

Réflexions sur la prise en compte des effets tridimensionnels pour l'analyse et la conception des ouvrages souterrains

François LAIGLE
EDF- Centre d'Ingénierie Hydraulique

CFMR

Séance du 5 mars 2009

Modélisation: quand faut-il passer au 3D ?

✚ Préambule

✚ Ouvrages souterrains et Modélisations

✚ Modélisations bidimensionnelles

✚ 3D: Rhéologie ou géométrie ?

✚ Apports & intérêts des modèles 3D

Aspects Géométriques

Interaction entre ouvrages

Intersections d'ouvrages

Phasage et séquences de réalisation

Structuration et fracturation du massif

Interaction sol-structure

✚ Influence des chemins de contrainte

✚ Lois de comportement et aspects tridimensionnels



Préambule

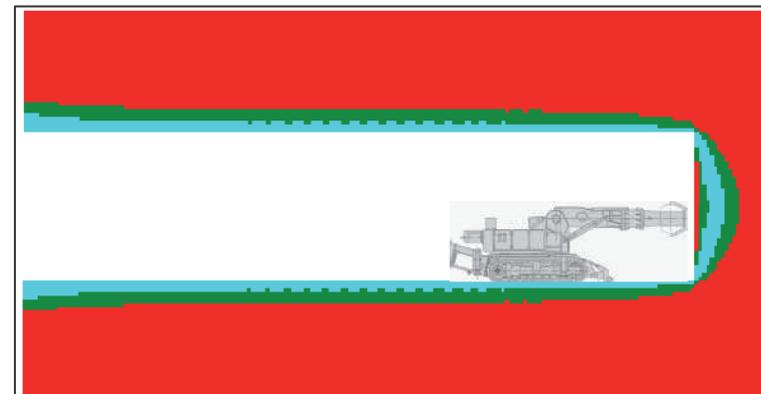
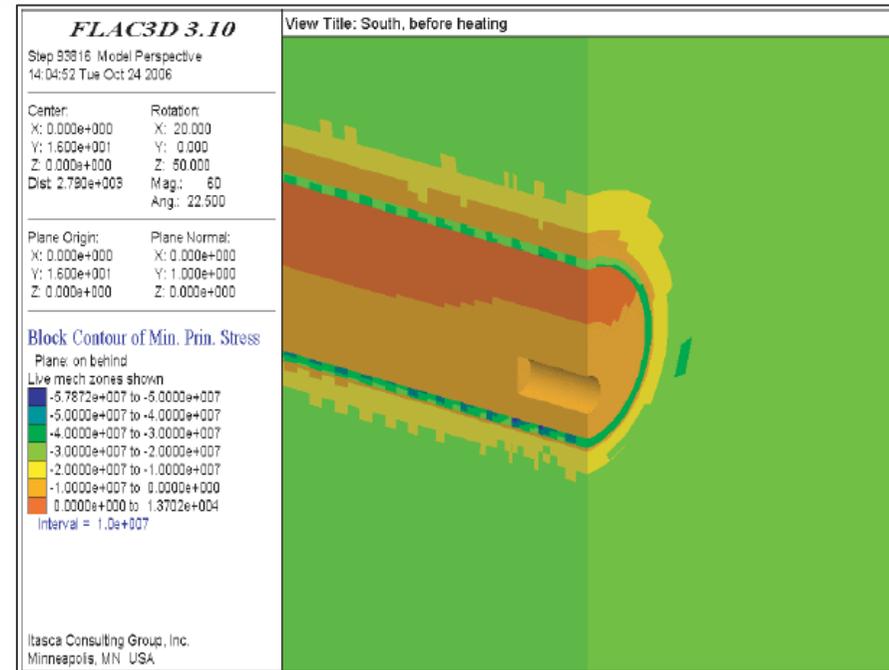
Congrès International de l'AFTES 2008. Monaco

Detailed Analysis of the Excavation and Heating of Nuclear Waste Storage Drifts

D. Billiaux et al
Congrès International de l'AFTES
2008. Monaco

Effet du comportement différé sur le creusement des tunnels

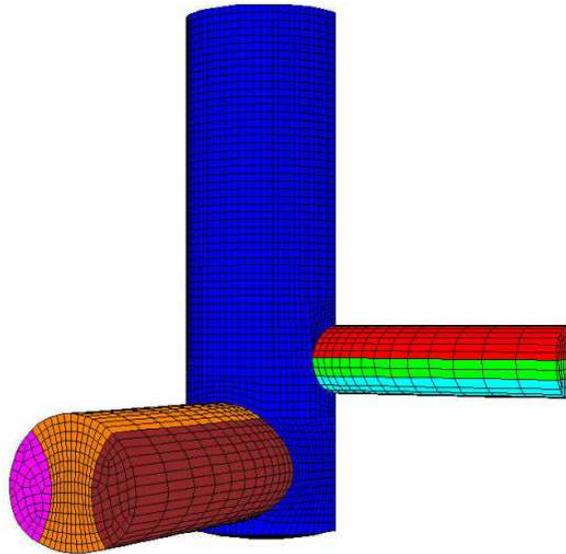
A. Silvestre
Congrès International de l'AFTES
2008. Monaco



Préambule

4^{eme} International Flac Symposium on Numerical Modeling in Geomechanics

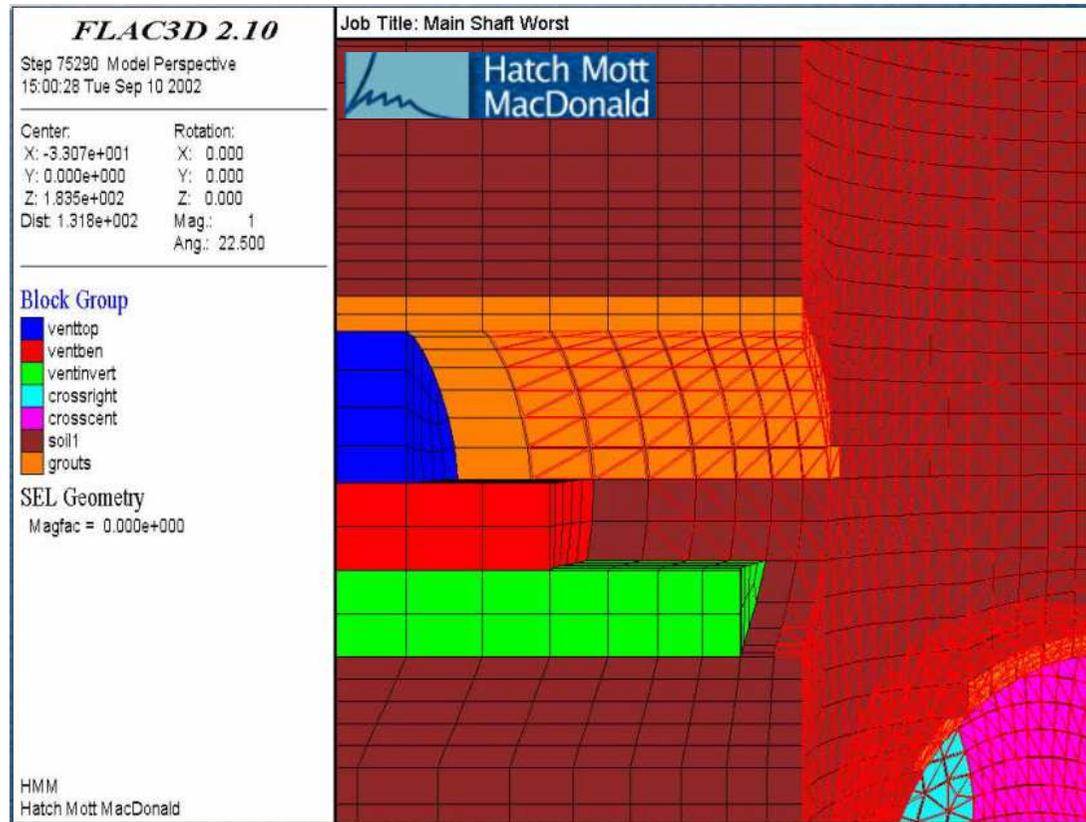
2006. Madrid



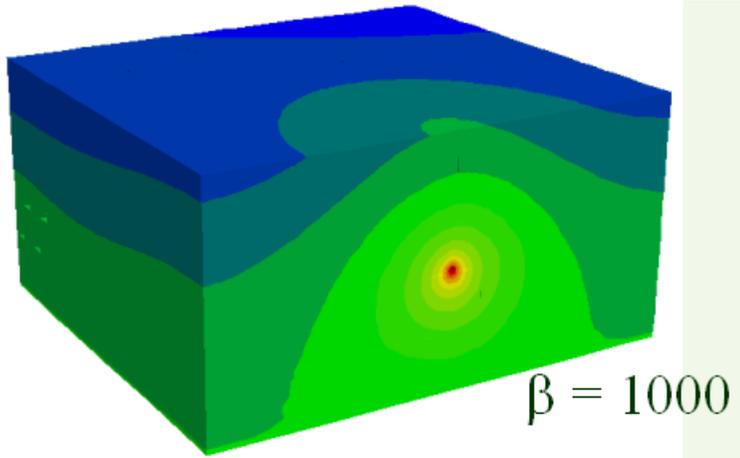
Use of FLAC3D on beacon Hill Station and Tunnels project in Seattle, Washington

T. Gregor et al

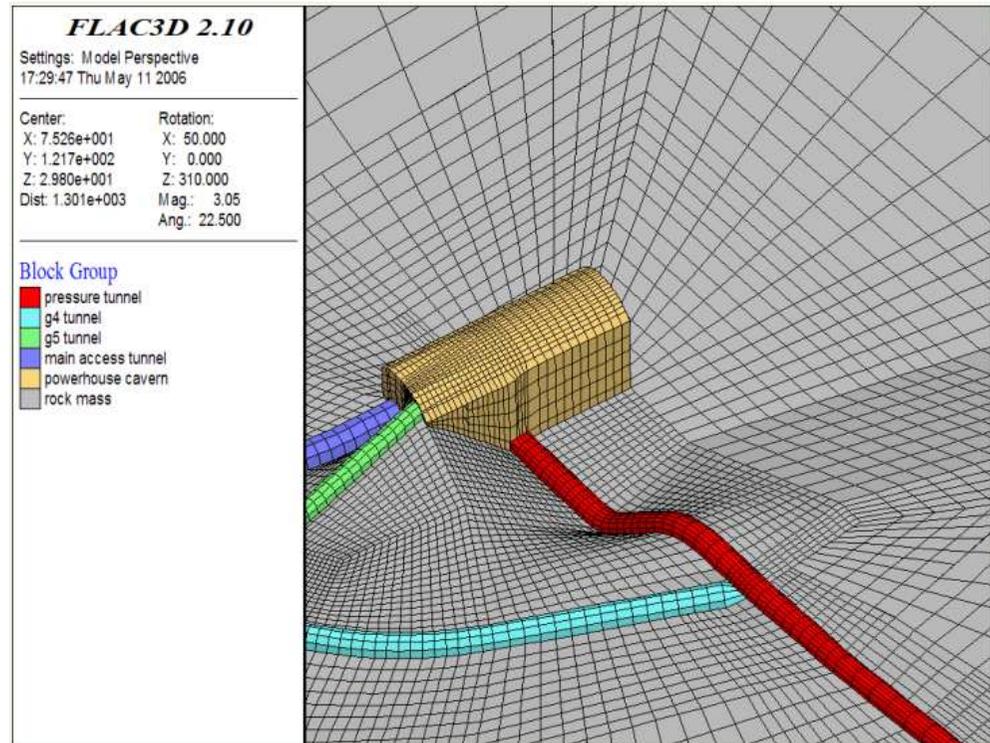
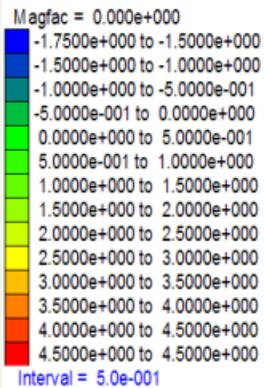
4^{eme} International Flac Symposium on Numerical Modeling in Geomechanics
2006. Madrid



Préambule



Contour of Pore Pressure



Ouvrages souterrains et Modélisations

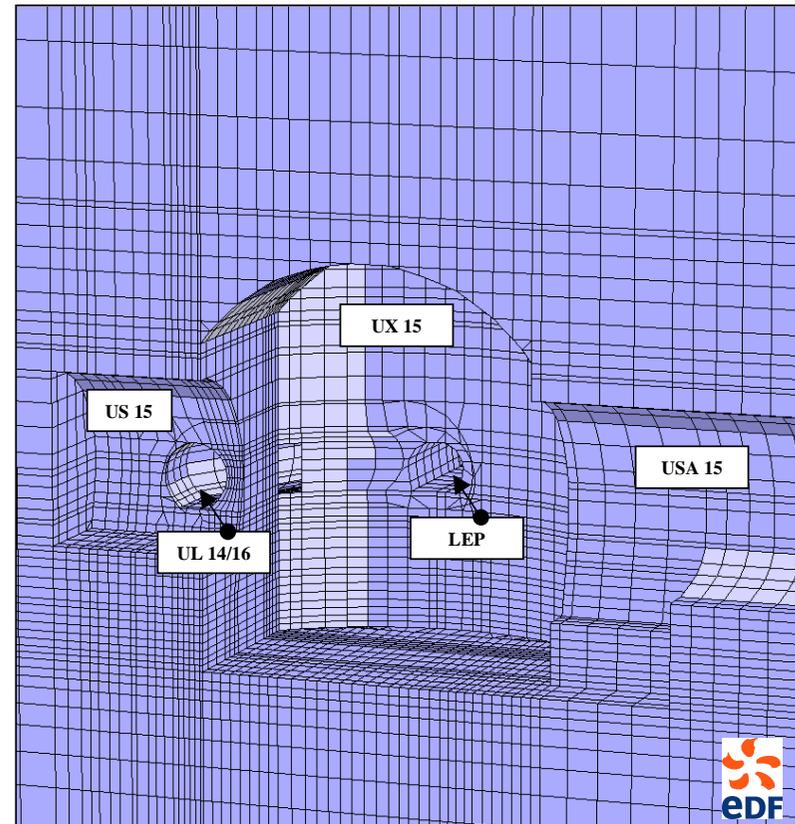
Quelle est la pertinence des résultats des modélisations dans le domaine des travaux souterrains?

Domaine de « spécialistes »

« ...vous qui entrez ici, perdez tout espoir...d'appliquer ce que vous avez appris pour construire sur le sol... »

Pierre Duffaut (1996)

«... je t'aime... moi non plus... »



Modélisations bidimensionnelles

Outils de modélisation 2D

Mise à disposition des ingénieurs d'outils:

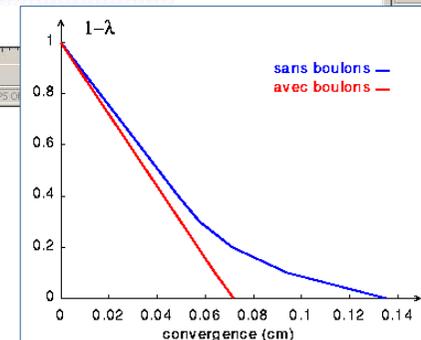
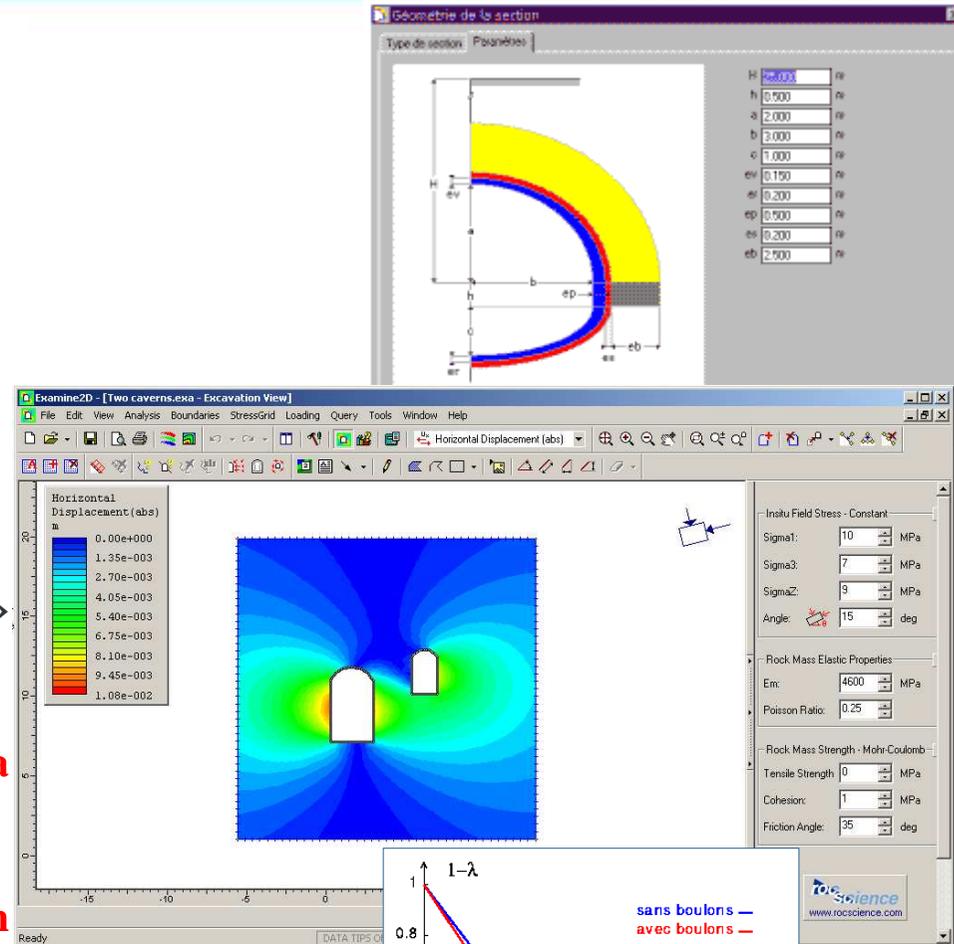
- Conviviaux
- Rapides
- Pré et post processeurs ergonomiques
- « robustes » numériquement ...

Attention à un excès de confiance « aveugle » en ces calculs!!

⚡ Exigences compatibles avec la représentativité des modèles.

⚡ Démarche d'interprétation et d'exploitation adaptée.

⚡ Utilisation raisonnée des modèles rhéologiques .



Modélisations bidimensionnelles

Outils de modélisation 2D

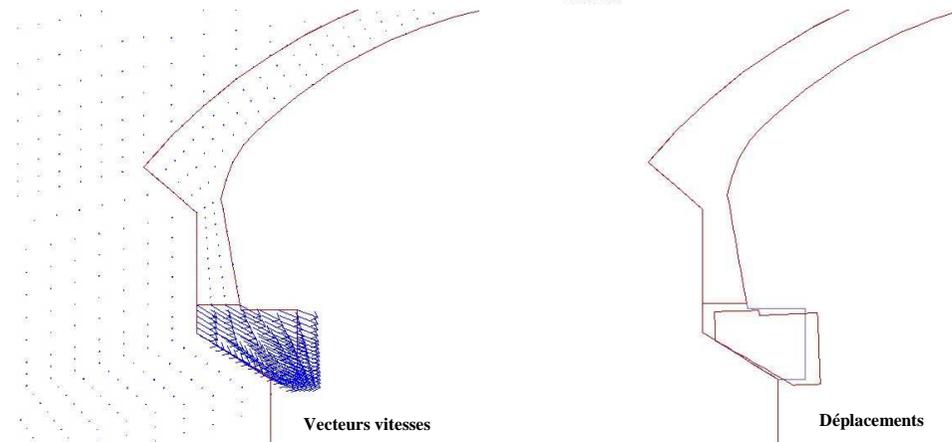
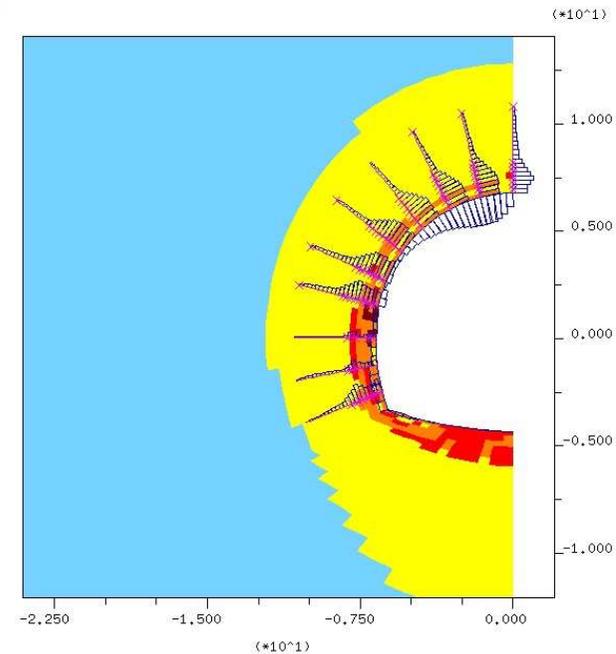
Modèle rhéologiques « avancés »

**Prise en compte des interactions
sol/roche \leftrightarrow structure**

- Barres \rightarrow Boulons
- Poutres \rightarrow Revêtements

Discontinuités, interfaces...

Couplages ...

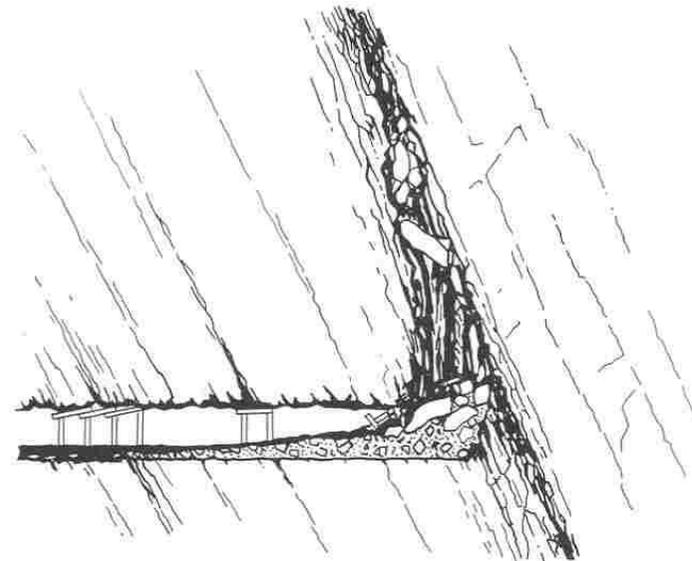
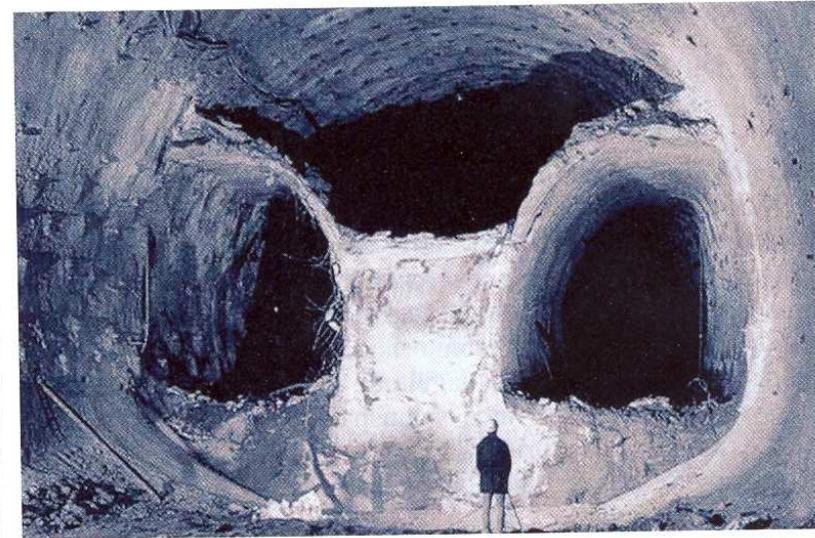


Modélisations bidimensionnelles

Limites des modélisations 2D

Effets et phénomènes tridimensionnels

- **Morphologie du milieu géologique**
Fracturation, anisotropie mécanique et/ou hydraulique...
- **Etat des contraintes**
Orientation du tenseur des contraintes principal par rapport aux plans d'études
- **Interaction avec d'autres structures**
Tassements en surface
Ouvrages souterrains existants...
- **Processus et phasages de réalisation**
Sections divisées
Géométries non-circulaires
- **Influence et stabilité du front de taille**



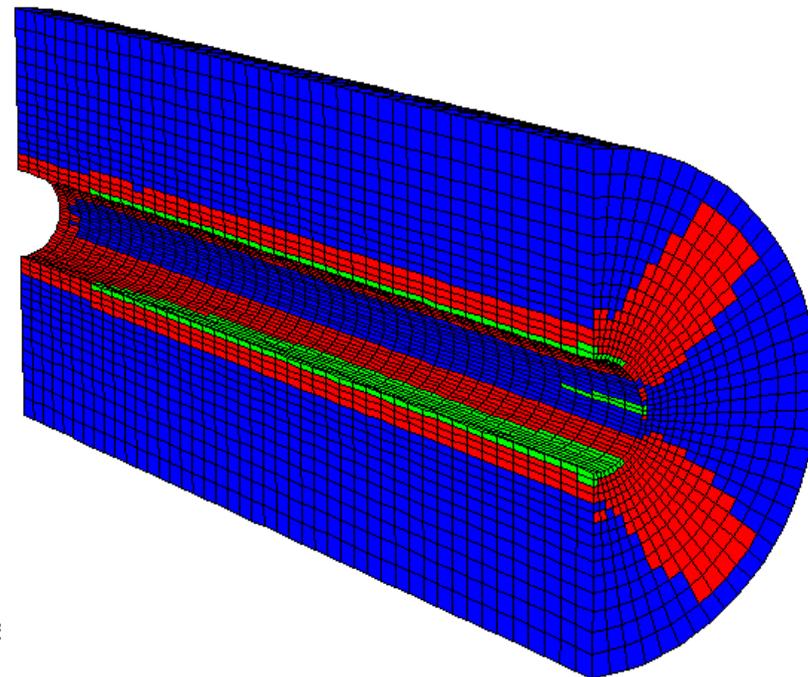
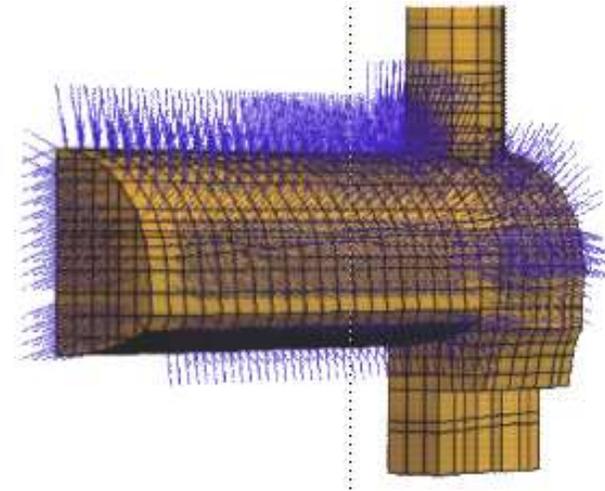
3D: Rhéologie ou géométrie ?

Modélisations 3D

En « *théorie* », ces problématiques peuvent être traitées par des approches 3D

Mais

- ✓ Complexité des modèles géométriques → maillage
Simplifications nécessaires
- ✓ Délais / Disponibilité / Temps
↔ Des apports / confiance
- ✓ Outils informatiques
 - Puissance et capacité de stockage
 - Robustesse numérique



3D: Rhéologie ou géométrie ?

Choix entre la représentativité rhéologique
et
la représentativité géométrique !!!!

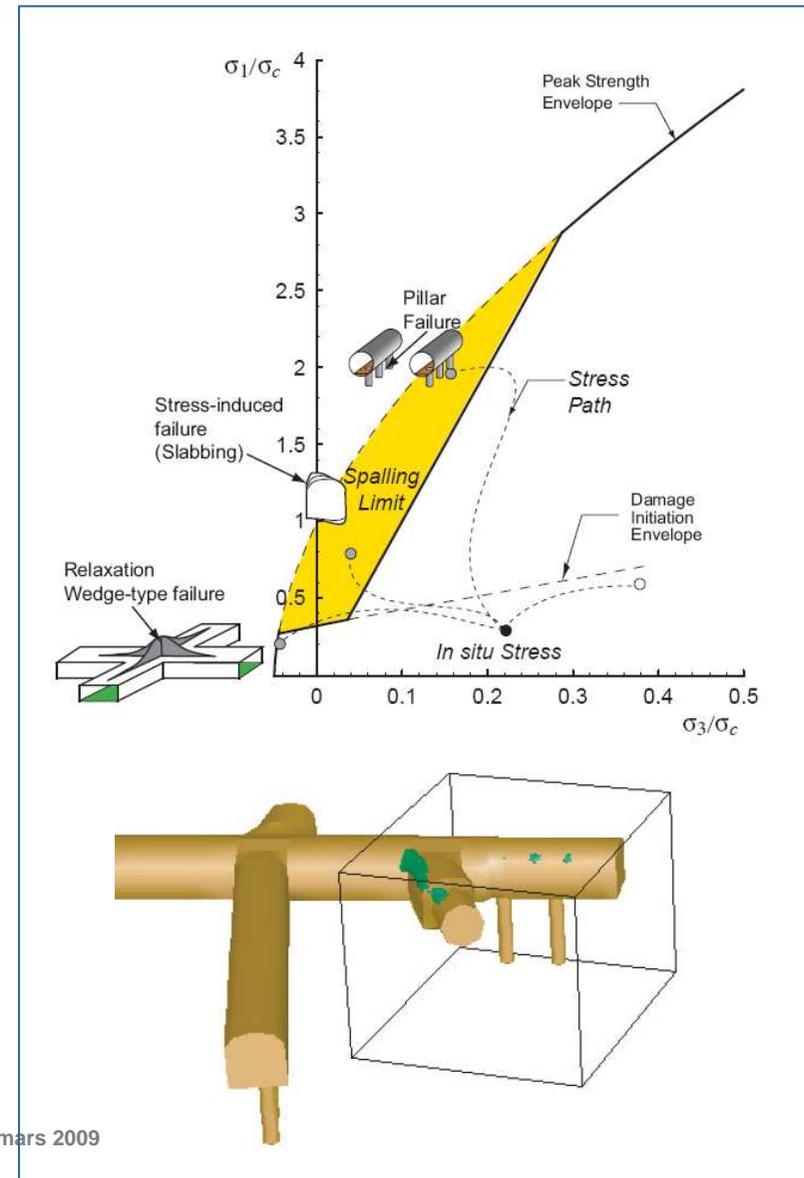
Modèles de comportement plus
« simples » mais « moins pertinents »

Interprétation sur la base de critères
adaptés et justifiés

Etudes définies, suivies, exploitées,
interprétés par un ingénieur
« expérimenté »

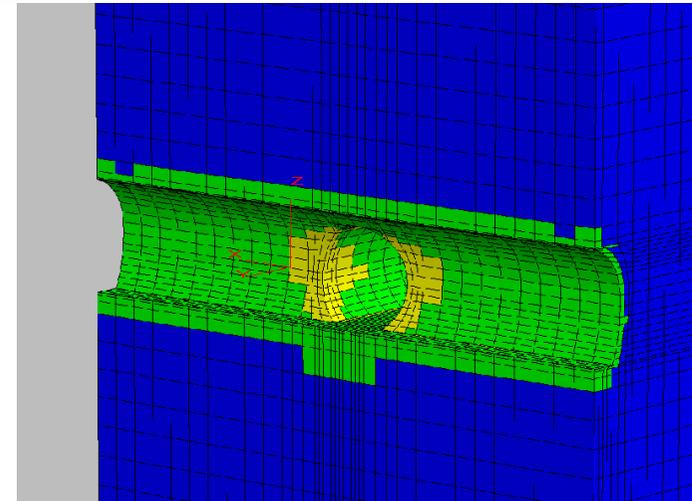
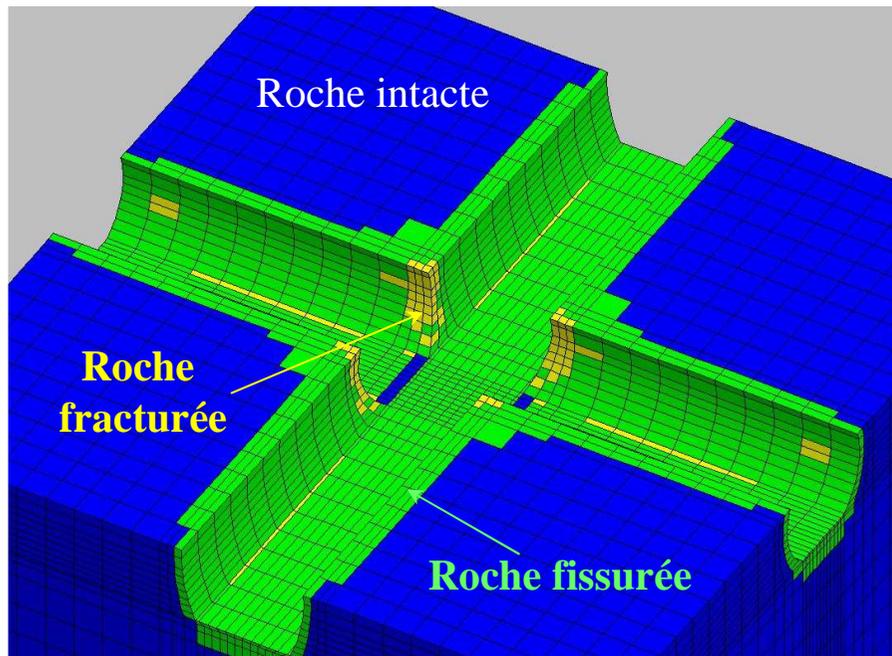
Modélisation

Projets

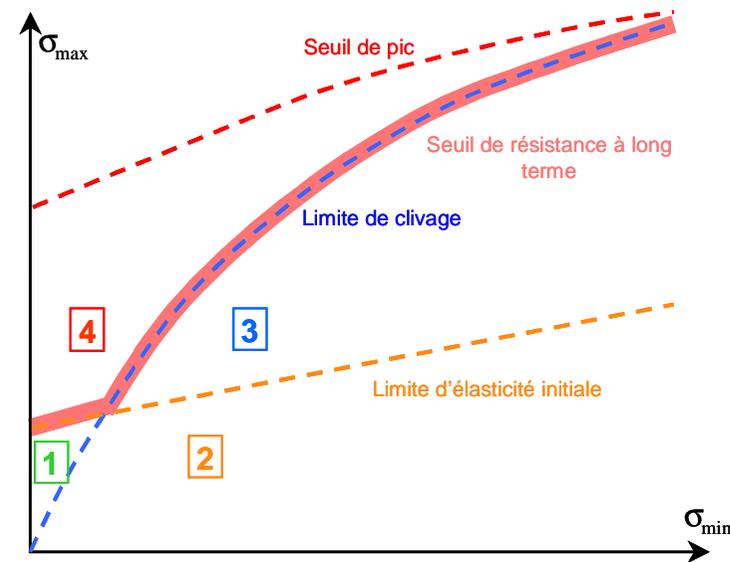


3D: Rhéologie ou géométrie ?

Choix entre la représentativité rhéologique
et
La représentativité géométrique



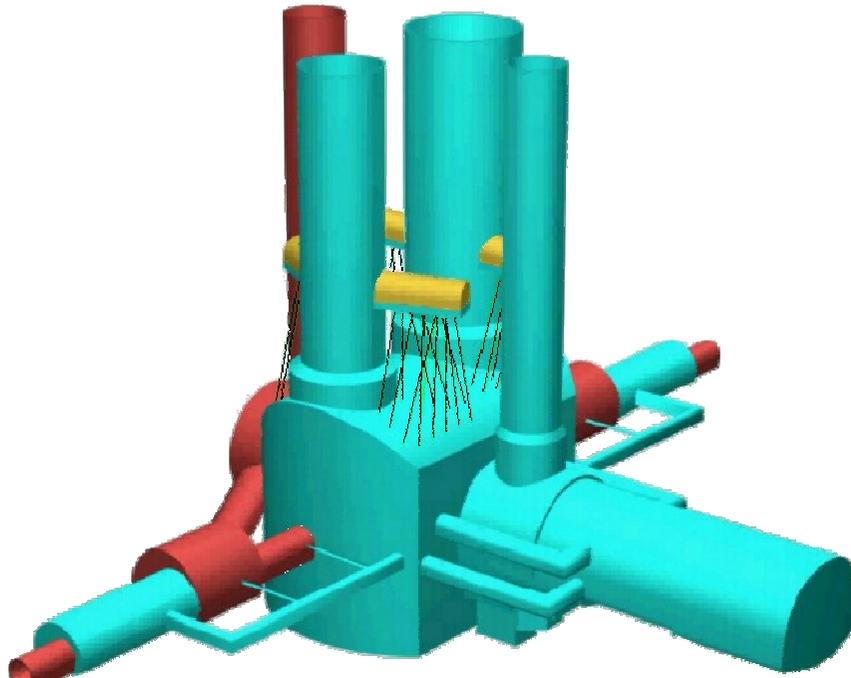
Calculs élastiques linéaires
Interprétation conformément au modèle L&K



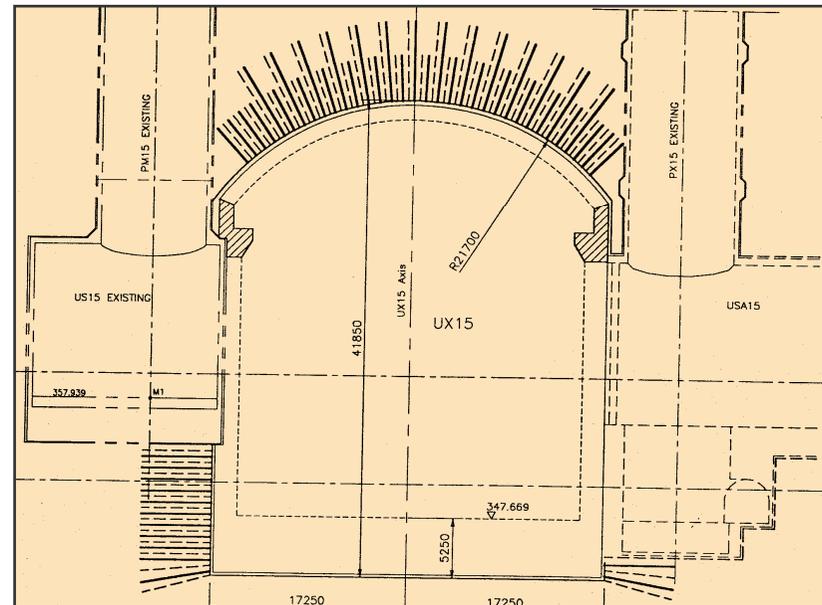
Apports & intérêts des modèles 3D

Aspects Géométriques

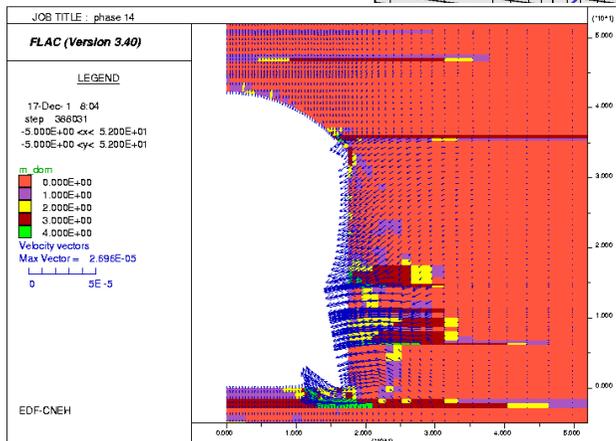
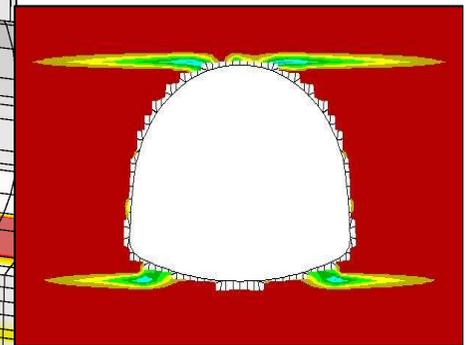
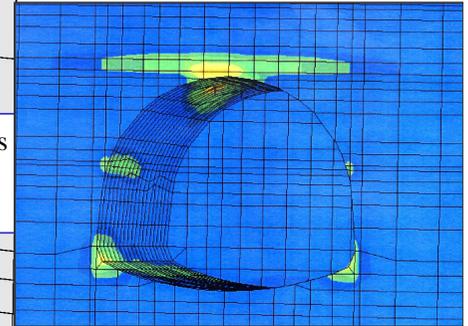
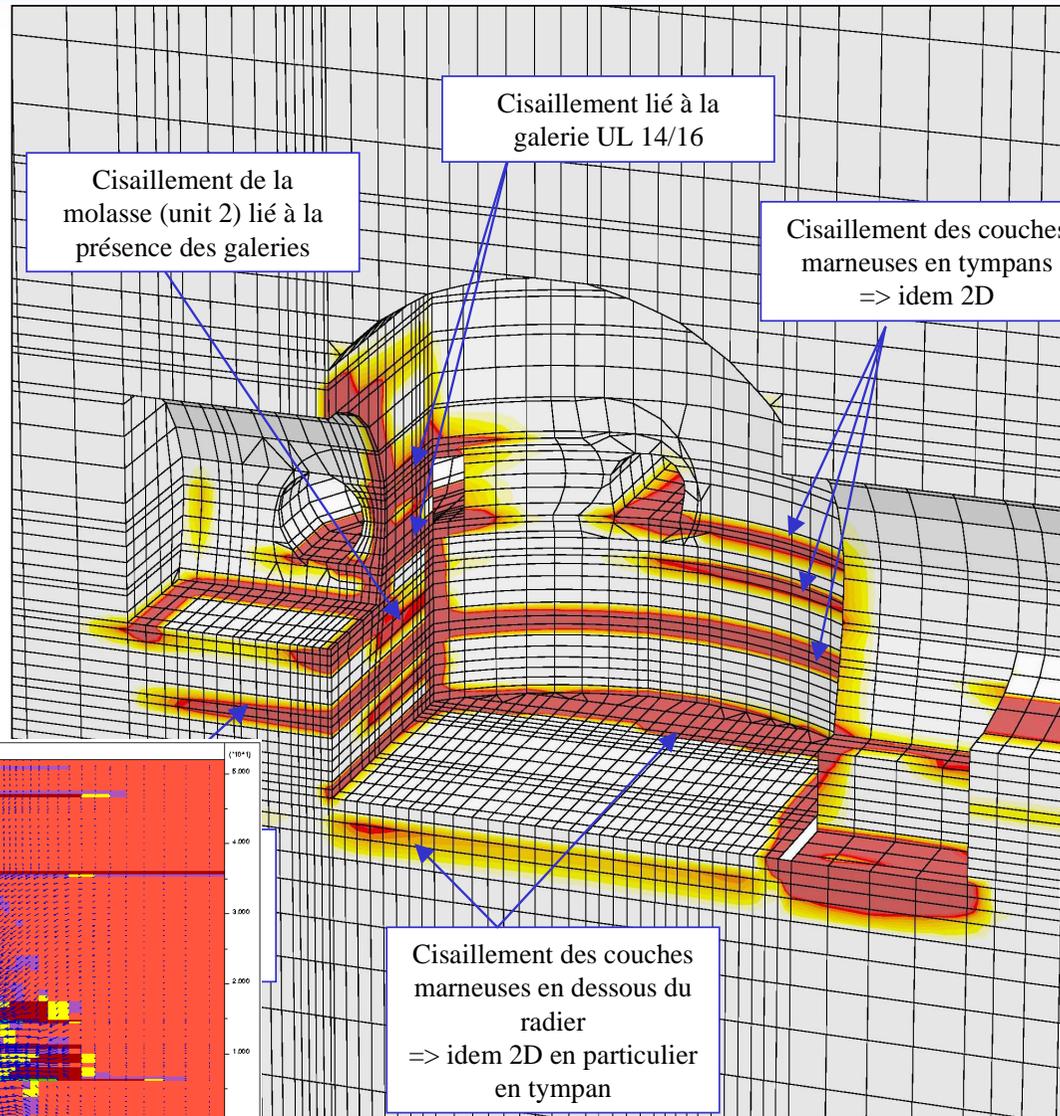
Exemple du projet CERN-LHC



New structures

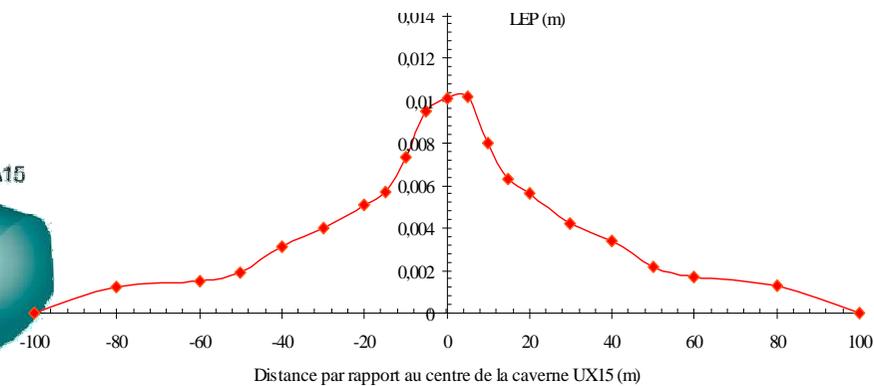
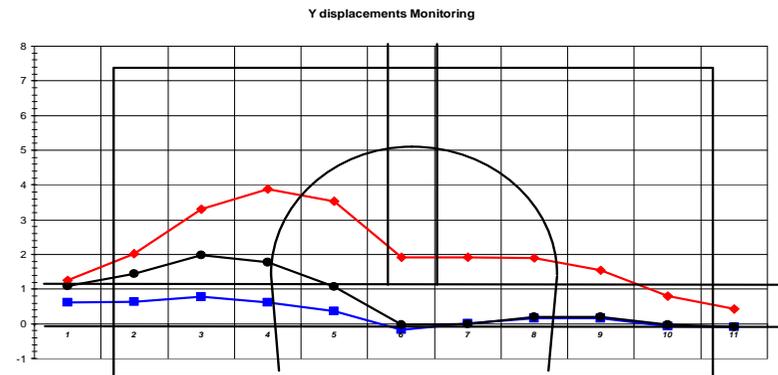
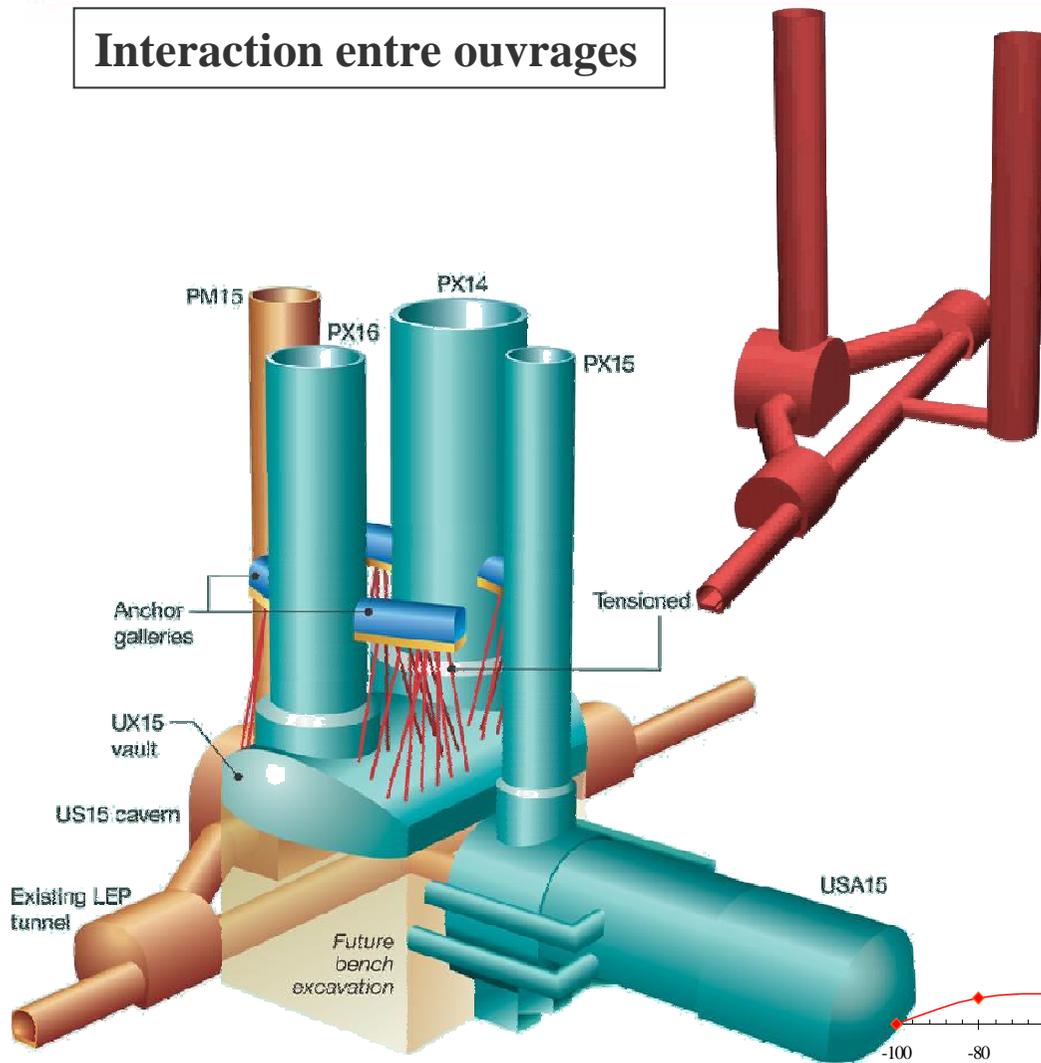


Apports & intérêts des modèles 3D

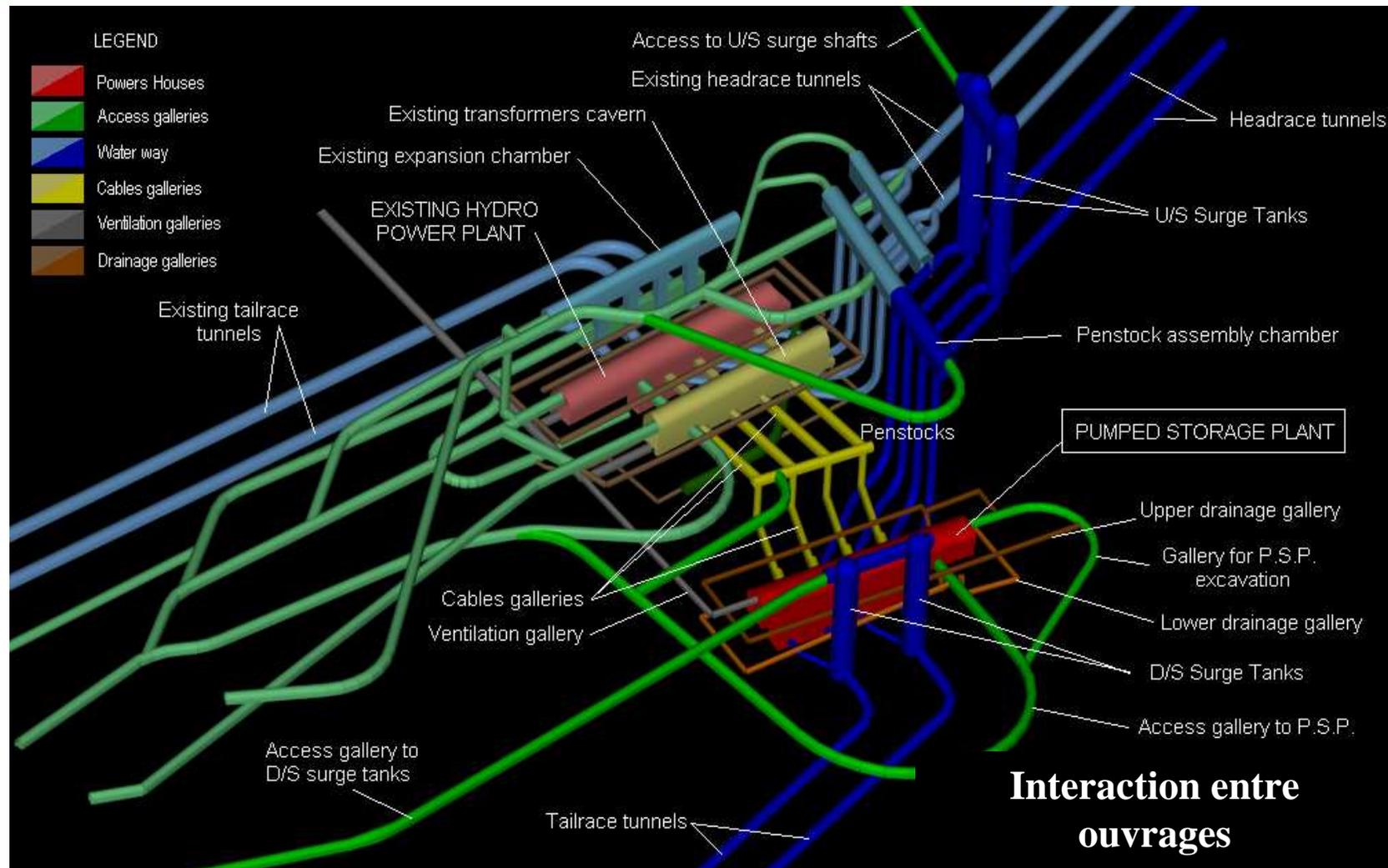


Apports & intérêts des modèles 3D

Interaction entre ouvrages



Apports & intérêts des modèles 3D



Apports & intérêts des modèles 3D

Interaction entre ouvrages



J.B. Kazmierczak, F. Laouafa (INERIS)

G. Armand (ANDRA)

TOS. N°208. Juillet/Août 2008

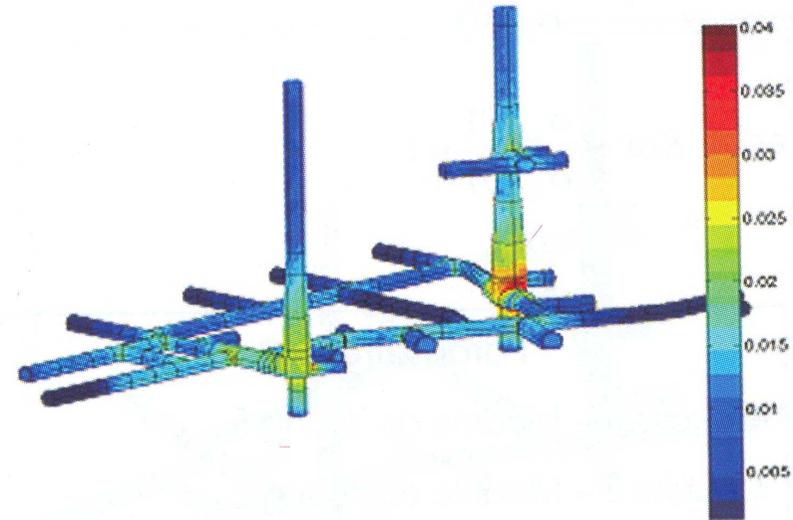
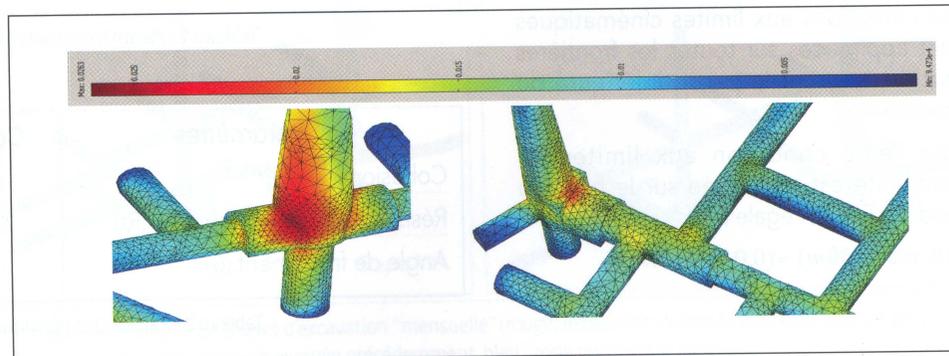


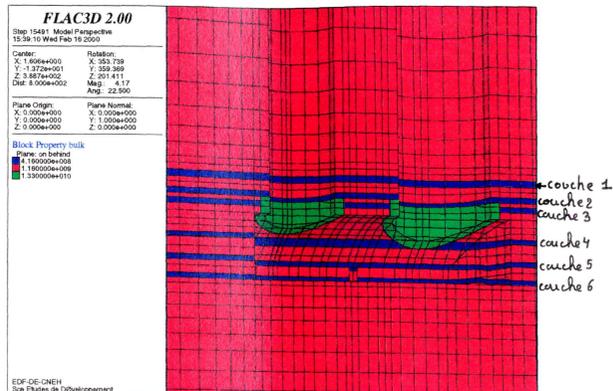
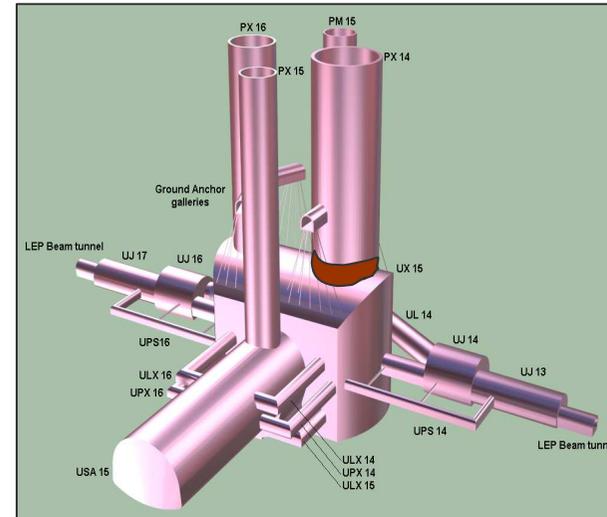
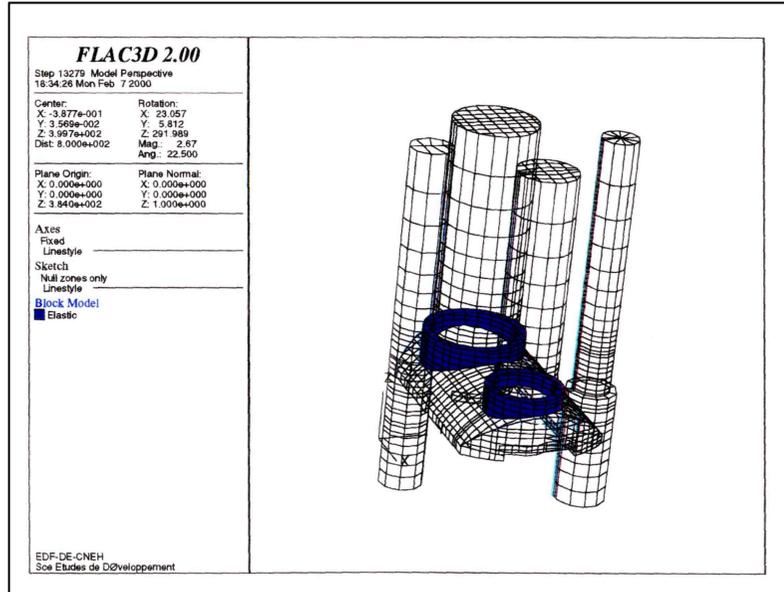
Figure 7 - Isovaleurs de la norme euclidienne du déplacement en paroi des puits et galeries.

Figure 8
Détail des isovaleurs de la norme euclidienne du déplacement (en m), au niveau de certaines parois.



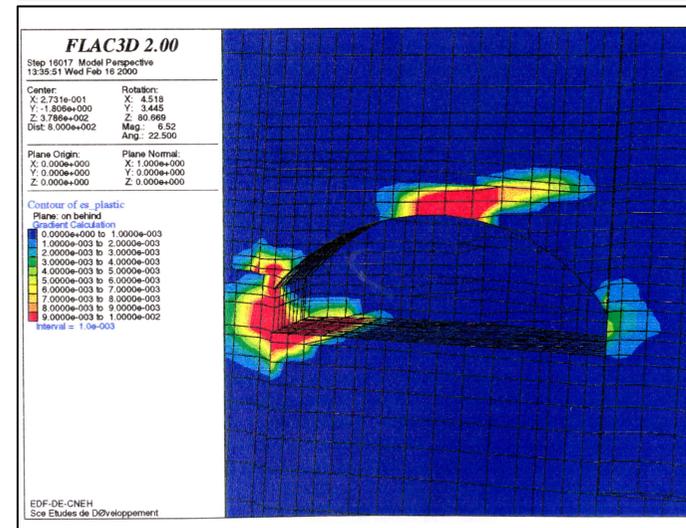
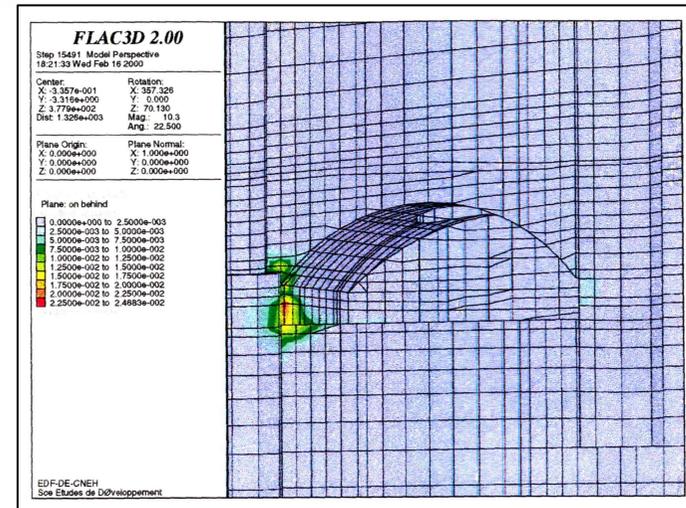
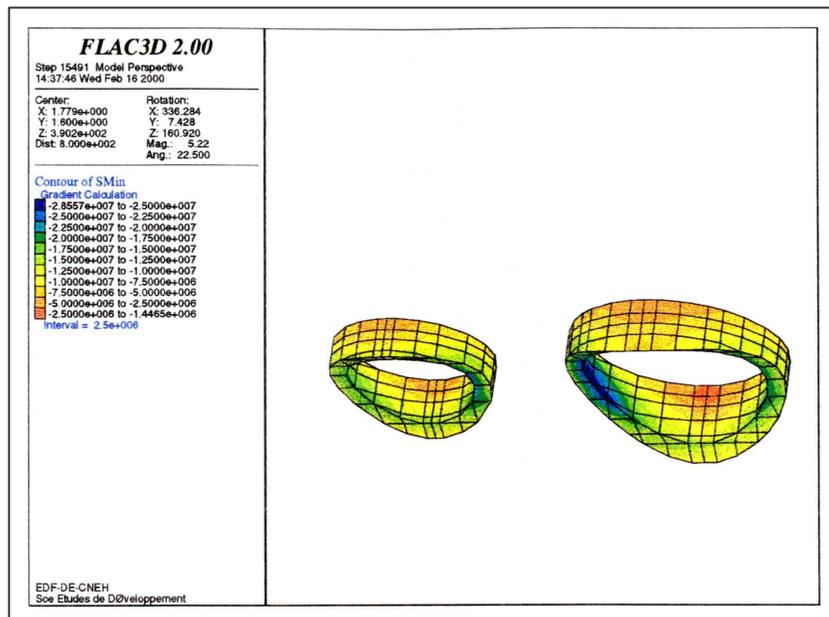
Apports & intérêts des modèles 3D

Intersections d'ouvrages



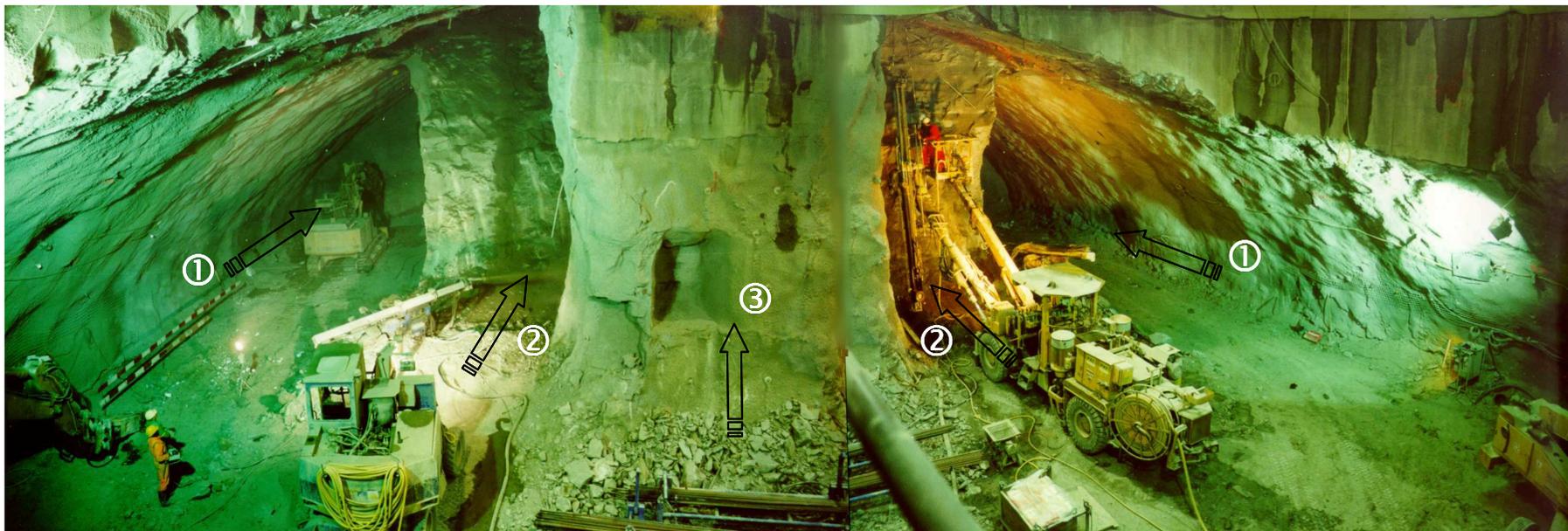
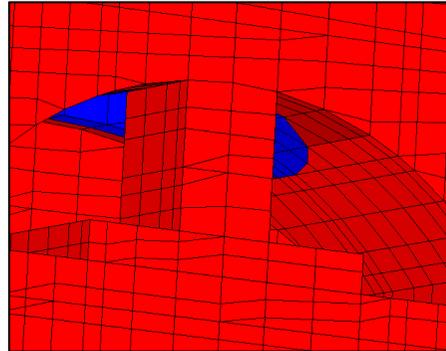
Apports & intérêts des modèles 3D

Intersections d'ouvrages



Apports & intérêts des modèles 3D

Phasage et séquences de réalisation



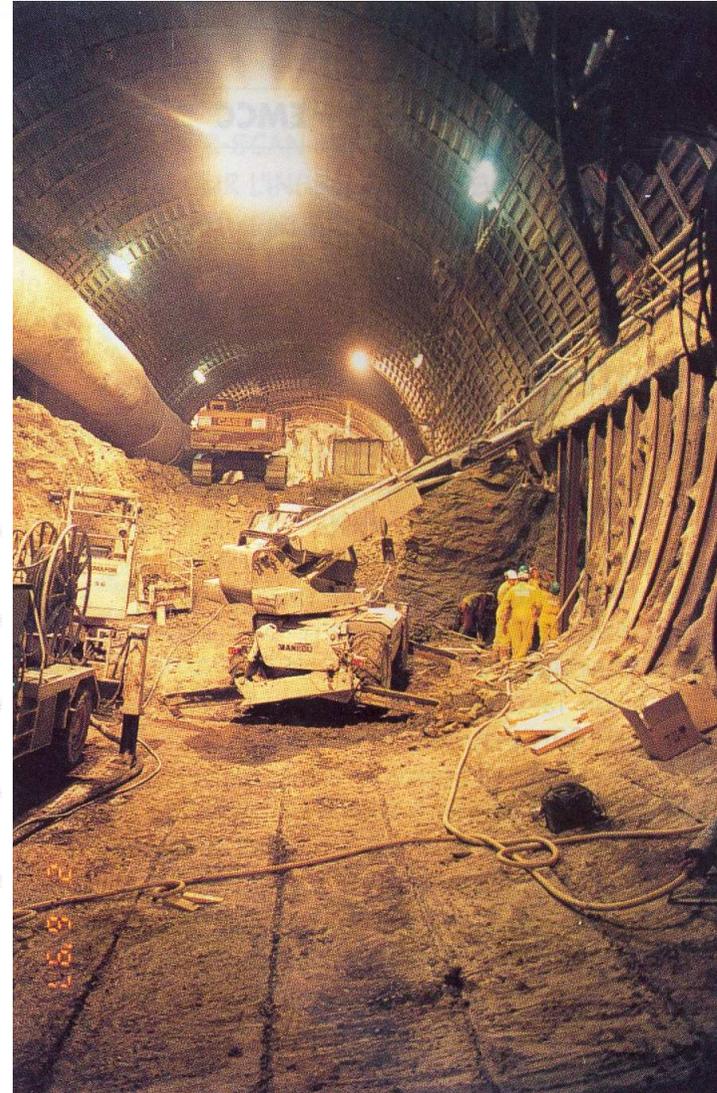
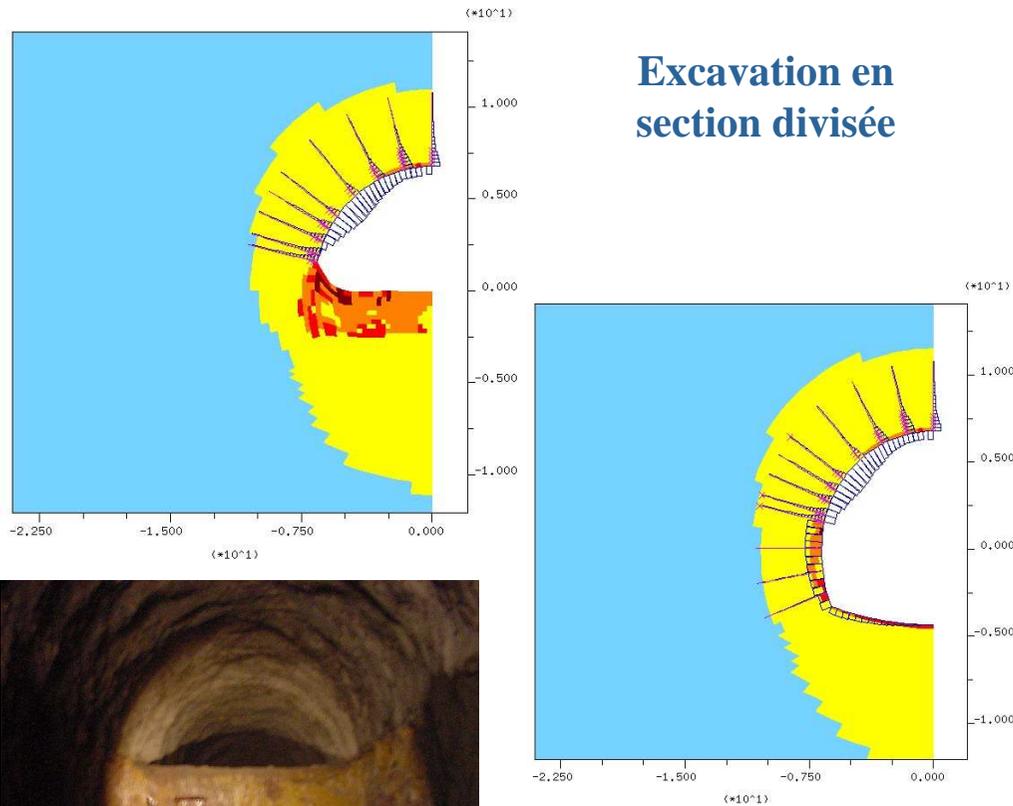
CERN-LHC



Apports & intérêts des modèles 3D

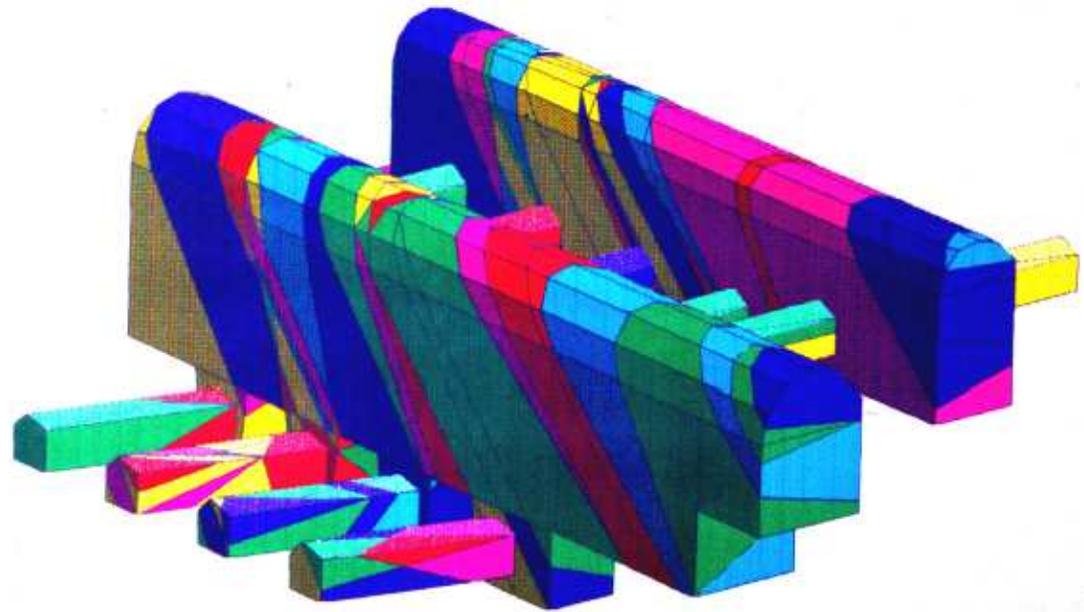
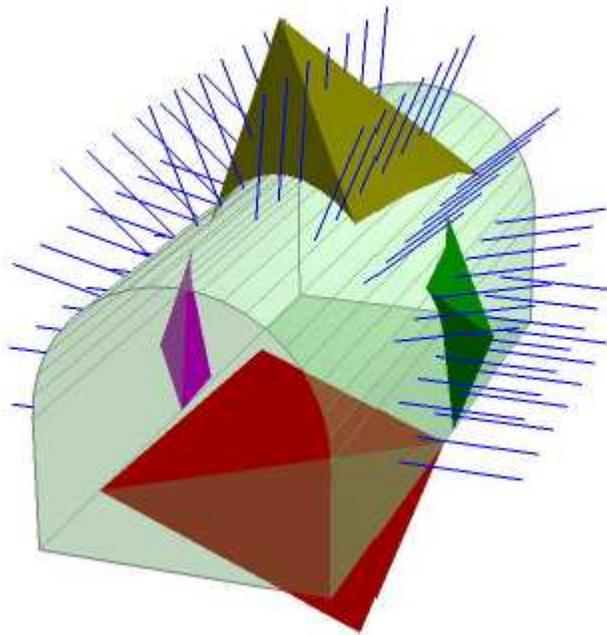
Phasage et séquences de réalisation

Excavation en section divisée



Apports & intérêts des modèles 3D

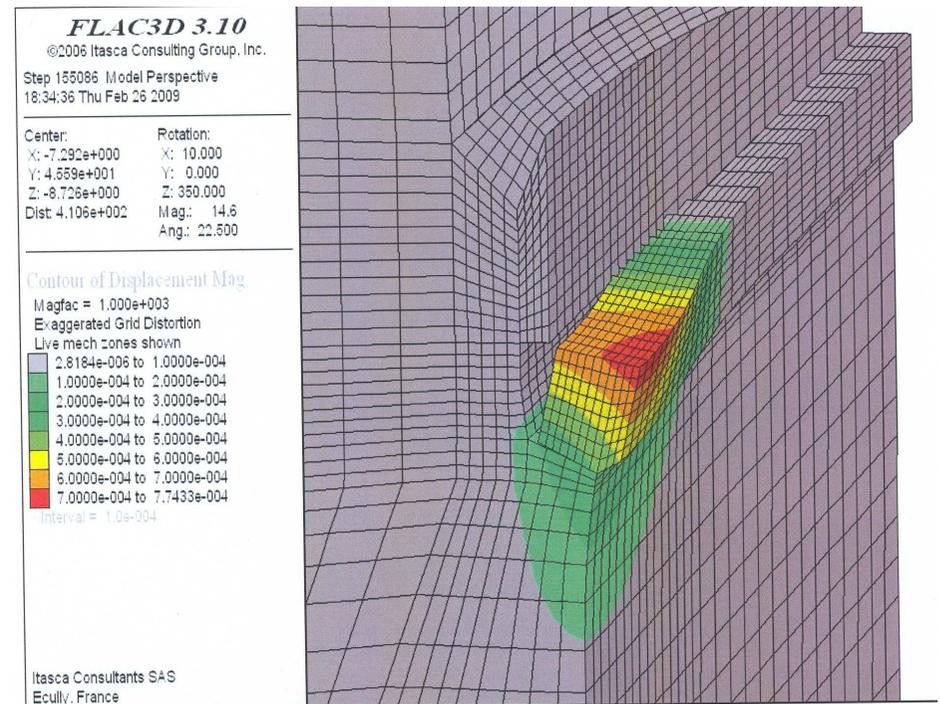
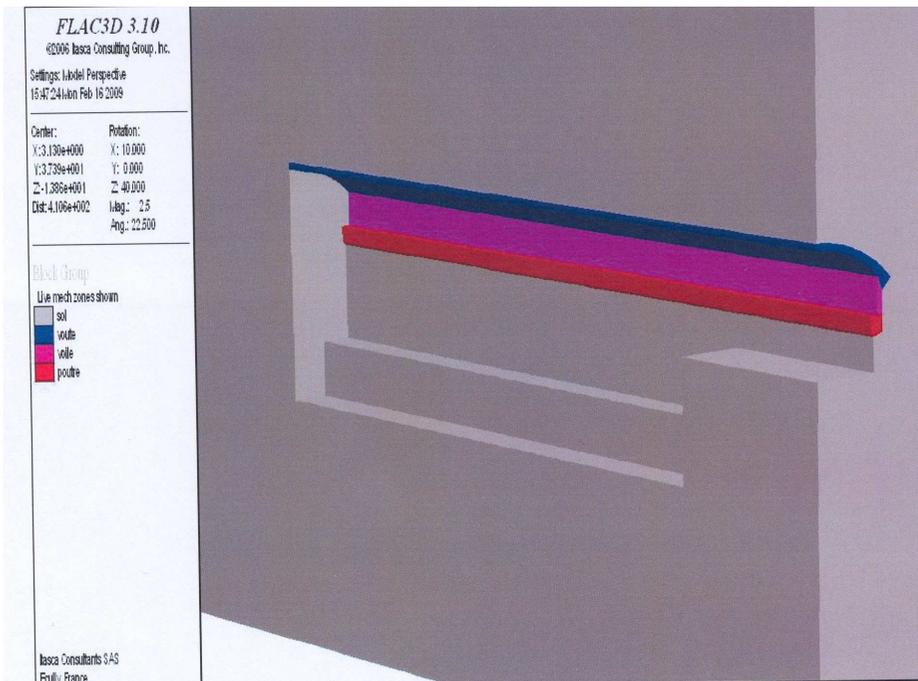
Structuration et fracturation du massif



Apports & intérêts des modèles 3D

Interaction sol-structure

Etude des conséquences de ruptures de tirants d'ancrage



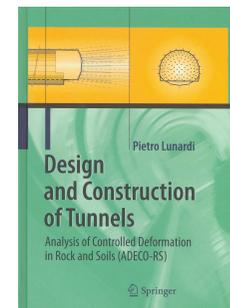
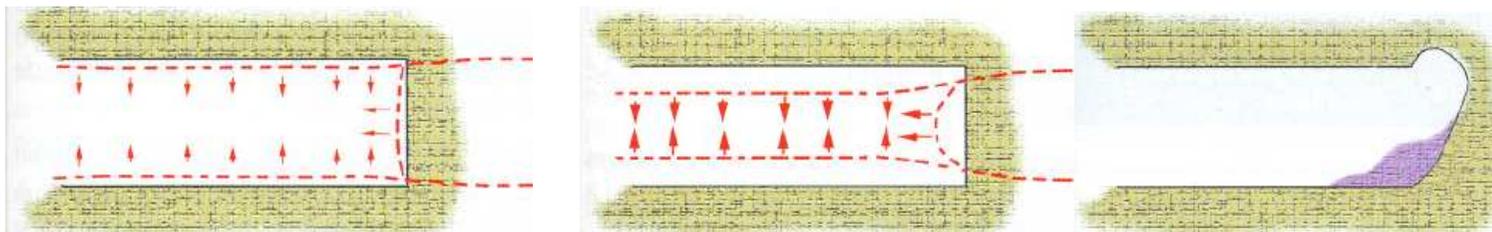
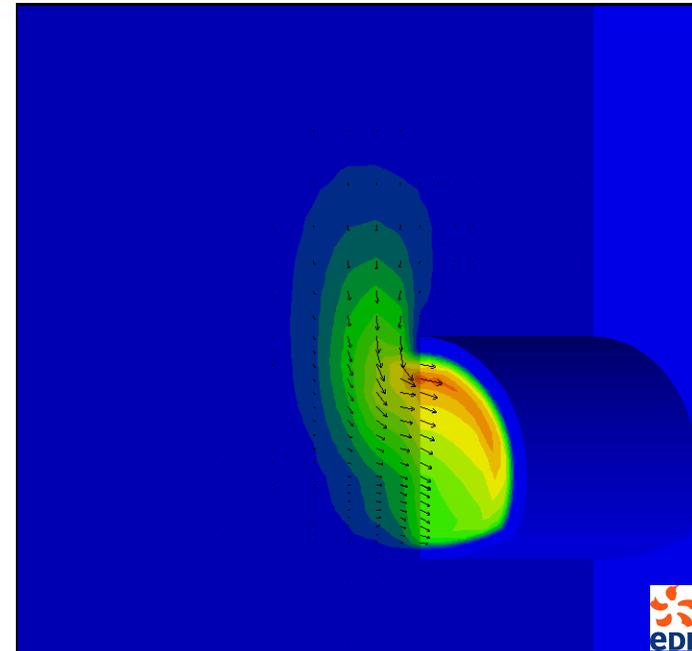
Comportement spécifique du front de taille

✚ Identification d'une instabilité potentielle du front de taille

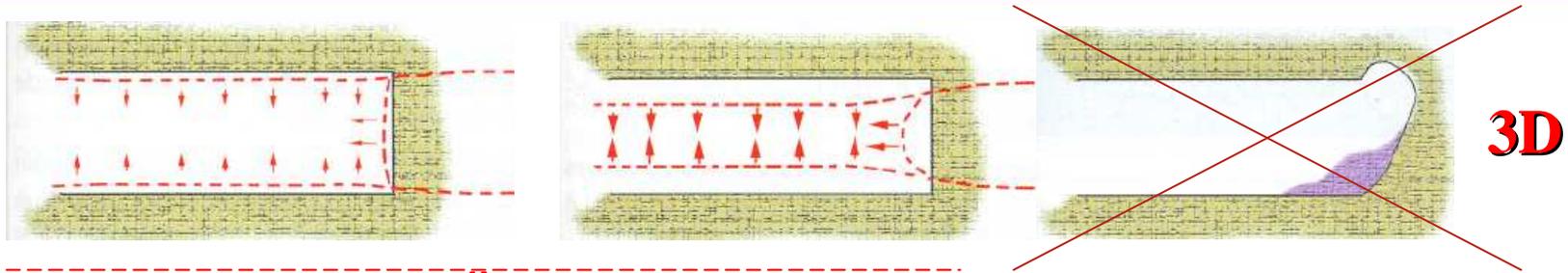
✚ Influence du front de taille sur les conditions de stabilité en arrière de celui-ci

• *Déformation et « préconvergence » du noyau en avant du front (Lunardi 2008) → Méthode ADECO-RS*

• *Plastification du noyau...*



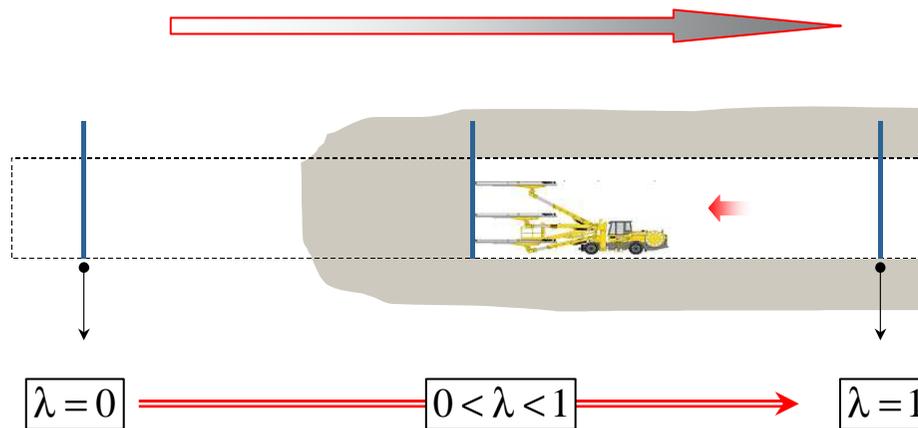
Comportement spécifique du front de taille



Méthode convergence-confinement

La méthode convergence-confinement permet de passer, sur une géométrie purement circulaire, d'une problématique

3D
Interaction
soutènement/terrain
à proximité du front



2D
Intégration de l'effet
3D à travers la
notion d'évolution
du taux de
déconfinement

Influence des chemins de contrainte

Chemin des contraintes

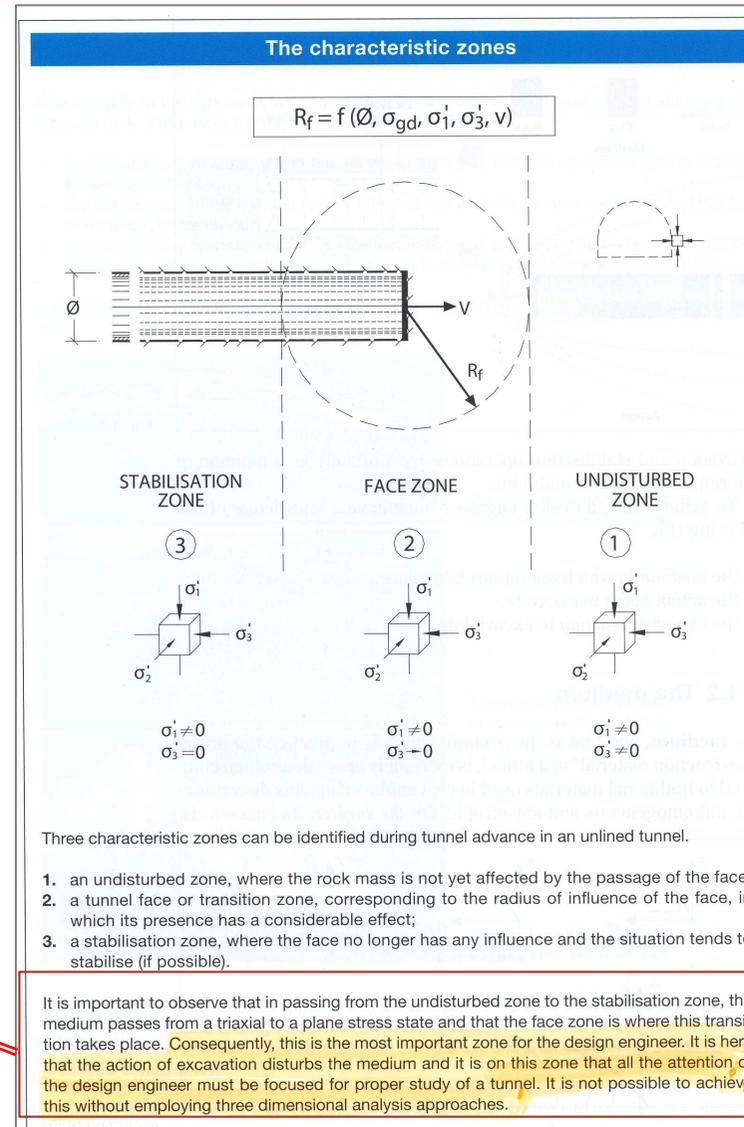
A proximité du front de taille, passage d'un

Etat de contrainte triaxial



Etat de contrainte plane

« ... En conséquence, (la zone du front) est la plus importante pour l'ingénieur concepteur. C'est ici que l'action de l'excavation perturbe le milieu et c'est dans cette zone que l'attention du concepteur doit se focaliser pour fournir un design adapté. Il n'est pas possible de réaliser cela sans mettre en œuvre une analyse tridimensionnelle... » (Lunardi 2008)



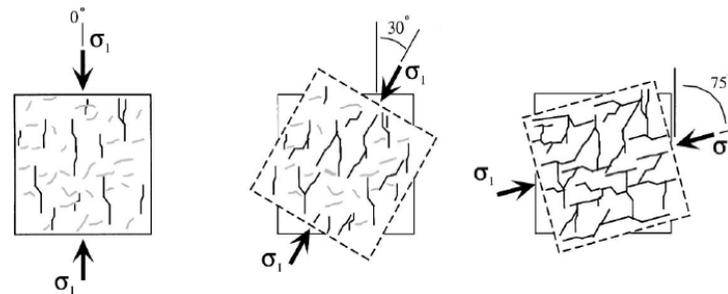
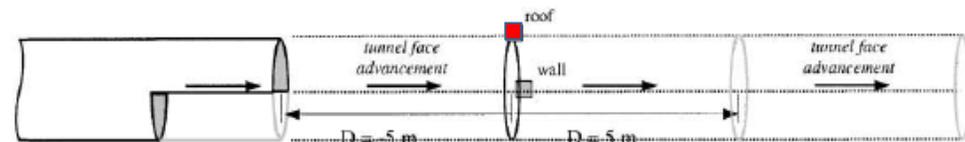
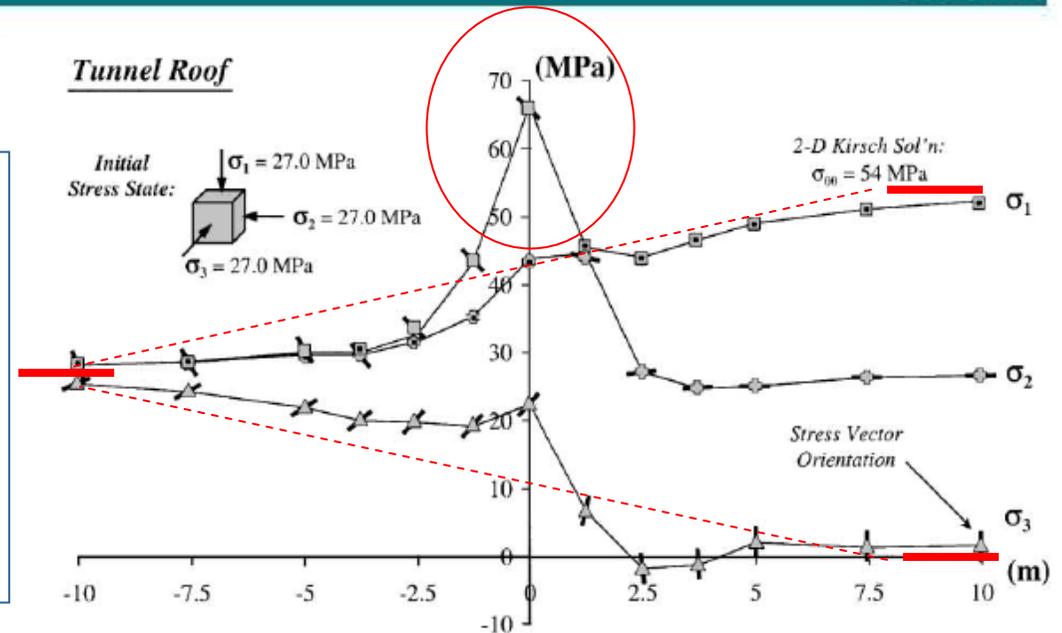
Influence des chemins de contrainte

Chemin des contraintes

E. Eberhardt

Numerical Modelling of three-dimension stress rotation ahead of an advancing tunnel face

International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 38 (2001) pp 499-518



Pic de contrainte au passage du front

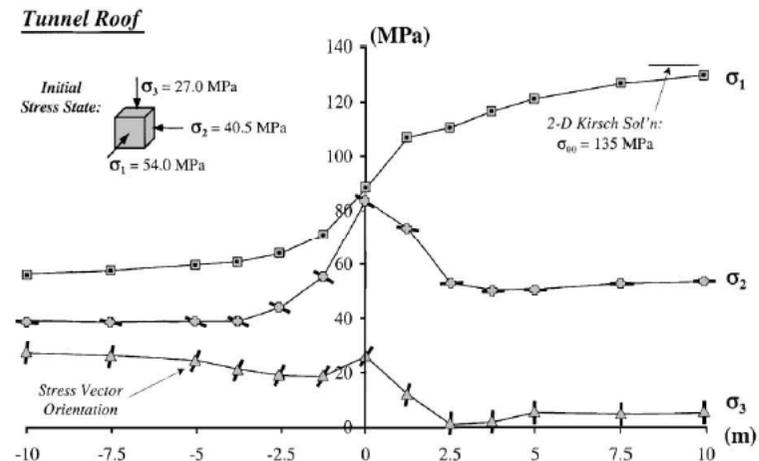
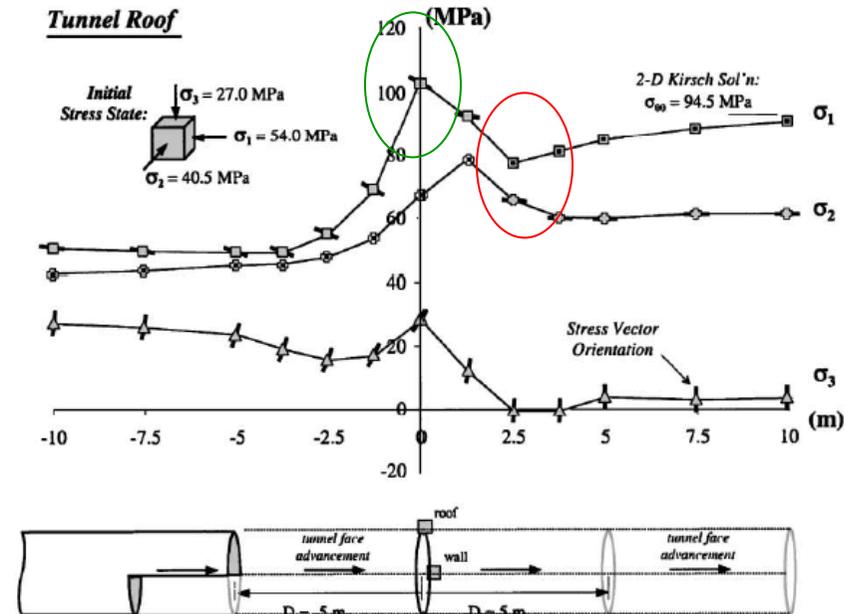
Rotation des contraintes principales

Influence des chemins de contrainte

L'orientation d'un tunnel selon la contrainte principale majeure horizontale génère:

- une forte augmentation du déviateur des contraintes au passage du front.
- une rotation du tenseur des contraintes principales

Mécanisme non identifié et traduit par une modélisation 2D en déformations planes



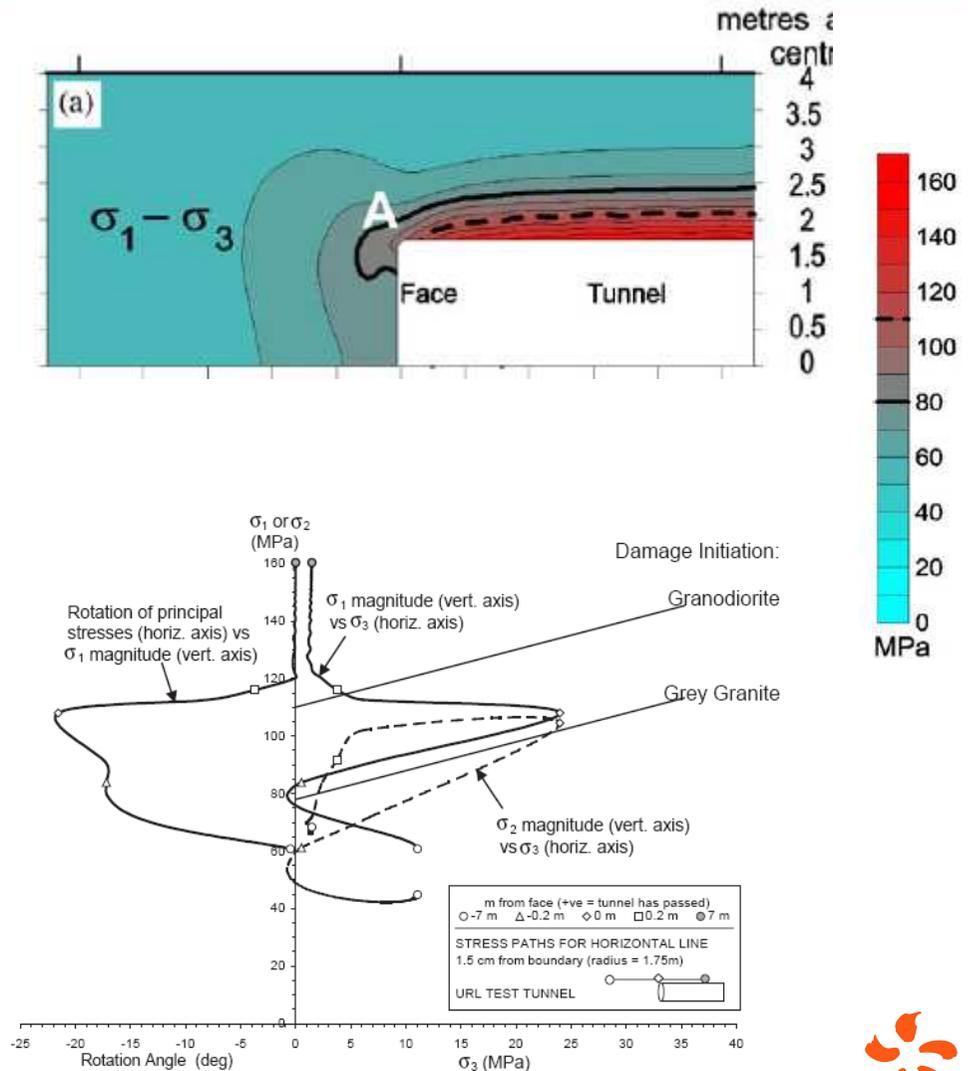
Influence des chemins de contrainte

Chemin des contraintes

M.S. Diederichs/P.K. Kaiser/E. Eberhardt

Damage Initiation and Propagation in Hard Rock during Tunnelling and The Influence of near-face stress rotation

International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 41 (2004) pp 785-812

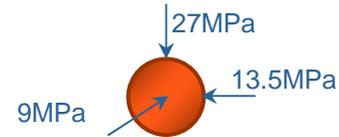


Influence des chemins de contrainte

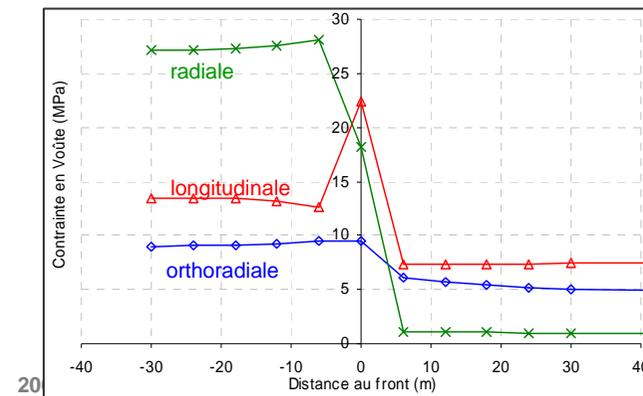
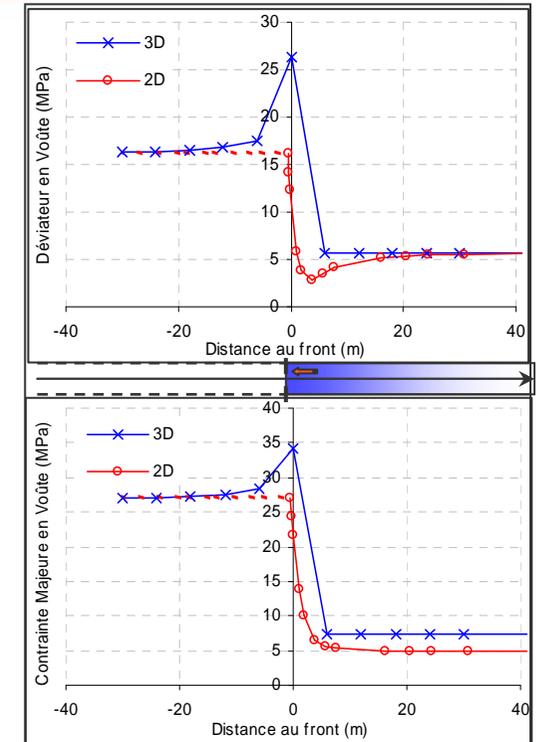
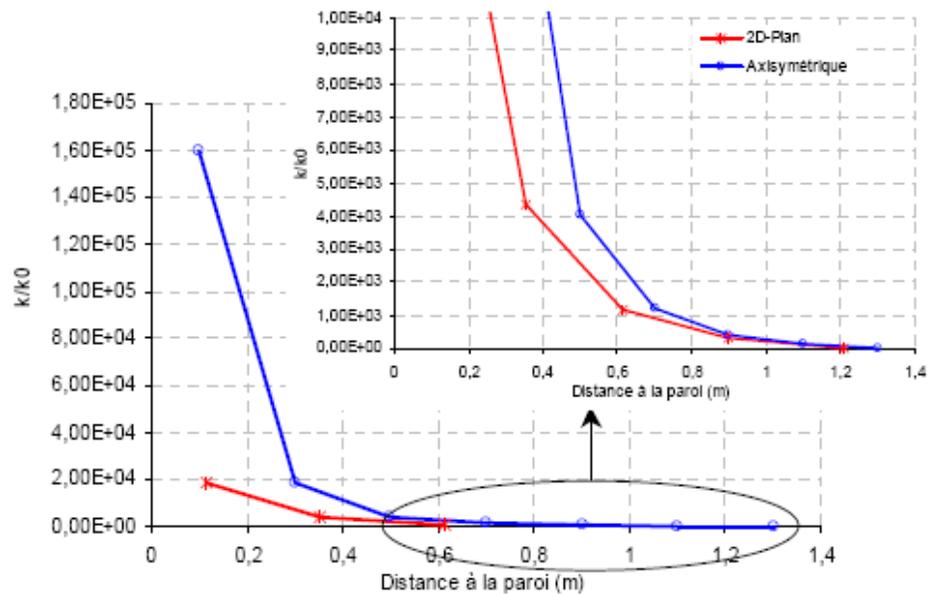
A. Kleine

Modélisation numérique du comportement des ouvrages souterrains par une approche viscoplastique

*Thèse de Doctorat INPL (2007)
Laego-EDF*



Le passage du front de taille est caractérisé par un pic de contraintes, susceptible de générer un endommagement supplémentaire du massif.



Rotation des contraintes (en voûte)



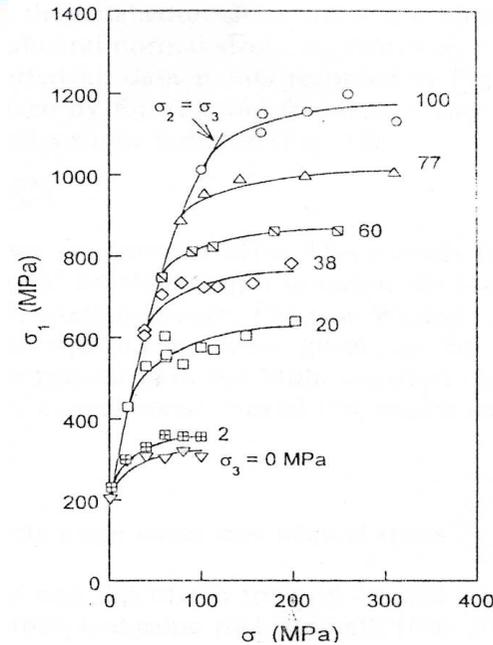
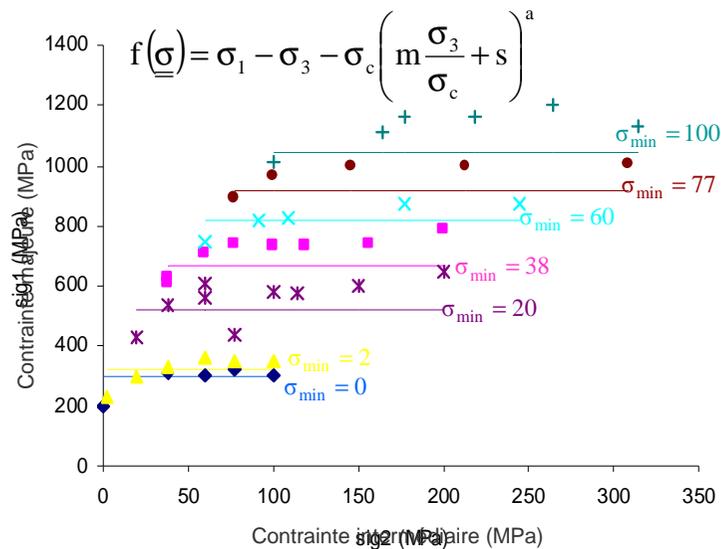
Lois de comportement et aspects tridimensionnels

Essais « usuels »:

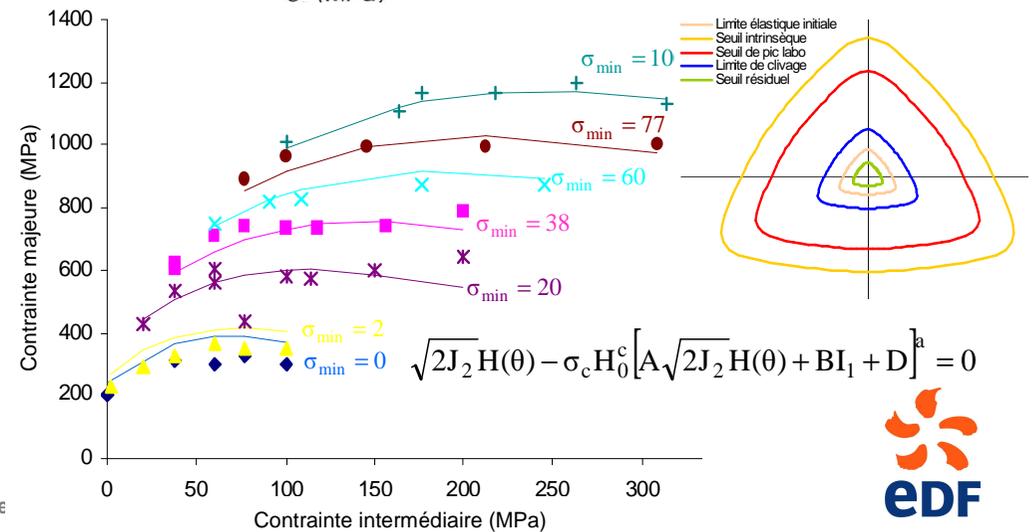
Compression ↔ Extension

Pas de rotation des contraintes

Conséquences sur la formulation des lois de comportement



(Granite de Westerly – Haimson/Chang 2000)



Conclusions

Développements des outils de calcul et informatique
→ Les outils « géotechniques » existent !!!

Problématique de la définition géométrique

Recherche d'un compromis entre un « raffinement géométrique » et un
« raffinement rhéologique »

Outils « pointus » à utiliser en s'appuyant sur une expérience