



# 10 ans de retour d'expérience de creusements d'ouvrages dans l'argilite du Callovo-Oxfordien au laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne

Gilles ARMAND

Colloque « Stockage Souterrain pour  
l'Énergie et l'Environnement »,  
Ecole des Ponts  
25/11/2014

## Contexte

## Objectifs des recherches en géomécanique et stratégie expérimentale

## Exemples sur la construction d'ouvrages souterrains (puits, galerie)

- ◆ À -445 m
- ◆ À -490 m (niveau cible du stockage)

## Conclusions et perspectives

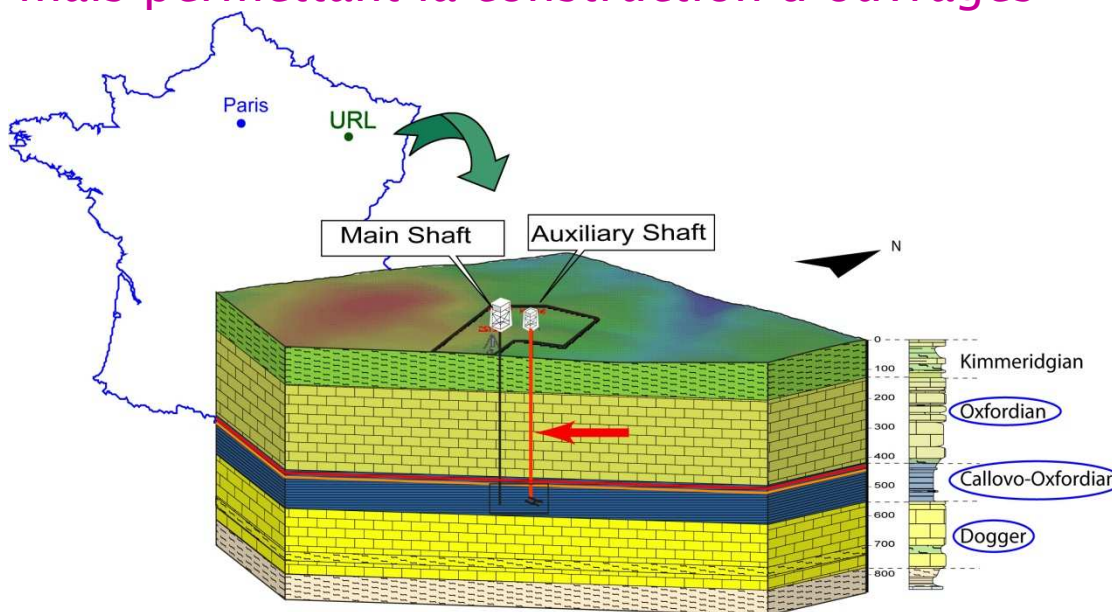


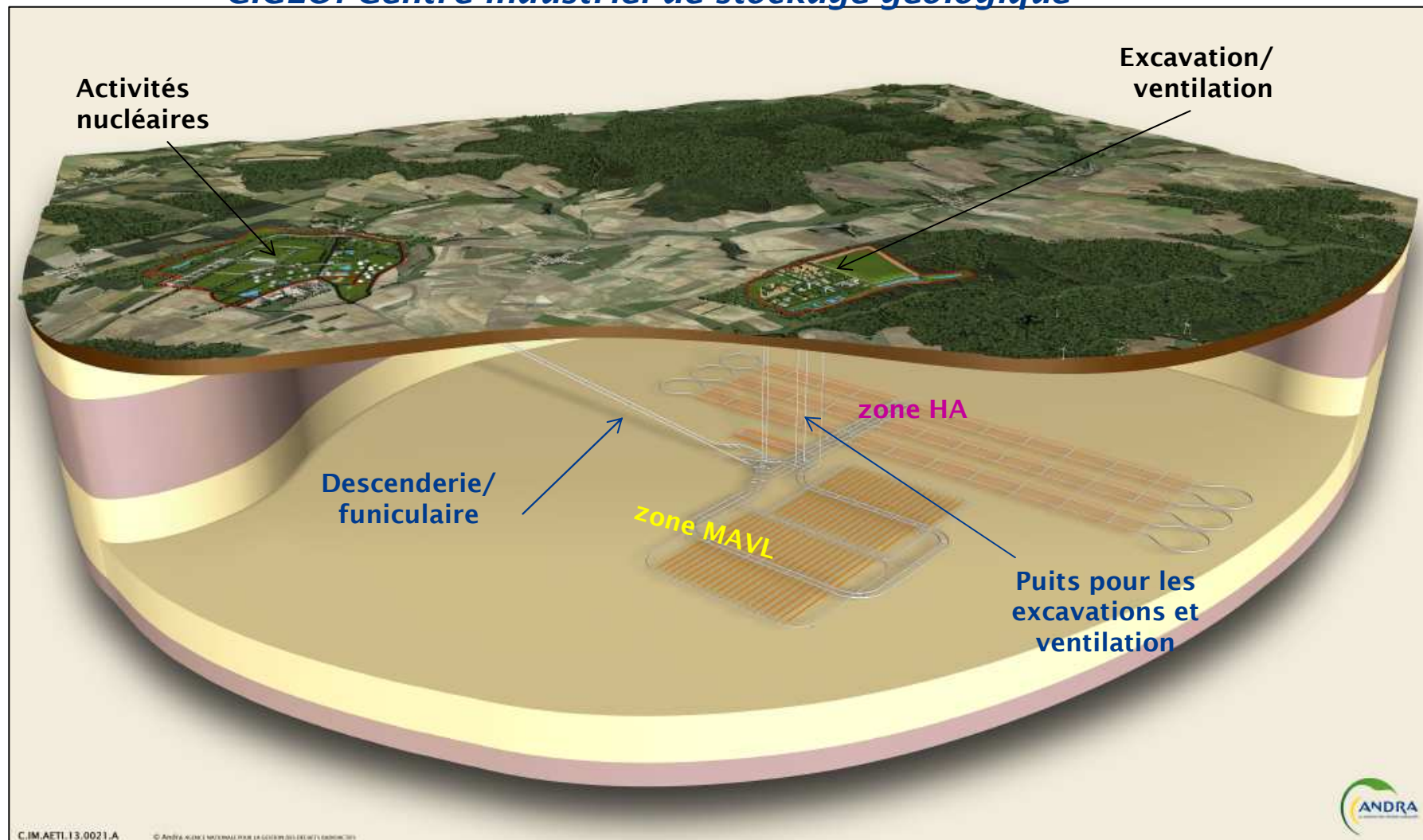
# Contexte

## Roche hôte compatible avec un stockage profond

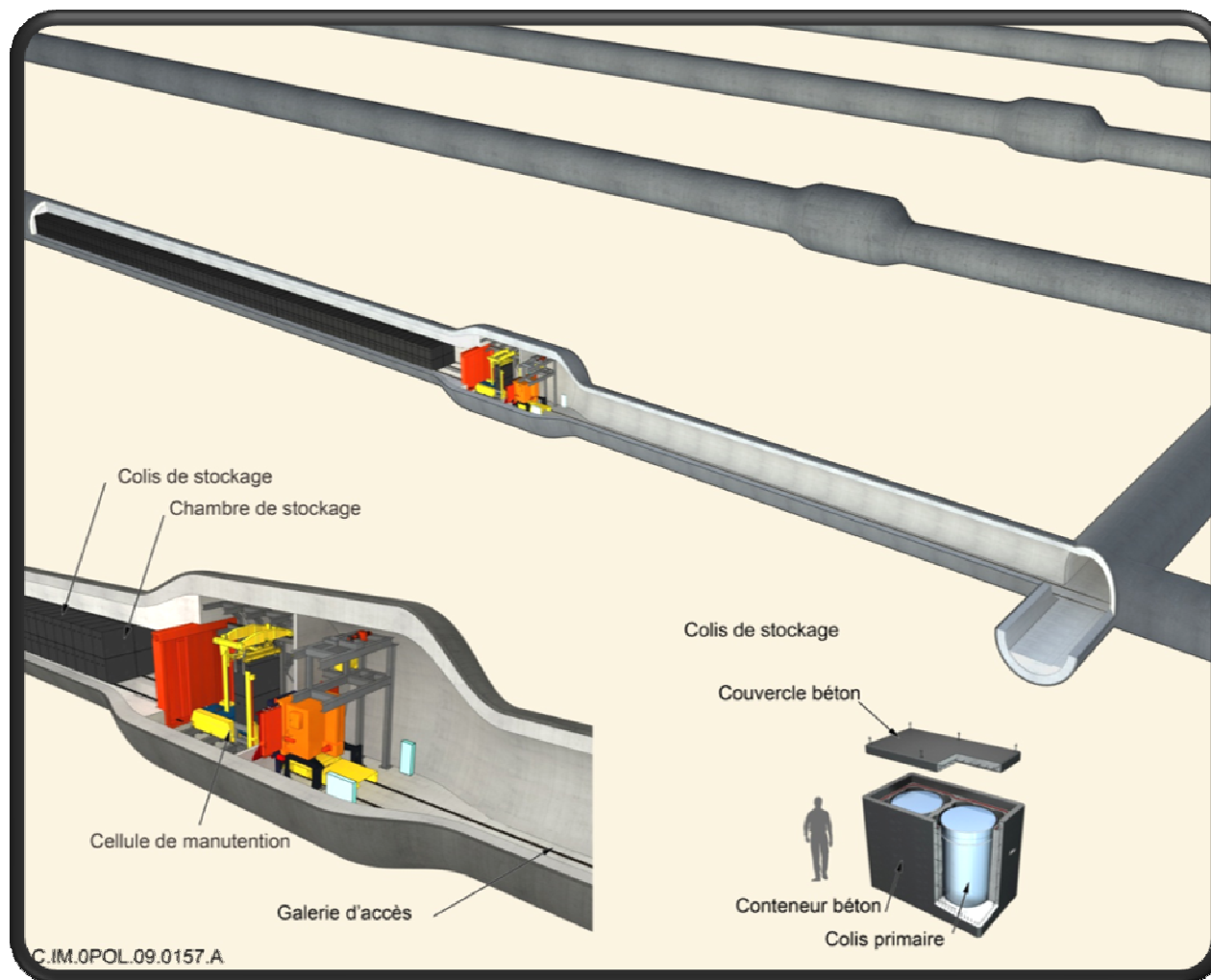
- ◆ Propriété de transport : faible diffusion des radionucléides
- ◆ Roche très peu perméable pour éviter les circulations d'eau
- ◆ Zone sans faille géologique
- ◆ Epaisseur de couche suffisante
- ◆ Profondeur suffisante mais permettant la construction d'ouvrages souterrains
- ◆ Zone non sismique

➔ Etudier l'argilite du Callovo-Oxfordien





Stockage géologique à 500 m de profondeur dans les argilites du Callovo-Oxfordien



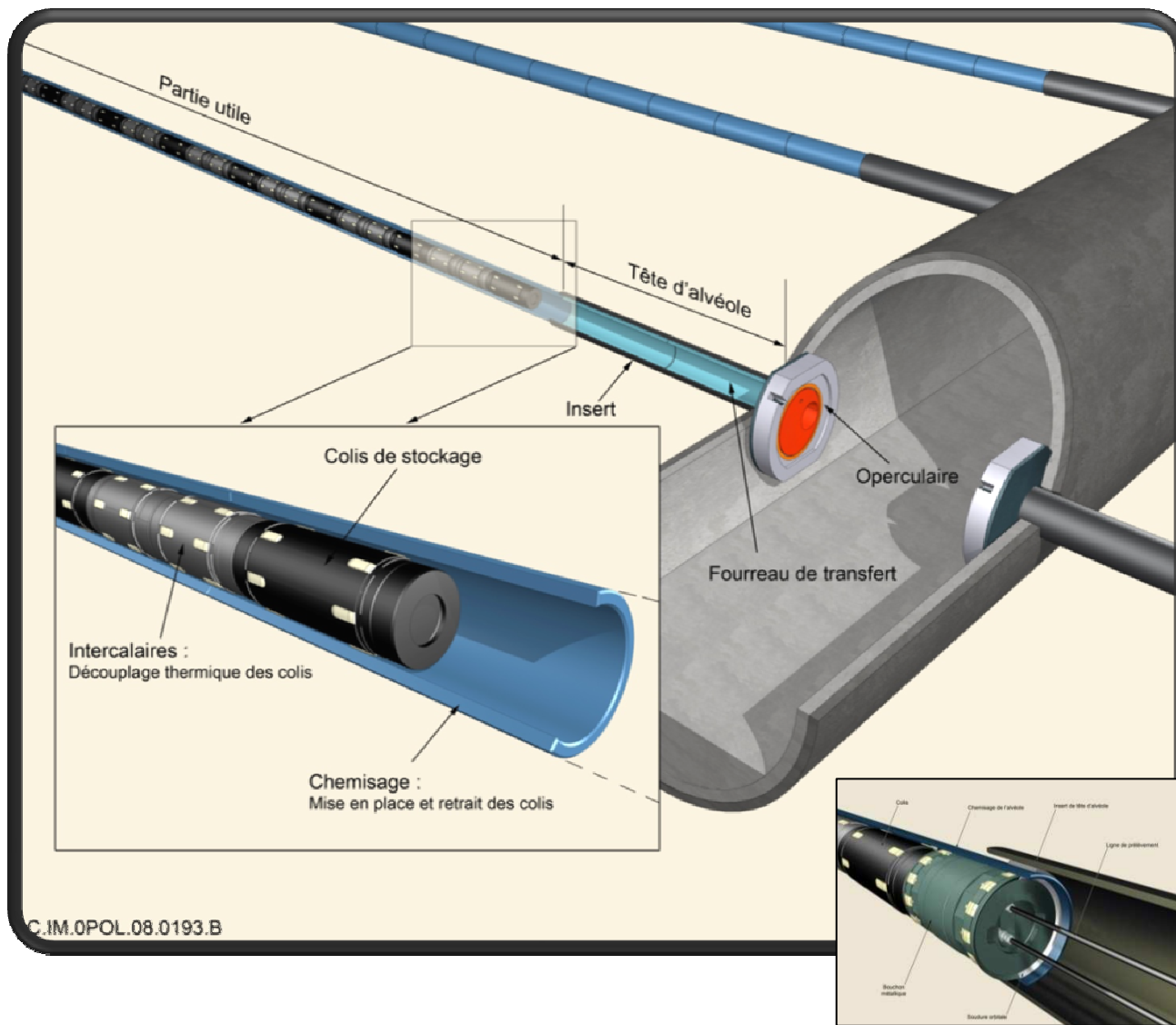
Longueur:  $\approx 400\text{m}$

Diamètre excavé: 9-11 m

2x2 ou 3x3 colis

Nb conteneurs  $\approx 800-1900$

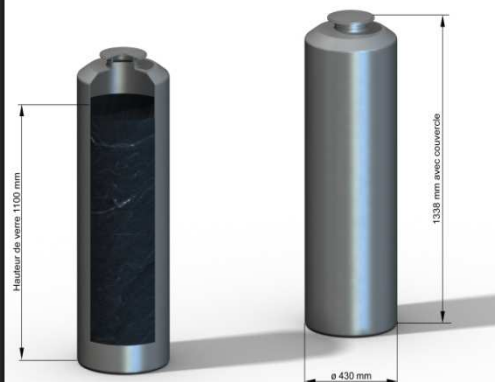
# Zoom sur l'alvéole HA



C.IM.OPOL.08.0193.B

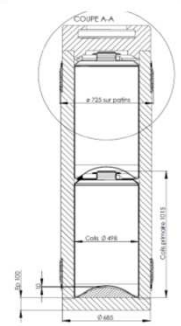
Longueur min: 40m  
(80 m en référence)  
Diamètre: 70cm  
Nb conteneurs: 7-20  
(pour 40 m)

COLIS DE DECHETS VITRIFIES CSD-V



ASTE.09.0210.A

Réalisée depuis la maquette 3D C.IM.ASTE.09.0210.A





# Objectifs des recherches en géomécanique



**Etudier le comportement hydromécanique des ouvrages souterrains (puits, galeries,...)**

- ◆ Pendant le creusement => comportement à court terme
- ◆ Au cours du temps => comportement différé

**Caractériser la zone endommagée par le creusement (EDZ) et son évolution au cours du temps**

**Etudier le couplage Thermo -Hydro-Mécanique**

**Etudier la problématique de scellement et des gaz**



**Construire des ouvrages souterrains et réaliser des expérimentations in situ au laboratoire souterrain de Meuse Haute Marne**

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

Caractérisation de l'EDZ (fracturation,  
propriétés de transport) et de son  
évolution au cours du temps

Comportement Hydromécanique des  
ouvrages souterrains et des argilites  
du COX

Données d'entrée pour les calculs de  
sûreté

Dimensionnement et optimisation des  
méthodes de construction pour le  
stockage CIGEO

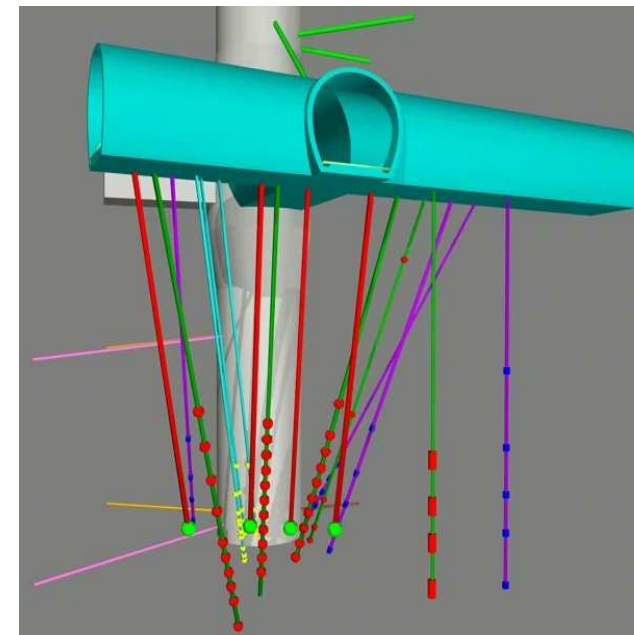
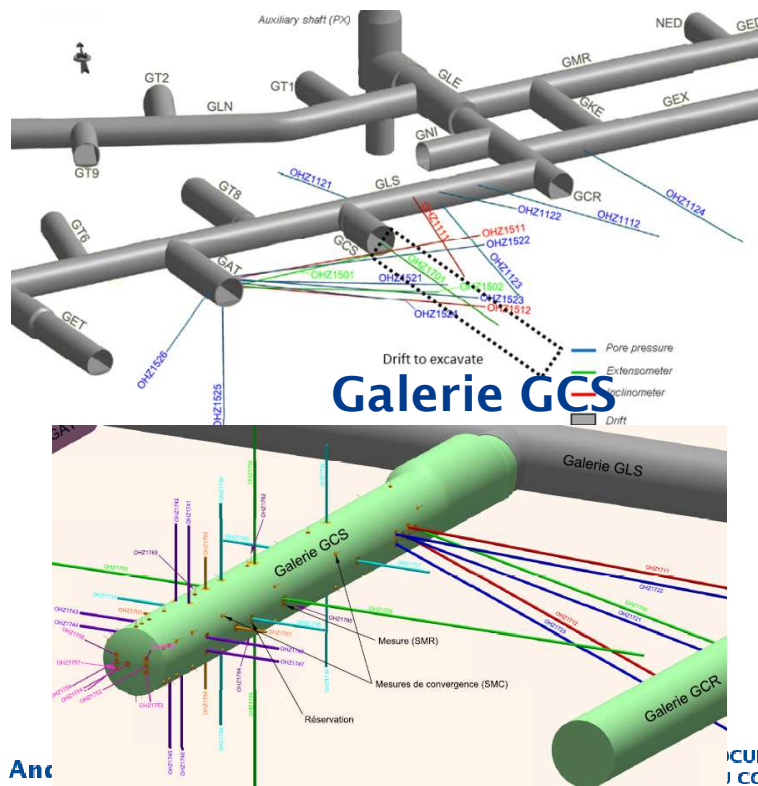
**Nécessité d'acquérir et de compléter les données non seulement sur le comportement intrinsèque des argilites du COX, mais aussi sur le comportement des ouvrages proprement dit, en particulier sur l'interaction roche/soutènement**

**➔ Développement séquentiel du réseau de galeries spécifiques permettant d'étudier les phénoménologies et l'impact des choix technologiques de construction:**

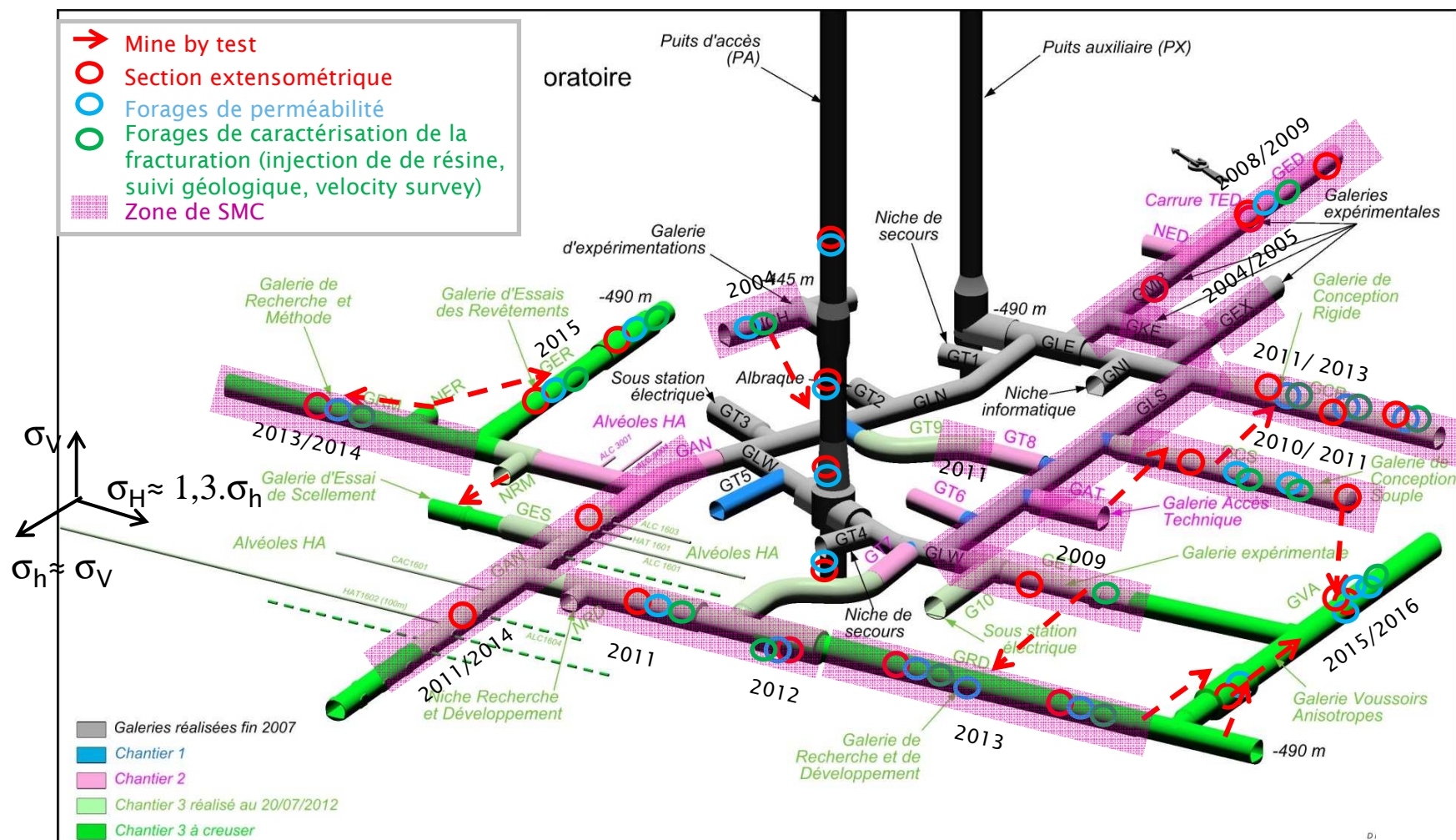
- ◆ Impact des différentes méthodes de creusement/soutènement par comparaison du comportement de différentes galeries parallèles
- ◆ Impact de l'orientation des ouvrages par rapport à l'état de contrainte
- ◆ Impact de la minéralogie sur le comportement des ouvrages (=> profondeur)
- ◆ Impact de la désaturation/resaturation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

## ◆ 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, ...)



## Localisation et phasage des expérimentations



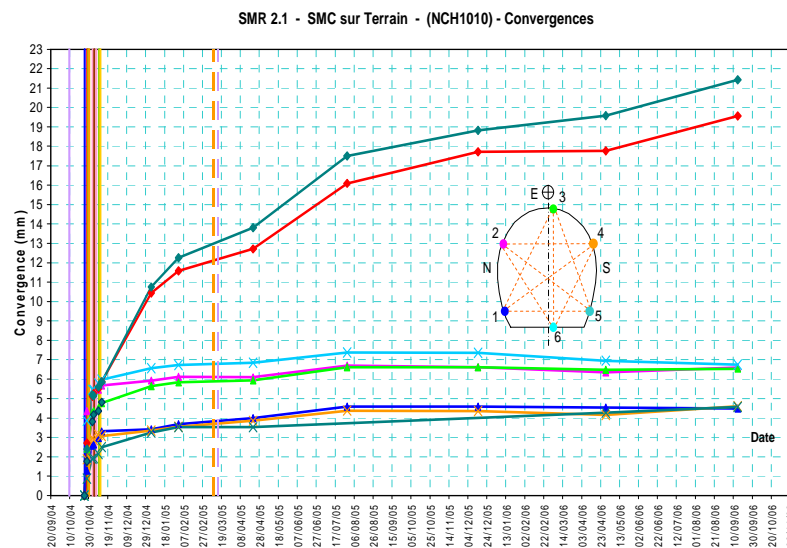
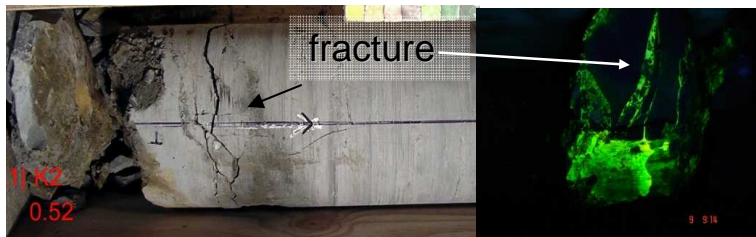


## Observations dans la niche (-445 m) et lors du creusement des puits d'accès

## Excavation à l'explosif (passe de 3 m), soutènement cintre coulissant



Fracture à 0,2 m du mur au radier de la galerie

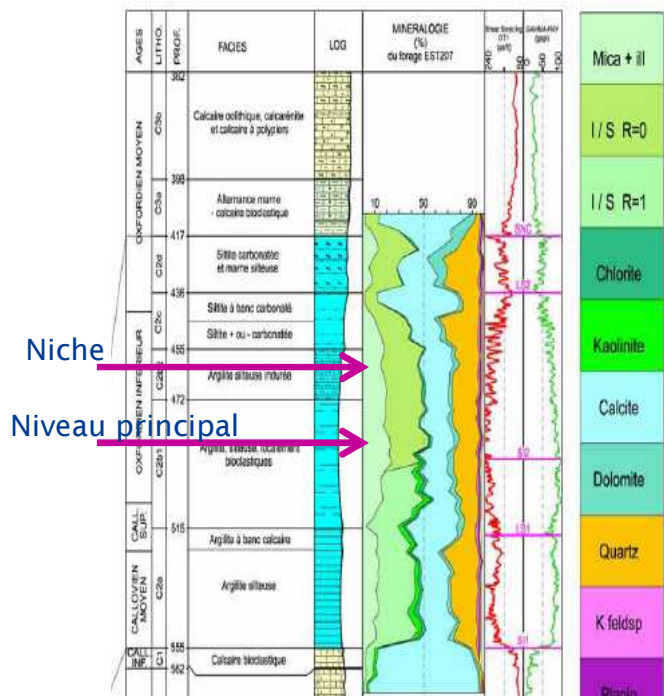


### Au creusement:

- Convergence horizontale: 4 à 7 mm
- Convergence verticale est supérieure (à cause du soulèvement du radier)
- Faible endommagement (quelques fissures en particulier au radier)

### A plus long terme:

- Effort faible sur les cintres
- Convergence verticale qui évolue (soufflage du radier) et convergence horizontale quasiment nulle

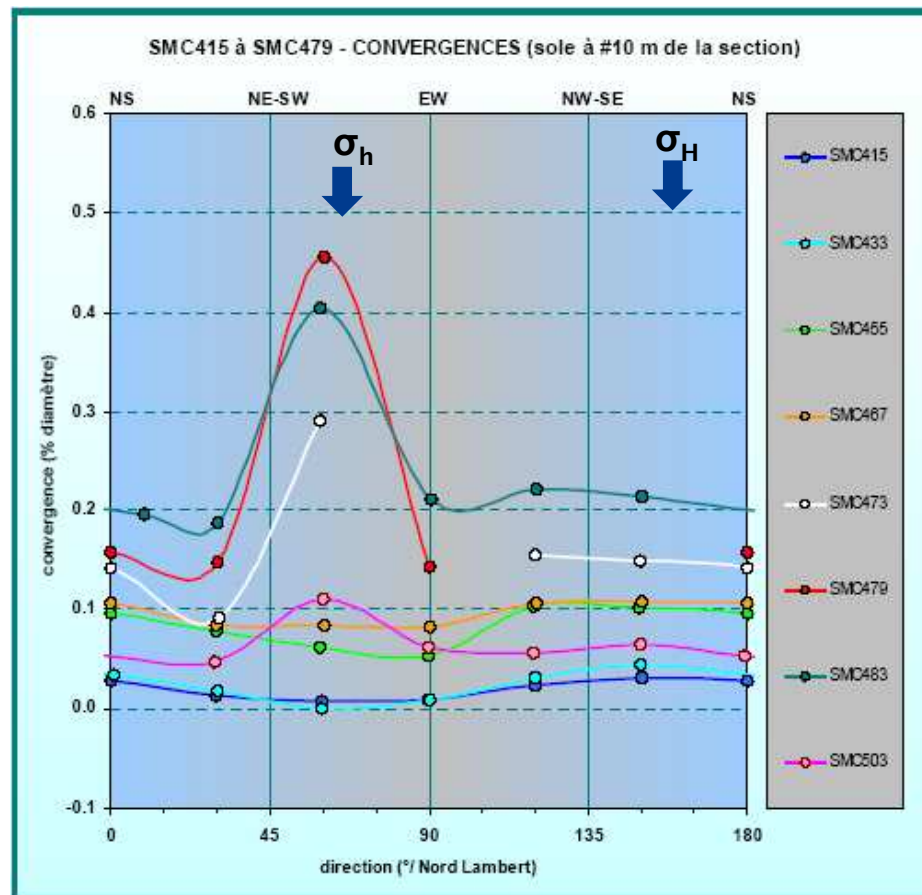


## Entre -433 et -467 m:

- ◆ Comportement quasi élastique

## En dessous de -473 m:

- ◆ Concentration de contrainte suivant  $\sigma_h$  (N65°E)
- ◆ déformations plastiques
- ◆ Suivant  $\sigma_H$  la convergence varie de 4 mm à -433,3 m (0,05 % diameter) à 18 mm à -483,7 m (0,23 %)





## Observation au niveau principal (-490 m)



- ◆ 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





26/05/2010 12:03



2011-11-18 05:34



2012-03-27 16:10



GCS drift

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



GCR drift

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



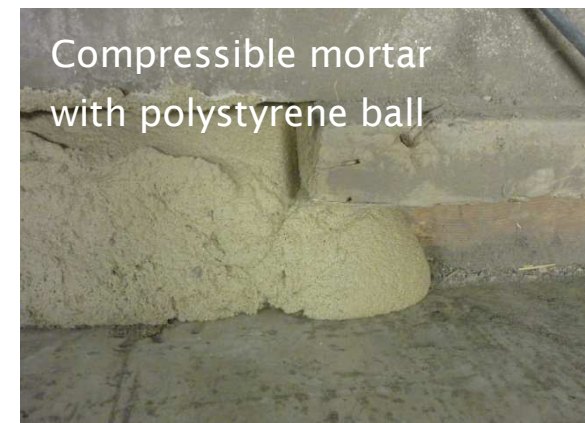
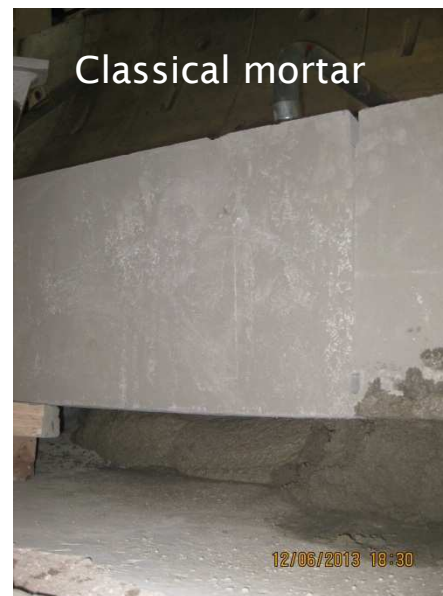
BPE drift

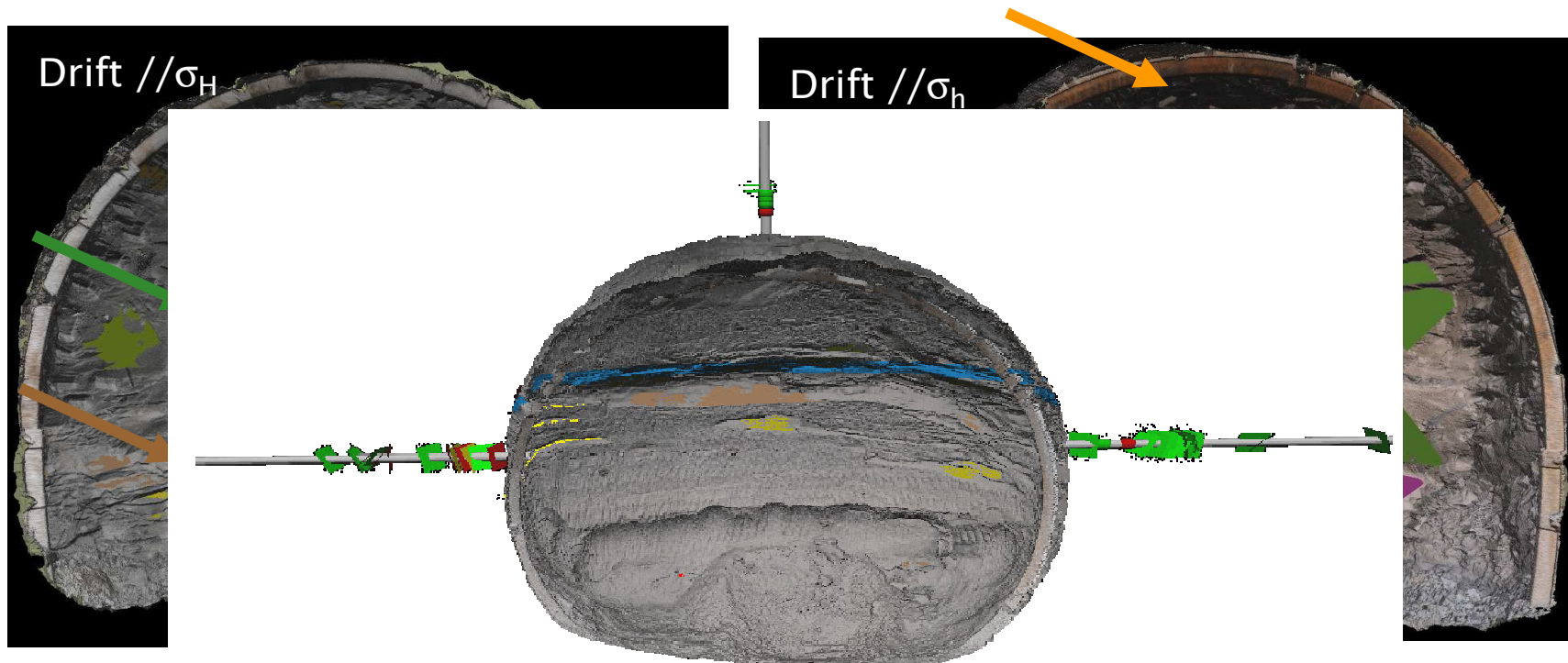
Boulons radiaux(3 m long),  
45 cm béton projeté fibré mis en 4 couches consécutives

2012-04-05 09:07

### ◆ Mise en place de voussoirs préfabriqués

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





Fracture sup

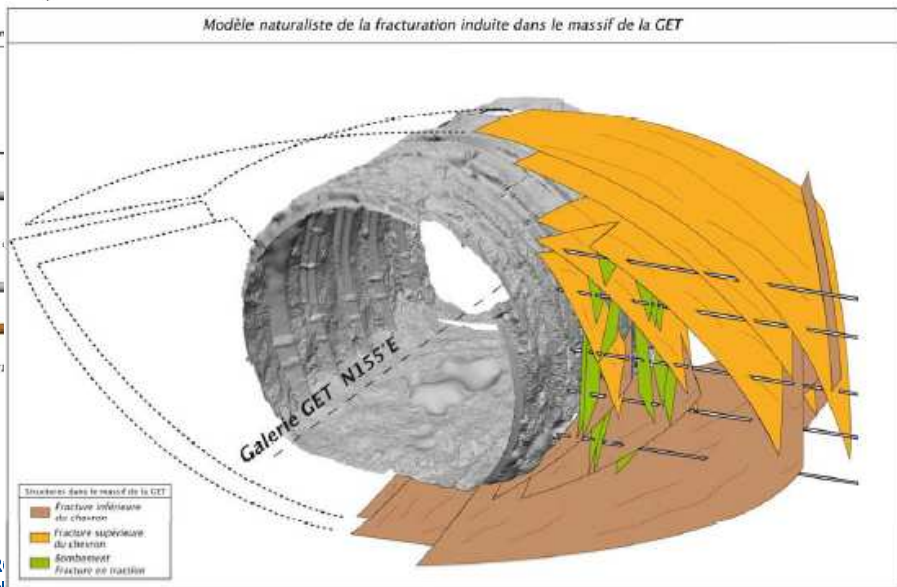
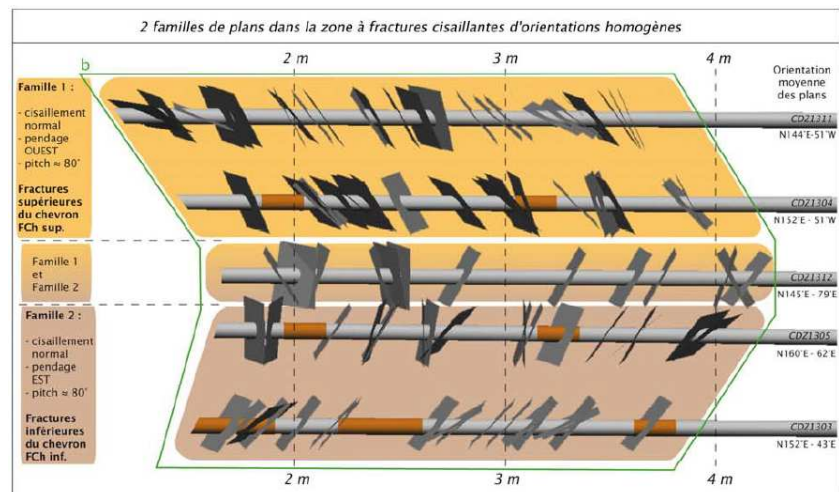
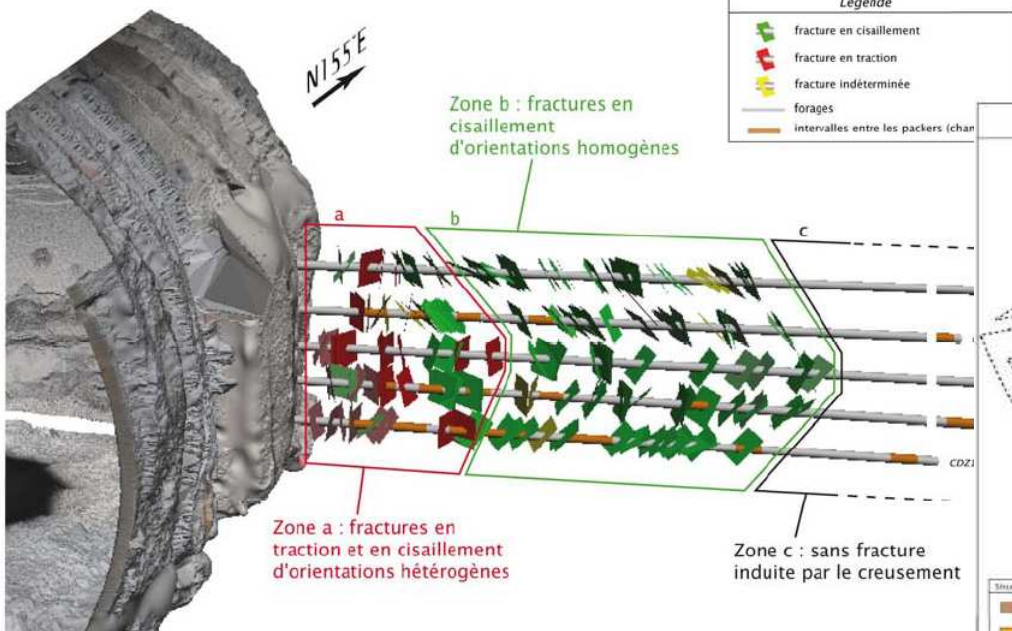
Fracture infé

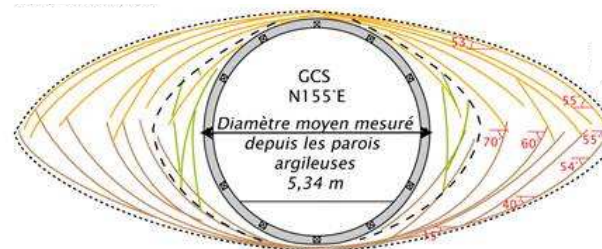
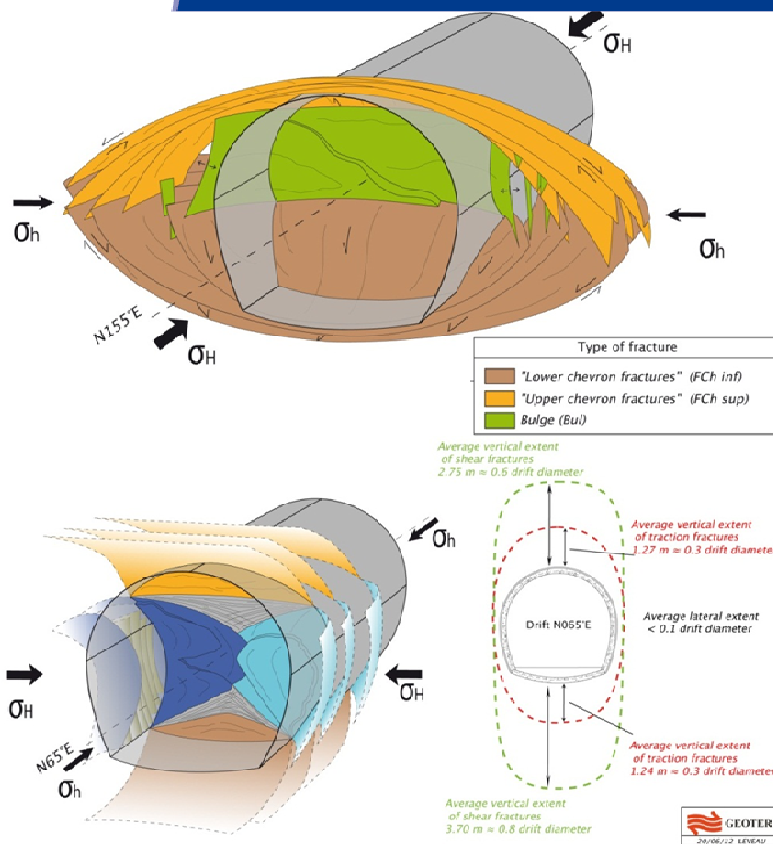
Fractures du bombement - extension

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

## Structural analysis in an area with numbers of borehole exhibits :

- ◆ Complex pattern
- ◆ Extent of shear fracture is larger than tensile fracture
- ◆ Deep in the rock the shear fracture are visible on different borehole





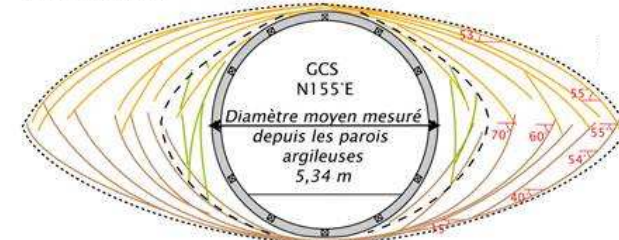
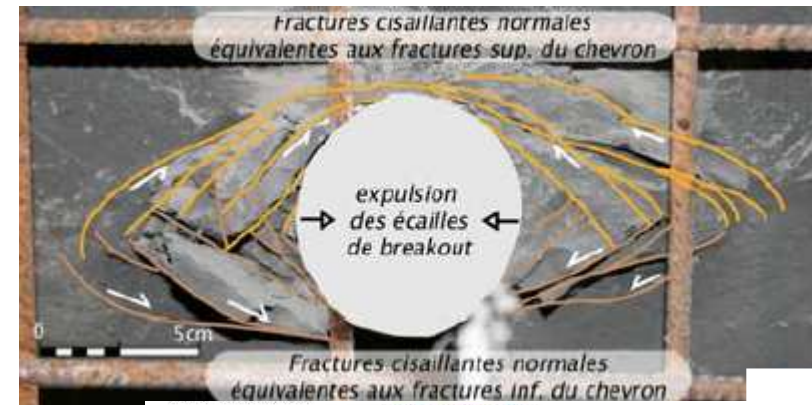
Drift Orientation		Extensional fractures extent			Shear fractures extent		
		Min.	Average	Max.	Min.	Average	Max.
N65 // $\sigma_h$	Ceiling	0.2xD	0.3xD	0.4xD	0.5xD	0.6xD	0.8xD
	Wall	0.1xD	0.1xD	0.2xD	-	-	-
	Floor	0.2xD	0.4xD	0.5xD	0.8xD	0.8xD	1.1xD
N155 // $\sigma_H$	Ceiling	-	0.1xD	0.15xD	-	-	-
	Wall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

- ◆ Différentes méthodes d'excavation (MAP, BRH) ont pas d'influence sur l'organisation du réseau de fracture et peu sur l'extension
- ◆ Différentes méthodes de soutènement testées (boulon/béton projeté/cintre, béton avec calle compressible, voussoir préfabriqué,...)

## ◆ Typologie de fracturation identique et d'extension similaire



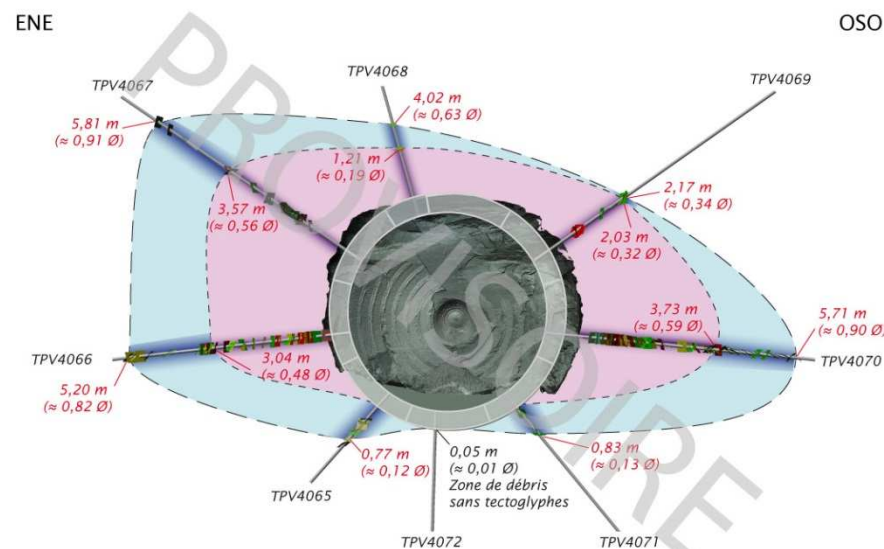
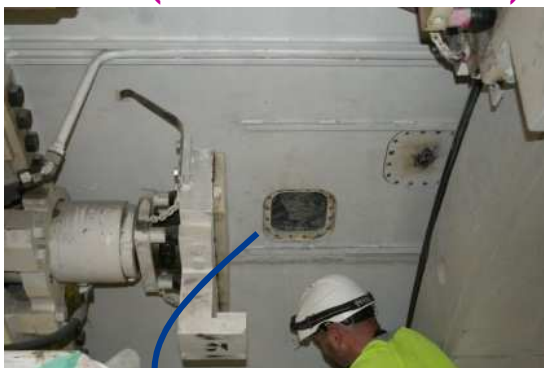
### Boulon





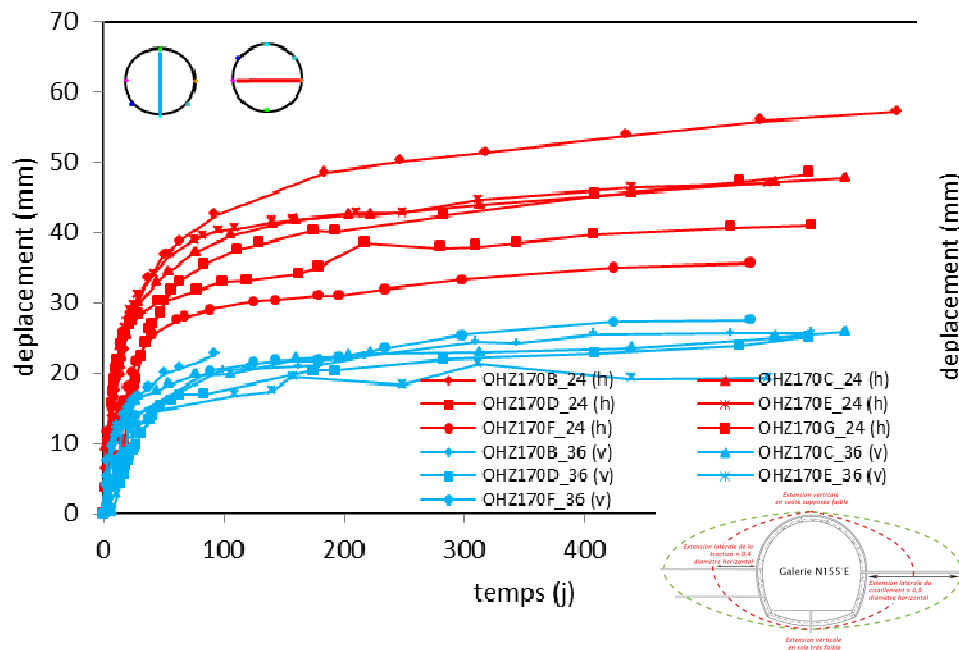
## Pour la galerie GRD4 creusée au tunnelier

- ◆ 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)

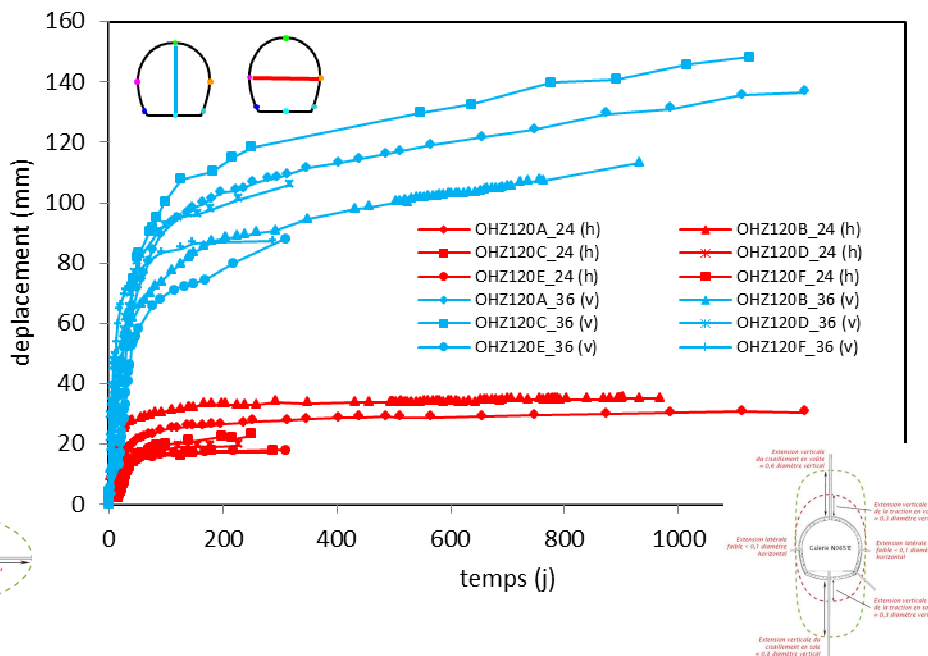


Forages réalisés 4 mois après la fin d'excavation de la galerie

## Galerie parallèle à la contrainte majeure

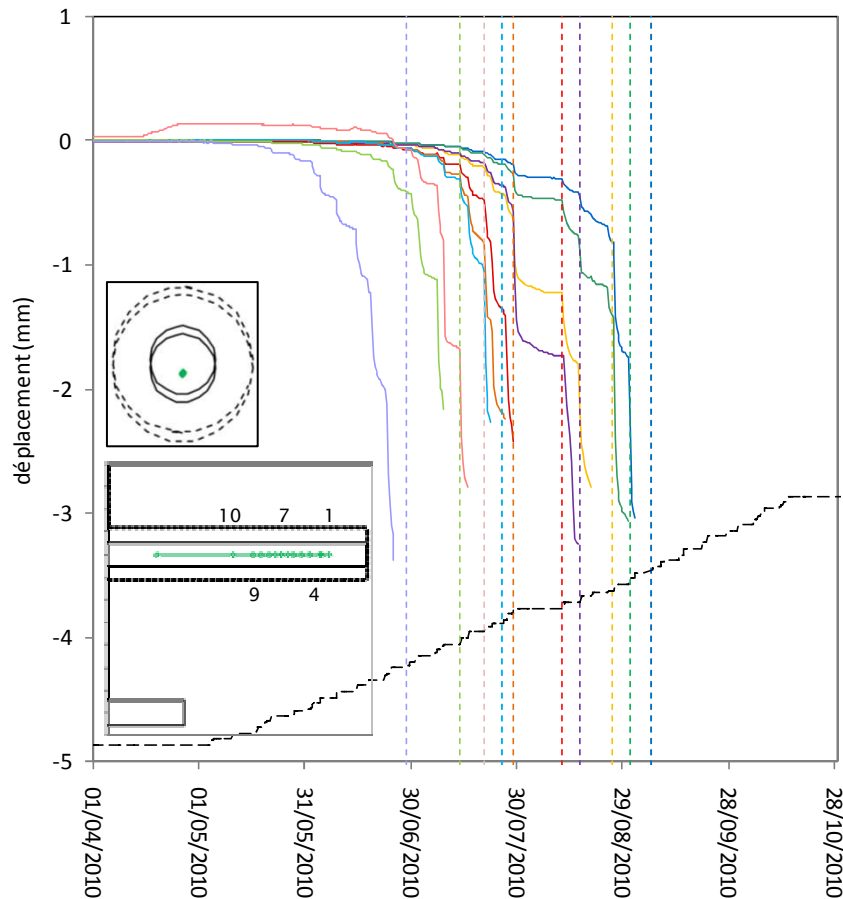


## Galerie parallèle à la contrainte mineure

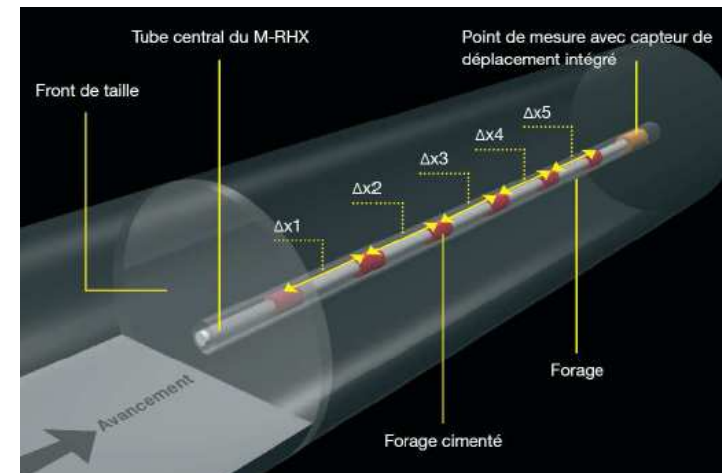


- ◆ L'amplitude des convergences dépend de l'orientation des galeries et de la zone fracturée
  - En GCS suivant  $\sigma_H$ ,  $C_v/C_h$  de l'ordre de 0,5
  - En GED suivant  $\sigma_h$ ,  $C_v/C_h$  de l'ordre de 4,4
- ◆ Convergence importante durant les 3 premiers mois de suivi, puis le taux de déformation décroît en fonction du temps

## Extensomètre inversé MRH-X installé dans l'axe de la GCS et détruit à l'avancement

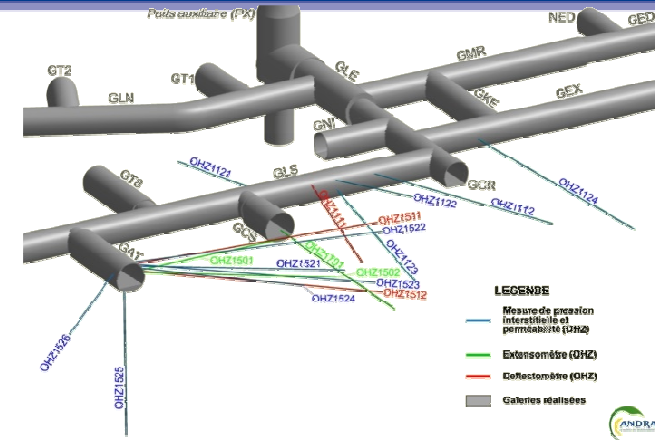
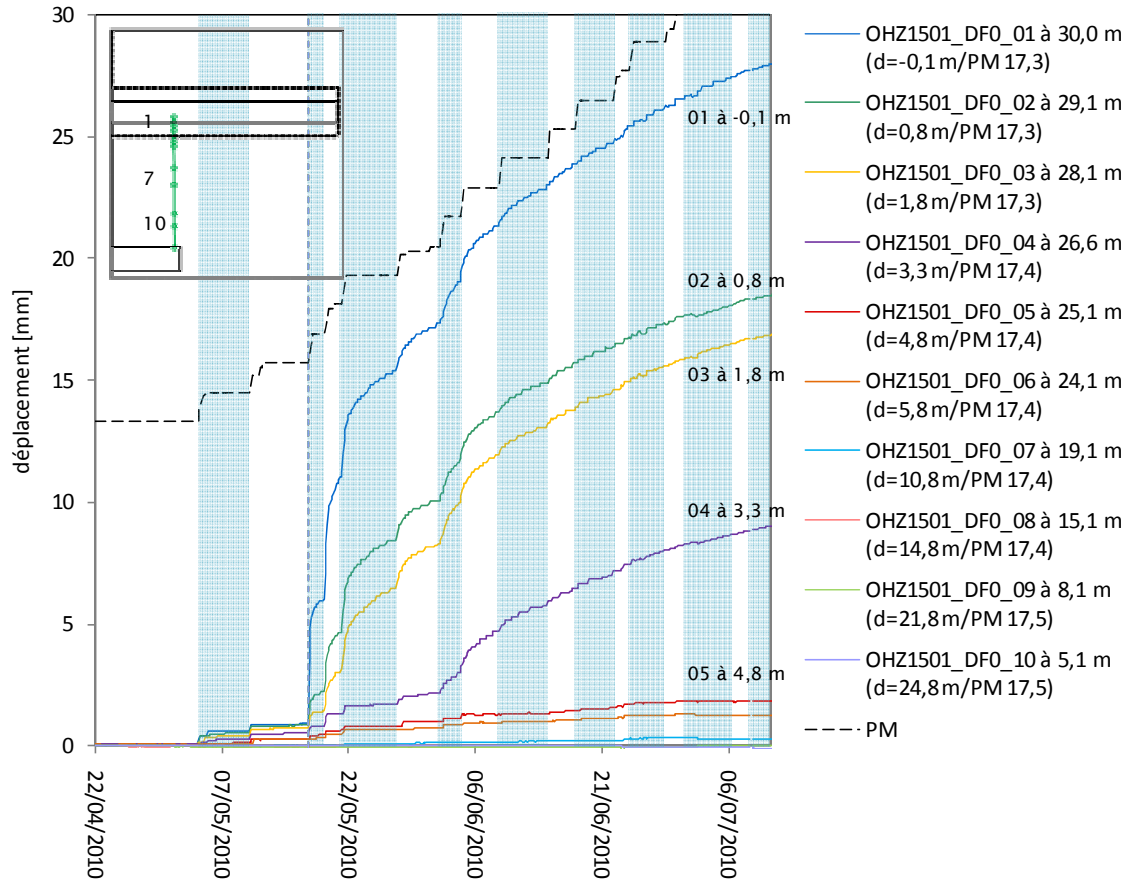


- OHZ1701\_DFO\_01  
PM 49,6
- OHZ1701\_DFO\_02  
PM 47,5
- OHZ1701\_DFO\_03  
PM 45,5
- OHZ1701\_DFO\_04  
PM 44,1
- OHZ1701\_DFO\_05  
PM 42,5
- OHZ1701\_DFO\_06  
PM 41,0
- OHZ1701\_DFO\_07  
PM 39,5
- OHZ1701\_DFO\_08  
PM 37,5
- OHZ1701\_DFO\_09  
PM 35,5
- OHZ1701\_DFO\_10  
PM 30,6
- PM

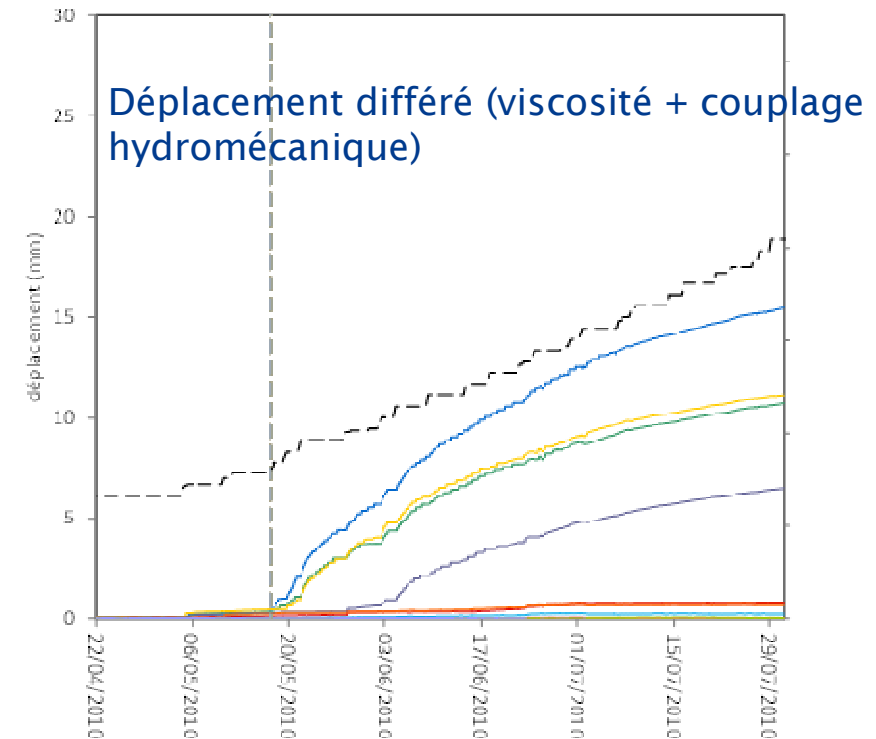
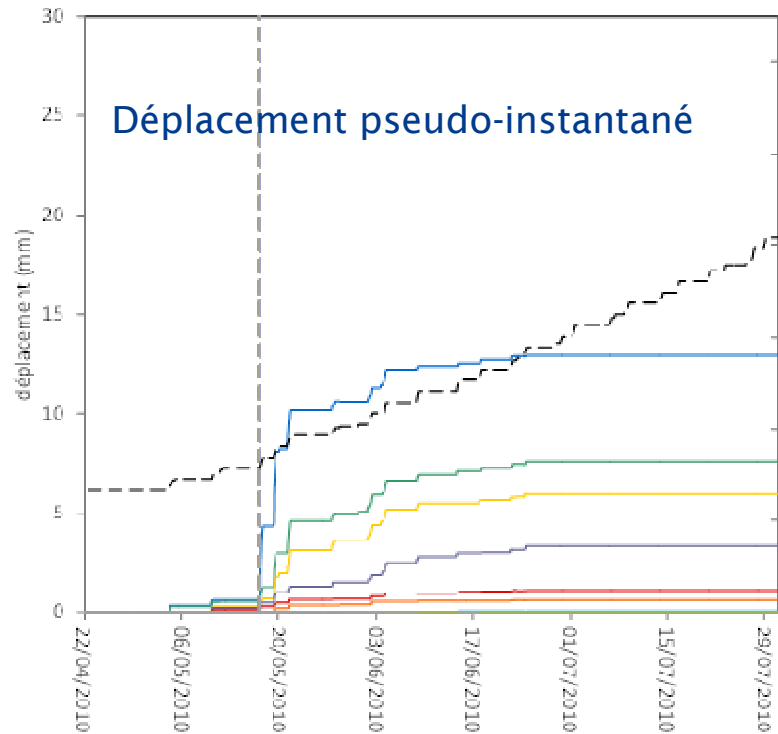


- Le début de réponse estimé à environ 10 m en avant du front.
- A 1,5 m du front, l'extrusion est de 2,74 mm en moyenne.
- Au-delà perte des mesures du fait de la destruction de l'extensomètre.

## Extensomètre subhorizontal perpendiculaire à la GCS corrigé des convergences de la galerie GAT



- Déformations apparaissent à 2,4 m en avant du front
- Influence des reprises d'excavation jusqu'à 8,4 m en arrière du front
- A partir de cette distance, la réponse différée devient prépondérante sur la réponse élastoplastique

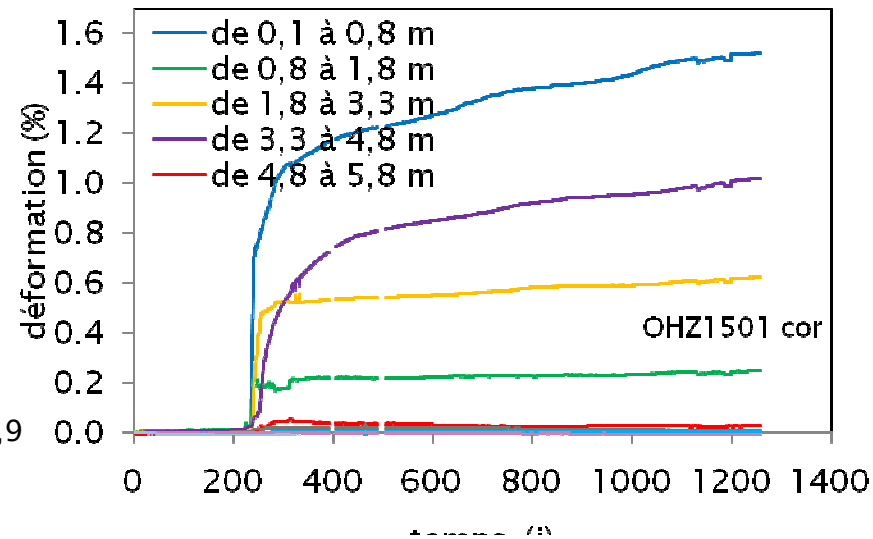
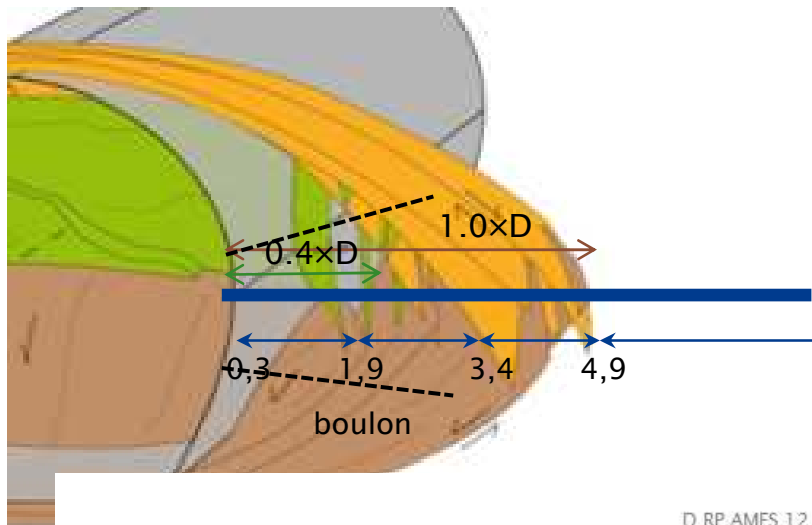


## ◆ Déformation différée autour des ouvrages

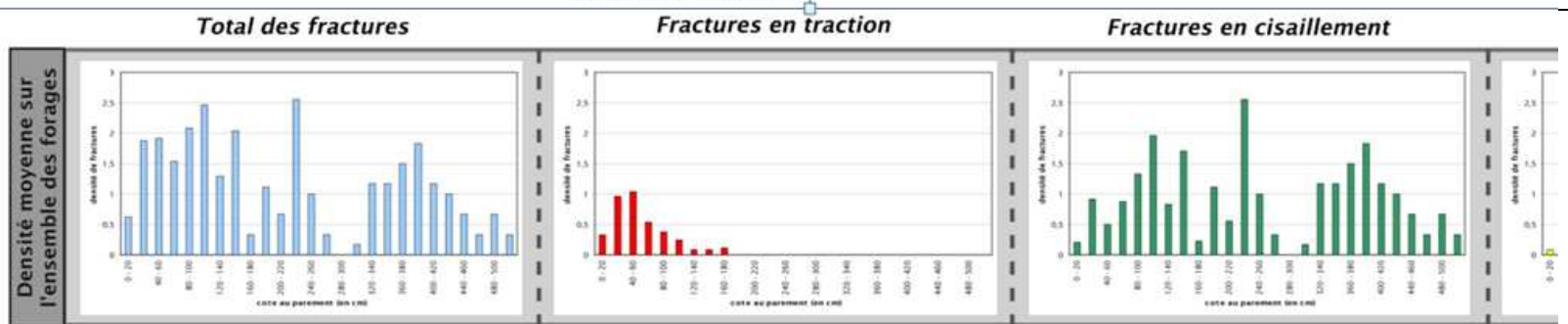
- couplage hydromécanique (variation de pression interstitielle, gonflement,...)
- Fluage du matériau (viscosité de la matrice rocheuse +/- propagation sub critique de la fissuration )
- Déformation d'un milieu fracturée par glissement/ouverture des fractures

# Déformations extensométriques au parement d'une galerie orientée suivant la contrainte majeure ( $\sigma_H$ )

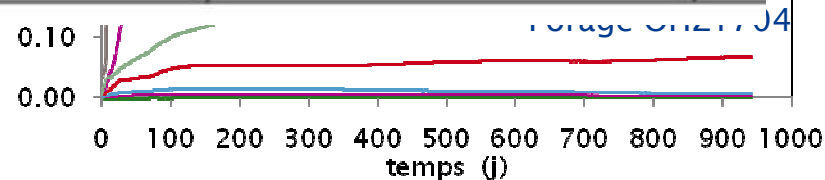
Forage OHZ1501 (à partir de la GAT)



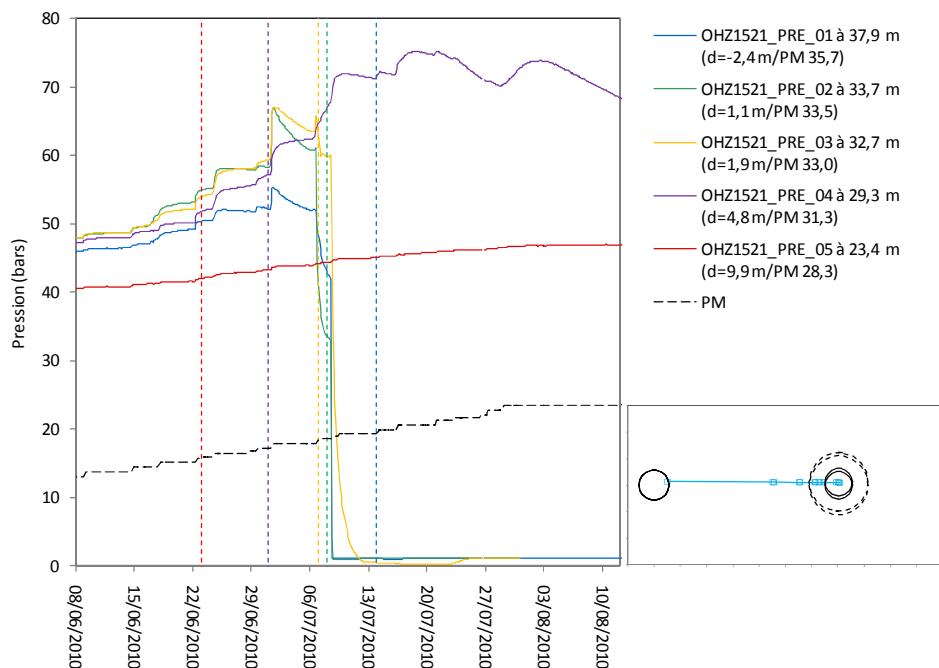
◆ L  
d



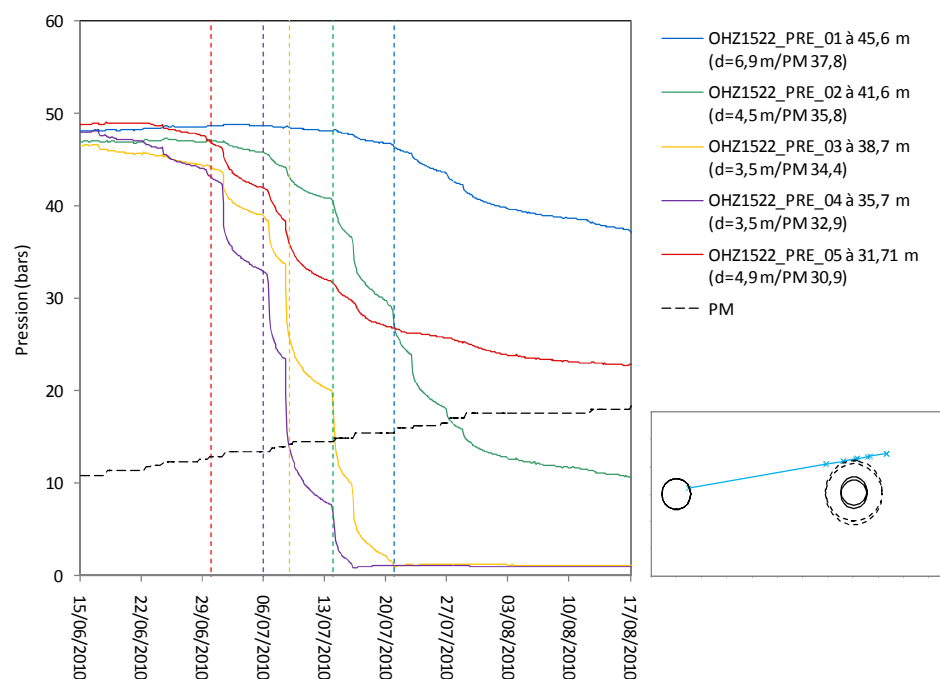
◆ Au-delà d'un 1D les déformations différées sont très faibles



## Horizontalement



## Verticalement

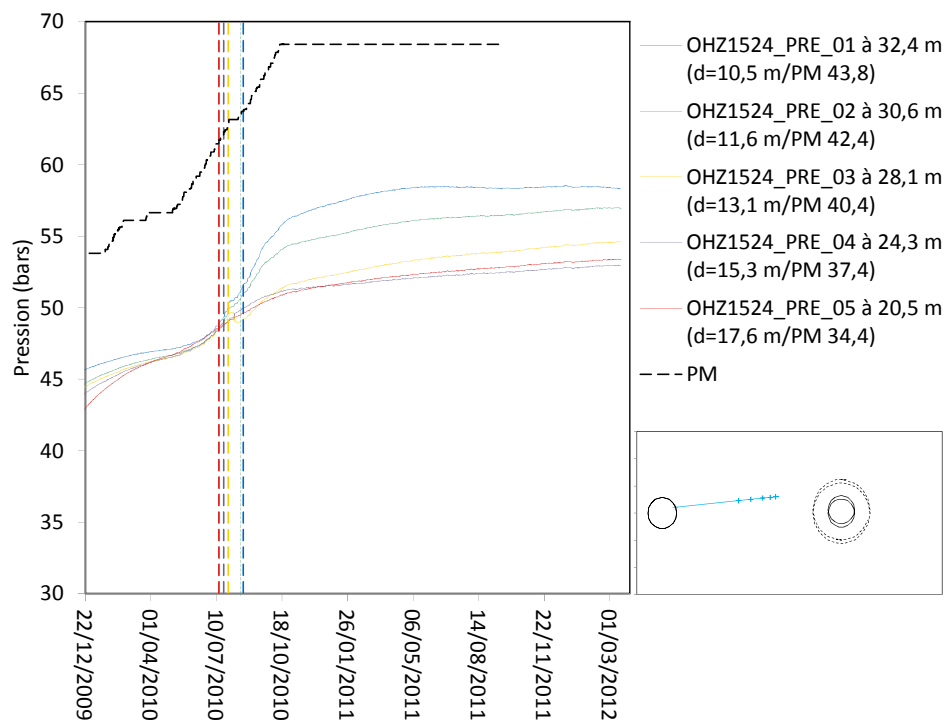


### ◆ Réponse hydraulique au passage du front (court terme)

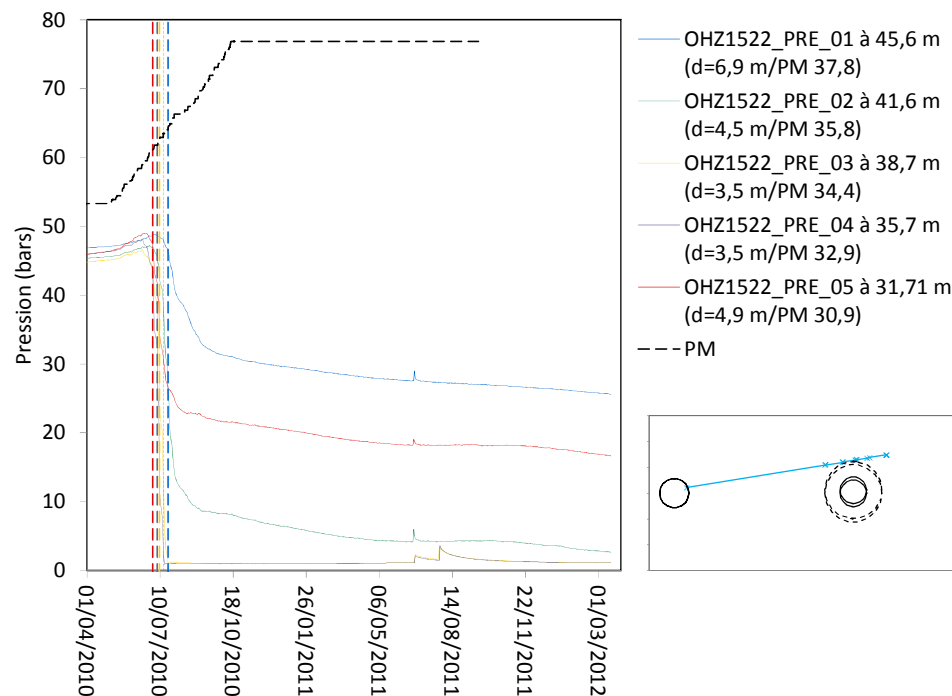
- Période de suivi : 60 jours
- Réponse du champ de pression anisotrope
- Evolution rapide du champ de pression au passage du front et influence des passes d'excavation:

**Impact du déconfinement mécanique sur le comportement court terme**

## Horizontalement



## Verticalement

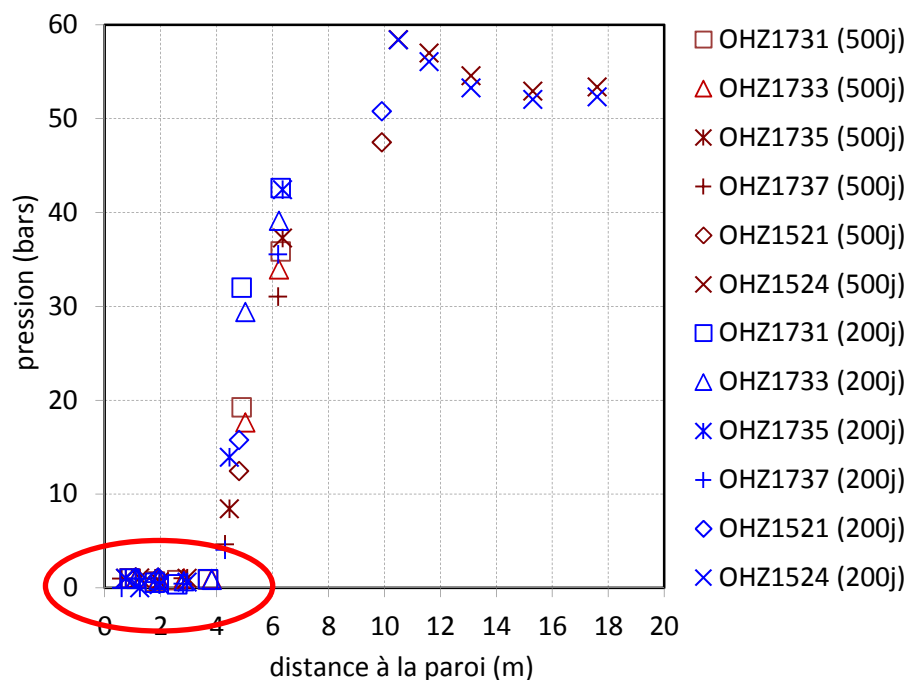


### ◆ Réponse hydraulique long terme

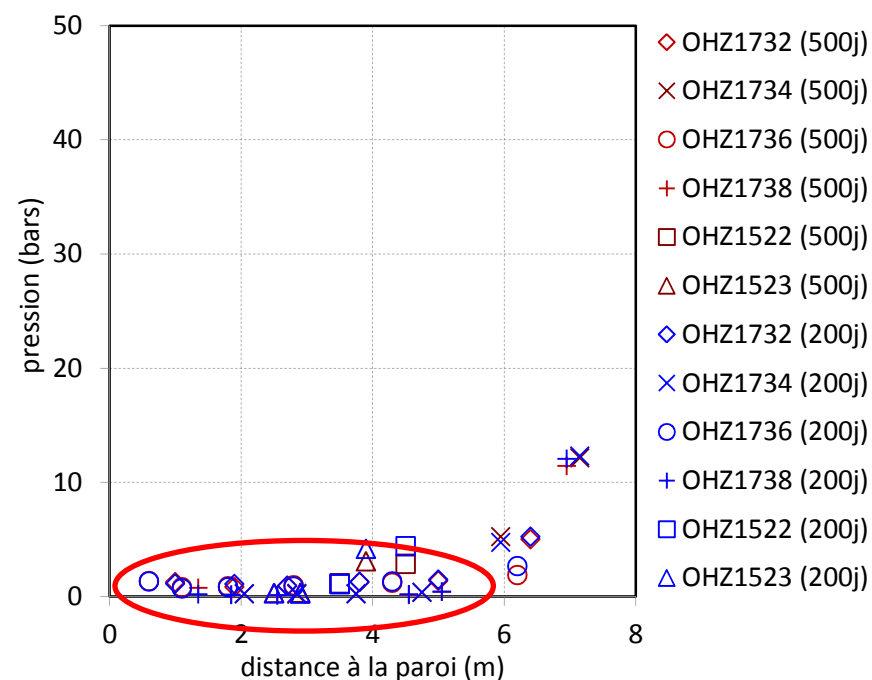
- 1 an après le creusement de la GCS, des surpressions persistent de 0,6 à 1 MPa dans le plan horizontal
- Verticalement, les pressions tendent à se stabiliser en fonction de leur distance à la paroi (et de leur position angulaire par rapport au plan horizontal)



## Horizontalement



## Verticalement



### ◆ Horizontalement:

- Gradient hydraulique non stabilisé, augmentation des pressions toujours visible
- Zone à P atm ou inférieure jusqu'à 4 m:

### ◆ Verticalement:

- Pressions tendent à se stabiliser en fonction de la distance à la paroi
- Augmentation des pressions à partir de 6 m:

## 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
- ◆ Les différentes méthodes d'excavation ont peu d'influence sur la fracturation induite
- ◆ 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 (Au-delà de la zone fracturée, on observe des vitesses de déformation différée qui diminuent avec la profondeur ( $1 \text{ à } 2 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1}$ ))

## Comportement HM

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

## Suivi à long terme des différents ouvrages

- ◆ convergence, déformation, évolution des pressions interstitielles, chargement des structures,...
- ◆ Evolution de la zone fracturée (perméabilité,...)
- ◆ Capacité des modèles rhéologiques à prédire le comportement des ouvrages

## Creusement de nouveaux ouvrages

- ◆ De plus grand diamètre (9 m)
- ◆ Dans la direction de la contrainte mineure
- ◆ Excavation en plusieurs phases



## 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 mechanics 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