



Développement d'une méthodologie de construction des modèles numériques de roche par approche particulière

Mariane PETER-BORIE, Arnold BLAISONNEAU,
Sylvie GENTIER, Théophile GUILLON, Xavier RACHEZ



Géosciences pour une Terre durable

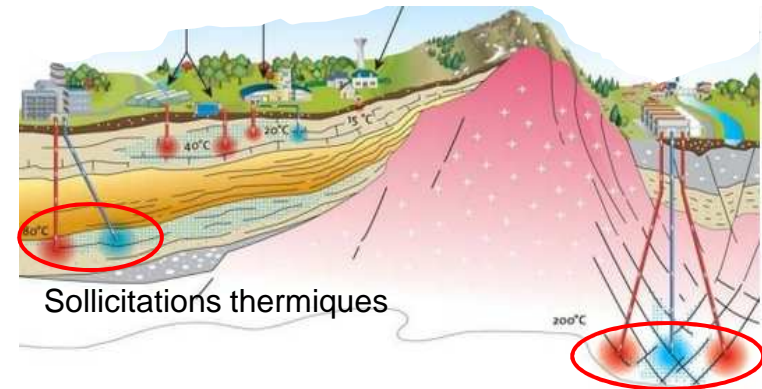
brgm

Direction des Géoressources / Division Géothermie

jeudi 19 mars 2015

Introduction

Dans le domaine de la géothermie
→ Sollicitations thermiques de la roche à proximité
du puits



Origine des contraintes thermo-mécaniques
(Wanne & Young, 2008) :

- Gradient thermique dans la roche
- Hétérogénéité dans la contraction/dilatation des grains-minéraux de la roche

Les caractéristiques pétrographiques (include grain size, grain shape, packing density, packing proximity, degree of interlocking, type of contacts, amount and type of cement and/or matrix and mineralogical composition) affectent les propriétés mécaniques des roches (Ulusay et al., 1994)

Méthode aux éléments discrets (DEM) basée sur
une approche particulaire

→ adaptée pour reproduire les processus TM
induits par la sollicitation thermique

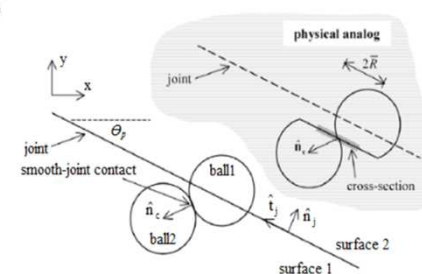
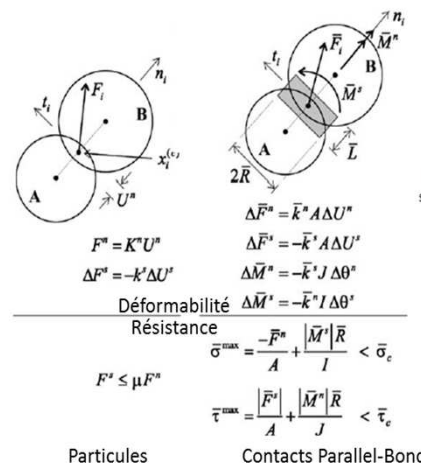
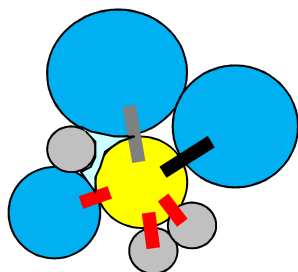
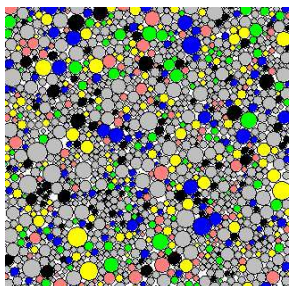
Discrete element code PFC2D (©Itasca)

Difficulté : calibration des propriétés à l'échelle des particules
pour retrouver les propriétés « macros »

→ méthode de conceptualisation des roches dans l'objectif d'optimiser
la calibration des propriétés dites « micros »

PFC2D

- > Assemblage de particules cylindriques/sphériques 2D
- > Comportement macroscopique gouverné par :
 - Les propriétés des particules (densité, E, coefficient d'expansion thermique ,...)
 - Les propriétés des contacts (raideur, frottement, cohésion, conductivité thermique,...)



Modèle des joints lisses

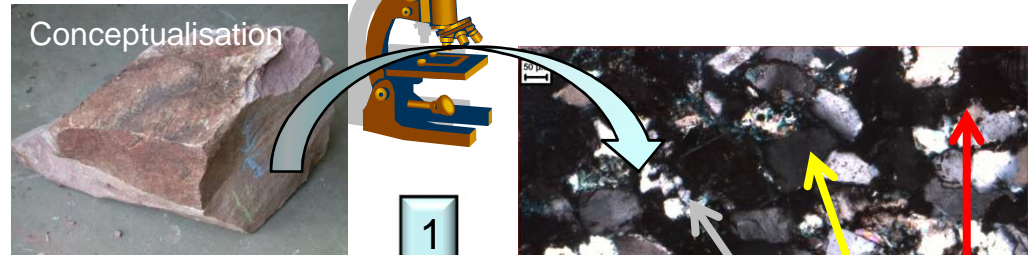
La construction du modèle de roche est essentielle
Elle doit être physiquement cohérente avec les
caractéristiques “microscopiques” et
macroscopiques de la roche



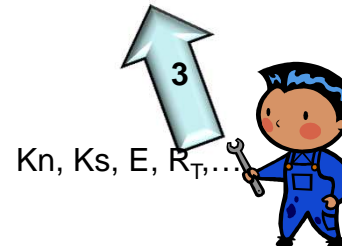
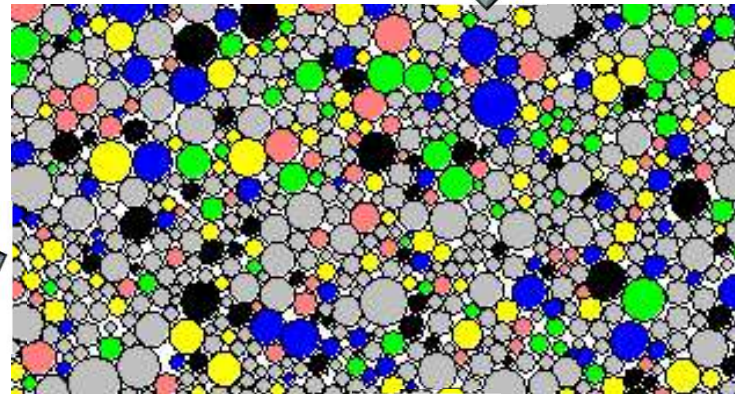
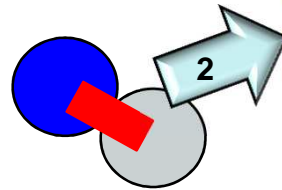
Modèles à l'échelle des grains de la roche

> 3 étapes principales :

1. Conceptualisation de la roche en accord avec le rôle de chaque minéral dans le comportement de la roche



2. Attribution des propriétés géométriques et physiques



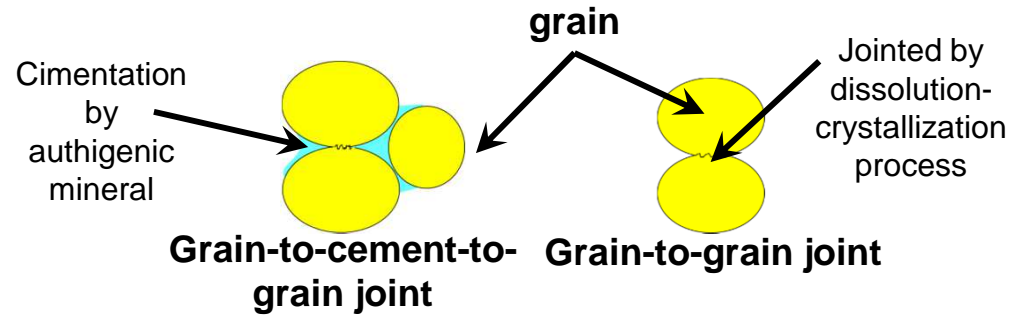
3. Calibration des propriétés thermiques, mécaniques et thermo-mécaniques



Modèles à l'échelle des grains de la roche

> Dans le détail, les contacts :

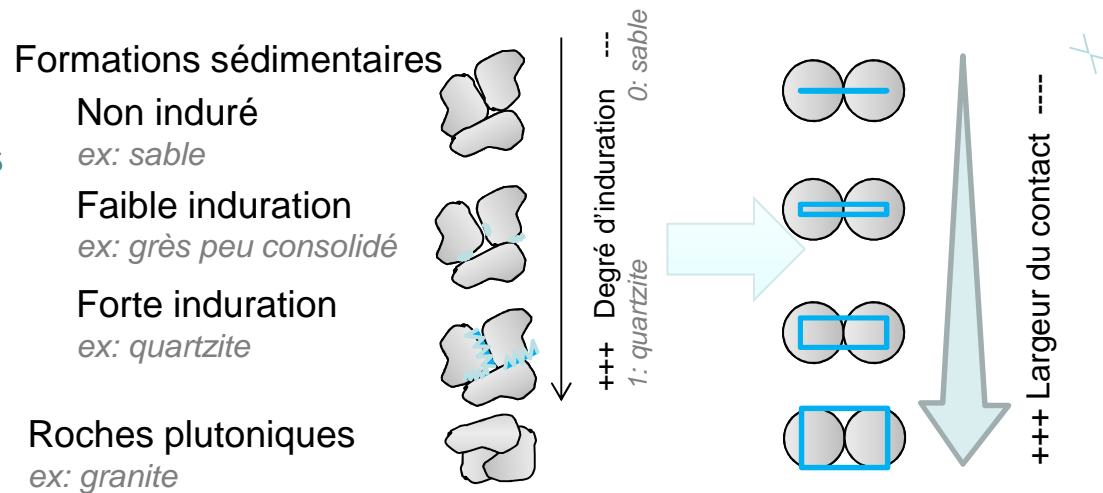
- **Ciments vs joints de grains (roches sédimentaires)**



Exemple rigidité d'un contact cimenté :

$$k_{nj} = \frac{E_j}{r_j} \beta_{kn_j} = \frac{(E_{i1} + E_{i2}) \times 0,5}{r_{i1} + r_{i2}} \beta_{kn_j}$$

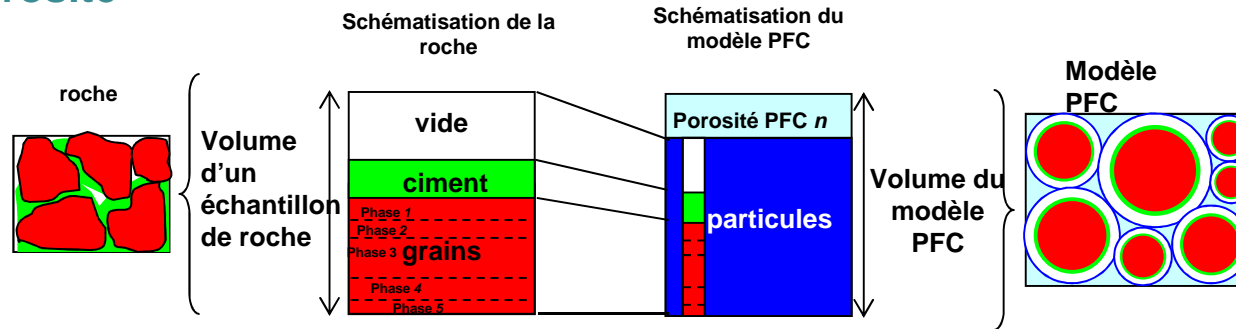
- **Largeur des contacts (Parallel Bonds)**



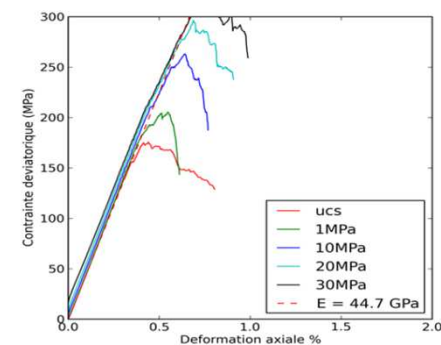
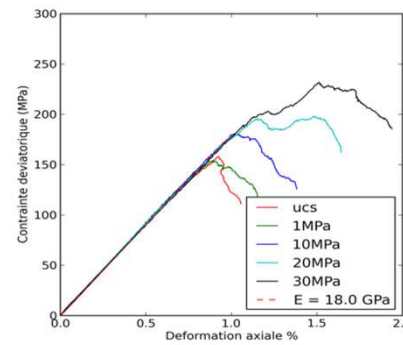
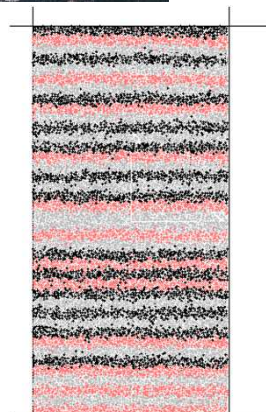
Modèles à l'échelle des grains de la roche

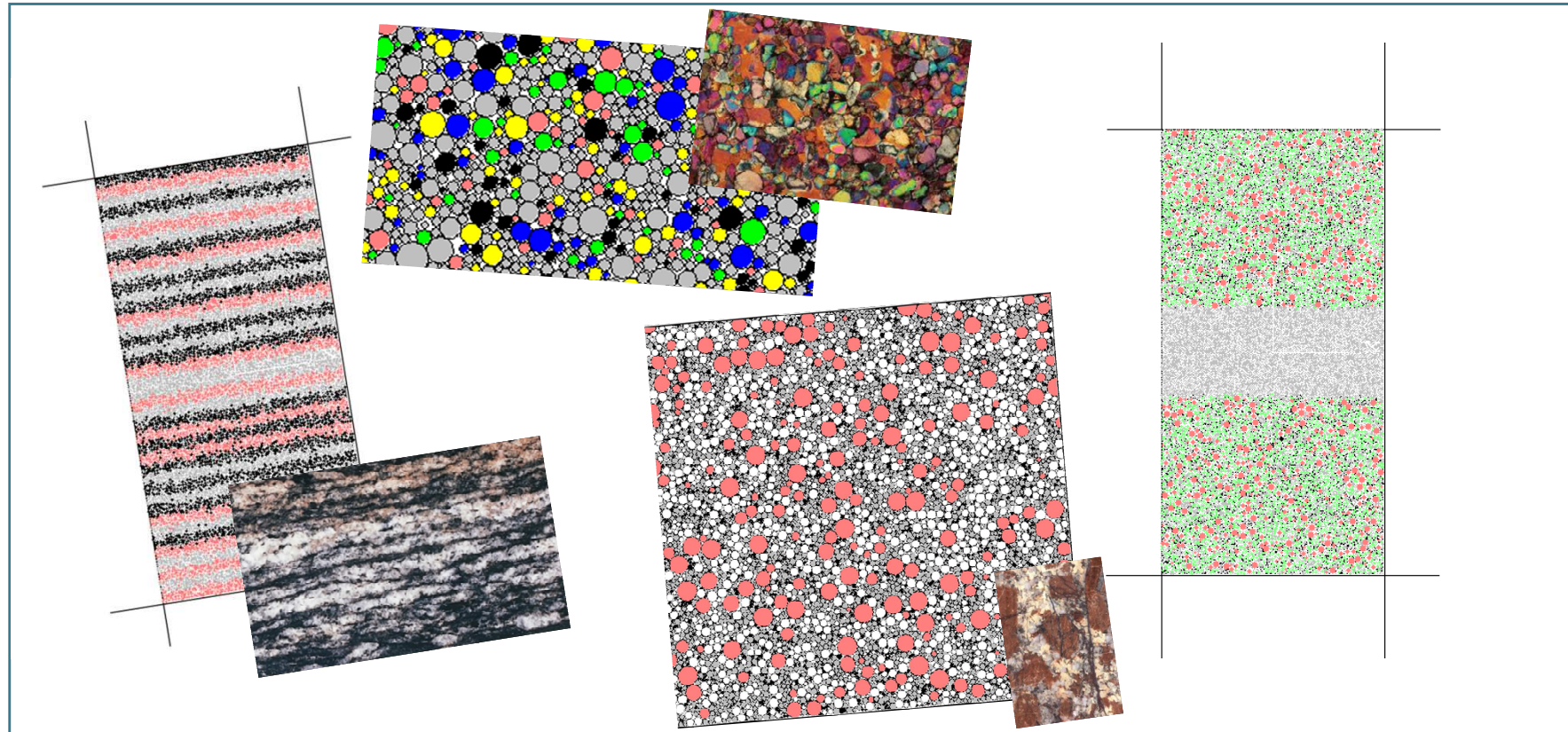
> Dans le détail, la texture/structure :

- Porosité



- Textures anisotropes (ex. gneiss) et structures anisotropes (ex. schiste)

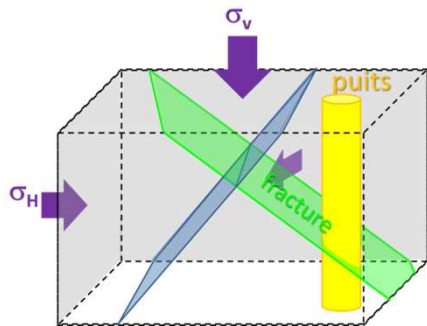
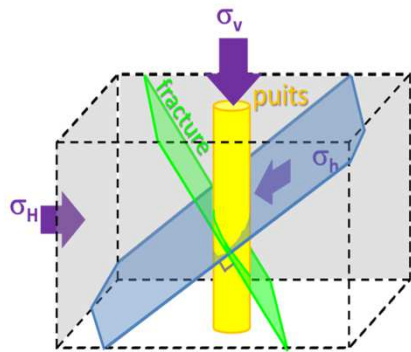
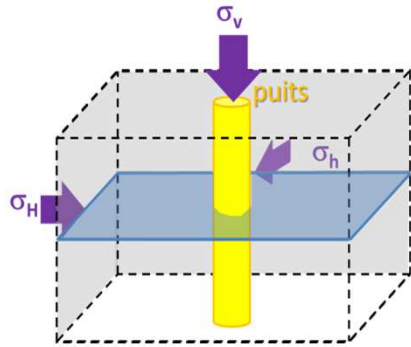




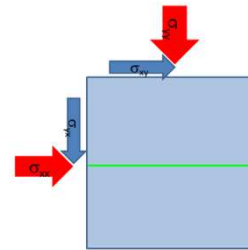
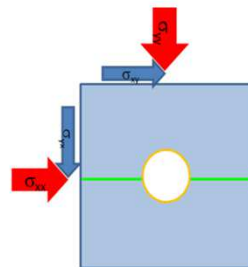
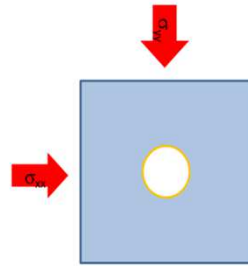
EXEMPLES D'APPLICATION

Différentes géométries autour du puits

Géométries :



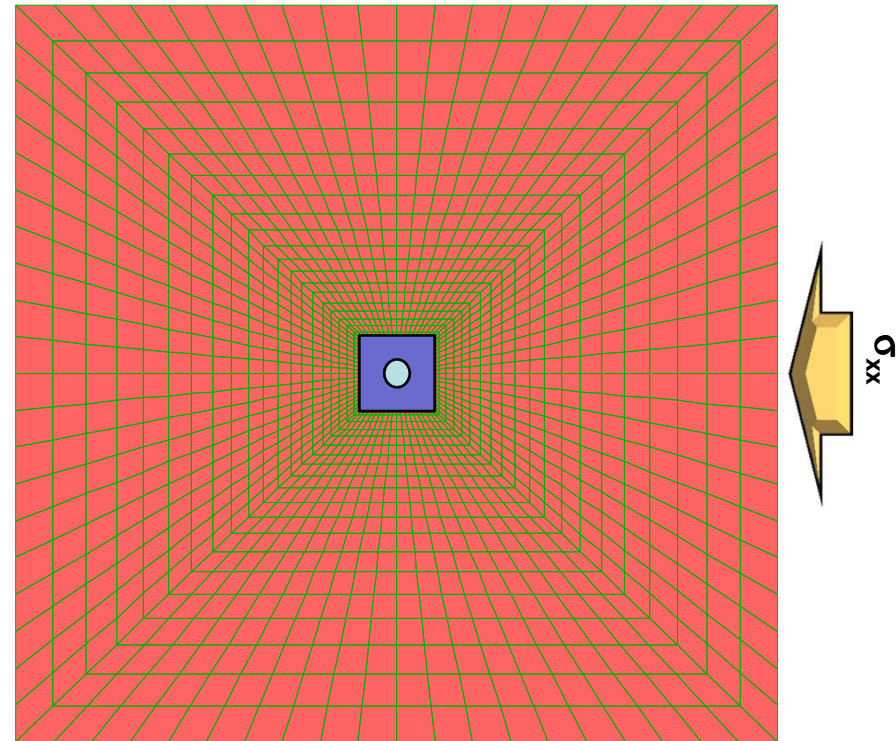
Modèles PFC:



Encapsulage du modèle PFC dans
FLAC pour repousser les conditions
aux limites :



FLAC2D – continuous model

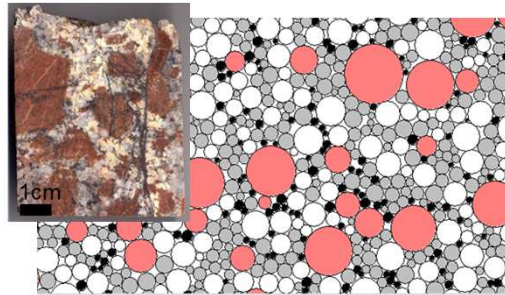


Géosciences pour une Terre durable

brgm

Compréhension de la formation des *breakouts*

Granite hydrothermalisé (Site de Soultz, formation des *breakouts* et des fractures induites)

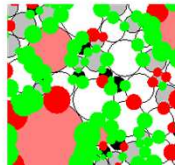
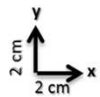


Particules :

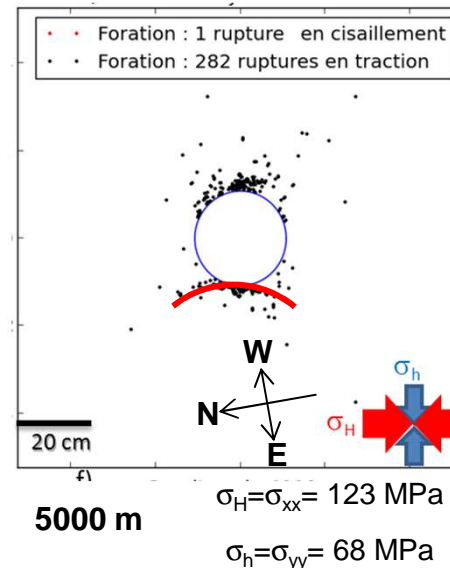
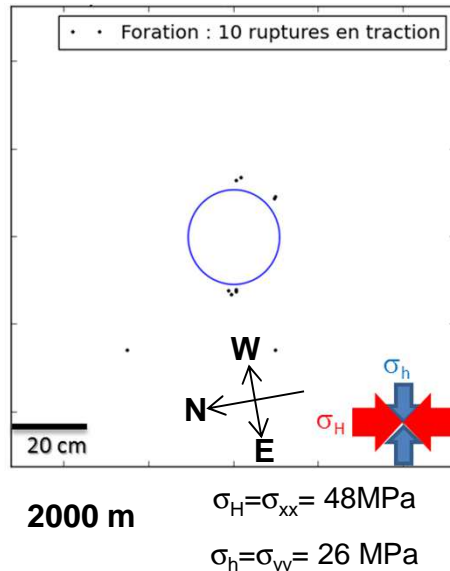
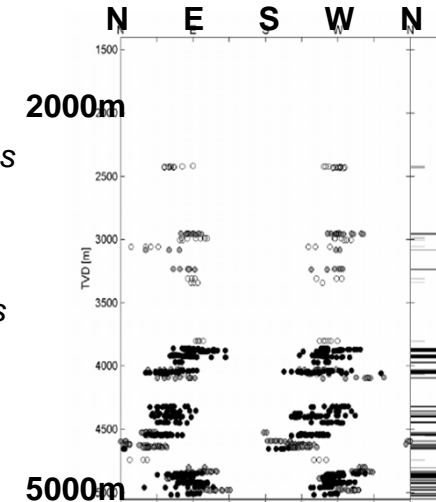
- Feldspaths potassiques
- Quartz
- Biotite et autres minéraux noirs
- Plagioclases
- Illite et/ou plagioclases altérés

Contacts :

- Joint de grain sain
- Joint de grain altéré



Localisation des *breakouts* relevés dans GPK3 par Valley et Evans (2003)

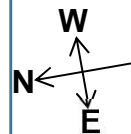


Résultats :
 → Reproduction des *breakouts* mécaniques en adéquation avec les observations
 → Forme des *breakouts*



Compréhension de la formation des *breakouts*

Granite hydrothermalisé (Site de Soultz, formation des *breakouts* et des fractures induites)

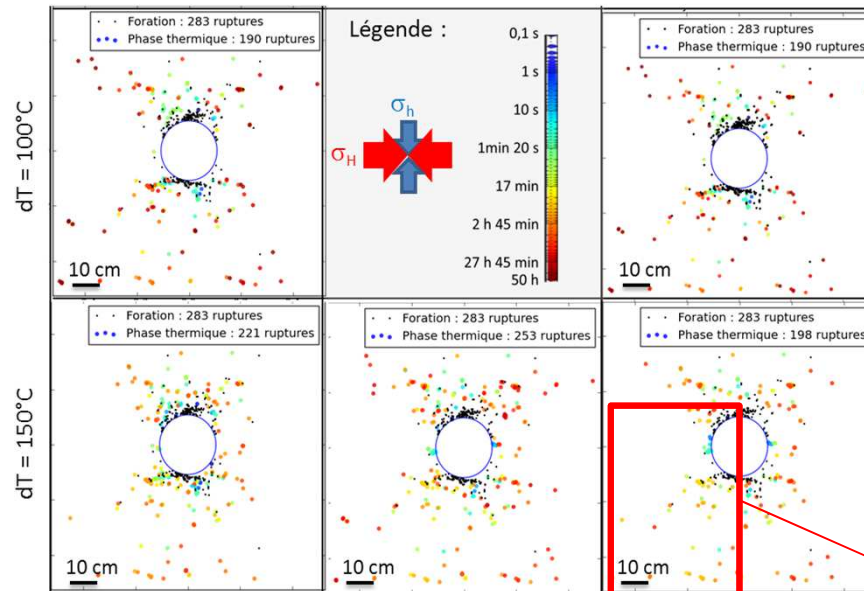


Profondeur 5000 m

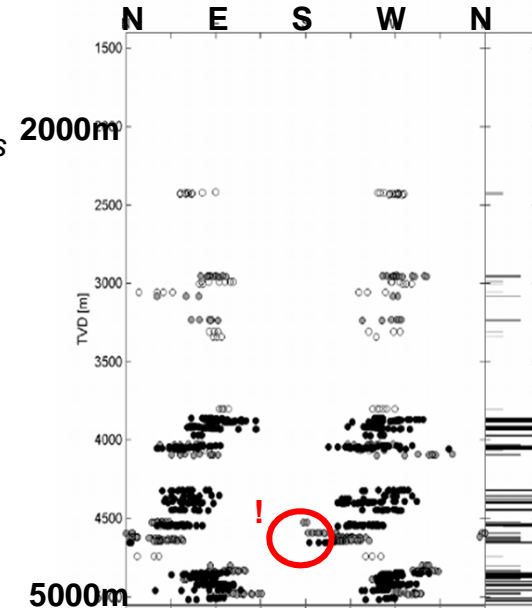
dP = 0,1 MPa

dP = 10MPa

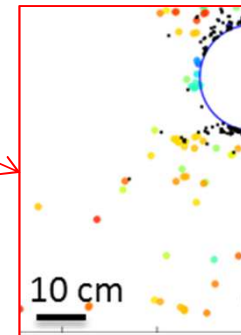
dP = 15MPa



Localisation des *breakouts* relevés dans GPK3 par Valley et Evans (2003)



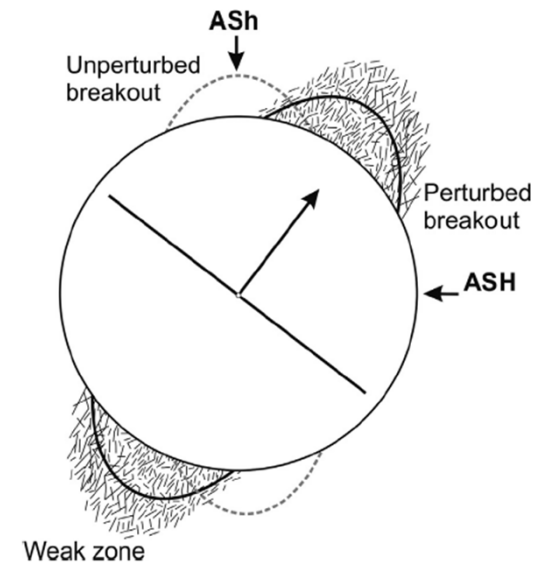
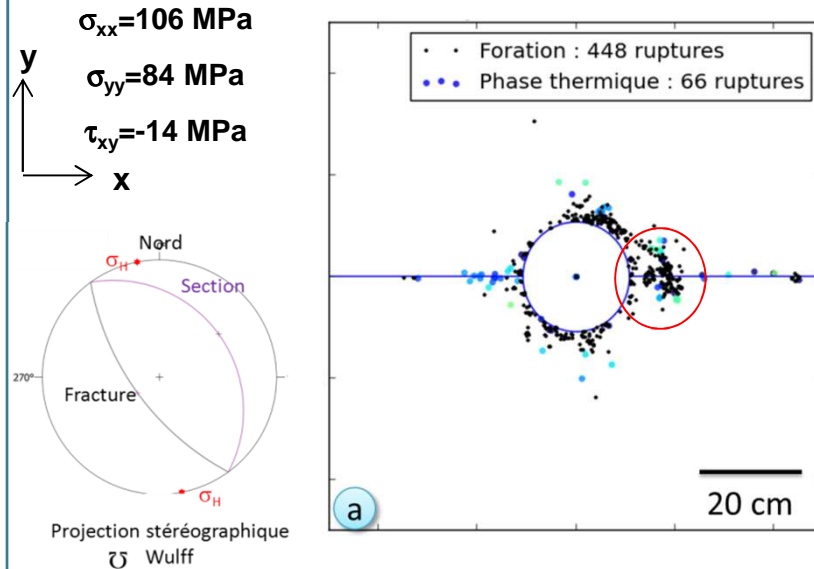
Breakouts d'origine thermique ? (Bérard, 2003)



Mise en évidence de la formation de *breakouts* d'origine thermique ?

Perturbation de la direction du *breakout* par la présence d'une fracture naturelle

Granite hydrothermalisé – 5000 m

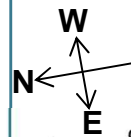


Sketch of the perturbed breakout shape in a heterogeneous material. The breakouts are rotated from the unperturbed breakouts (black elongations) toward the weak zone, i.e. weak zones are assumed to be the results of the intersection between natural fracture and borehole wall

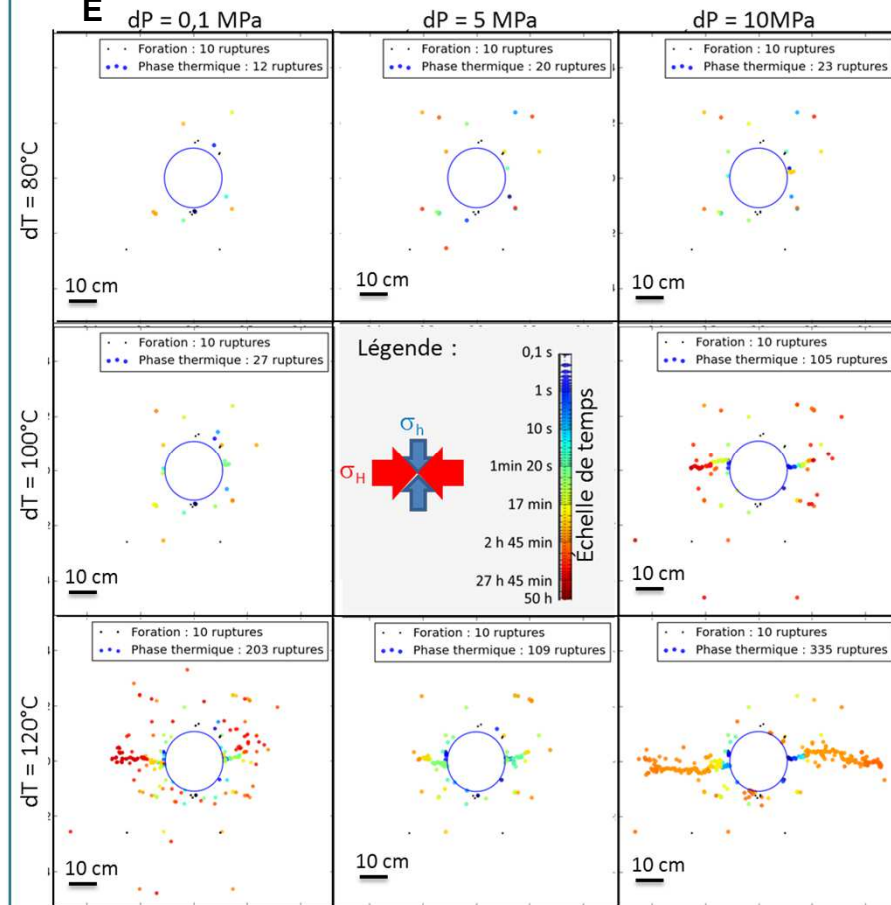
Sahara et al., 2014

Compréhension de la formation de la fracturation induite

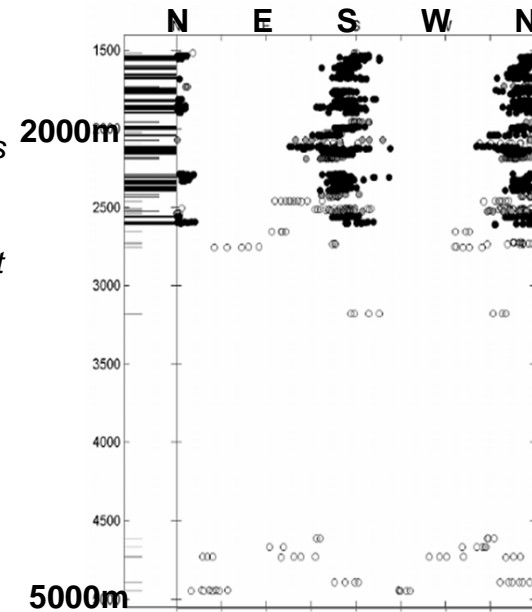
Granite hydrothermalisé (Site de Soultz, formation des breakouts et des fractures induites)



Profondeur 2000 m



Localisation des fractures induites dans GPK3 (Valley et Evans, 2003)



→ Reproduction des fractures induites en adéquation avec les observations

→ Evolution de cette fracturation dans le temps et dans l'espace (initiation, développement, arrêt, dichotomie...)

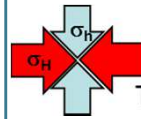


Géosciences pour une Terre durable

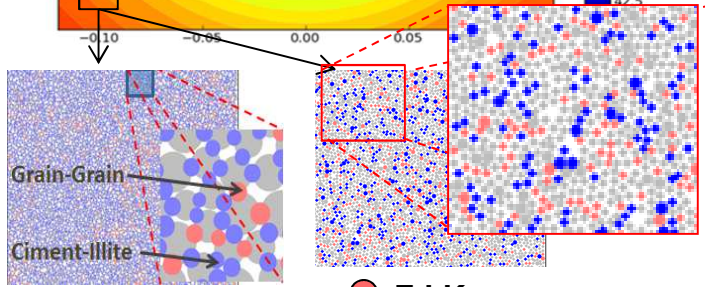
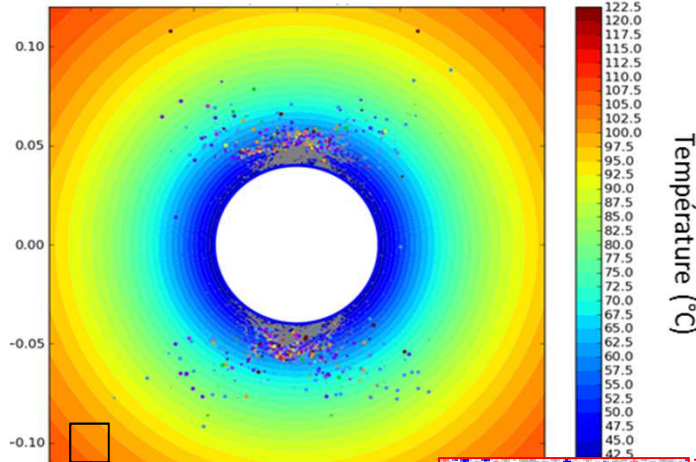
brgm

Analyse de la topologie et de la localisation de la fissuration

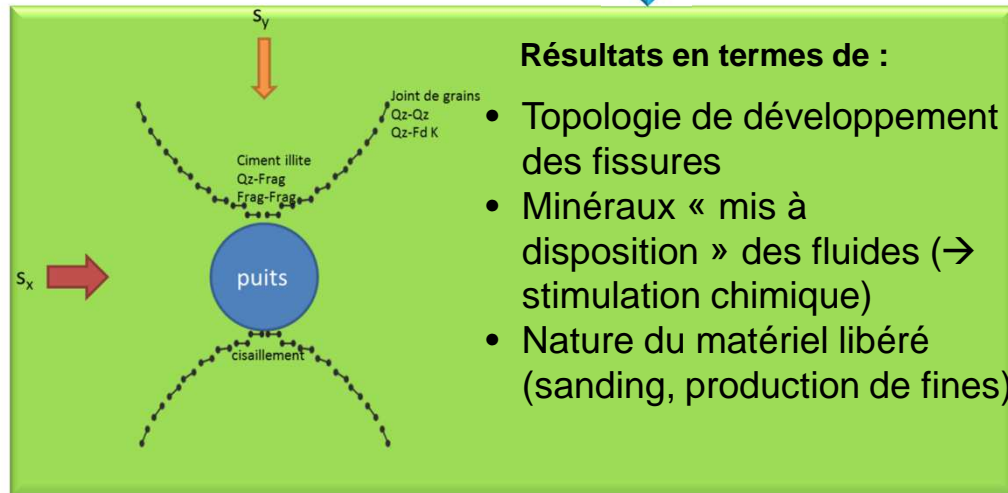
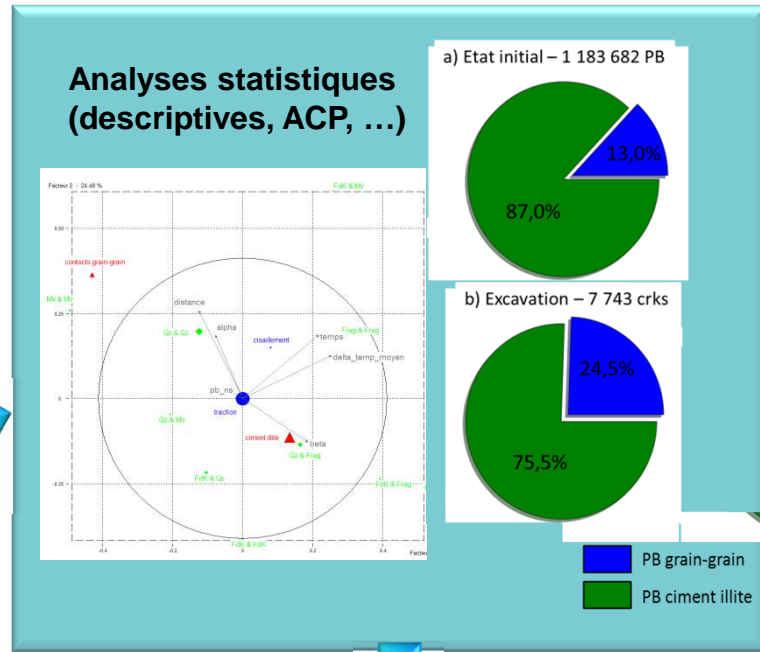
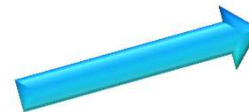
Grès des Vosges Injection de CO₂ supercritique (40°C) à 2400m de profondeur $\sigma_H/\sigma_h=1,25$



$T_{\text{roche}} = 120^\circ\text{C}$ – conduction
Temps de simulation = 7200 s



- Fd K
- Quartz
- Illite
- Fragments de roche



Conclusion

- > Impact des caractéristiques pétrographiques de la roche sur la physique des phénomènes étudiés
- > Topologie, localisation et évolution de la propagation de la fissuration

→ Permet en particulier :

- Meilleure compréhension du développement des *breakouts* en relation avec les hétérogénéités locales et les spécificités pétrographiques de la roche
- Connaissance de la localisation de la fissuration par rapport aux hétérogénéités et nature des roches : ouverture sur les stimulations thermiques et stimulations chimiques

Analyse et interprétation des résultats fortement liés à la « qualité » de la construction du modèle à l'échelle des particules