

Modélisation numérique et couplages

Robert Charlier – Université de Liège

50 ans du CFMR

14 septembre 2017

Une vision personnelle, partielle, subjective, incomplète...

Domaines d'application

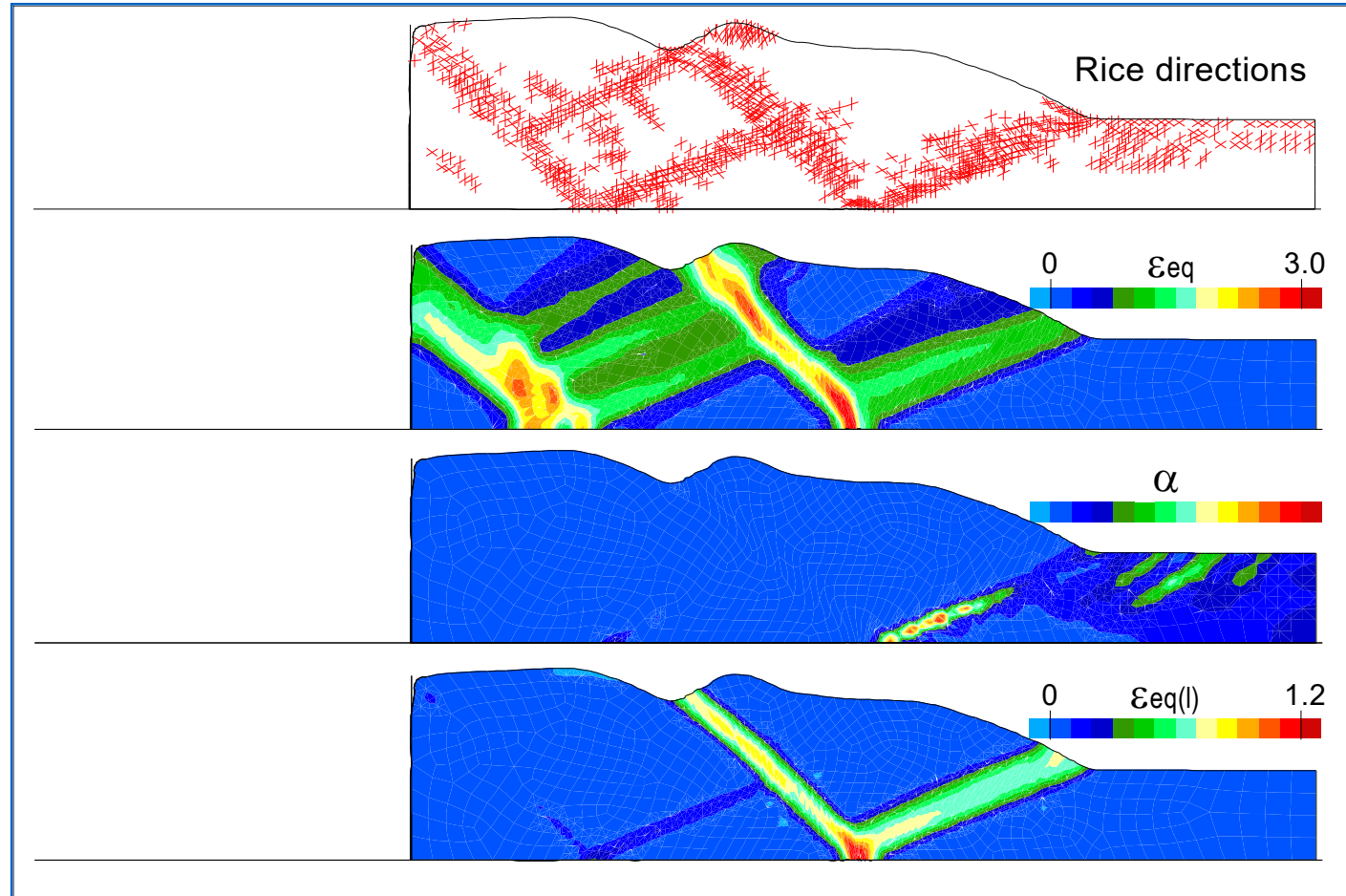
- **Ingénierie des Réservoirs** : industrie pétrolière (subsidence, activation de failles, pertes de puits, **histoire géologique** ...)
- Réservoirs d'eau – aquifères et subsidence, réservoirs de chaleur et géothermie
- **Stockage de déchets nucléaires**
- Mines
- Energy geotechnics (TC, Barcelona, Kiel, Lausanne ...)

Modèles

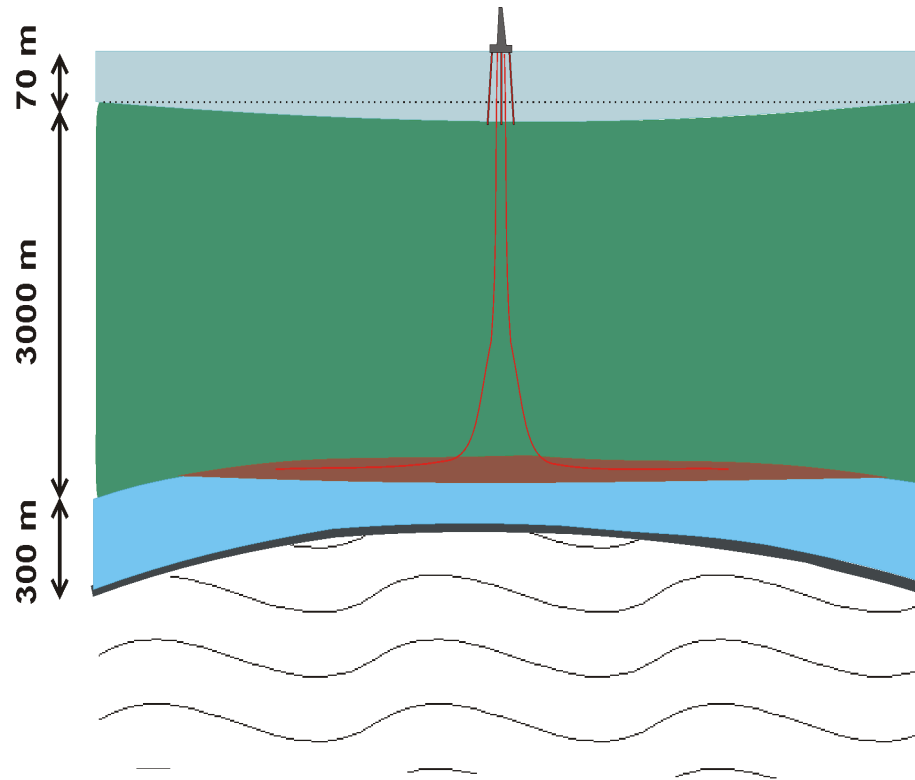
- Éléments finis : un outil robuste et résistant au temps (Plaxis, Aster, Code_Bright, Lagamine ...)
- Différences finies : FLAC
- Éléments distincts, particules : UDEC, PFC, Yade, Montpellier, Grenoble

Ingénierie des réservoirs – histoire tectonophysique – compression d'un bassin sédimentaire $\phi_i=25^\circ$, $u=5.81\text{cm}$

Thèse
JD Barnichon
ULg



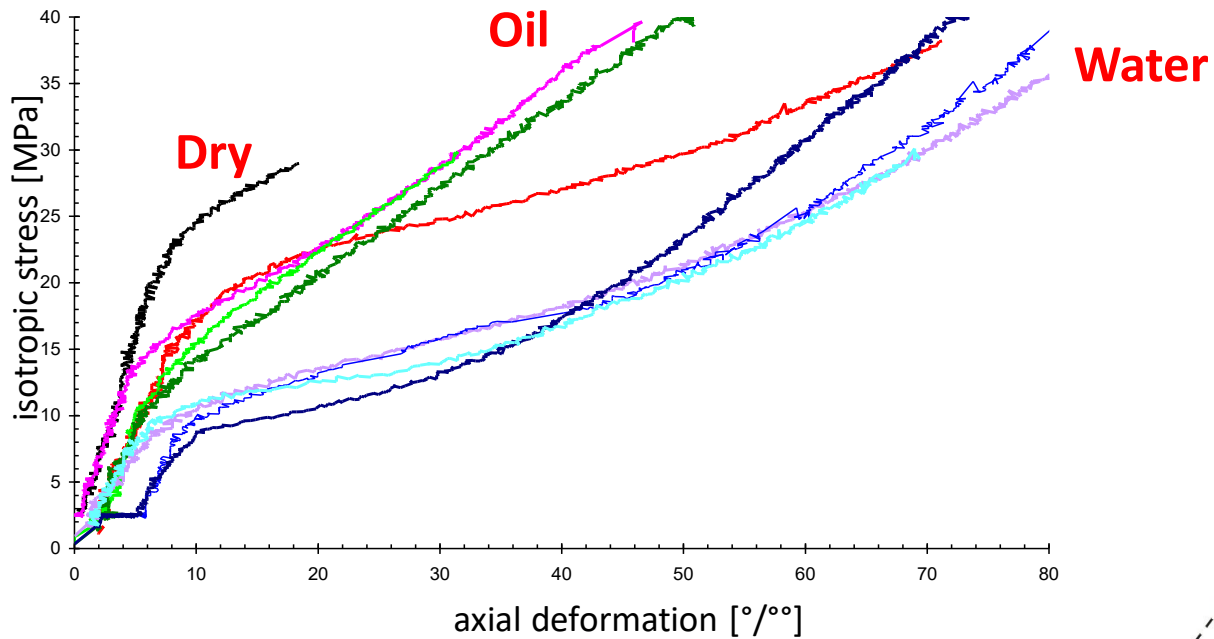
Subsidence du réservoir d'Ekofisk



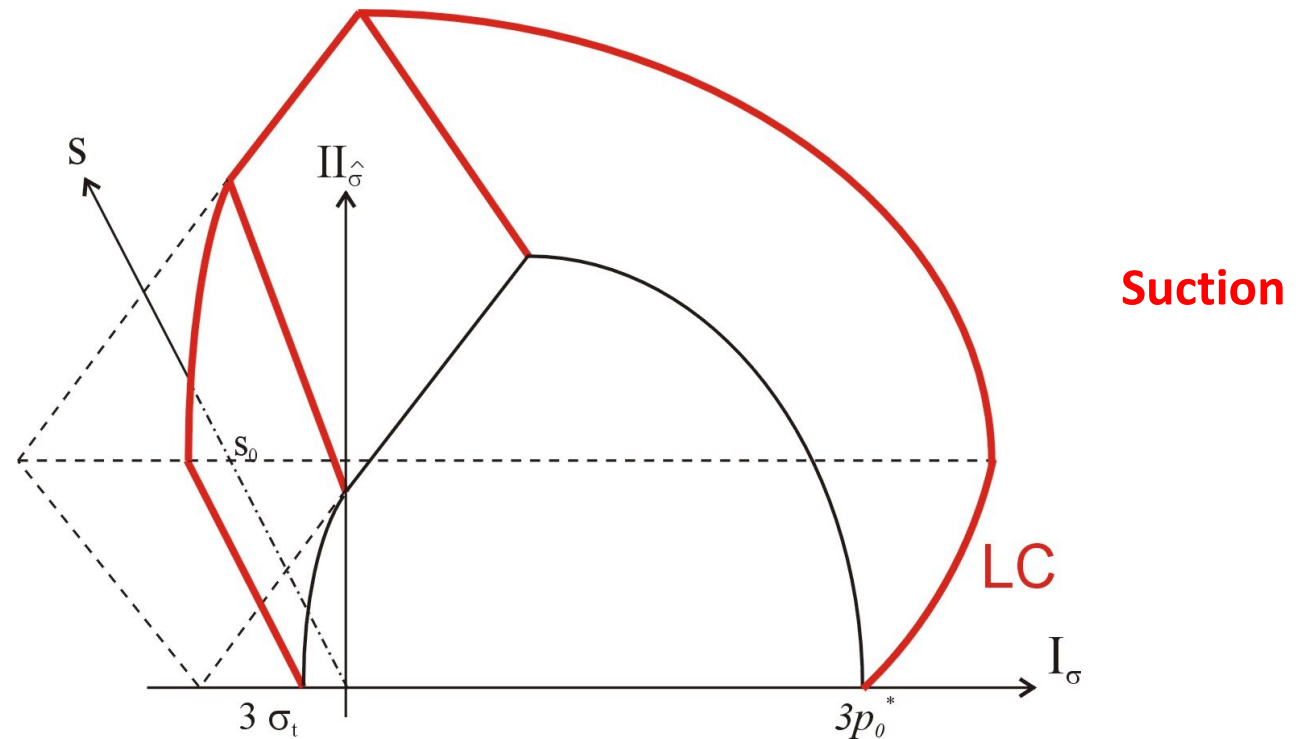
Initial stress state :
 $\sigma_v = 62$ MPa et $\sigma_h = 55$ MPa
Pore pressure :
49 MPa

- 1970: Start of production
 - Depletion
 - Compaction
- 1975 - 1977: Re-injection of gas
- 1985: Subsidence (3 metres)
- 1986: Injection of sea water
 - *****
 - Subsidence: 50 cm/year
 - Evolution of the reservoir pore pressure: de 49 MPa à 24 MPa
- 2000: Subsidence (8 metres)

A partial saturation model for chalk

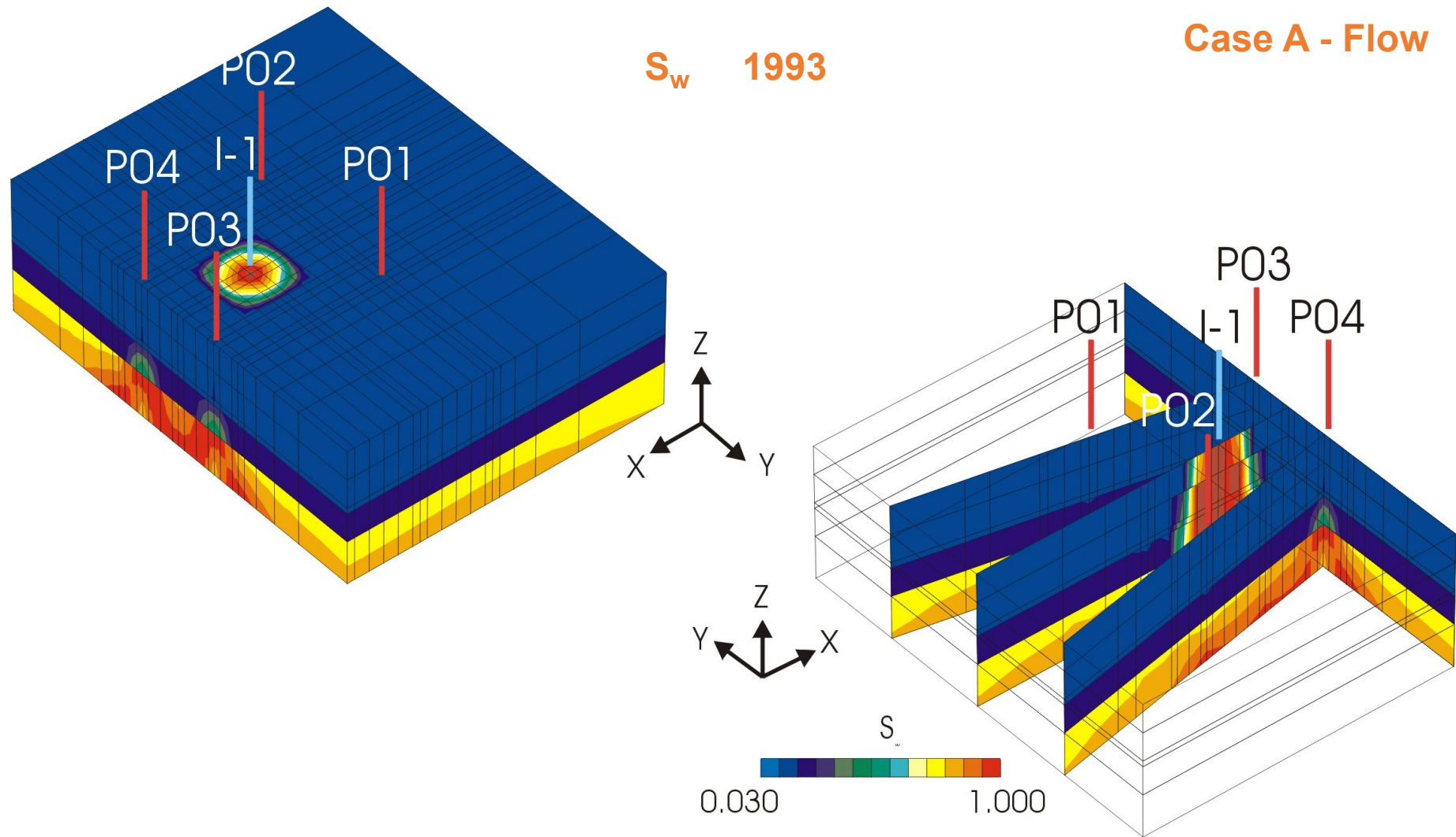


Thèse de F Collin



Thèses de
F Collin
C Schroeder
ULg

Degré de saturation – injection d'eau



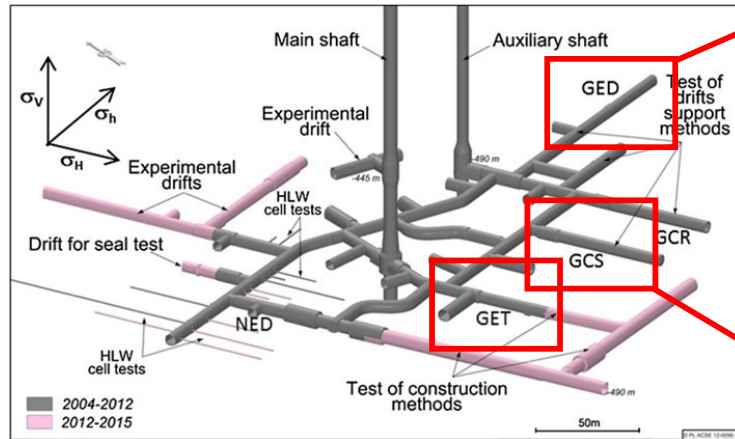
Stockage géologique de déchets nucléaires – EDZ

- Fracturing

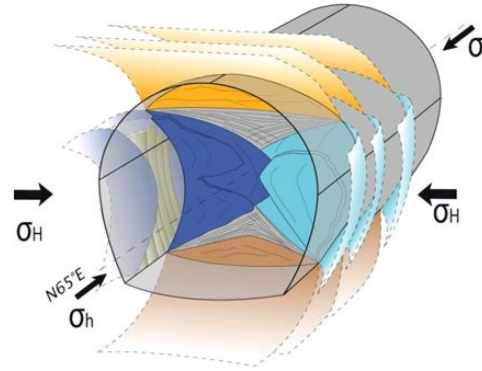
Anisotropies: - stress : $\sigma_H > \sigma_h \sim \sigma_v$

- material : HM cross-anisotropy.

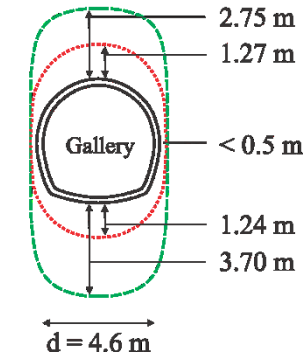
(Armand et al., 2014)



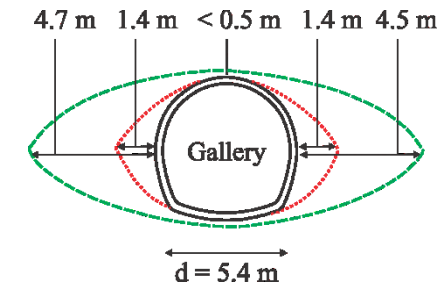
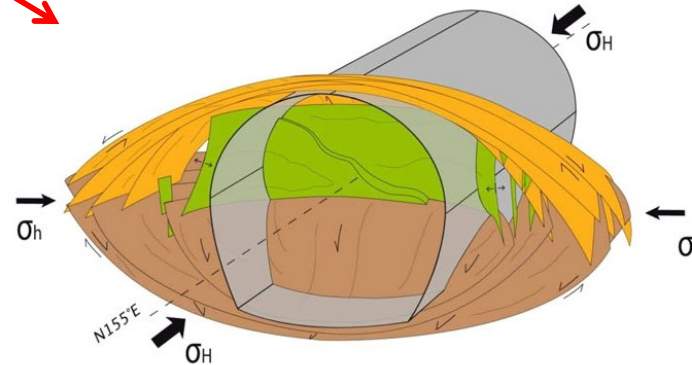
Galery // to σ_h



--- Shear fractures
 Mixed fractures



Galery // to σ_v



Issues: Prediction of the fracturing.
 Effect of anisotropies ?
 Permeability evolution & relation to fractures ?

Strain localisation

Thèse de B. Pardoën, ULg

- Anisotropie hydrique K
- Modèle EP Drucker Prager + adoucissement cohésion + écrouissage frottement
- Anisotropie mécanique élastique + cohésion + Biot
- Fluage

- Perte d'eau de la roche en champ proche
- Échanges hydriques en paroi, saturé / non saturé, couche limite

- Évolution de la perméabilité dans les bandes de déformation localisée : plusieurs ordres de grandeur

EDZ permeability

Modelling of excavation and SDZ experiment

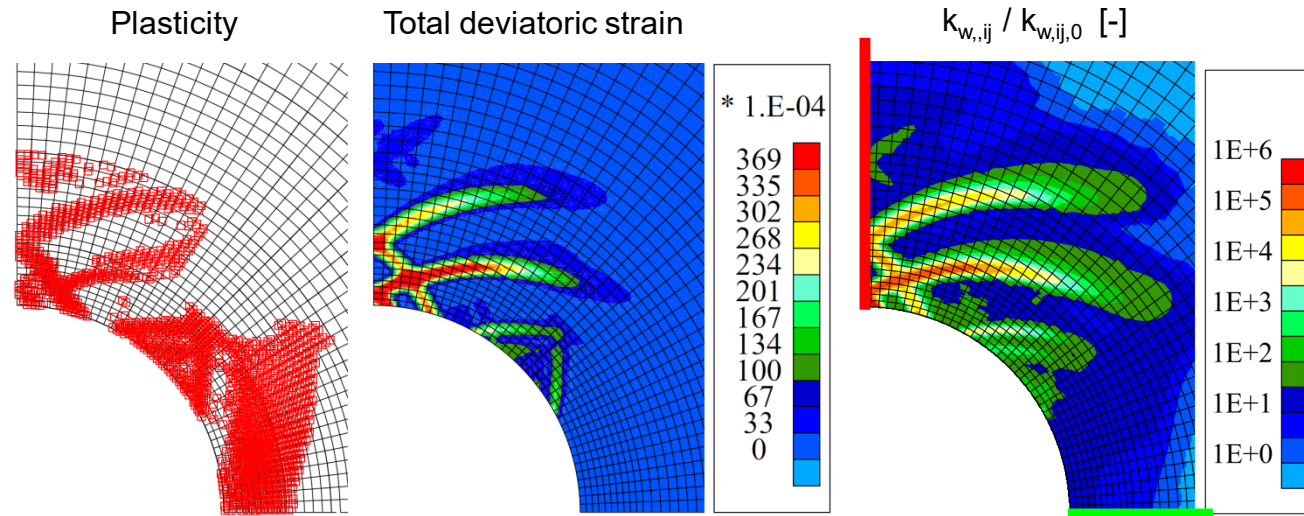
HM coupling in EDZ

- Gallery excavation

SDZ → GED gallery // σ_h

Anisotropic $\sigma_{ij,0}$ and material

→ Localisation zone dominated by stress anisotropy

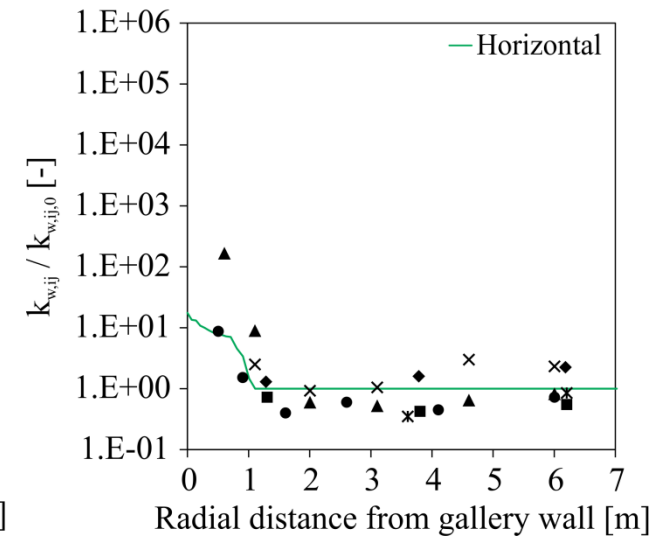
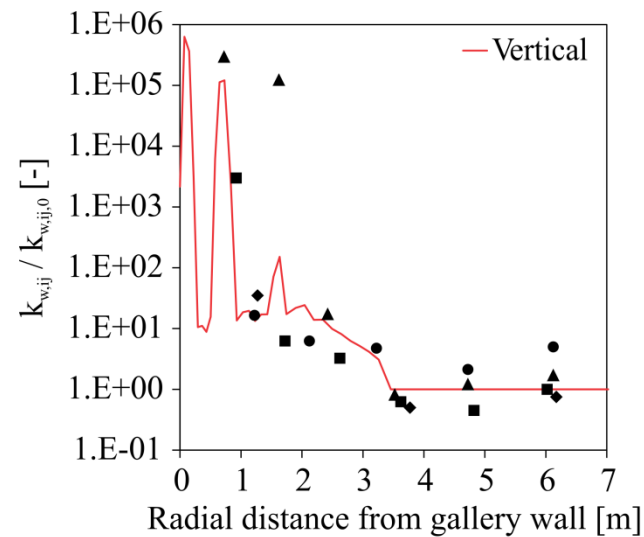


- Intrinsic permeability evolution

$$\frac{k_{w,ij}}{k_{w,ij,0}} = \left(1 + \beta \langle YI - YI^{thr} \rangle \hat{\varepsilon}_{eq}^3\right)$$

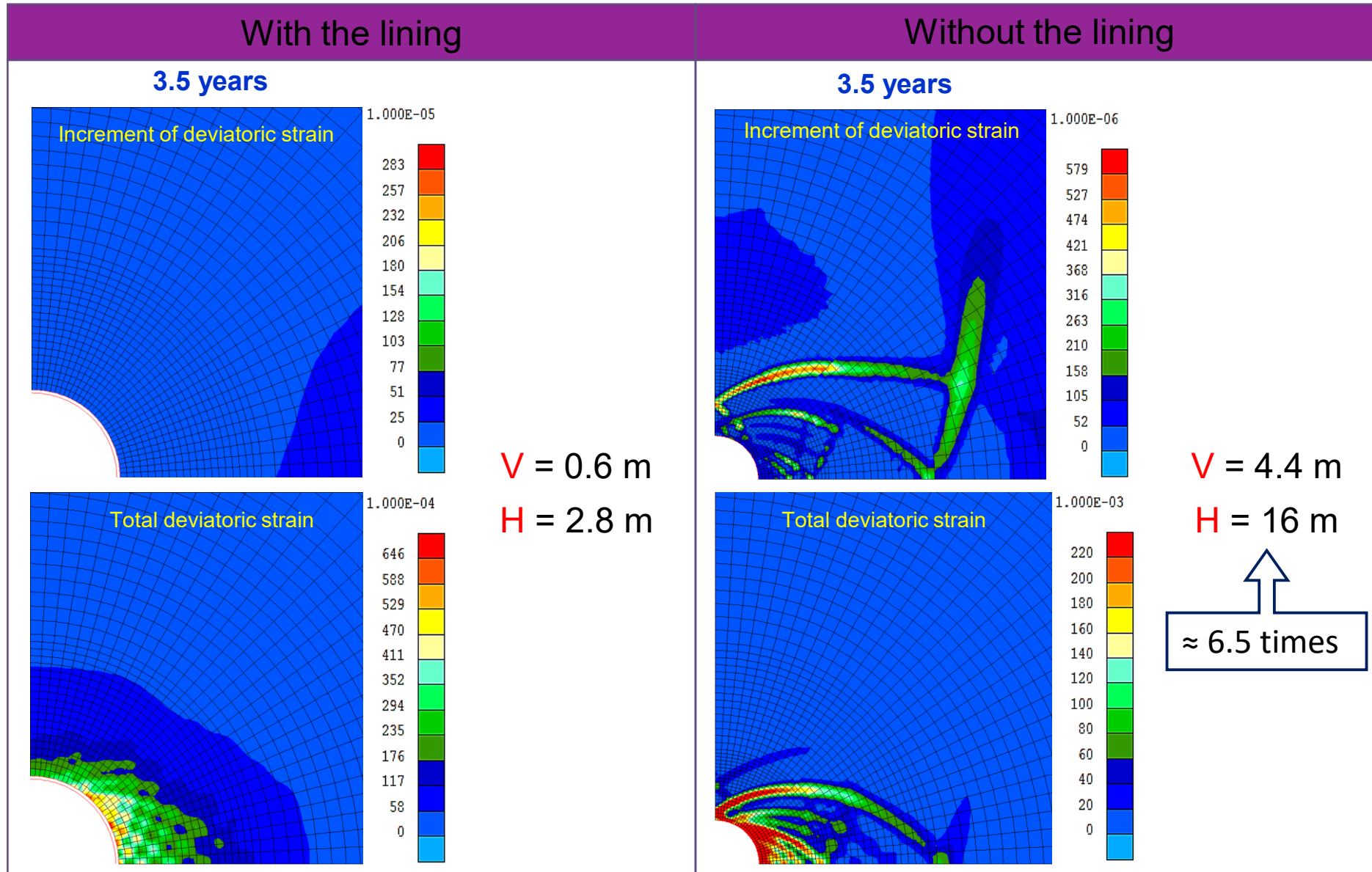
$$YI^{thr} = 0.95$$

Cross-sections

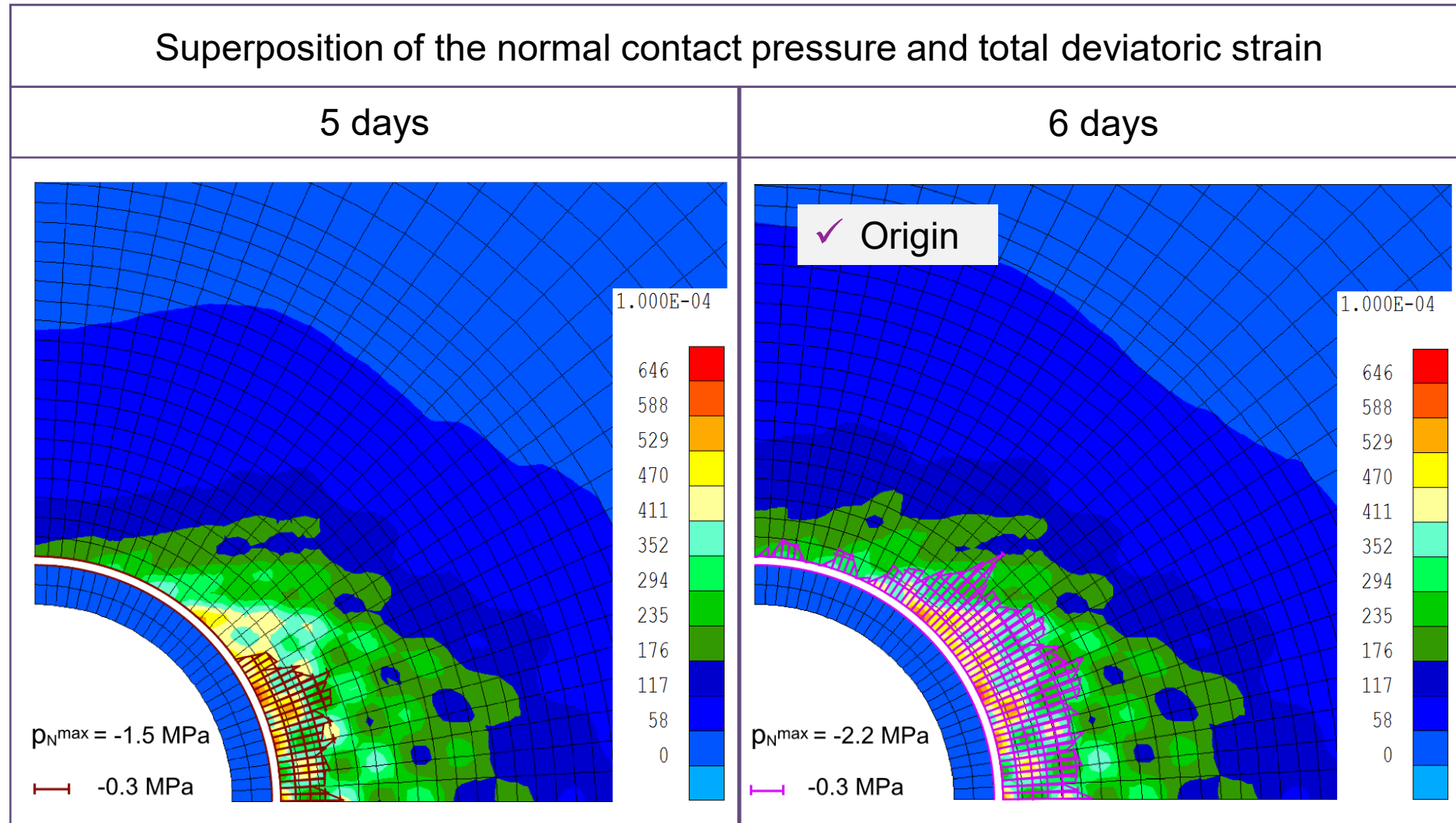


Plastic strain and a part of the elastic one → EDZ extension + k_w increase

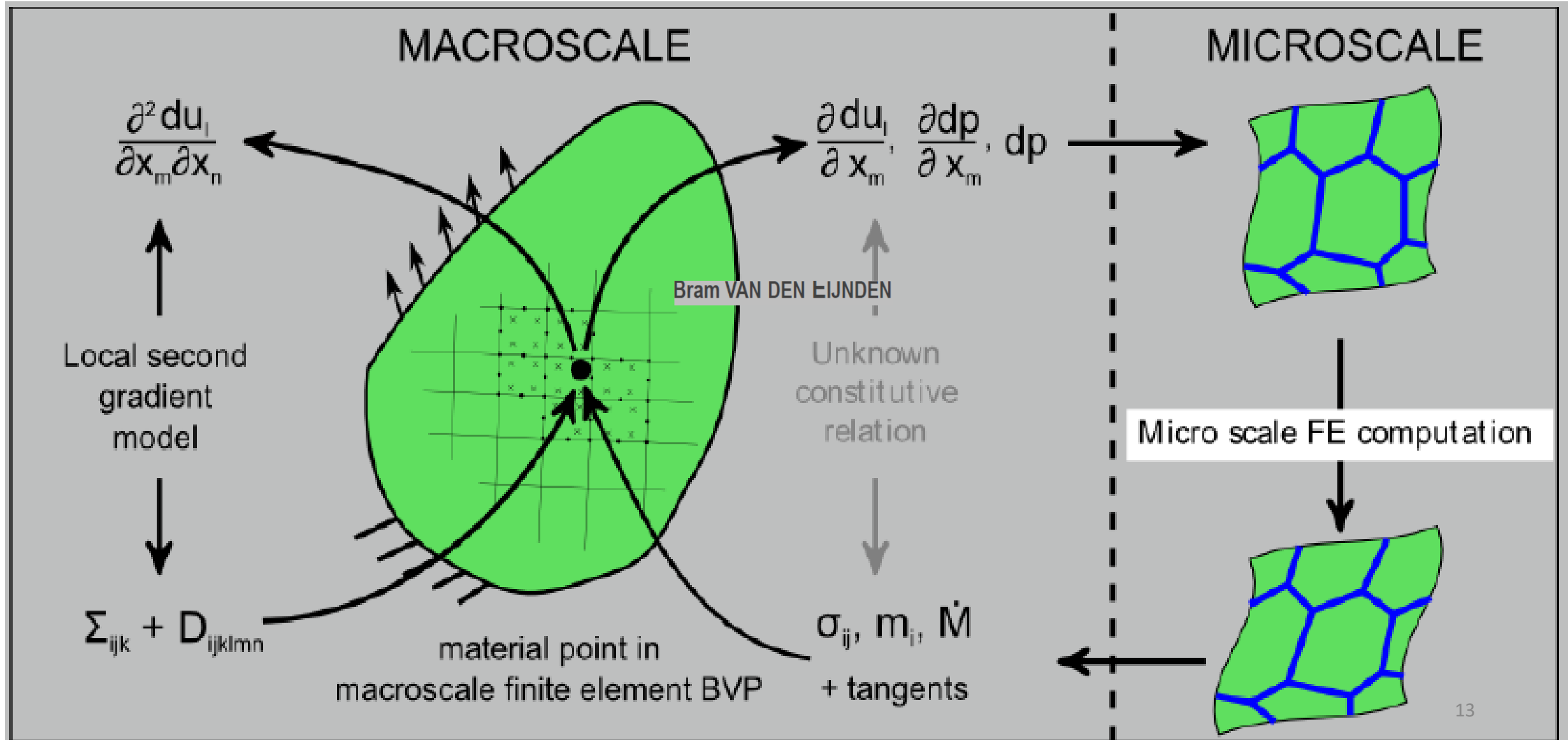
Thèse de F Salehnia - ULg : interaction roche & EDZ – soutènement



Oscillations: Contact pressure in relation to strain localization

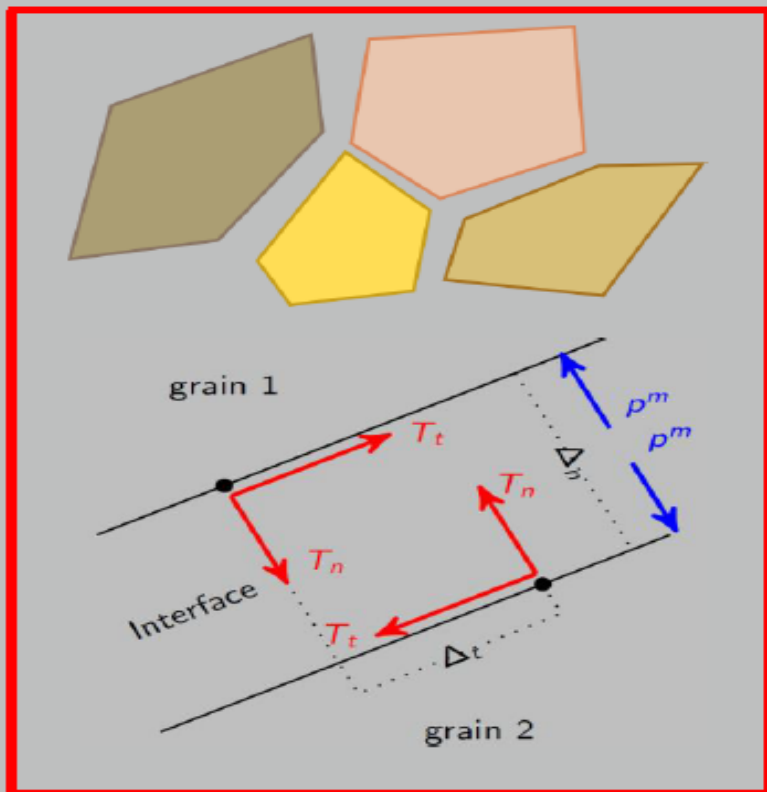
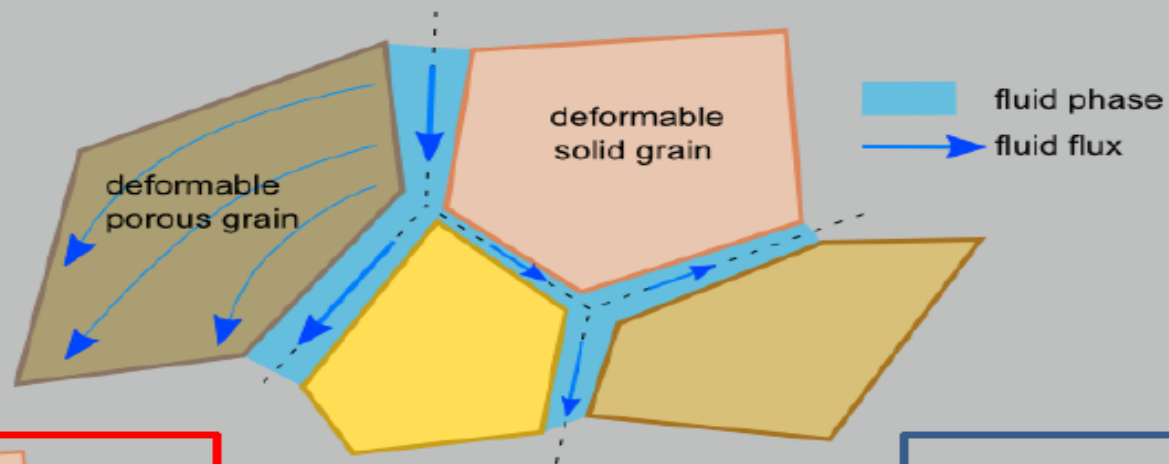


FE2 : thèse B. Van Den Eijnden – 3SR & ULg

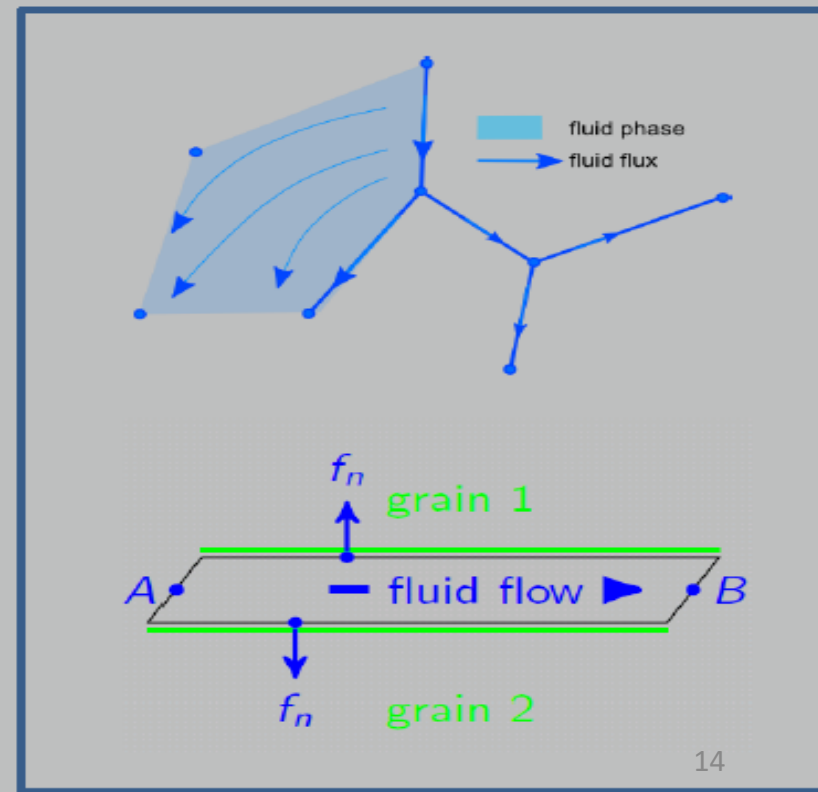


The double-scale model

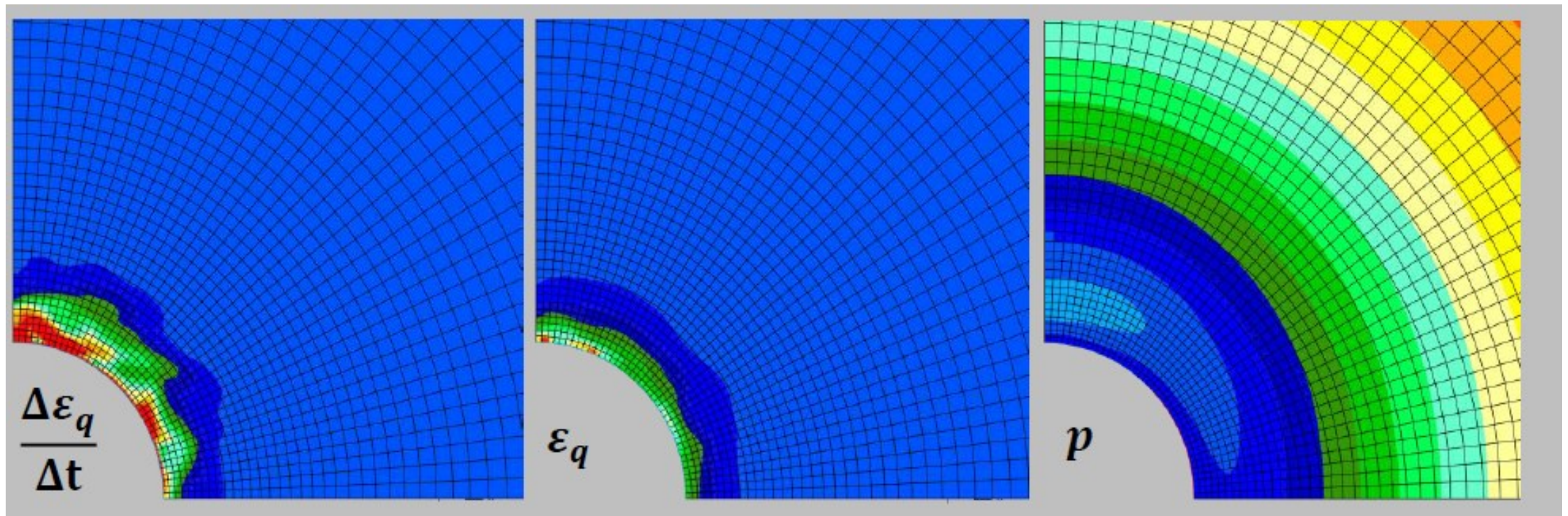
Microscale model: concept



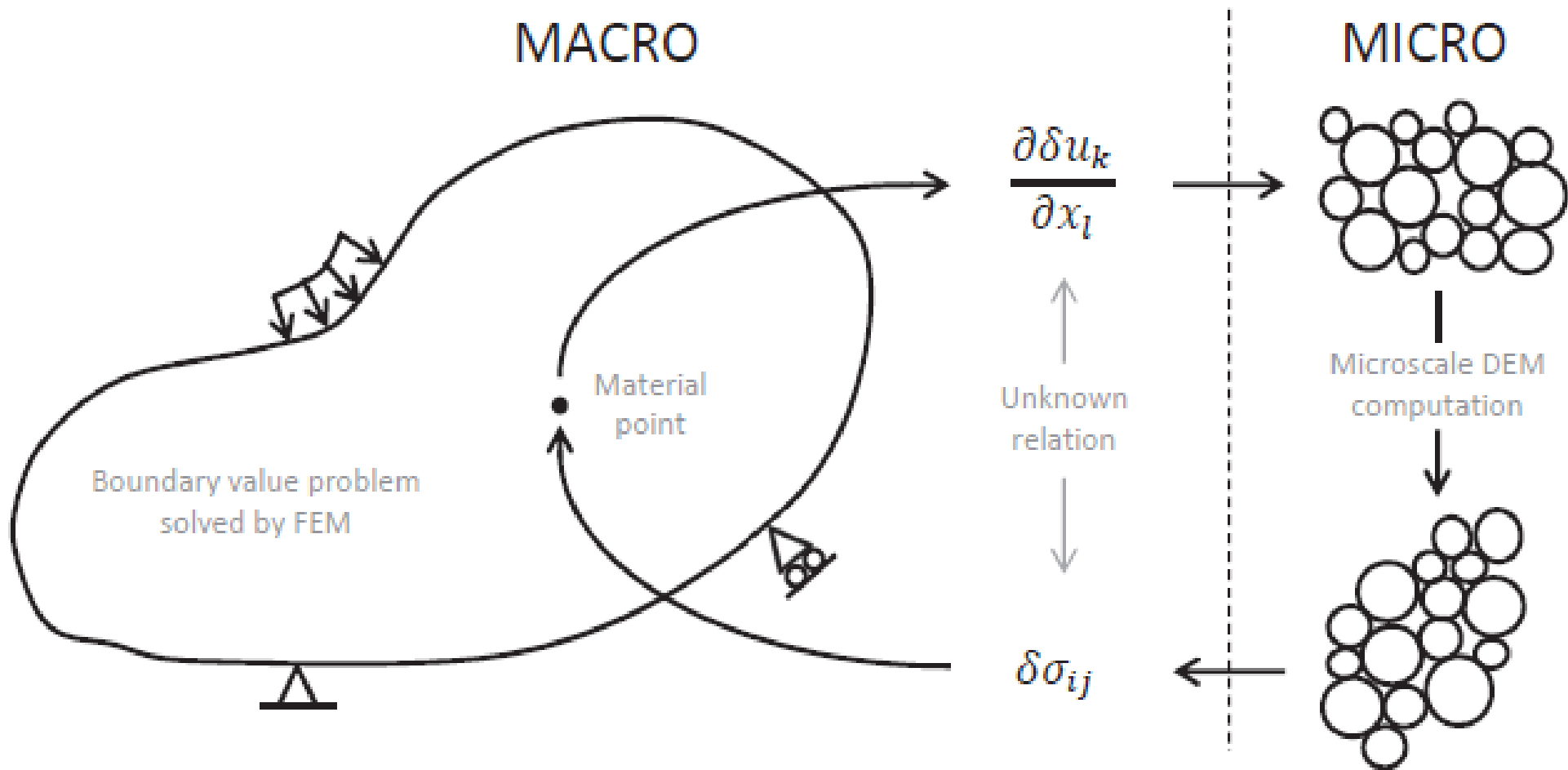
Δu_n
 interface opening



FE2 – 5 ans – couplage hydromécanique saturé



FEM – DEM : thèse A. Argilaga Claramunt – 3SR



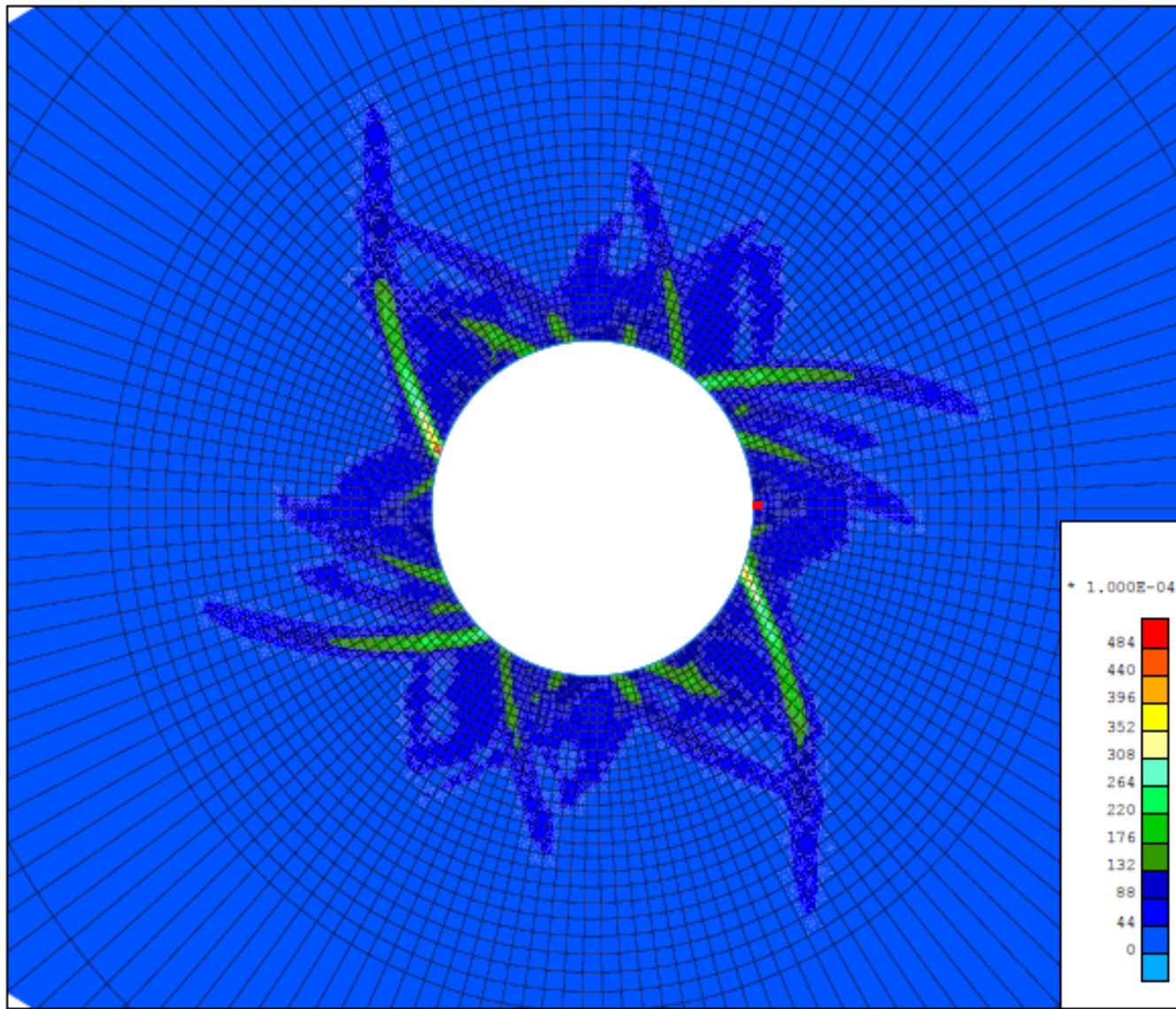


Figure: Localization around a gallery. FEM: 4950 elements, 18900 nodes, 66297 DOF

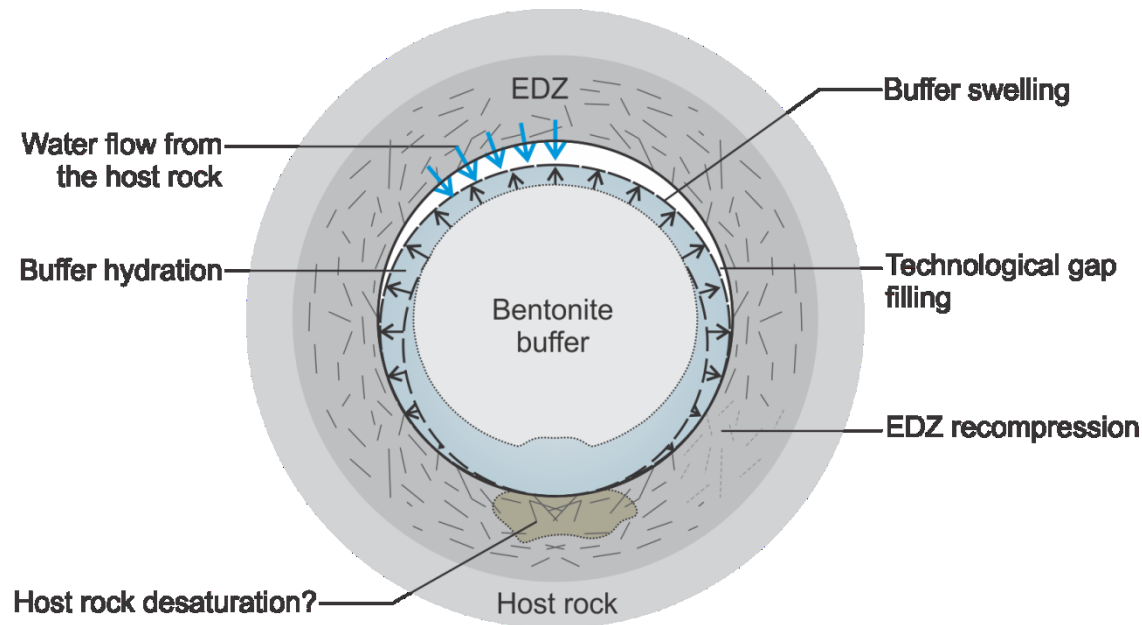


Figure: 400 particles DEM microscale at the end of the loading

Thèse de AC Dieudonné – ULg : perméabilité d'un scellement en bentonite

The processes taking place under repository conditions include

- Development of swelling strain / pressure
- Evolution of the water retention properties, the permeability...
- Structure changes

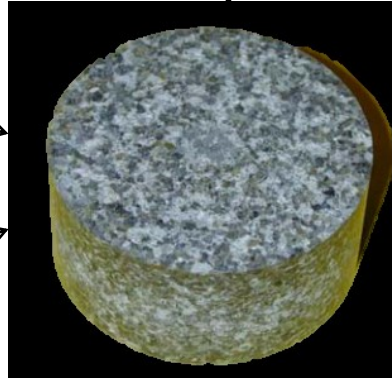


→ Complex and strongly coupled multiphysical & multiscale processes !

Material

MX-80 bentonite
(70% in dry mass)

Uniaxially compacted samples

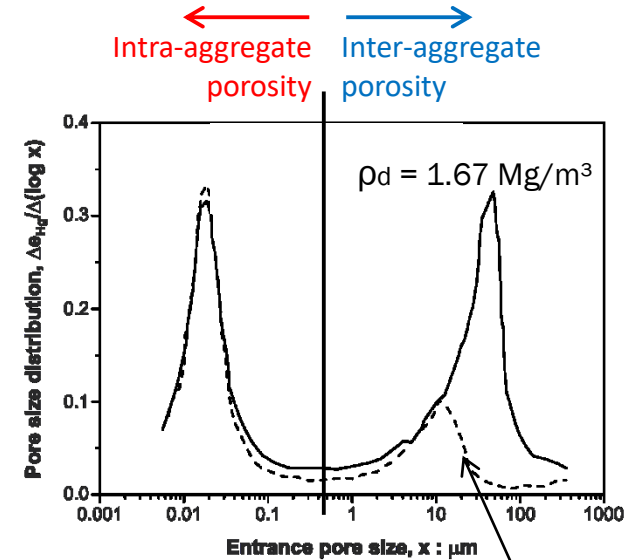


Quartz sand
(30% in dry mass)

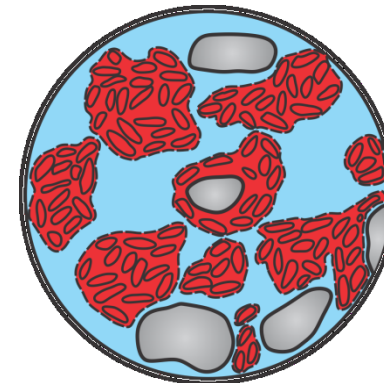
$$\rho_d = 1.67 - 2.00 \text{ Mg/m}^3$$

$$w = 7 - 11\%$$

(used in Bure and
Tournemire URLs, France)



$$\rho_d = 1.97 \text{ Mg/m}^3$$

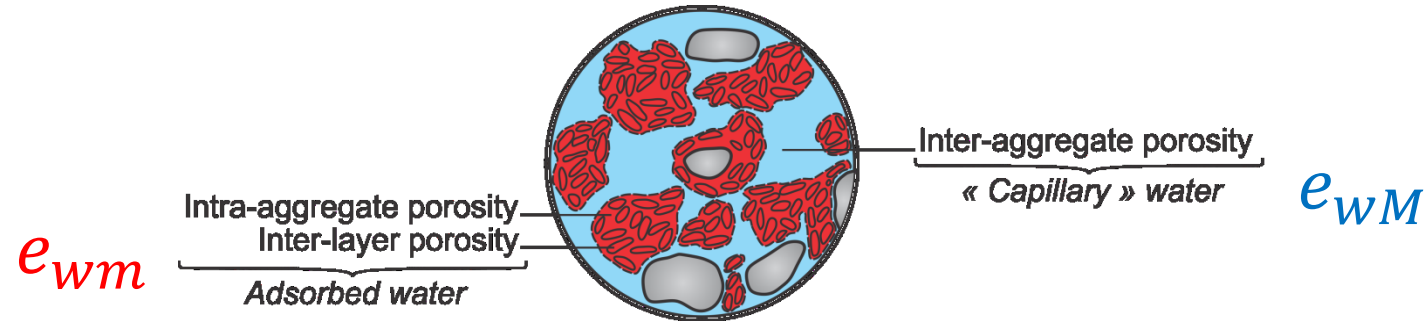


Experimental characterization performed in:

- [CEA Saclay](#), France (Gatabin et al. 2016)
- [Ecole des Ponts ParisTech](#), France (Wang 2012, Saba 2013)

Constitutive model

$$e_w = S_r \cdot e = e_{wm} + e_{wM}$$



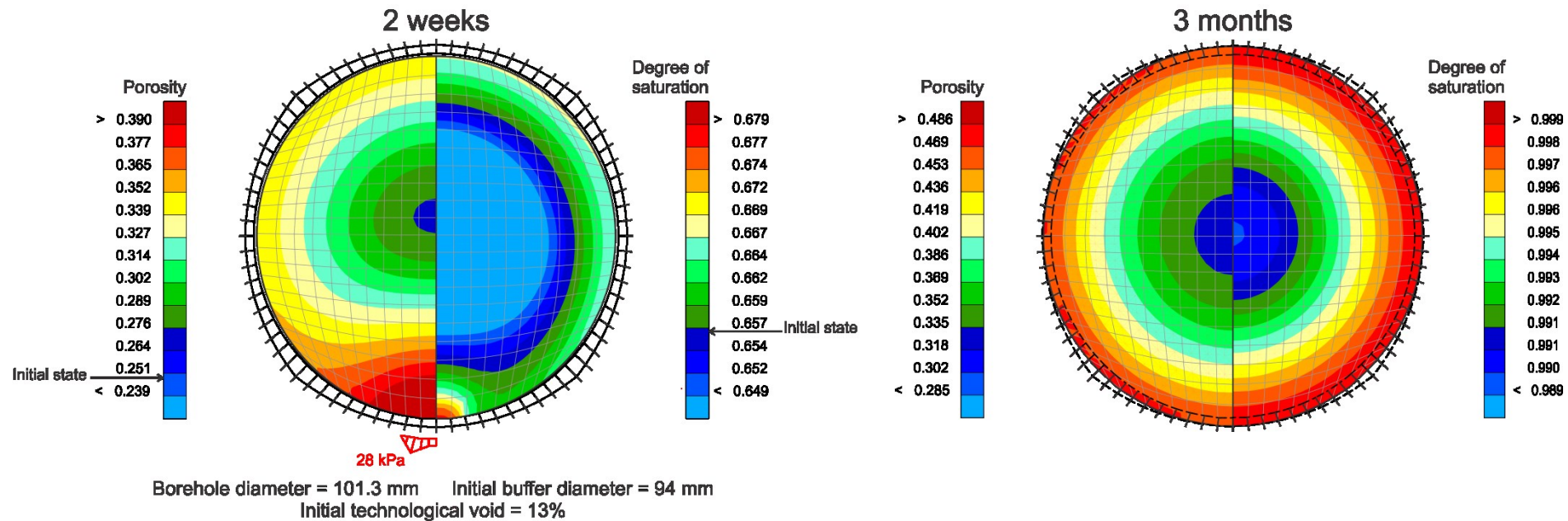
➤ Microstructural water ratio: $e_{wm}(s, e_m) = e_m \exp[-(C_{ads}s)^{n_{ads}}]$

➤ Macrostructural water ratio: $e_{wM}(s, e, e_m) = (e - e_m) \left[1 + \left(\frac{s}{a}\right)^n \right]^{-m}$

➤ Coupled modelling (HM): $K_w = K_0 \frac{(1-\phi_{M0})^M}{(\phi_{M0})^N} \frac{(\phi_M)^N}{(1-\phi_M)^M} \quad m^2$

Numerical results

- Evolution of the bentonite buffer:
 - Very high transmissivity if contact, lower if technological void.
 - Preferential hydration from the bottom in the early process.



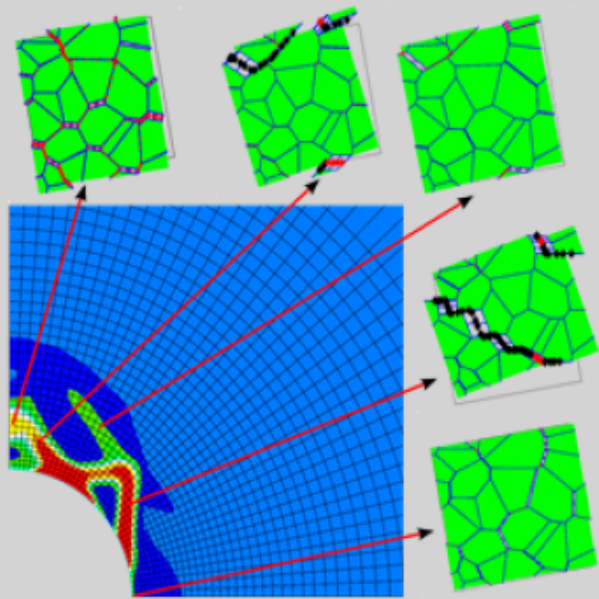
Conclusions 1 – modèles de comportement mécanique

- Modèles de comportement mécanique : le cadre élastoplastique reste un outil puissant, performant, qui permet de prendre en compte plusieurs facettes de la physique (cf. les anisotropies)
- Les outils de changement d'échelle, de micromécanique prennent une place croissante, mais encore modeste : lourdeur conceptuelle ou de calcul, difficulté d'identifier les paramètres, l'état initial, anisotropie, couplages, description de la microstructure sont difficiles
- Modéliser la localisation des déformations permet de représenter les zones plastiques (EDZ ...)
- Complexité croissante des modèles de comportement, du degré de couplage, de la physique représentée, des conditions aux limites ...

Conclusion 2 – couplage hydromécanique

- Couplages de non linéarité croissante
- Interfaces et couplages, des écoulements préférentiels
- Perméabilité dans l'EDZ, dans un matériau fortement gonflant :
Évolution de la perméabilité en fonction de « quelle porosité » ?
Fractures, macro porosité, etc. Potentiel des modèles fondés sur la micromécanique
- Une question ouverte : évolution perméabilité – porosité, quelle porosité?

Merci pour votre attention



2nd International Workshop on
the Finite Element Code LAGAMINE
(LAGASHOP 2018)

31st January – 2nd February 2018
Delft University of Technology, Delft

