



Un modèle probabiliste de fracturation des roches lors de l'injection de gaz :

Application à l'étude de la sûreté de stockage géologique de CO₂

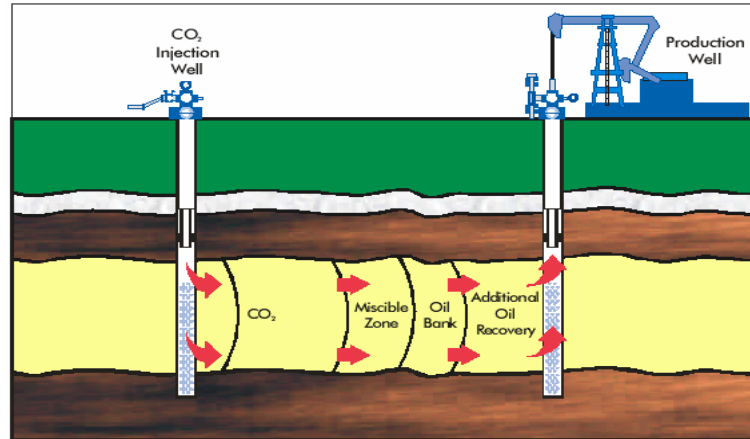
Dariussh Seyedi¹
Nicolas Guy^{1,2} et François Hild²

¹ BRGM – ARN

² LMT-Cachan, ENS de Cachan/CNRS/Université de Paris 6

m.seyedi@brgm.fr

Stockage géologique de CO₂



- > **Stockage de CO₂ dans les formations géologiques profondes telles que les réservoirs de pétrole, aquifères salines, ...**
- > **Diminution des gaz à effet de serre, Amélioration de la production du pétrole, production de Méthane, ...**
- > **Sûreté et fiabilité de stockage à long terme**

Objectif

> Détermination de la pression limite d'injection

- L'injectivité : pouvoir injecté suffisamment de CO₂
- Préserver l'intégrité de la couverture

> Conséquences de dépassement de la pression limite

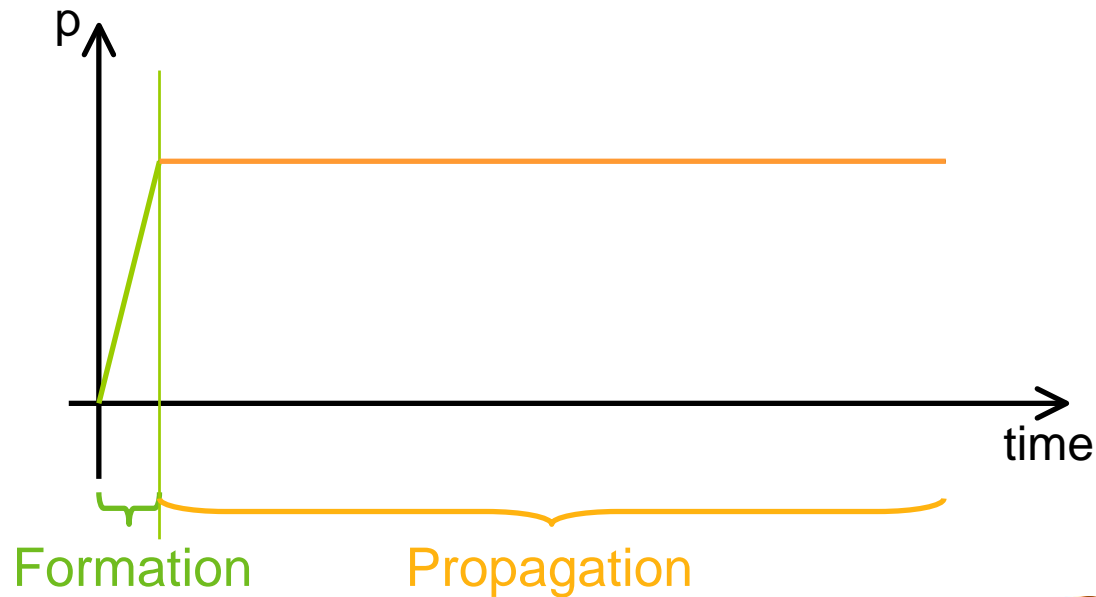
- Impact sur la perméabilité



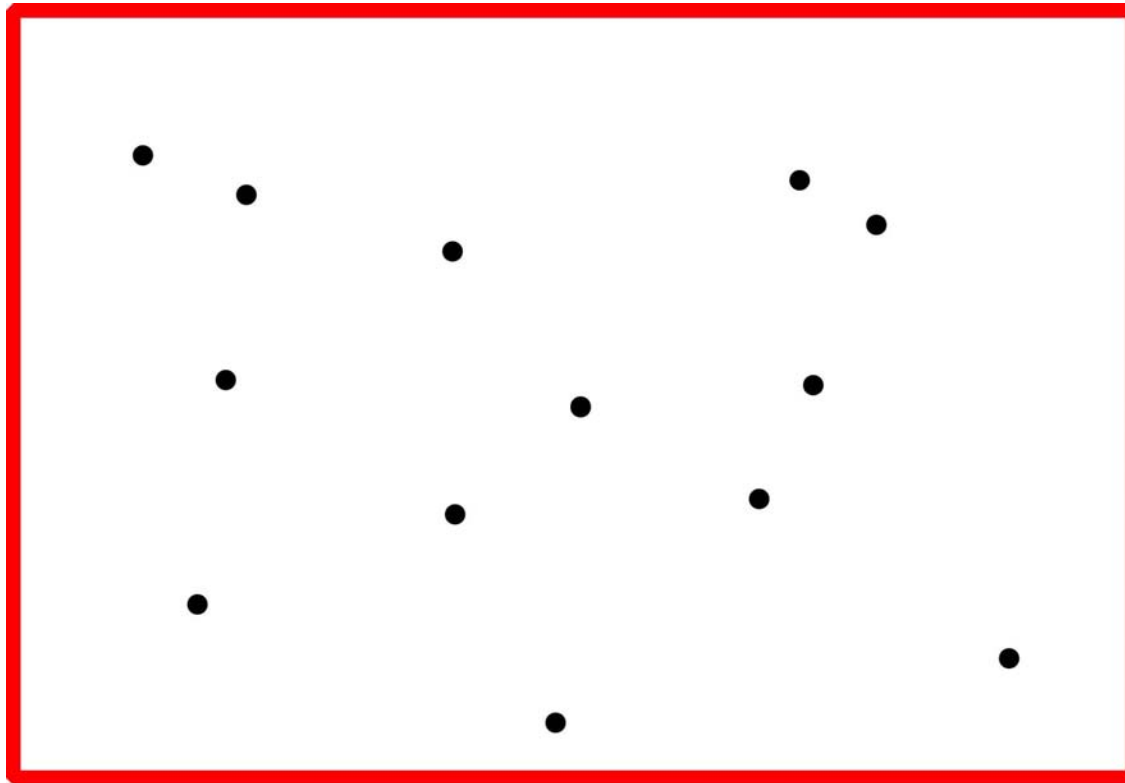
Détermination des marges de sécurité

Amorçage de fissures

- > Toutes les fissures sont amorcées à partir des micro-fractures existantes pendant la phase d'augmentation de la pression
- > Pas de nouvelle amorçage après la phase de formation de réseau



Sites potentiels de fissuration



Processus ponctuel de Poisson de l'intensité :

$$\lambda_t(\sigma) = \lambda_0 \left(\frac{\langle \sigma \rangle}{\sigma_0} \right)^m$$

Formation de réseaux de fissures : les hypothèses

Probabilité de rupture :

$$P_F = 1 - \exp\left[-Z_{eff} \lambda_t(p_{int})\right] \text{ avec } \lambda_t(p_{int}) = \lambda_0 \left(\frac{p_{int}}{p_0}\right)^m$$

La microstructure du matériau est définie par des défauts ponctuels de densité λ_t (Processus point poissonnien)

FIC pour une fissure :

$$K = Y\sigma\sqrt{a}$$

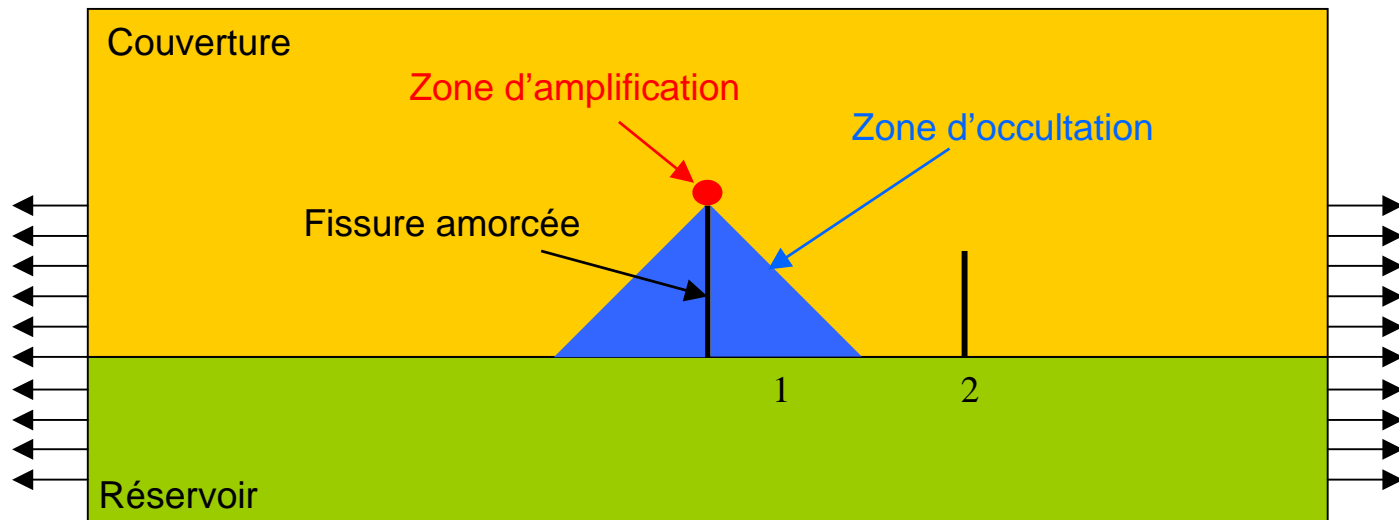
Condition de propagation :

$$K > K_{IC}$$

Niveau de contrainte d'initiation /
taille de défaut (fissure) :

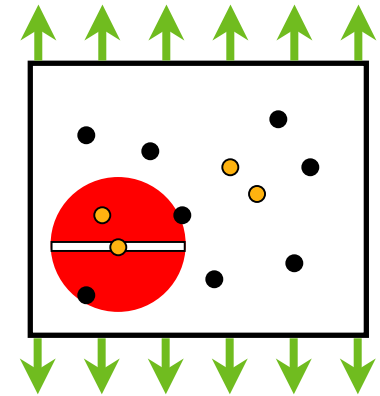
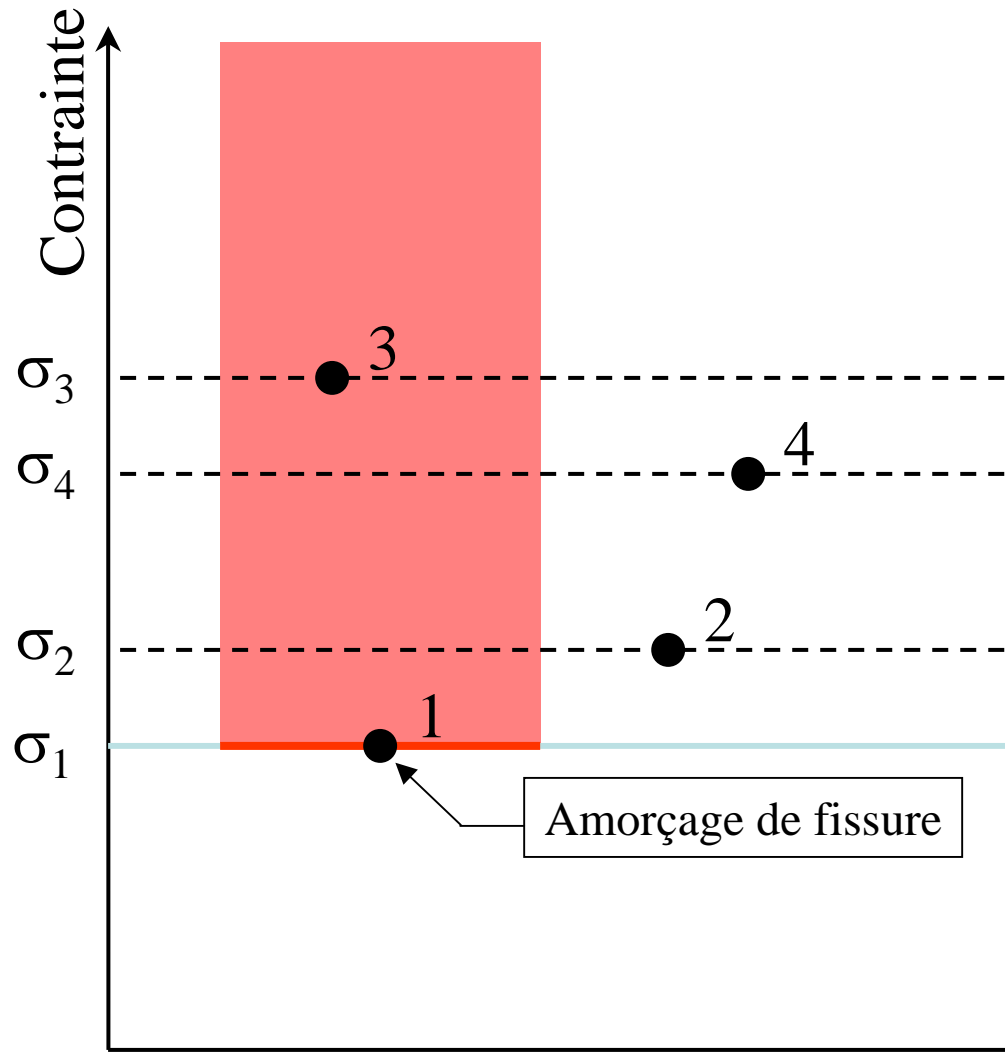
$$\sigma_{th} = \frac{K_{IC}}{Y\sqrt{a_{th}}}$$

Interaction entre les fissures amorcées sur l'interface réservoir/couverture

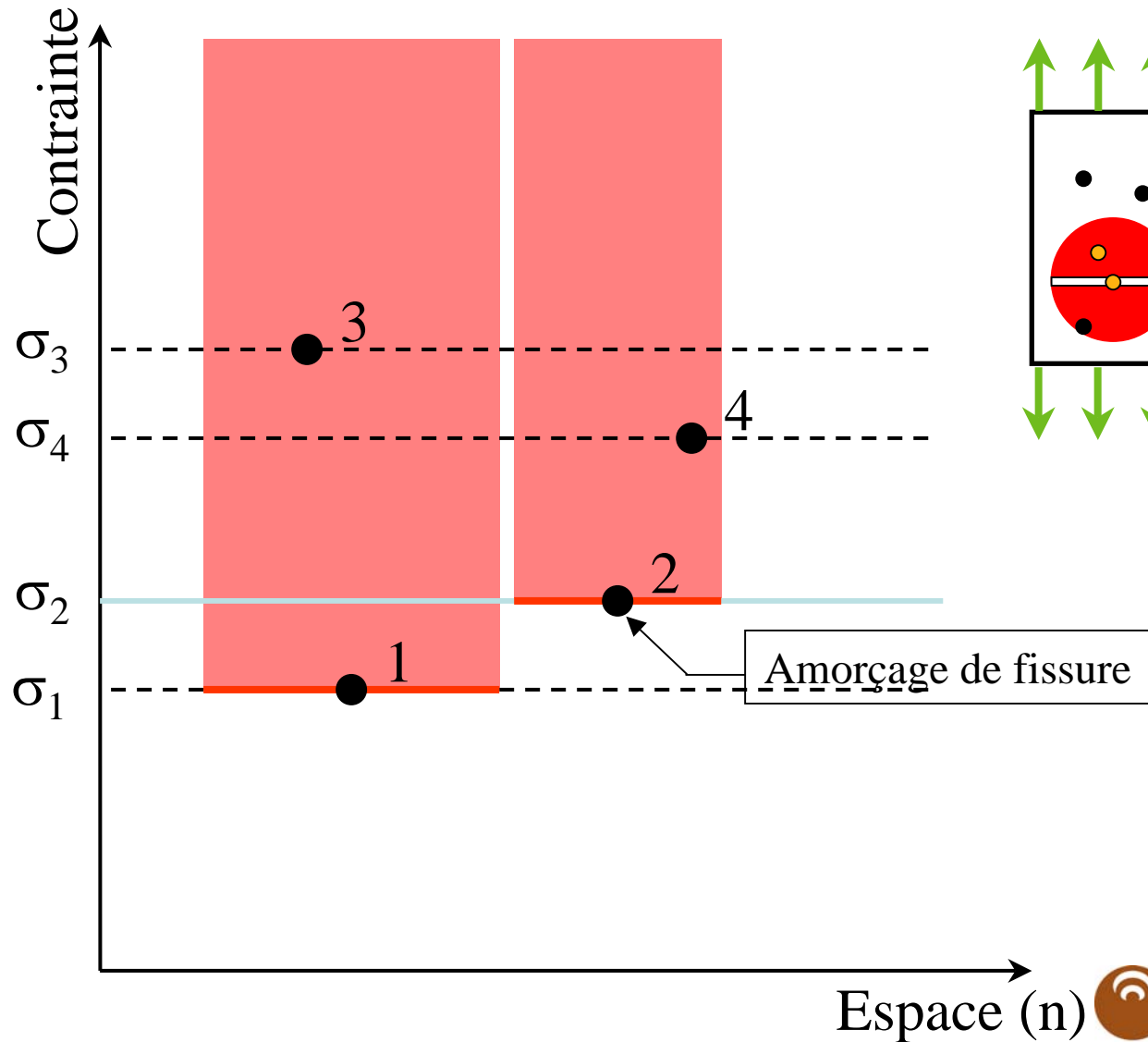


Fissure 1: écrantée
Fissure 2: peut se propager

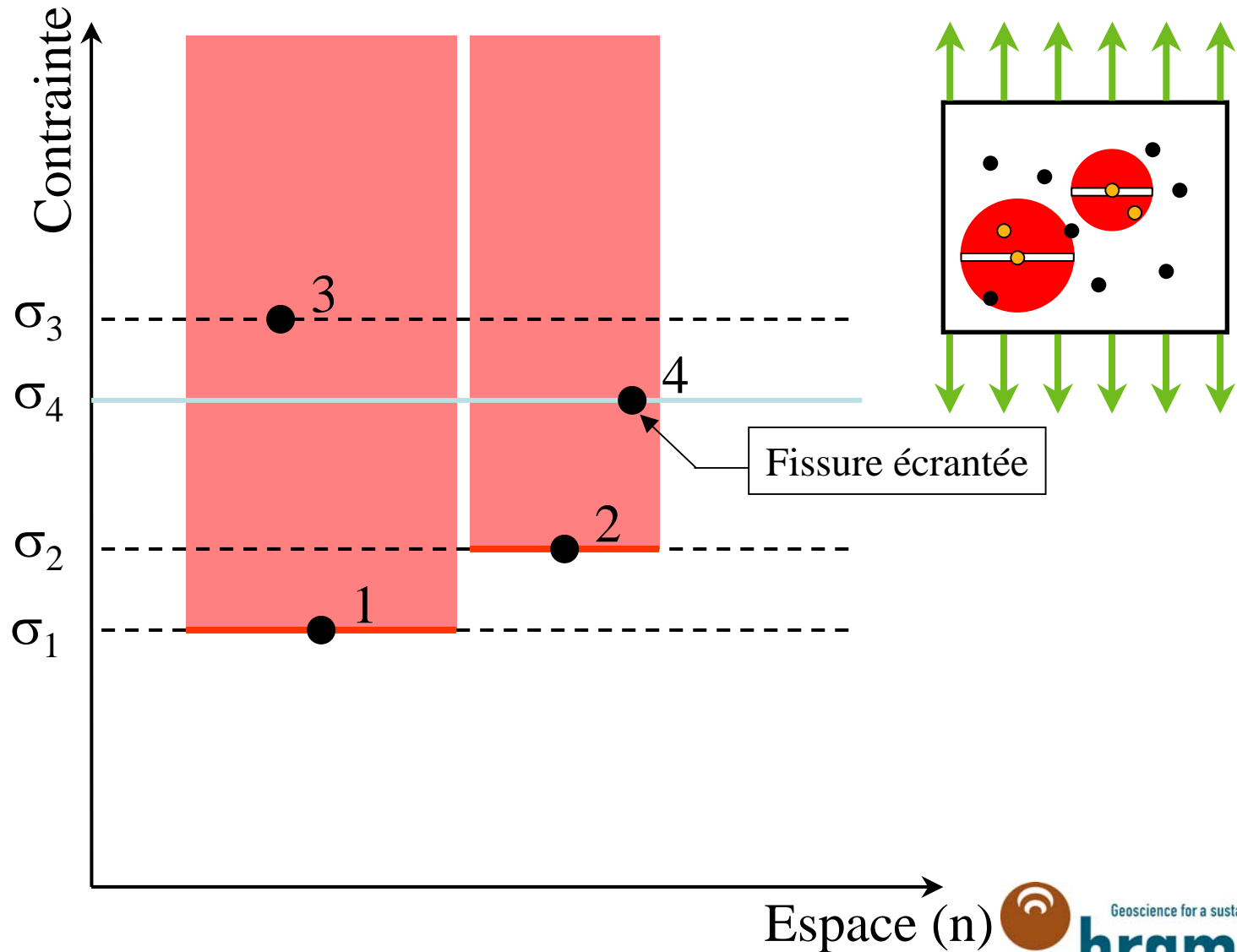
Amorçage des fissures



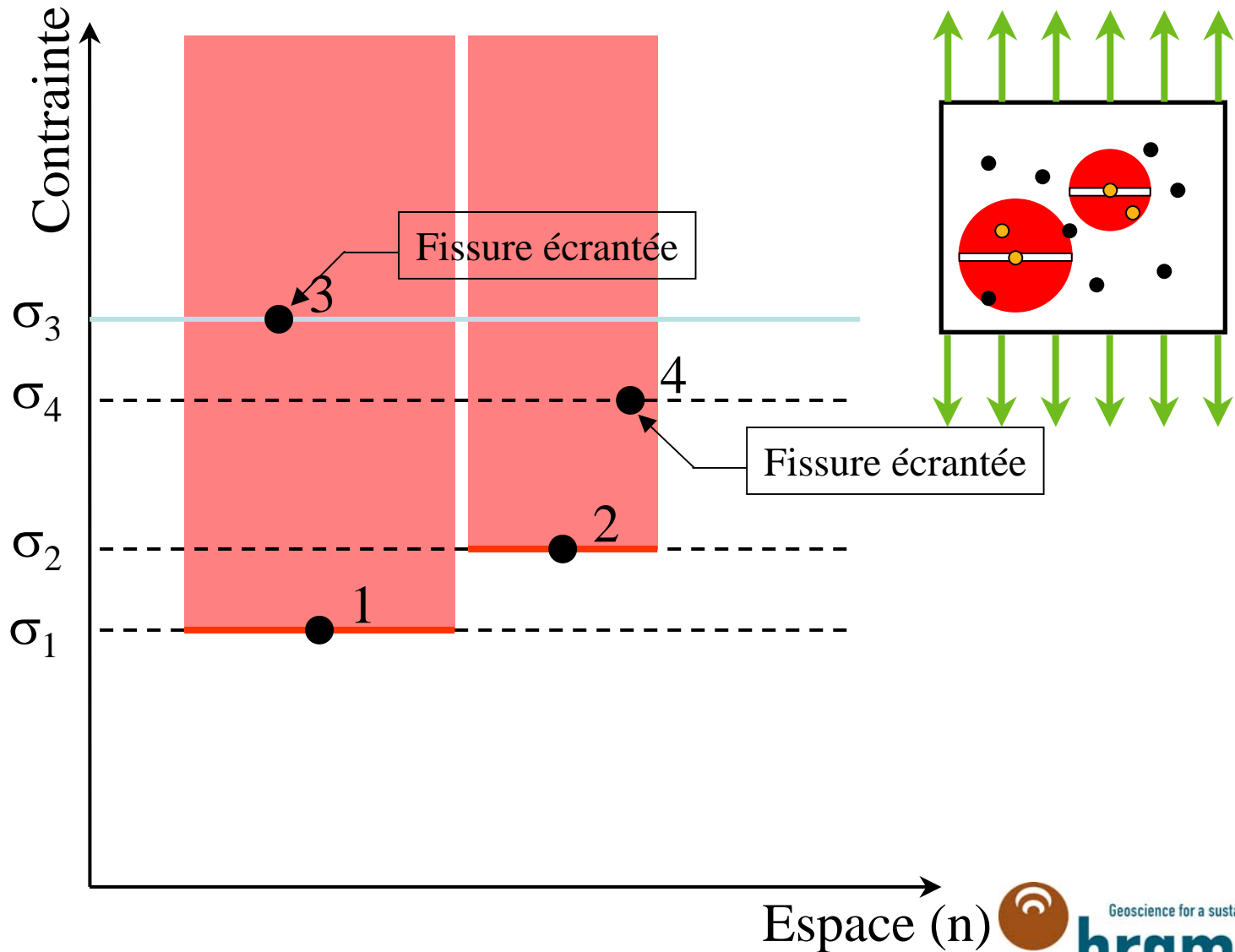
Amorçage des fissures



Amorçage des fissures



Amorçage des fissures



Modélisation probabiliste de formation d'un réseau de fissures (Seyedi et al. 2006)

Probabilité d'écrantage $P_o(p) = 1 - \exp \left[- \int_0^p \frac{d\lambda_t}{dp}(p_i) Z_o(p_i) dp_i \right]$

P_o = probabilité d'écrantage λ_t = densité des défauts p = pression

La forme et la taille de la zone d'écrantage $Z_o(p)$

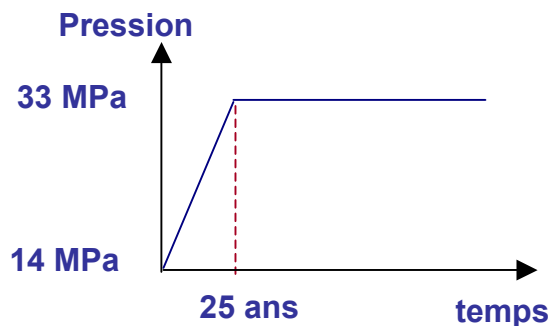
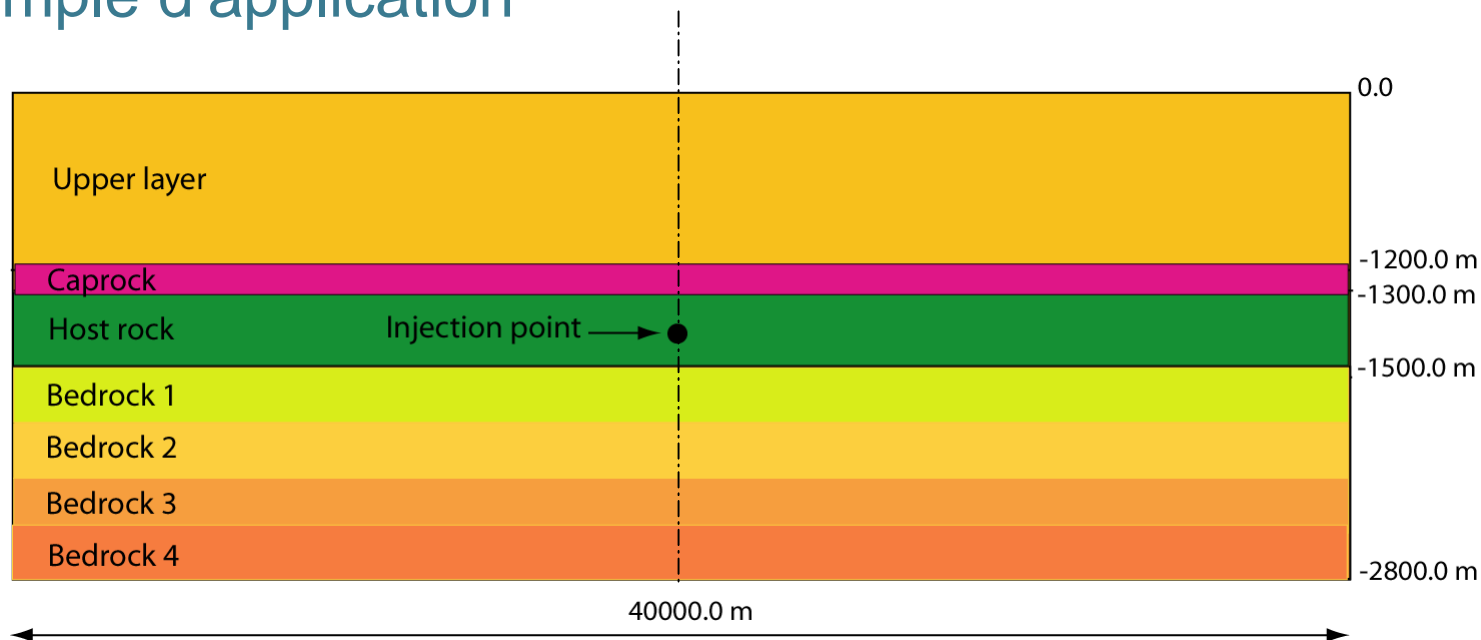


Probabilité d'écrantage



Densité de fissuration

Exemple d'application



Pression d'injection

Material	E (GPa)	$K_{int}(m^2)$	ϕ^0
Soil	10	10E-14	0.15
Cap Rock	20	10E-15	0.5
Host Rock	20	10E-13	0.15
Basement 1	20	10E-15	0.5
Basement 2	30	10E-14	0.15
Basement 3	40	10E-14	0.15

Propriétés matériaux

Geoscience for a sustainable Earth



Equations d'état

Milieu poreux élastique saturé en eau

$$\operatorname{div}(\boldsymbol{\sigma}) + r\mathbf{g} = 0,$$

$$\dot{r}_m + \operatorname{div}(\mathbf{M}) = 0$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}' + \sigma_p \mathbf{I}$$

$$d\varphi = (b - \varphi)d\varepsilon_v,$$

$$\rho_l \varphi(1 + \varepsilon) = \rho_l^0 \varphi^0 + r_m$$

$$\varepsilon_v = \operatorname{tr}(\boldsymbol{\varepsilon})$$

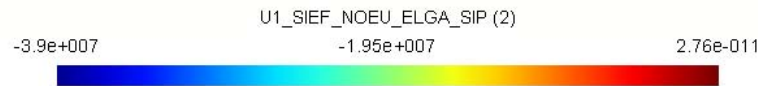
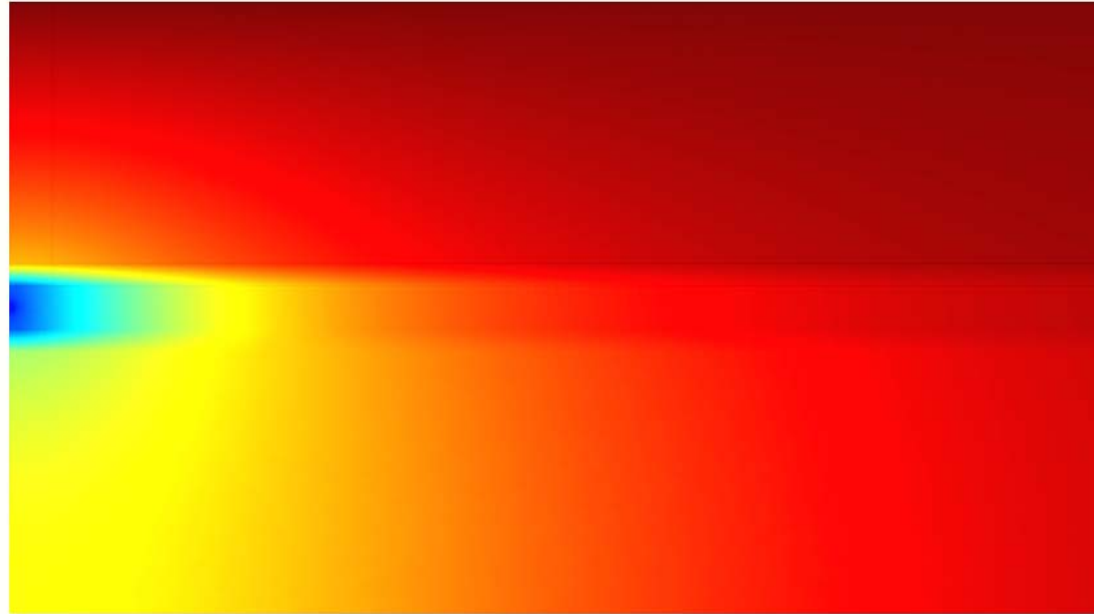
$$\frac{d\rho_l}{\rho_l} = \frac{dp}{K_w},$$

$$\frac{\mathbf{M}}{\rho_l} = \lambda[\operatorname{grad}(p) + \rho_l \mathbf{g}]$$

$$\lambda = \frac{K_{\text{int}}}{\mu}$$

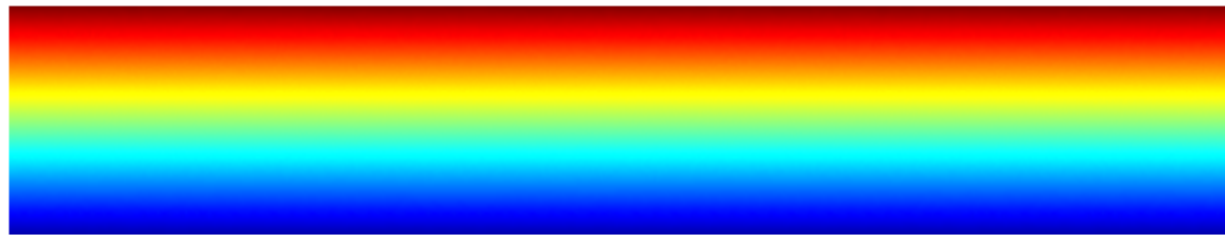
$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}\boldsymbol{\varepsilon}$$

Évolution de la pression interstitielle due à l'injection du



P = 33 MPa

Évolution des contraintes effectives



U1_SIEF_ELNO_ELGA_SIXX (0)

-1.06e+007

-5.3e+006

0



U1_SIEF_ELNO_ELGA_SIXX (6)

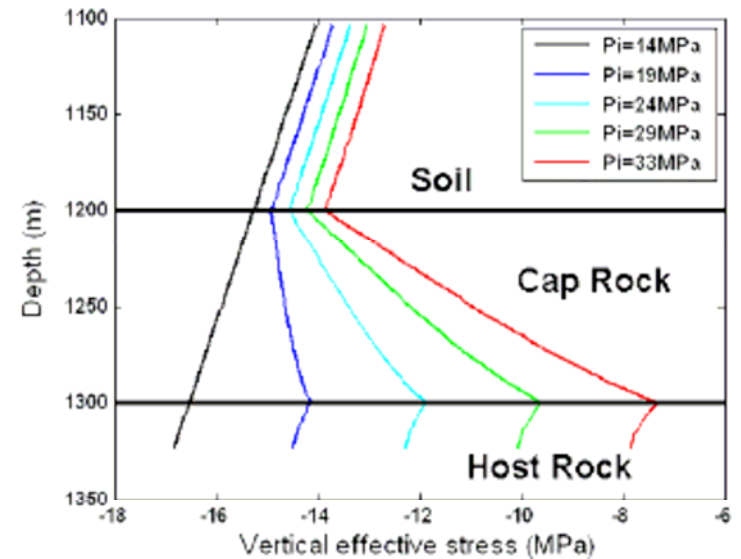
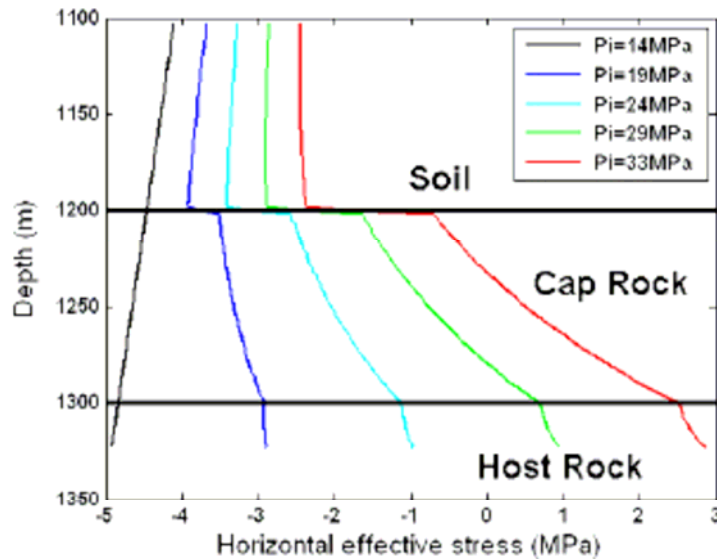
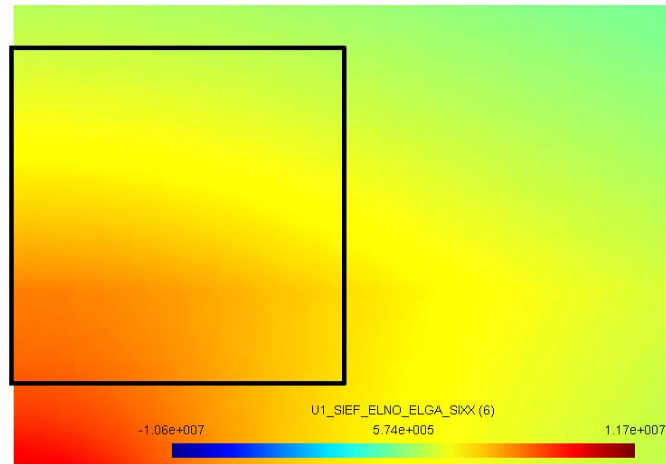
-1.06e+007

5.74e+005

1.17e+007



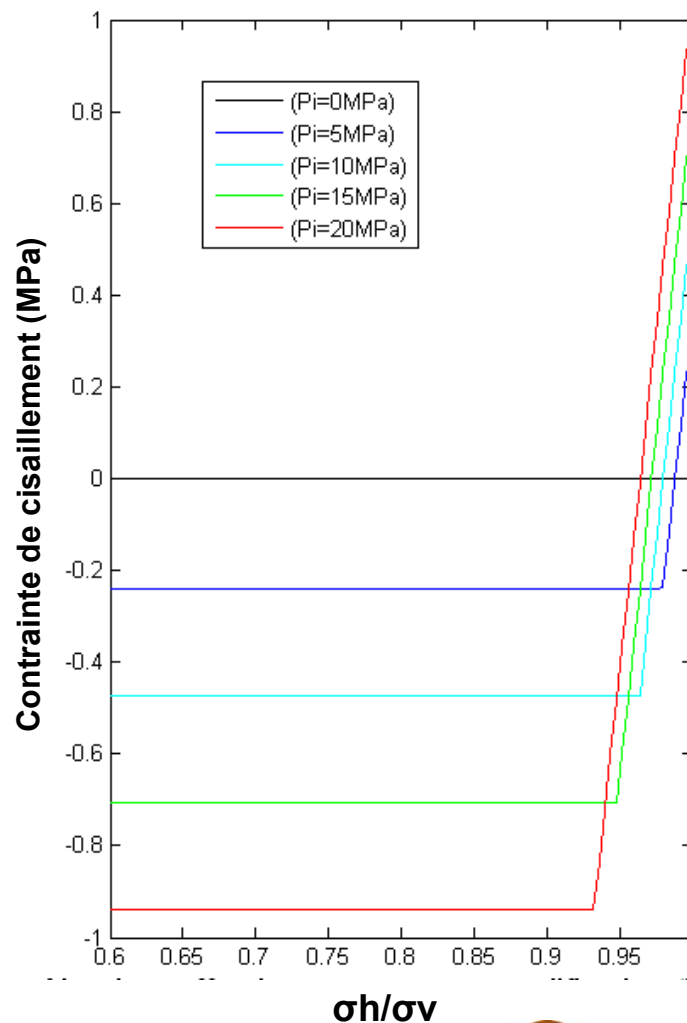
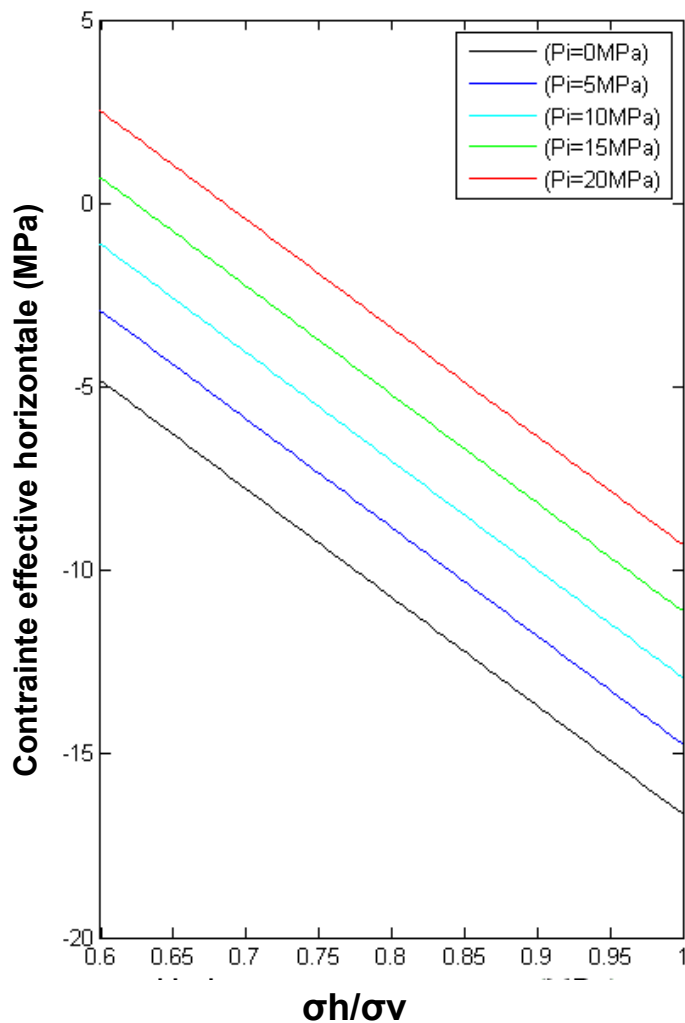
Évolution des contraintes effectives dans la couverture



Contrainte effective verticale

Contrainte effective horizontale

Effet des conditions initiales



Représentation du réseau de fissures

$$\lambda_t(\sigma) = \lambda_0 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m$$

$$P_{obs} = 1 - \exp \left[- \int_0^\sigma \frac{d\lambda_t(p)}{dp} Z_{obs}(p) dp \right].$$

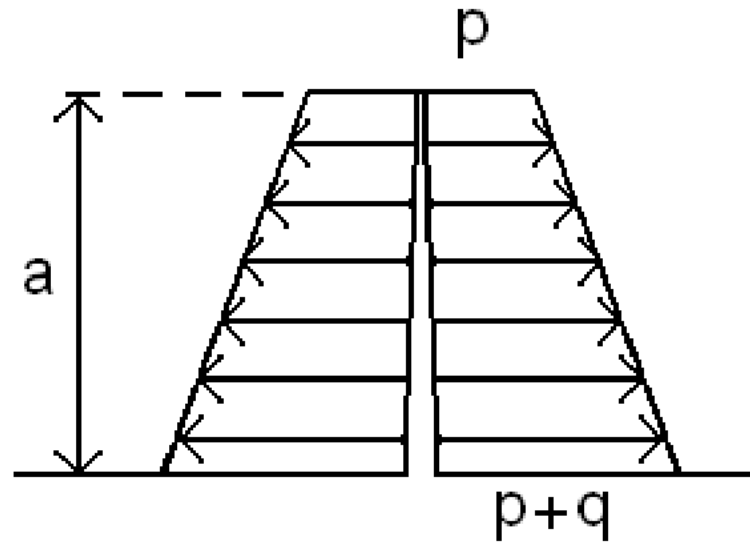
Paramètres matériaux associés

$$\sigma_0^m / \lambda_0 = 10^{40} \text{ Pa}^m / \text{m}^2$$

$$K_{Ic} = 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$$

$$m = 6$$

Propagation d'une fissure et zone d'obscureissement



$$K = (1.1215p + 0.439q)\sqrt{a\pi}$$

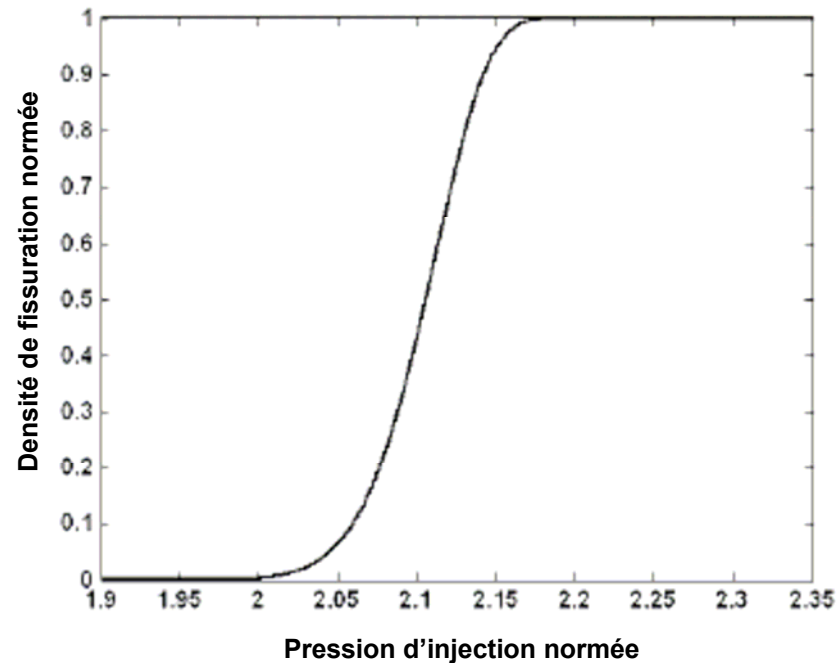
$$a = \alpha \langle P_i - P_t \rangle,$$

$$Z_{obs} = 2la$$

Résultat: évolution du réseau de fissures

$$P_{obs} = 1 - \exp\left[-\frac{2lm\alpha\beta^m\lambda_0}{(m+1)\sigma_0^m}\langle Pi - Pt \rangle^{m+1}\right],$$

$$\lambda_b = \frac{m+1}{2l\alpha} \gamma\left[\frac{m}{m+1}; \frac{2lm\alpha\beta^m\lambda_0}{(m+1)\sigma_0^m}\langle Pi - Pt \rangle^{m+1}\right]$$



Résumé

- > Simulations EF à grande échelle pour étudier l'évolution de champs de contraintes
- > Un modèle probabiliste pour modéliser la formation d'un réseau de fractures à partir d'une distribution aléatoire des sites d'amorçage.
- > L'interaction entre les fissures est prise en compte en introduisant une « zone d'écrantage »
- > La densité de fissuration décrite en fonction de la probabilité d'écran de le réseau

Perspectives

- > Développement d'un modèle d'endommagement – perméabilité
- > Endommagement sous confinement
- > Implantation du modèle d'endommagement dans un code de calcul
- > Modélisation des cas réels