



# CONSTRUCTIBILITE ET TENUE DES OUVRAGES TYPES ALVÉOLES MA-VL ET GALERIES

Réunion d'information et d'échange  
Andra – CLIS 9  
décembre 2019

# Contexte

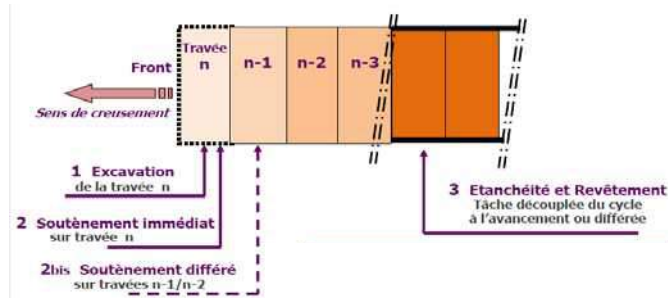
## Les méthodes de creusement de base : rappel

### Méthode Traditionnelle (CTM)

- Répétition d'un cycle d'opérations, réalisées par ateliers successifs, avec des moyens spécifiques, selon un phasage adapté
  - Soutènement primaire mise en place rapidement après creusement suivi (avec possibilité d'un décalage temporelle) du coulage d'un revêtement final

#### Exemple d'un cycle de creusement

Illustration : Ponts formation conseil

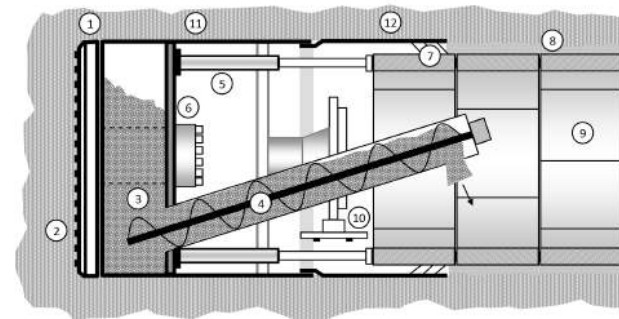


### Méthode au tunnelier (TBM)

- Creusement et construction mécanisée, intégrant à l'avancement un cycle d'opérations en parallèles ou successifs, réalisés toutes via le tunnelier
  - Revêtement par anneau de voussoirs préfabriqués mise en place et clavé à l'avancement du tunnelier

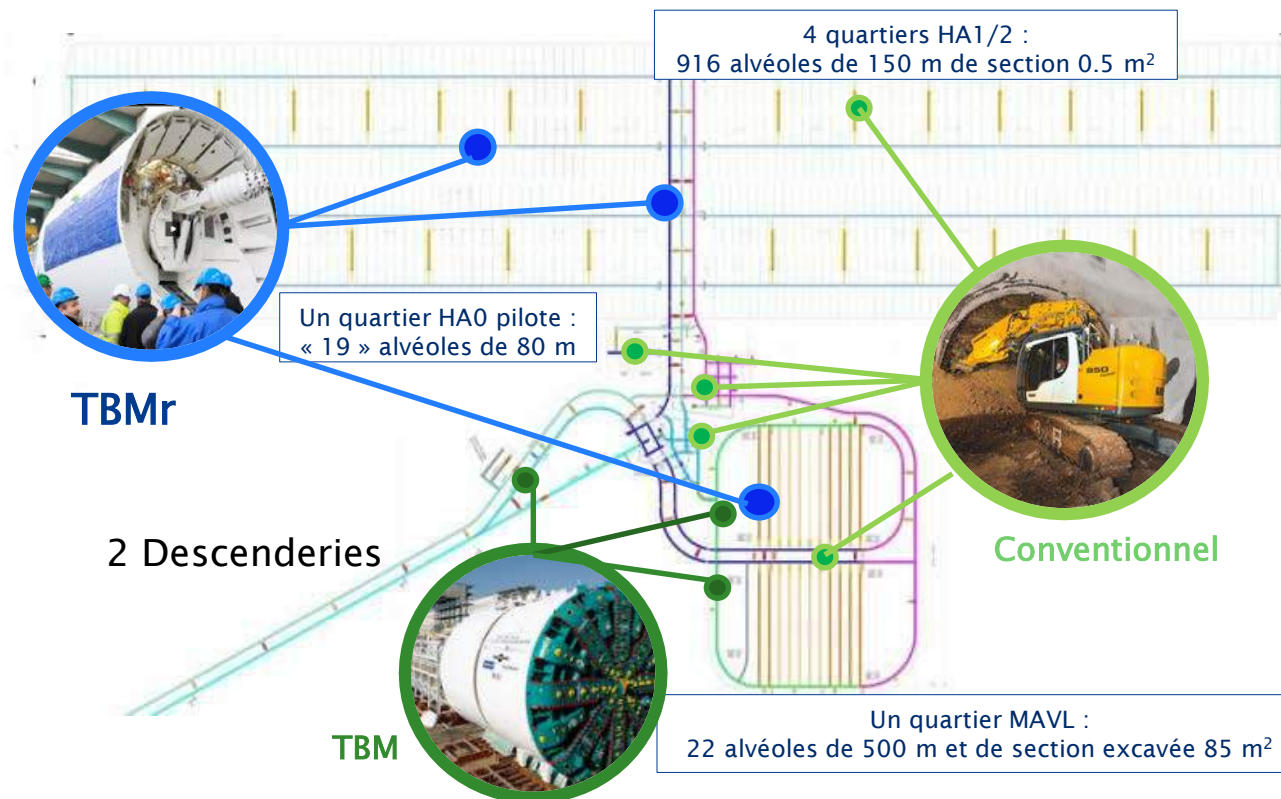
#### Exemple : coupe schématique tunnelier à pression de terre

illustration : ENS Cachan



# Contexte

## Les méthodes de creusement des galeries de Cigéo



### Creusement au tunnelier

- Voussoirs avec matériau compressible

### Creusement conventionnel

- Soutènement :
  - boulons
  - béton projeté (15 à 20 cm) avec cales compressibles
- Revêtement :
  - Matériau compressible
  - béton coulé en place 6 mois à 1 an après creusement

## Contexte

### Les études pour le dossier de DAC

#### Réalisation d'ouvrages de grand diamètre dans le Callovo-Oxfordien

- chambres de montage des tunneliers d'un diamètre excavé proche de 12,5 m
- diamètre excavé des alvéoles de déchets MA-VL proche de 10,5 m
- carrefours de grande taille avec dépose de voussoirs

#### Capacité technique à construire des ouvrages de grand diamètre

- REX du laboratoire souterrain de Meuse/Haute Marne
  - Différentes méthodes de construction testées
  - Maitrise de la phénoménologie
- REX industriel important sur les tunneliers de grande taille

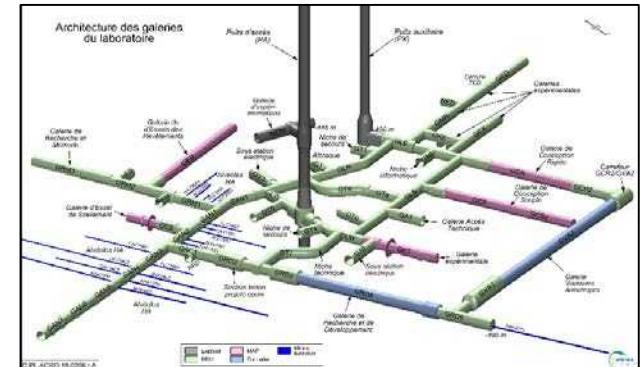


# La constructibilité des galeries et alvéoles MA-VL

## Le programme mis en œuvre au Laboratoire souterrain

Programme scientifique et d'essais technologiques mené depuis 2004

- Démarche séquentielle : construction de différentes galeries parallèles par les deux méthodes de creusement (*pour différents diamètres et soutènements/revêtements...*)
  - Méthode traditionnelle (CTM) et méthode mécanisée (TBM)
  - Analyse du comportement par comparaison d'ouvrages parallèles construits par différentes méthodes
    - Analyse de l'interaction roche/revêtement
    - Orientation des ouvrages par rapport à la contrainte horizontale maximale
    - Effet de la taille des ouvrages sur le comportement
- ⇒ optimisation du choix du couple « technologie de creusement, type de revêtement »
- Développement poussé jusqu'à la qualification industrielle de solutions technologiques «innovantes»
  - Limiter (différer) les efforts dans le revêtement et accroître les marges de garantie de la tenue des ouvrages sur la durée séculaire d'exploitation



# La faisabilité des galeries et des alvéoles MA-VL

## La méthode de creusement CTM - 1/2

○ *Creusement MAP et BRH*

○ *Diamètre excavé: 3,8 à 9 m - Pleine et demi section*



Pas de difficulté technique pour excaver le Callovo-Oxfordien avec les méthodes types MAP ou BRH

- Homogénéité de l'excavation (3 chantiers différents, 2 entreprises de travaux)
  - Moyenne d'avancement de l'ordre de 2 m/s.
  - Phasage maintenu lors des trois chantiers de travaux pour les galeries expérimentales avec les interventions scientifiques

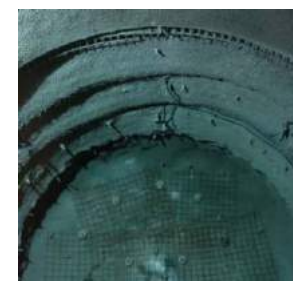
Pas d'influence de la méthode d'excavation sur la fracturation induite par le creusement

# La faisabilité des galeries et des alvéoles MA-VL

## La méthode de creusement CTM - 2/2

### *Du soutènement primaire au définitif*

- Différentes rigidités : du souple à cintre glissant au soutènement rigide



- Une maîtrise de la réalisation des différents types de soutènements testés
  - Pas d'influence significative sur l'avancement
  - Une répétabilité en termes de caractéristiques mécaniques de la formulation du béton projeté
- Une technique de soutènement souple par cales compressibles éprouvée
  - Un rôle « d'accompagnement » de la convergence, avec limitation des efforts dans les soutènements
  - Un bon fonctionnement multi-échelle (de la cale compressible au soutènement)

# La faisabilité des galeries et des alvéoles MA-VL

## La méthode de revêtement CTM

### Revêtement coffré coulé

- Coulage en trois phases
- Utilisation de deux formulations de béton
- Répétabilité et homogénéité satisfaisante
  - Positionnement des coffrages et des capteurs
  - Cycle de coulage, épaisseur des revêtements
  - Caractérisation mécanique conforme des bétons



⇒ Le comportement mécanique observé confirme la bonne maîtrise de la mise en place

*7 couples de soutènement/revêtement dédiés au suivi de l'interaction roche/structure*

Drift		Diameter (m)	Length (m)	Direction Vs $\sigma$ H	Start	finish	Excavation technic	Primary support		Final concrete support			Structure measure point
								Yieldable wedges	Shotcrete	Site-cast concrete (C30/35 MPa)	Site-cast concrete (C60/75 MPa)	Pre-cast lining elements	
GCS		5,2	64,3		mai-10	oct.-10	Road header	X	X(21 cm)				74
GCR	zone 1	5,4	64,3		janv.-11	mars-12		X	X(21 cm)		X (30cm)		464
	zone 2							X	X(21 cm)	X			
	zone 3								X(21 cm)		X (30cm)		
BPE		6,3	15		févr.-12	mars-13			X (45cm)				156
GRD4	zone 1	6,27	66		mai-13	nov.-13	TBM					X + "classical grout"	739
	zone 2											X + "comp grout"	

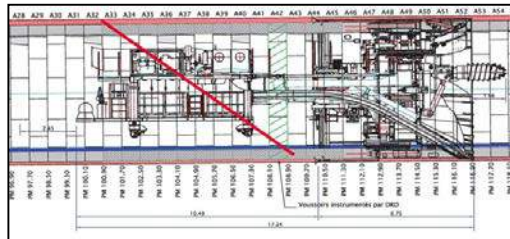


# La faisabilité des galeries et des alvéoles MA-VL

## La méthode TBM - 1/2

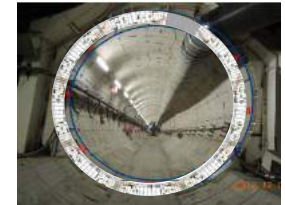
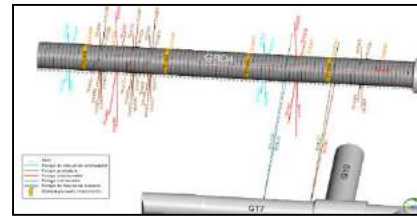
### Creusement au tunnelier à attaque ponctuelle (TAP)

- épaisseur voussoir : 45 cm
  - 8 voussoirs + clé
- Diamètre excavation : 6,27 m
- Deux types de coulis d'injection
- Avancement : 5 anneaux/semaine
  - Confirmation de la faisabilité du creusement par tunnelier dans le Callovo-Oxfordien



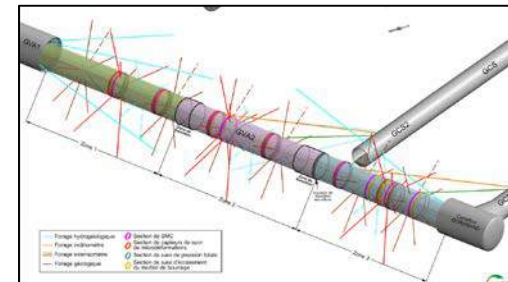
### Galerie GRD4

- 74 m de longueur, 93 anneaux
- Instrumentation
  - 593 capteurs dans le revêtement (945 mesures)
  - 300 échantillon de béton+ mortier de bourrage
  - 1 voussoir témoin



### Galerie GVA2

- 117 m de longueur, 146 anneaux, 3 tronçons



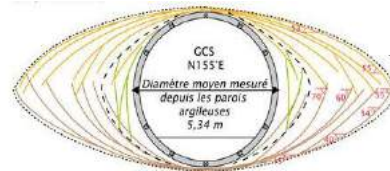
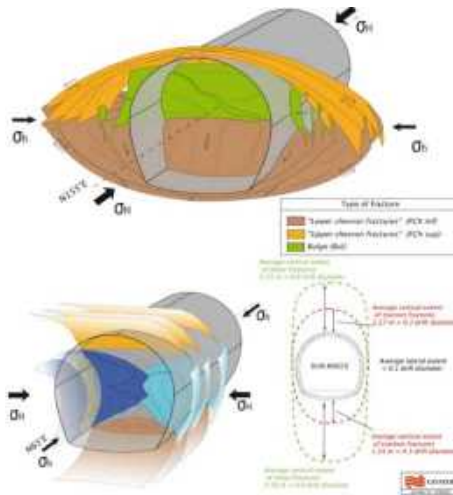


# Les acquis du laboratoire souterrain

## Un comportement des ouvrages bien appréhendé - 1/4

Une fracturation induite par le creusement anisotrope avec une extension proportionnelle au diamètre de l'ouvrage

- o Même typologie de fractures quelle que soit l'orientation de l'ouvrage
- o Orientation fonction de l'orientation vs direction des contraintes mécaniques naturelles in situ
- o Pas (peu) d'influence (ou peu) des différentes méthodes d'excavation (MAP, BRH) sur l'organisation du réseau de fractures et l'extension



Extension de la fracturation pour des galeries boulonnées au Laboratoire souterrain

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	0.8xD	
	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	-	-	-

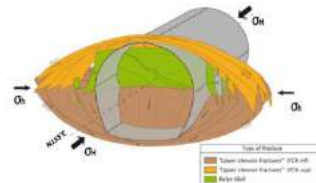
# Les acquis du laboratoire souterrain

## Un comportement des ouvrages bien appréhendé - 2/4

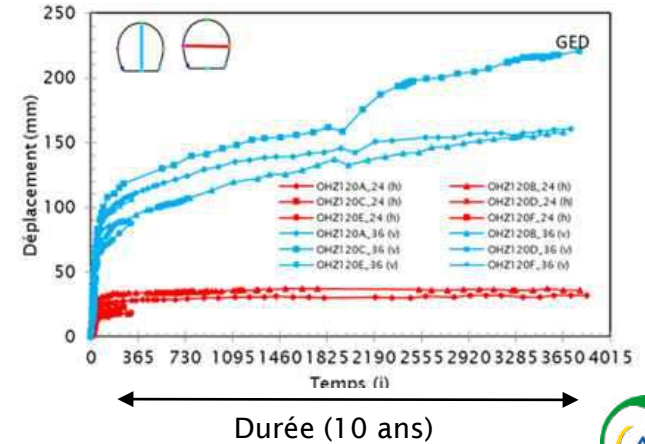
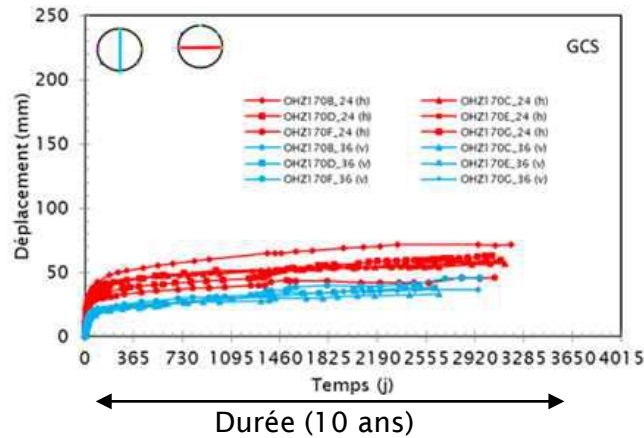
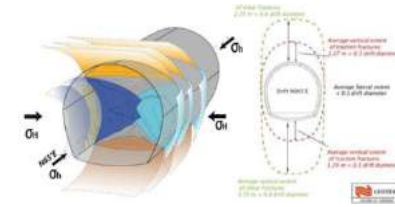
Un rôle important de la zone fracturée sur le comportement hydromécanique des ouvrages (convergence)

- Des convergences importantes au creusement puis des vitesses qui décroissent au cours du temps
- Des convergences anisotropes dépendant de l'orientation de l'ouvrage
- Evolution similaire

*Galerie parallèle à la contrainte majeure*



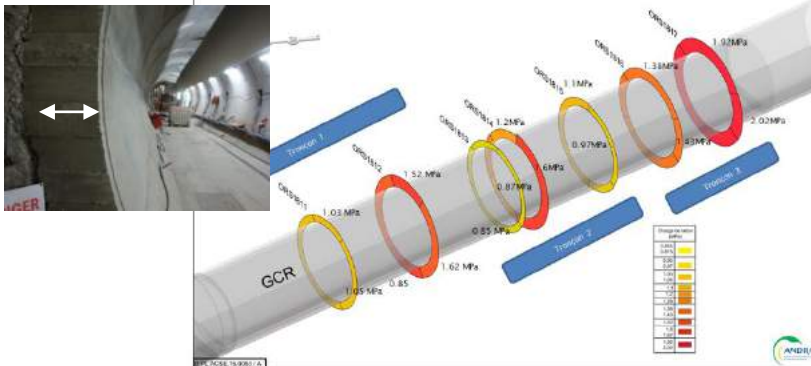
*Galerie parallèle à la contrainte mineure*



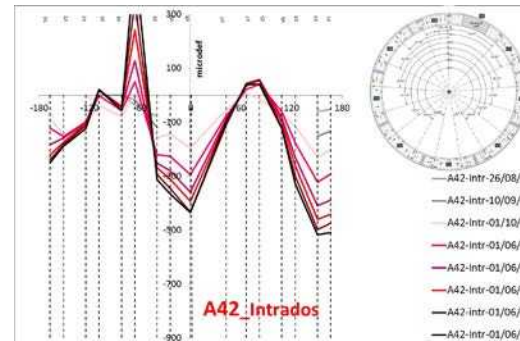
# Les acquis du laboratoire souterrain

## Un comportement des ouvrages bien appréhendé - 3/4

- o La mise en place d'un revêtement rigide empêche la convergence du terrain et conduit à une augmentation des contraintes dans le béton
  - Faible augmentation de la contrainte radiale
  - Augmentation plus importante de la contrainte orthoradiale
- o CTM: mise en place retardé du revêtement coulé ( 6 mois pour GCR) impliquant un chargement quasi isotrope des revêtements rigides avec le temps
  - Augmentation faible de la contrainte radiale < 2MPa à 5 ans
- o TBM: mise en place rapide impliquant un chargement anisotrope des revêtements rigides avec le temps
  - Contraintes ortho-radiales maximales atteintes dans les voussoirs de la galerie GRD4 égales à 13 MPa (5 ans après leur pose)



DRD/MFS/19-0152



Evolution (absolue) μDef		2018	2017	2016	2015
Def. Orthoradiales	Moyenne	7	12	11	29
	Min	0	0	0	0
	Max	35	40	53	96

*Evolution des déformations orthoradiales corrigées du comportement intrinsèque du béton*

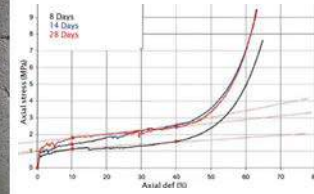
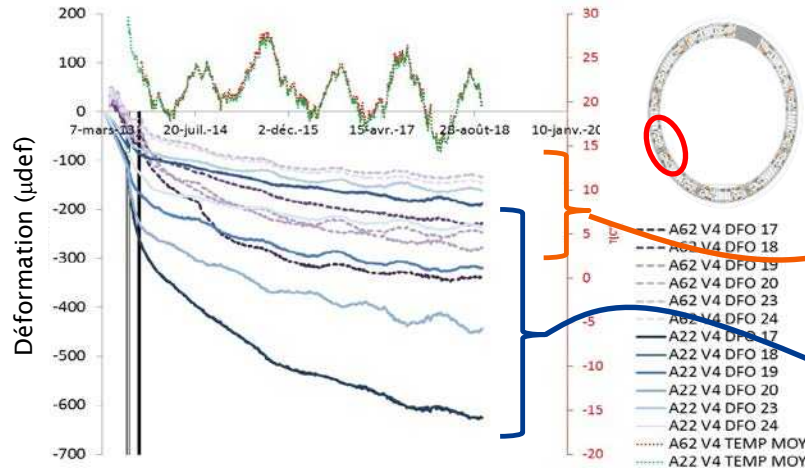


# Les acquis du laboratoire souterrain

## Un comportement des ouvrages bien appréhendé - 4/4

Utilisation d'un mortier compressible à l'extrados, pour limiter les efforts radiaux transmis aux voussoirs :

- Répétabilité du comportement mécanique tout au long de la section injectée
- Atténuation des déformations/contraintes dans les voussoirs de la zone à mortier compressible



Matériau compressible  
Type DeCoGrout/Compex



Matériau de bourrage  
classique



# Les acquis du laboratoire souterrain

## L'absence d'effet de la taille des ouvrages - 2/3

Ouvrages de  $\varnothing$  centimétrique  $\Rightarrow$   $\sim$  6 m

- Organisation de la fracturation similaire pour des ouvrages de diamètres très différents

Galeries grand diamètre au CMHM (chambres de montage du TBM-TAP) :

- GRD3  $\varnothing \sim 7,8$  m selon  $\sigma_H$
- GVA1  $\varnothing \sim 9$  m selon  $\sigma_h$
- Organisation et extension globalement similaire
  - Effet du phasage de l'excavation sur l'extension finale
- Perméabilité semblable en fonction du ratio distance/diamètre

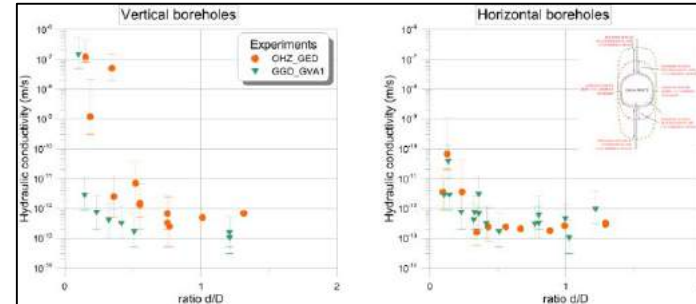
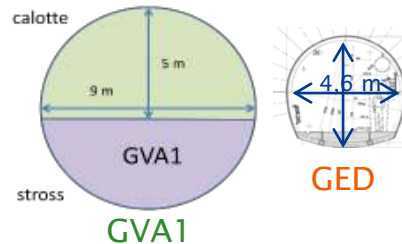
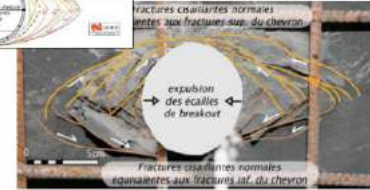
Démonstrateur Alvéole HA



Boulon



Galeries



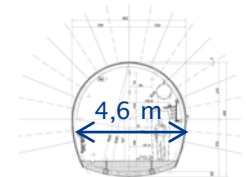
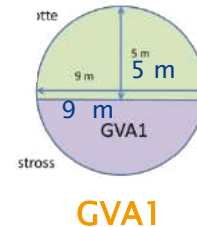
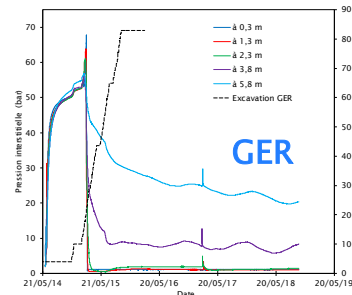
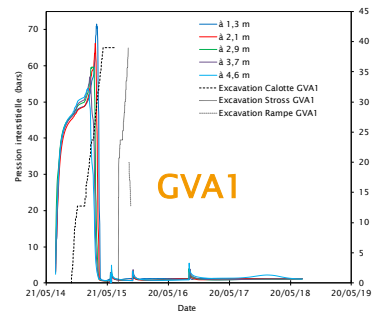
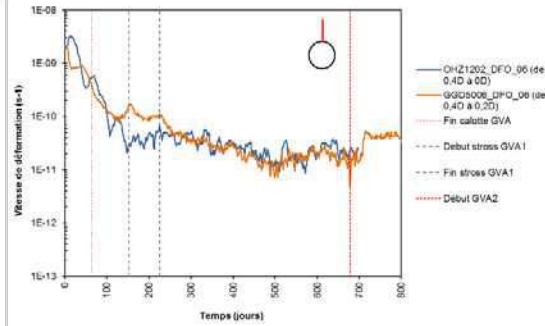
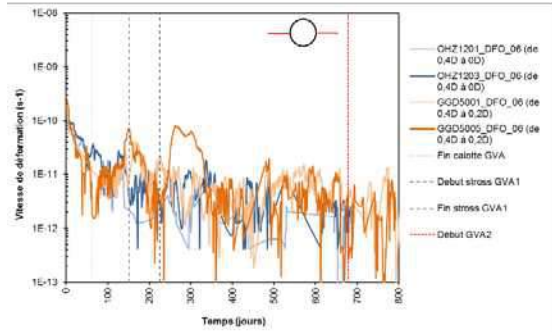


# Les acquis du laboratoire souterrain

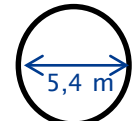
## L'absence d'effet de la taille des ouvrages - 3/3

Même comportement hydromécanique pour une galerie de 5 m et de 9 m de diamètre

- o Même évolution des vitesses de déformation en fonction du ratio distance/diamètre
- o Même évolution des pressions interstitielles au creusement



GED



GER

# Le dimensionnement des revêtements de Cigéo

## L'utilisation du REX du Laboratoire souterrain

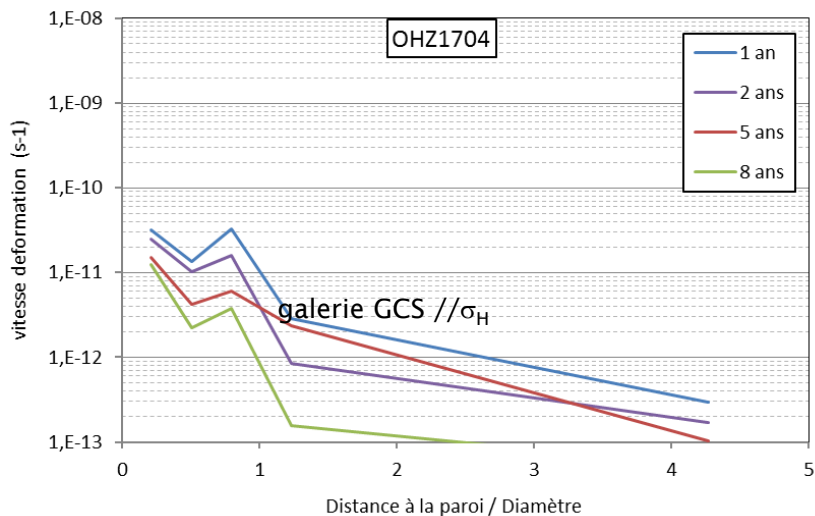
Comportement observé au LS utilisé pour les calculs de dimensionnement

- Vitesses de convergence diminuent avec le temps



Introduction d'un matériau compressible

- Retarde le chargement du revêtement
  - Permet le creusement au tunnelier avec pose de voussoirs à l'avancement
  - Contribue à la robustesse du dimensionnement
- Atténue partiellement l'anisotropie de chargement du revêtement



# Le dimensionnement des revêtements de Cigéo

## Les critères de dimensionnement

Suivant les recommandations de l'AFTES

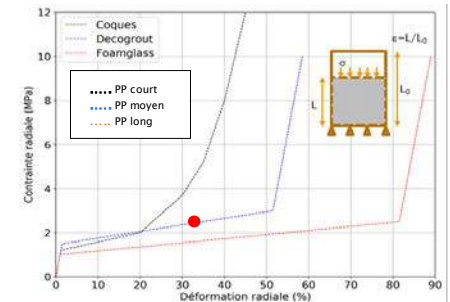
Vérification de la contrainte de compression maximale du béton à 100 ans

- $\sigma_{\max} < 29,6$  MPa pour le béton coffré (BC)
  - pour résistance initiale du béton  $> 60$  Mpa (C60)
- $\sigma_{\max} < 34,2$  MPa pour le béton préfabriqué (voussoirs-BV)
  - pour résistance initiale du béton  $> 60$  Mpa (C60)
- Coefficient de sécurité  $1,35 \sigma_{\max}$  et  $R_c/1,5$  (BC) ou  $R_c/1,3$  (BV)

Vérification de la contrainte/écrasement du matériau compressible

- Ratio (limite palier plastique (PP)/déformation radiale)
  - $> 1,5$  pour l'essentiel des ouvrages
  - $> 1,2$  pour quelques ouvrages spécifiques

*Différents matériaux compressibles*



# Synthèse

## Cadre général

Un REX montrant la capacité de constructibilité d'ouvrages horizontaux de grande dimension

- Différentes méthodes de construction CTM et TBM possibles

Une maîtrise du comportement hydromécanique et de la tenue des ouvrages dans le temps

- Comportement similaire quelque soit la méthode de construction
  - Convergence anisotrope rapide pendant les premiers mois puis lente après conduisant à un chargement des structures en béton
  - Pas d'effet d'échelle entre les ouvrages de 5 m à 9 m de diamètre
    - Comportement suivi sur déjà 13 ans pour certains ouvrages
- Apport des revêtements/soutènements « souples » pour accroître la tenue mécanique des ouvrages

Une utilisation de ce REX pour le dimensionnement

# Synthèse

## La poursuite des travaux : le chantier 4 au LS - 1/2

Chantier 4 engagé début 2019 pour une durée de 6 ans, afin de disposer à ce terme d'un complément de connaissances sur :

- L'emploi des matériaux compressibles pour les revêtements/soutènements
  - en particulier pour les « carrefours en X »
- La capacité à déposer des voussoirs en partie courante et en « carrure en T »
- La mise en place de « remblais courants » dans des conditions représentatives des opérations de comblement des galeries de Cigéo
- La réalisation de prototypes représentatifs des concepts des 2 types d'alvéoles, HA et MA-VL





**Merci de votre attention**

# Annexe : essais grande échelle futurs au Laboratoire souterrain

## L'expérimentation OMA

### Démonstrateur (prototype) d'une alvéole MA-VL

- se rapprochant le plus possible du concept proposé par les Maîtrises d'œuvre du projet Cigéo en fin de la phase APS (Avant-Projet Sommaire),
- adapté aux contraintes opérationnelles de réalisation du Laboratoire souterrain (diamètre, sections divisées, ventilation, marinage, bétonnage...)

- Objectifs

- Faisabilité technologique
- Test de dispositifs de suivi d'un ouvrage de grand diamètre avec la définition future d'un programme de surveillance
- Consolidation de la compréhension HM en particulier l'interaction roche et soutènement/revêtement, à cette échelle
  - Tests sur 2 portions longitudinales dont une comprenant un matériau compressible

- Planning prévisionnel : 2020-2024