



# Apport du laboratoire souterrain de Meuse Haute-Marne pour la compréhension du comportement hydromécanique des ouvrages souterrains dans les argilites

Gilles Armand, Jad Zghondi, Hipolyte Djizanne, Nathalie Conil, Rémi de la Vaissière, Frédéric Bumbieler, Laurence Richard-Panot, Jean- Michel Bosgiraud

Andra

CFMR, 17/03/2016

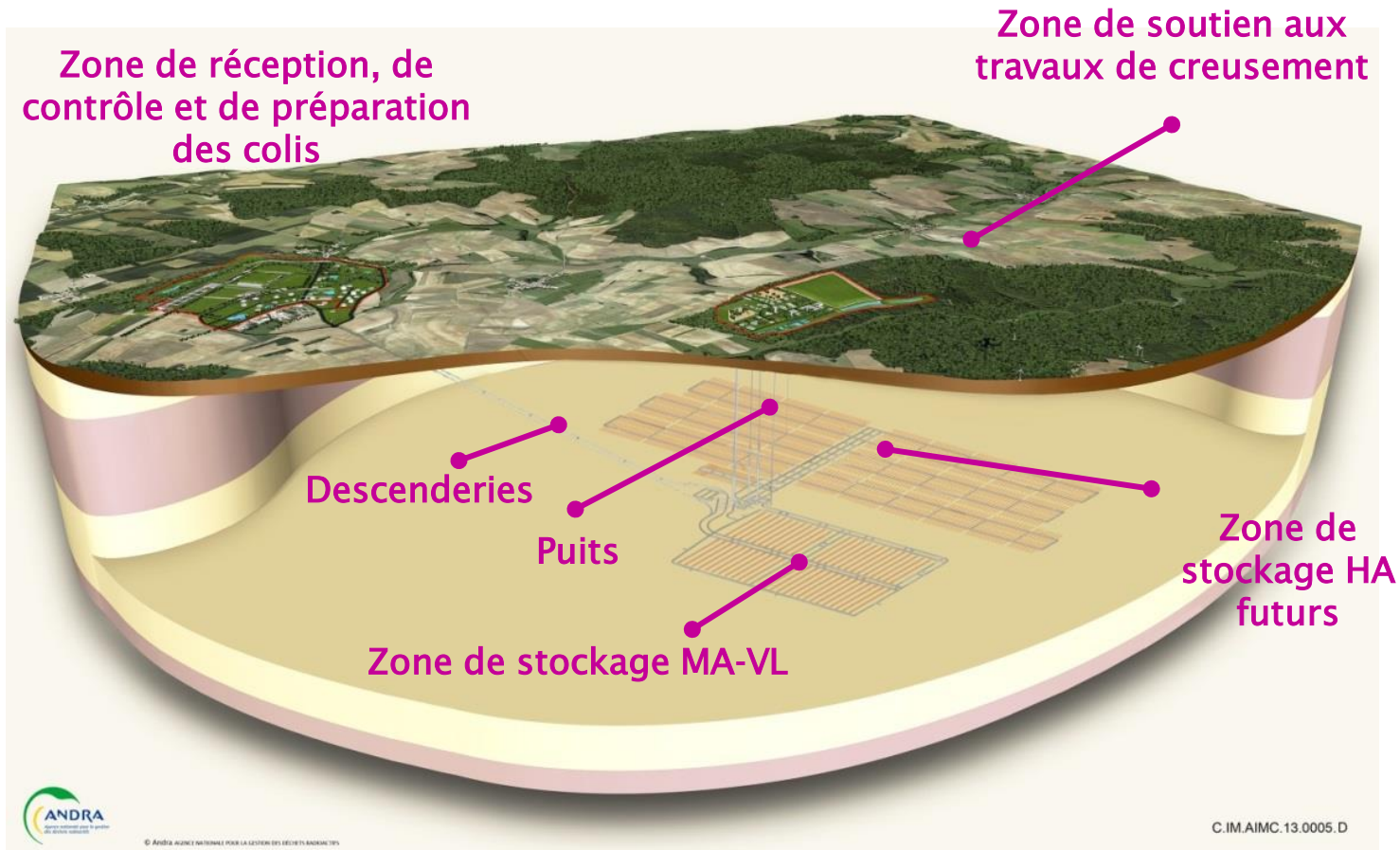
## Contexte

## Stratégie expérimentale

## Observations réalisées

- ◆◆ Caractérisation de la zone endommagée par le creusement
- ◆◆ Déformations des ouvrages
- ◆◆ Evolution des pressions interstitielles
- ◆◆ Impact du comportement de roche sur le comportement des soutènements/revêtements

## Conclusions



Différents ouvrages souterrains avec différentes fonctions (alvéoles de stockage, galeries d'accès, galeries techniques,...)  
 => qui peuvent nécessiter des méthodes de construction différentes



# Stratégie expérimentale et mesures mises en œuvre pour caractériser le comportement des ouvrages souterrains au laboratoire de recherche de Meuse Haute-Marne

Compréhension du  
comportement HM de la roche  
et du soutènement/revêtement  
+  
Impact des différentes  
méthodes de  
creusement/soutènement

Caractérisation de la zone  
endommagée par le creusement (EDZ)  
(fracturation, propriétés de transport)  
et de son évolution au cours du  
temps

Comportement Hydromécanique des  
argilites du COX autour des ouvrages  
et évolution des  
contraintes/déformations des  
structures de soutènement

Données d'entrée pour les calculs de  
sûreté

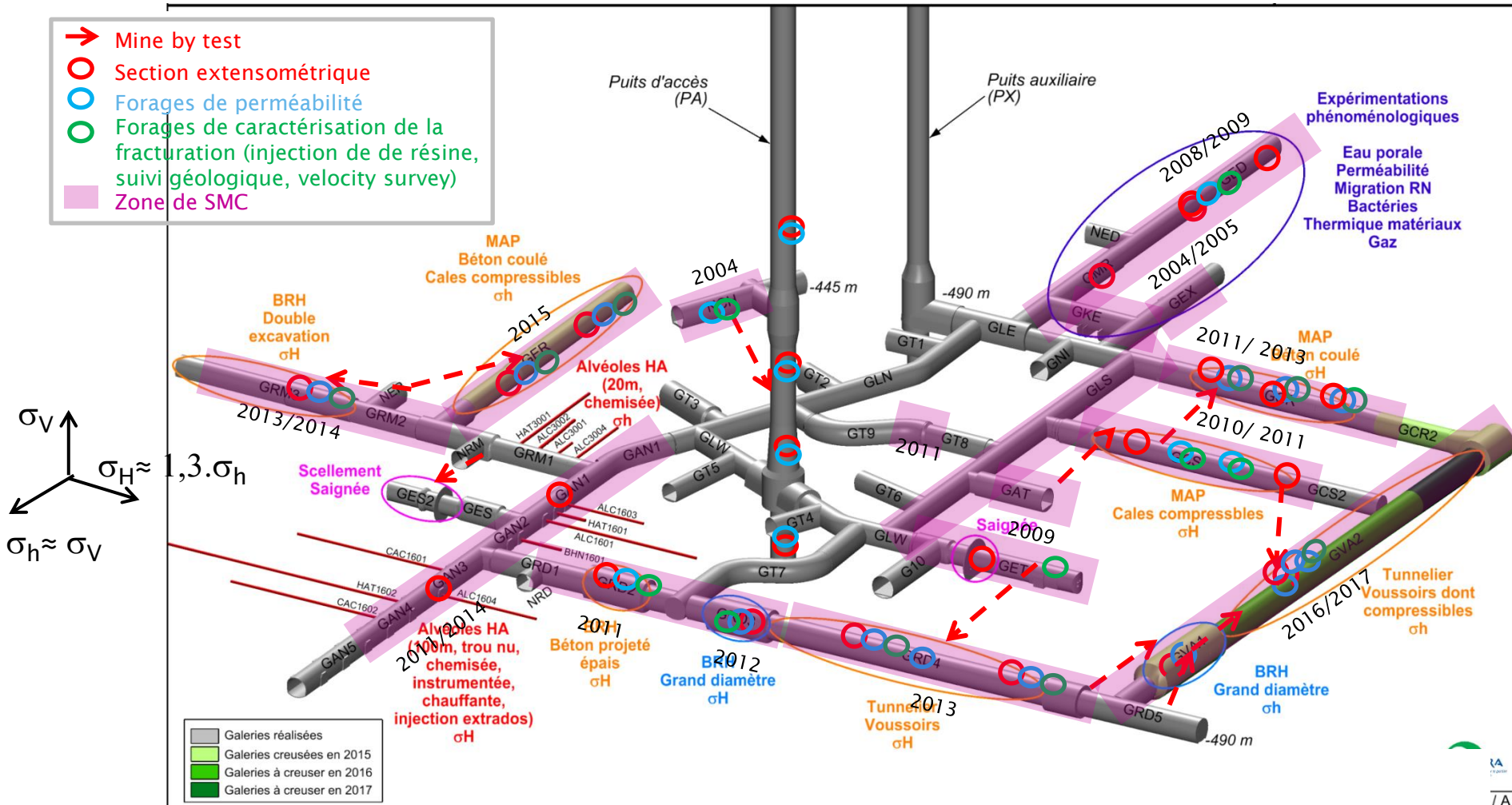
Dimensionnement et optimisation des  
méthodes de construction pour le  
stockage CIGEO

- ◆ Nécessité d'acquérir et de compléter les données non seulement sur le comportement intrinsèque des argilites du COX, mais aussi sur le comportement des ouvrages proprement dit, en particulier sur l'interaction roche/soutènement

## ➔ Développement séquentiel du réseau de galeries spécifiques permettant d'étudier les phénoménologies et l'impact des choix technologiques de construction (de 2006 à 2020) :

- ◆ Effet de l'orientation des ouvrages par rapport à l'état de contrainte
- ◆ Effet de la minéralogie sur le comportement des ouvrages (=> profondeur)
- ◆ Effet de la désaturation/resaturation sur le comportement d'un ouvrage
- ◆ Propriétés de l'EDZ sous chargement mécanique et imbibition
- ◆ Effet des différentes méthodes de creusement/soutènement par comparaison du comportement de différentes galeries parallèles
- ◆ Suivi long terme des différents ouvrages

## Localisation et phasage des expérimentations



- ◆ Test de différentes méthodes d'excavation/soutènement dans des galerie parallèles pour voir l'influence sur le comportement HM



Machine à attaque ponctuelle sous jupe







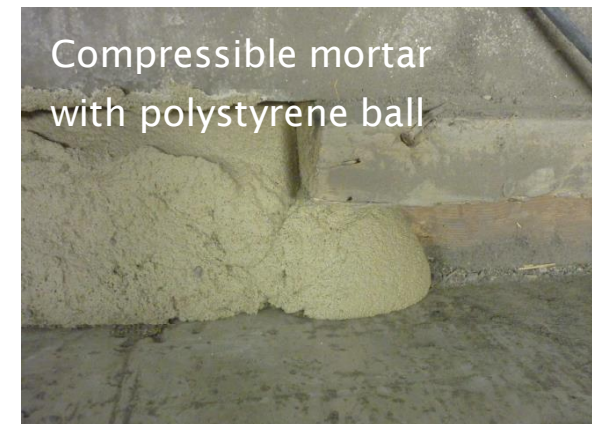
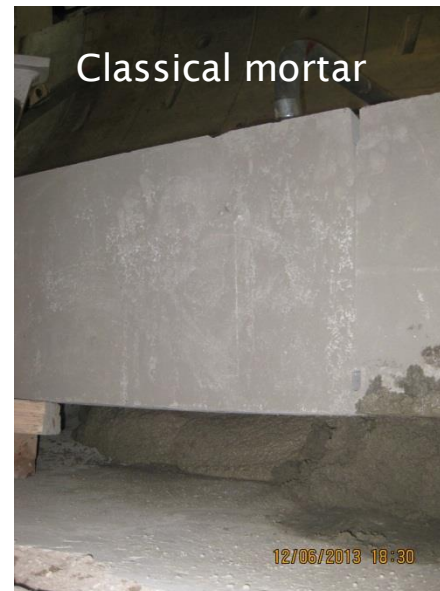
Boulons radiaux (3 m long),  
18 cm béton projeté fibré,  
12 cales compressibles (hiDcon®)

≈ GCS t + 27 cm de béton coulé en  
place 6,5 mois après le creusement

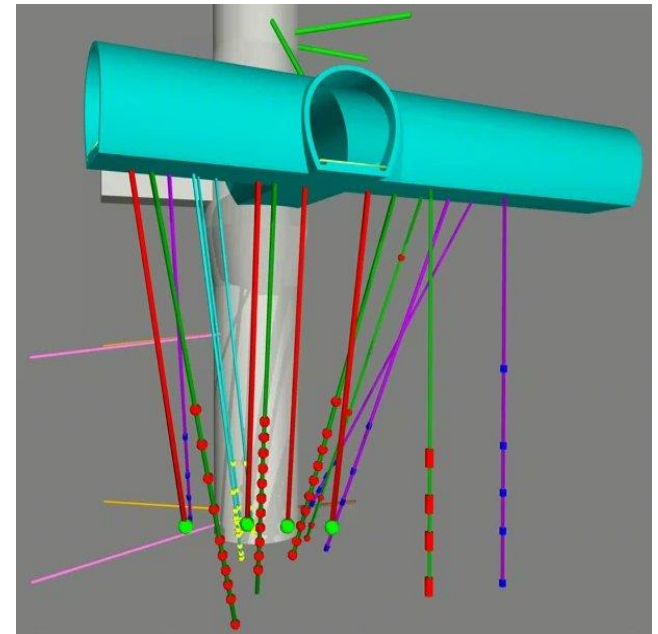
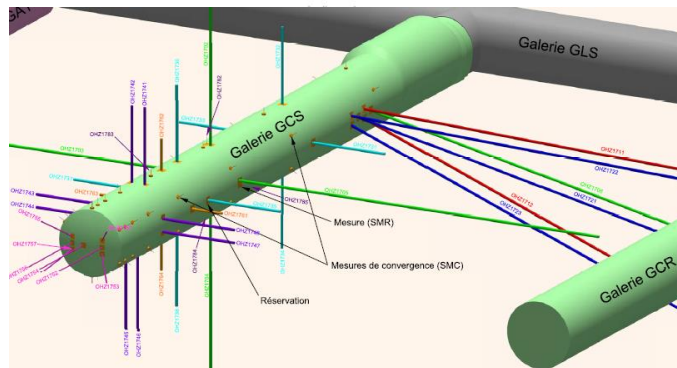
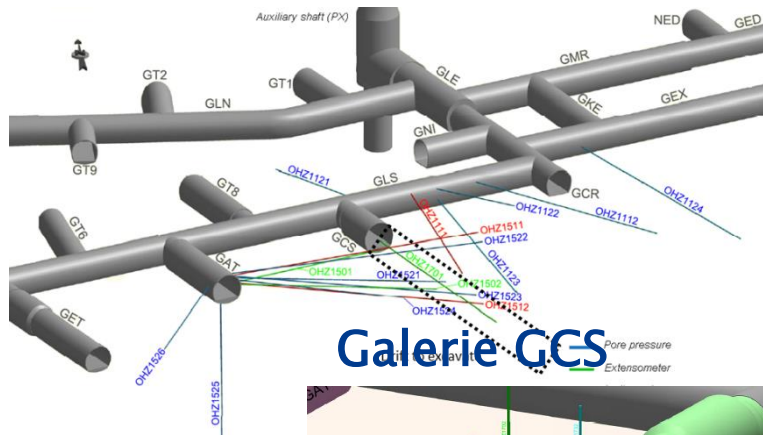
Boulons radiaux(3 m long),  
45 cm béton projeté fibré mis en 4  
couches consécutives

## ◆ Mise en place de voussoirs préfabriqués

- Voussoir 45 cm d'épaisseur
- Injection de différents matériaux de bourrage



- ◆ Nécessité de disposer de mesures pour comprendre le comportement des ouvrages
  - Dispositif expérimental : “Mine by experiment”
    - Mesures en forage (déplacement, pression interstitielle) mises en place avant le creusement
    - Mesures de convergence extensométrie, caractérisation géologique des front de taille, analyse structurale des carottes
    - Caractérisation intensive après creusement (perméabilité, ...)

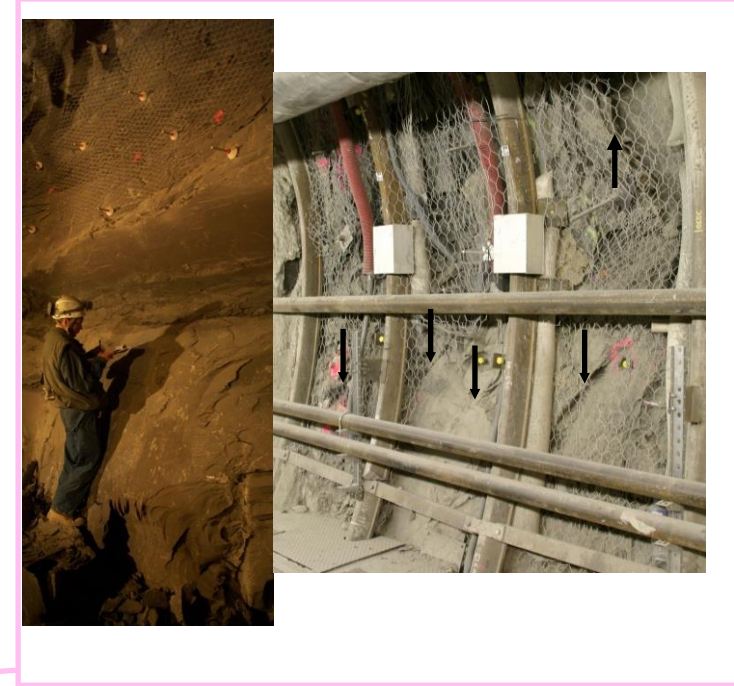
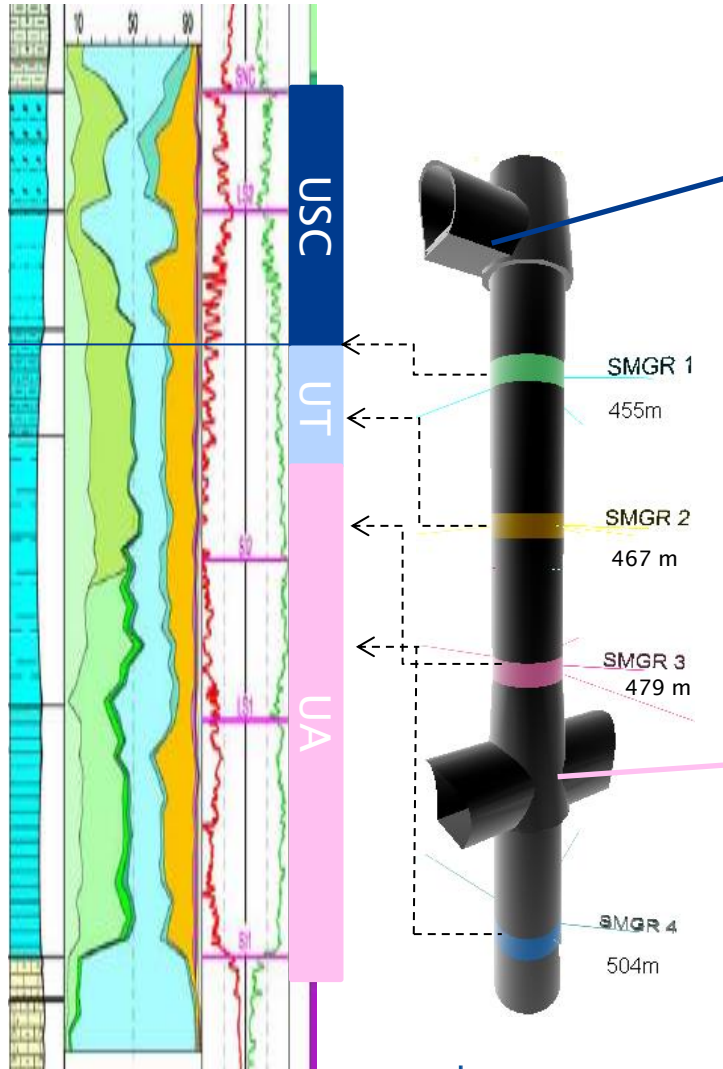




# Observations réalisées

## Au cours du creusement

◆ A Endommagement faible dans la niche 445m

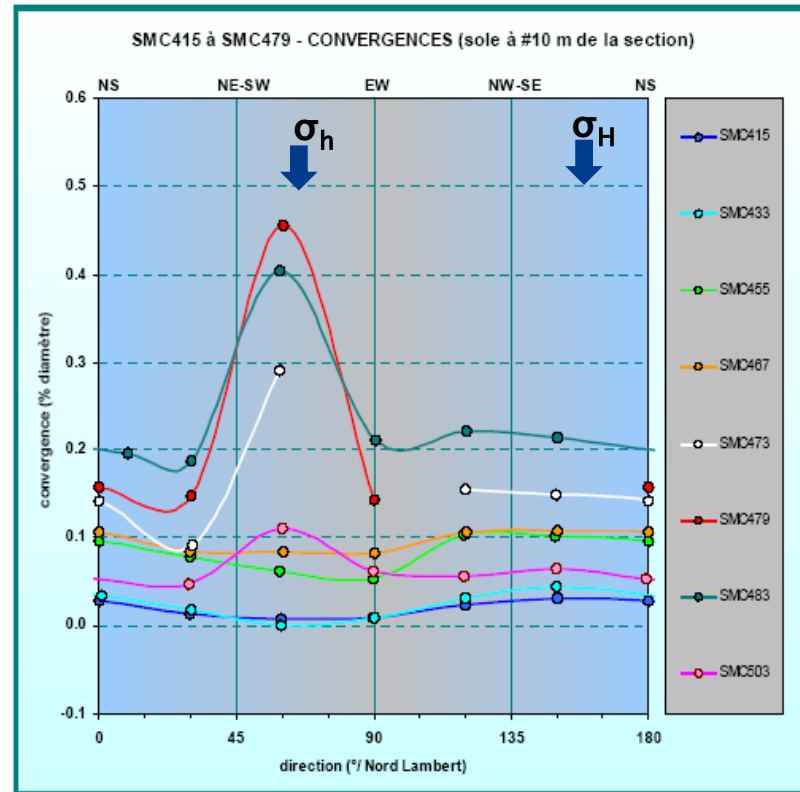
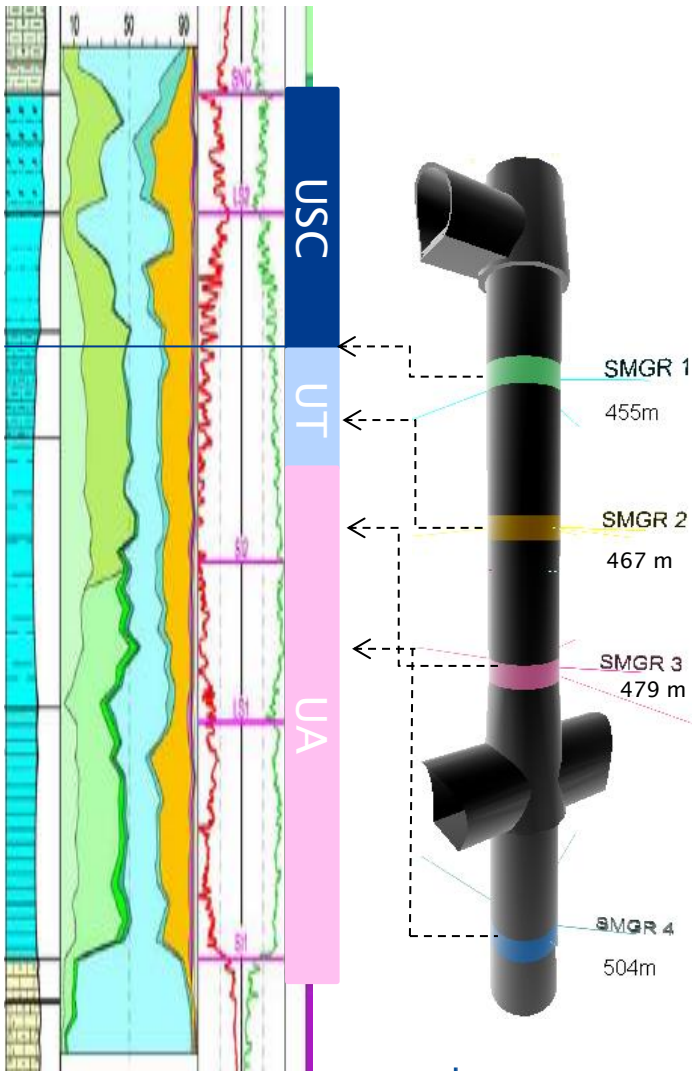


◆ À 490 m: Fracturation induite importante au front et sur les parements

## Au cours du creusement

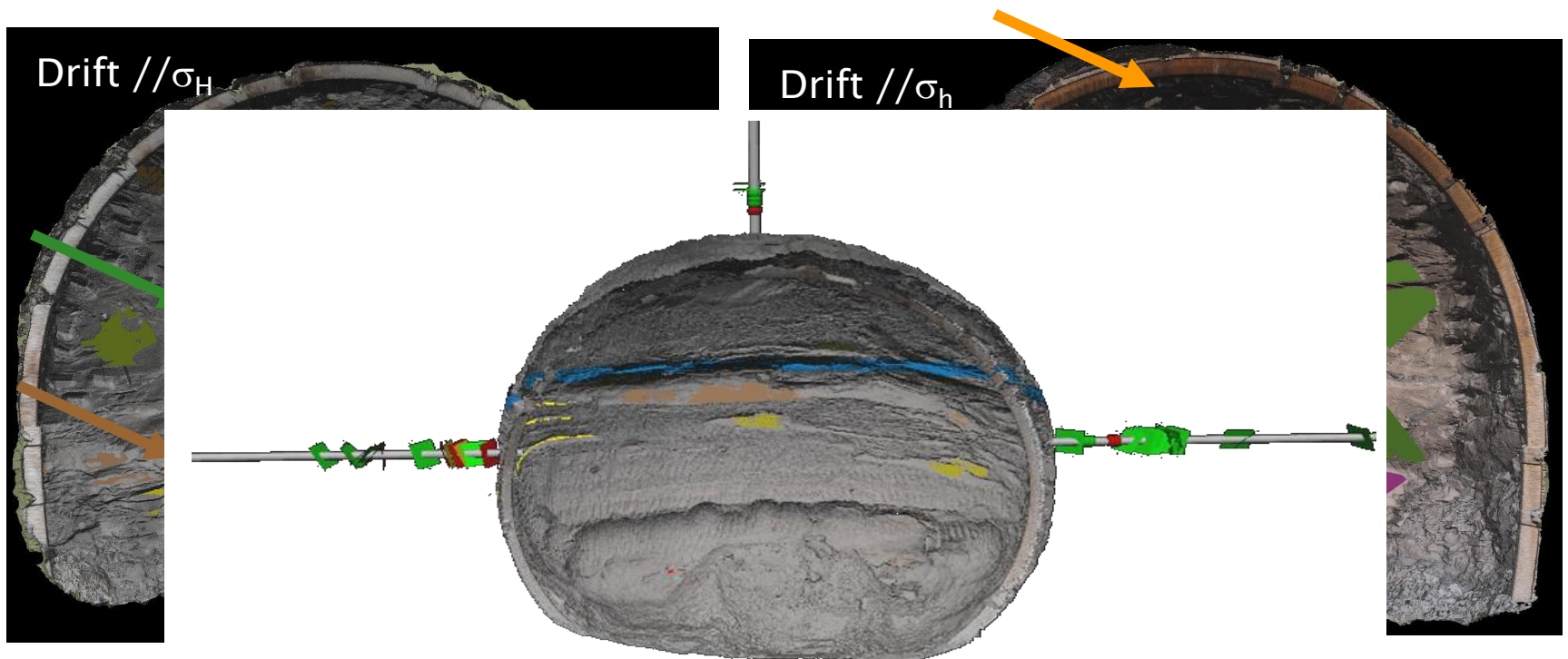
### ◆ Evolution des convergences différentes en fonction de l'unité rencontrée

- Comportement quasi élastique dans l'USC
- Comportement plastique dans l'UA montrant une endommagement





# Caractérisation de la zone fracturée induite par le creusement au niveau principal du laboratoire



Fracture supérieure

Fracture inférieure

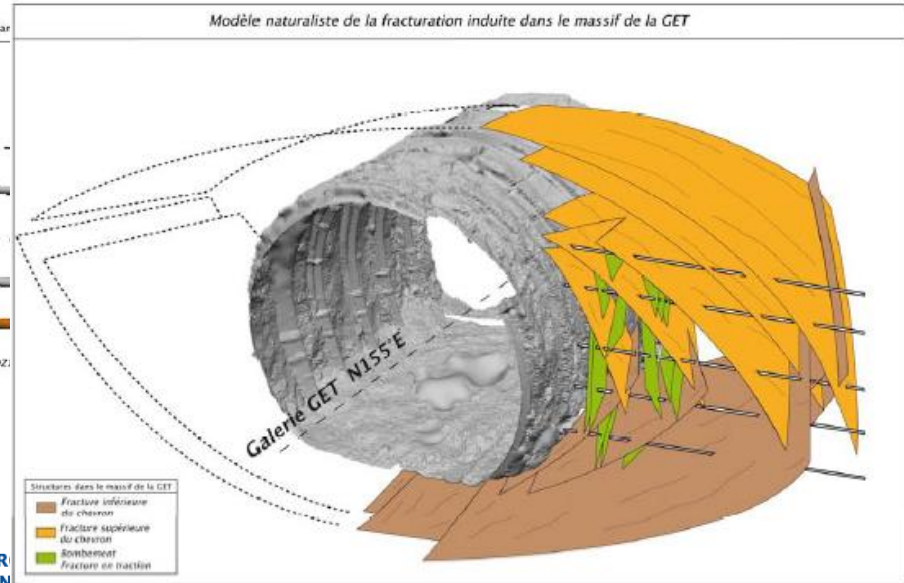
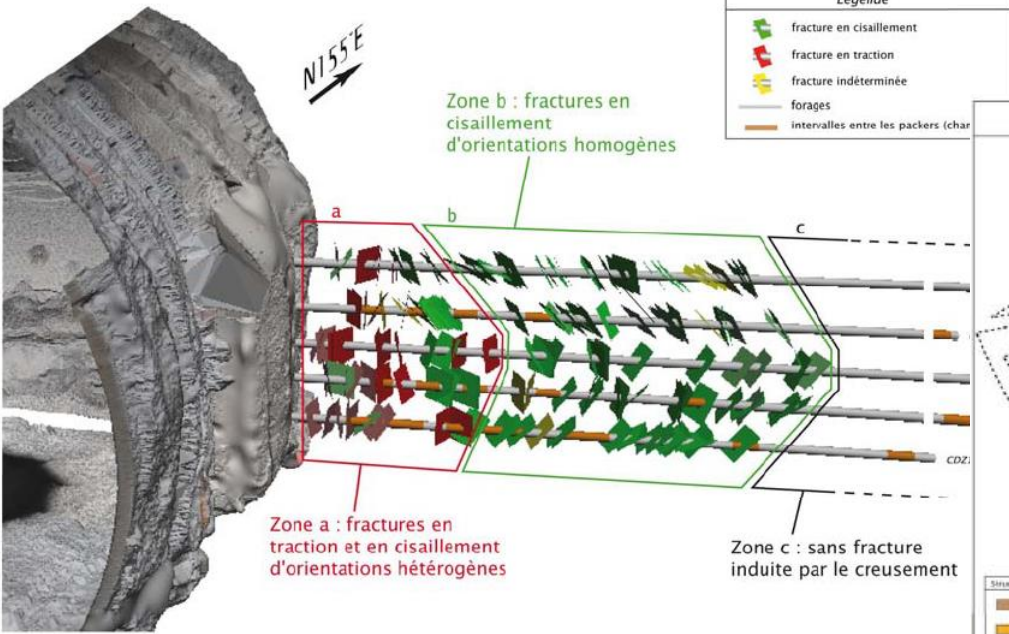
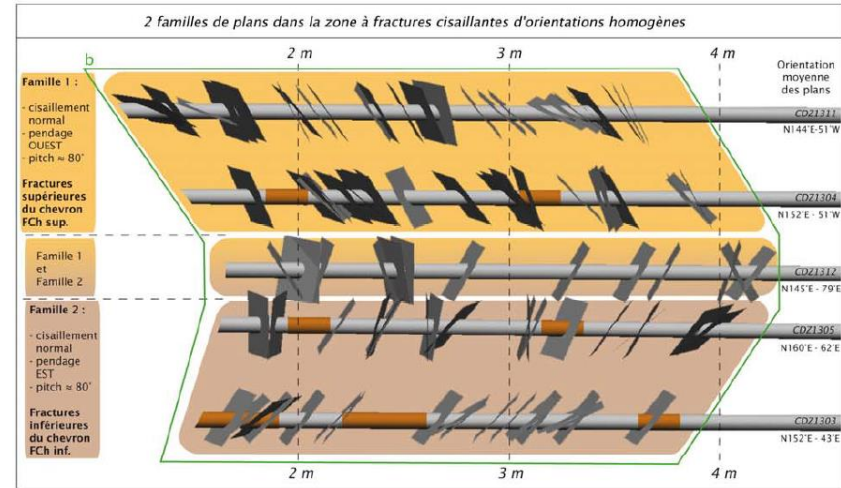
Fractures du bombement - extension

- » A 490 m: présence d'une fracturation induite importante
- » Influence de la direction de creusement/à l'orientation des contraintes in situ



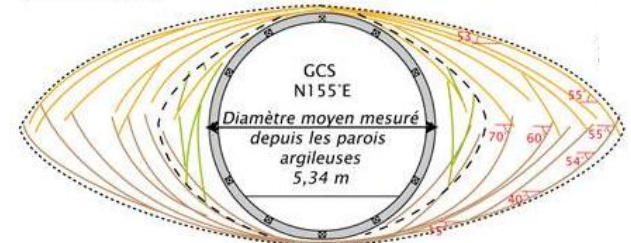
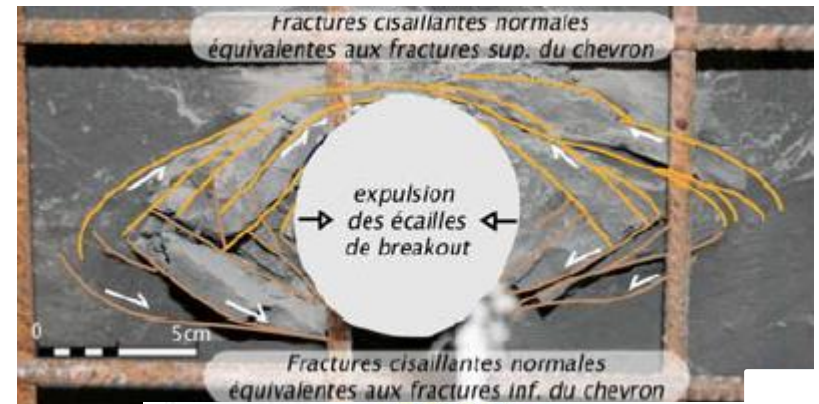
## Analyse structurale des fronts de taille et des fractures observées sur les carottes

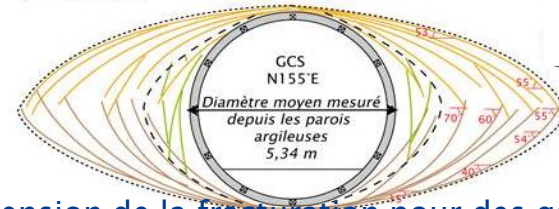
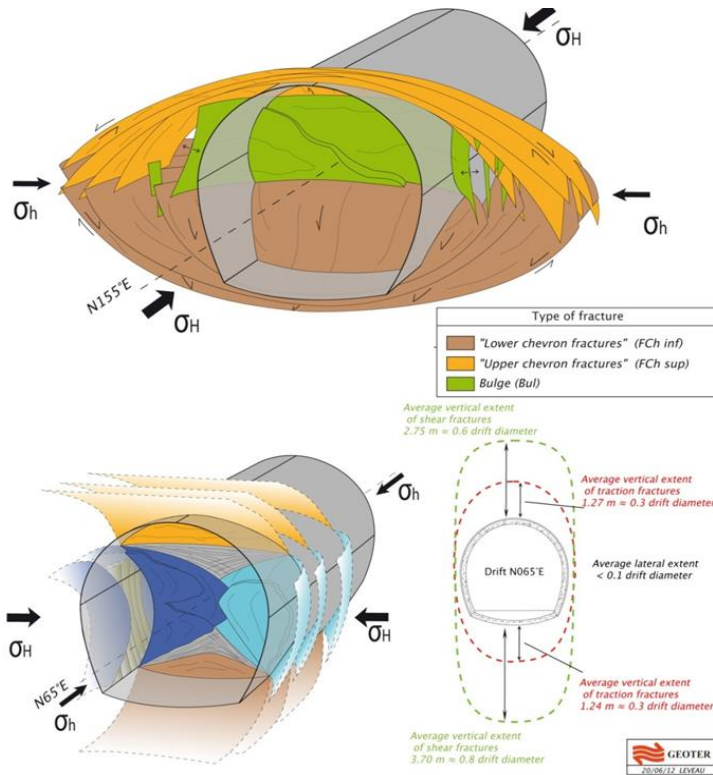
- ◆ Réseau de fractures complexe avec des fractures en cisaillement et en extension
- ◆ Fracturation en cisaillement est plus développée et plus profonde que celle en extension



- ◆ Typologie de fracturation identique et d'extension similaire pour des ouvrages de différentes tailles

## Boulon





Extension de la fracturation pour des galeries boulonnées

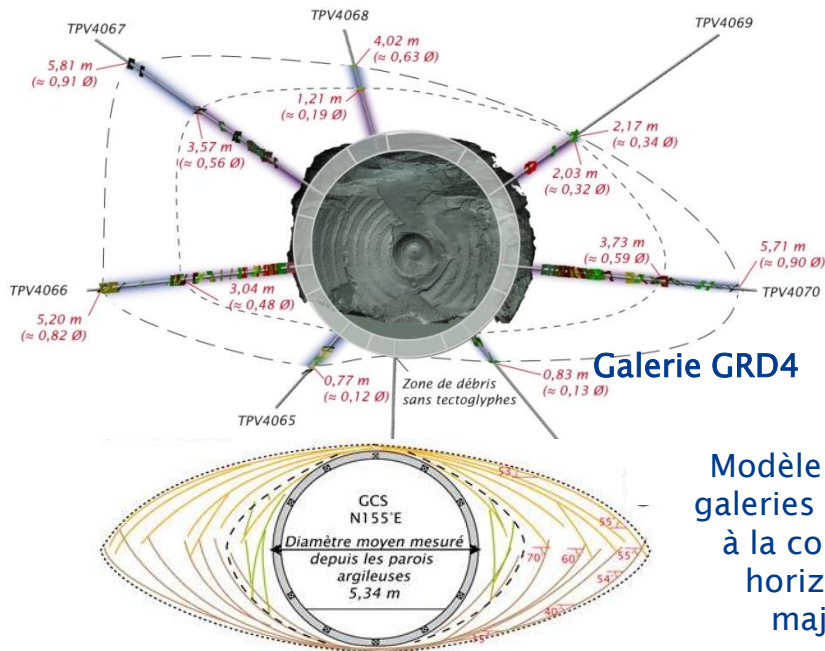
Drift Orientation		Extensional fractures extent			Shear fractures extent		
		Min.	Average	Max.	Min.	Average	Max.
N65 // $\sigma_h$	Ceiling	0.2xD	0.3xD	0.4xD	0.5xD	0.6xD	0.8xD
	Wall	0.1xD	0.1xD	0.2xD	-	-	-
	Floor	0.2xD	0.4xD	0.5xD	0.8xD	0.8xD	1.1xD
N155 // $\sigma_H$	Ceiling	-	0.1xD	0.15xD	-	-	-
	Wall	0.01xD	0.2xD	0.4xD	0.7xD	0.8xD	1.0xD
	Floor	-	0.1xD	0.15xD	-	-	-

G. Armand et al 2014

- ◆ Apparition de fractures au front lors de l'excavation et qui se développent au cours de l'excavation
- ◆ Même typologie de fractures quelque soit l'orientation des galeries mais l'organisation du réseau est différentes
- ◆ Différentes méthodes d'excavation (MAP, BRH) ont pas d'influence (ou peu) sur l'organisation du réseau de fracture et peu sur l'extension

## Pour la galerie GRD4 creusée au tunnelier

- ◆ Matériau de bourrage mis en place avec une rampe => clavage tardif à environ 2,5 D du front
- ◆ Typologie de la fracturation similaire aux autres méthodes d'excavation, mais extension différente particulièrement en voute (étude en cours)

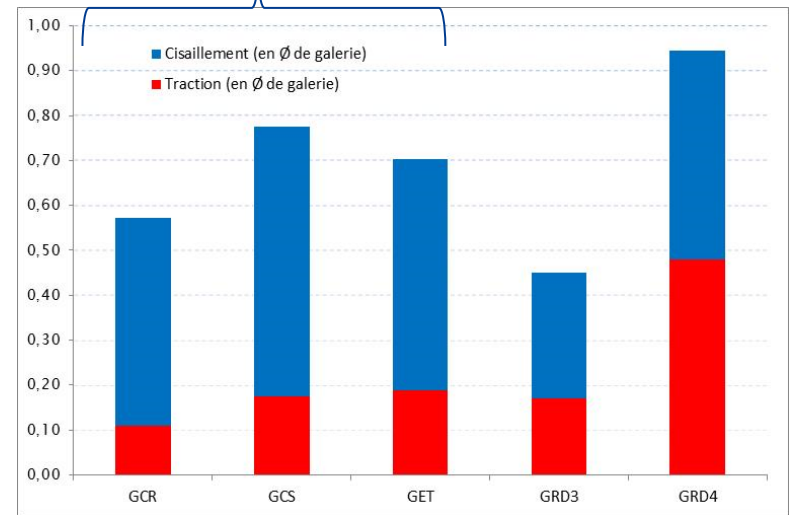


Galerie GRD4

Modèle pour les galeries parallèles à la contrainte horizontale majeure

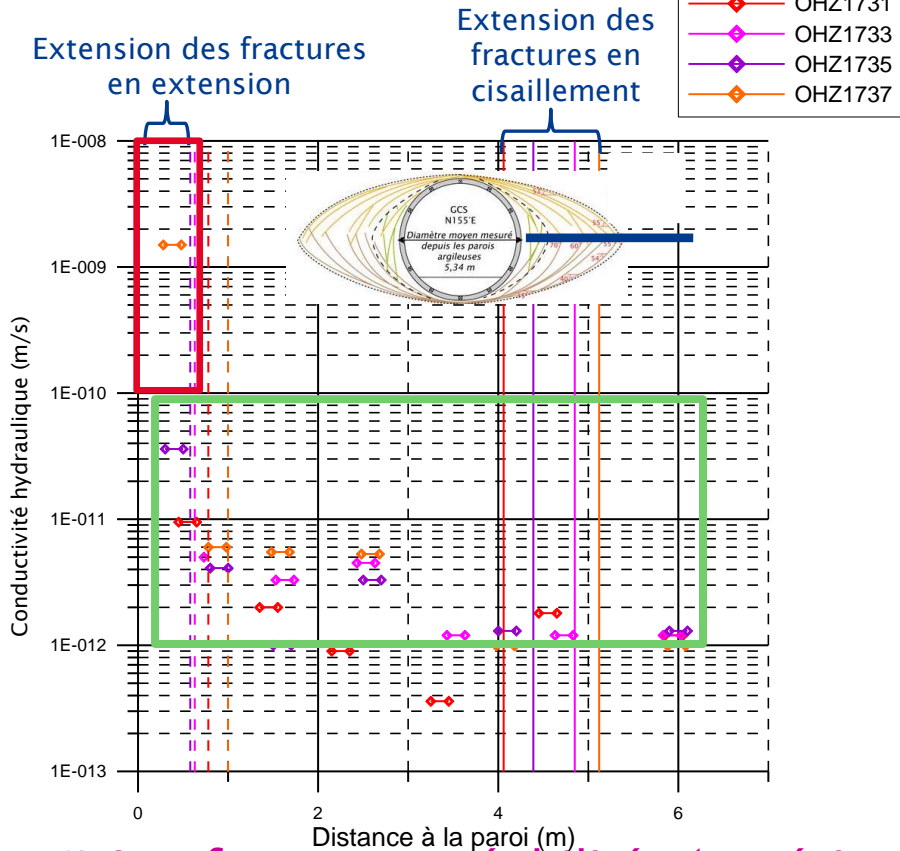
Galerie boulonnées à l'avancement

Galerie creusée au tunnelier

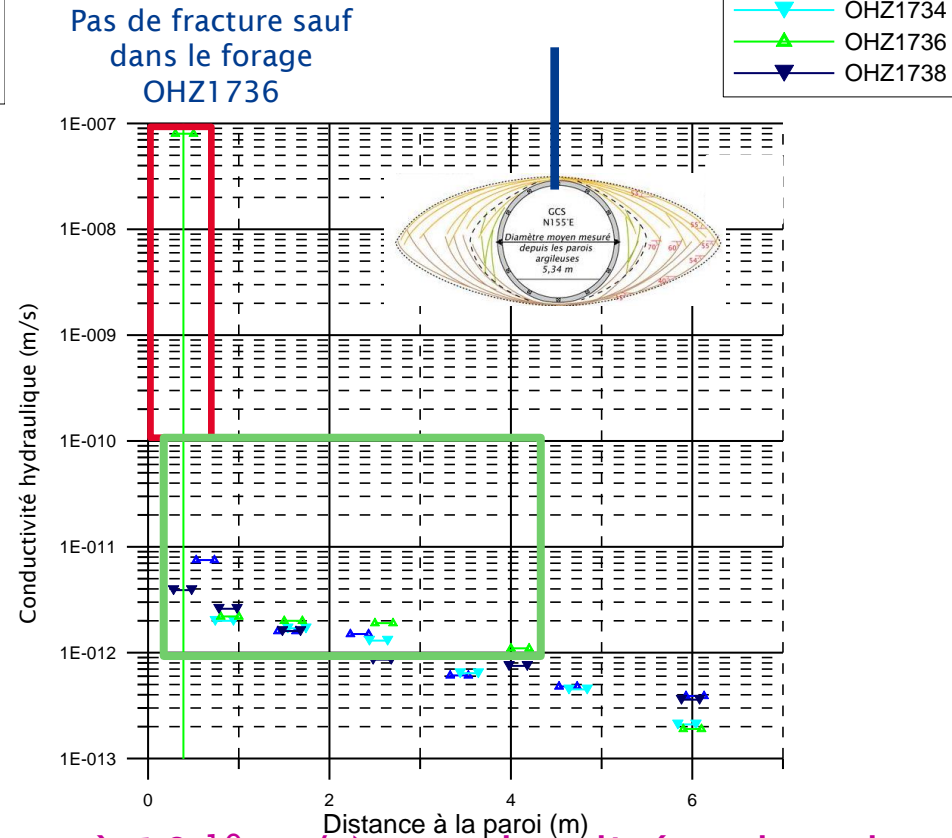


- ◆ La géométrie et le temps de mise en place du soutènement jouent un rôle majeur sur l'extension et la densité de fracturation induite par le creusement.

## Horizontalement

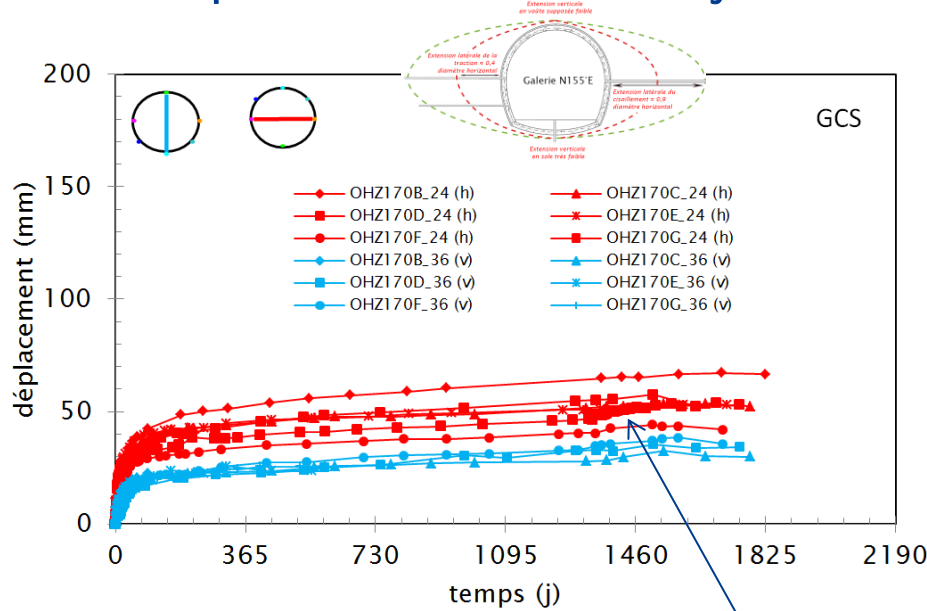


## Verticalement



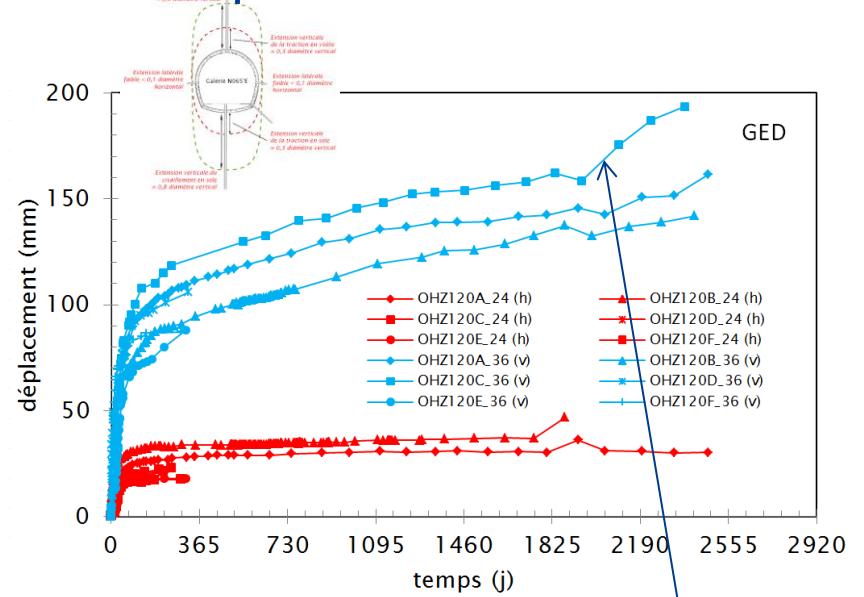
- ◆ Les fortes perméabilités (supérieures à  $10^{-10}$  m/s) sont localisées dans la zone fracturée avec des fractures mixtes (transmissivité de fracture)
- ◆ Une zone de fracture connectée et une zone avec une fracturation « discrète »

## Galerie parallèle à la contrainte majeure



Reprise du creusement de la galerie GCS

## Galerie parallèle à la contrainte mineure



Fuite d'eau au radier  
Effet de gonflement

◆ L'amplitude des convergences dépend de l'orientation des galeries et de la zone fracturée

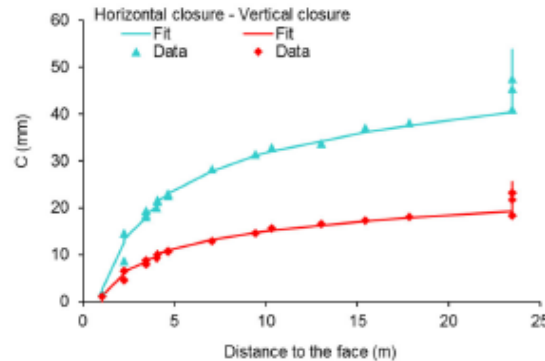
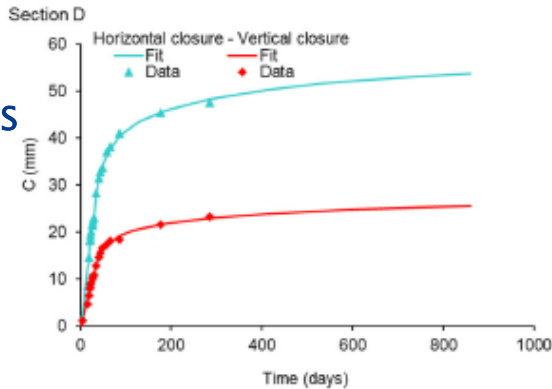
- En GCS suivant  $\sigma_H$ ,  $C_v/C_h$  de l'ordre de 0,5
- En GED suivant  $\sigma_h$ ,  $C_v/C_h$  de l'ordre de 4

◆ Convergence importante durant les 3 premiers mois de suivi, puis le taux de déformation décroît en fonction du temps

$$C(x,t) = C_{\infty} \left[ 1 - \left( \frac{X}{x+X} \right)^2 \right] \left\{ 1 + m \left[ 1 - \left( \frac{T}{t+T} \right)^n \right] \right\}$$

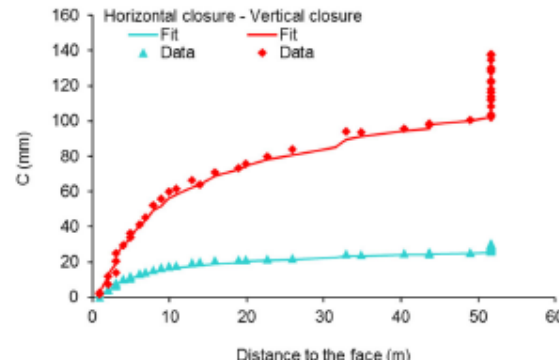
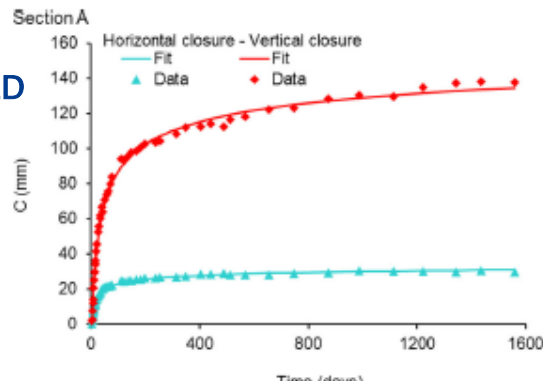
- ◆ Hypothèse de déformation elliptique de la galerie
  - Très bonnes reproduction et prévision des convergences
- ◆ Paramètres de la loi de convergence (X, T, m, n, C<sub>∞</sub>)
  - 40 jours de suivi permettent de déterminer les paramètres de la loi

Galerie GCS  
(// σ<sub>H</sub>)



Travaux de thèse  
L-M. Guayacán-Carrillo

Galerie GED  
(// σ<sub>h</sub>)



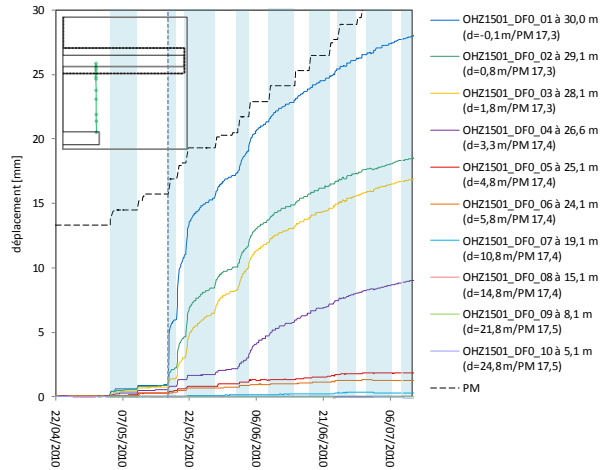
L-M. Guayacán-Carrillo et al, 2016

# Observations sur le comportement des ouvrages au LS

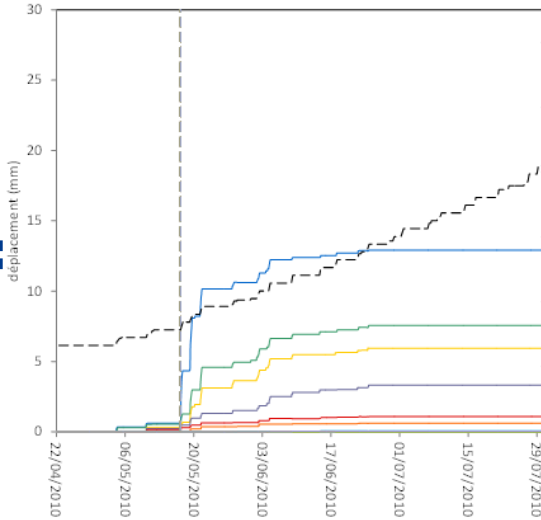
## Le comportement différé : ouvrage suivant $\sigma_H$



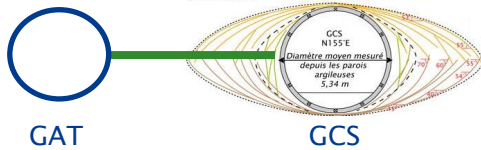
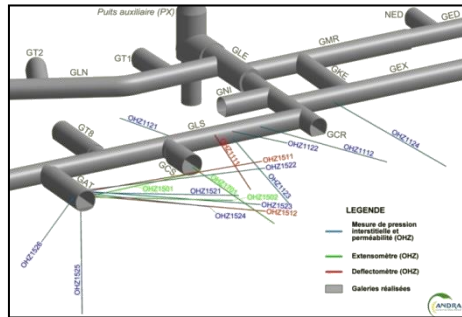
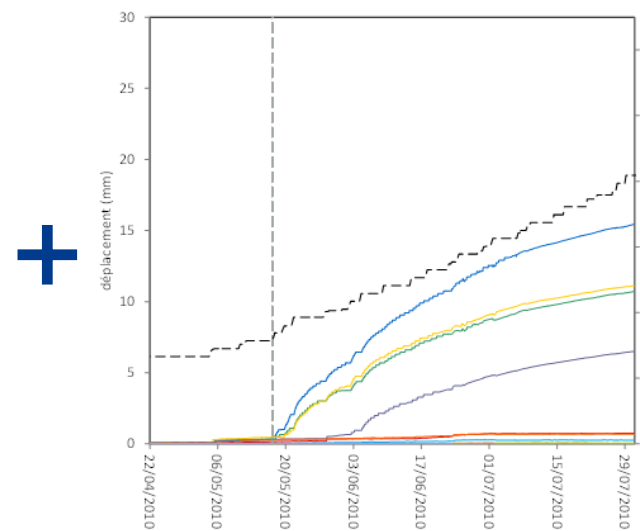
### Extensomètre subhorizontal perpendiculaire à la GCS



### Déplacement pseudo-instantané



### Déplacement différé



◆ Influence des reprises d'excavation jusqu'à 8,4 m en arrière du front

◆ Importance des déformations différées

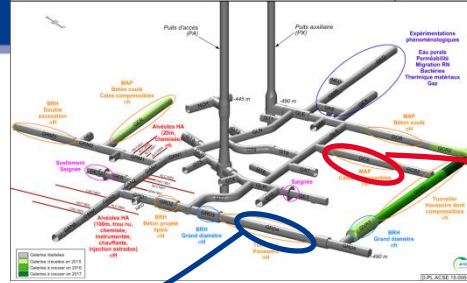
- Couplage hydromécanique (variation de pression interstitielle, gonflement,...)
- Fluage du matériau (viscosité de la matrice rocheuse +/ou propagation sub critique de la fissuration)
- Déformation d'un milieu fracturé par glissement/ouverture des fractures



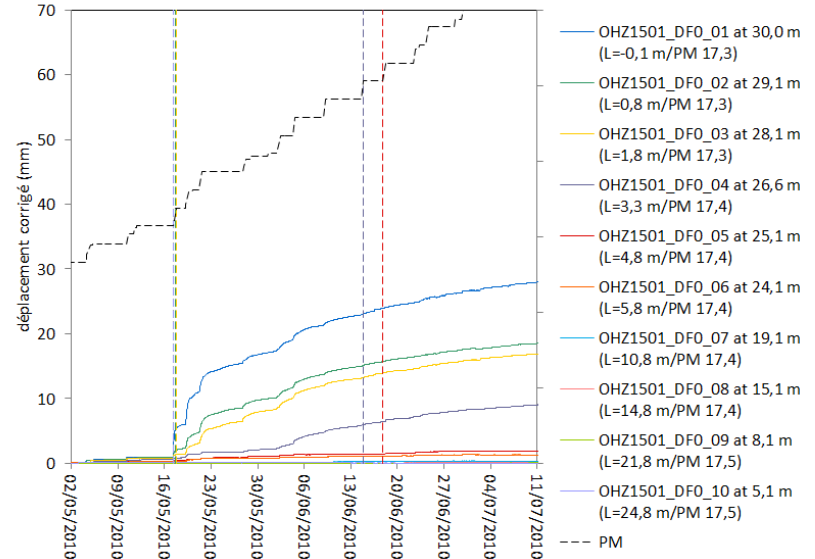
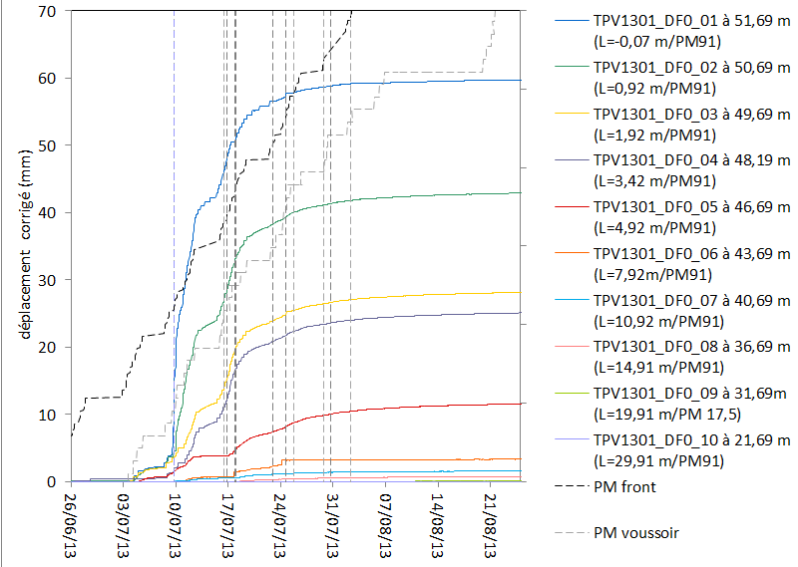
## Galerie GRD4 (revêtement rigide)



## Galerie GCS (Soutènement souple)



### Evolution des déplacement radiaux au parement sur 60 jours

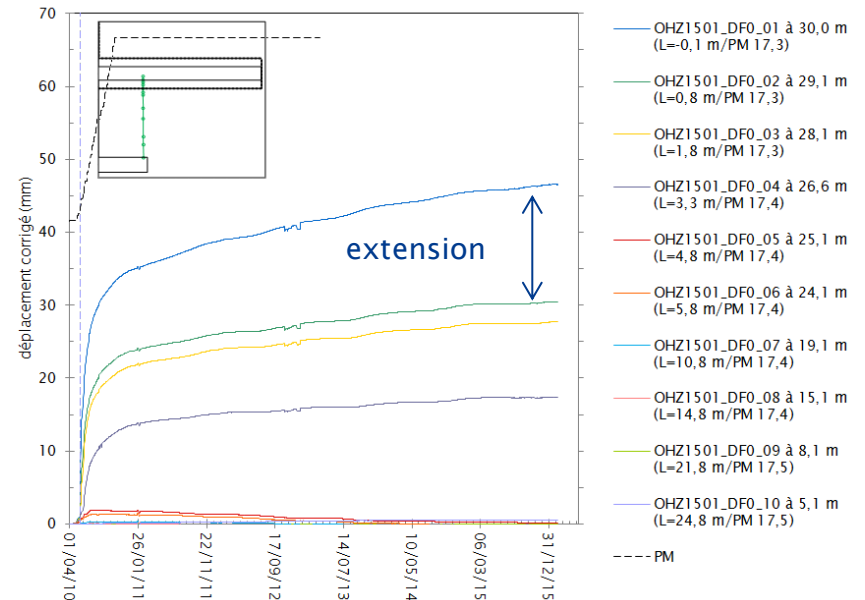
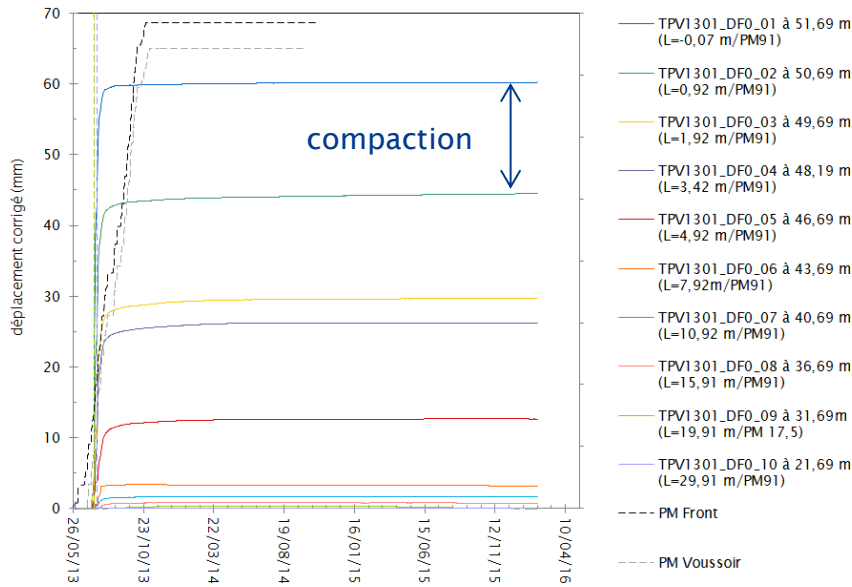
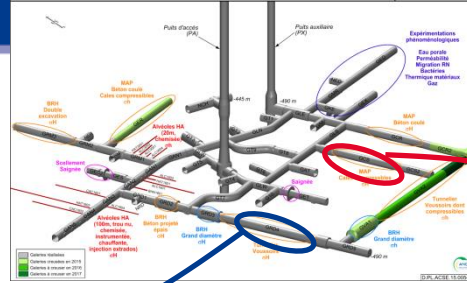


◆ Clavage tardif (> 2D) implique des déformations plus importante de la zone fracturée

## Galerie GRD4 (revêtement rigide)



## Galerie GCS (Soutènement souple)



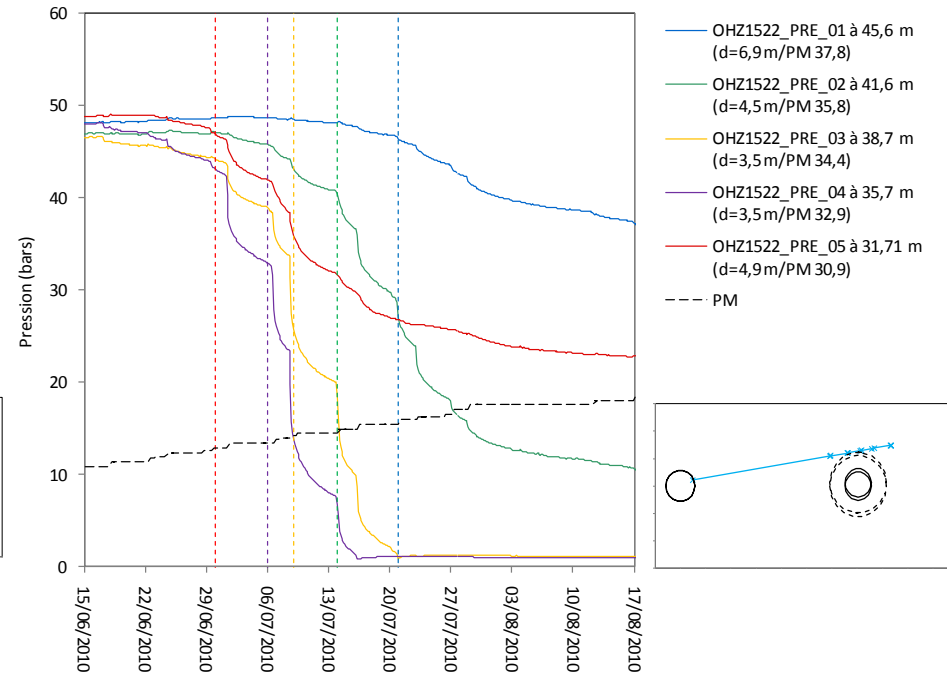
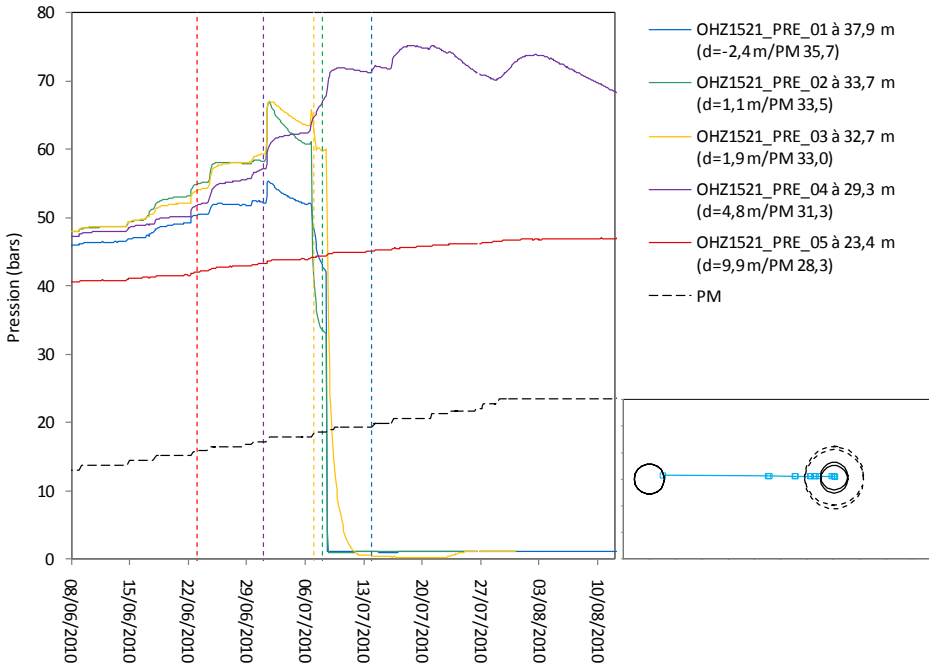
- ◆ A long terme le revêtement rigide empêche les déformations à la paroi
  - Compaction dans le premier mètre de la galerie GRD4 (fermeture des fractures aussi observée sur les essais à la plaque (expérimentation CDZ))
  - Extension dans le premier mètre de la galerie GCS



# Impact hydromécanique

## Horizontalement

## Verticalement

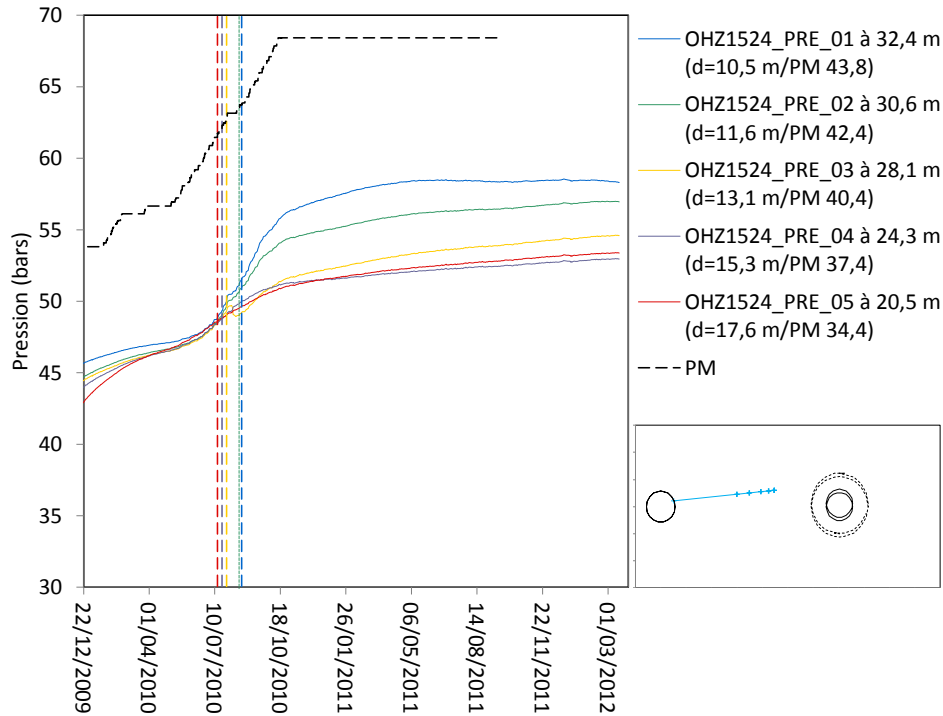


### ◆ Réponse hydraulique au passage du front (court terme)

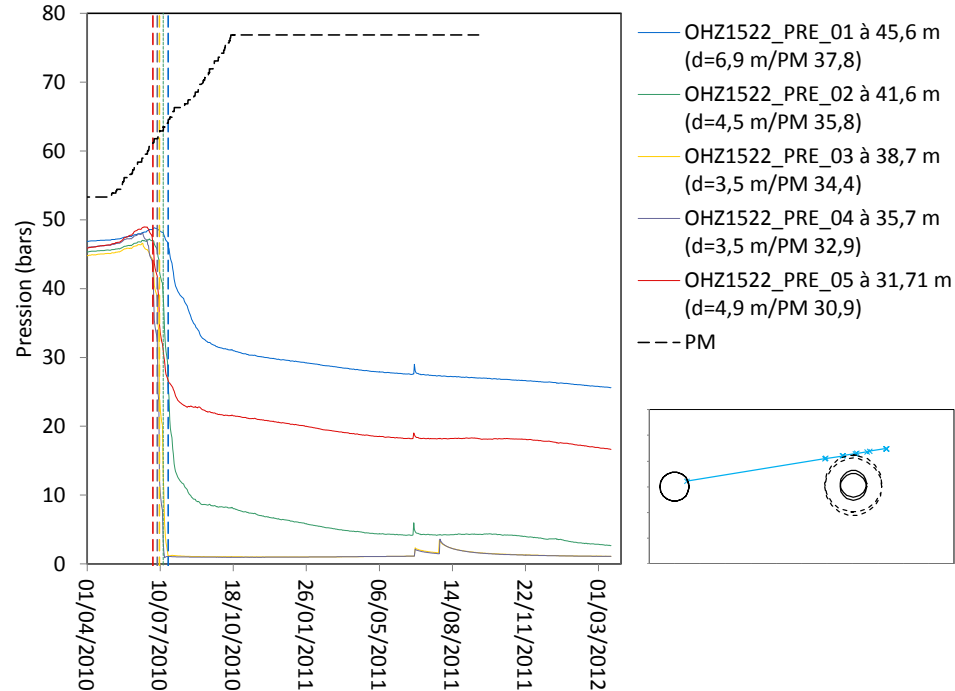
- Période de suivi : 60 jours
- Réponse du champ de pression anisotrope
- Evolution rapide du champ de pression au passage du front et influence des passes d'excavation:

Impact du déconfinement mécanique sur le comportement court terme

## Horizontalement



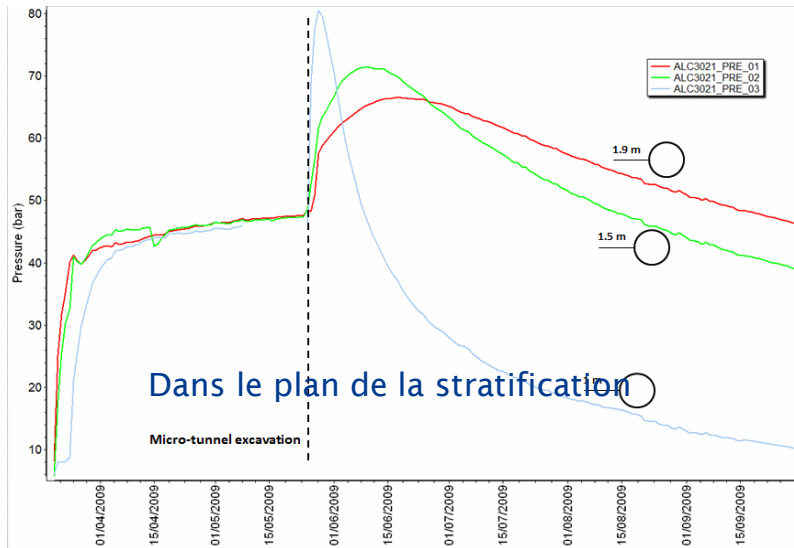
## Verticalement



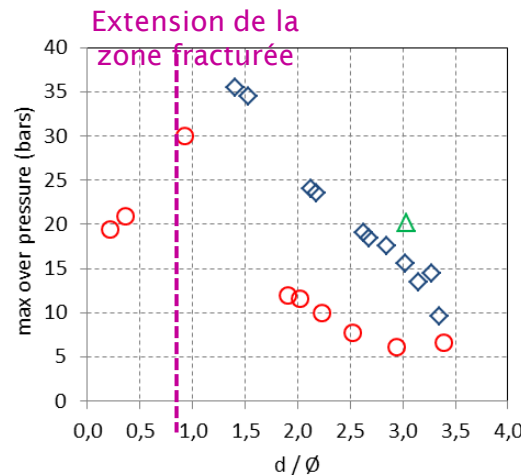
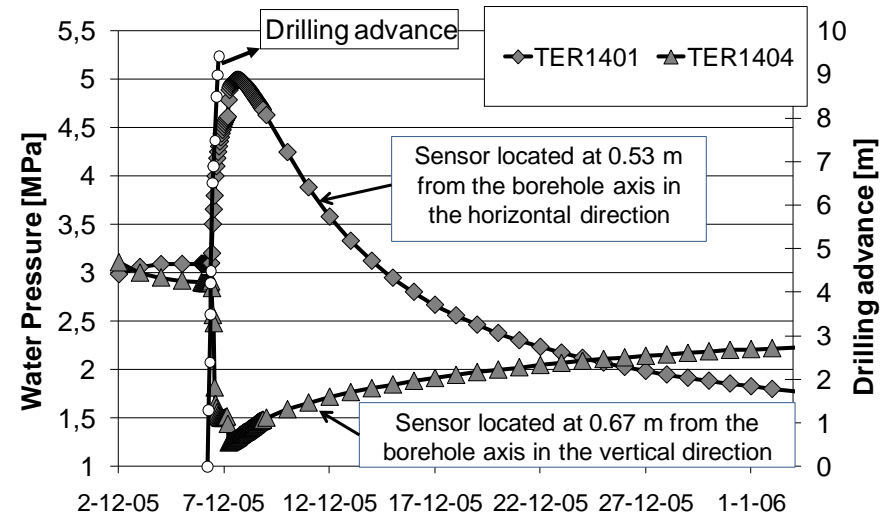
### ◆ Réponse hydraulique long terme

- 1 an après le creusement de la GCS, des surpressions persistent de 0,6 à 1 MPa dans le plan horizontal
- Verticalement, les pressions tendent à se stabiliser en fonction de leur distance à la paroi (et de leur position angulaire par rapport au plan horizontal)

## ◆ Micro tunnel de 0,7 m de diamètre



## ◆ Forage de de 0,15 m de diamètre



### Vitesse d'excavation (par heure)

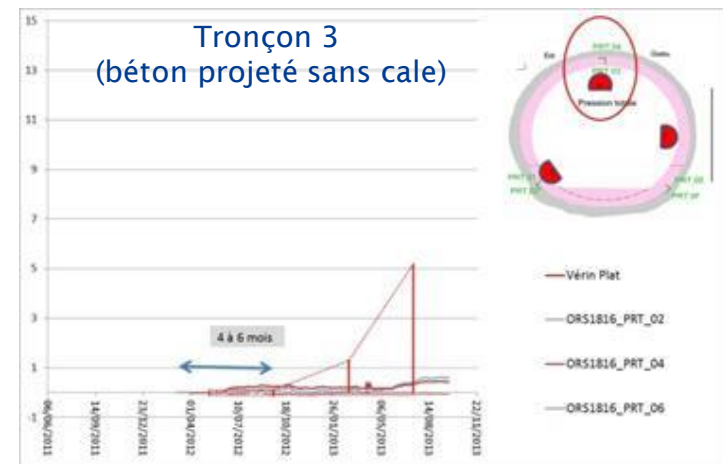
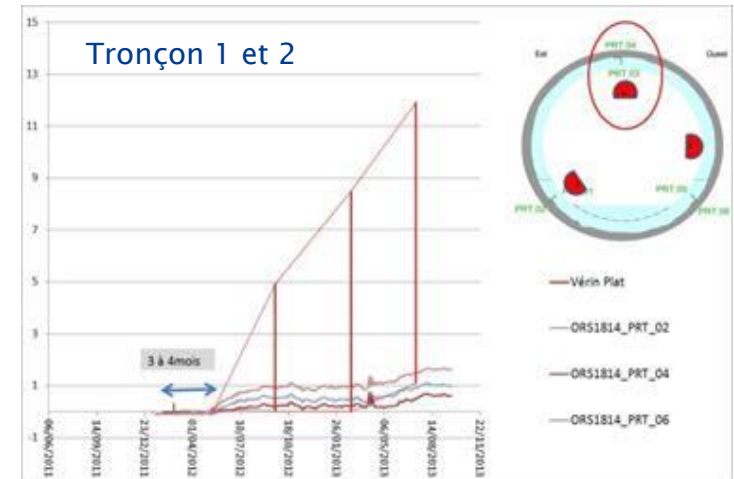
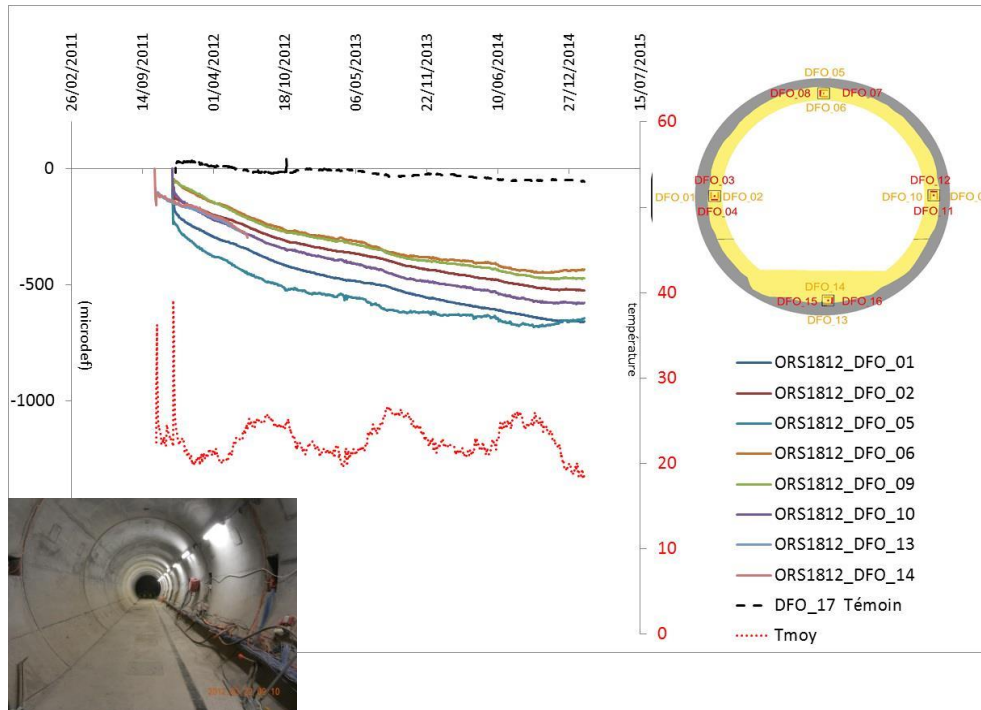
- ◇ microtunnel 1×R
- drift 0.006×R
- △ borehole 5×R



# Impact du comportement de roche sur le comportement des soutènements/revêtements

## ◆ Evolution des contraintes et déformations dans le revêtement

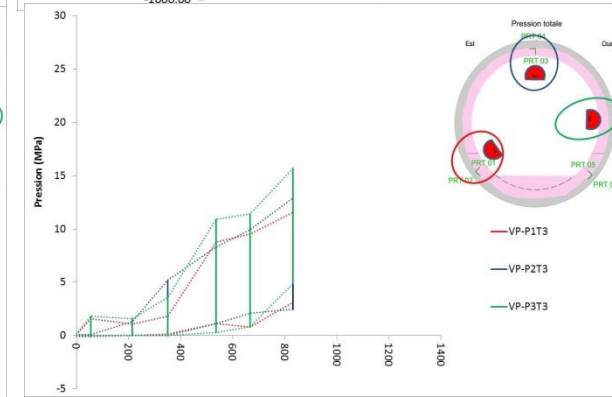
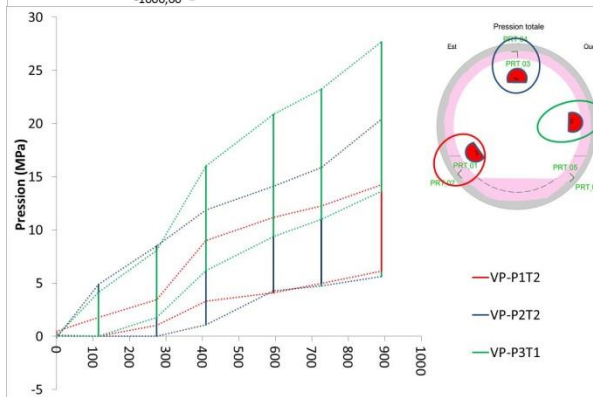
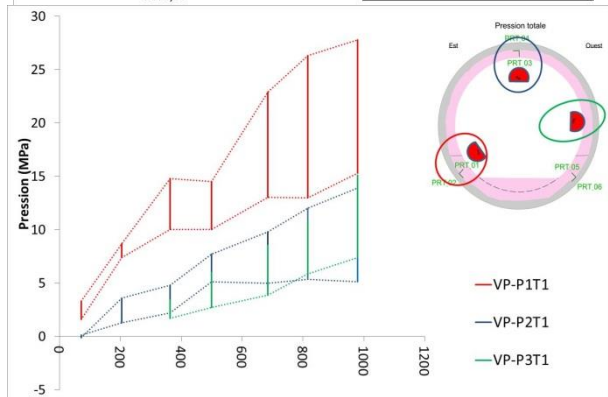
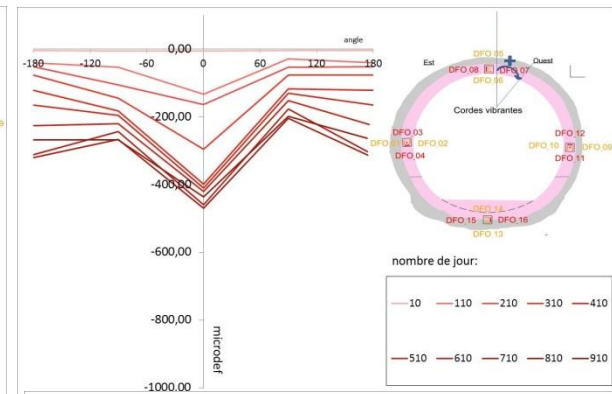
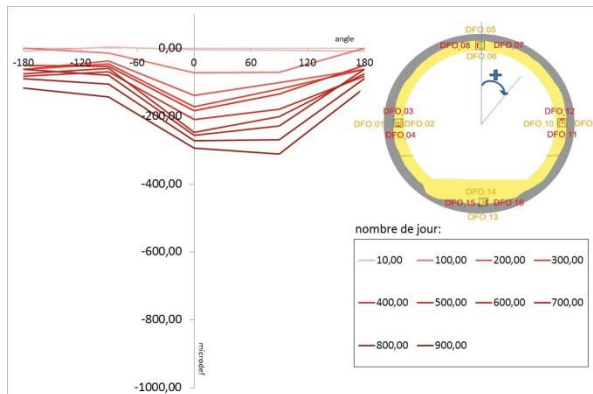
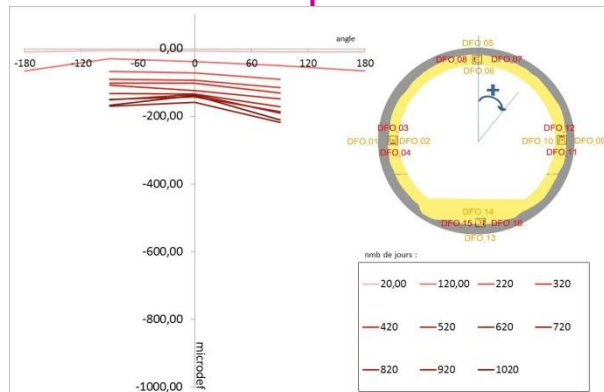
- Après mise en place , on observe des déformations du béton sans augmentation de contrainte => prise du béton





## Différences observées entre les trois tronçons:

- ◆ Chargement assez isotrope du revêtement
- ◆ Le soutènement sans cale joue un rôle (augmentation épaisseur) qui réduit les contraintes dans le revêtement, mais transmet un chargement un peu plus anisotrope



Tronçon 1  
C60

Avec cale compressible

Tronçon 2  
C30-37

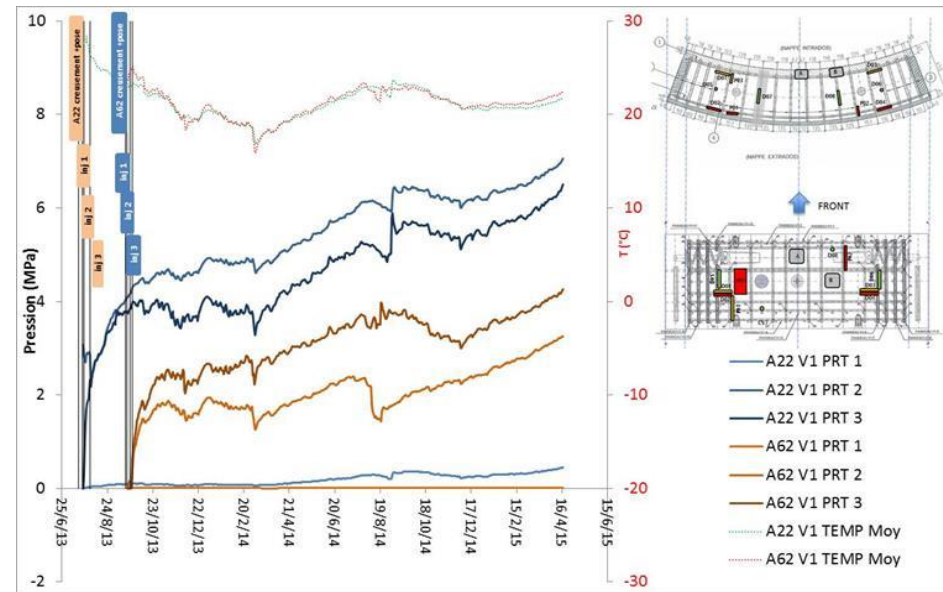
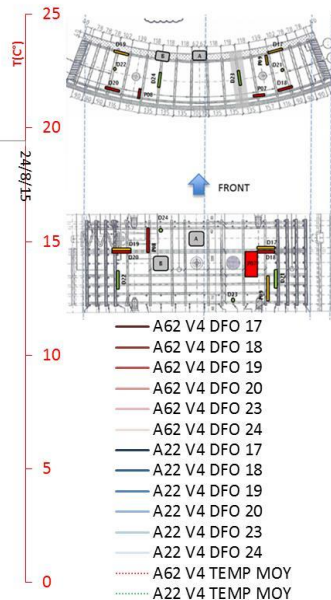
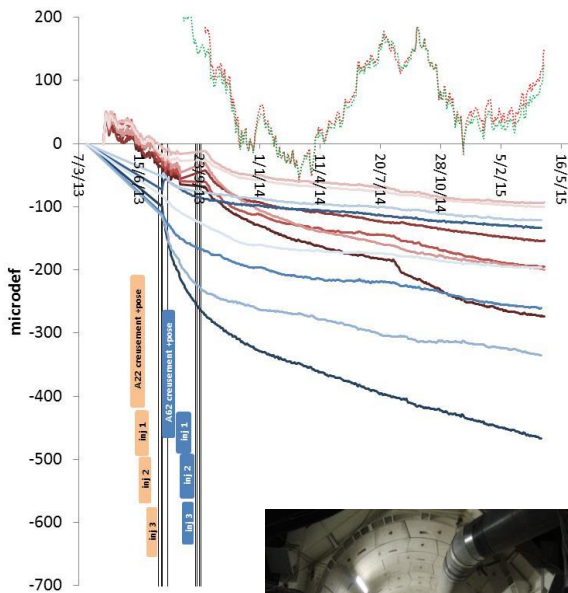
Avec cale compressible

Tronçon 3  
C60

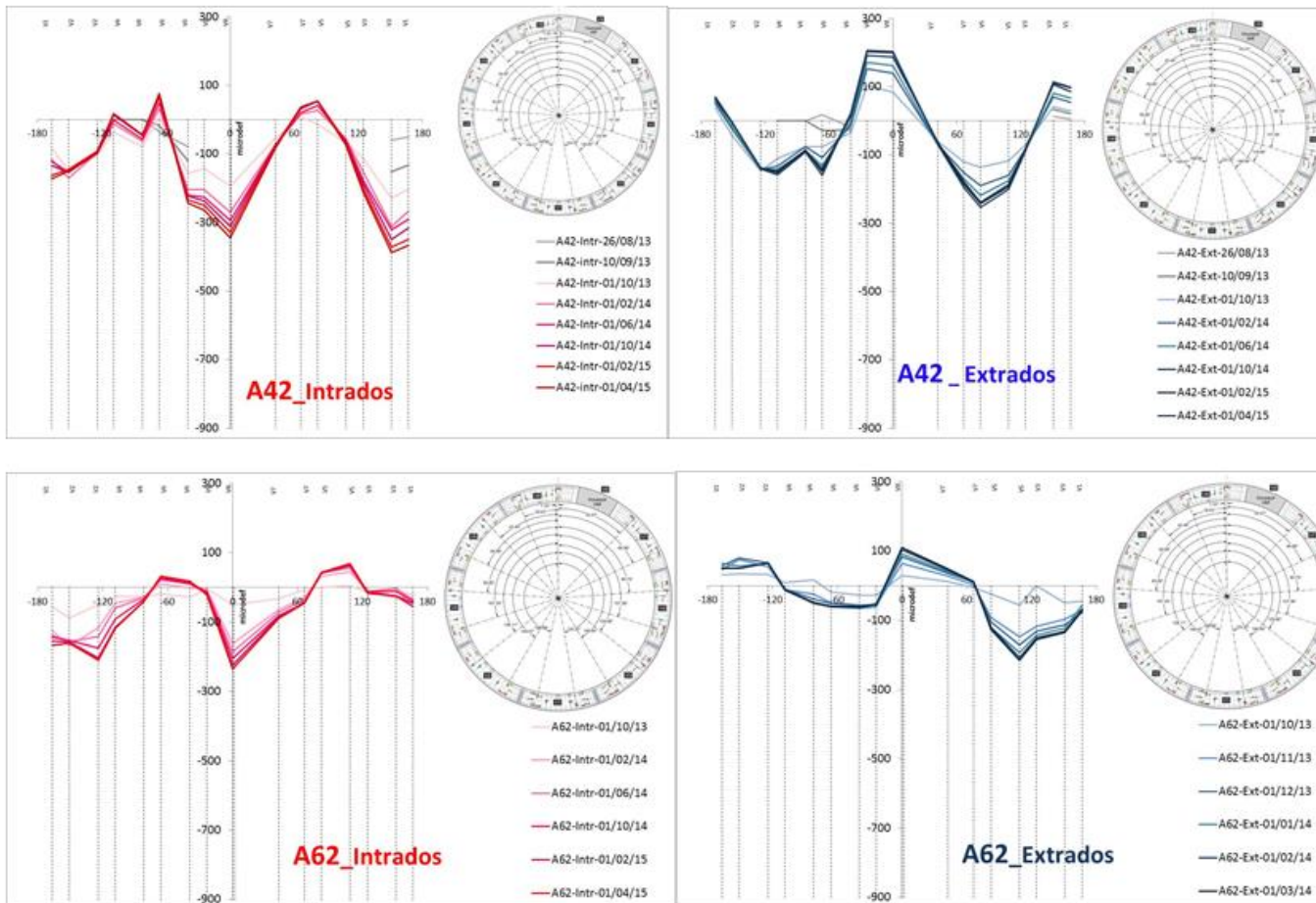
Sans cale compressible

## Evolution des contraintes et déformations dans les voussoirs

- ◆ Début de la mise en charge dès la mise en place dès l'injection des voussoirs
- ◆ Déformations/contraintes plus importantes dans la zone avec mortier classique



- ◆ Déformations corrigées dans l'anneau A42 (mortier classique) et A62 (mortier compressible)
  - Signature sinusoïdale => chargement anisotrope



## Comportement HM des ouvrages diffère suivant la minéralogie

- ◆ Plutôt élastique dans l'UCS
- ◆ Endommagement et comportement différé important dans l'UA

## Au niveau principal (UA) une fracturation induite importante est observée

- ◆ Elle se développe dès le front de taille. La géométrie dépend de l'orientation de la galerie par rapport au champ de contrainte.
- ◆ Les fractures en cisaillement représente 75 % des fractures induites
- ◆ Même typologie de fracturation quelque soit la méthode d'excavation Entre 0,1 m et 6 m de diamètre la forme et extension de la fracturation sont similaires
- ◆ Pour les ouvrages de grande taille (6 m) la mise en place tardive d'un soutènement induit une accentuation de la fracturation

## La zone fracturée joue un rôle majeur sur le comportement des ouvrages dans l'UA,

- ◆ Les convergences sont anisotropes et dépendent de l'orientation des ouvrages => chargement anisotrope des structures
- ◆ Les déformations différées sont principalement localisées dans la zone fracturée

## Comportement HM

- ◆ Fort couplage  $M \Rightarrow H$
- ◆ Champ de pression interstitielle « anisotrope » autour des ouvrages en lien avec la fracturation induite

## Comportement des soutènements / revêtements

- ◆ La rigidité du soutènement/revêtement impacte la convergence du terrain,
- ◆ Le type de soutènement/revêtements et sa distance de mise en œuvre par rapport au front a un impact important sur l'amplitude du chargement de la structure en béton, mais aussi sur l'anisotropie de ce chargement
- ◆ Quelques soit le type soutènement/revêtement, dès la mise en place la structure en béton se charge .On note un retard dans le « démarrage » du chargement du revêtement en béton coulé en place de la GCR lié au retrait lors de la prise de ce dernier .
- ◆ Les structures en béton continuent à se charger/déformer sur la période d'observation.



## Merci de votre attention

- G. Armand, F. Leveau, C. Nussbaum, R. de La Vaissiere, A. Noiret, D. Jaeggi, P. Landrein, C. Righini, 2014, Geometry and Properties of the Excavation-Induced Fractures at the Meuse/Haute-Marne URL Drifts, Rock mechanic and Rock engineering, Volume 47, Issue 1, pp 21-41
- G. Armand, A. Noiret, J. Zghondi, D.M. Seyedi, 2013, Short- and long-term behaviors of drifts in the Callovo-Oxfordian claystone at the Meuse/Haute-Marne Underground Research Laboratory, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 5, pp 221-230
- R. De La Vaissière, G. Armand, J. Talandier, 2015, Gas and water flow in an excavation-induced fracture network around an underground drift: A case study for a radioactive waste repository in clay rock, Journal of Hydrology 521, pp141-156
- L-M. Guayacán-Carrillo, J. Sulem,, D.M. Seyedi, Si. Ghabezloo, A. Noiret & G. Armand, 2016, Analysis of Long-Term Anisotropic Convergence in Drifts Excavated in Callovo-Oxfordian Claystone, Rock Mechanics and Rock Engineering, Volume 49, Issue 1, pp 97-114
- G. Armand, F. Plas, j-M Bosgiraud, 2015, L'apport du laboratoire souterrain de l'Andra pour le choix et la mise au point des techniques de creusement des ouvrages souterrains du projet de stockage de déchet radioactif Cigéo, Tunnels et ouvrages souterrain, n°250, p251-268