

Journée 2009 des utilisateurs
de *Code_Aster*[®] en géosciences

Modélisation hydromécanique de stockage
géologique du CO₂ et étude des modes
possibles d'endommagement des couvertures
(Utilisation du *Code_Aster*[®] en géosciences au BRGM)

N. Guy^{a,b}, *F. Hild*^b, *J. Rohmer*^a, *D. Seyedi*^a

^a BRGM

^b LMT-Cachan

d.seyedi@brgm.fr



Code_Aster au BRGM

> Génie parasismique

- Evaluation de la vulnérabilité sismique des bâtis (projet ANR VEDA)

> Modélisation d'endommagement autour des alvéoles de stockage des déchets nucléaires

- Collaboration de recherche ENDOSTON (BRGM-EDF)

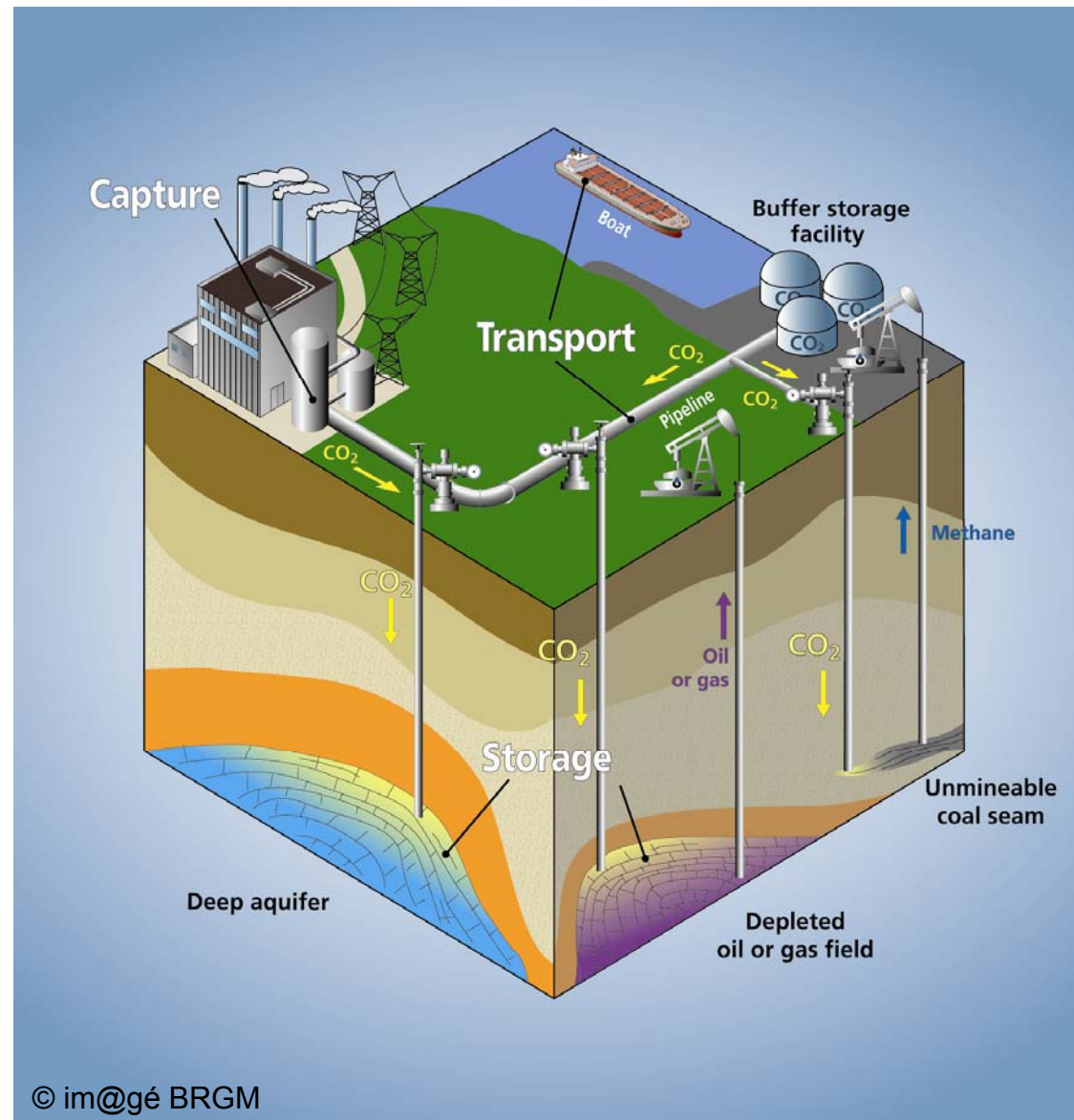
> Modélisation hydromécanique pour l'étude de l'intégrité de stockage géologique du CO₂

- Programme de recherche BRGM
- Projet ANR Géocarbone-Intégrité

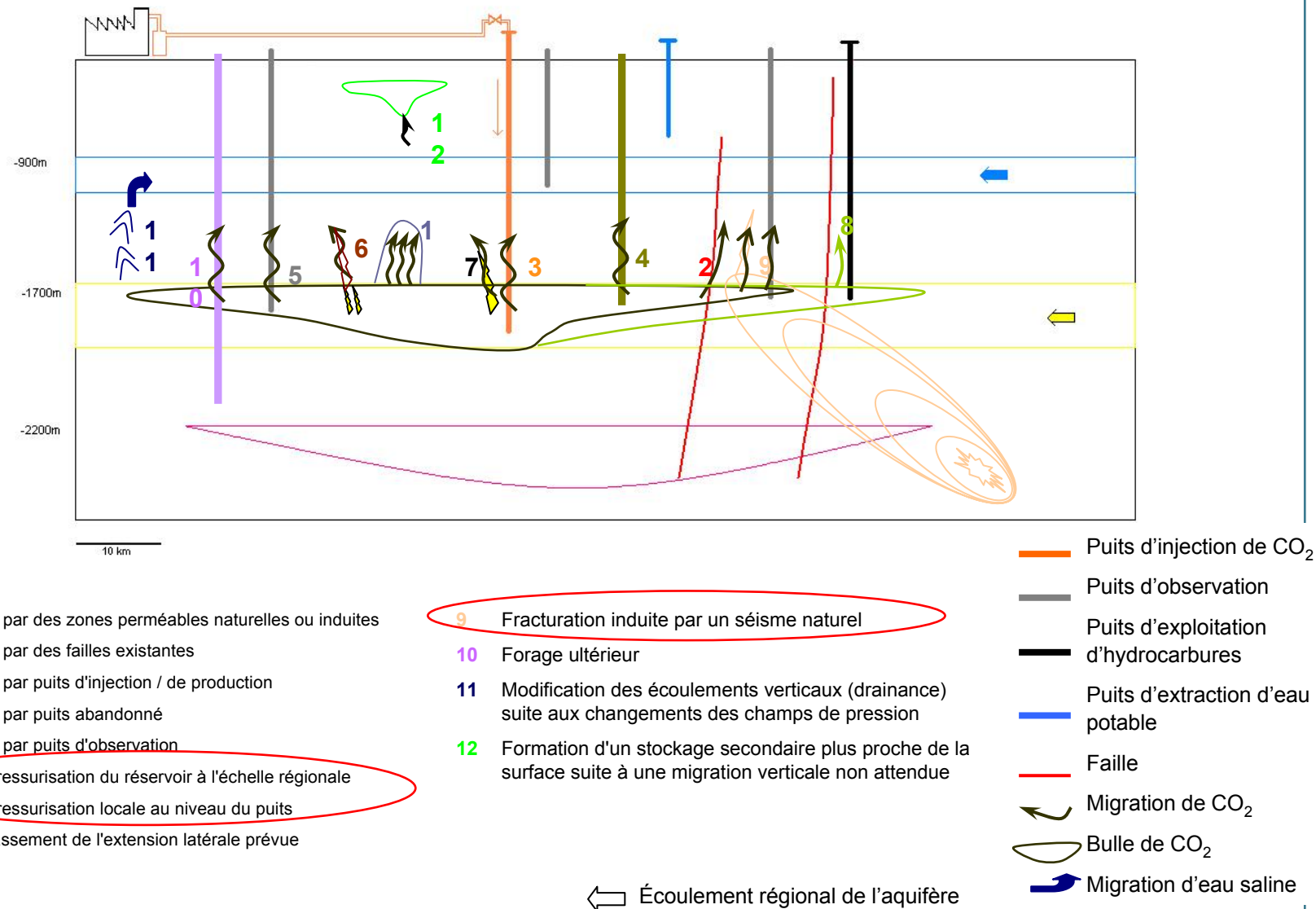
Plan de l'exposé

- > **Problématique de sûreté de stockage géologique du CO₂**
 - Approche par scénarios
- > **Modélisation hydromécanique de l'injection de CO₂ « supercritique »**
 - Couplage Tough2 – *Code_Aster*
- > **Les marges de sécurité**
 - Abaque de pression/taux d'injection limite
- > **Perspectives : développements en cours**
 - Couplage des codes
 - Modélisation d'endommagement des roches
 - Vers un modèle d'endommagement probabiliste

Captage et stockage de CO₂



Différents scénarios de fuite (Bouc et al. 2008)



Objectif

- > **Evaluation des conséquences mécaniques de l'injection de gaz**
- > **Détermination de la pression / du débit limite d'injection**
 - Préserver l'intégrité de la couverture
- > **Conséquences de dépassement de la pression limite**
 - Impact sur la perméabilité



Détermination des marges de sécurité

Modélisation hydromécanique de l'injection du CO₂ « supercritique »

Objectifs

- > Evaluation de l'impact de l'injection de CO₂ supercritique sur la répartition du champ de contraintes effectives
- > A terme, déterminer la pression limite d'injection pouvant endommager les formations de couverture

Code de calcul (Couplage séquentiel entre deux codes)

- > **Code transport diphasique** (CO₂ supercritique + eau + sel) :
 - Tough2 - LBNL
- > **Code mécanique** :
 - Code_Aster®

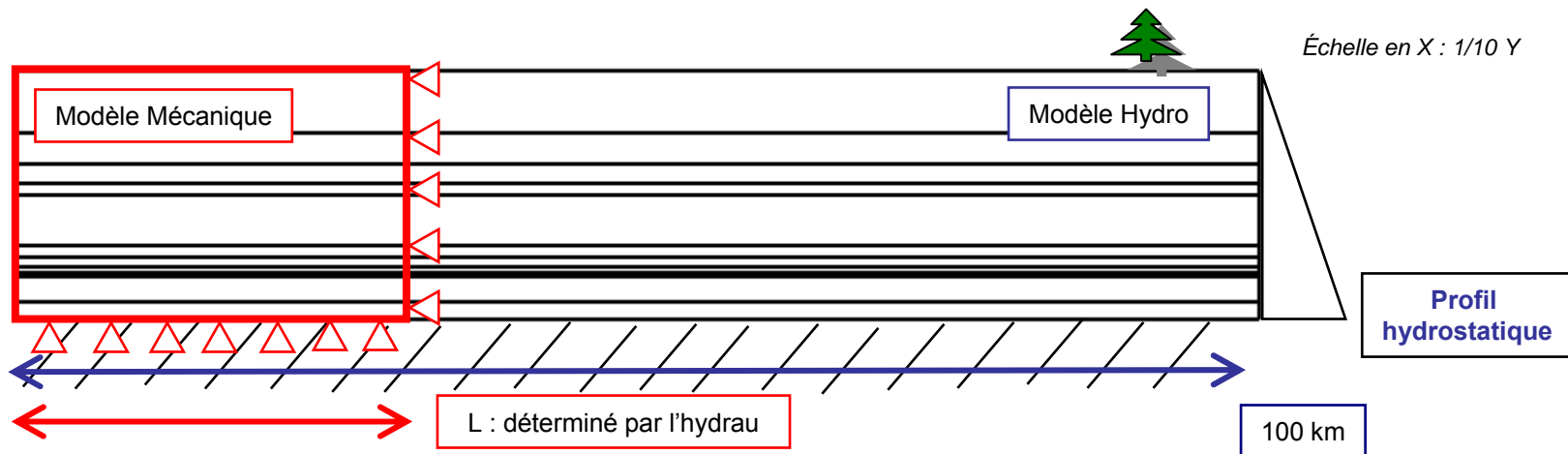
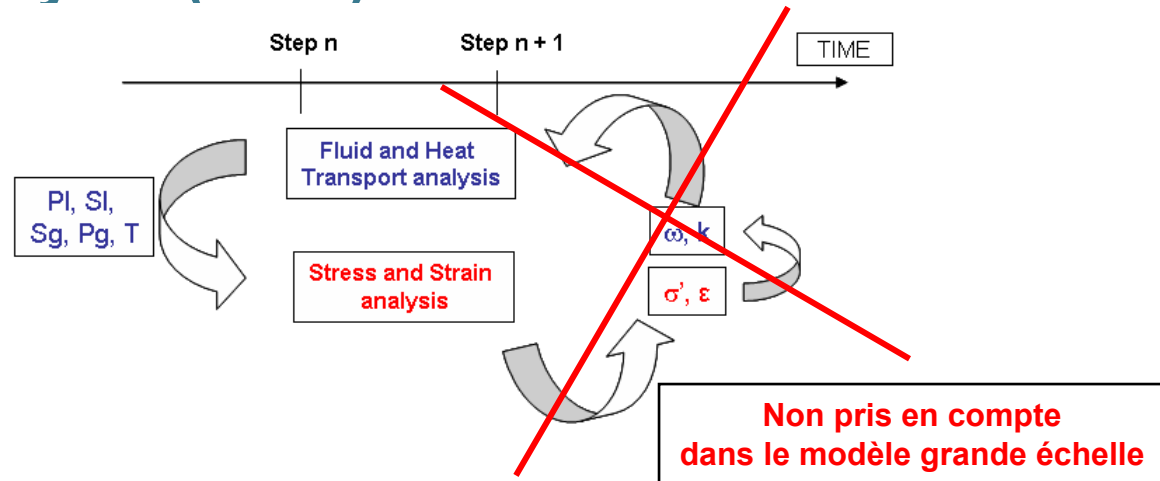
Avancement

- > Résultat sur un cas « type bassin de Paris »

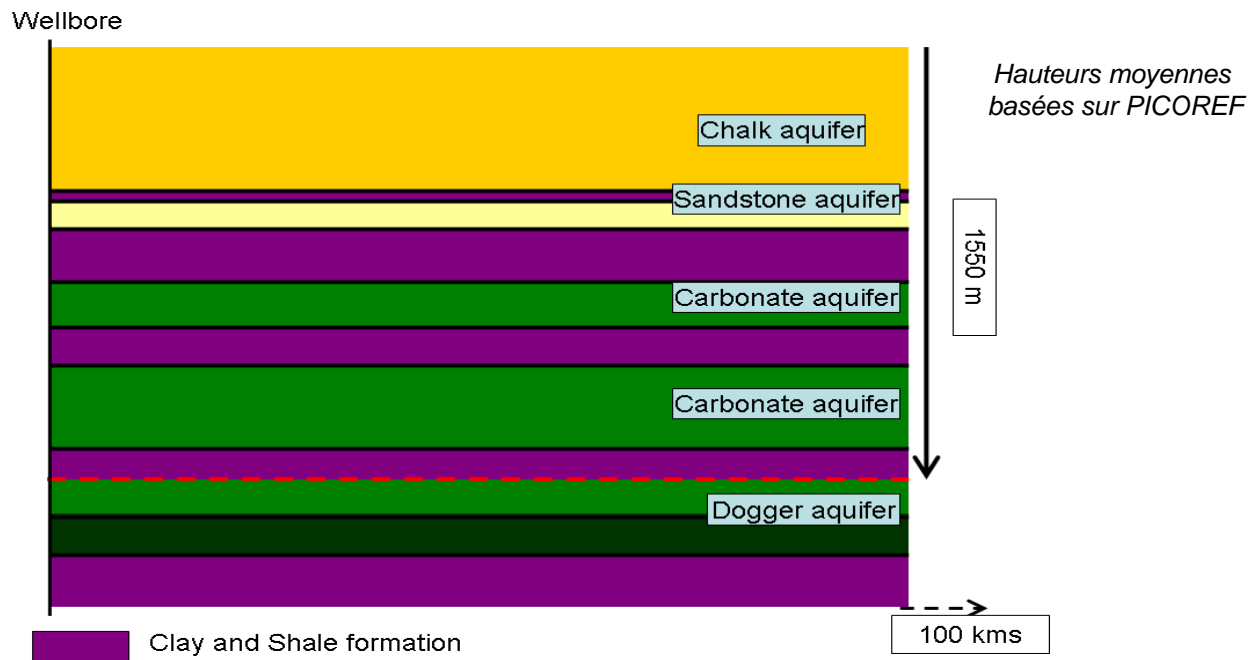
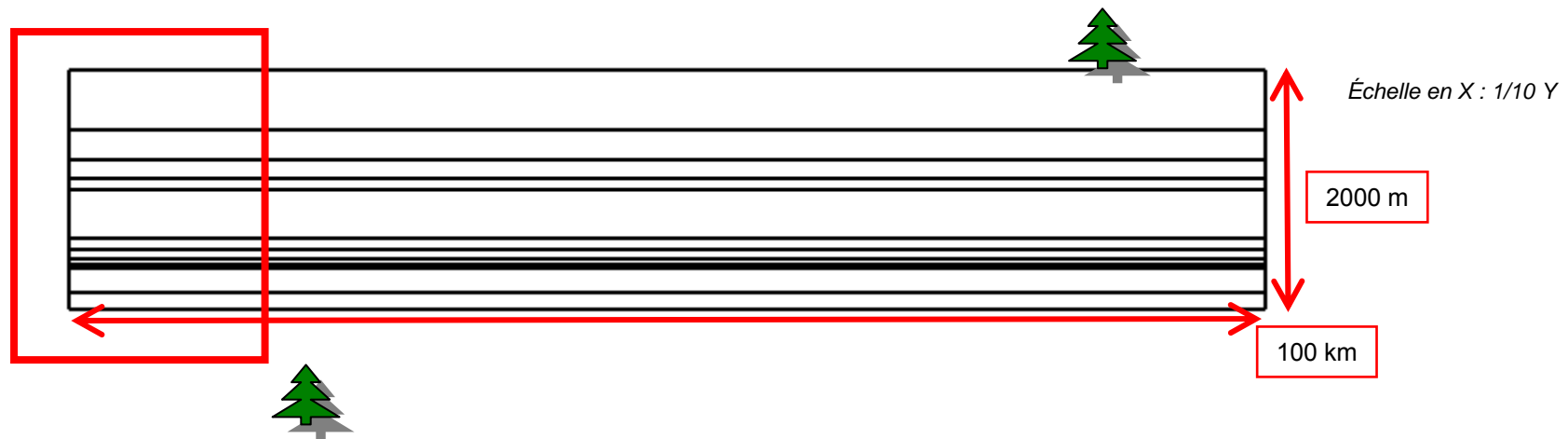


Outil numérique : chaînage externe

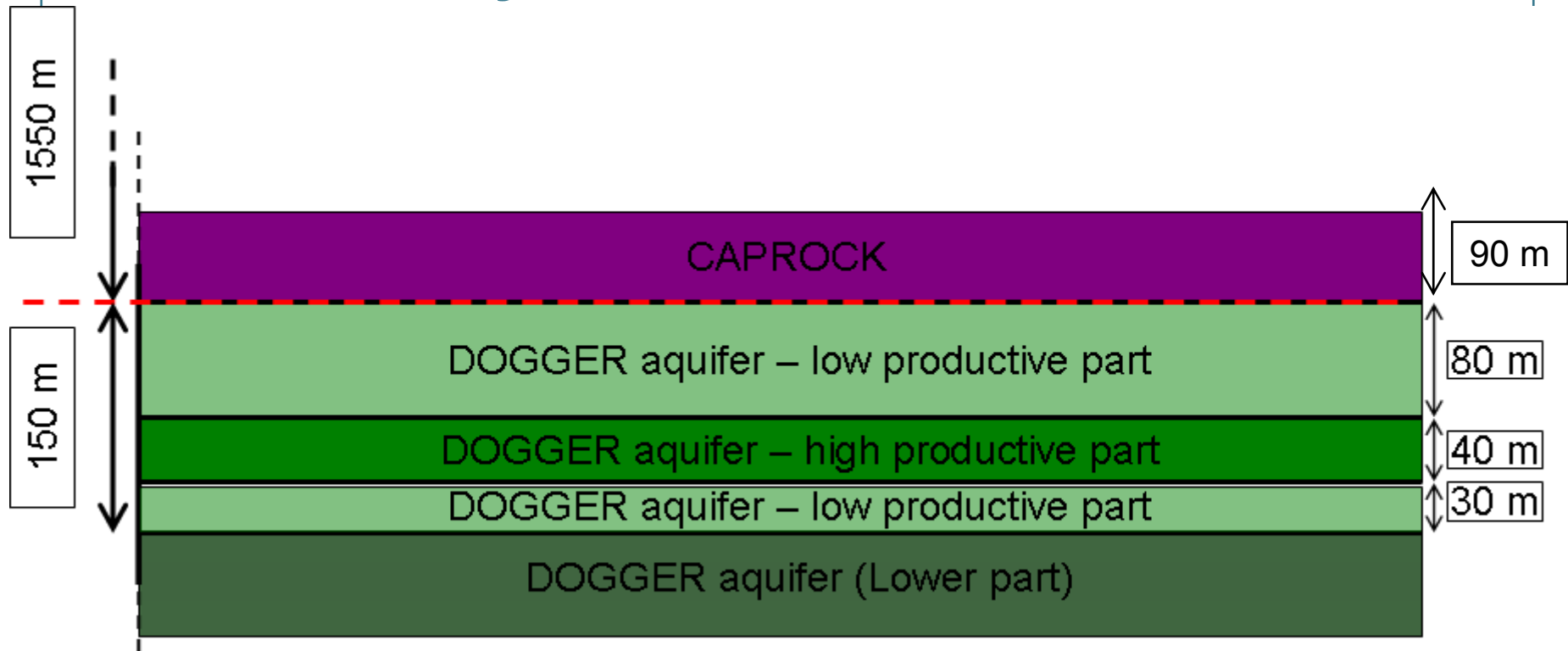
Rohmer et Seyedi (2009)



Vision « idéalisée » de Bassin de Paris

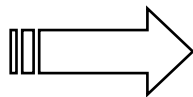


Traduction « hydro » du réservoir



$K_h = 90\text{mD}$, $K_v = K_h / 10$, $\omega = 15\%$
 $K_h = 705\text{mD}$, $K_v = K_h / 10$, $\omega = 15\%$
 $P_0 = 0,54 \text{ bars}$, $S_{lr} = 20 \%$, $\lambda = 0.600$

$K_h = 5 \mu\text{D}$, $K_v = K_h / 10$, $\omega = 5\%$
 $P_0 = [20 - 80] \text{ bars}$,
 $S_{lr} = 30 \%$, $\lambda = 0.329$



$T \approx 38.1 \text{ D.m}$

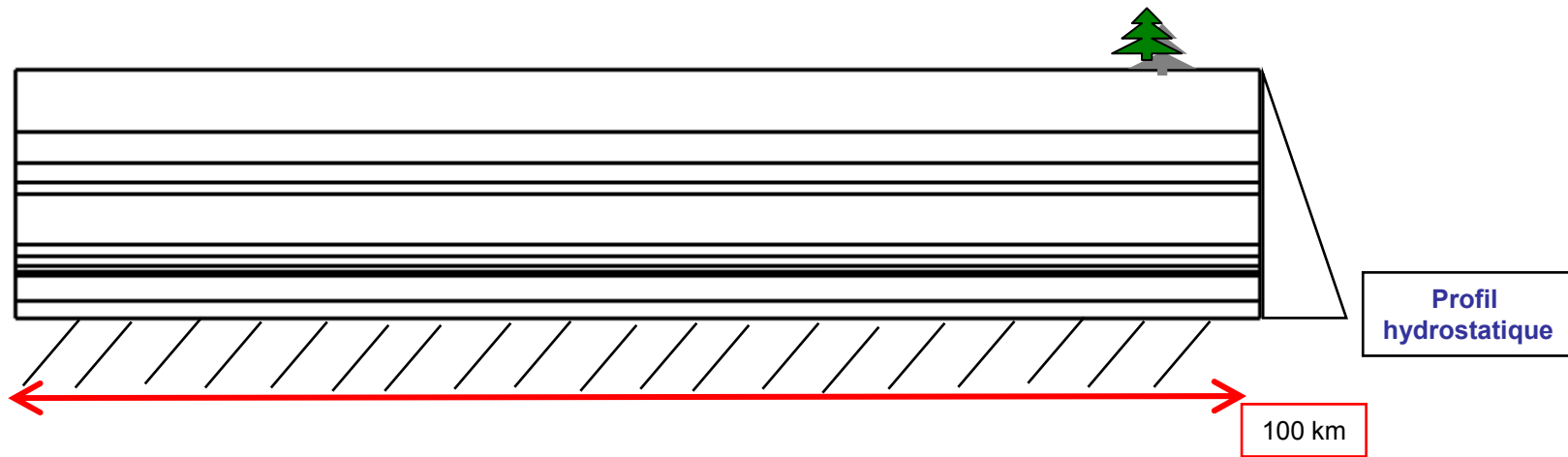
Basé sur Andre et al., 2007
Et Rojas et al., 1989

Basé sur ANDRA, 2005



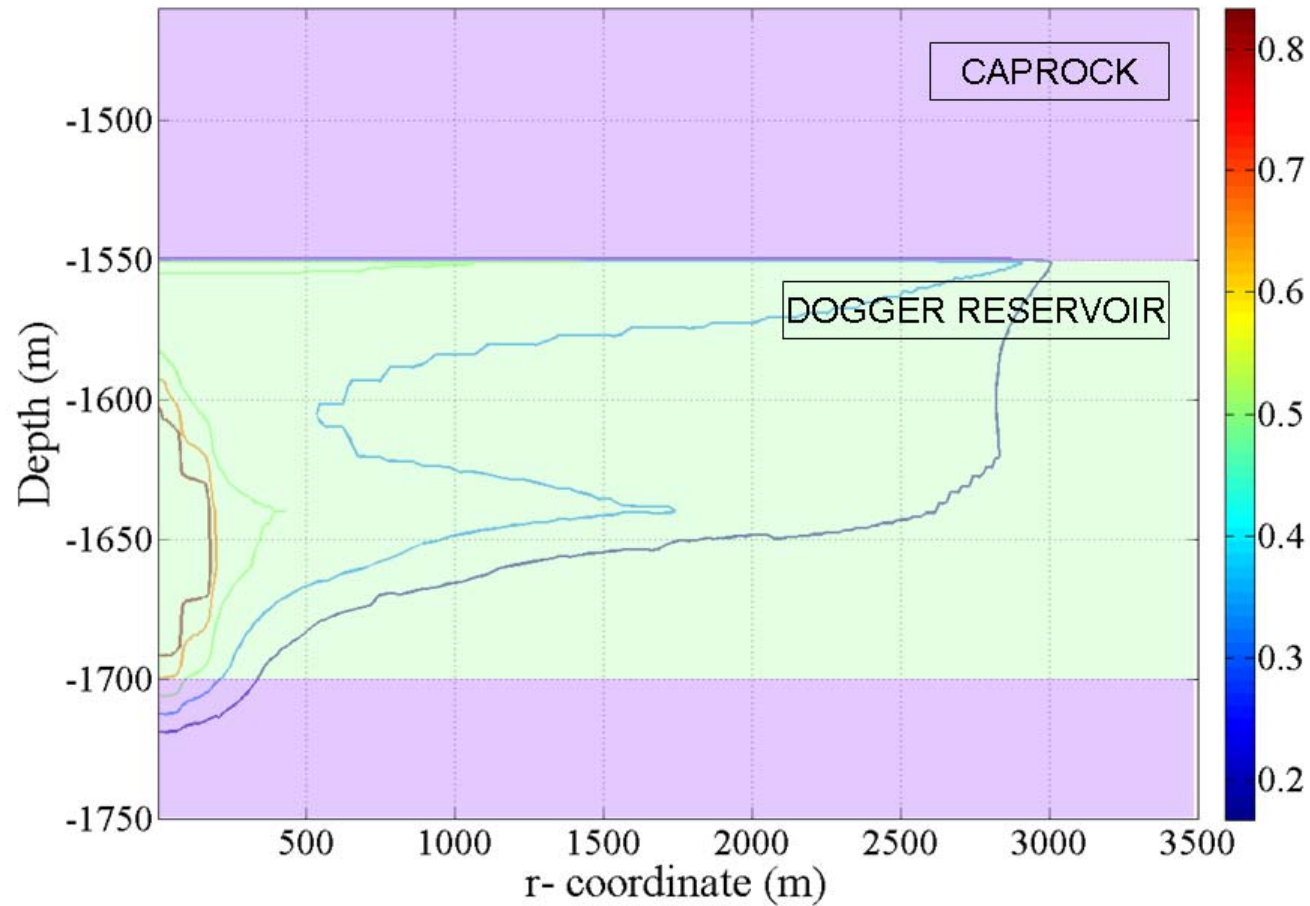
Conditions initiales « hydro »

Échelle en X : 1/10 Y

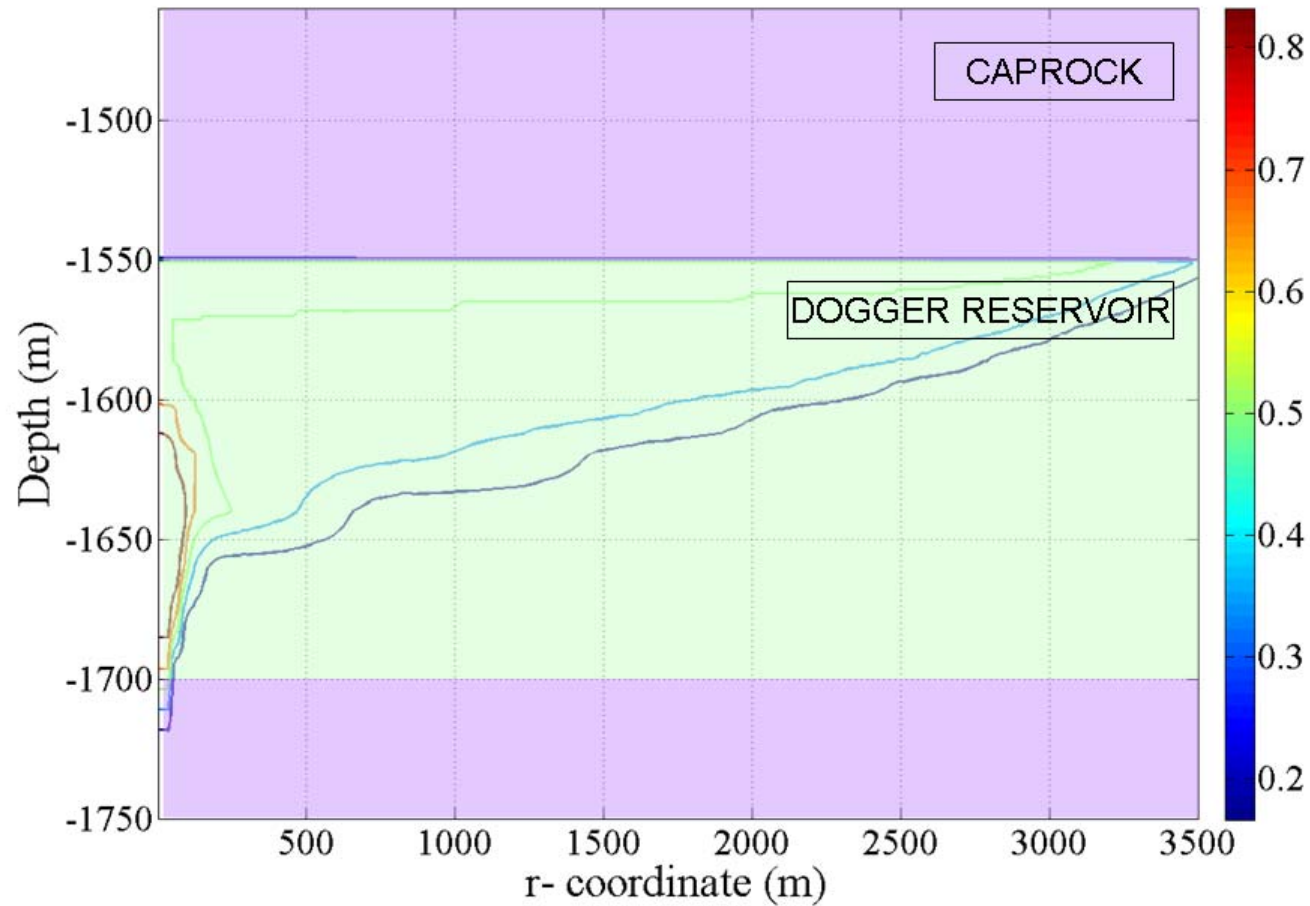


- **Modèle axisymétrique 2D**
- **Milieu initialement saturé en eau**
- **Pression d'eau initiale = Pression hydrostatique**
- **Chargement en flux de CO₂ sur la hauteur productrice**
- **Injection pendant 10 de 320 kg/s (10 Mt / an) (+ 10 ans stockage)**
- **Salinité 35 g/l**
- **Diffusion moléculaire non prise en compte**
- **Evolution isotherme, T=température à 1550 m, gradT=0.041 °C/m**

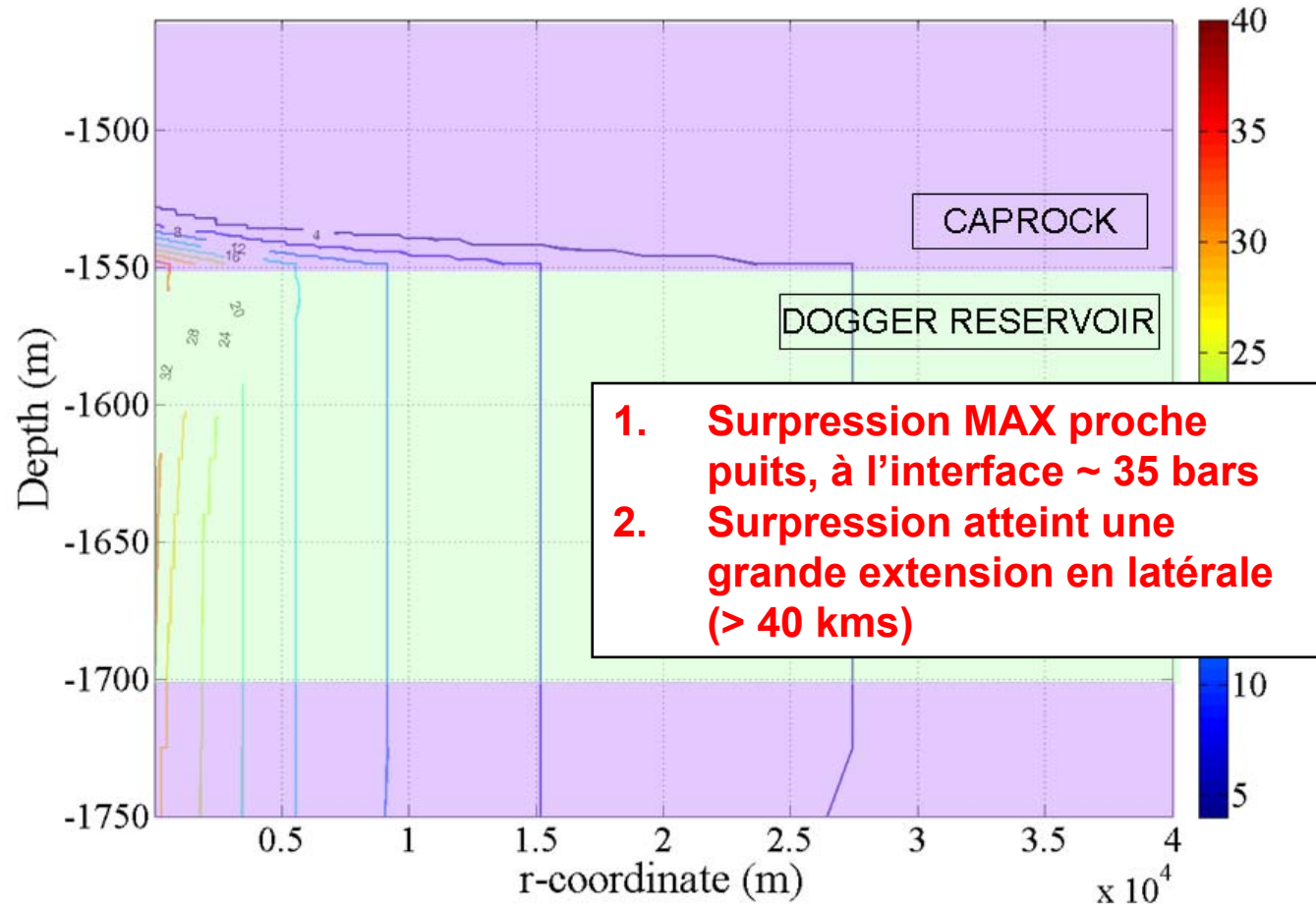
Saturation en CO2 – 10 ans d'injection



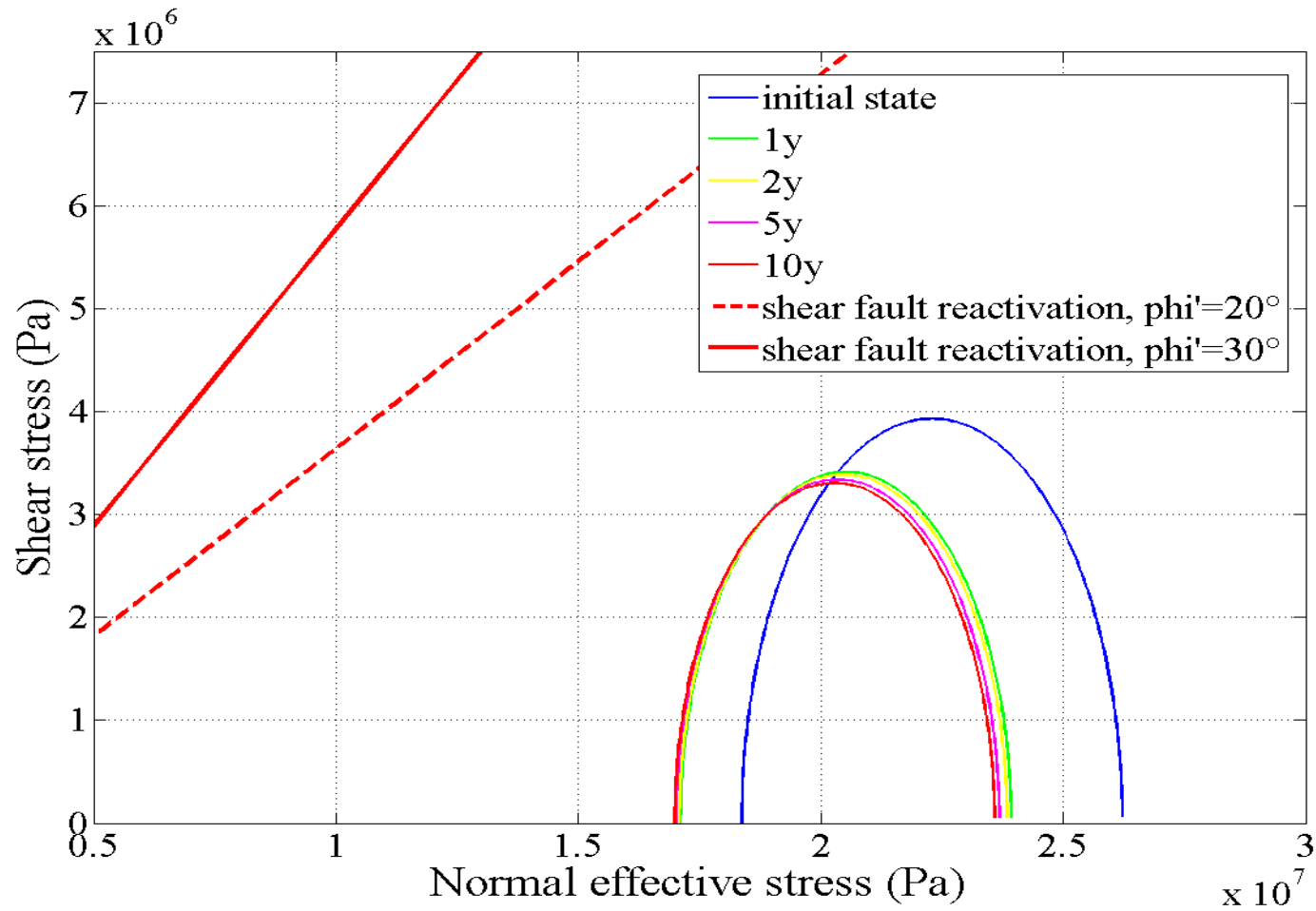
Saturation en CO2 – 10 ans de stockage



Surpression totale – 10 ans d'injection (bars)



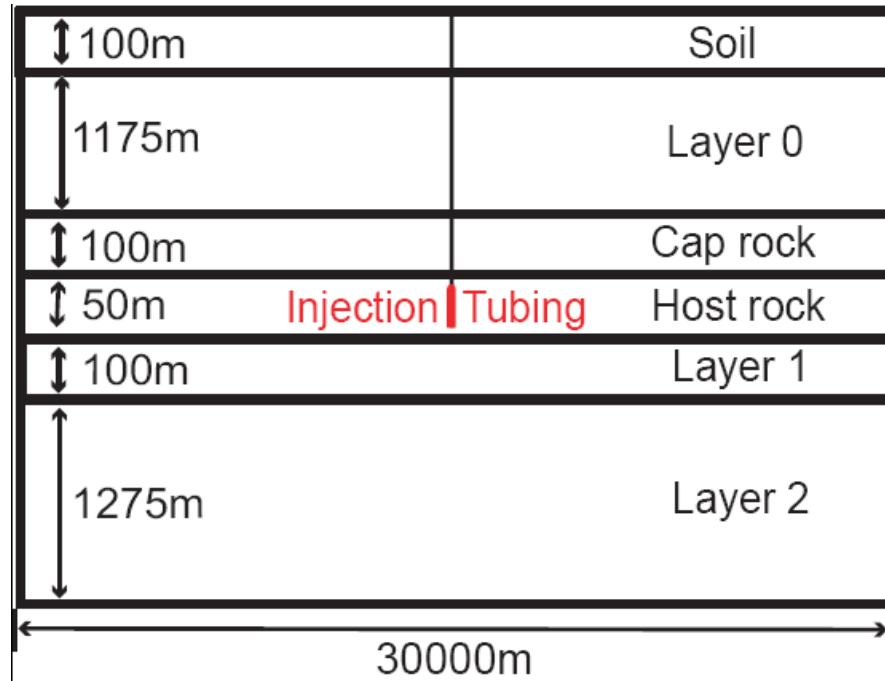
Evolution des contraintes au droit de l'injection



Les marges de sécurité – calculs simplifiés

- > **Modèle géologique multicouches simplifié**
- > **Propriétés matériaux extraites de la littérature**

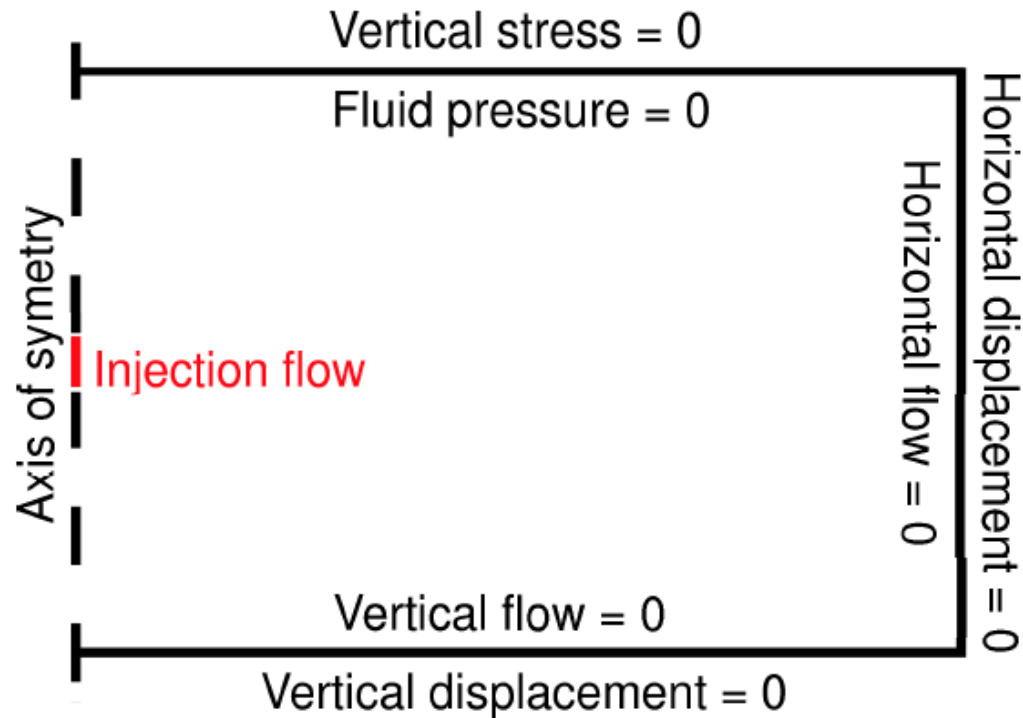
Modèle géologique



Propriétés des couches

Layer	E [GPa]	K_{int} [m ²]	ϕ^0	b
Soil	1	10^{-13}	0.3	1.0
Layer 0	20	10^{-15}	0.15	0.8
Caprock	20	10^{-17}	0.05	0.8
Hostrock	20	10^{-14}	0.15	0.8
Layer 1	20	10^{-17}	0.05	0.8
Layer 2	20	10^{-15}	0.15	0.8

Conditions aux limites

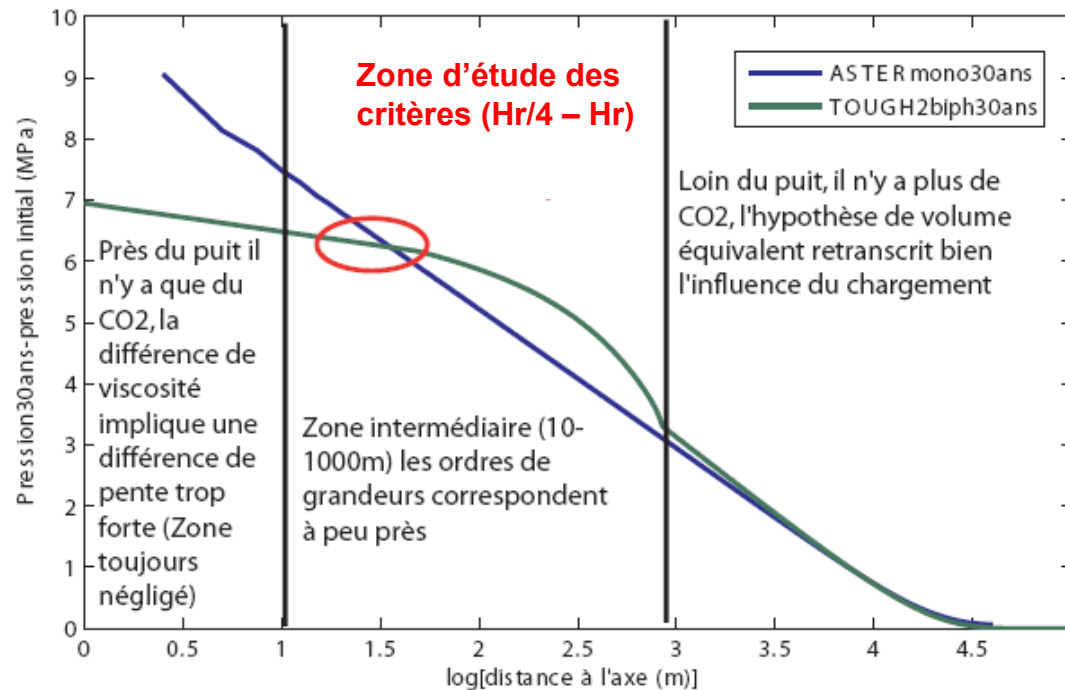


- > L'injection peut être pilotée en débit ou en pression
- > Le sous sol modélisé est suffisamment grand pour que la condition fluide sur le bord extérieur du cylindre n'influe les résultats

Modélisation simplifiée

> Modèle monophasique (roche saturée en eau)

- Chargement piloté en pression
 - Problème de maillage à la proximité de puits
- Chargement piloté en débit équivalent
 - Résultats erronés sur la paroi de puits



Comparaison des profils de pression moyenne dans le réservoir obtenus par un calcul monophasique et un calcul diphasique

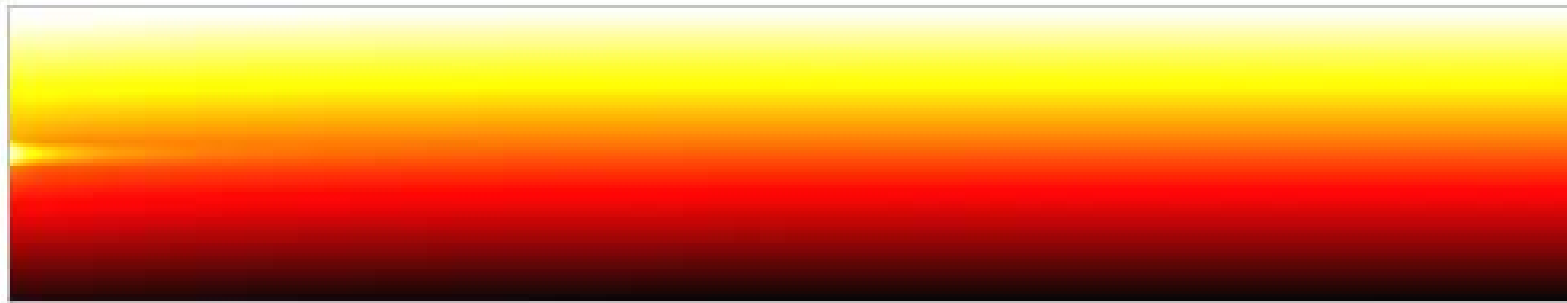
Modélisation simplifiée de l'injection

- > L'injection est représentée par une augmentation de débit progressive (conservation de la masse)
- > Le fluide n'étant modélisé que par de l'eau (milieu saturé), on introduit un débit d'injection (en Mt/an) équivalent en termes de volume
- > On considère qu'à la profondeur d'injection (1400m) le CO₂ a une masse volumique d'environ 700kg/m³

$$r = r_e / r_0$$

- > L'augmentation du débit équivalent est suffisamment lente (0,1 Mt/an pendant 35 ans) pour que l'on se trouve quasiment en écoulement permanent dans la zone d'étude

Evolution de champs des contraintes effectives due à l'injection



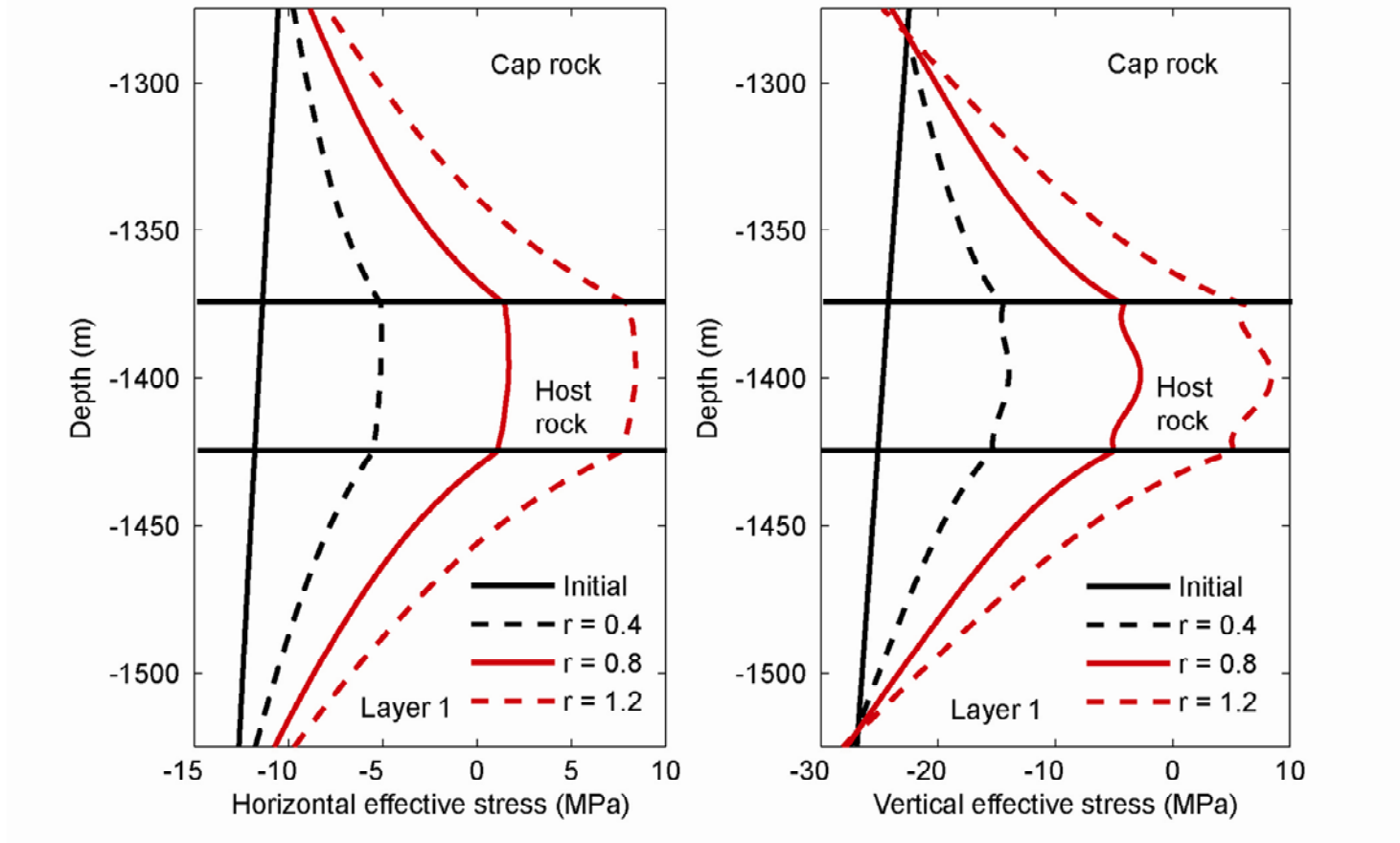
-23 MPa

0 MPa

$$\sigma'_{xx} (k_0 = 0,7, r = r_e/r_0 = 1)$$

- > L'injection a une influence sur le champ de contrainte à proximité de la zone d'injection car il génère une augmentation de la pression des pores
- > L'injection a une influence sur le champ de contrainte à l'aplomb de la zone d'injection car il y a une redistribution des contraintes

Evolution de champs de contraintes effectives (Guy et al. 2009)



Taux d'injection normé : $r = r_e / r_0$

Mécanismes d'endommagement

A) Activation de mécanismes dus au cisaillement : Critère de Coulomb :

$$S_{mc} + \sigma_{mc} \sin(\theta) \geq C_0 \cos(\theta)$$

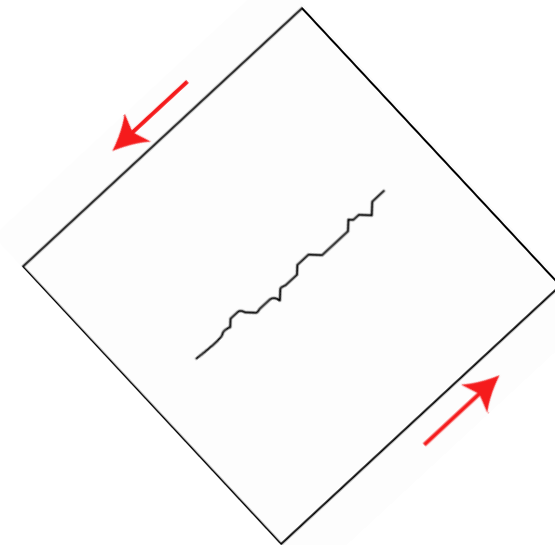
$$\sigma_{mc} = \frac{1}{2} (\sigma'_h + \sigma'_v)$$

$$S_{mc} = \frac{1}{2} |\sigma'_h - \sigma'_v|$$

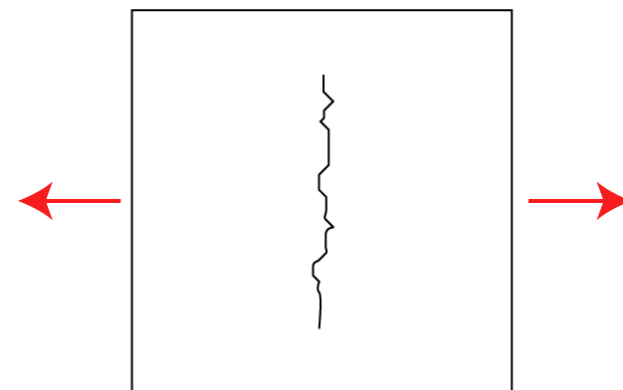
B) Activation de mécanismes dus à la traction horizontale : Critère de Rankine

$$\sigma'_h \geq 0$$

Fissures verticales propageant en mode d'ouverture



Fissures frottantes propageant obliquement



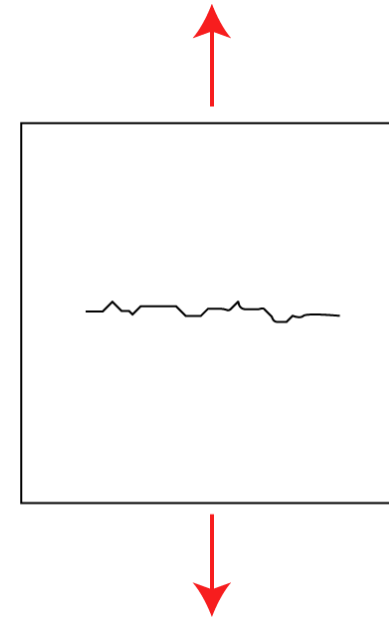
arth

brgm

Mécanismes d'endommagement

- C)** Activation de mécanismes dus à la traction verticale : Critère de Rankine

$$\sigma'_v \geq 0$$



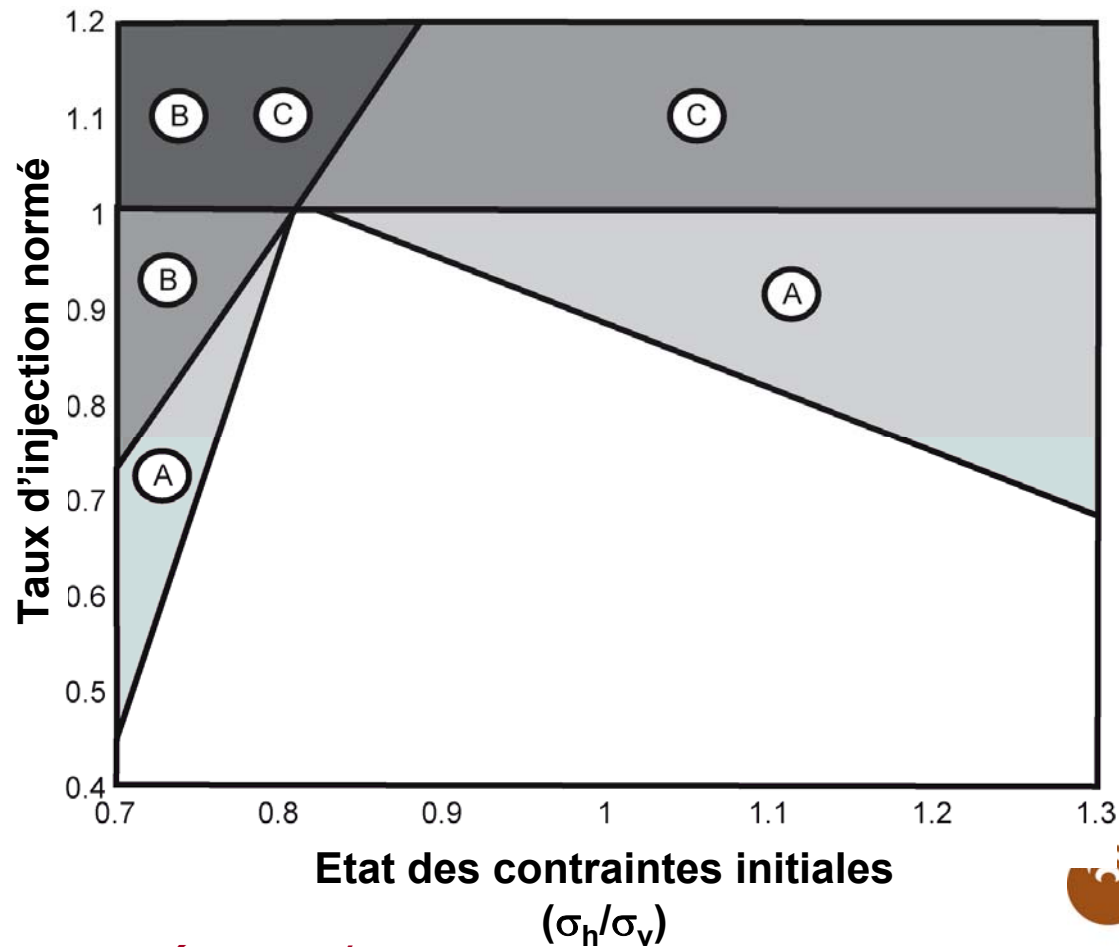
Fissures horizontales propageant en mode d'ouverture



Evaluation de la pression / du débit limite

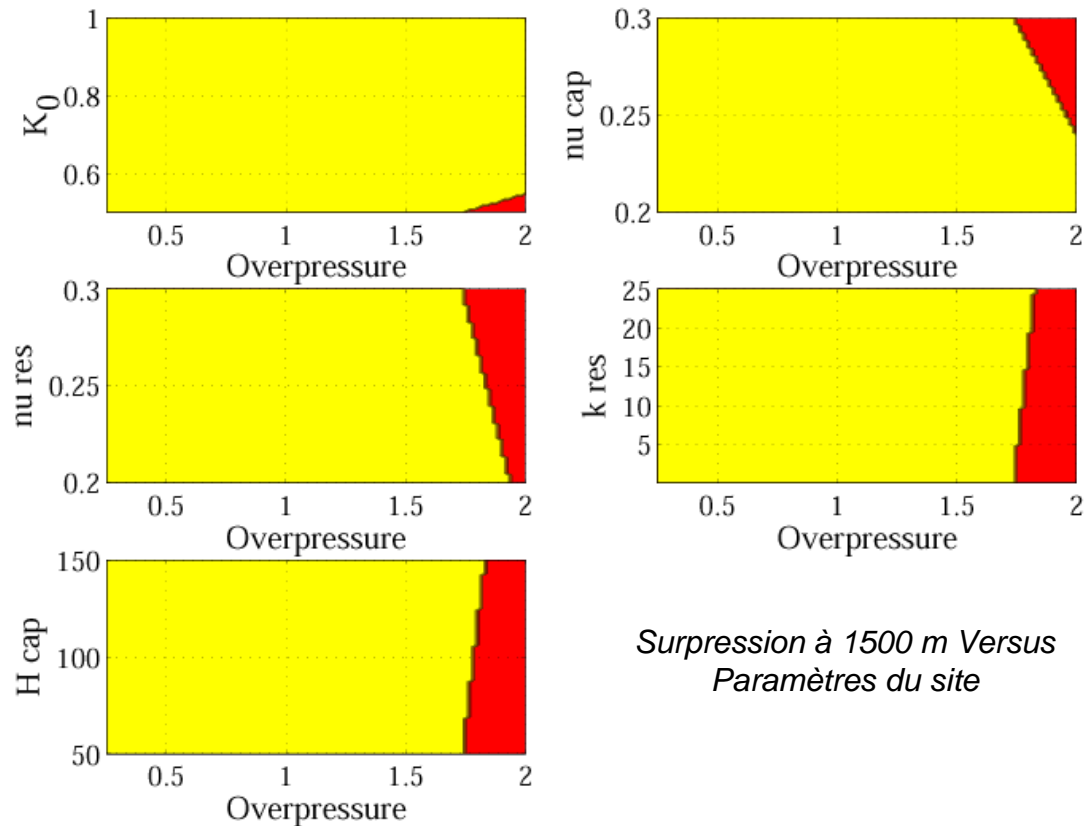
Débit limite d'injection (Guy et al. 2009)

Effet d'état initial des contraintes



Taux d'injection normé : $r = r_e / r_0$

Pression limite d'injection (Rohmer et Bouc 2008)



L'exemple des abaques d'évaluation de la pression limite d'injection en fonction des paramètres de site de stockage. Pour chaque abaque les valeurs des autres paramètres sont considérées constantes et égales aux valeurs les plus défavorables.

Conclusions

> Modélisation numérique à grande échelle

- Couplage externe
- Modélisation de l'injection de CO₂ en état supercritique

> Modélisation EF simplifiée à grande échelle

- Evaluation de la variation de σ'
- Estimation de la pression / du débit limite d'injection

> Dépendance de mode rupture pour les débits d'injection élevés aux contraintes initiales *in situ*

- $\sigma_{hi} / \sigma_{vi} > 0,8 \rightarrow$ fissuration sous cisaillement
- $\sigma_{hi} / \sigma_{vi} < 0,8 \rightarrow$ fissuration en traction est possible

> Faisabilité de génération des abaques

- Estimation rapide de la pression maximale d'injection en fonction de différents paramètres



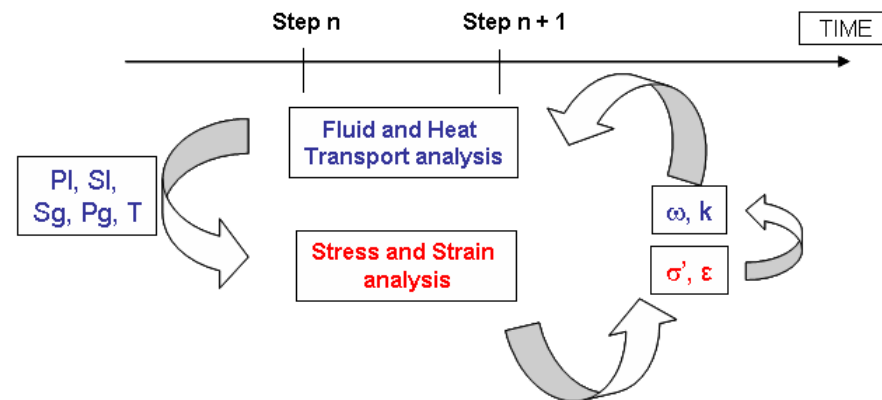
Perspective : Coupage Tough2 – Code_Aster

> Stabilisation/optimisation d'outil de couplage

- Schéma de couplage : pas de temps hydro/méca
- Indépendance d'outil de couplage vis-à-vis des codes

> Prise en compte de ΔT

> Non-linéarité du comportement mécanique

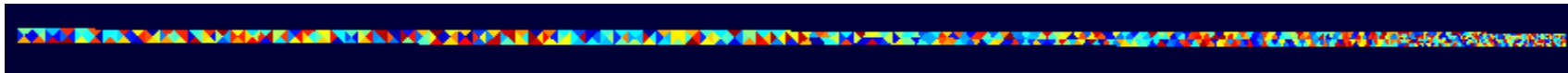


Perspective : Loi d'endommagement probabiliste (Thèse de N. Guy, 2006-2009)

> Intégration d'une lois d'endommagement probabiliste dans le Code_Aster

- Prise en compte de l'hétérogénéité spatiale de la résistance à la rupture
- Lois d'endommagement basée sur une distribution de Poisson-Weibull
- Diminution des problèmes liés au maillage par l'introduction d'une longueur caractéristique physiquement définissable

Dispersion des résultats expérimentaux



Dispersion de la contrainte à la rupture (tirage aléatoire de σ_y à partir d'une distribution de Weibull)