



COMPORTEMENT DES TUNNELS EN TERRAIN POUSSANT

Modélisation des déformations différées anisotropes

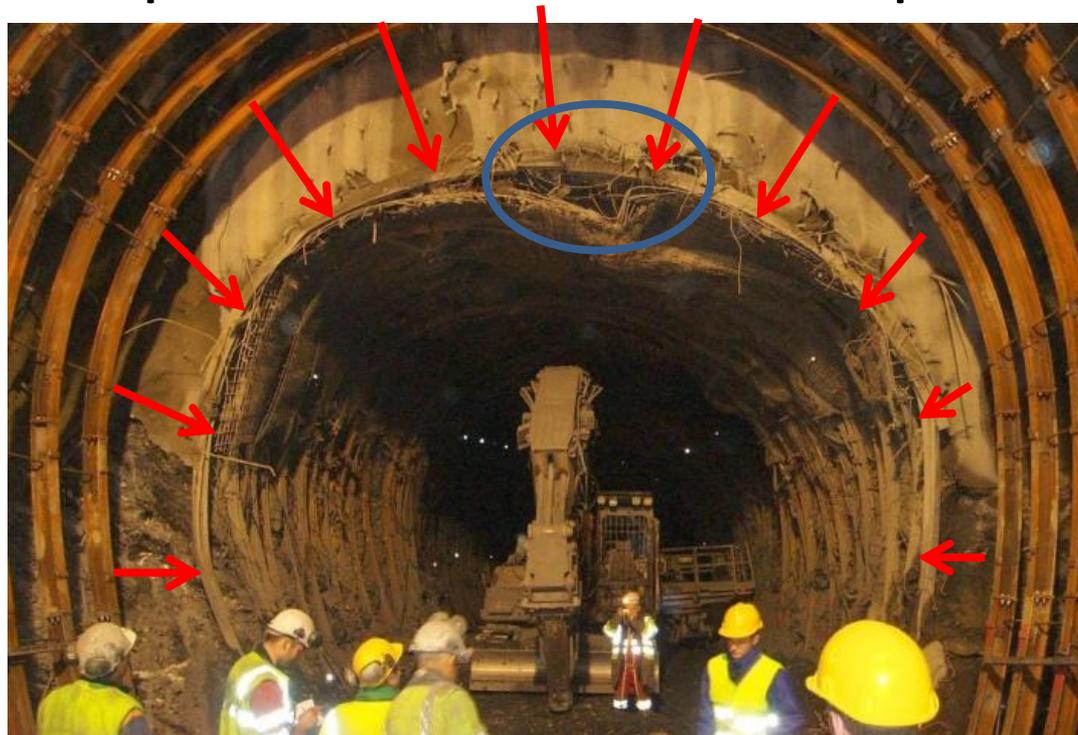
TRAN MANH HUY

Encadrants : **Prof. Jean SULEM** et **Dr. Didier SUBRIN**

Séance Technique du CFMR
Paris, 3 Décembre 2015

Contexte et objectifs

Comportement des tunnels en terrain poussant



- Grande déformation **différée** et souvent **anisotrope**
- Terrain de faible résistance et de forte déformabilité (**roche altérée et ductile**)
- Influence importante des **discontinuités** (plans de stratification et schistosité) - **Anisotropie**

Approche empirique

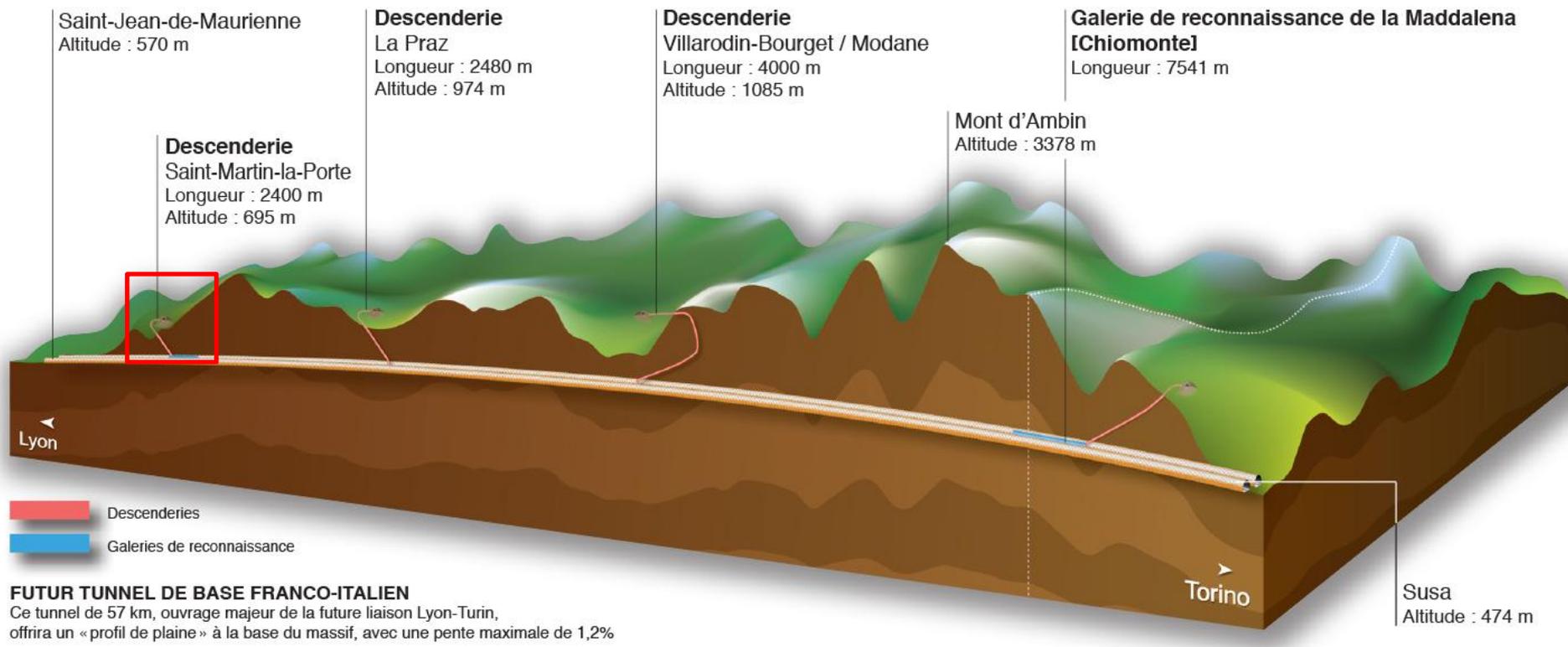
Approche analytique

Approche numérique

Sommaire

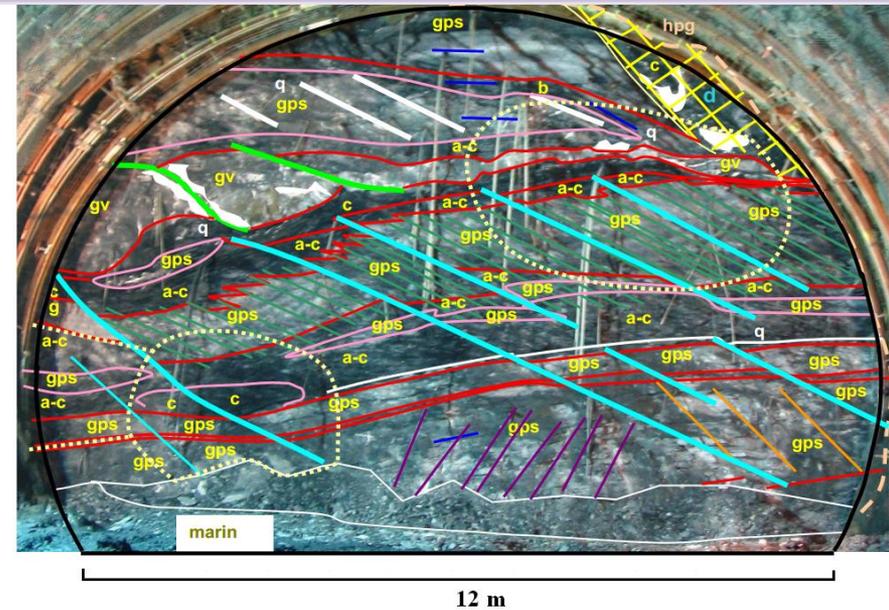
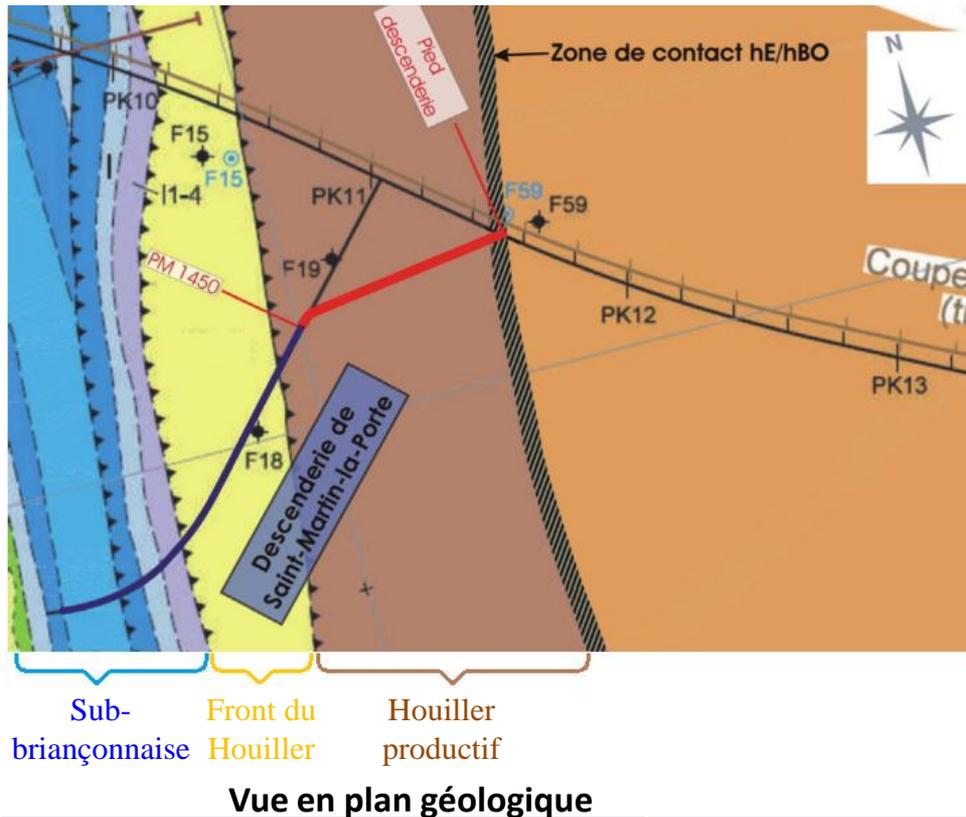
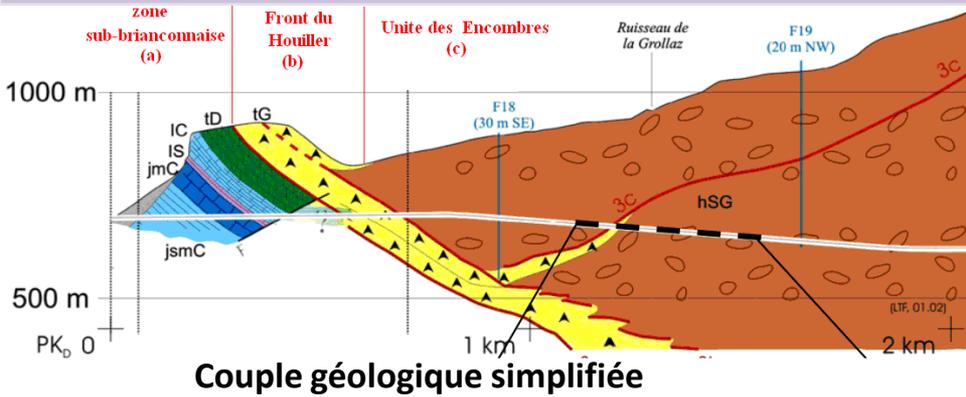
1. Cas d'étude, la descenderie de Saint-Martin-La-Porte
2. Analyse des données d'auscultation
3. Développements analytiques
4. Etudes numériques
5. Conclusions et perspectives

Tunnel de Base Lyon-Turin



- Ligne ferroviaire mixte (frets et voyageurs)
- Longueur: 57 km
- 4 descenderies: **Saint-Martin-La-Porte**, La Praz, Modane et La Maddalena

Contexte géologique

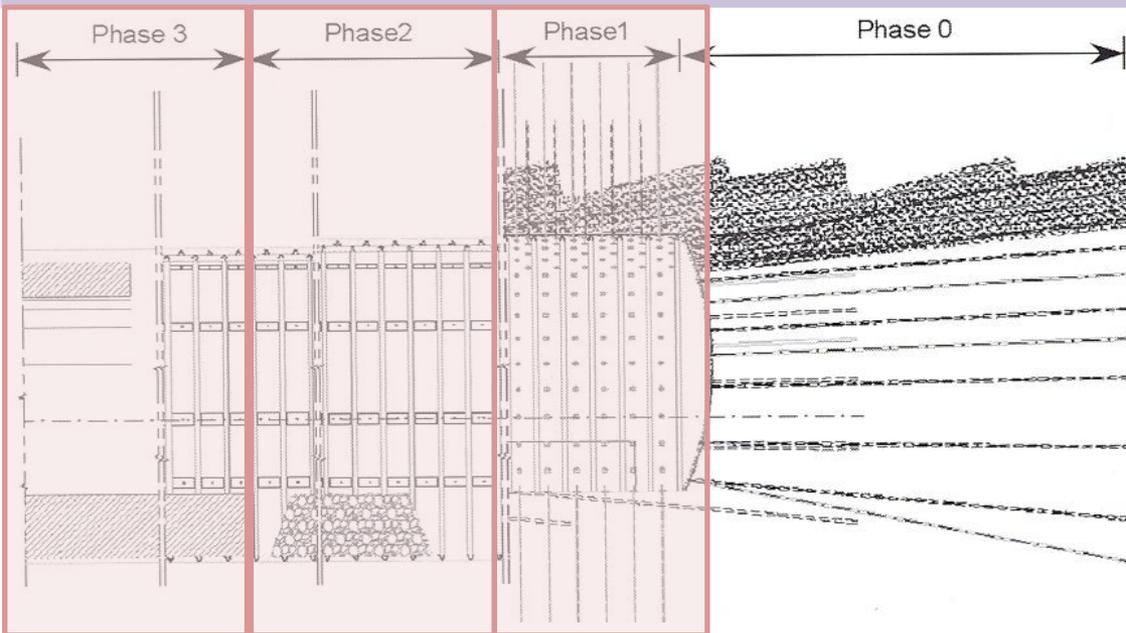


- Unité des Encombres à partir du PM 810:
- Fortement tectonisé, très hétérogènes
 - Alternances de schistes (45-55 %), de grès (40-50 %) et de charbon (5 %)

Terrain poussant

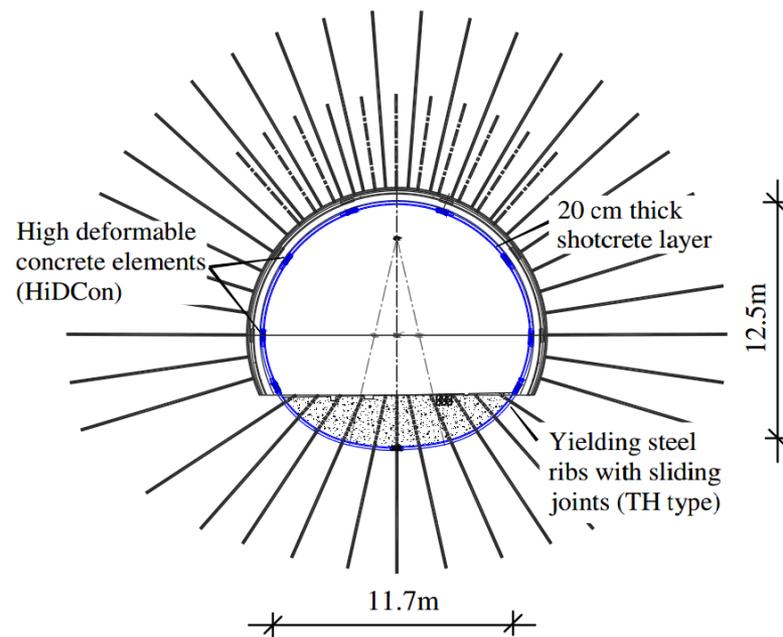
Rettighieri et al. (2008) Congrès international de Monaco

Profil de soutènement



Excavation mécanique , pas de 1m , cintre coulissant

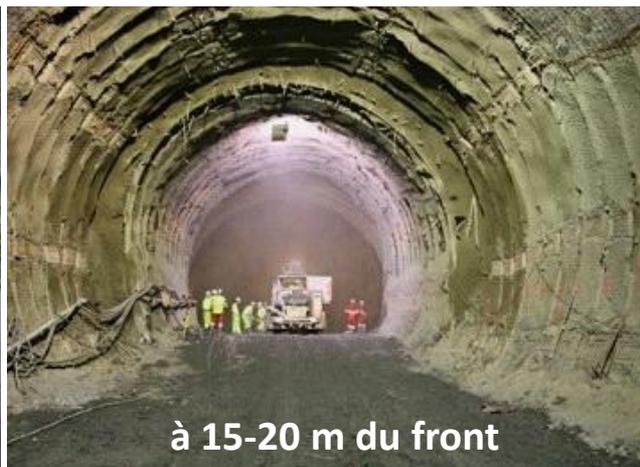
Reprofilage, béton projeté (20cm), éléments compressibles



Anneau en béton (1 m)



TRAN MANH Huy (CETU/ENPC)



à 15-20 m du front

Tunnels en terrain poussant



à 80 m du front

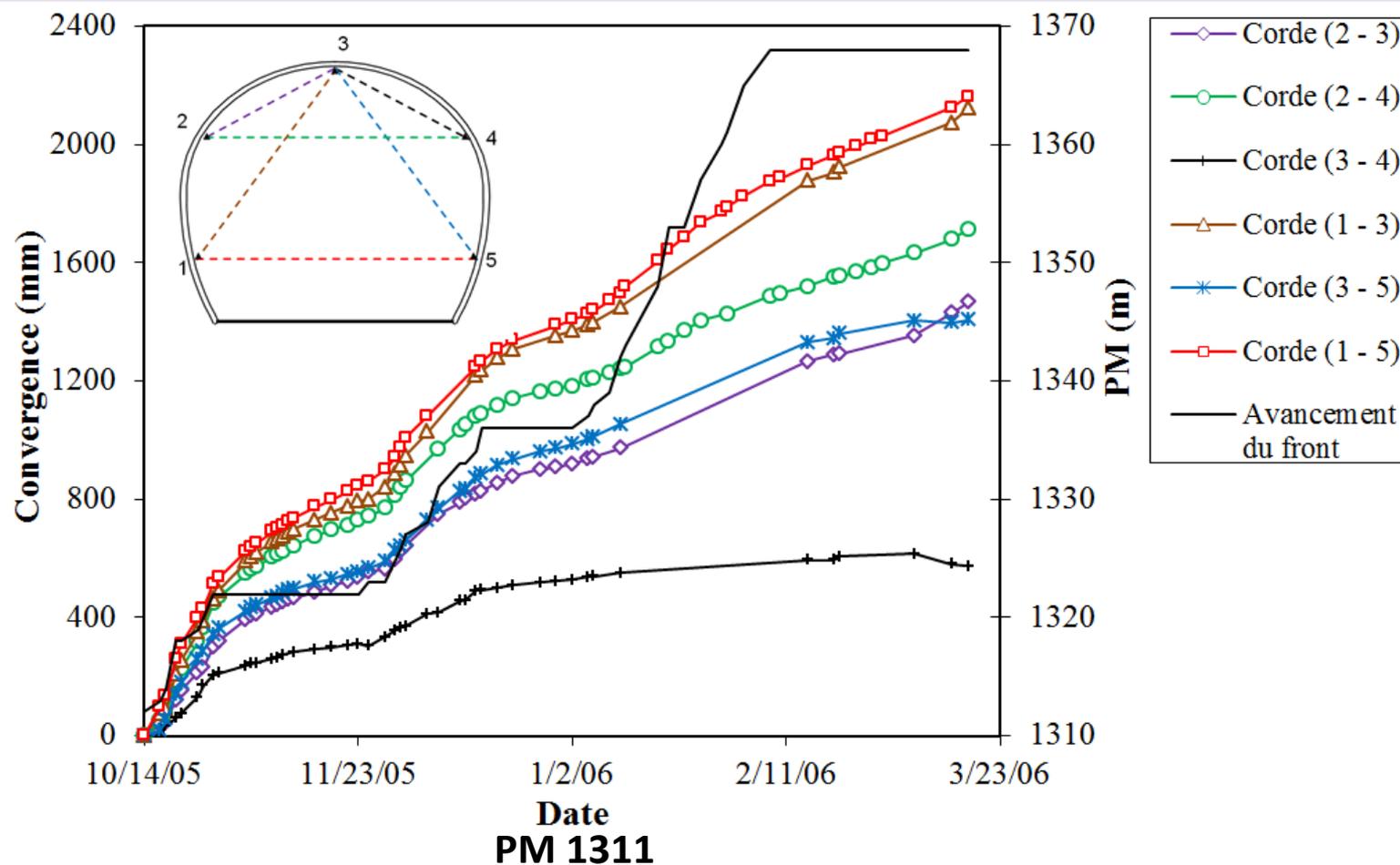
Paris, 3 Décembre 2015

6/28

Sommaire

1. Cas d'étude
2. Analyse des données d'auscultation
3. Développements analytiques
4. Etudes numériques
5. Conclusions

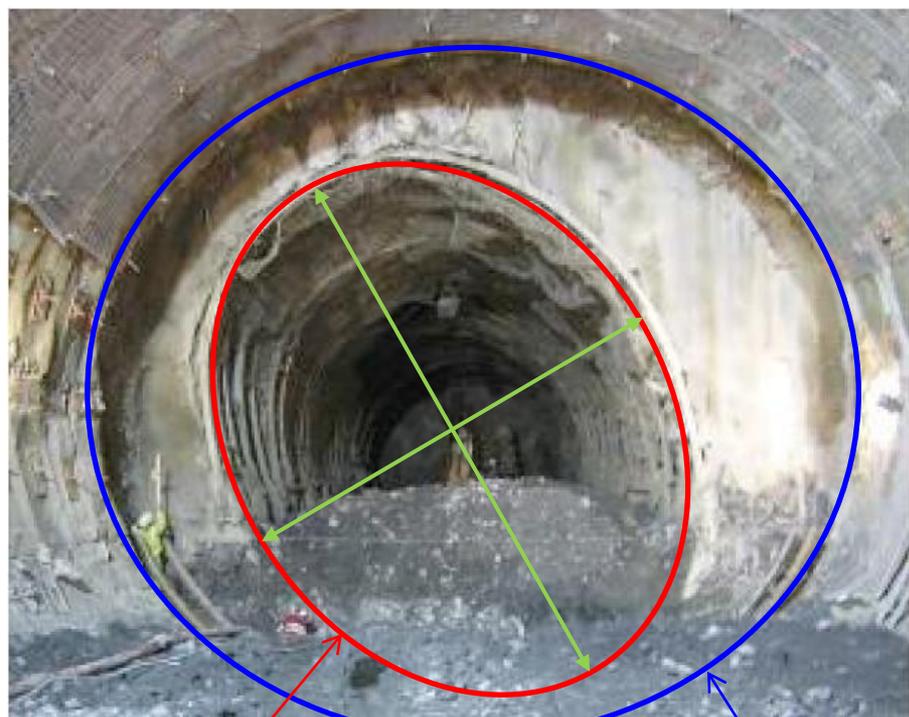
Mesure de convergence



- Forte convergence, dépasse les 2m
- Convergence anisotrope
- Comportement différencié marqué
- Zone d'influence du front très large
- Pas de stabilisation après 5 mois

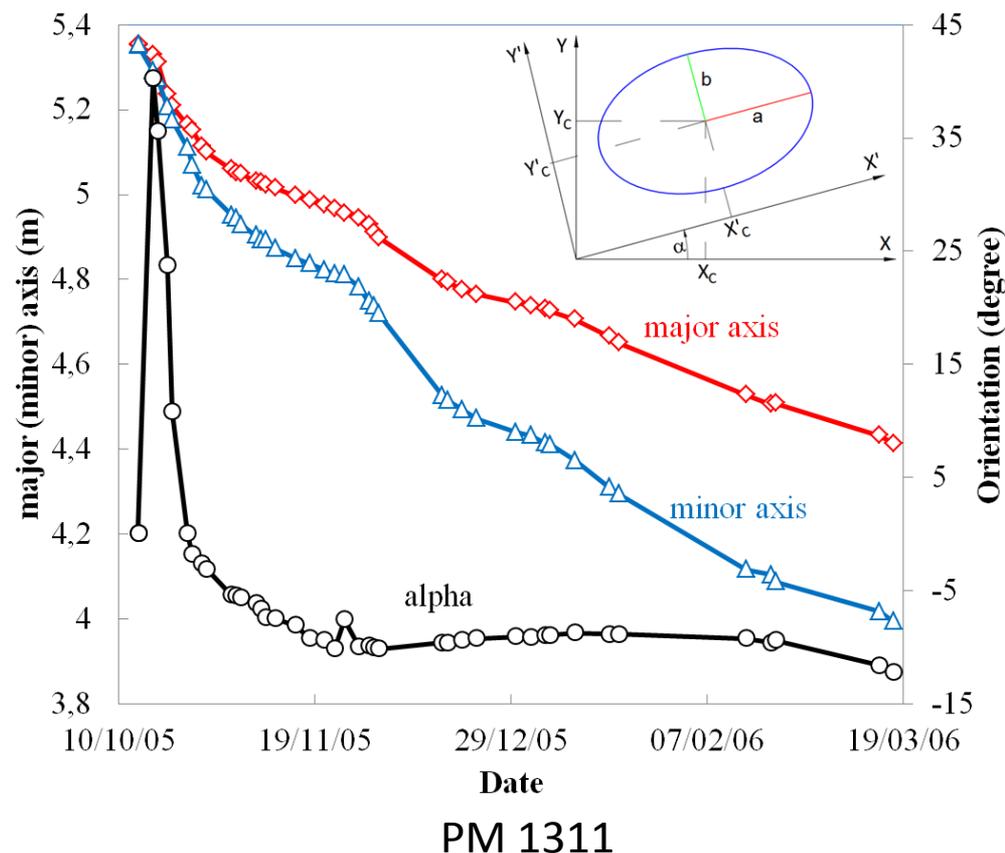
Traitement géométrique des données de convergence

- Projection de la position des plots des convergence sur le plan moyen vertical de la section considérée
- Approximation elliptique de la forme de la section déformée



Section déformée

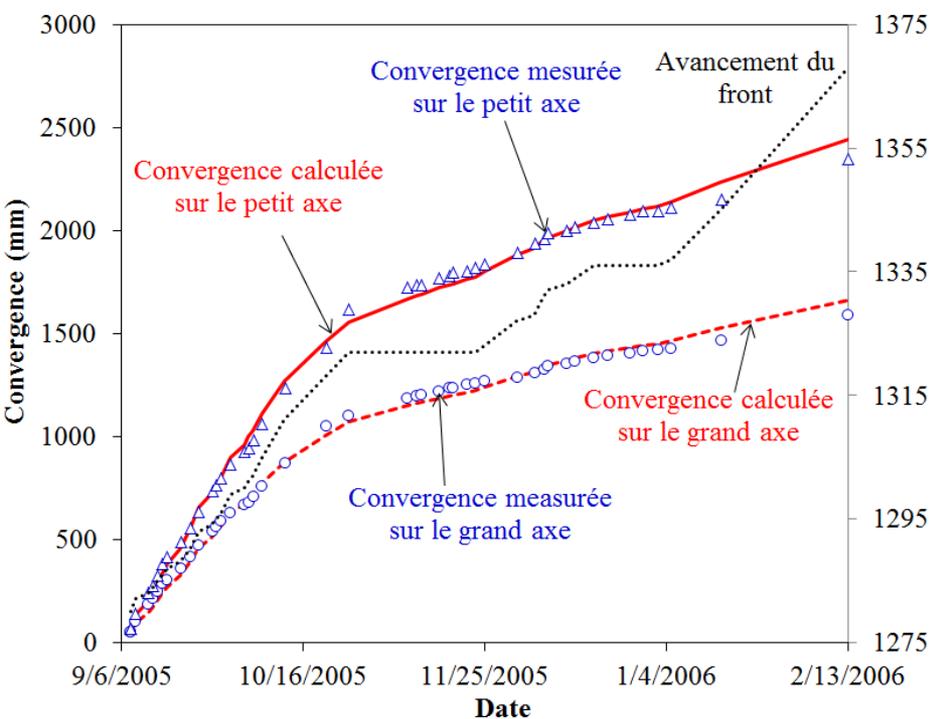
Section initiale



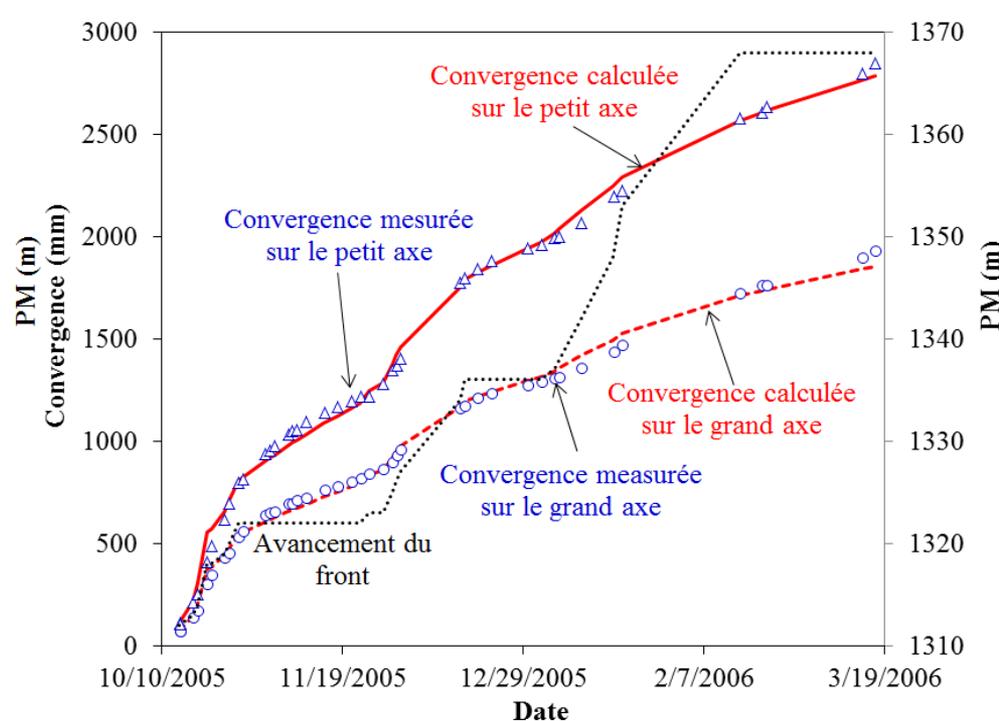
Calage des données de convergence

Loi de convergence de Sulem et al., 1987:

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



PM 1278



PM 1311

Zones quasi-homogènes

Paramètres de la loi de convergence entre PM1250 et PM1385

PM	T (days)	m	Grand axe			Petit axe		
			X (m)	$C_{\infty x}$ (m)	C_{total} (m)	X (m)	$C_{\infty x}$ (m)	C_{total} (m)
1272			23	0.20	1.97	39	0.43	4.23
1278			34	0.33	3.20	36	0.49	4.74
1284	16	8.8	16	0.32	3.12	46	0.70	6.78
1291			15	0.32	3.15	39	0.64	6.23
1297			14	0.32	3.15	22	0.66	6.39
1311			13	0.50	5.31	13	0.75	7.99
1322	71	9.6	24	0.48	5.12	24	0.60	6.36
1331			34	0.46	4.88	57	0.62	6.57
1342			14	0.48	5.13	14	0.61	6.46
1367			37	0.30	3.74	37	0.61	7.67
1375	117	11.5	5	0.24	2.93	6	0.54	6.72
1384			31	0.40	4.93	32	0.75	9.40

Sommaire

1. Cas d'étude
2. Analyse des données d'auscultation
3. Développements analytiques
4. Etudes numériques
5. Conclusions

Problématique

Relation constitutive

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix}$$

S_{ij} : coefficients de souplesse

Fonction d'Airy

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}, \sigma_y = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}, \tau_{xy} = -\frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y}$$

Compatibilité de déformation

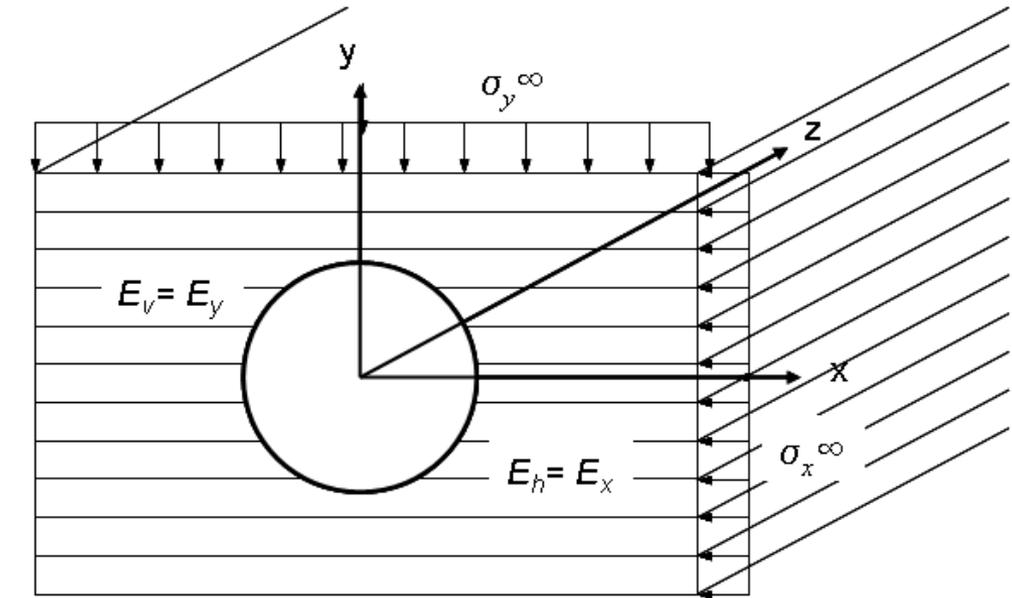
$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \alpha_1 \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \alpha_2 \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) U = 0$$

$$\alpha_1 \alpha_2 = \frac{S_{11}}{S_{22}} \quad \text{and} \quad \alpha_1 + \alpha_2 = \frac{S_{33} + 2S_{12}}{S_{22}}$$

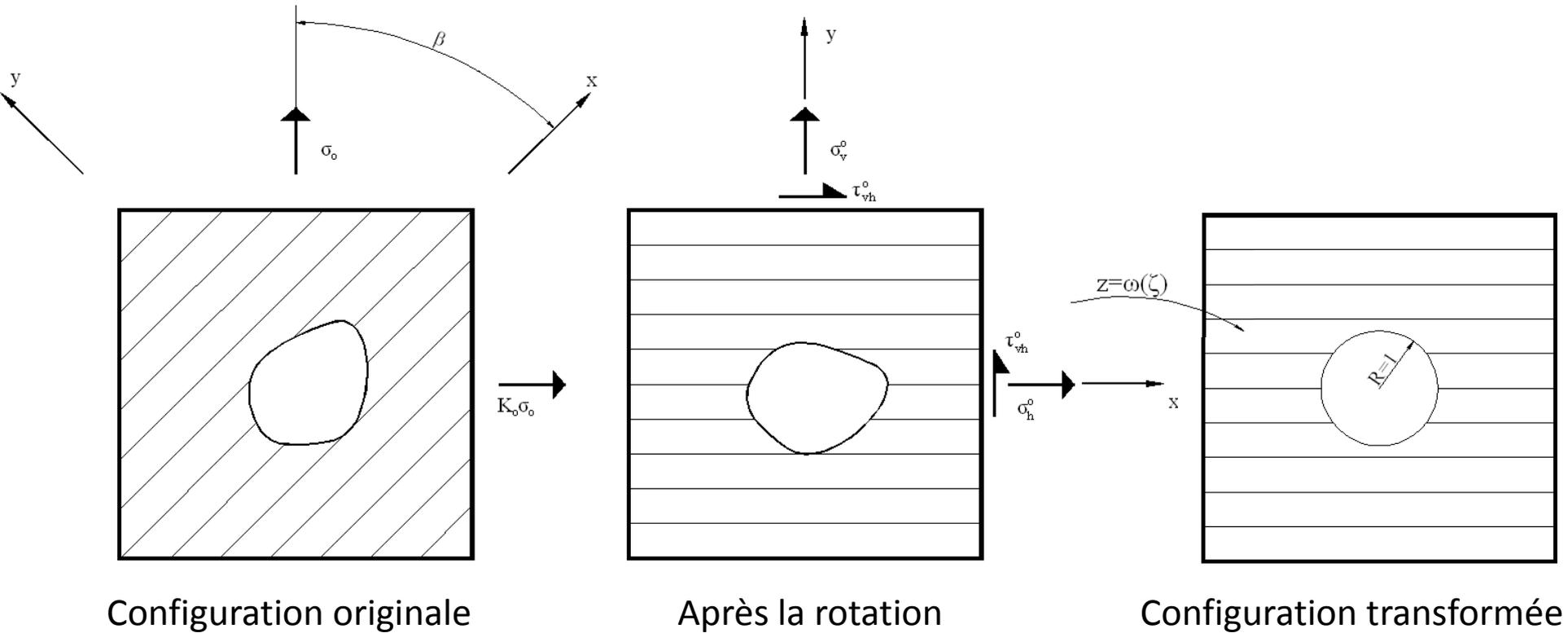
Méthode des variables complexes

$$U = \sum_{k=1}^2 \left(\Omega_k(z_k) + \overline{\Omega_k(\bar{z}_k)} \right)$$

$$\Omega'_k(z_k) = \sum_{n=1}^{\infty} A_{kn} (z_k)^{-n}$$



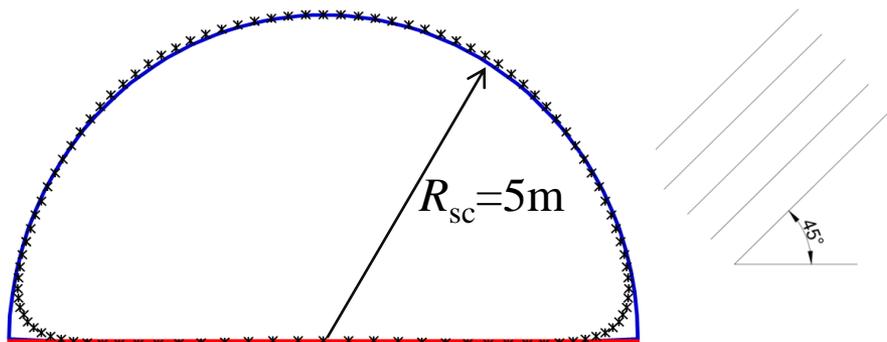
Tunnel de section quelconque



Fonction de transformation conforme

$$z = \omega(\zeta) = R \left[\zeta + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \zeta^{-n} \right]$$

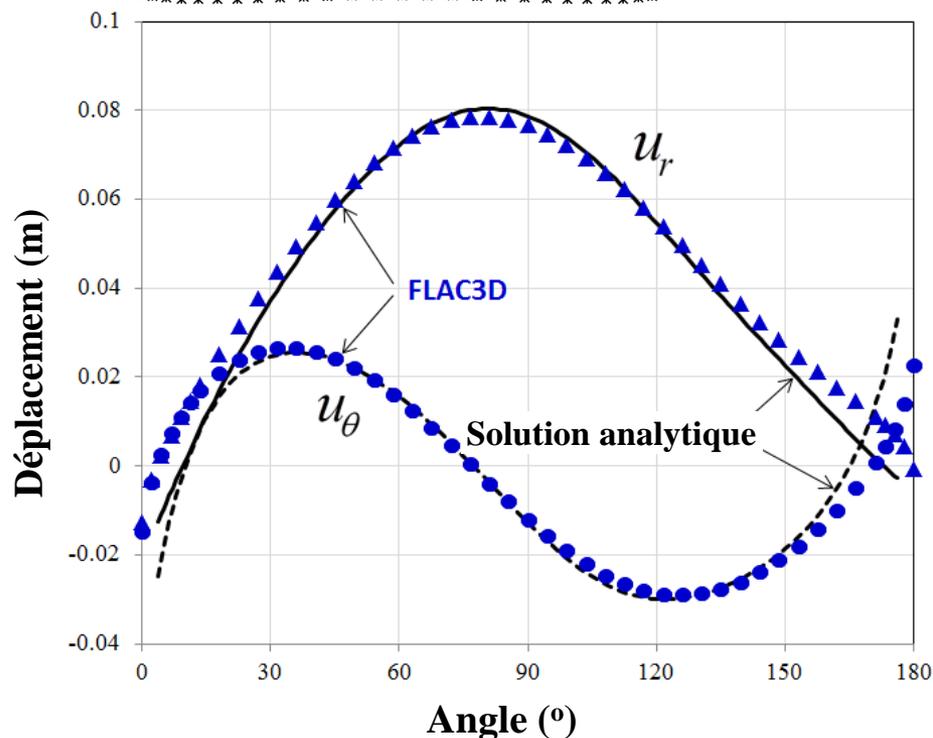
Exemple d'un tunnel de section semi-circulaire



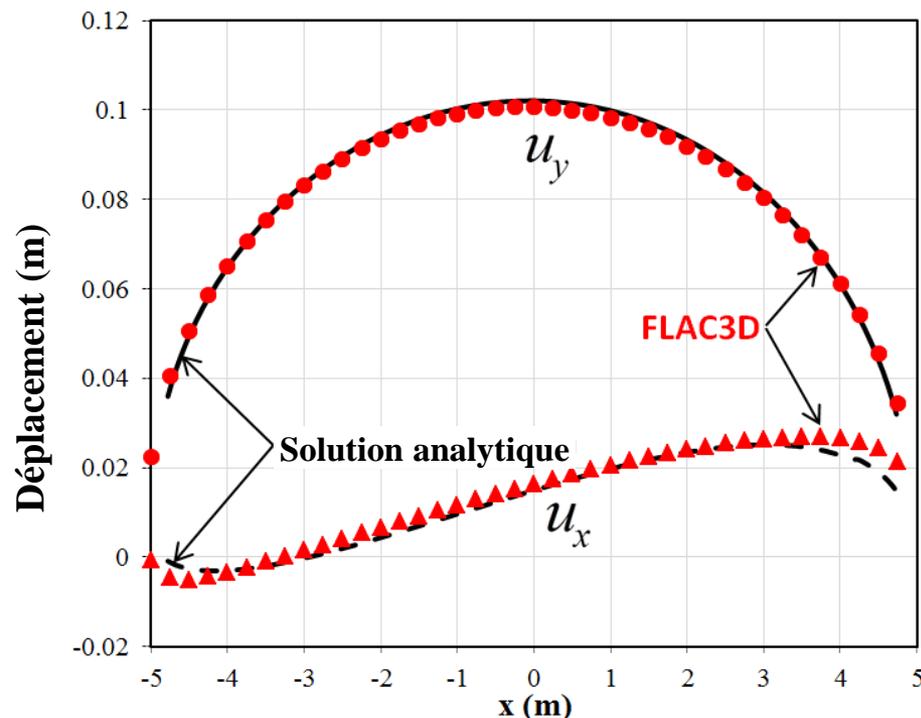
$$z = z(\zeta) = R(\zeta + a_1\zeta^{-1} + a_2\zeta^{-2} + a_3\zeta^{-3})$$

$$R = 3.8052$$

$$a_1 = 0.3040 \quad a_2 = -0.1372i \quad a_3 = -0.0390$$



Angle (°)
En voûte



En radier

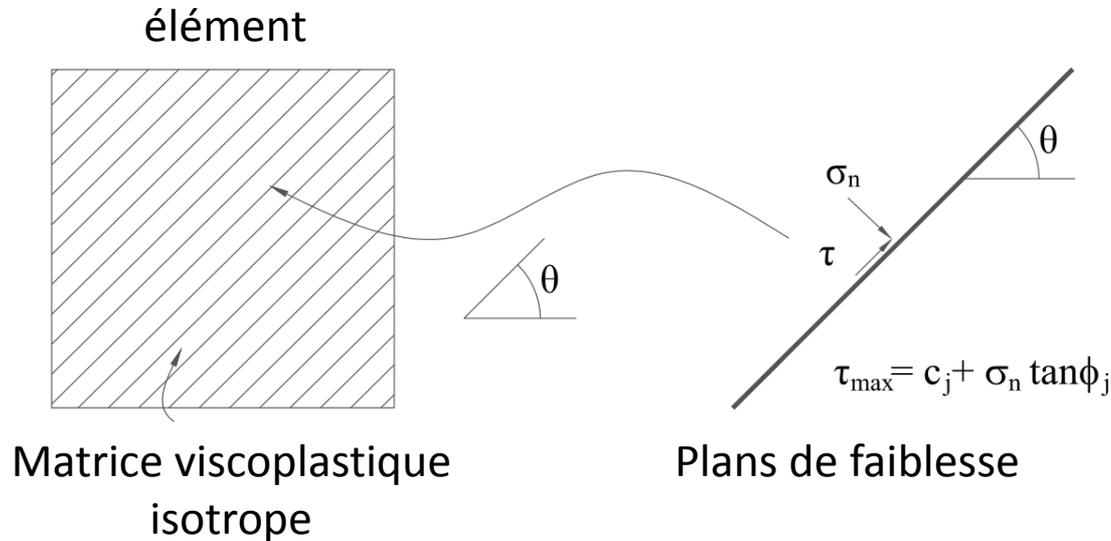
$$E_h = 620\text{MPa} \quad E_v = 340\text{MPa} \quad G_v = 200\text{MPa} \quad \nu_h = 0.12 \quad \nu_{hv} = 0.2 \quad \sigma_0 = 5\text{MPa} \quad K_0 = 0.75$$

Sommaire

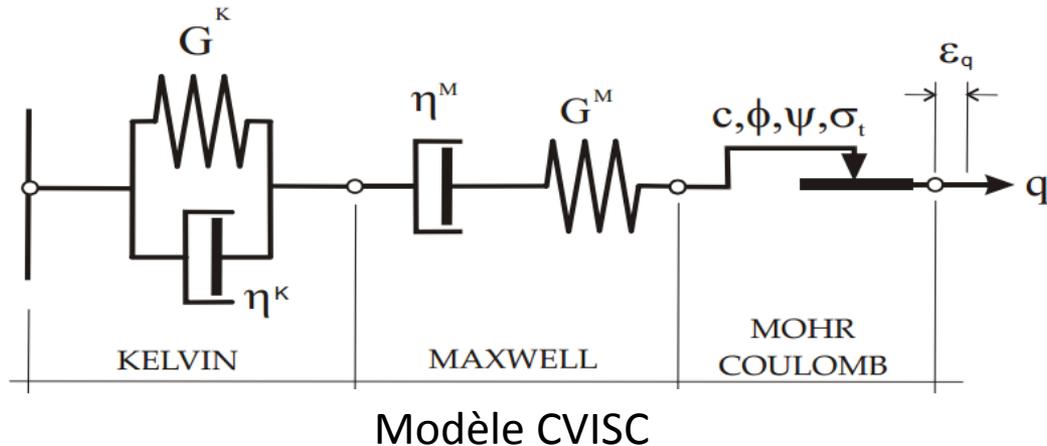
1. Cas d'étude
2. Analyse des données d'auscultation
3. Développements analytiques
4. Etudes numériques
5. Conclusions

Comportement différencié anisotrope

Approche pseudo-discontinue: Joints omniprésents (« ubiquitous joints ») avec une orientation fixe imbriqués dans une matrice viscoplastique isotrope



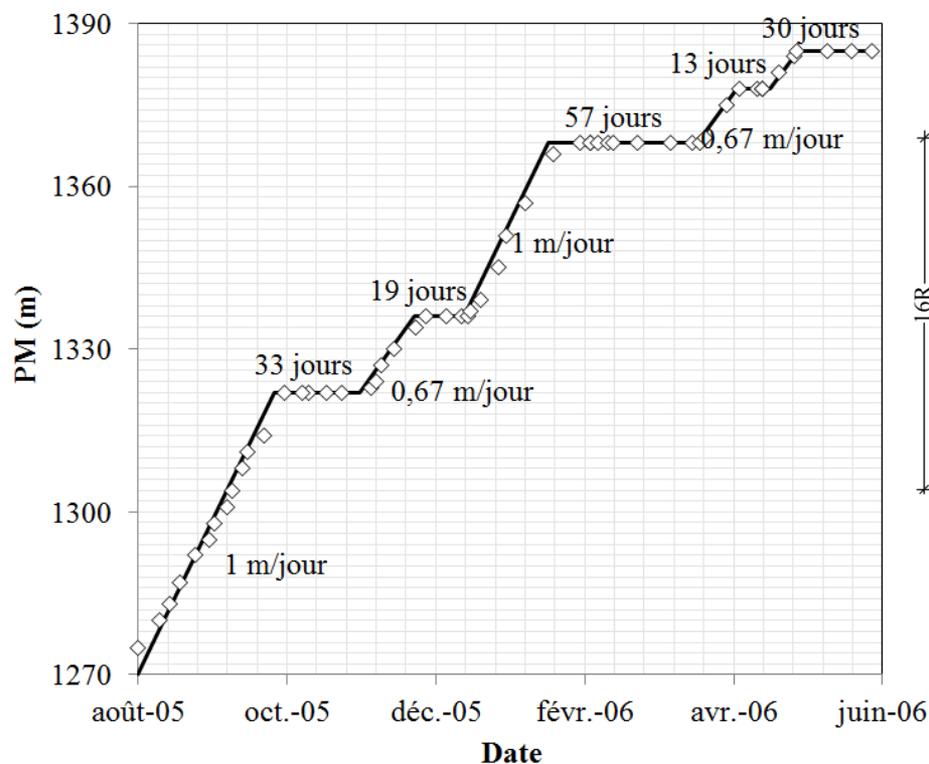
13 paramètres constitutifs:
 -9 pour la matrice solide
 -4 pour les joints



Degré d'anisotropie

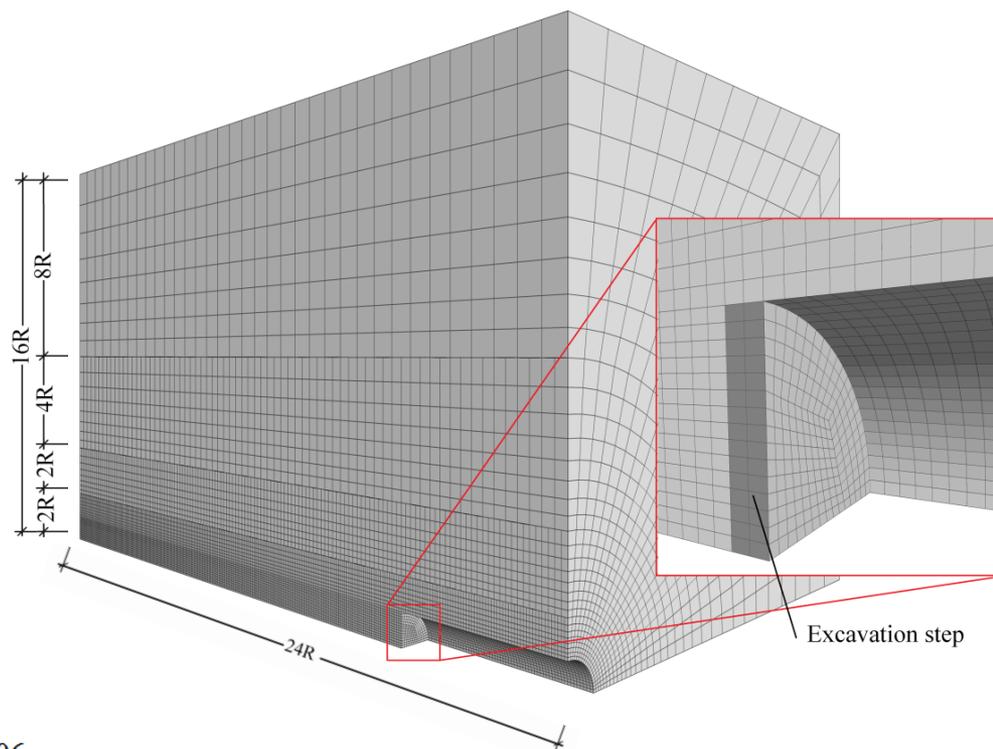
$$m = \frac{c + \sigma_n \tan \phi}{c_j + \sigma_n \tan \phi_j}$$

Simulation numérique



Avancement du front dans le tronçon étudié

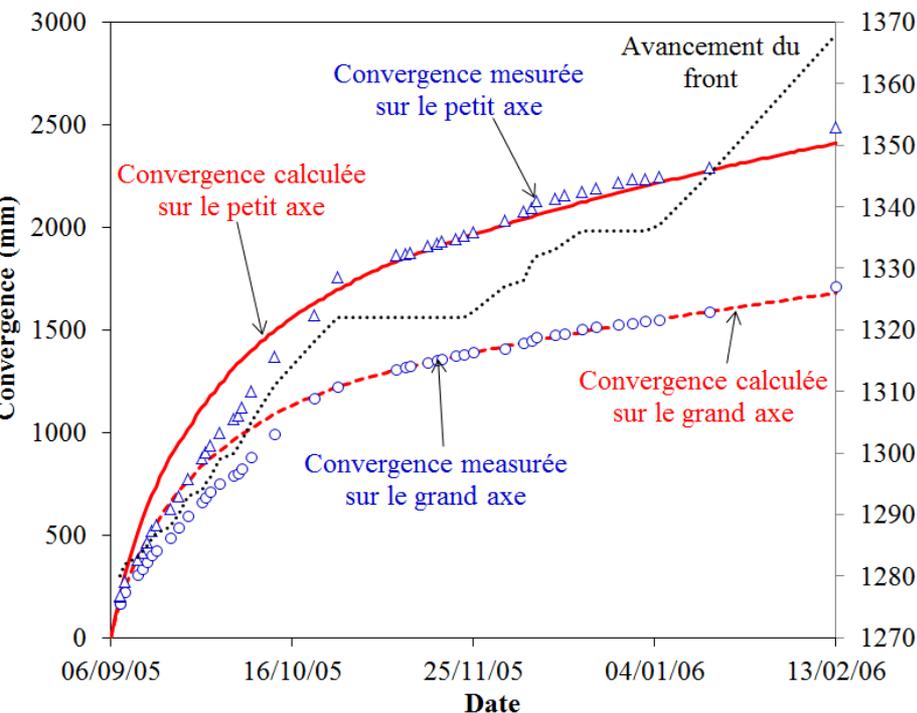
- Tronçon de forte convergence entre PM1250-PM1385
- Rayon équivalent de la section $R = 5.5$ m
- État de contrainte initiale 8.5 MPa
- Influence du soutènement souple est négligée
- Calcul en grande déformation



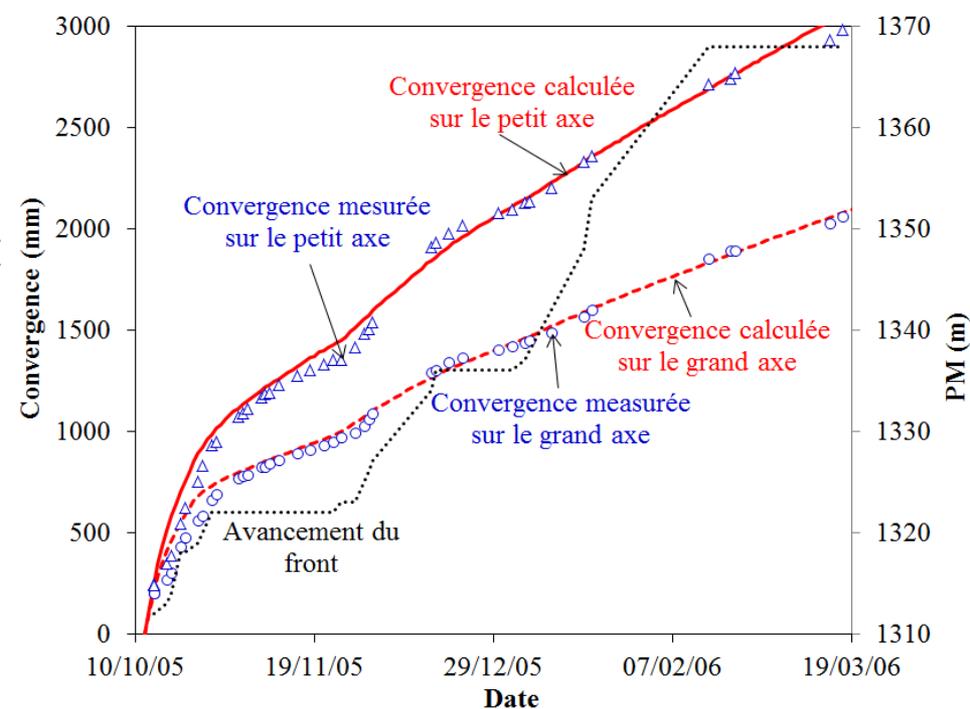
Maillage tridimensionnel

Résultats numériques (1/2)

Déplacement en paroi du tunnel



au PM1278



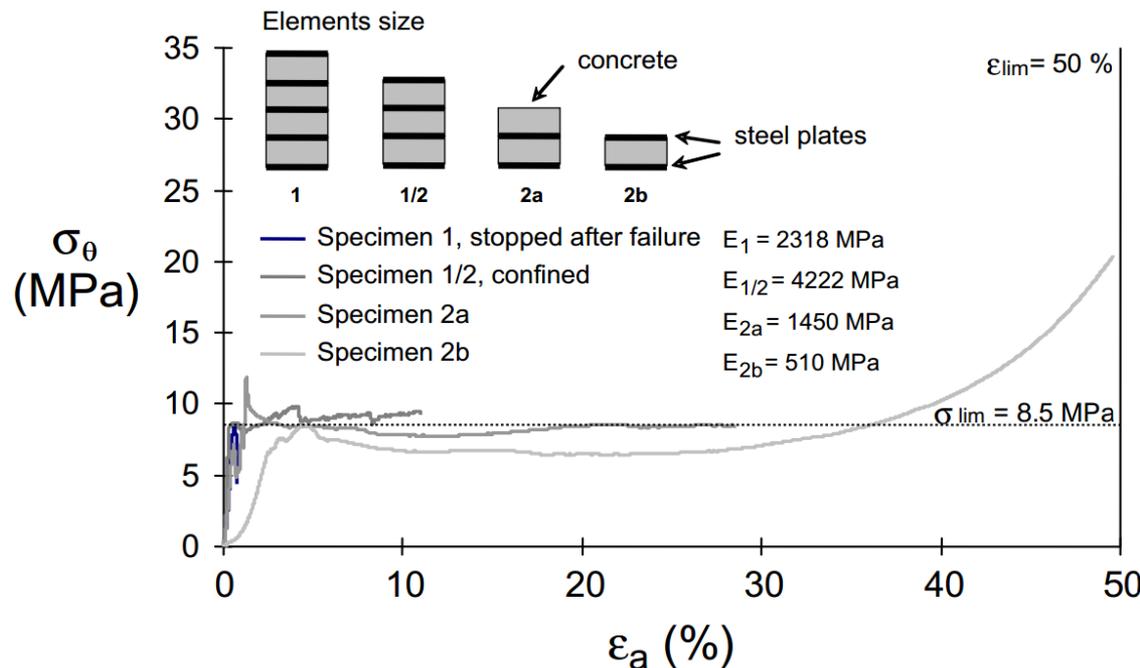
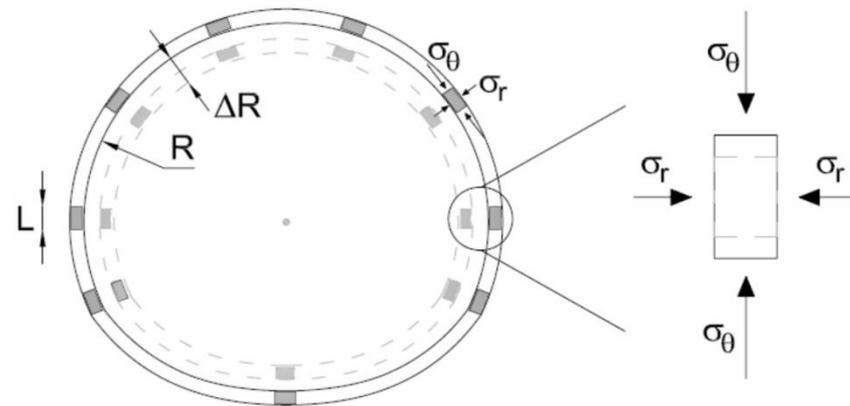
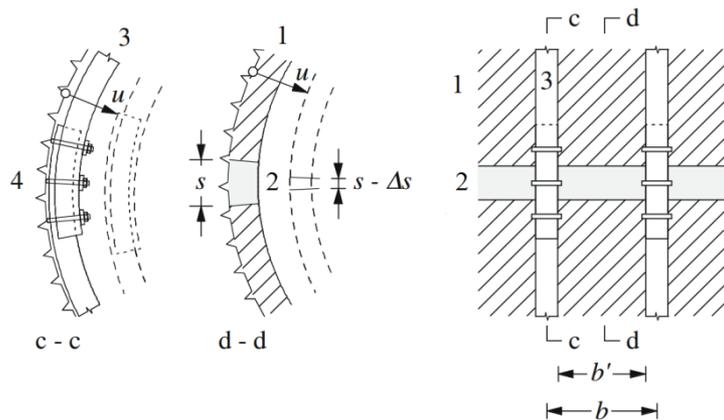
au PM1311

Résultats numériques (2/2)

Paramètres constitutifs du modèle proposé entre PM1250 et PM1385

PM	Matrice solide						Joints						
	E MPa	ν -	G^K MPa	η^K GPa.day	η^M GPa.day	c MPa	ϕ °	σ_t MPa	ψ °	c_j MPa	ϕ_j °	σ_{tj} MPa	ψ_j °
1272						0.80				0.25			
1278						0.45				0.35			
1284	650	0.3	250	6.25	35.00	0.40	26	0.01	0	0.18	23	0.01	0
1291						0.42				0.25			
1297						0.45				0.20			
1311						0.65				0.45			
1331	650	0.3	250	1.25	10.00	0.70	26	0.01	0	0.50	23	0.01	0
1342						0.73				0.70			
1367						1.55				0.40			
1375	650	0.3	550	2.20	13.75	1.30	26	0.01	0	0.35	23	0.01	0
1384						1.20				0.42			

Soutènement semi-rigide (Phase 2, $PM > 1385$)

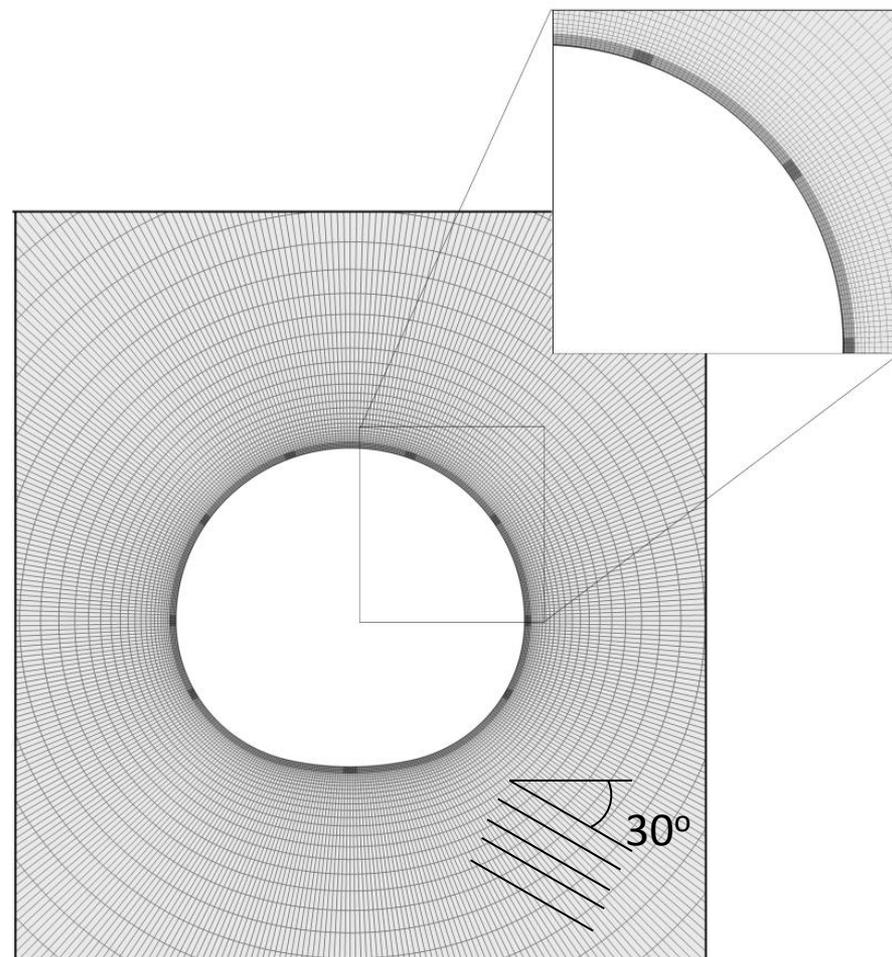


Contrôle en déformation (Yield-control)

Modèle numérique

Modélisation en déformation plane

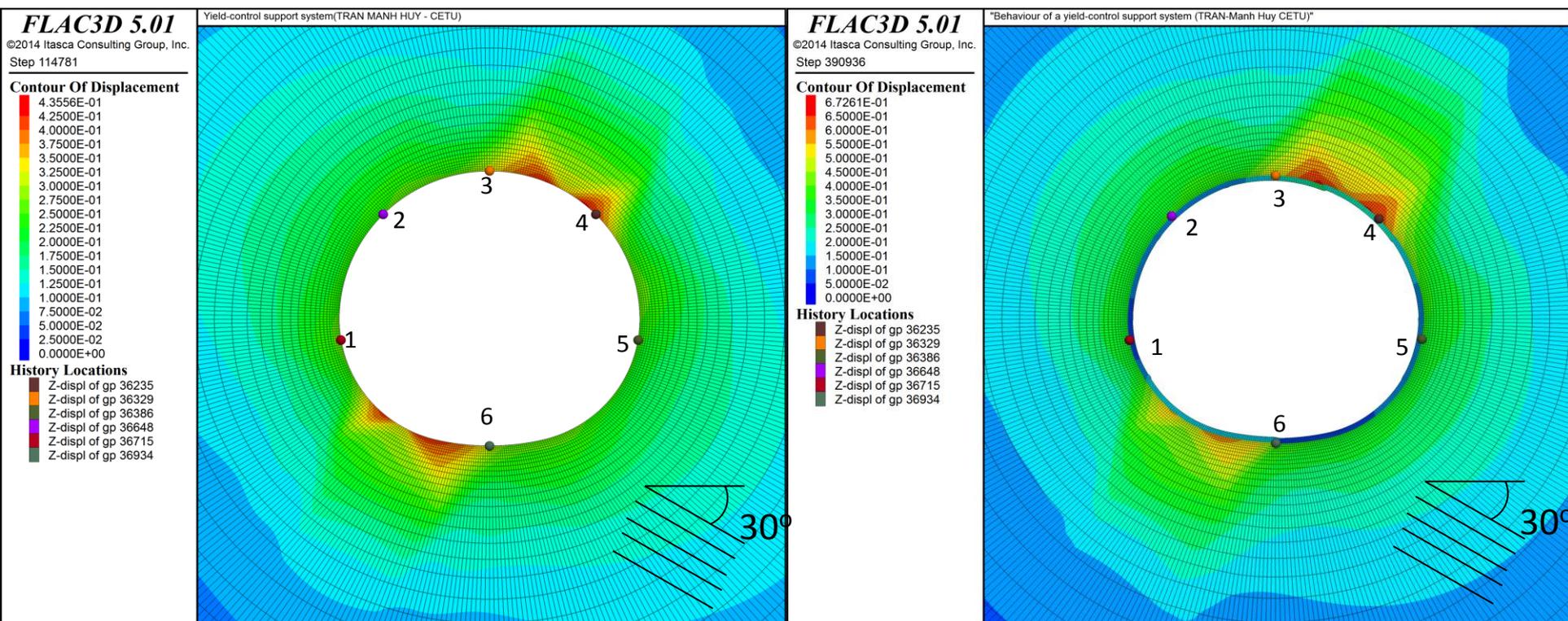
- Massif rocheux: modèle à joints omniprésents (« ubiquitous-joint ») avec la matrice élasto-plastique, taux de dégradation
- Béton projeté : élasto-plastique
- Éléments compressibles: élasto-plastique (dilatance négative)
- Interfaces : élasto-plastique
- État de contrainte initial de 9.5 MPa
- Taux de déconfinement à la pose du soutènement $\lambda_d=97\%$



Maillage bidimensionnel autour du tunnel

Résultats et discussions (1/2)

Champs de déplacement autour du tunnel au PM1443

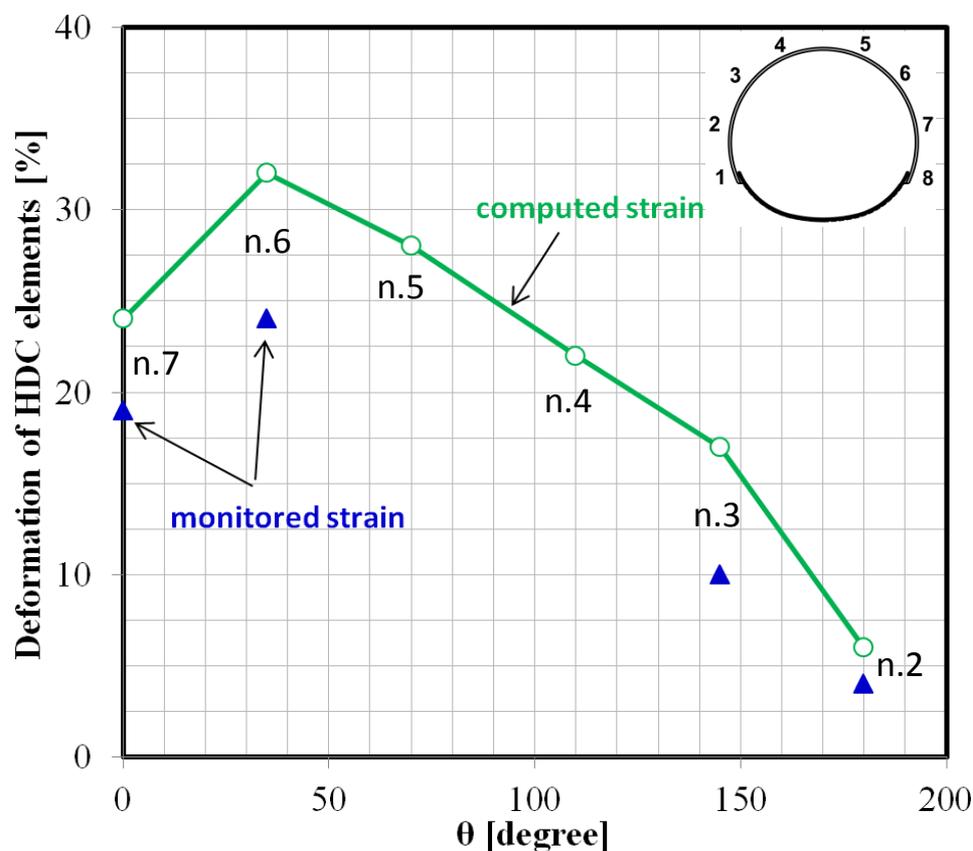


Avant la pose du soutènement

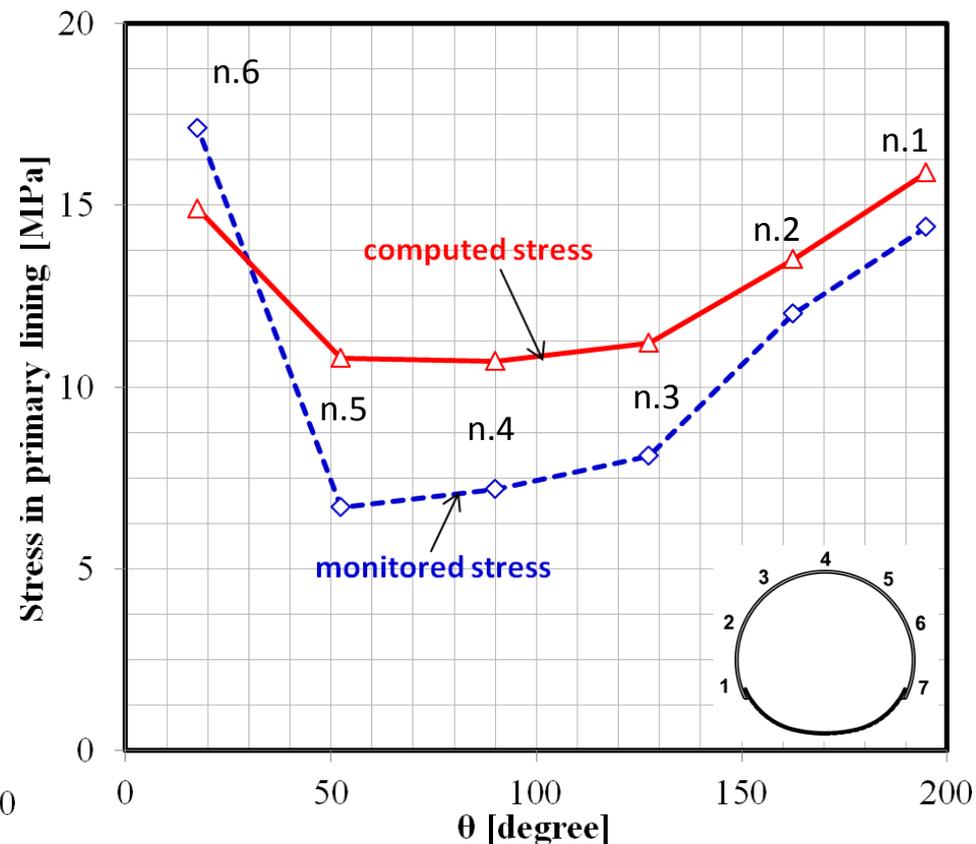
Après la pose du soutènement

Extensomètres	1	2	3	4	5	6
Données (mm)	51	63	197	258	67	86
Numériques (mm)	79	97	194	232	112	95

Résultats et discussions (2/2)



Déplacements des éléments compressibles



Contraintes dans le béton projeté

Comparaison entre les données mesurées et résultats numériques après 03 mois au PM1443

Sommaire

1. Cas d'étude
2. Analyse des données d'auscultation
3. Développements analytiques
4. Etudes numériques
5. Conclusions et perspectives

Conclusions

Approche empirique

- Méthode solide pour le calage des données de convergence
- Développement d'un outil pour la prédiction de la convergence à long terme

Approche analytique

- Tunnels non - circulaires (Tran-Manh et al . 2014, RMRE)
- Interaction terrain-soutènement
- Interaction entre deux tunnels (Tran-Manh et al . 2015, Géotechnique)
- Comportement non-linéaire et calcul en grande déformation
- Modèle de dégradation de la roche et solution dépendant du temps (Tran-Manh et al. 2015, Acta Geotechnica)

Approche numérique

- Modélisation du comportement différencié anisotrope (Tran Manh et al . 2015, RMRE)
- Modélisation de l'interaction entre le terrain et le soutènement déformable

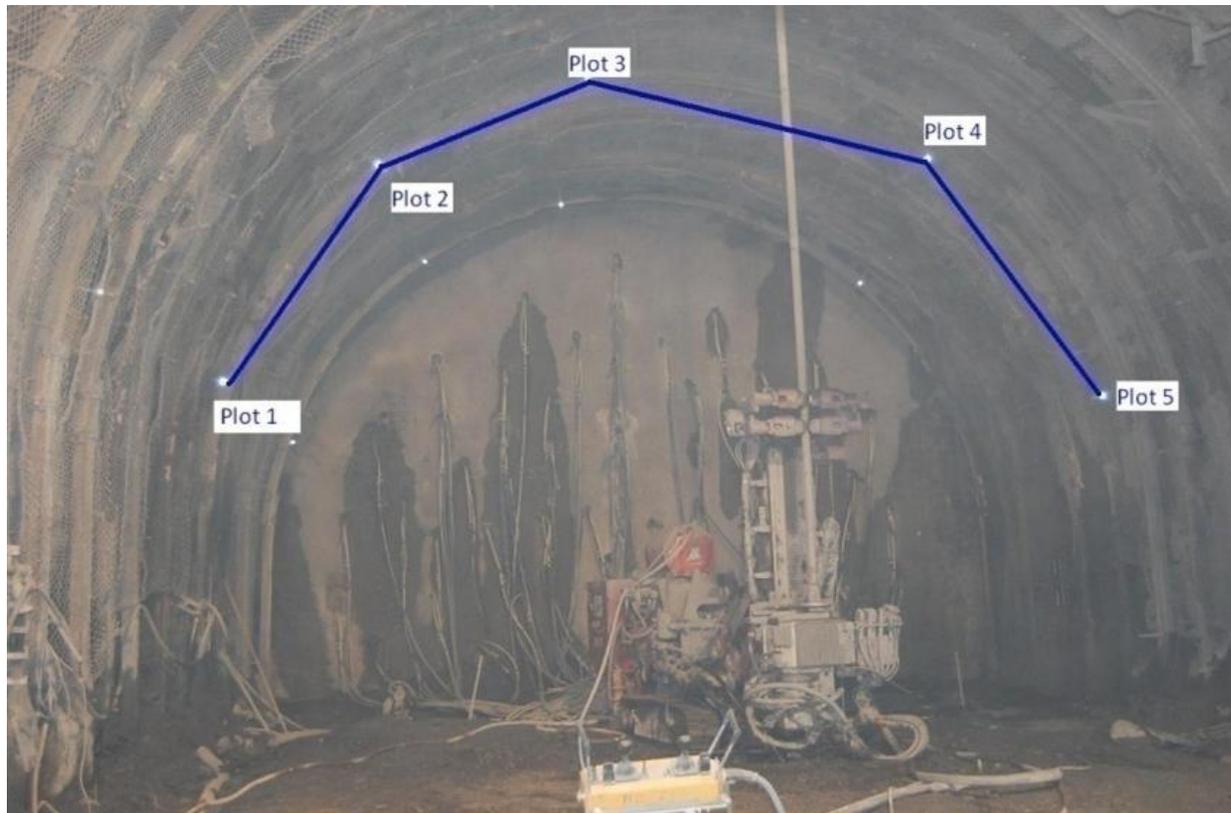
Perspectives

- Application à d'autres ouvrages (tunnel du Fréjus, galeries du laboratoire souterrain à Bure)
- Corrélation entre les paramètres empiriques de la loi de convergence et les paramètres constitutifs du modèle de comportement proposé
- Tunnel creusé au tunnelier en milieu poussant et anisotrope

Merci pour votre attention!



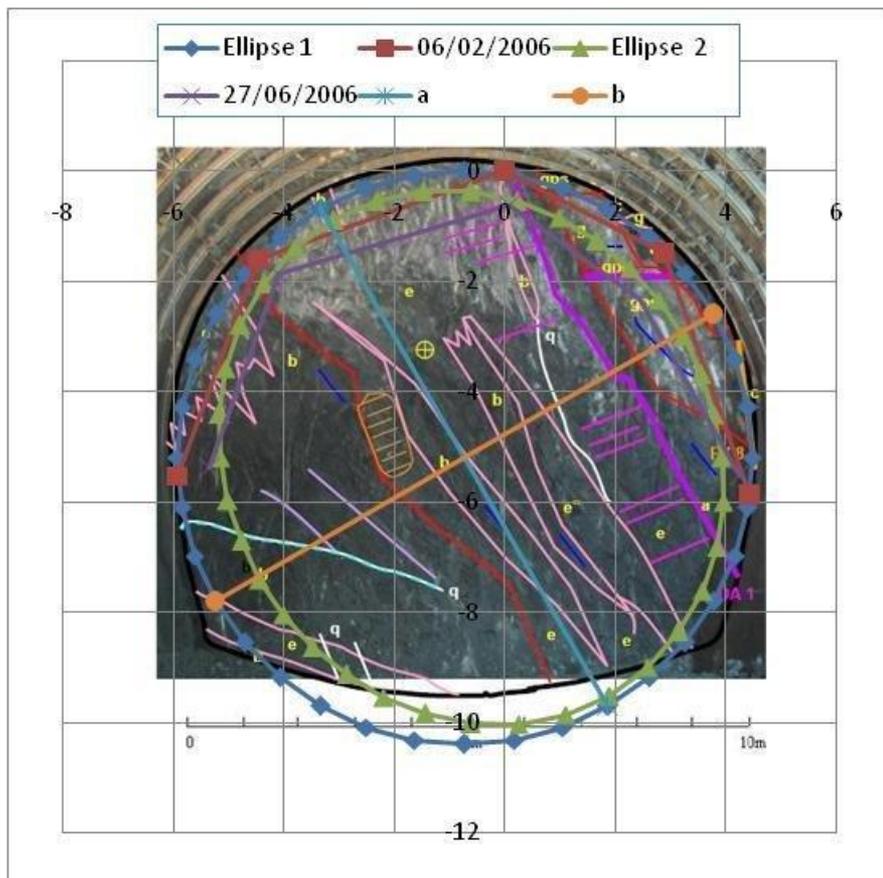
Convergence measurements



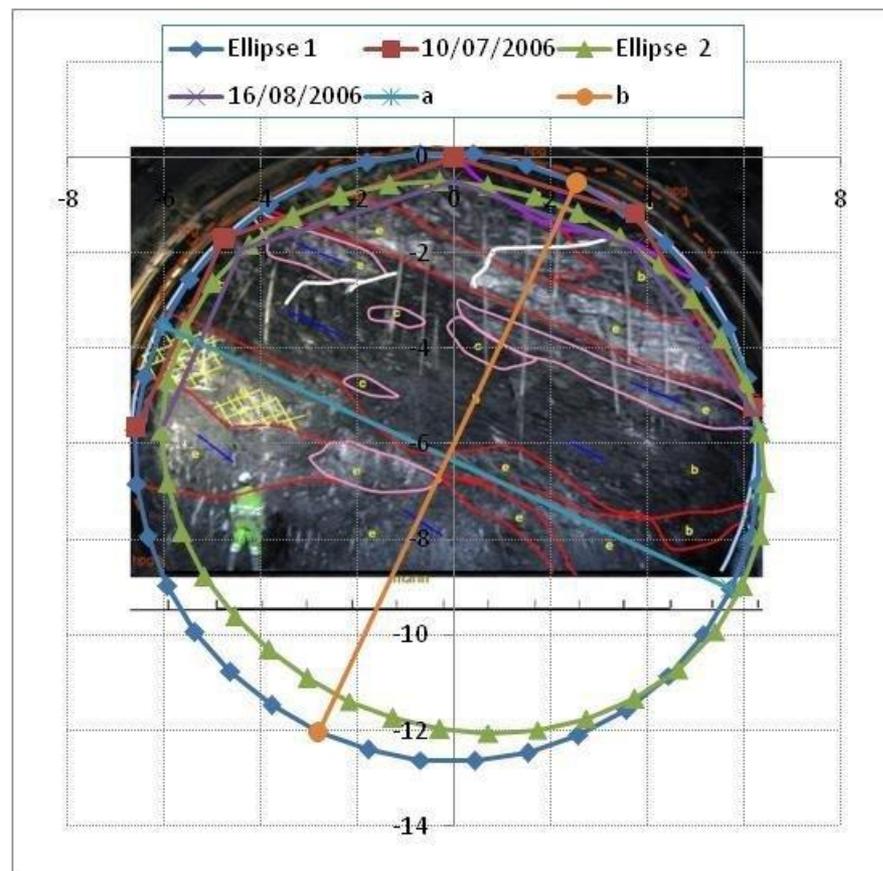
Measuring : optical targets

- Tridimensional measures
- Relatives in X and Y (horizontal)
- Absolute in Z (vertical)

PM 1367

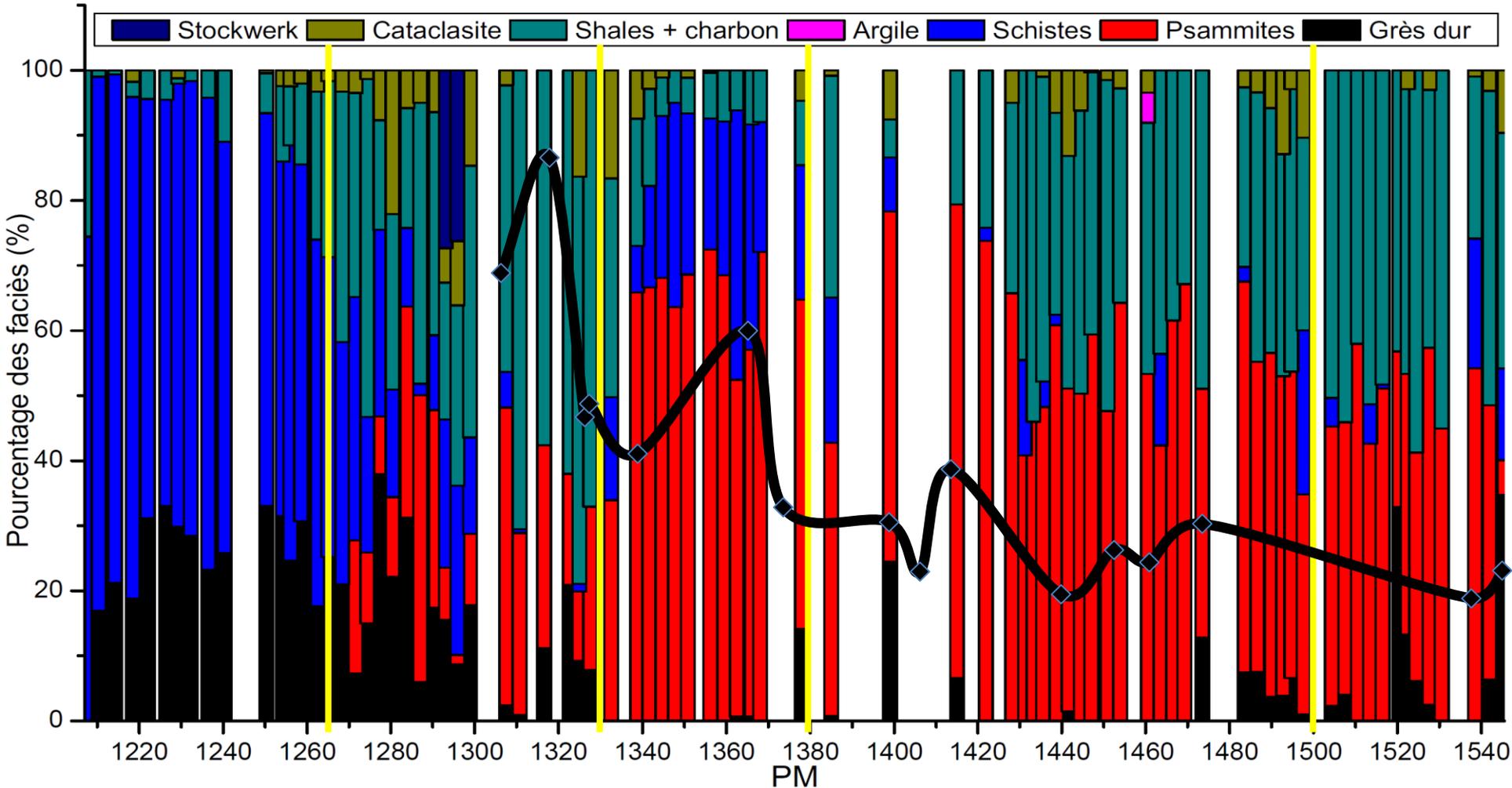


PM 1399



Délimitation des zones

Zonage lithologique



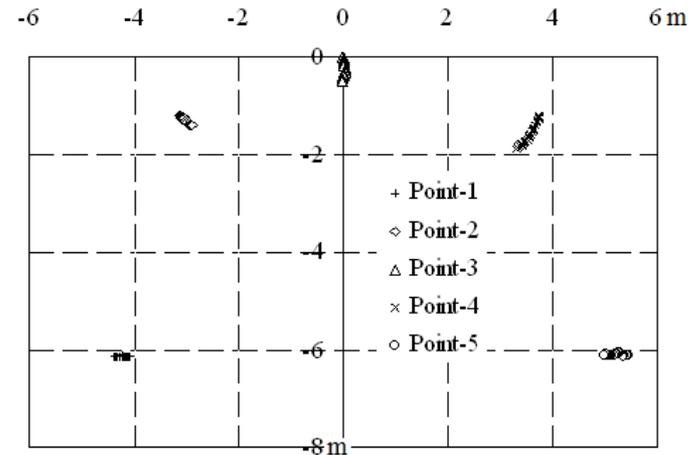
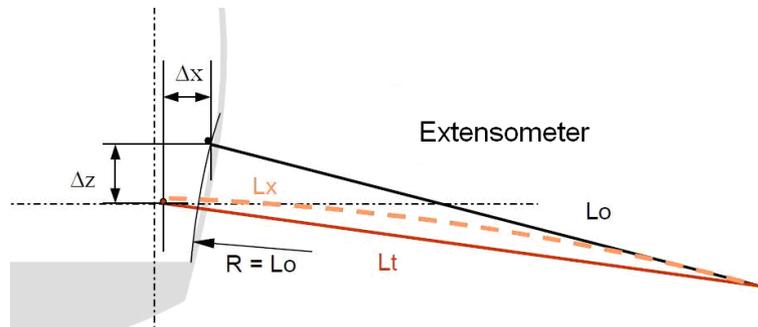
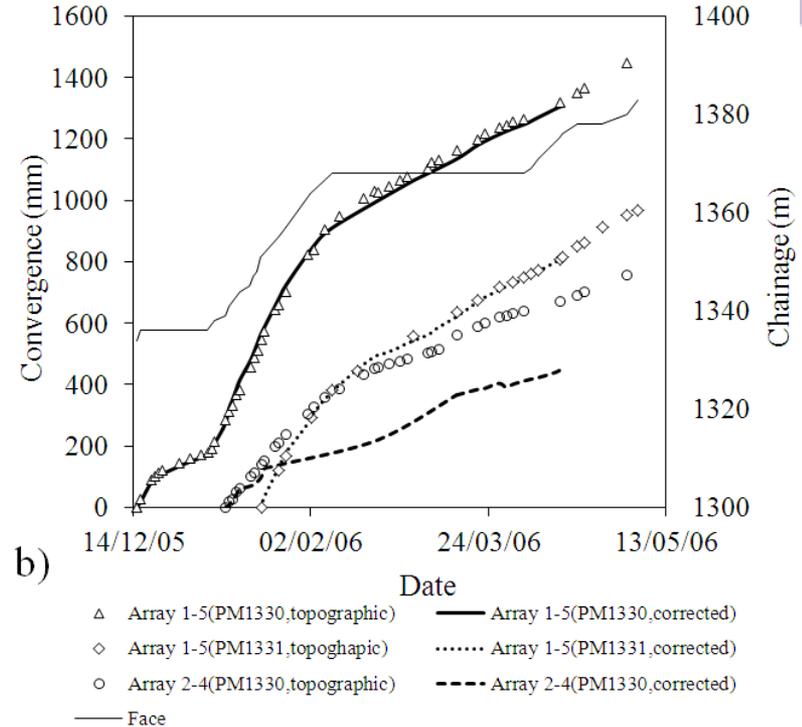
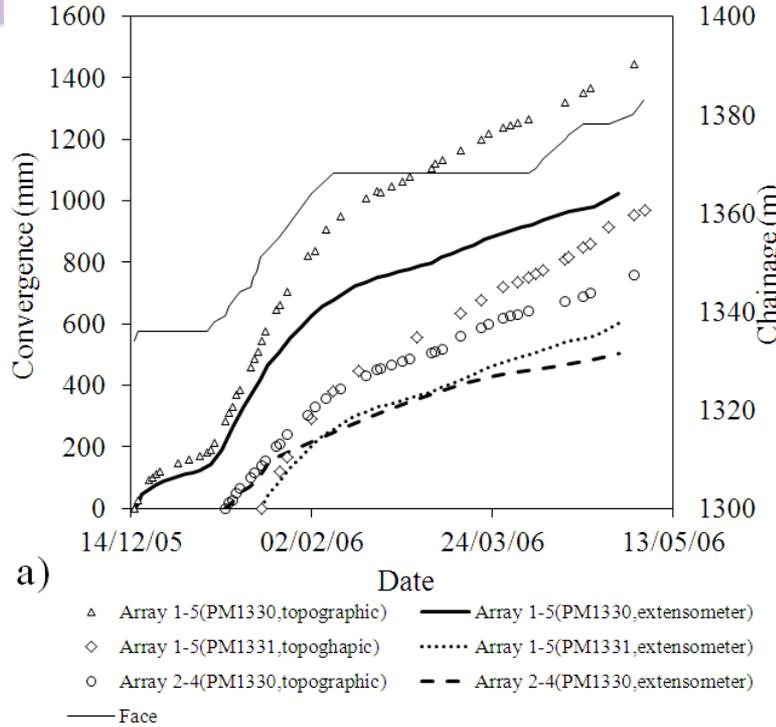
Zone faiblement cataclasée schistes et de grès

Zone fortement cataclasée shales et charbon

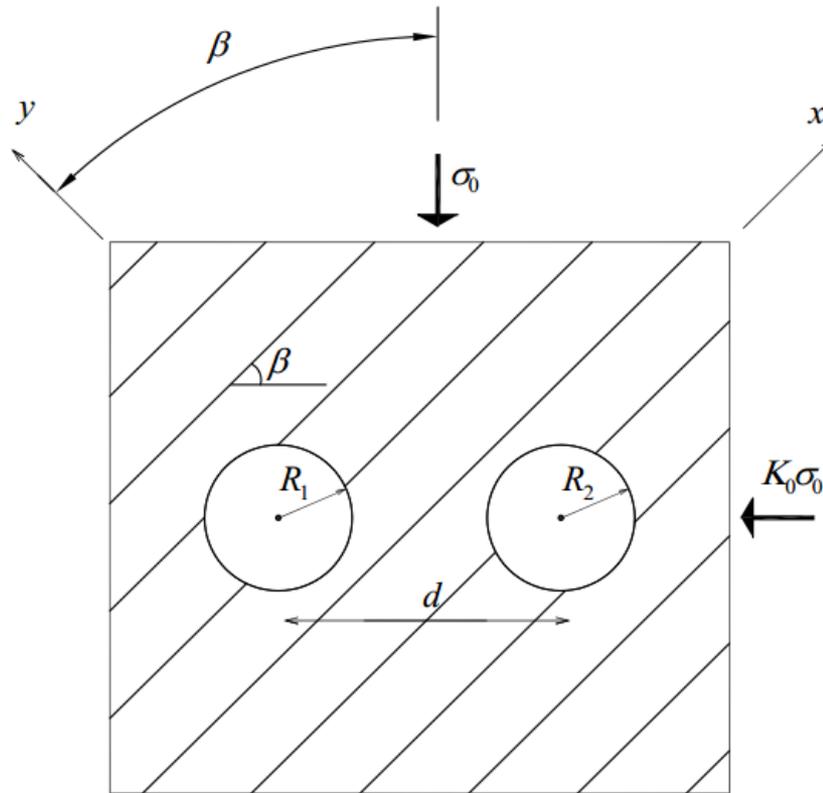
Zone homogène cataclasée psammites et de schistes

Zone fortement cataclasée Psammites, shales et charbon

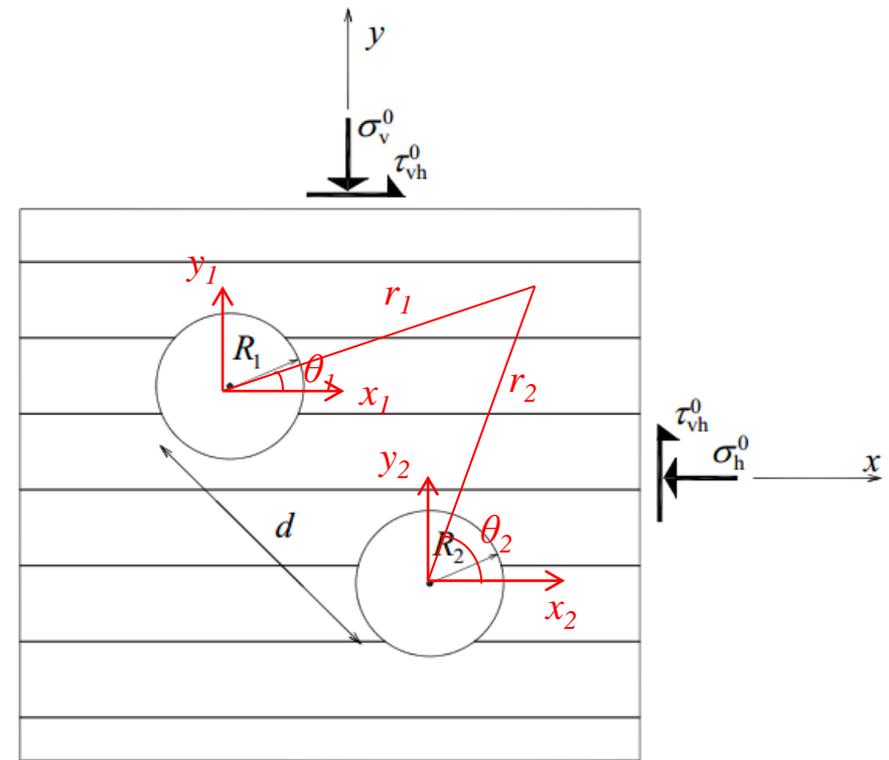
Zone faiblement cataclasée shales et charbon psammites



Interaction between two tunnels (1/2)



a) original loading



b) loading after rotation

Local complex variables

$$z_p = x_p + iy_p = r_p e^{i\theta_p}$$

$$z_{pk} = (z_p + \gamma_k \bar{z}_p)$$

General stress function

$$U = \sum_{p=1}^2 \sum_{k=1}^2 \left(\Omega_{pk}(z_{pk}) + \overline{\Omega_{pk}}(\bar{z}_{pk}) \right)$$

Interaction between two tunnels (2/2)

$$E_h = 620 \text{ MPa}$$

$$E_v = 340 \text{ MPa}$$

$$G_v = 200 \text{ MPa}$$

$$\nu_h = 0.12$$

$$\nu_{hv} = 0.2$$

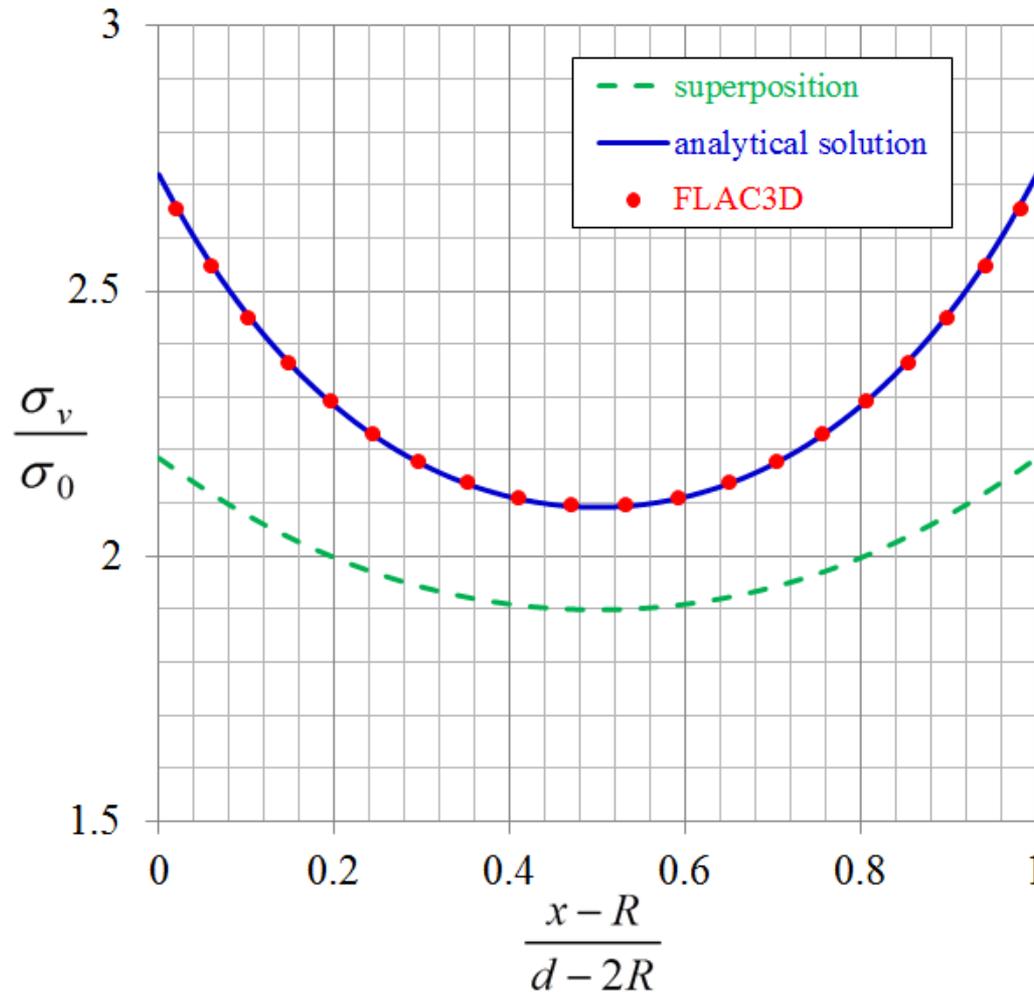
$$R_1 = R_2 = R = 5 \text{ m}$$

$$d = 3R$$

$$\beta = 0$$

$$\sigma_0 = 10 \text{ (MPa)}$$

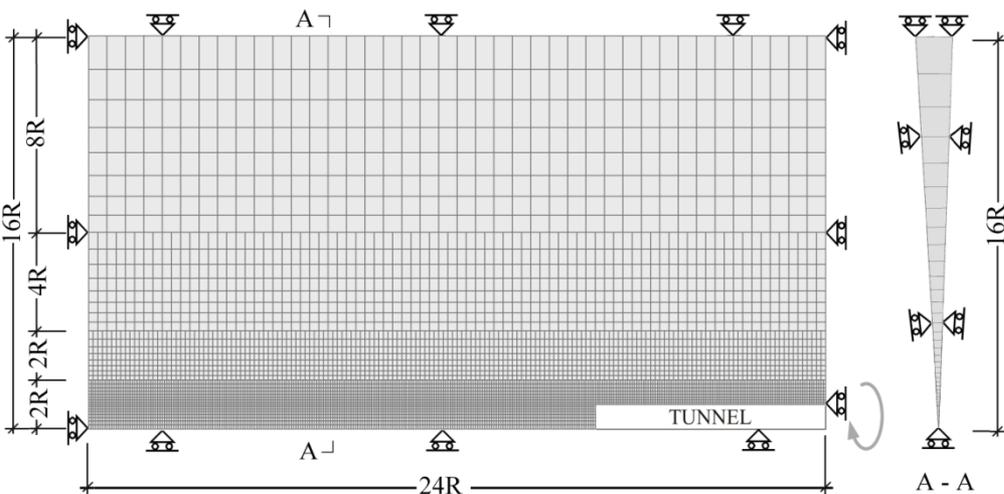
$$K_0 = 1$$



Concentration factors calculated with different methods

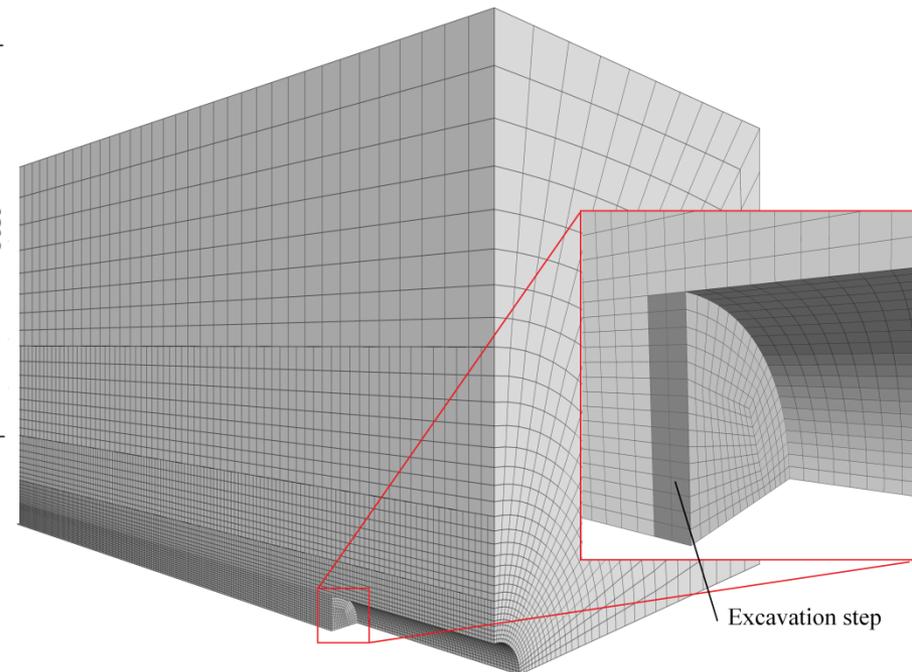
Calibration of the constitutive parameters (2/2)

Axisymmetric simulation

**In the solid**

	PM1311
Elastic bulk modulus, K	650 MPa
Cohesion, c	0.65 MPa
Dilation angle, ψ	0°
Angle of internal friction, φ	26°
Kelvin shear modulus, G^K	250 MPa
Kelvin viscosity, η^K	1.25 GPa.day
Elastic shear modulus, G^M	250 MPa
Maxwell dynamic viscosity, η^M	10 GPa.day
Tension limit σ^t	0.01 MPa

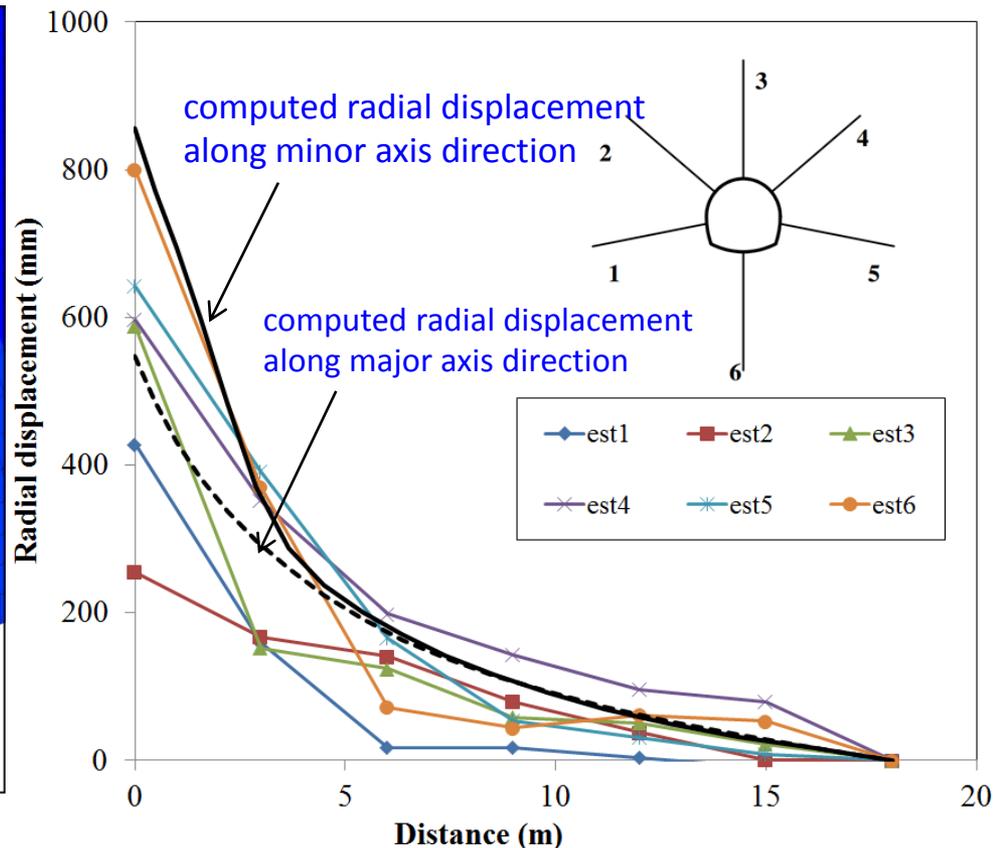
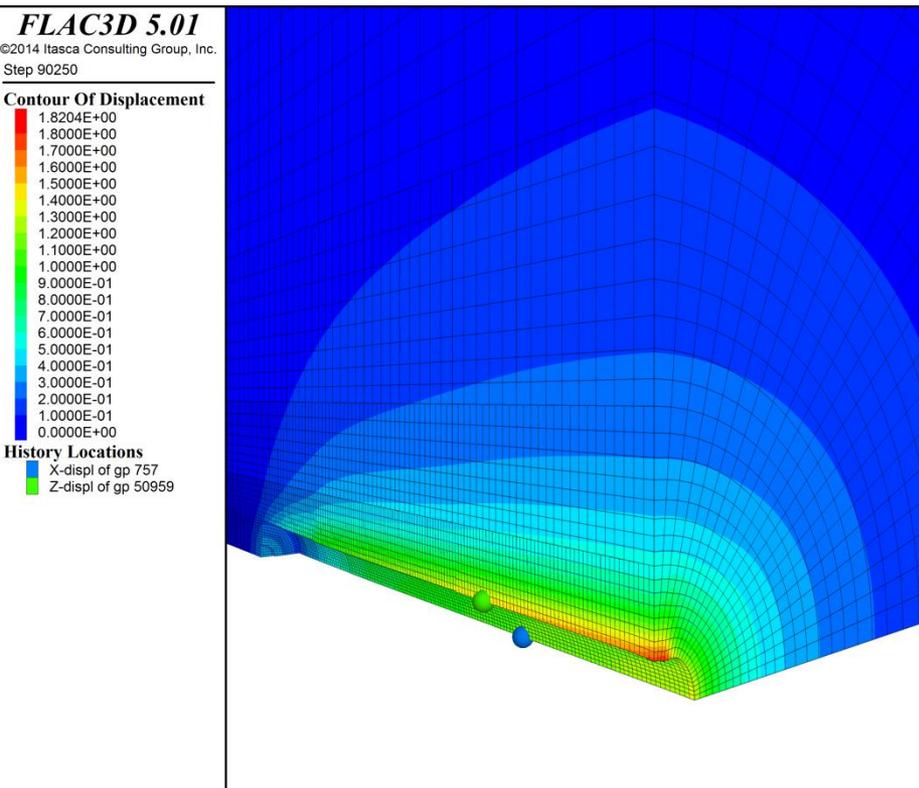
Full 3D simulation

**On the weak-plane**

	PM1311
joint cohesion, c_j	0.45 MPa
joint friction angle, φ_j	23°
joint tension limit, σ_{tj}	0.01 MPa
joint dilation angle, ψ_j	0°

Numerical results (2/3)

Radial displacements at depth



at chainage 1331m after 131 days from installation

Séquence d'excavation

1. Initialisation du modèle:

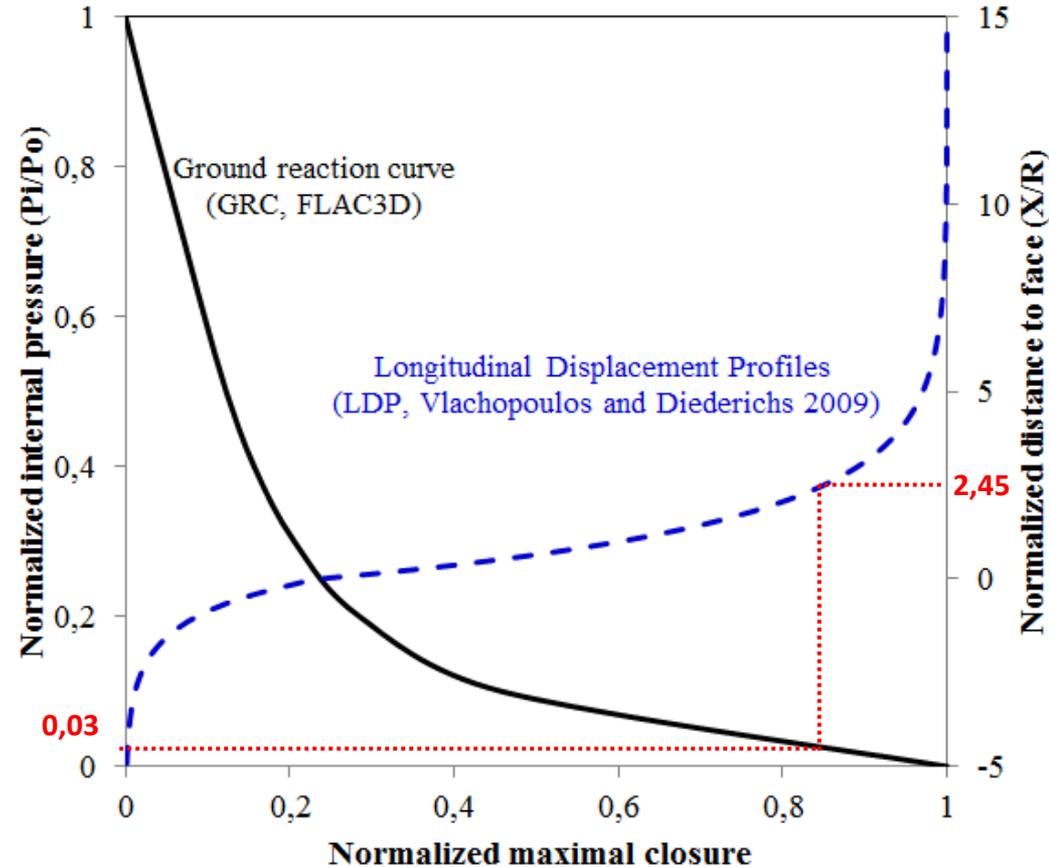
- Paramètres à court terme;
- État de contrainte initial isotrope 9.5 MPa

2. Creusement du tunnel:

- Diminution progressive du taux de déconfinement jusqu'à $\lambda_d=97\%$

3. Mise en place du soutènement:

- Installation du soutènement
- Paramètres à long terme (facteur de dégradation de 50 %)
- Déconfinement total $\lambda=100\%$



Determination du taux de déconfinement