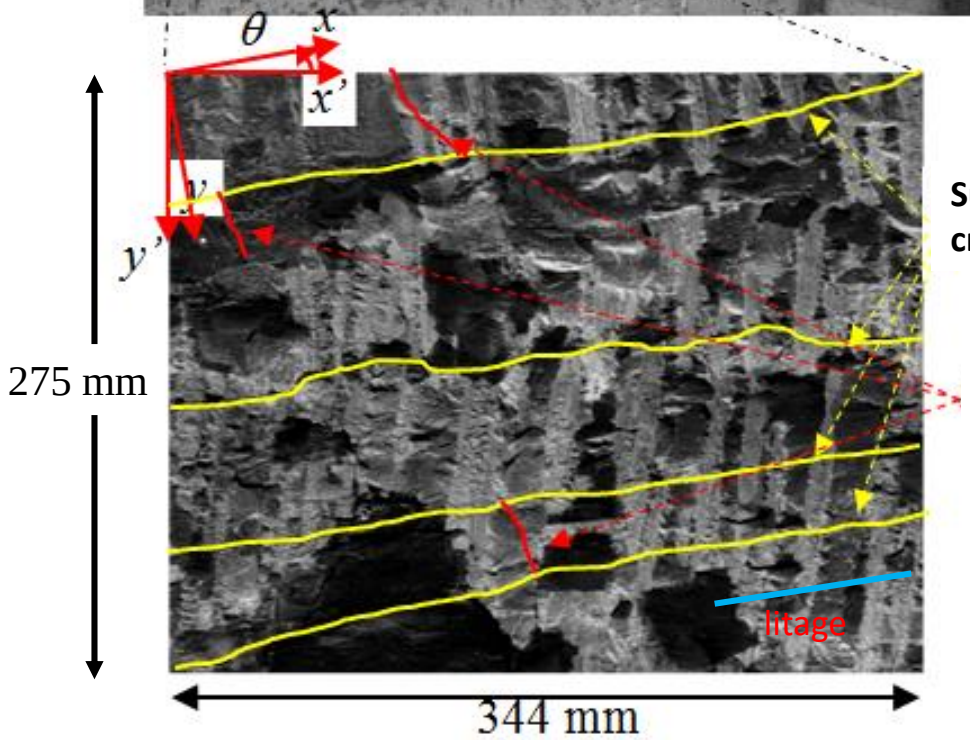
Métrologie optique

Adapté d'après les Techniques de l'ingénieur

		
$u(x,y,z)$; $v(x,y,z)$; $w(x,y,z)$	$u(x,y,z(x,y))$; $v(x,y,z(x,y))$; $w(x,y,z(x,y))$	$u(x,y,z_0)$; $v(x,y,z_0)$
3D/3C	2D/3C	2D/2C
	Avantages (+) /inconvénients(-)	
(+)3 composantes **volumiques** du déplacements (u,v,w) (-) Acquisition du volume (ex: µtomo RX) (-)Tps de calcul long (GPU) **(+) tenseur (3x3) des déformations (E)** **(+) milieu discontinu (fissures)**	(+/-)3 composantes **planes** du déplacements (u,v,w) (+/-) 2 caméras + calibration (+) Tps de calcul court (GPU) **(+/-) tenseur (2x2) des déformations (E)** (+) **milieu discontinu (fissures)**	(+/-) 2 composantes **planes** du déplacements (u,v) (+) 1 caméra (+) Tps de calcul court (GPU) **(-) tenseur (2x2) des *petites* déformations (ε)** (+) **milieu discontinu (fissures)**
	Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne (ANDRA)	Station expérimentale de Tournemire (IRSN)

Montage expérimental





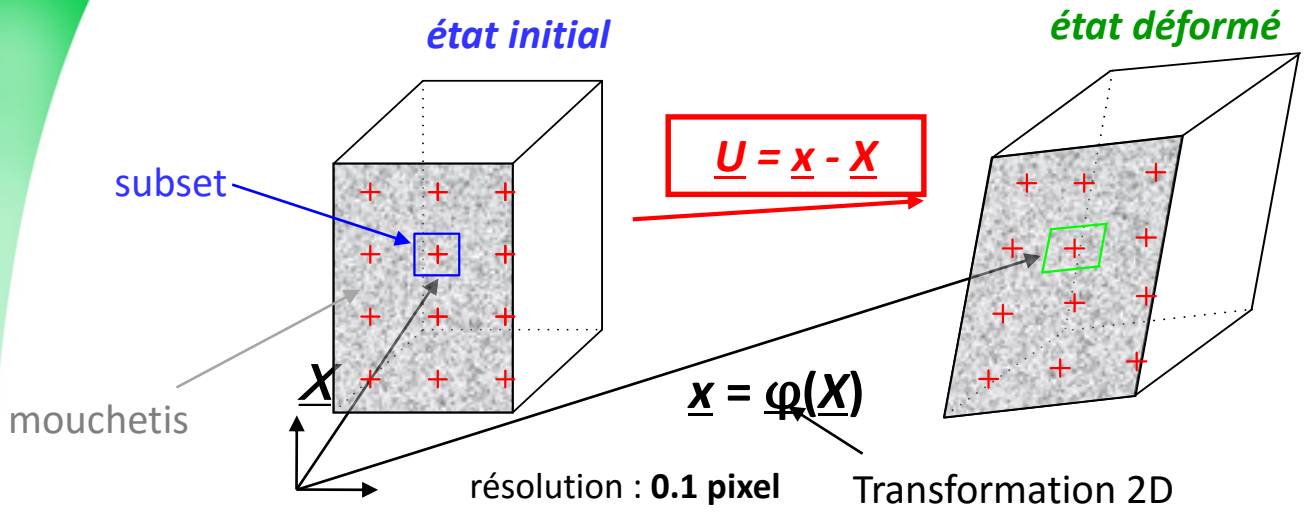
Excavation of gallery: **1996**
EDZ is created (15 seasonal cycles before the beginning of study)
1280x1024 pixels
2 images.h^{-1}
Magnification: **0.269** mm.pixel^{-1}
344x275mm^2
spotlight: **400W**
100% automatic

Sub-horizontal cracks

Sub-vertical cracks

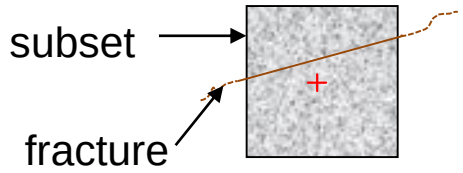
Distance entre 2 fissures sub-horizontales proche de **200 mm** (Cabrera et al., 2001)

CIN classique



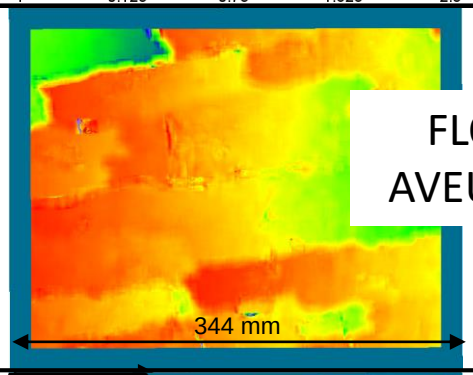
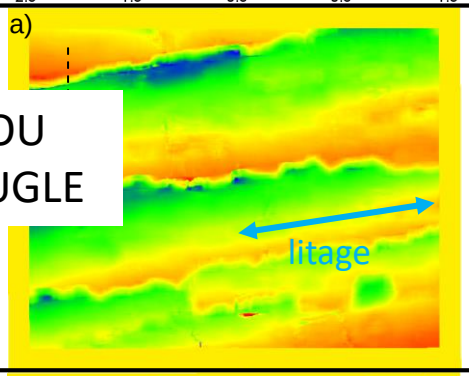
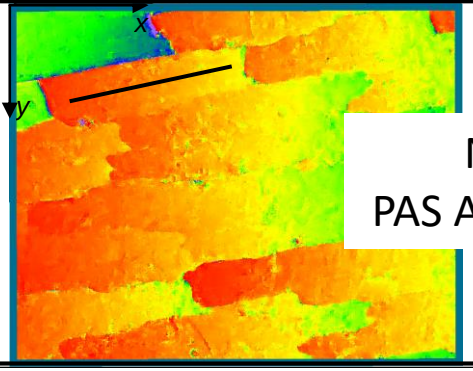
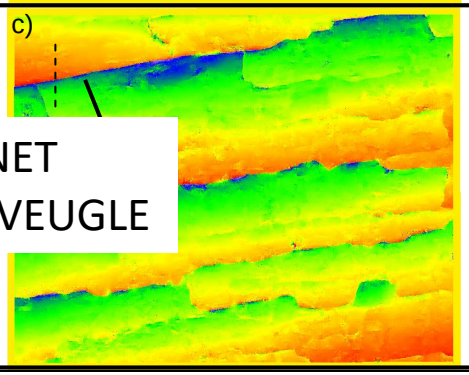
Mouchetis = marquage aléatoire
(marquage naturel du front de galerie)

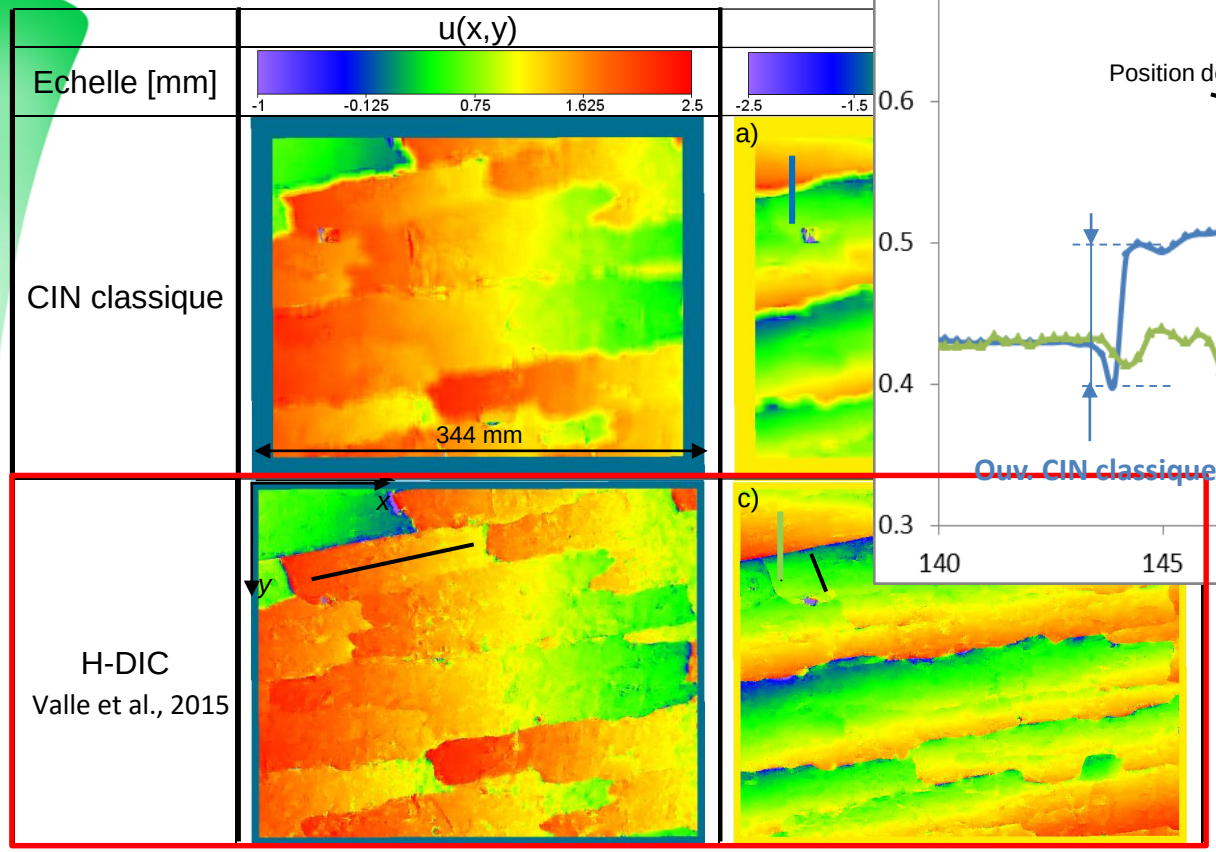
H-DIC (Valle *et al*, 2015)

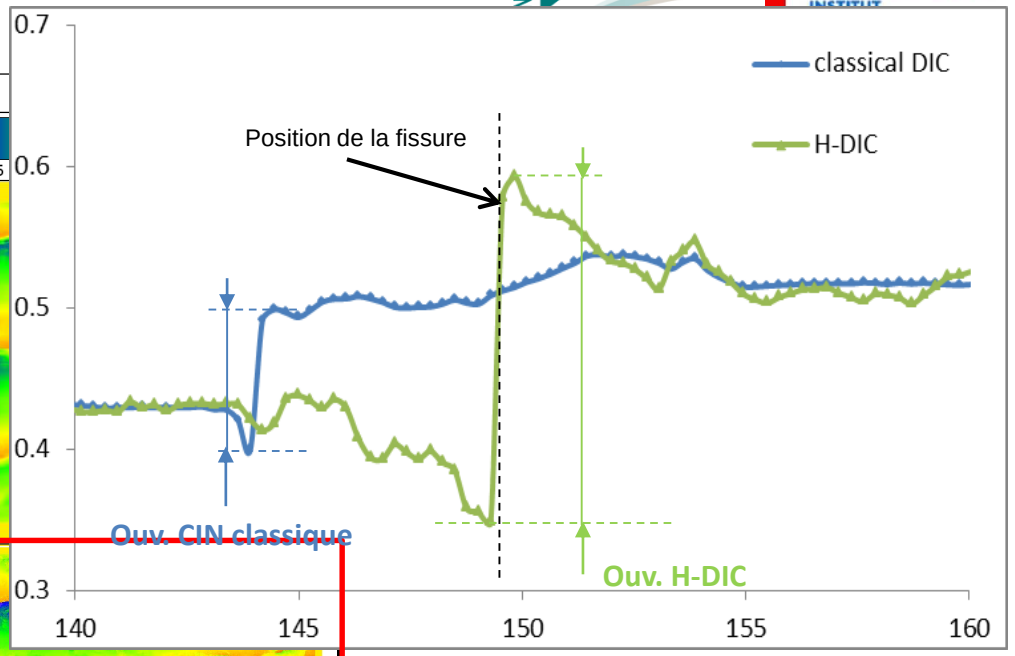


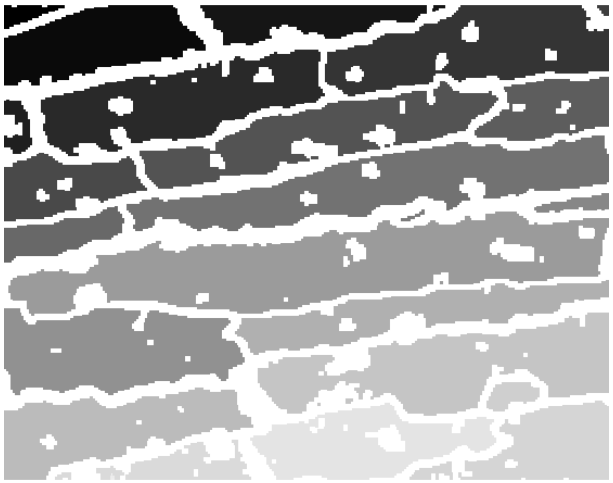
→La méthode H-DIC tient compte de discontinuités dans les subsets

Différents algorithmes de CIN

	u(x,y)	v(x,y)	Avantages	Inconvénients
Echelle [mm]	-1 -0.125 0.75 1.625 2.5	-2.5 -1.5 -0.5 0.5 1.5		
CIN classique			➢ Tps de calcul	➢ Hyp: milieu continu ➢ Ne détecte pas les « petites » fissures ➢ Taille subset fixe
H-DIC Valle et al., 2015			➢ Calcul parallélisé (**GPU**) ➢ Milieu **discontinu** ➢ Localisation **fine** des fissures ➢ Calcul **précis** d'ouverture de fissure	➢ Tps de calcul







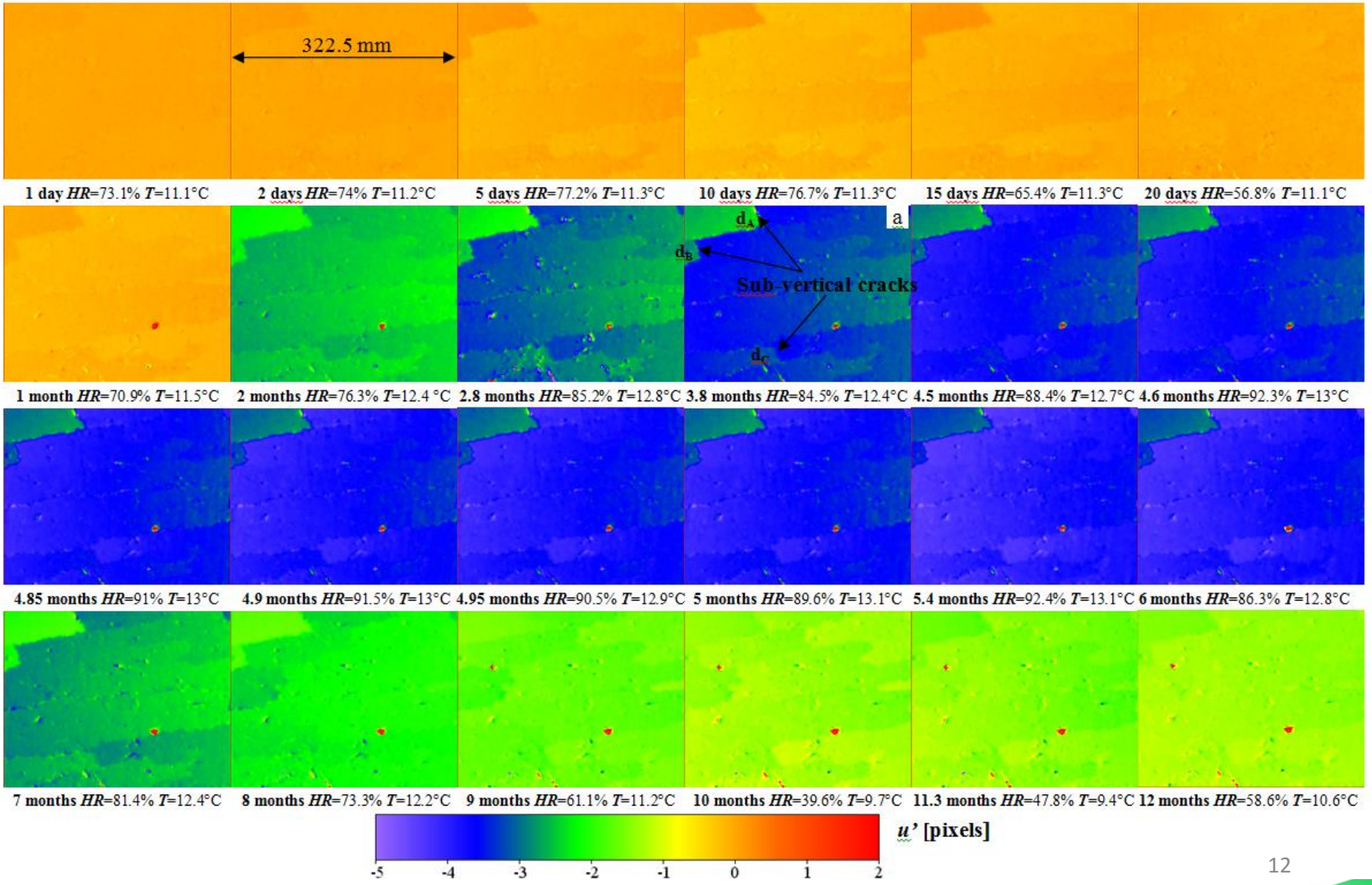
Ouverture fissure vs temps, HR,T

$\varepsilon_{//}$ et $\varepsilon_{\perp}$ vs temps, HR,T

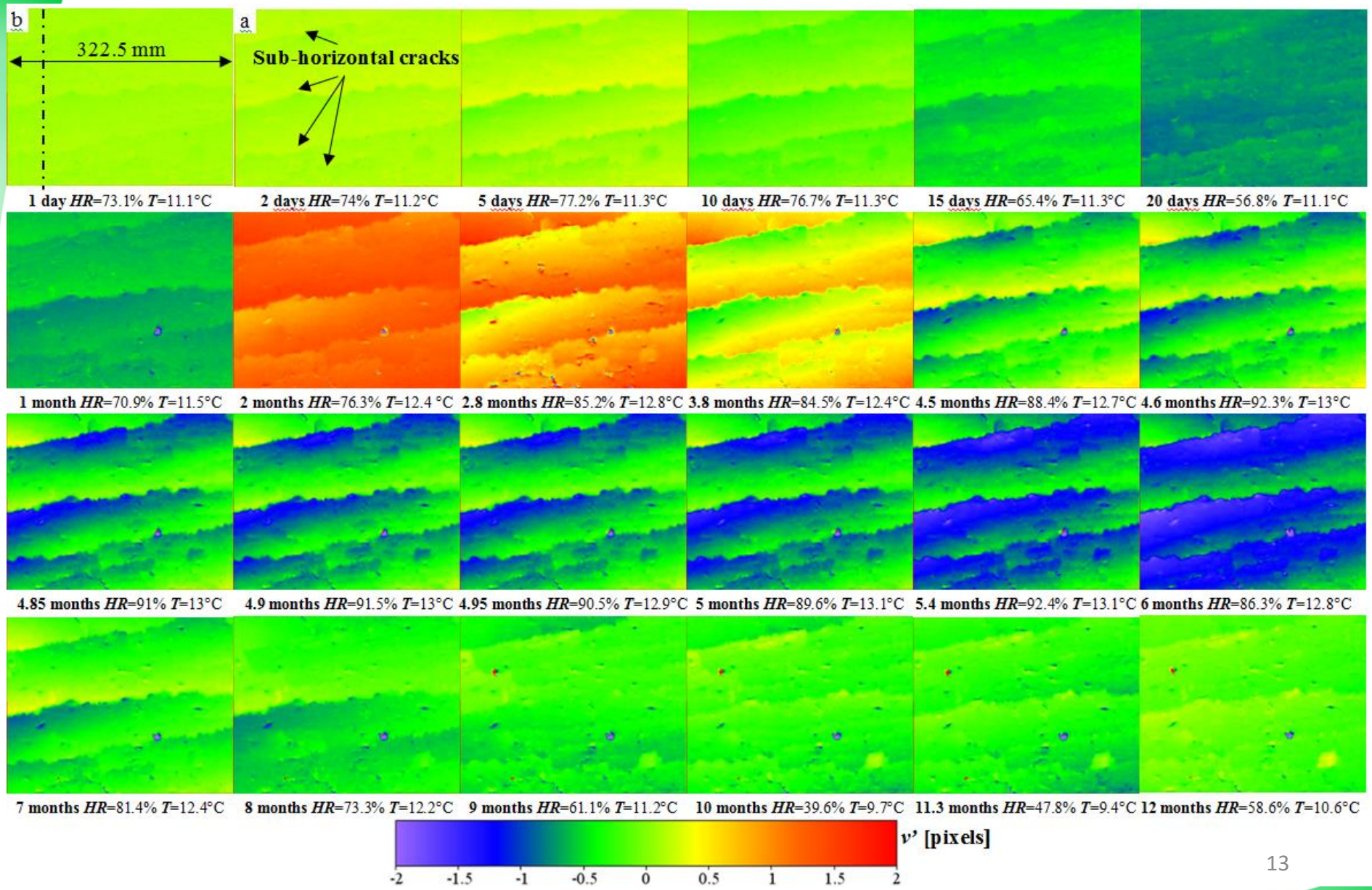
15 blocs « continus »

1 bloc = 1 surface sans fissures visibles

Digital Image Correlation (DIC): Displacements fields on one year



Digital Image Correlation (DIC): Displacements fields on one year

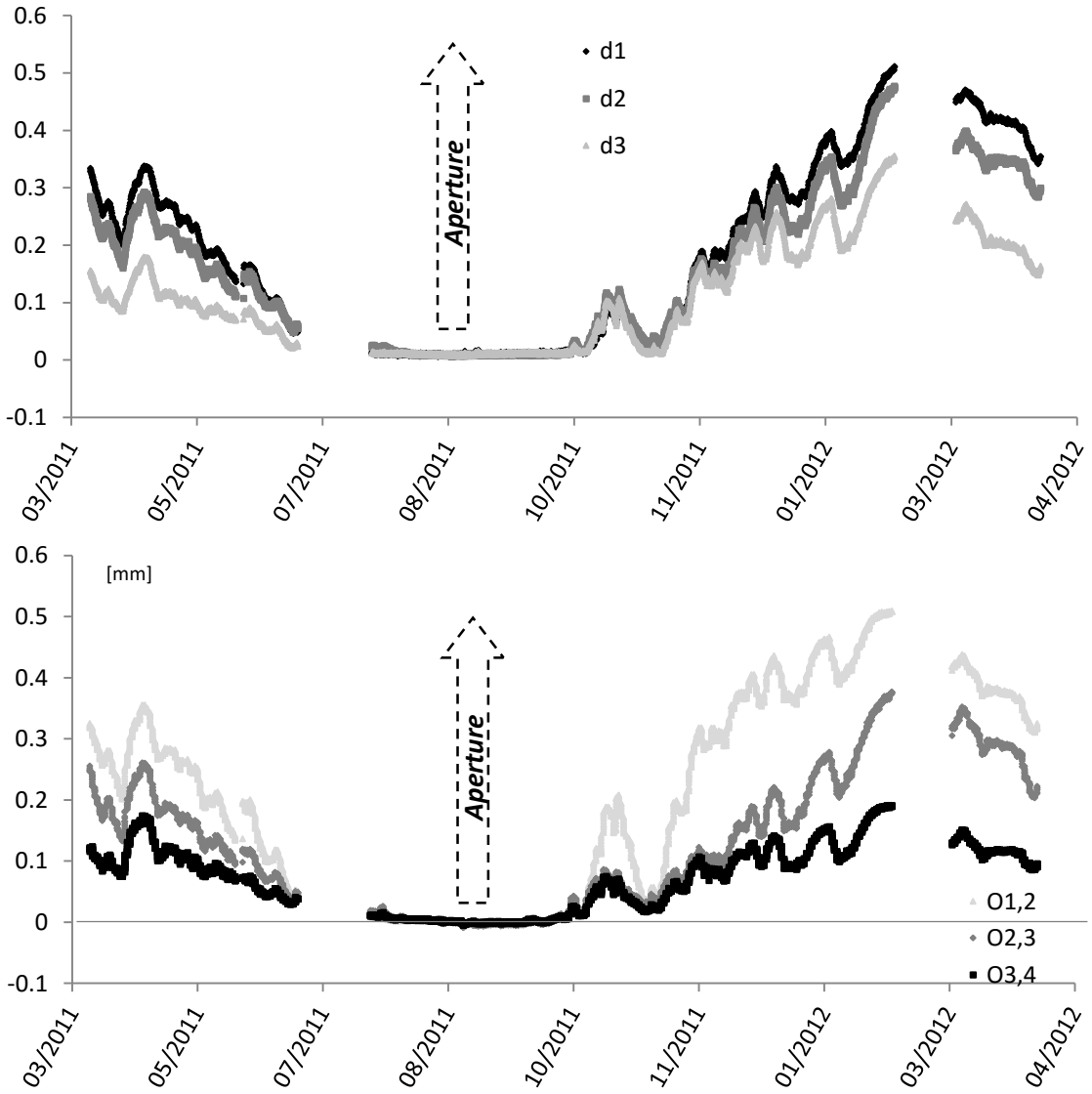


crack apertures with 2011/08/23, 17h49min25s GMT as Image reference

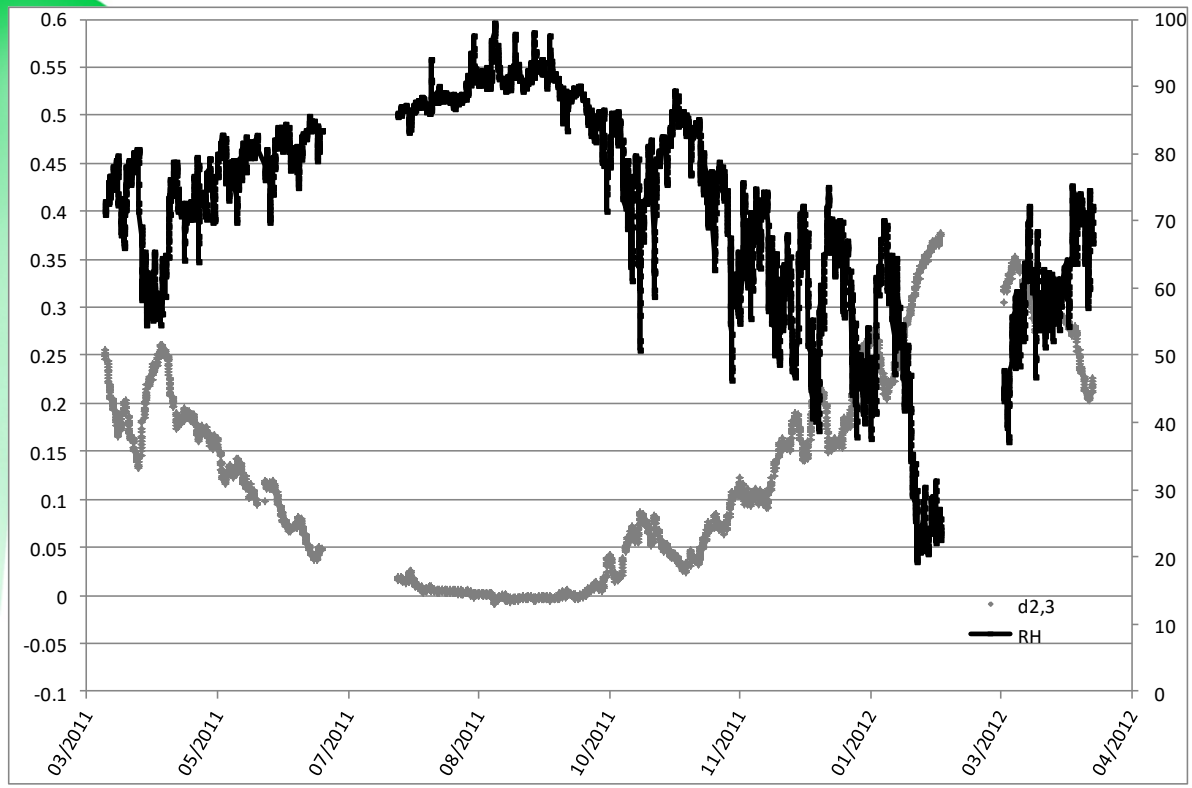
Sub-vertical crack

2011/08/23 (17 h 49 min 25 s GMT when RH=91.11% and T=13.05°C)

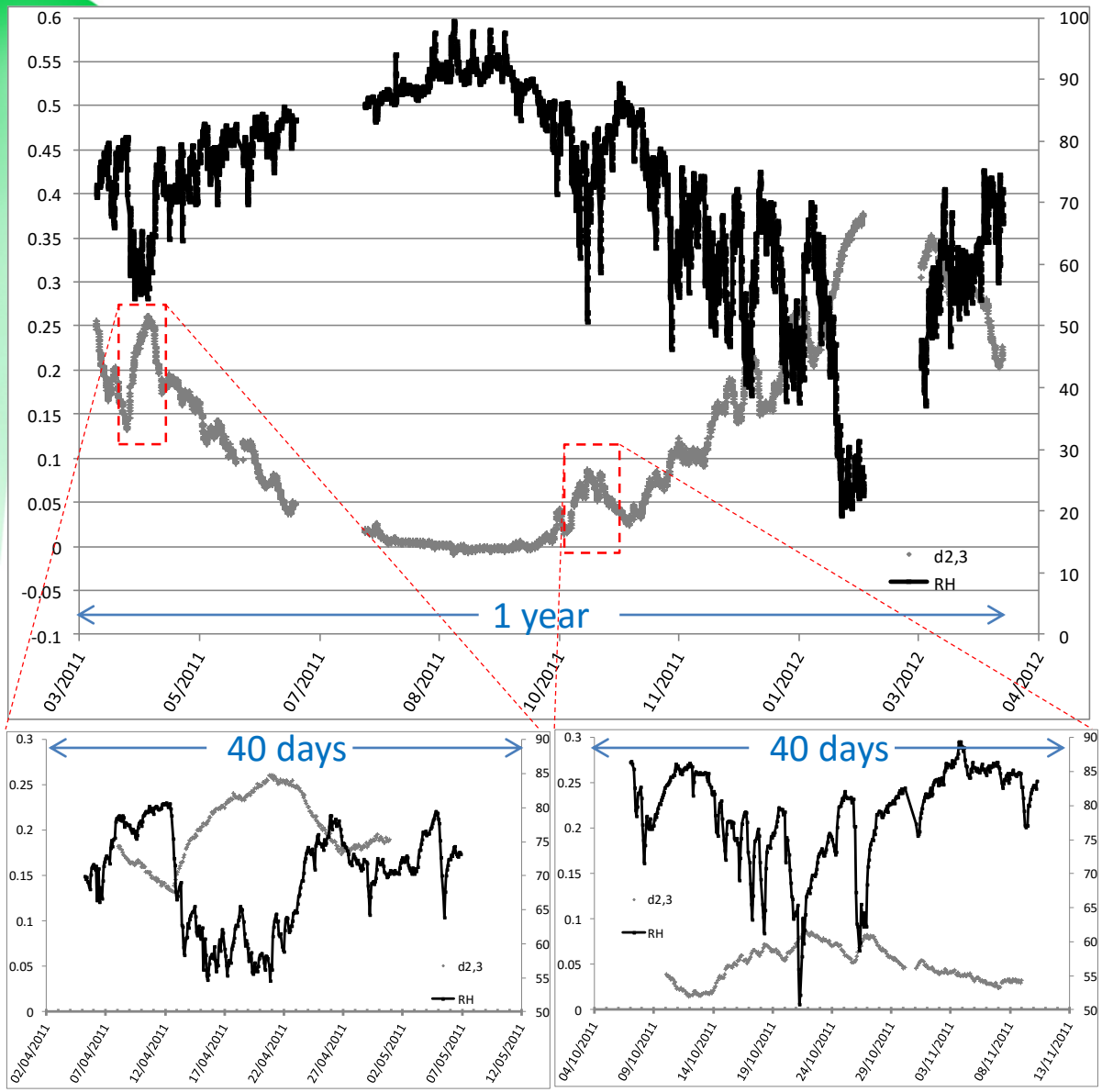
Sub-horizontal crack



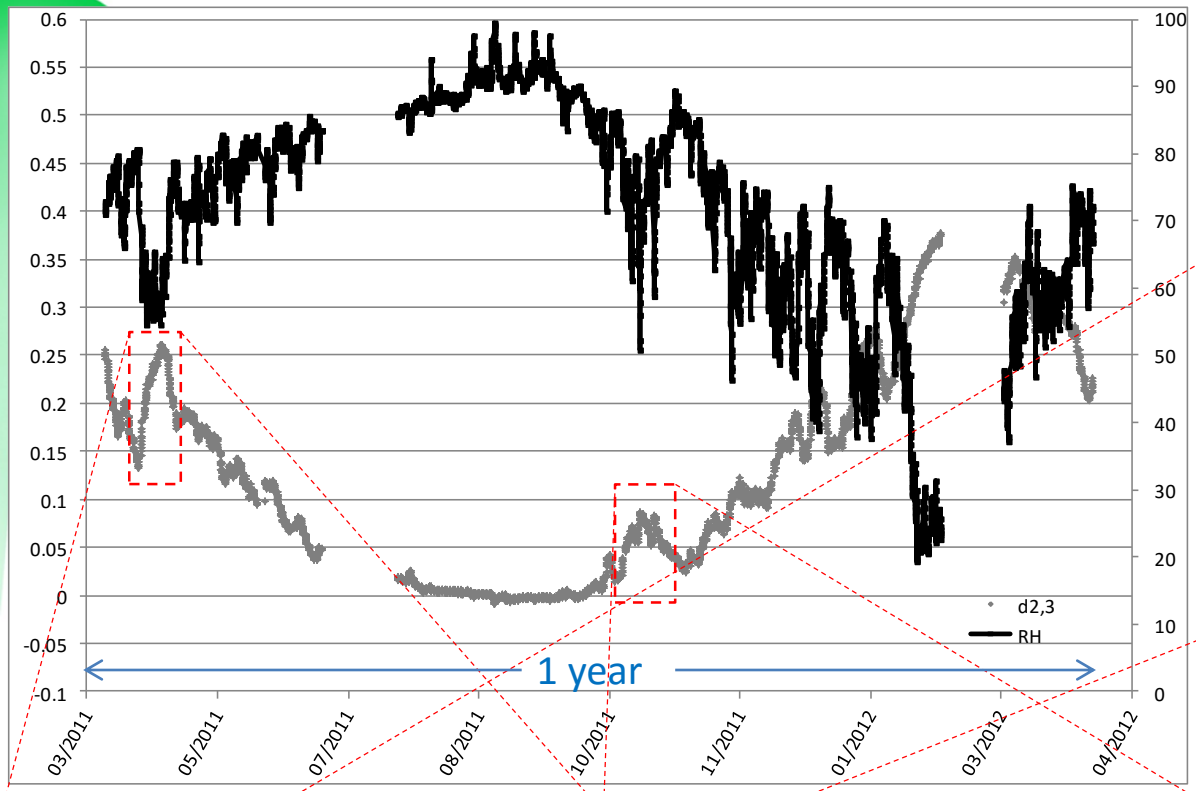
Comparison of sub-horizontal crack aperture and Relative Humidity RH



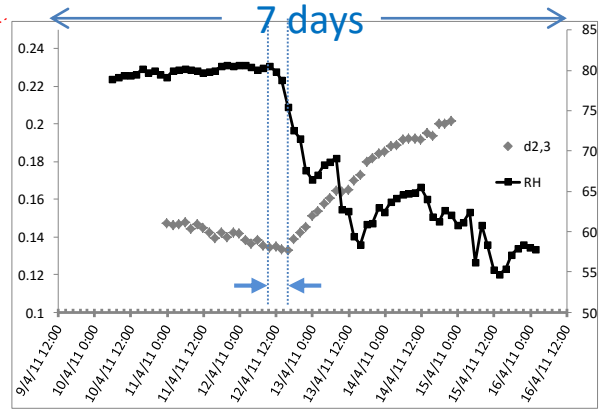
Comparison of sub-horizontal crack aperture and Relative Humidity RH

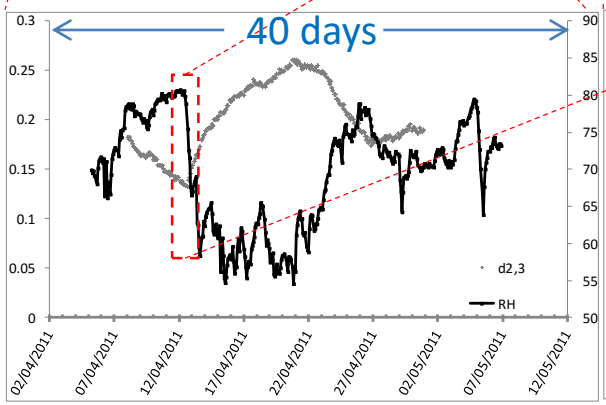


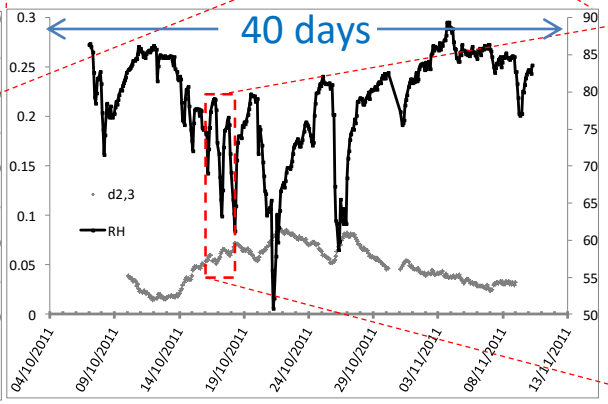
Comparison of sub-horizontal crack aperture and Relative Humidity RH

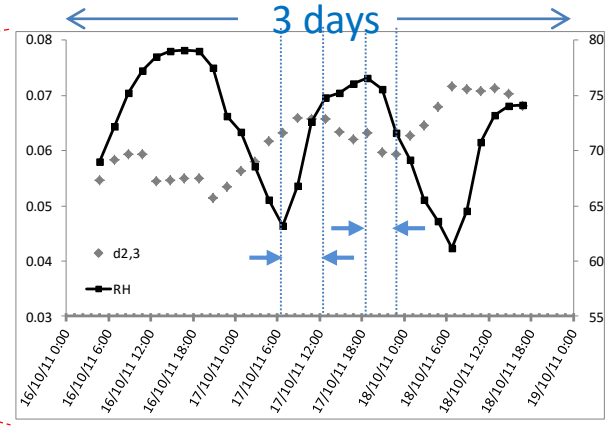


variation and **duration** of RH are greater than **15%** and **6-8 h**, respectively



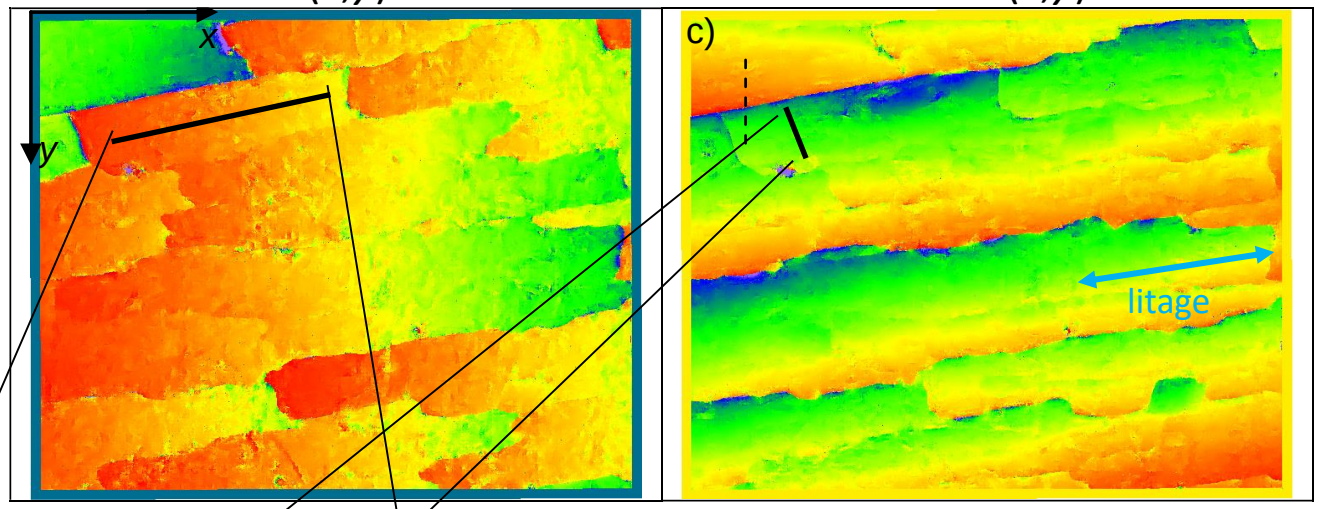


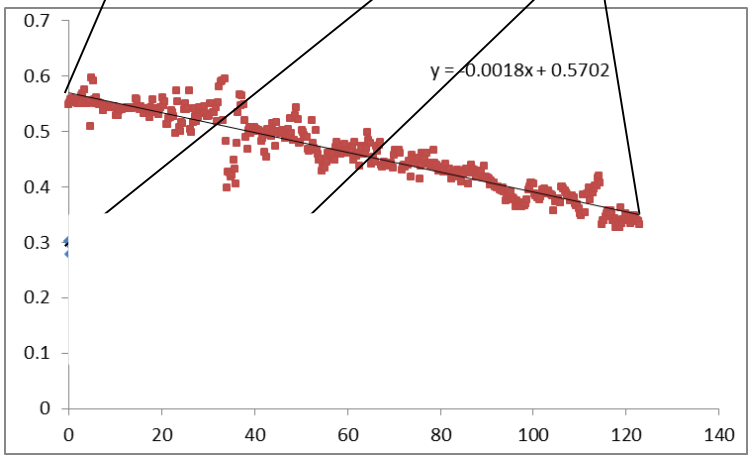




Anisotropie des déformations hydromécaniques

u(*x*,*y*) v(*x*,*y*)





Equations d'un plan

$$u(x,y) = A_x^k.x + B_x^k.y + C_x^k$$

$$v(x,y) = A_y^k.y + B_y^k.x + C_x^k$$

+ procédure de minimisation

k :N° du bloc

3 jauges de déformation

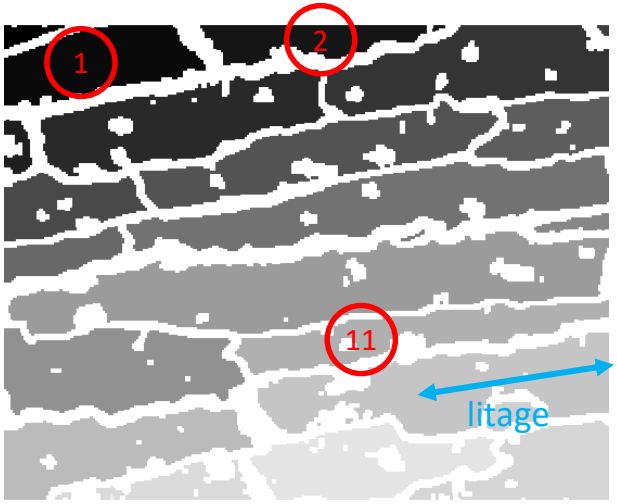
3 composantes de déformations /bloc/état

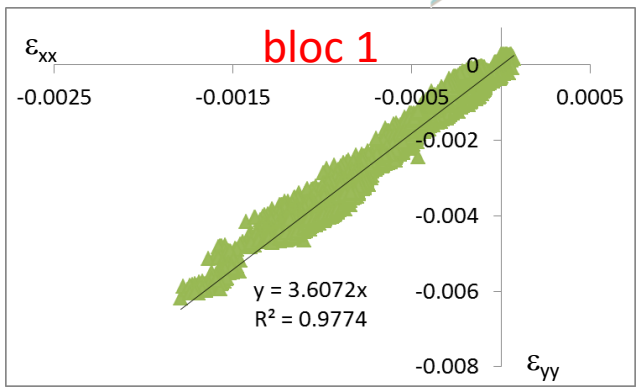
$$\varepsilon_{xx}^k = A_x^k \qquad \varepsilon_{yy}^k = A_y^k \qquad \varepsilon_{xy}^k = \frac{1}{2}\left(B_x^k + B_y^k\right)$$

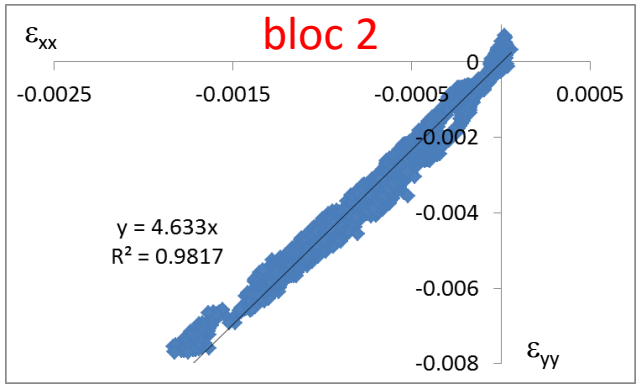
$$\left(\varepsilon_1^k, \varepsilon_2^k\right)$$

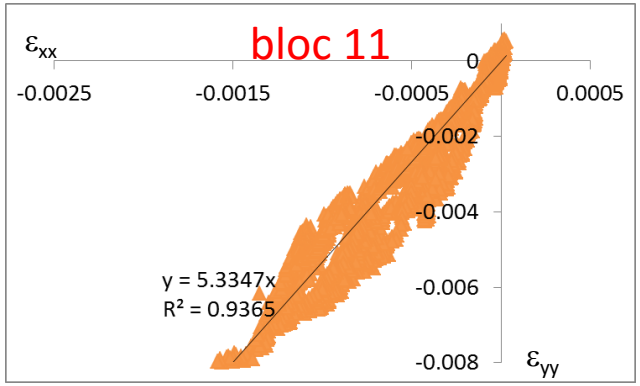
15 blocs « continus »
4400 états

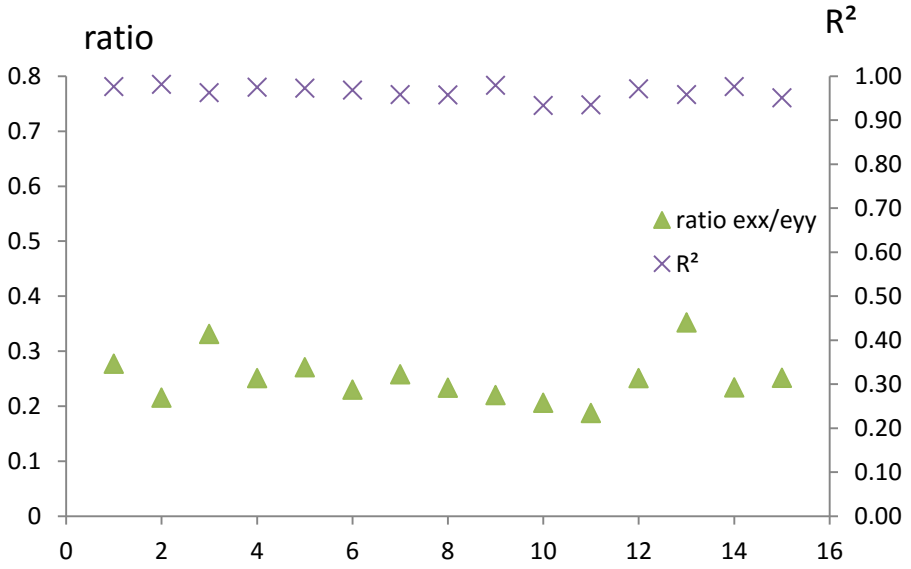
Anisotropie des déformations hydromécaniques



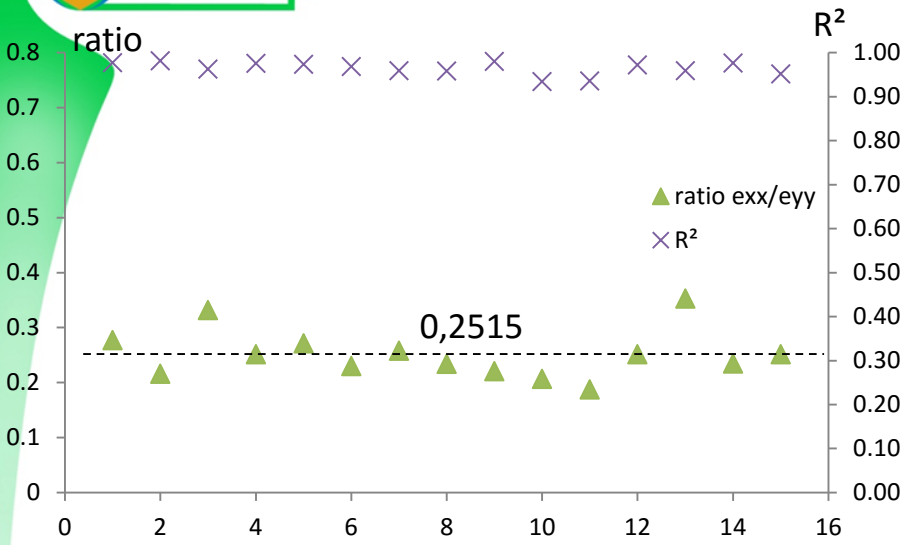


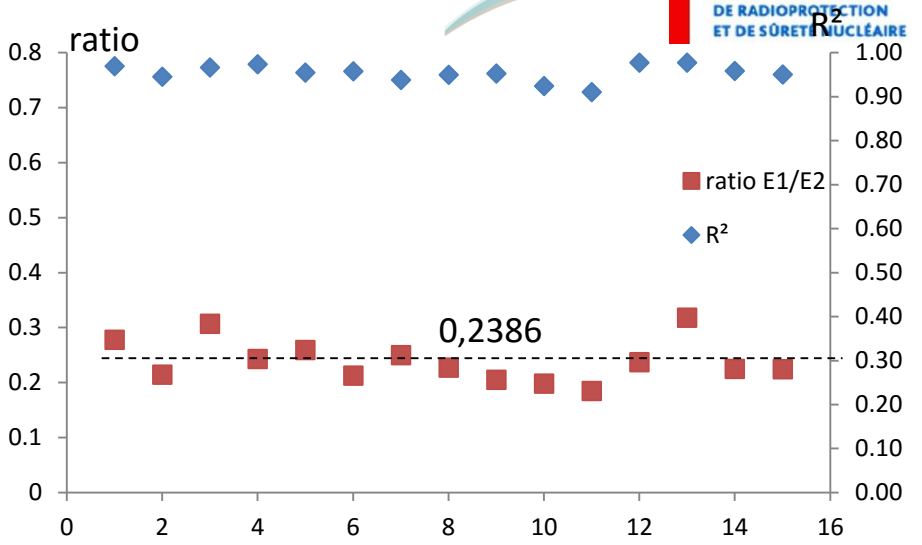


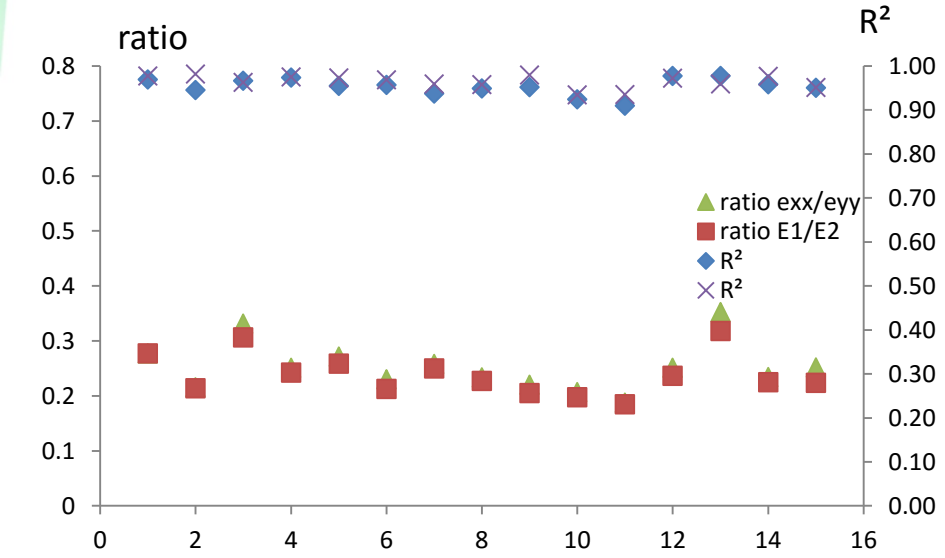


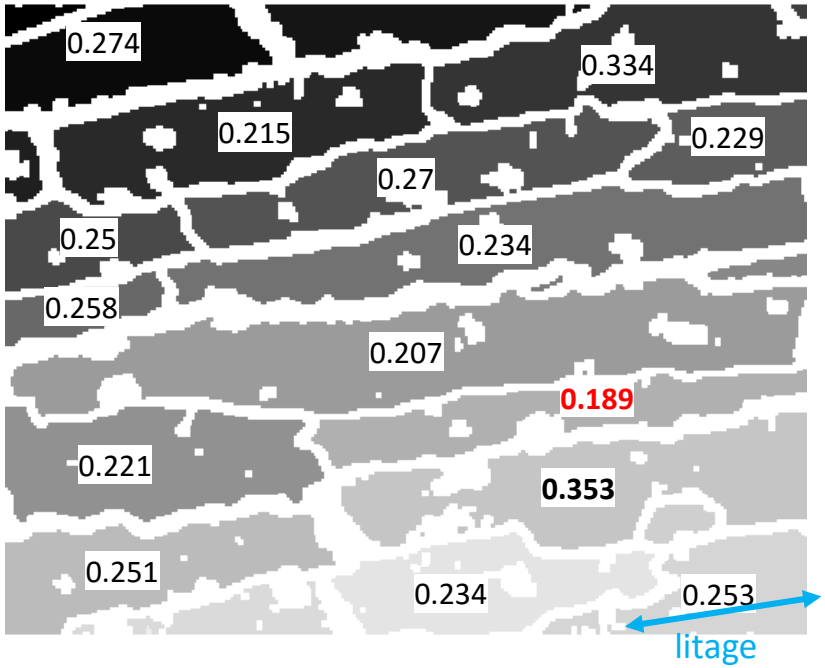


Anisotropie des déformations hydromécaniques



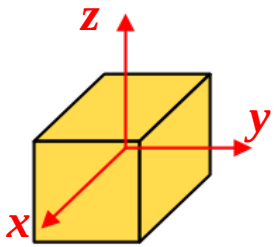
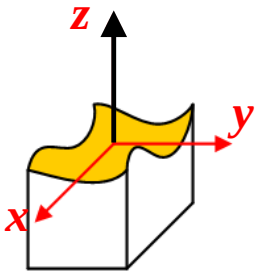
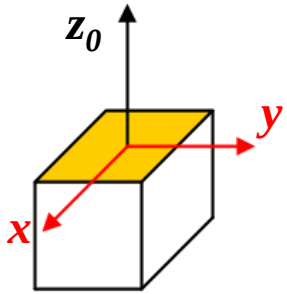


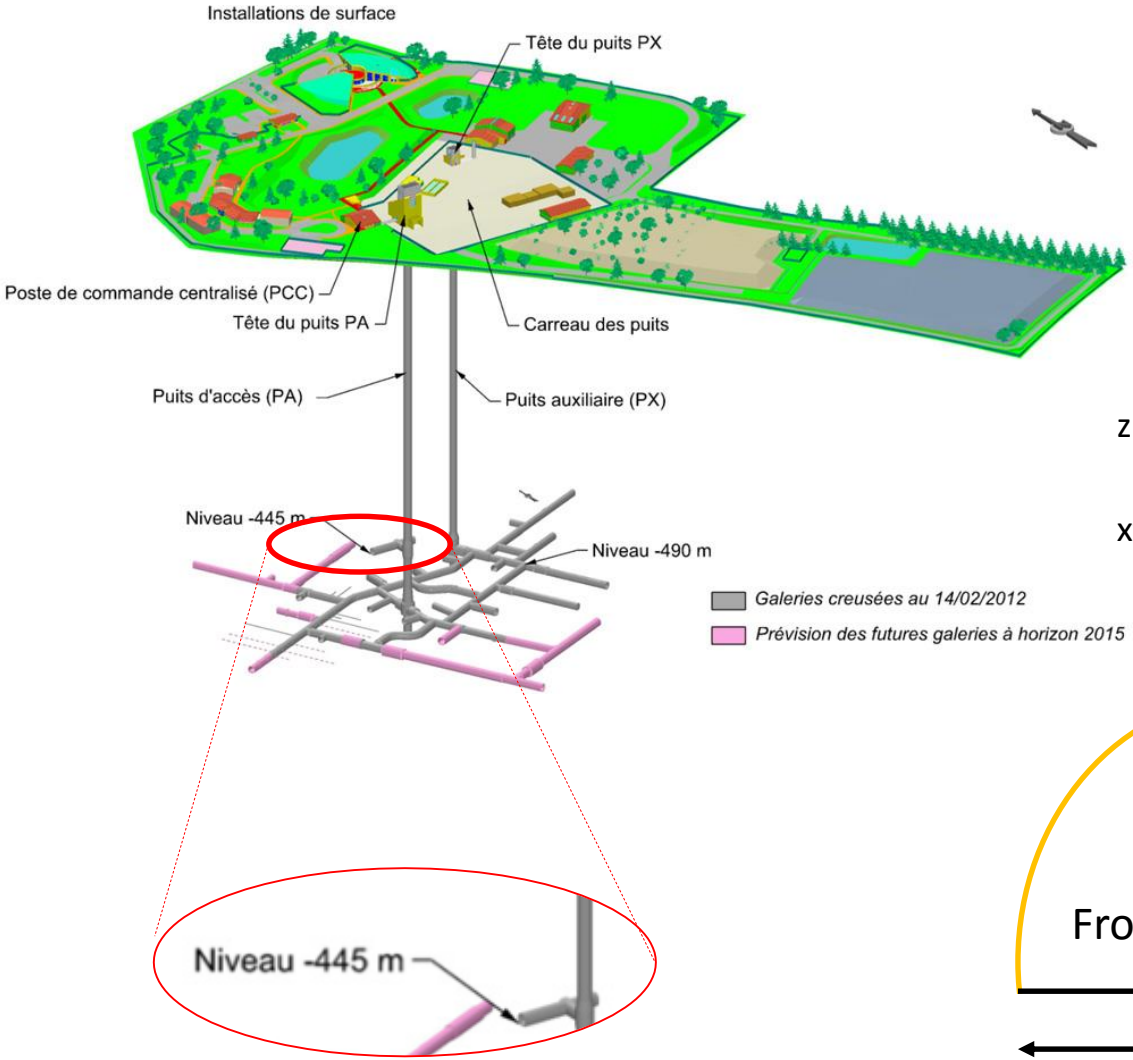




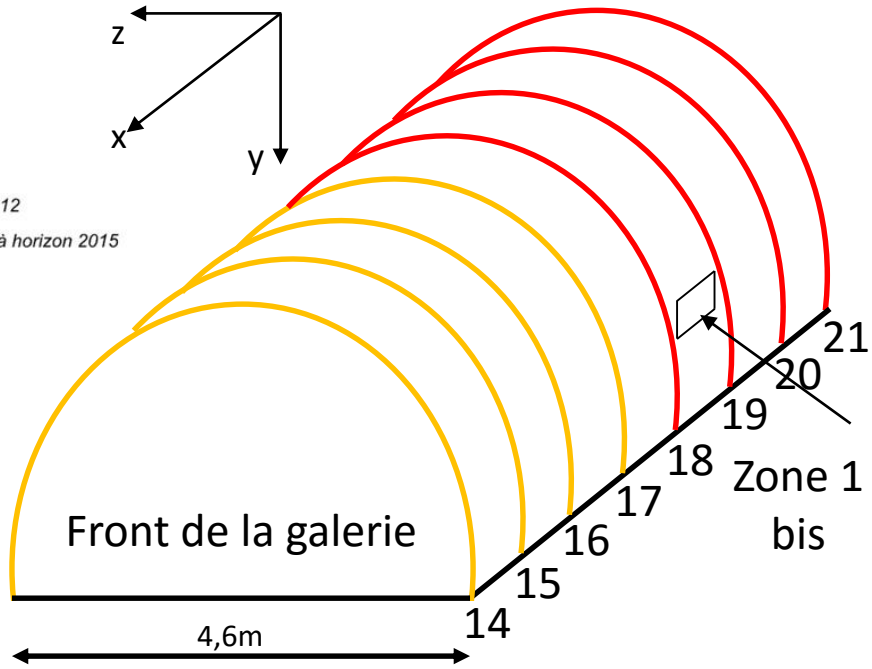
Métrologie optique

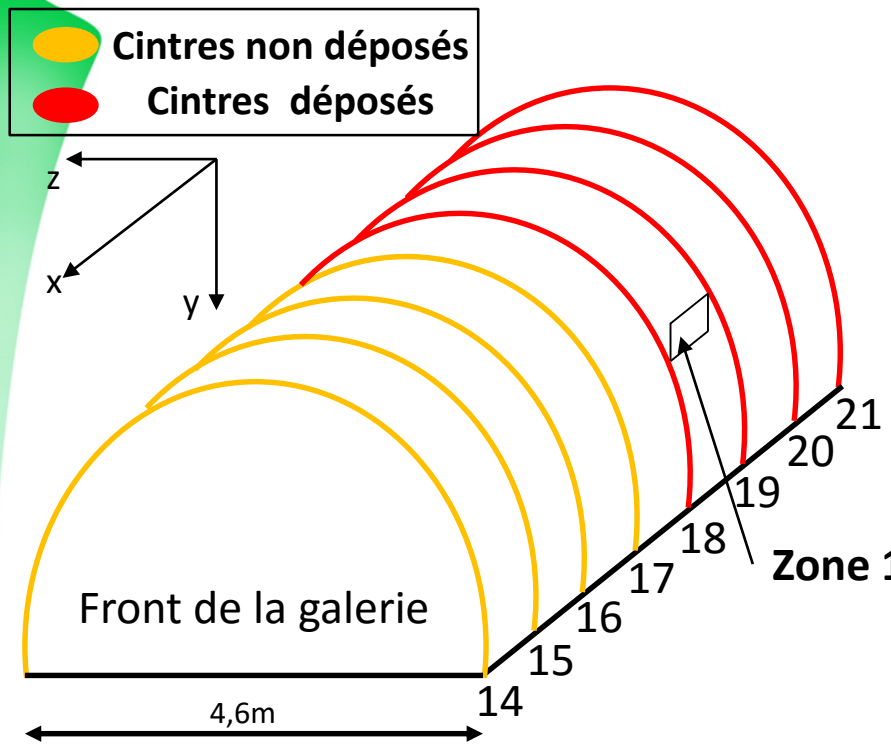
Adapté d'après les Techniques de l'ingénieur

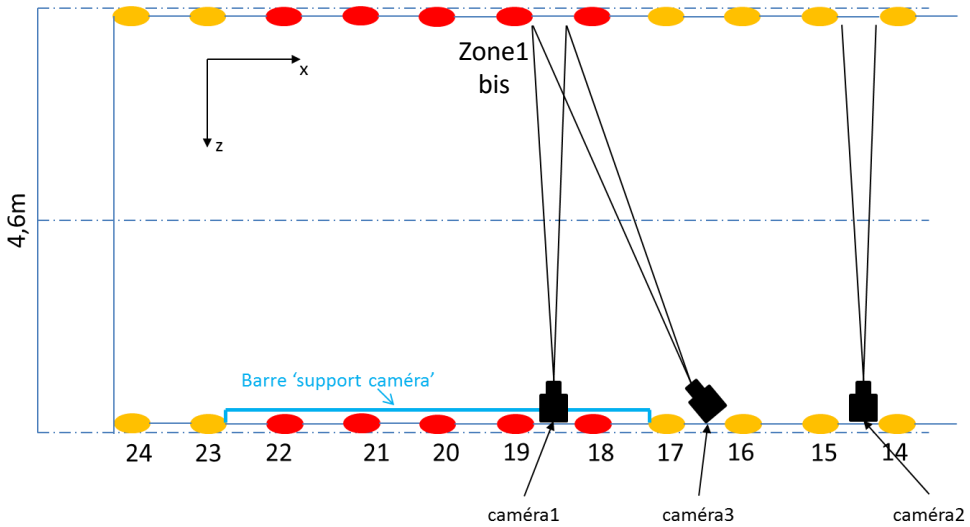
		
$u(x,y,z)$; $v(x,y,z)$; $w(x,y,z)$	$u(x,y,z(x,y))$; $v(x,y,z(x,y))$; $w(x,y,z(x,y))$	$u(x,y,z_0)$; $v(x,y,z_0)$
3D/3C	2D/3C	2D/2C
	Avantages (+) /inconvénients(-)	
(+)3 composantes volumiques du déplacements (u,v,w) (-) Acquisition du volume (ex: µtomo RX) (-)Tps de calcul long (GPU) (+) tenseur (3x3) des déformations (ε) (+) **milieu discontinu (fissures)**	(+/-)3 composantes planes du déplacements (u,v,w) (+/-) 2 caméras + calibration (+) Tps de calcul court (GPU) (+/-) tenseur (2x2) des déformations (ε) (+) **milieu discontinu (fissures)**	(+/-) 2 composantes planes du déplacements (u,v) (+) 1 caméra (+) Tps de calcul court (GPU) (-) tenseur (2x2) des ***petites*** déformations (ε) (+) **milieu discontinu (fissures)**
	Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne (ANDRA)	Station expérimentale de Tournemire (IRSN)

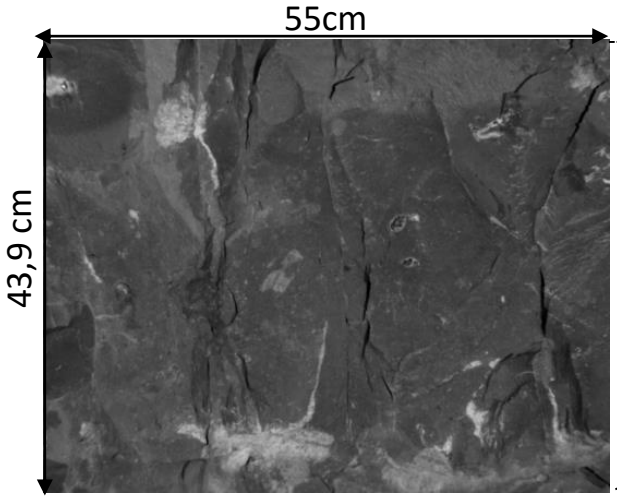

Installations de surface
Tête du puits PX
Poste de commande centralisé (PCC)
Tête du puits PA
Carreau des puits
Puits d'accès (PA)
Puits auxiliaire (PX)
Niveau -445 m
Niveau -490 m
Galeries creusées au 14/02/2012
Prévision des futures galeries à horizon 2015
Niveau -445 m

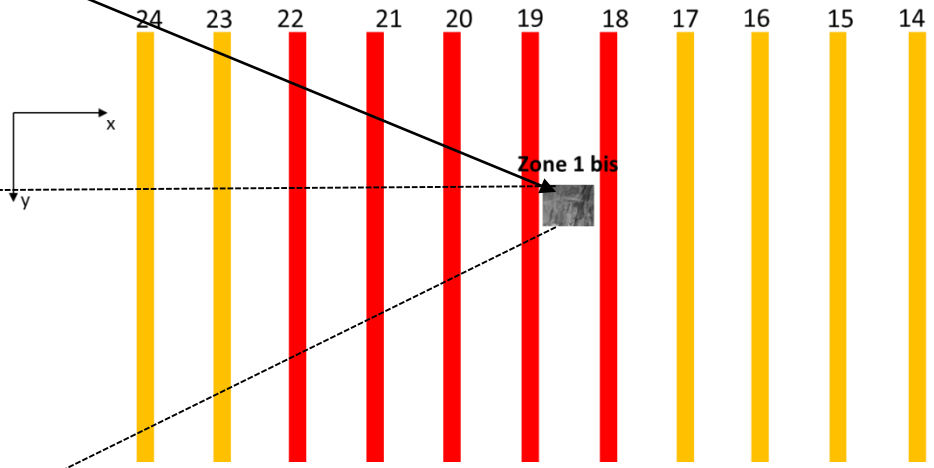

Cintres non déposés
Cintres déposés


z
x
y
Front de la galerie
14
15
16
17
18
19
20
21
Zone 1 bis
4,6m


Cintres non déposés
Cintres déposés
z
x
y
Front de la galerie
4,6m
14
15
16
17
18
19
20
21
Zone 1 bis

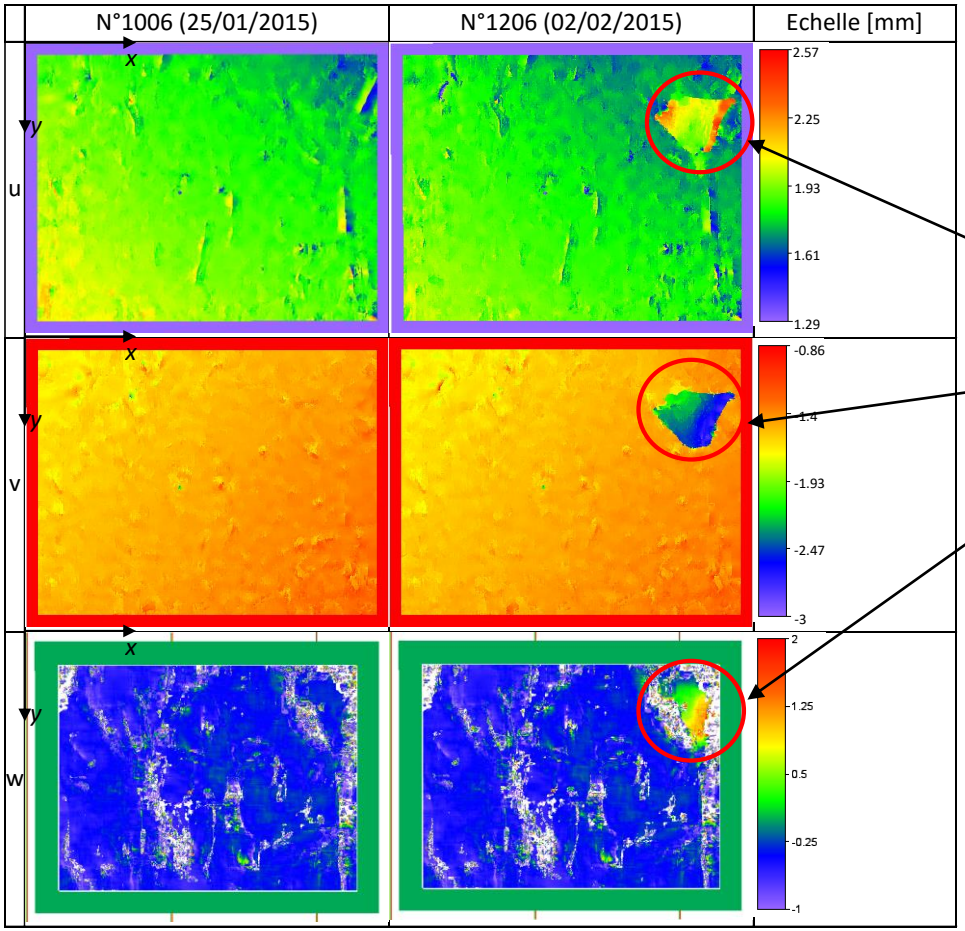

Zone1
bis
x
z
4,6m
Barre 'support caméra'
24
23
22
21
20
19
18
17
16
15
14
caméra1
caméra3
caméra2


55cm
43,9 cm


24
23
22
21
20
19
18
17
16
15
14
x
y
Zone 1 bis

Après dépose des cintres : zone 1bis (du 18/12/14 au 27/05/15)

RAPPEL : Champs de déplacement plan (***u,v,w***) ; **ouverture des fissures** ; champ de déformations (ε_1,ε_2)

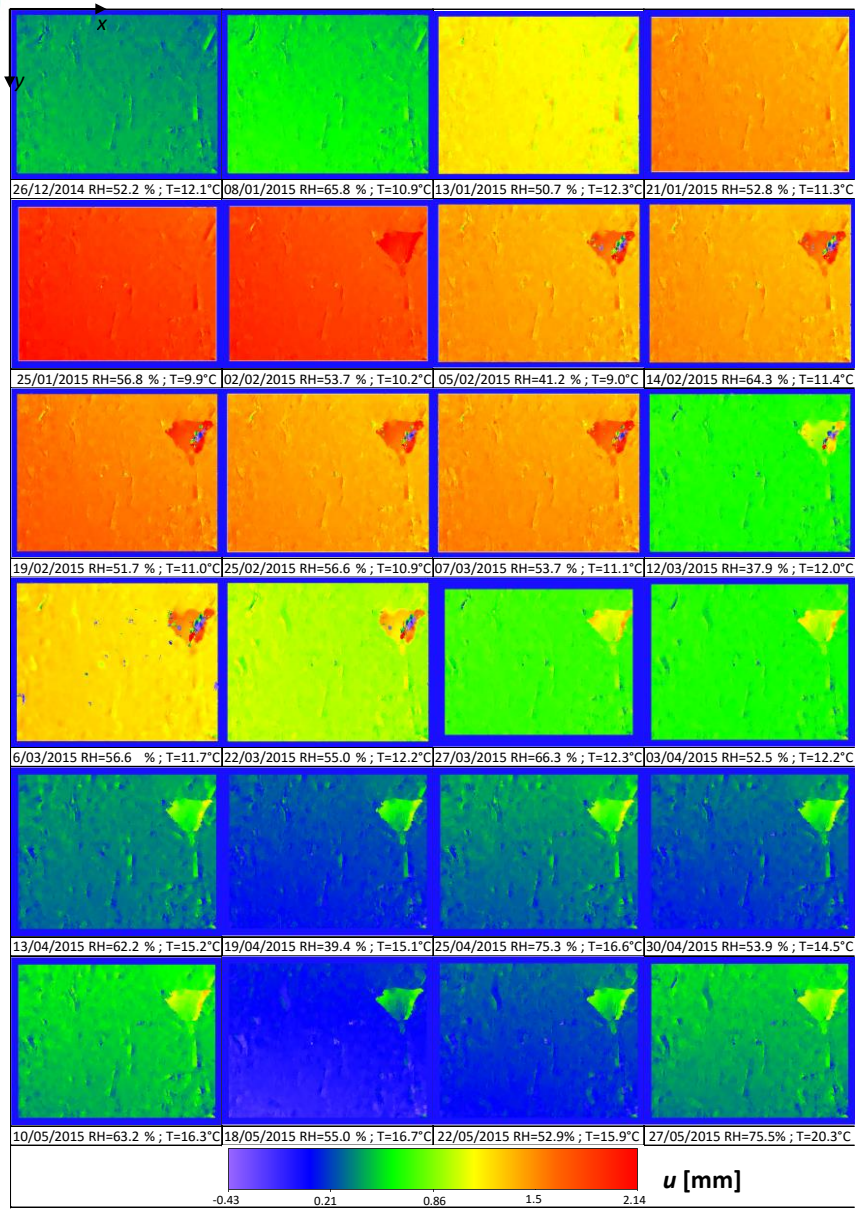


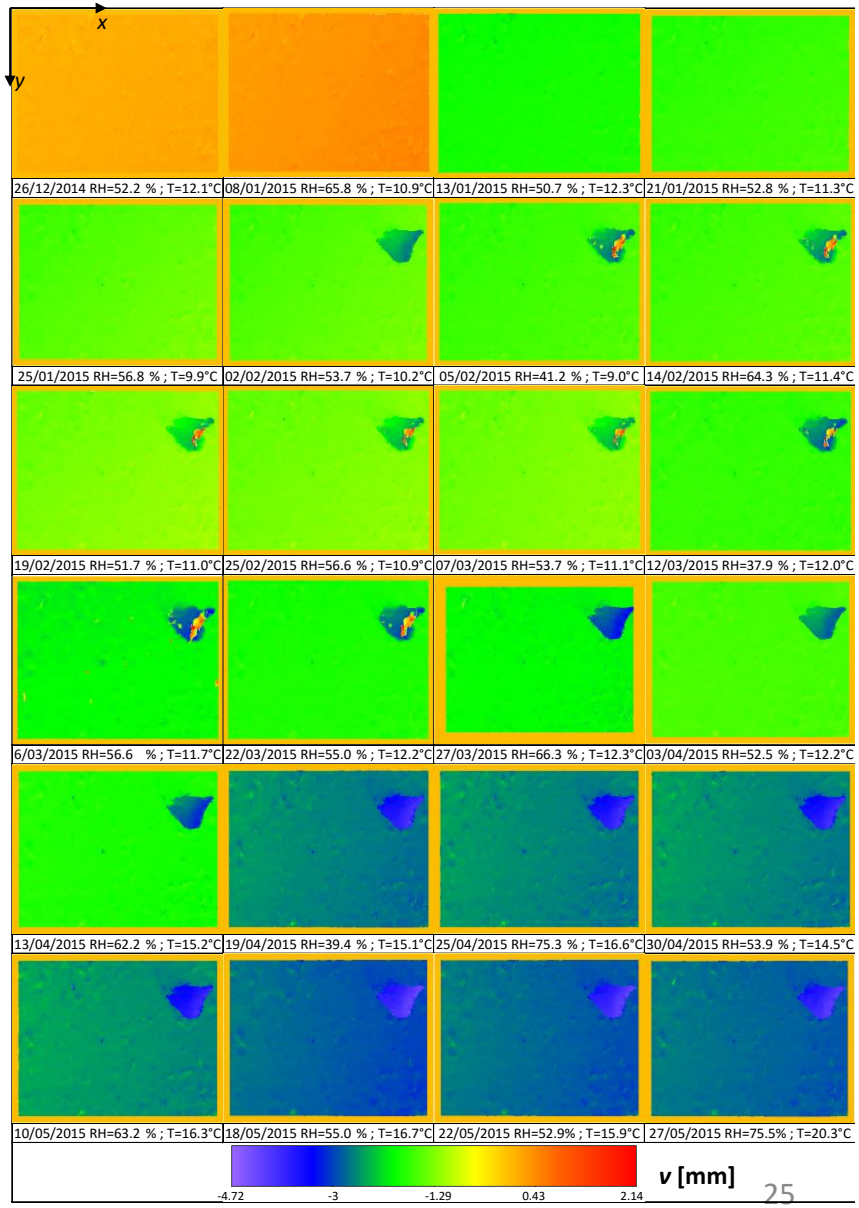
Écaille ou fragment

⇩

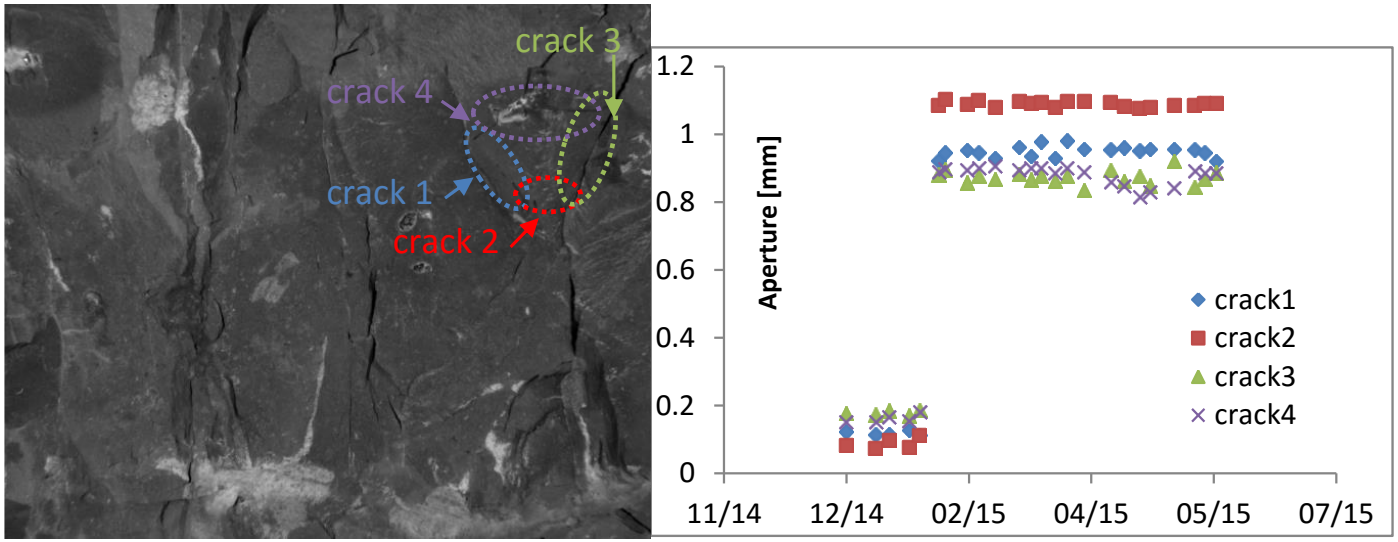
Translation ou déplacement tridimensionnel

Après dépose des cintres : zone 1bis (du 18/12/14 au 27/05/15)





Le contour du fragment a été scindé en **quatre** « fissures »



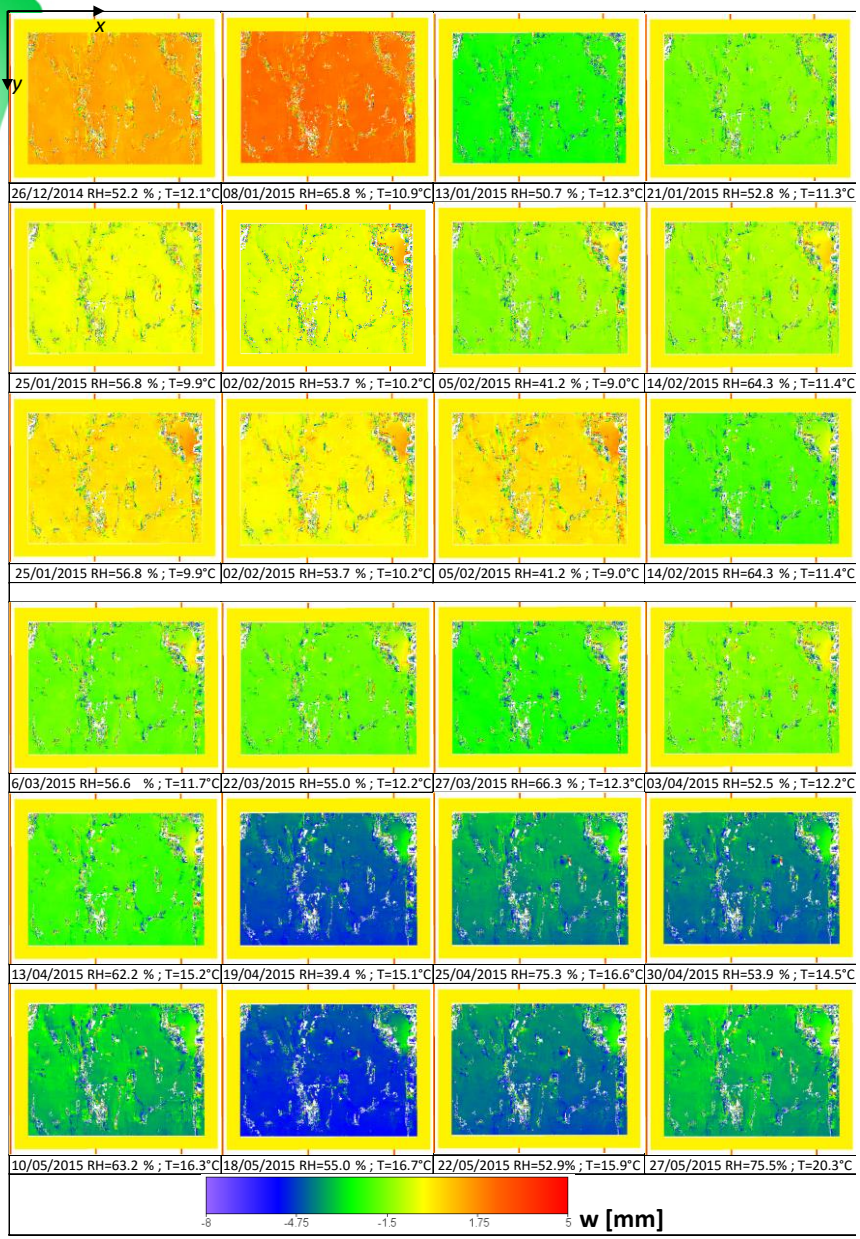
La cinétique du fragment peut être découplé en 3 phases :

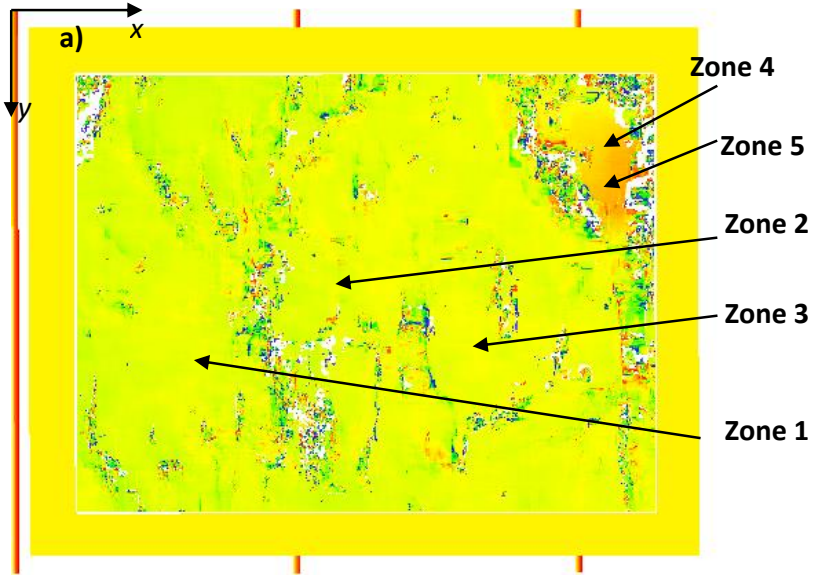
1 – L'évolution temporelle des ouvertures montre qu'avant le 25/01/2015, les valeurs sont proches de **zéro**.

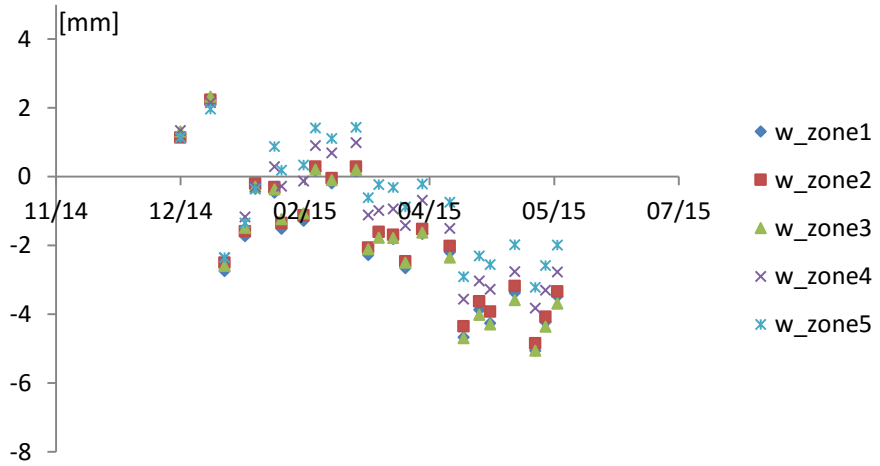
2 – Il s'en suit un saut des valeurs d'ouverture entre **0,9** et **1,1 mm**, confirmant ainsi la translation du fragment.

3 – Un fois cette translation brutale venue, **aucune fluctuation** des valeurs n'est observée confirmant ainsi que le mouvement du fragment n'est pas corrélé aux variations hydriques dans la niche.

Après dépose des cintres : zone 1bis (du 18/12/14 au 27/05/15)



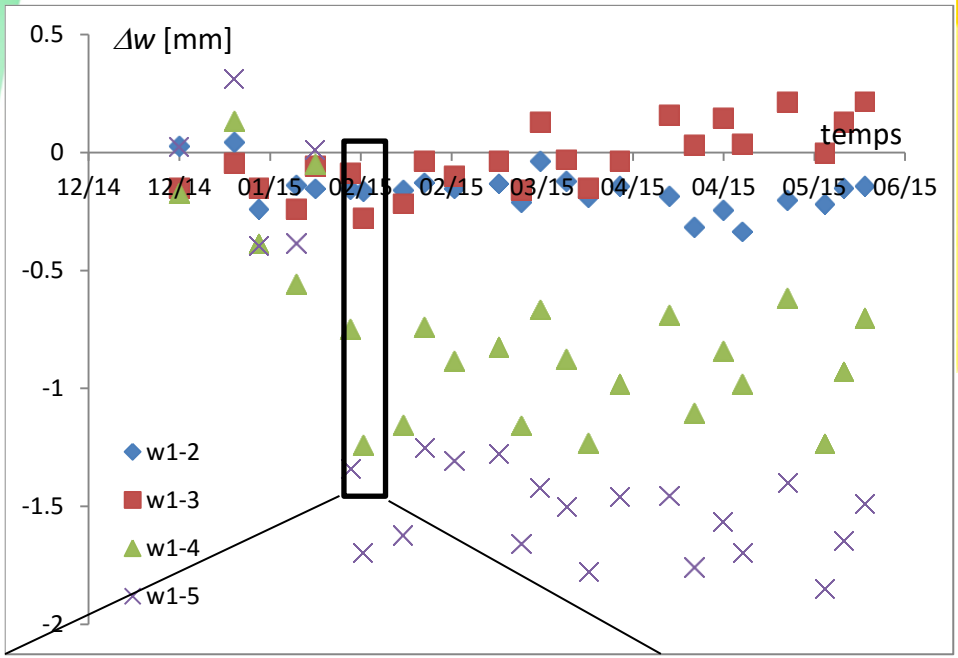


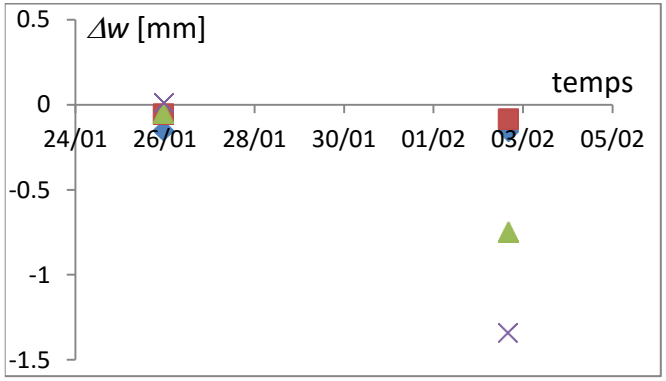


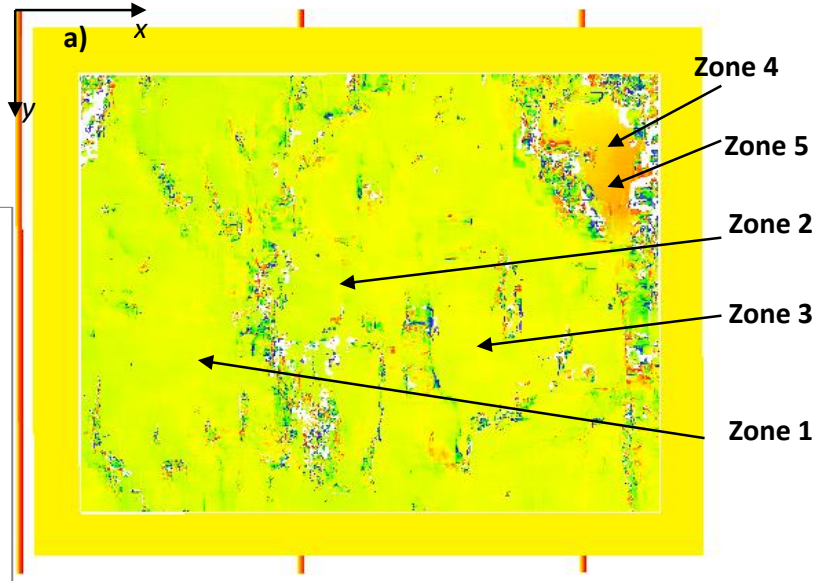
$$\Delta w = w_{\_zone1} - w_{\_zone\,i} \qquad \textit{avec i=2 à 5}$$

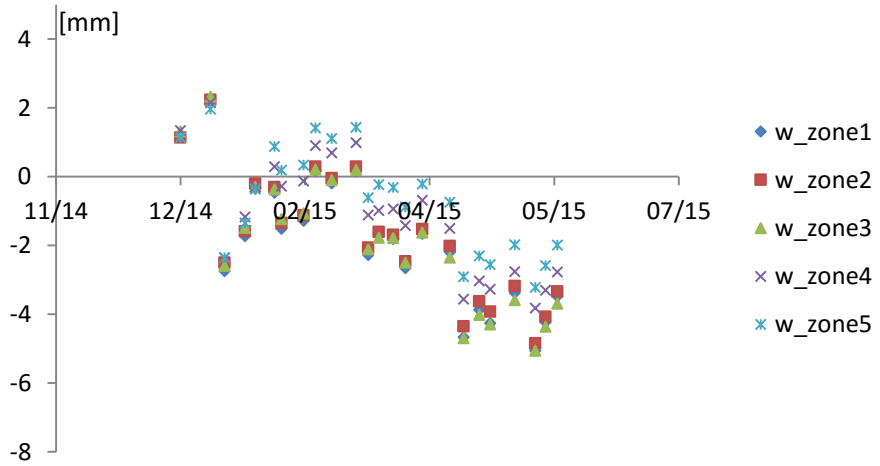
Si $\Delta w \rightarrow 0$ (pas de déplacement hors-plan)

Si $\Delta w \nearrow$ (déplacement hors-plan local)









Déplacement hors-plan du fragment entre -0,75 et -1,34mm

Avantages :
Sans contact
Multi-échelle
Comportement mécanique (déformations)
Spatialisation
Milieu discontinu (fissures)
Calcul des ouvertures de fissure
Stéréo-corrélation : tenseur (2x2) des déformations (Green-Lagrange)

Inconvénients :
Conservation du mouchetis au cours de l'étude (pas de variation locale des niveaux de gris)
temps de calcul (GPU)
Pas le tenseur complet des déformations (Green-Lagrange)
CIN : tenseur (2x2) des petites déformations

Remerciements

aux collègues, étudiants, …

Merci pour votre attention