

# Modélisations du comportement différé des argilites et dimensionnement des structures : application au chantier 4 du laboratoire de l'Andra à Bure

*Long-term effect models of claystones and design of structures: application to the 4<sup>th</sup> construction step of Bure laboratory (Andra)*

Jean-François BRUCHON, Nour Eddine EL KHOTRI, Yvon DELERABLE, Alexis SERIEYS, Sébastien BURLON, Hervé LE BISSONNAIS, Terrasol, Paris, France



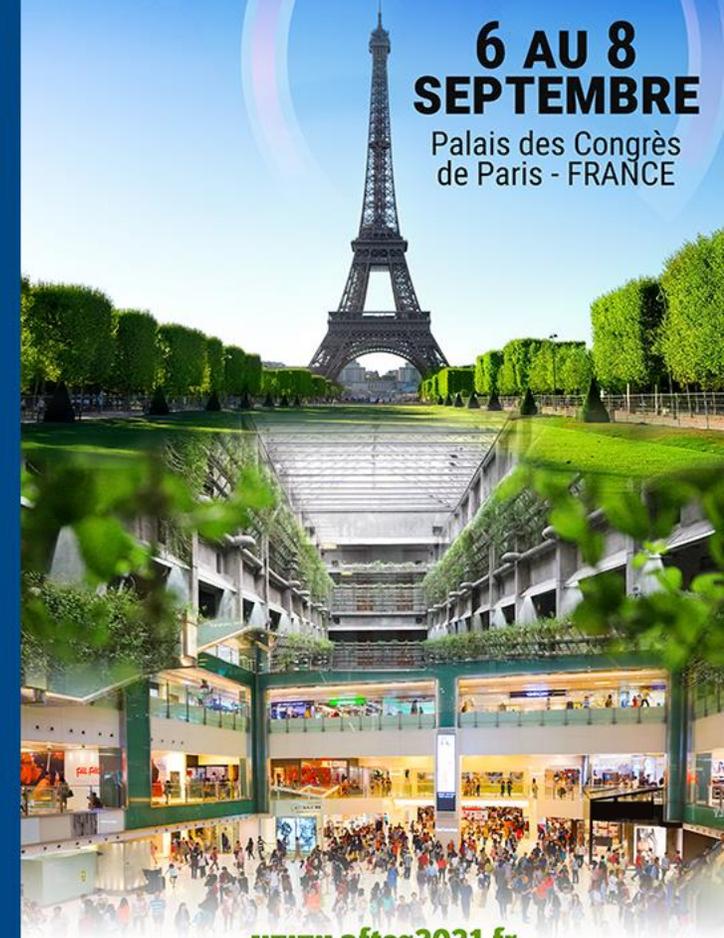
XVI<sup>ÈME</sup> CONGRÈS INTERNATIONAL

AFTES  
2021

Le souterrain,  
espace  
d'innovations

6 AU 8  
SEPTEMBRE

Palais des Congrès  
de Paris - FRANCE



[www.aftes2021.fr](http://www.aftes2021.fr)

AFTES  
42 rue Boissière,  
75116 PARIS  
[www.aftes.asso.fr](http://www.aftes.asso.fr)



# Chantier 4 du LSMHM de l'Andra

MOA : ANDRA

MOE : Groupement Antea Group, BG Ingénieurs Conseils

Entreprise : Eiffage GC

Missions de Terrasol (sous-traitant d'Eiffage GC) :

- Études G3
- Suivi G3 :
  - Creusement – levé de tous les fronts
  - Soutènement – vérification des méthodes et du comportement des ouvrages

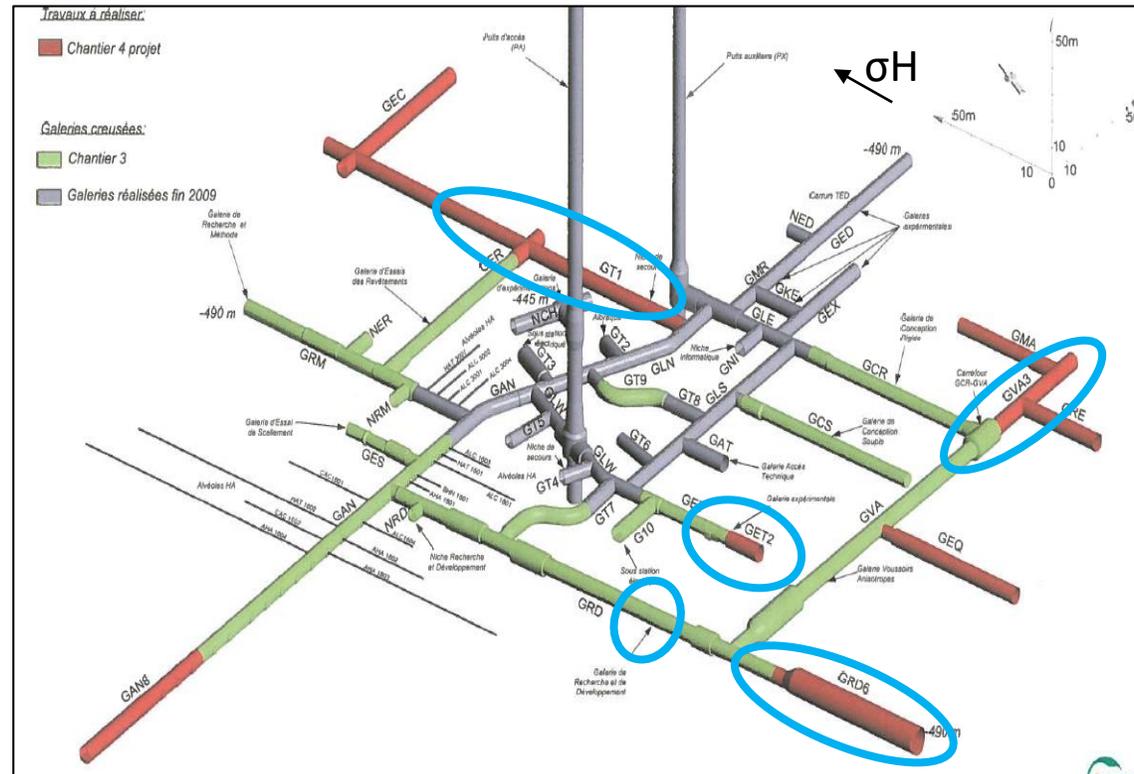


# Chantier 4 du LSMHM de l'Andra

- Début des travaux : 06/2019
- Environ 600 m de galerie à creuser sur 5 ans
- Actuellement : 260 m en 2 ans

## - Structures :

- Soutènements souples pour accompagner le terrain
- Revêtements rigides posés tardivement ou équipés d'un matériau compressible



Architecture du Laboratoire  
Galeries rouges – projet chantier 4  
Galeries entourées – réalisées ou en cours

XVI<sup>ÈME</sup> CONGRÈS INTERNATIONAL

**AFTES 2021** | Le souterrain, espace d'innovations

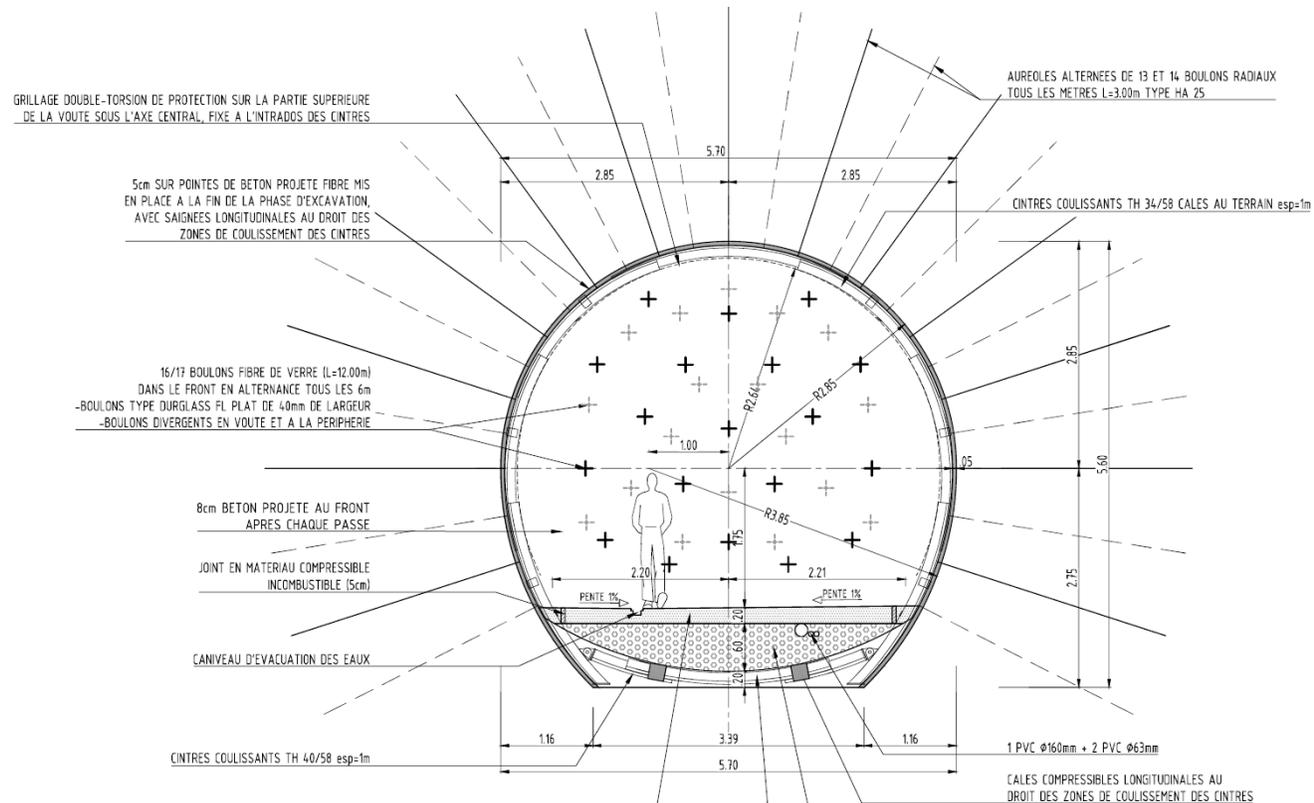
**6 AU 8 SEPTEMBRE**  
Palais des Congrès de Paris - FRANCE

[www.aftes2021.fr](http://www.aftes2021.fr)

# Soutènement type – section cintrée

Vérifications : cintres, boulons et stabilité des fronts

Effets différés à prendre en compte sur 20 ans



# Approche générale de modélisation

- Modélisation de l'argilite – différentes approches testées :
  - Hoek-Brown + loi Lemaitre (HBL)\*
  - Mohr Coulomb + zone dégradée + loi de Norton (MCN)\*\*
  - Mohr Coulomb + zone dégradée + loi de Norton modifiée (MCNm)\*\*\*
- Béton : loi élastique ;
- Cale compressible : loi élastique parfaitement plastique (loi « double yield » de Flac) ;
- Cintre coulissant : de type poutre et coulissement directement pris en compte dans Flac2D et modélisé suivant l'approche proposée par Manh (2015) dans Flac3D ;
- Boulon : élément travaillant uniquement en traction et frottement limite unitaire égal à 1000 kPa

\*Shiu, Billiaux, Poutrel (2014). Interaction entre l'argilite et revêtement autour d'une alvéole MAVL de stockage à long terme. JNGG2014

\*\*Saitta, Lopard, Petizon, Armand (2017). Projet Cigéo (France) - Modélisation du comportement des argilites de la galerie GRD du laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne - AFTES2017

\*\*\*Ribeiro Lima, Bruchon, Burlon. Prise en compte des effets différés des roches argileuses sur la conception de tunnels profonds- - JNGG 2020

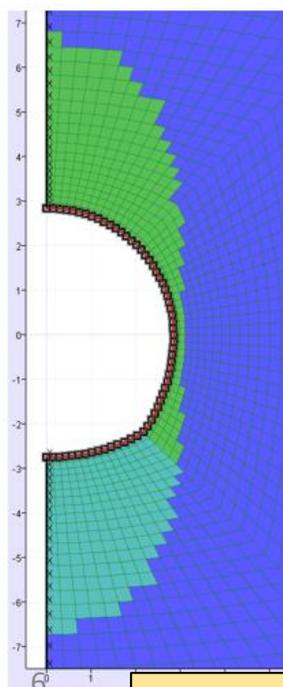
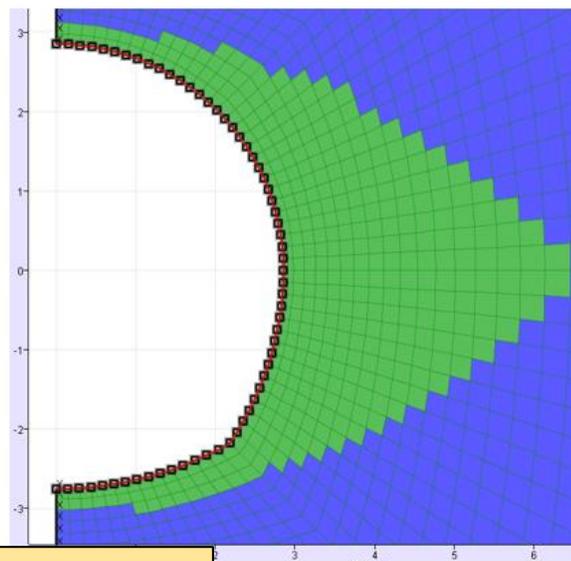


www.aftes2021.fr



# Modélisations 2D : section cintrée

Pour les modèles MC : zone dégradée calée sur les observations – dépend de la direction de creusement et du type de soutènement (étendue, présence d'un boulonnage)

Galerie //  $\sigma_h$ Galerie //  $\sigma_H$ 

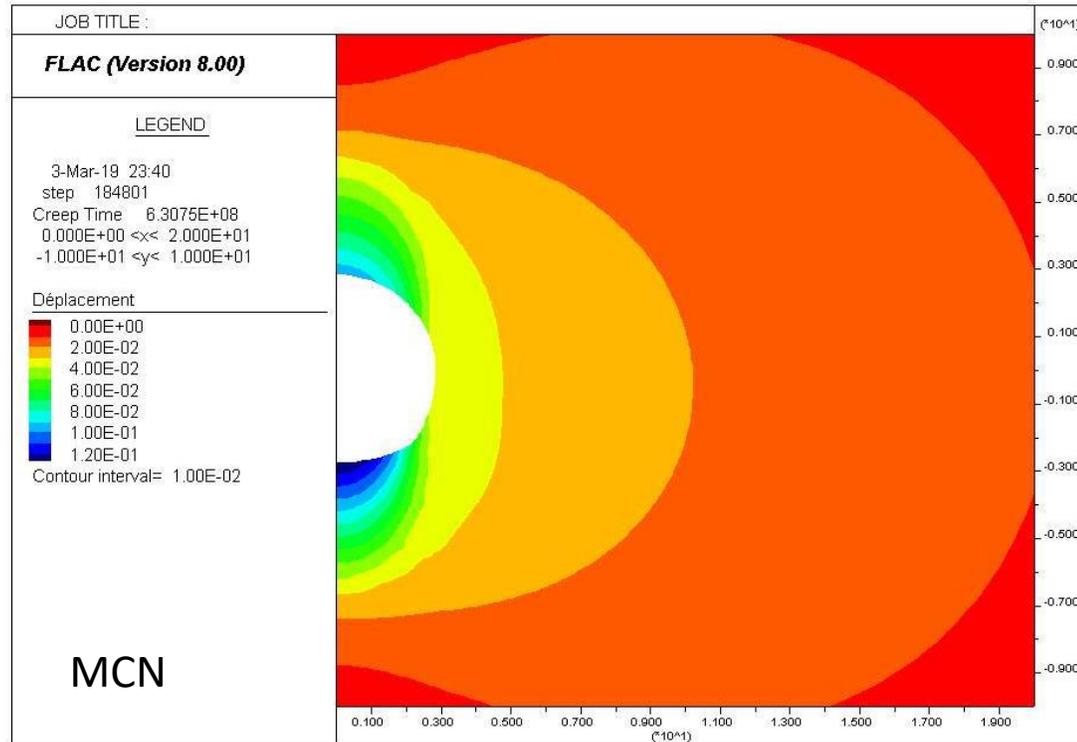
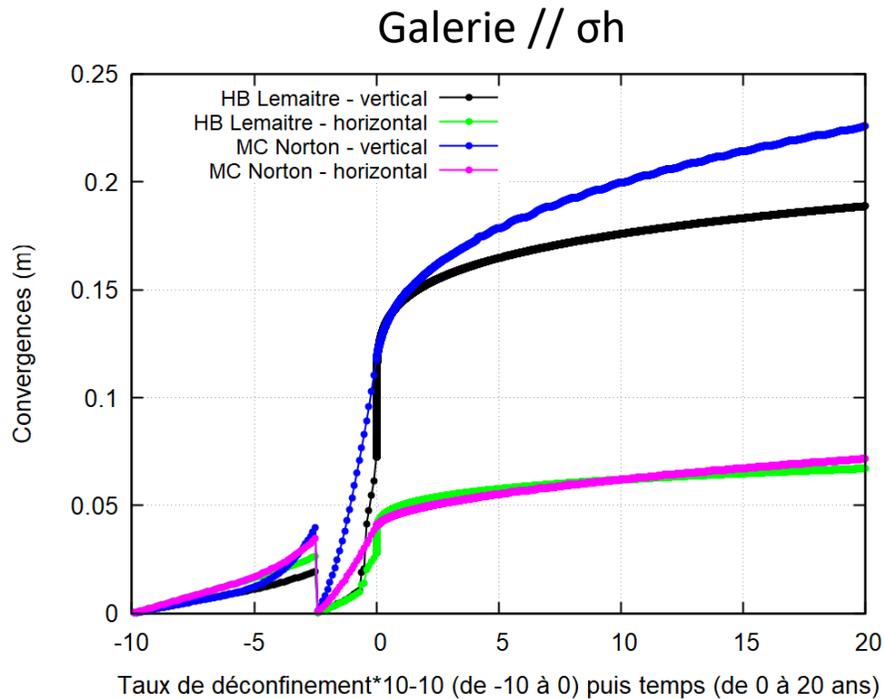
Modèles FLAC2D

	Argilite dégradée sans boulonnage	Argilite dégradée avec boulonnage	Argilite intacte
E (GPa)	4	4	4
v (-)	0.3	0.3	0.3
c (MPa)	0.6	0.8	6
$\Phi$ (°)	25	25	20
$\Psi$ (°)	5	2	0
Rt (MPa)	0	0	0.9
qref (MPa)	qini – Von Mises	qini – Von Mises	qini – Von Mises
A (-)	2.5e-59	2.5e-59	2.5e-59
n (-)	6.8	6.8	6.8

Orientation de la galerie	Plan de creusement	Géométrie de la zone dégradée	Avec boulonnage	Sans boulonnage
// Contrainte mineure $\sigma_h$ (N065°E)	Anisotrope	$\left(\frac{x}{R + E_{cx}}\right)^2 + \left(\frac{z}{R + E_{dz}}\right)^5 = 1$	Edx = 0.1R Edz = 1.2R (GED)	
// Contrainte majeure $\sigma_H$ (N155°E)	Isotrope	$\left(\frac{x}{R + E_{dx}}\right)^2 + \left(\frac{z}{R + E_{cz}}\right)^{1.25} = 1$	Edx = 1.4R Ecz = 0.1R (GCS)	Edx = 2.0R Ecz = 0.25R (GRD4)
x (horizontale), z (verticale), d (zone fracturée discrète) et c (zone fracturée continue)				

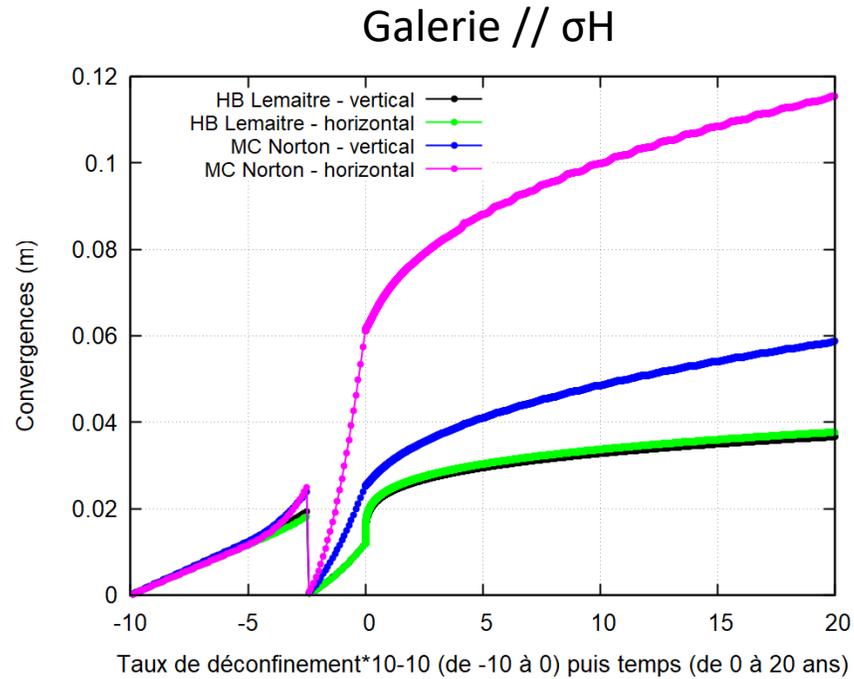
# Modélisations 2D : section cintrée

- Résultats - convergences

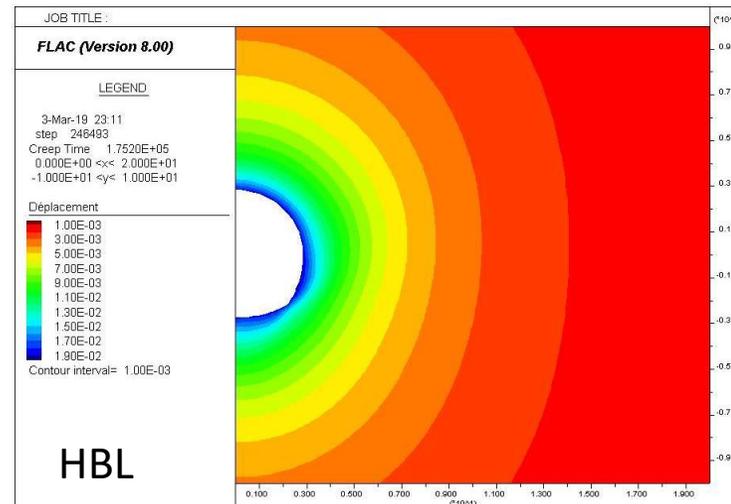
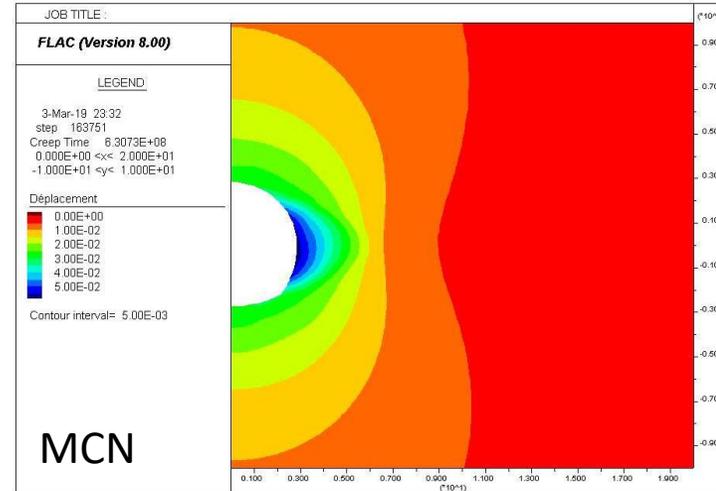


# Modélisations 2D : section cintrée

- Résultats - convergences



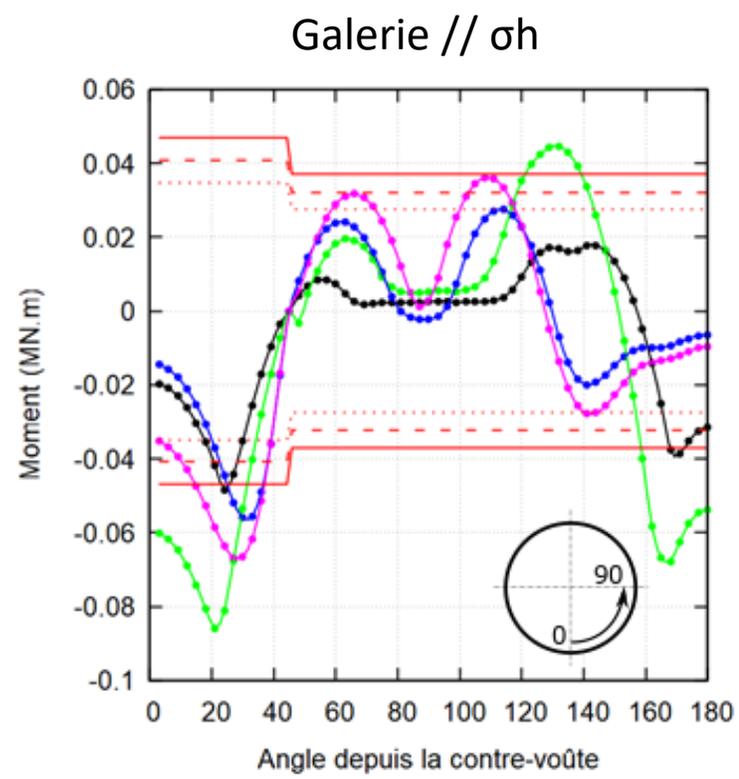
Zone dégradée → force l'anisotropie



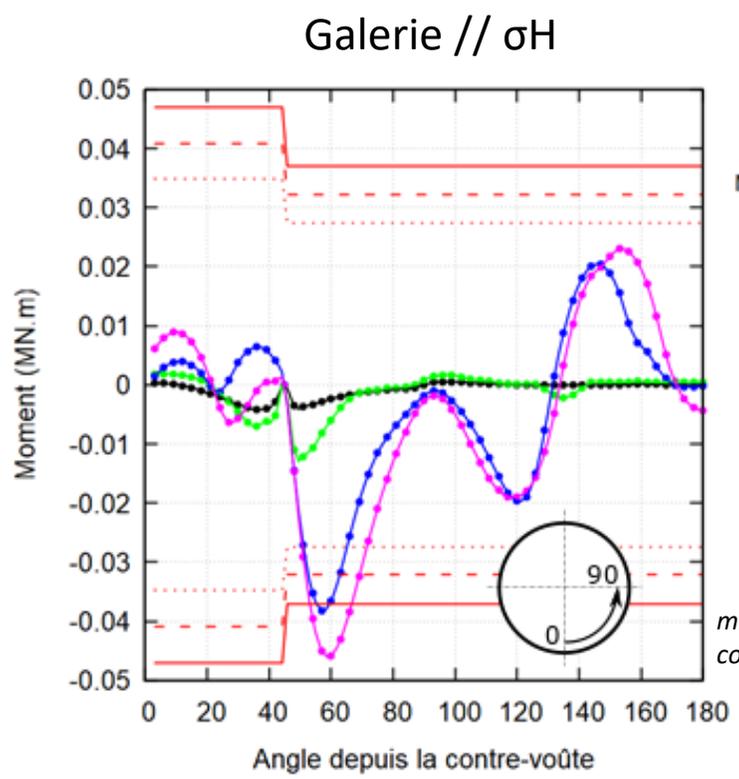


# Modélisations 2D : section cintrée

## • Résultats - sollicitations



HBL et MCN assez similaires

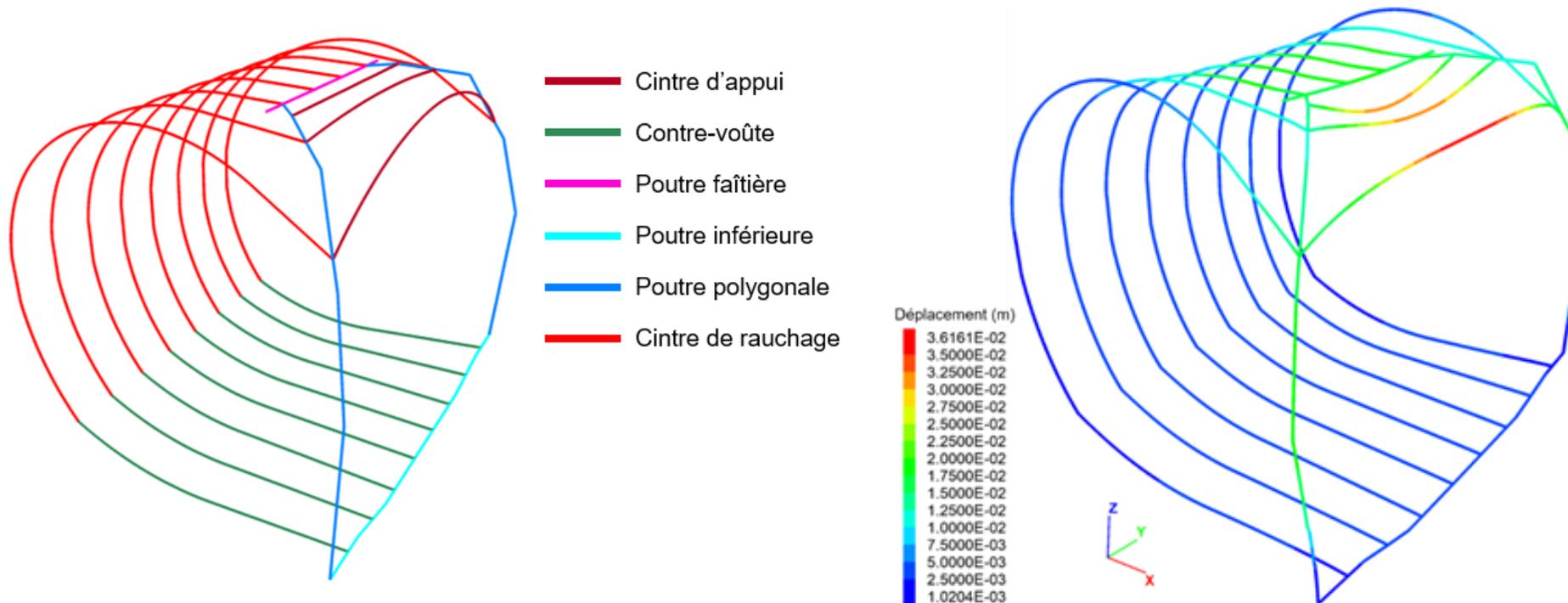


HBL et MCN différents

*moment positif = intrados plus comprimé que l'extrados*

# Modélisations 3D : structures singulières

Carrures : approche découplée terrain – carrure → permet de simuler des cas de chargement particuliers (exemple : poids d'un bloc)



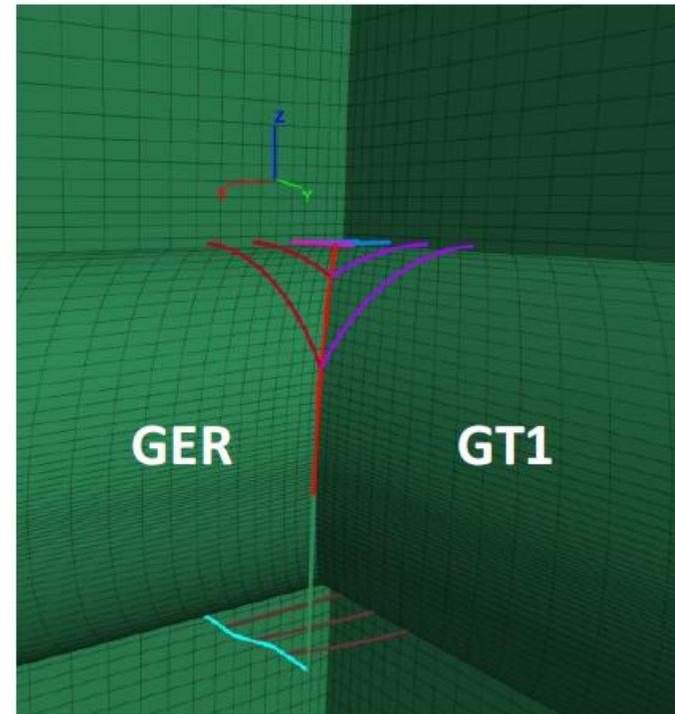
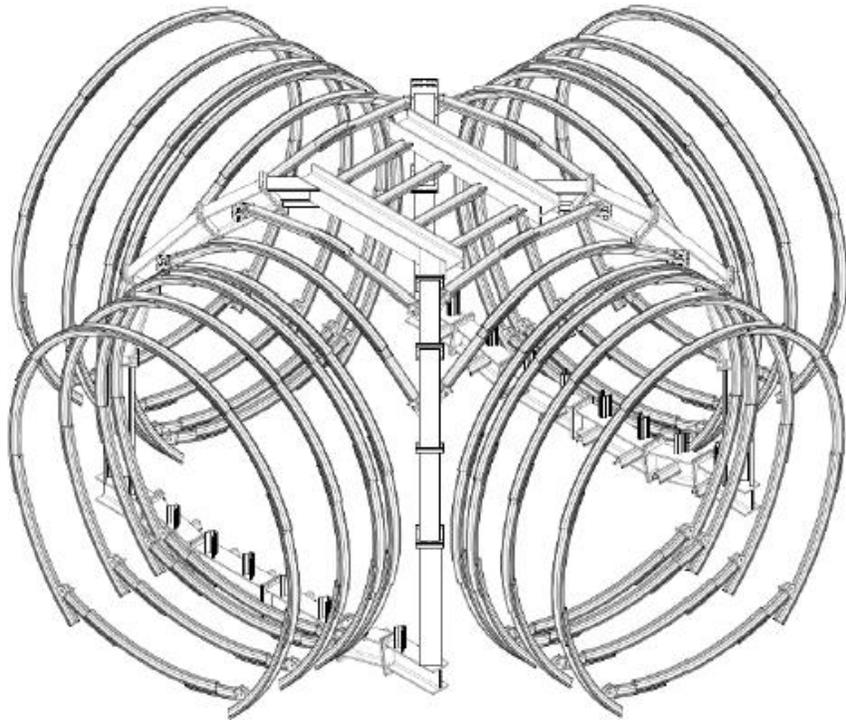
Modèles FLAC3D



# Modélisations 3D : structures singulières

## Carrures

- Approche couplée terrain – carrure : plus simple via quelques simplifications géométriques



Modèles FLAC3D

XVI<sup>ème</sup> CONGRÈS INTERNATIONAL

**AFTES 2021** | Le souterrain, espace d'innovations

**6 AU 8 SEPTEMBRE**  
Palais des Congrès de Paris - FRANCE



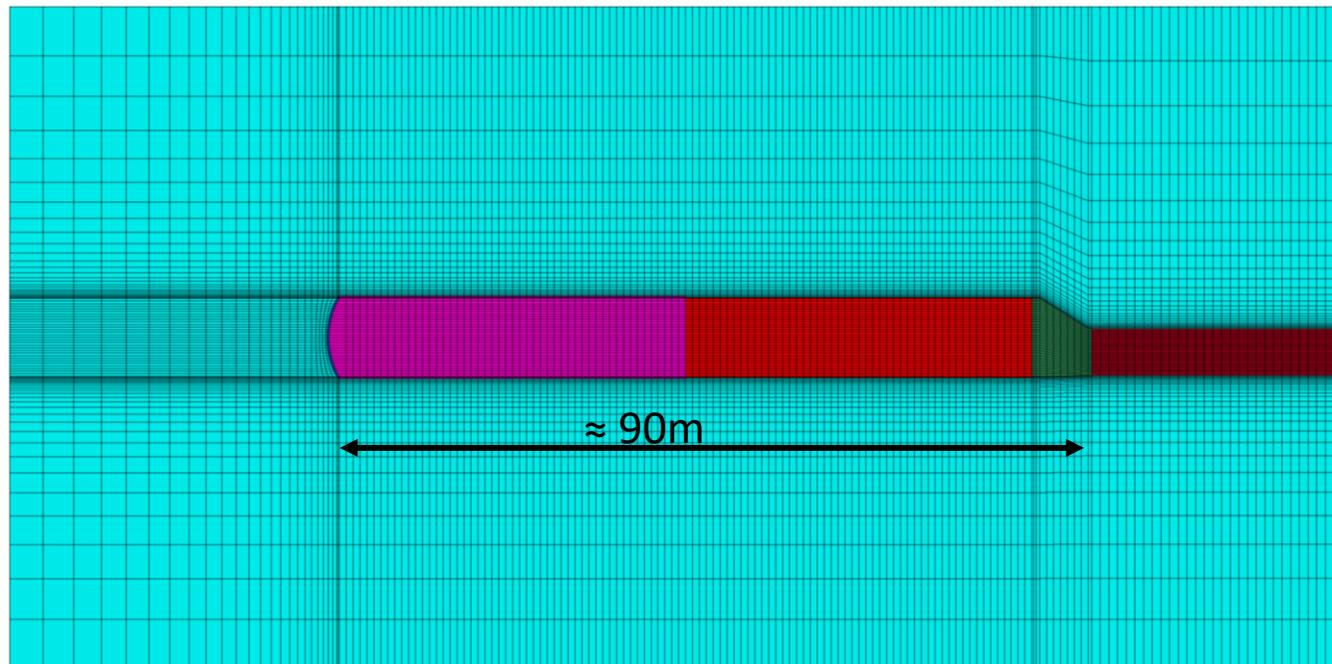
[www.aftes2021.fr](http://www.aftes2021.fr)

AFTES  
42 rue Boursière  
75116 PARIS  
[www.aftes.asso.fr](http://www.aftes.asso.fr)



# Modélisations 3D : structures singulières

Galerie GRD6 (9.6m de diamètre) – creusement calotte-stross



Modèles FLAC3D

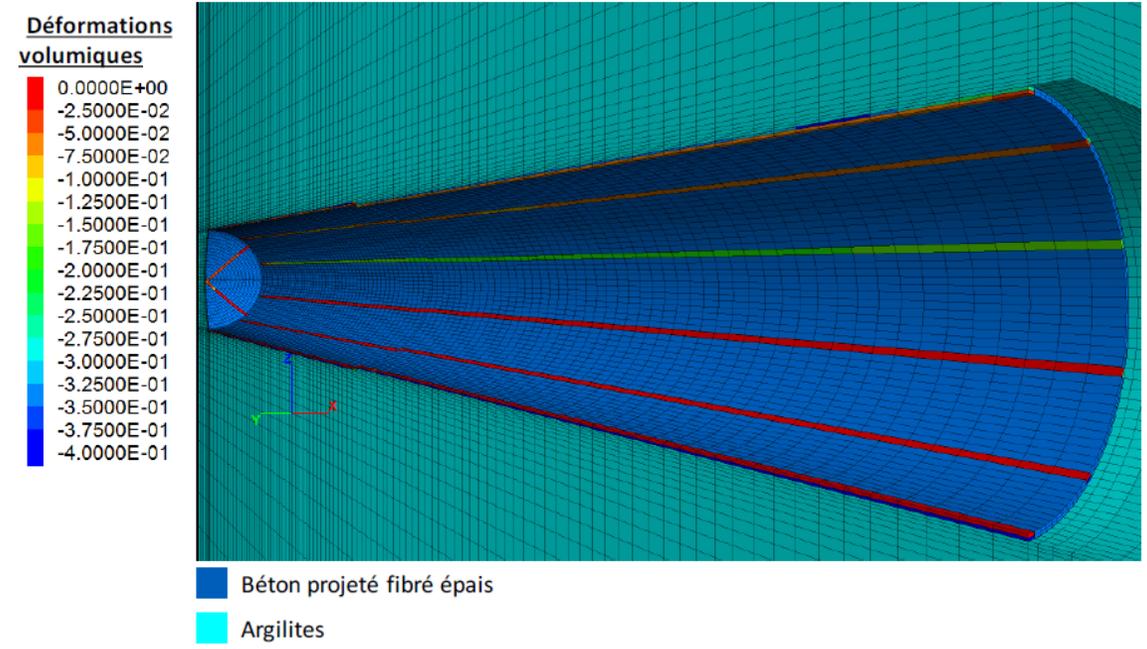




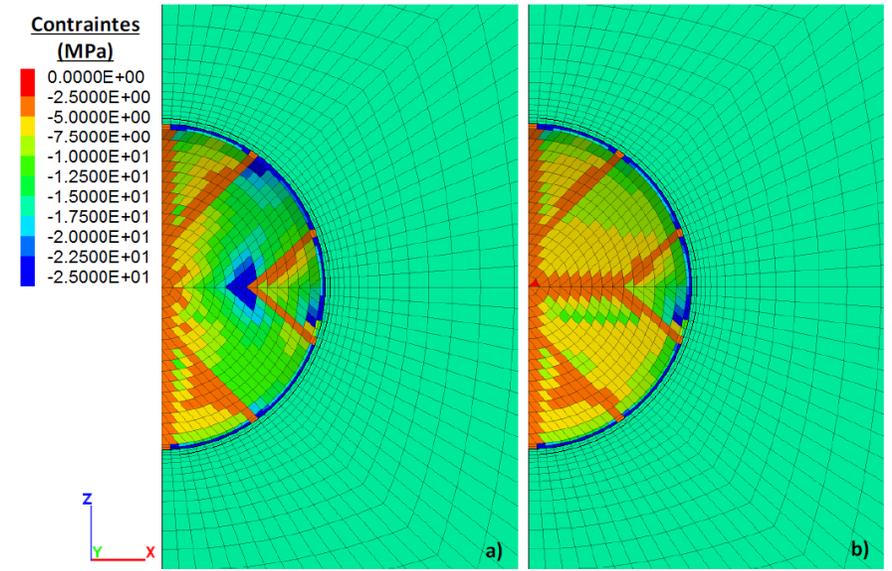
# Modélisations 3D : structures singulières

Galerie GRD6 (9.6m de diamètre) – creusement calotte-stross

Soutènement : béton projeté + cales compressibles puis revêtement



Vérification des cales



Influence de la disposition des cales au front

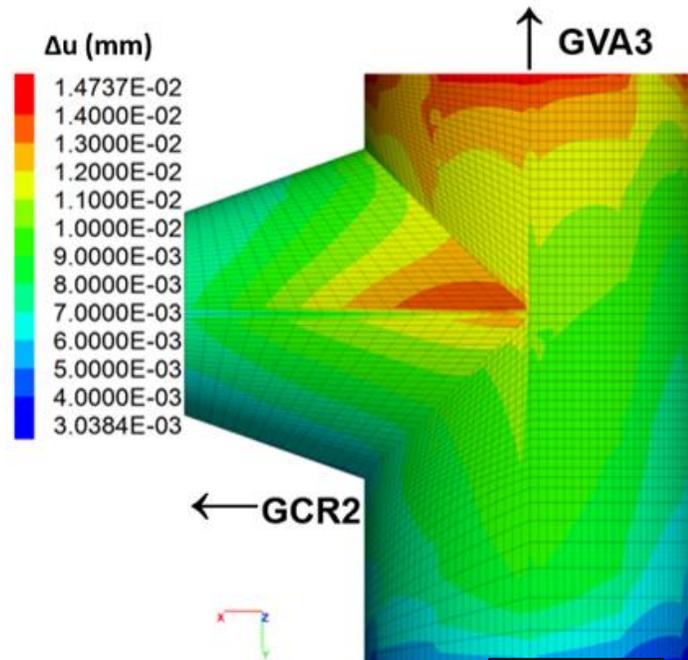
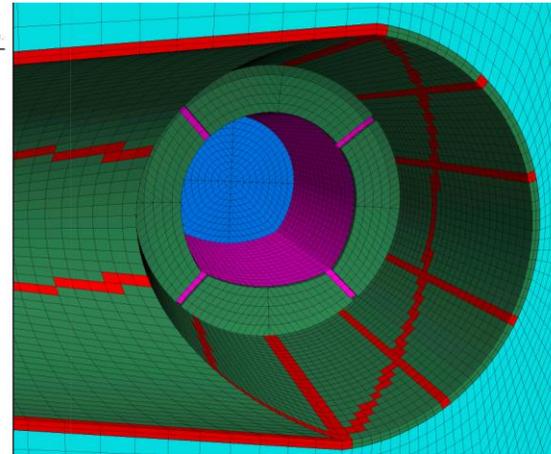
# Influence sur les structures existantes

## Carrefour GCR2-GVA2-GVA3

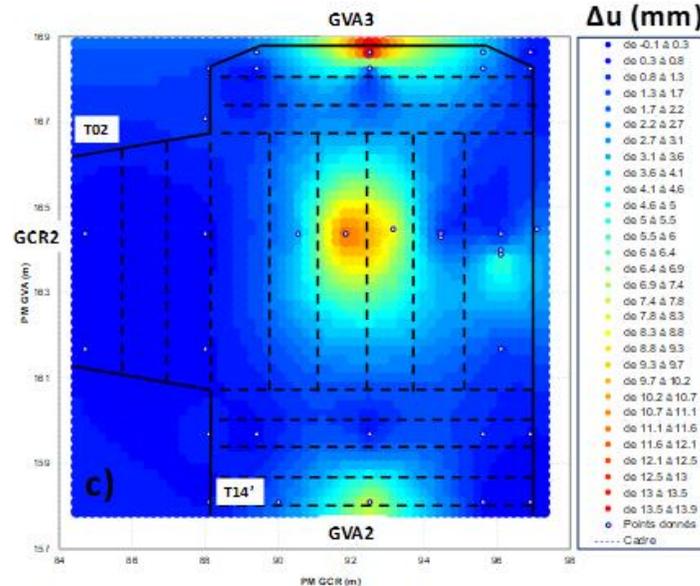
- diamètre = 8.8m
- 20 cm BP + cales compressibles

FLAC3D 6.00  
©2019 Itasca Consulting Group, Inc.

Zone Group  
 Default=BP  
 Default=Cale  
 Default=Excavation  
 Default=FrontGVA3  
 Default=Terrain



Calculs

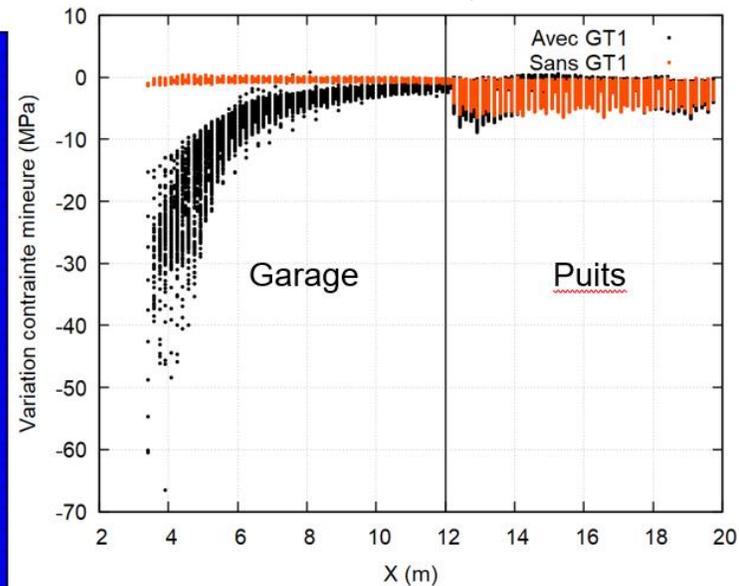
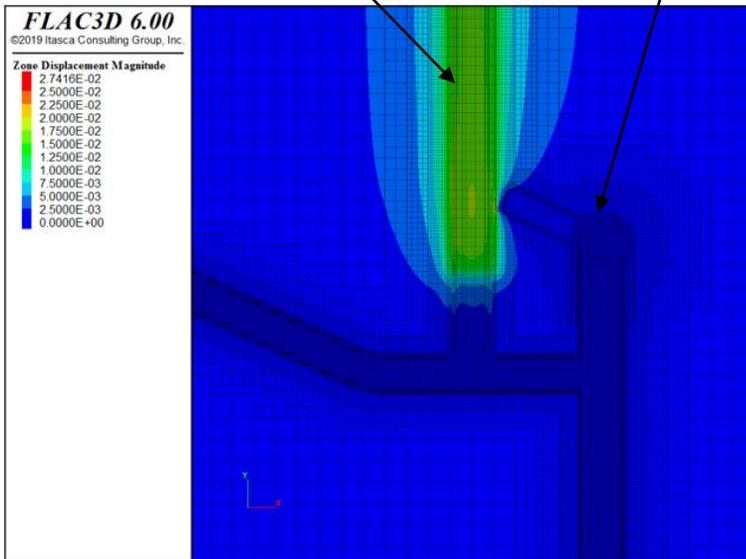
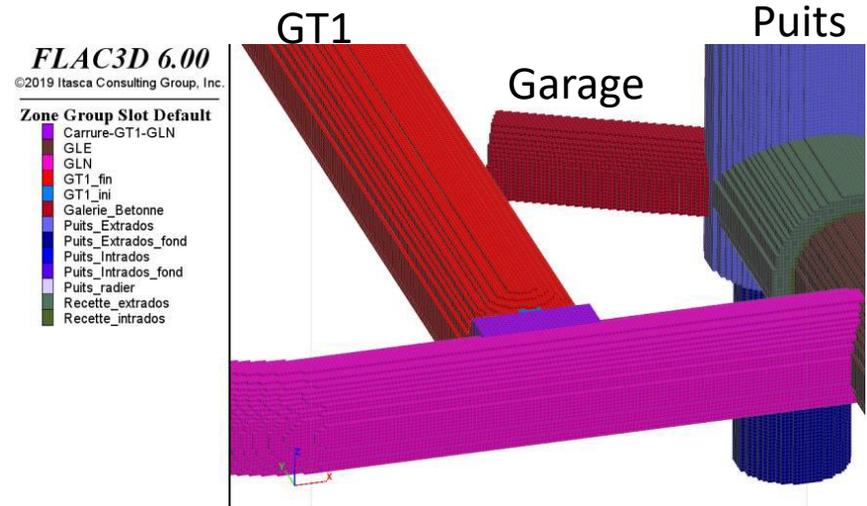


Mesures



# Influence sur les structures existantes

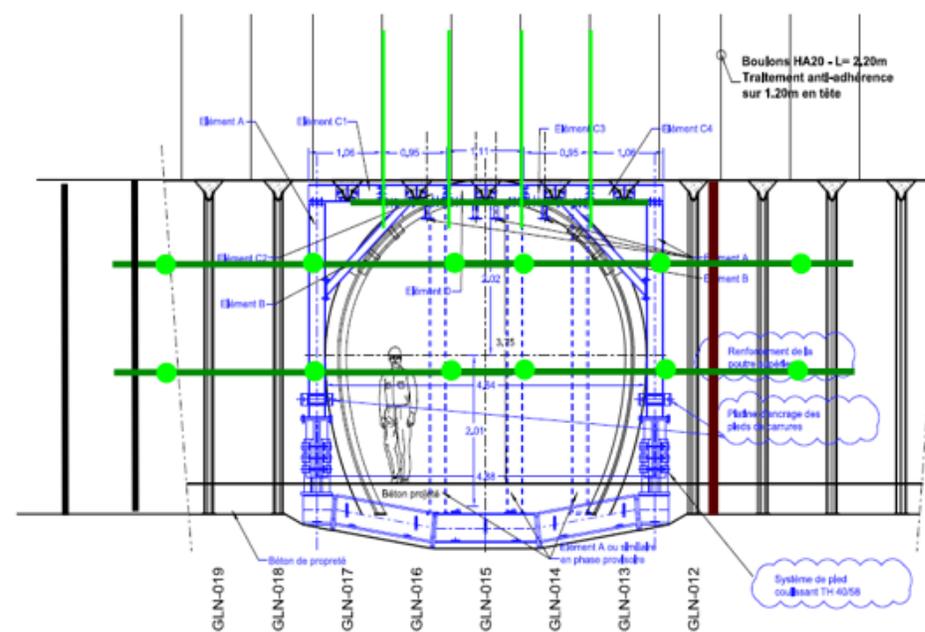
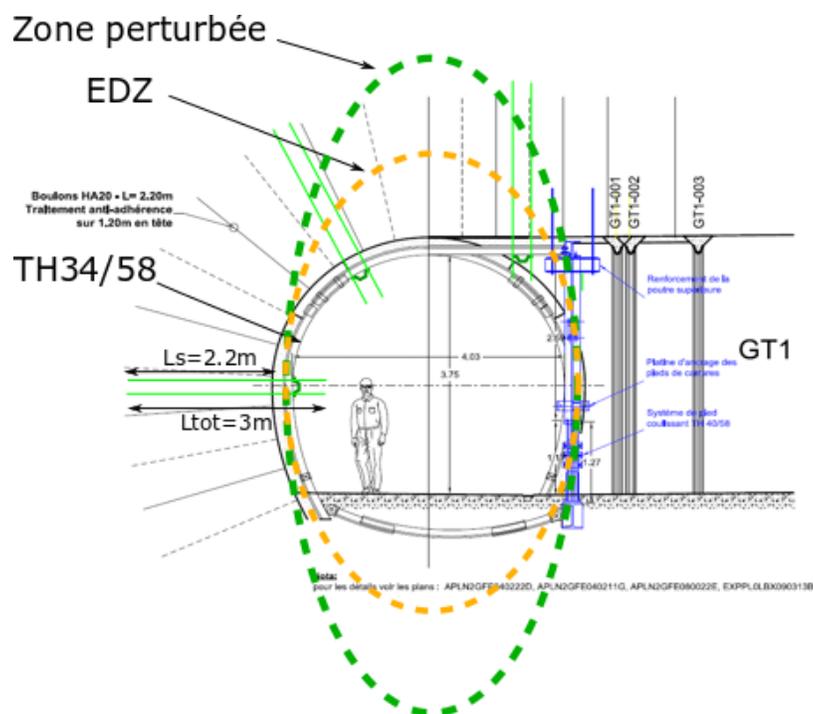
Galerie GT1 : interaction avec le puits PX





# Influence sur les structures existantes

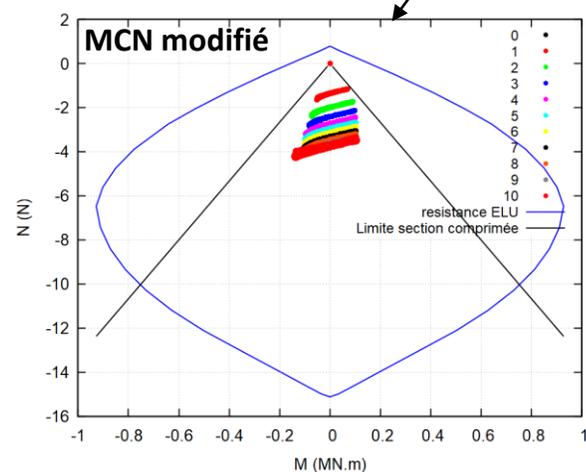
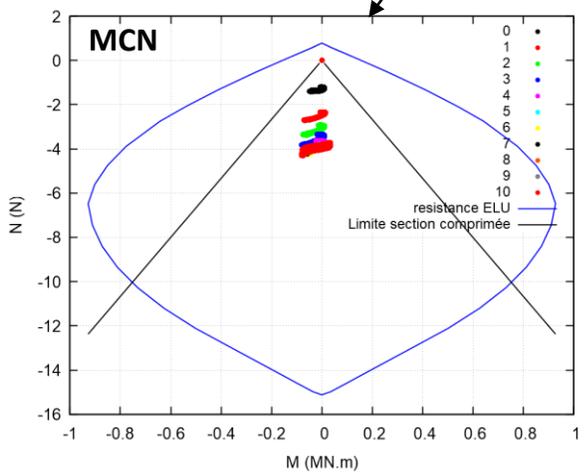
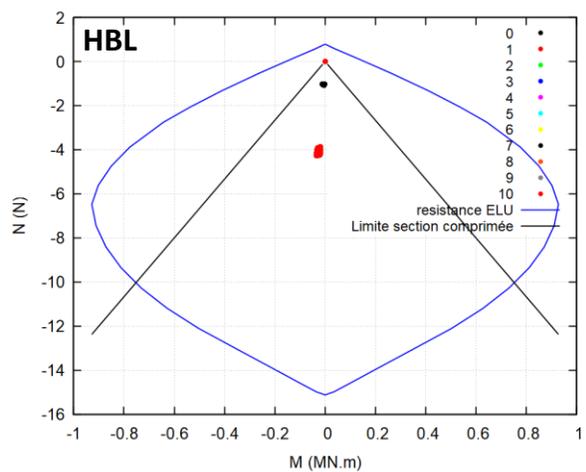
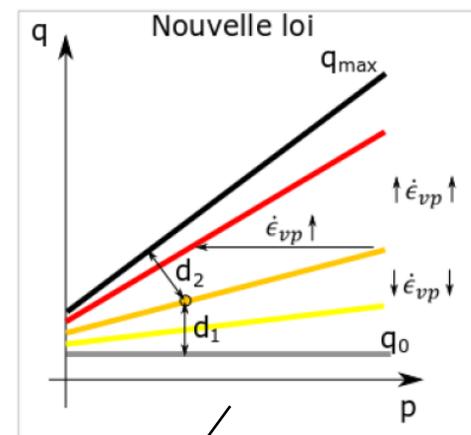
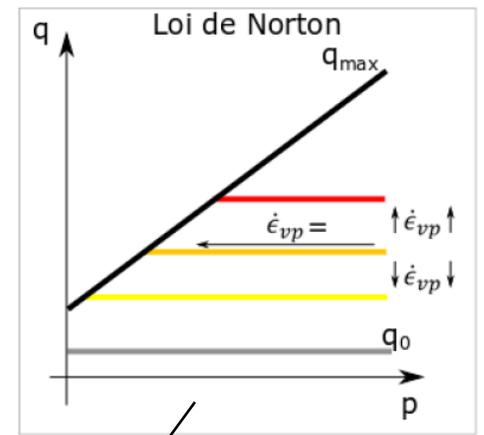
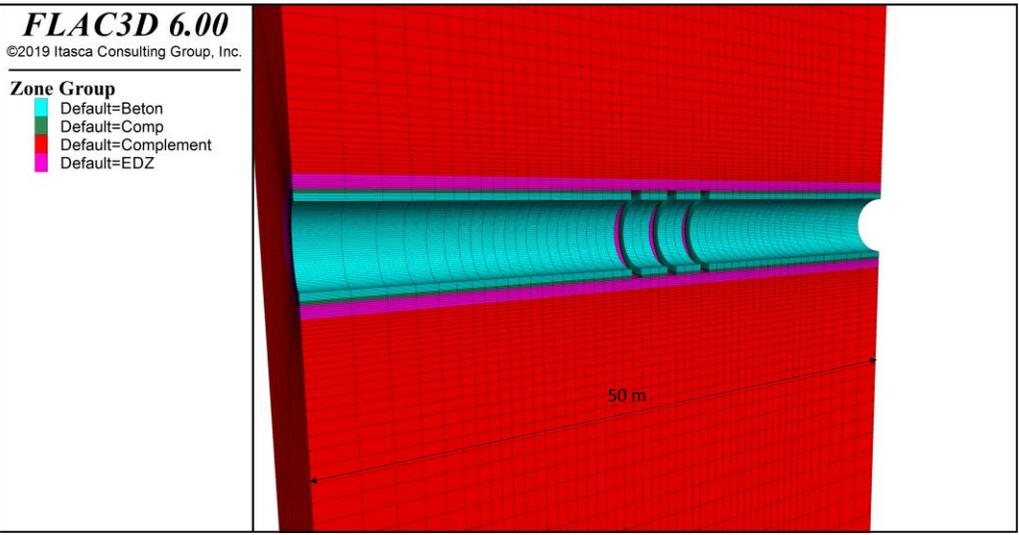
Interaction GT1-GLN : renforcement préventif permettant de soulager la carrure (profils métalliques ancrés par des boulons)





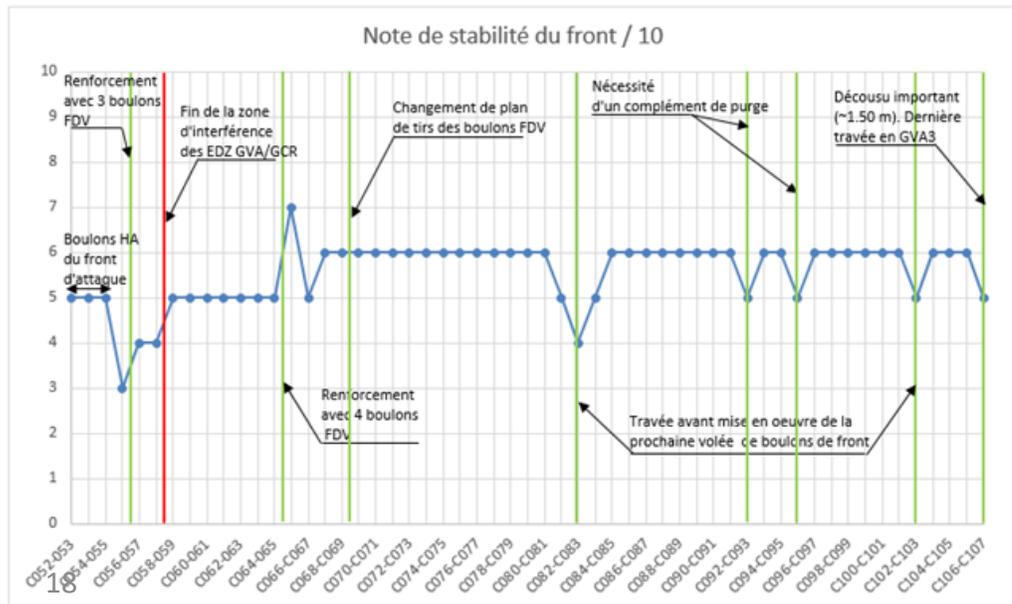
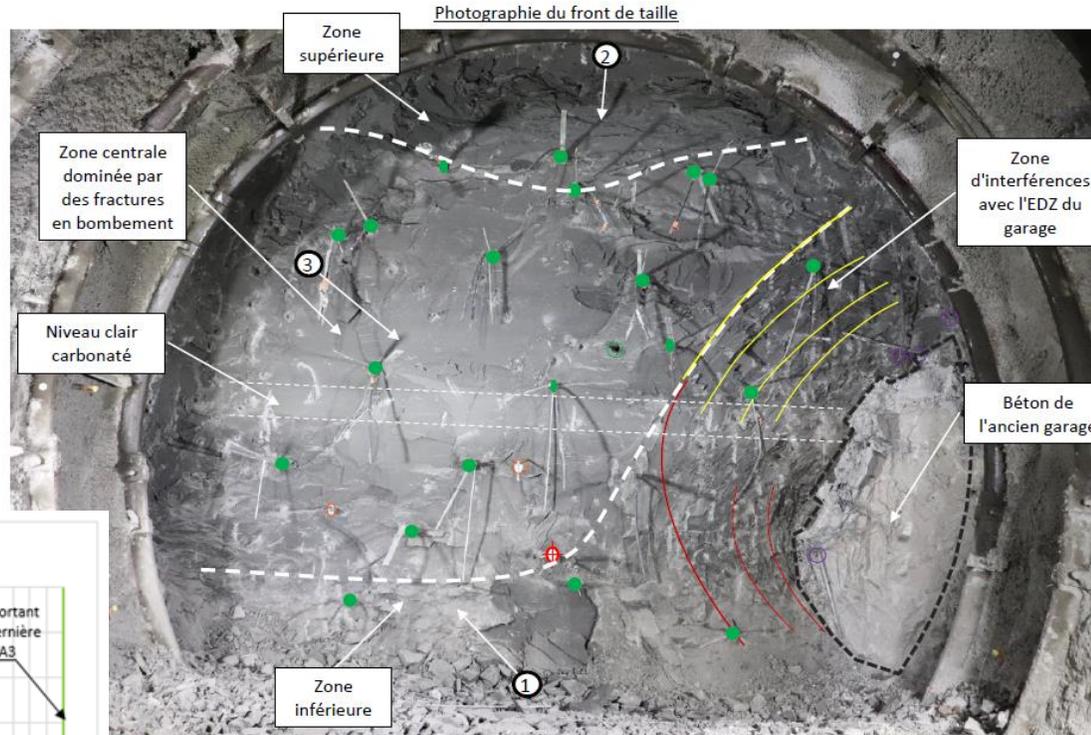
# Influence sur les structures existantes

## Dépose de voussoirs



# Suivi G3 « classique »

Levé de front + compléments  
Suivi des structures



XVI<sup>ÈME</sup> CONGRÈS INTERNATIONAL

**AFTES 2021** | Le souterrain, espace d'innovations

**6 AU 8 SEPTEMBRE**  
Palais des Congrès de Paris - FRANCE

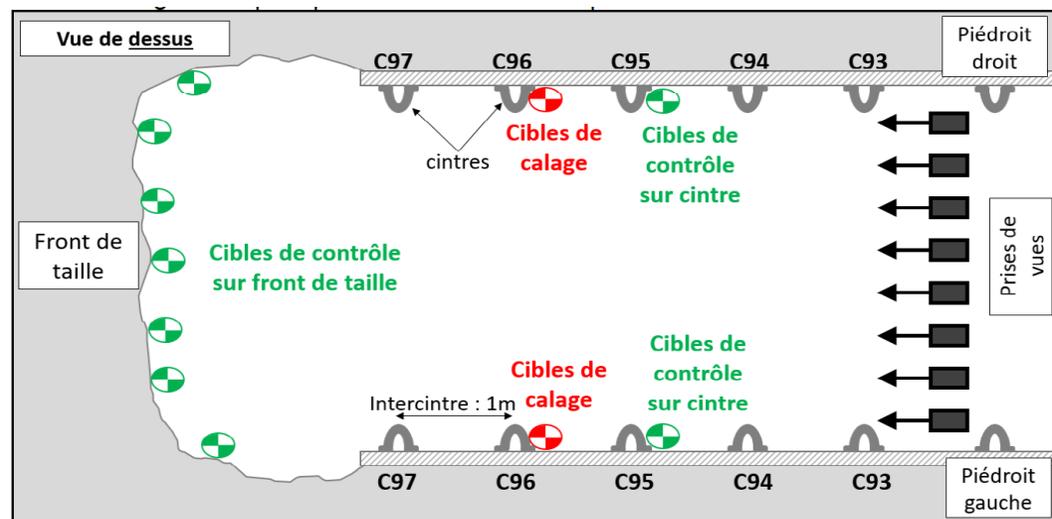
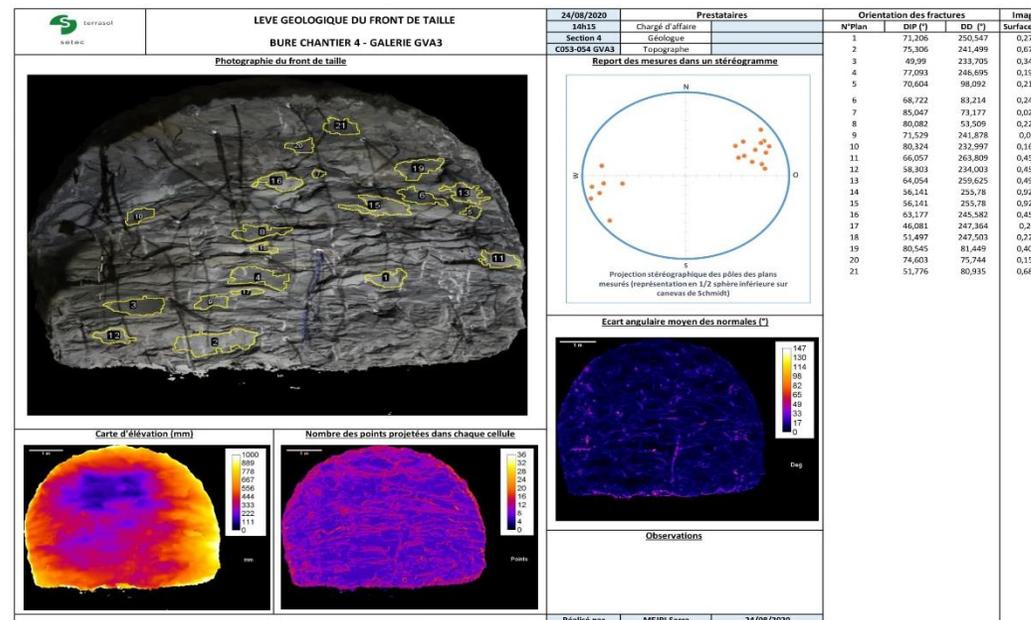
[www.aftes2021.fr](http://www.aftes2021.fr)

# Suivi G3

## Photogrammétrie – en développement

Acquisition et évaluation de la précision \*

Mesure semi-automatique des plans



# Conclusions

Vis-à-vis des calculs réalisés prenant en compte les effets différés :

- Soutènements souples : convergences bien estimées
- Interaction sol-structure : encore complexe à bien représenter

Plus généralement :

- Complémentarité étude/suivi et de leurs apports respectifs
- Calculs de dimensionnement vs mesures : permet de fiabiliser les approches de calcul et souligne l'importance d'une approche pragmatique face à la complexité des phénomènes.

Merci de votre attention

