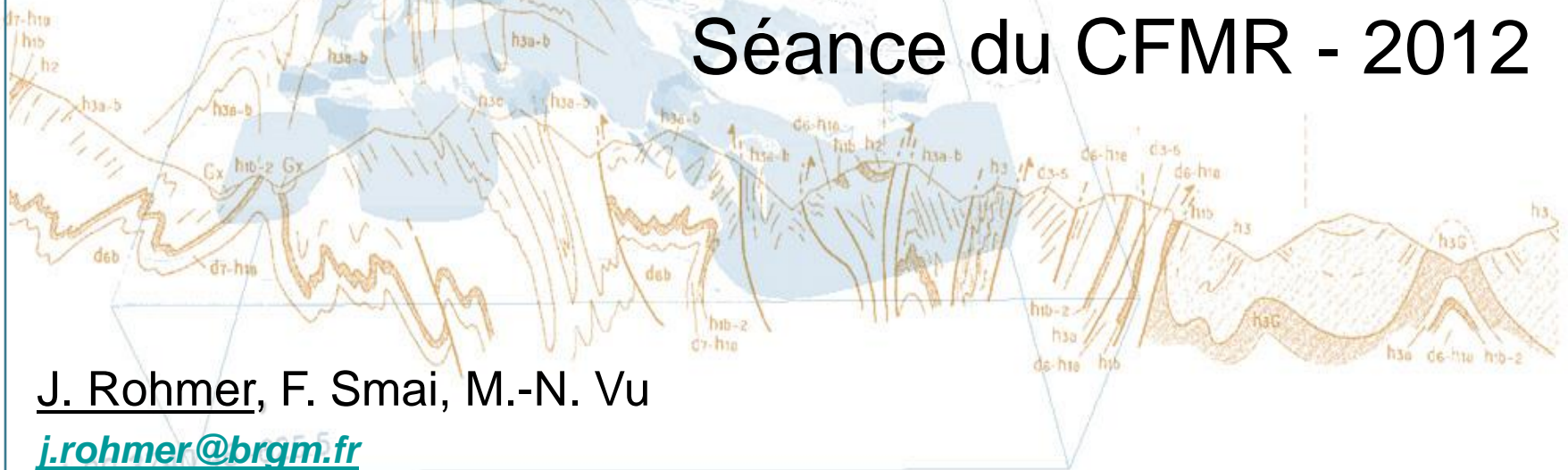


Risques de réactivation de faille : la problématique des stockages de CO₂

Séance du CFMR - 2012



J. Rohmer, F. Smai, M.-N. Vu

j.rohmer@brgm.fr



48 articles found for: (ALL(fault reactivation slip)) and co2 storage AND LIMIT-TO(topics, "co2 storage,co2 injection,fault reactivation,fluid flow,fluid pressure,pore pressure,fault zone,paris basin,shear zone,fault rock")

Résultats de recherche for 'fault reactivation co2 storage'sans filtre

Affichage des documents 1 - 10 à 47

Year
<input type="checkbox"/> 2012 (10)
<input type="checkbox"/> 2011 (11)
<input type="checkbox"/> 2010 (5)
<input type="checkbox"/> 2009 (6)
<input type="checkbox"/> 2008 (2)
<input type="checkbox"/> 2007 (1)
<input type="checkbox"/> 2005 (6)
<input type="checkbox"/> 2004 (1)
<input type="checkbox"/> 2003 (3)
<input type="checkbox"/> 2002 (1)
<input type="checkbox"/> 1992 (1)
<input type="checkbox"/> 1990 (1)

- 2013 (1)
- 2012 (6)
- 2011 (7)
- 2010 (6)
- 2009 (6)
- 2008 (9)
- 2007 (4)
- 2006 (1)
- 2005 (1)
- 2004 (3)
- 2002 (1)
- 2000 (2)

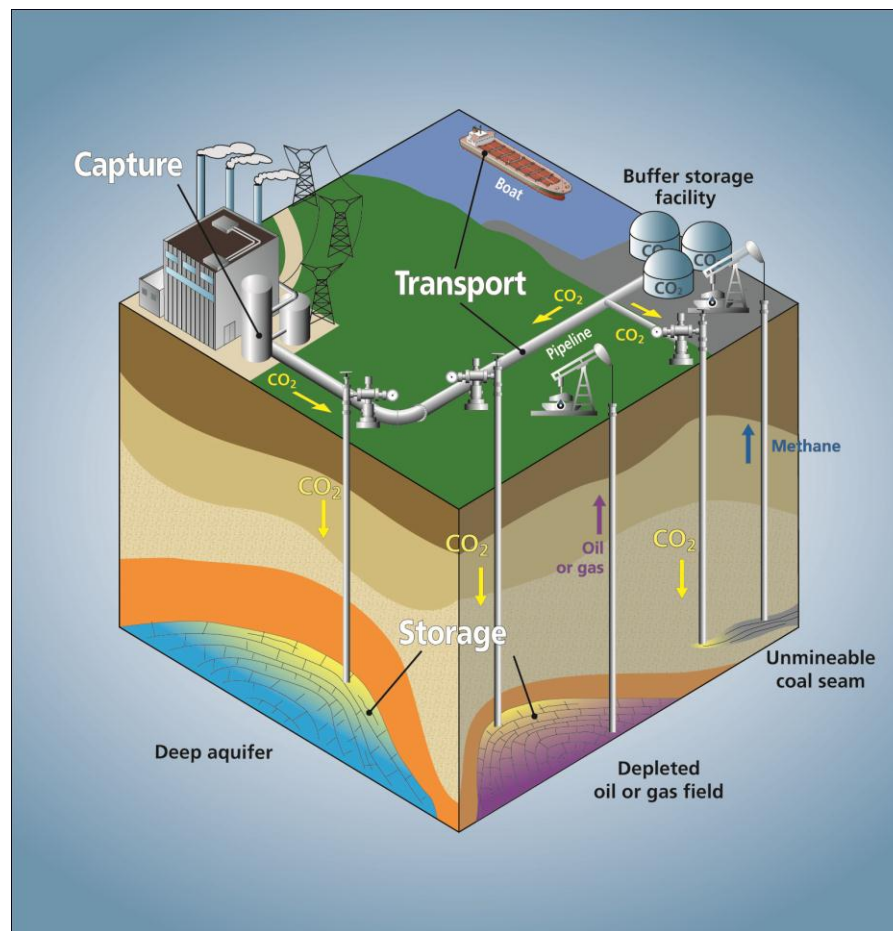
Objectif

- > **Etat des lieux sur l'évaluation de risque de réactivation des failles / fractures pour les stockages de CO2**
 - > **Où en est-on ?**
- > **Difficultés / défis liés aux caractéristiques de ce type d'activité**
 - > **Où va-t-on ?**

Contexte (rapide)

Technologie Capture – Transport – Stockage de CO₂:

- > Une des solutions identifiées pour réduire les émissions de CO₂ (GIEC, 2005);
- > Devrait participer à leur réduction à hauteur de un cinquième d'ici 2050 (IEA, 2009);
- > Objectif de **100 projets d'ici 2020**, et plus de 3000 en 2050,
- > **Objectif: quantité annuelle stockée = 10 Gt/an**

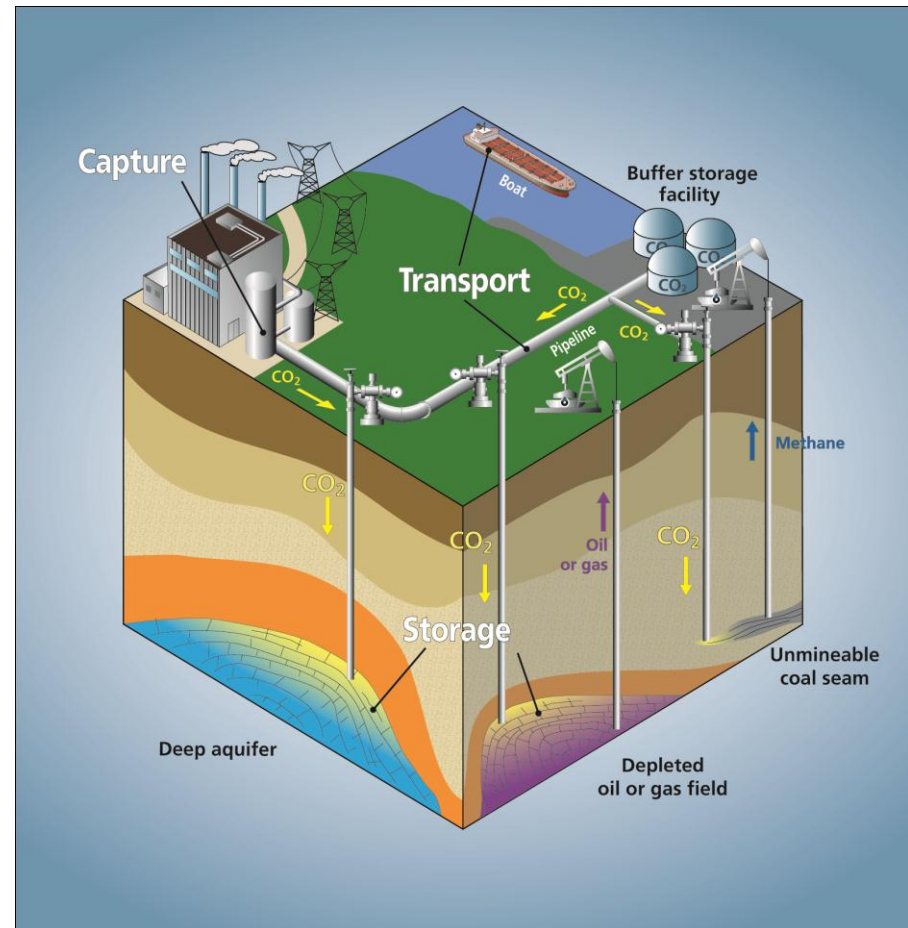


Contexte (rapide)

Technologie Capture – Transport – Stockage de CO₂:

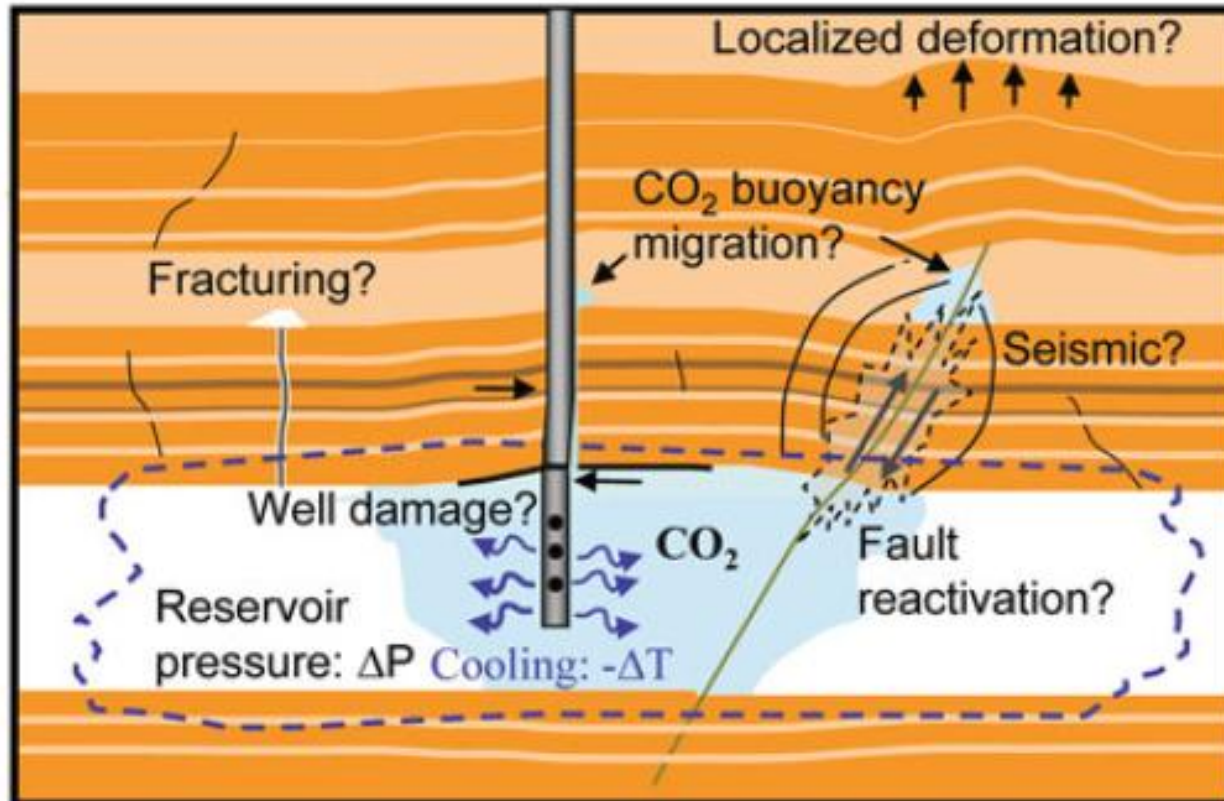
- > Une des solutions identifiées pour réduire les émissions de CO₂ (GIEC, 2005);
- > Devrait participer à leur réduction à hauteur de un cinquième d'ici 2050 (IEA, 2009);
- > Objectif de **100 projets d'ici 2020**, et plus de 3000 en 2050,
- > **Objectif: quantité annuelle stockée = 10 Gt/an**

- > **Pré-requis (IEA-GHG, 2007)**
- ➔ **Démontrer la sécurité**



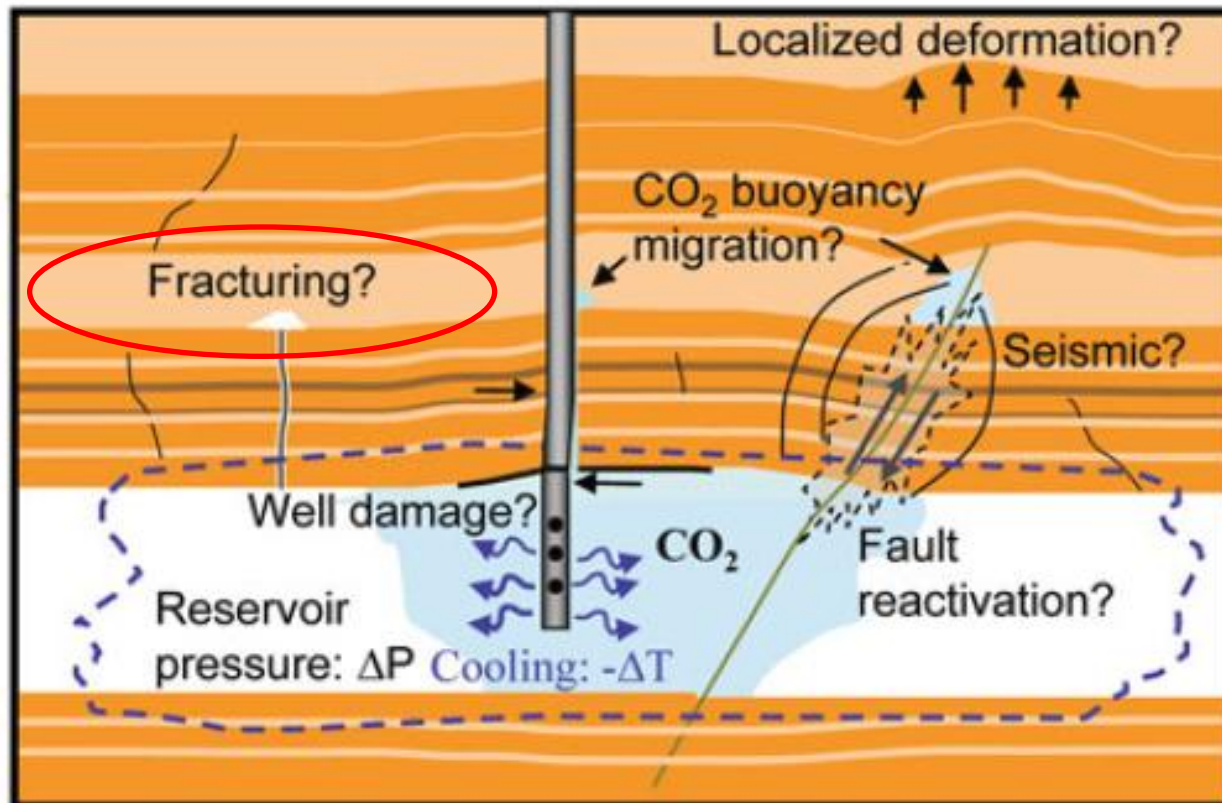
Multiples risques géomécaniques

Unwanted mechanical changes



Multiple risks géomécaniques

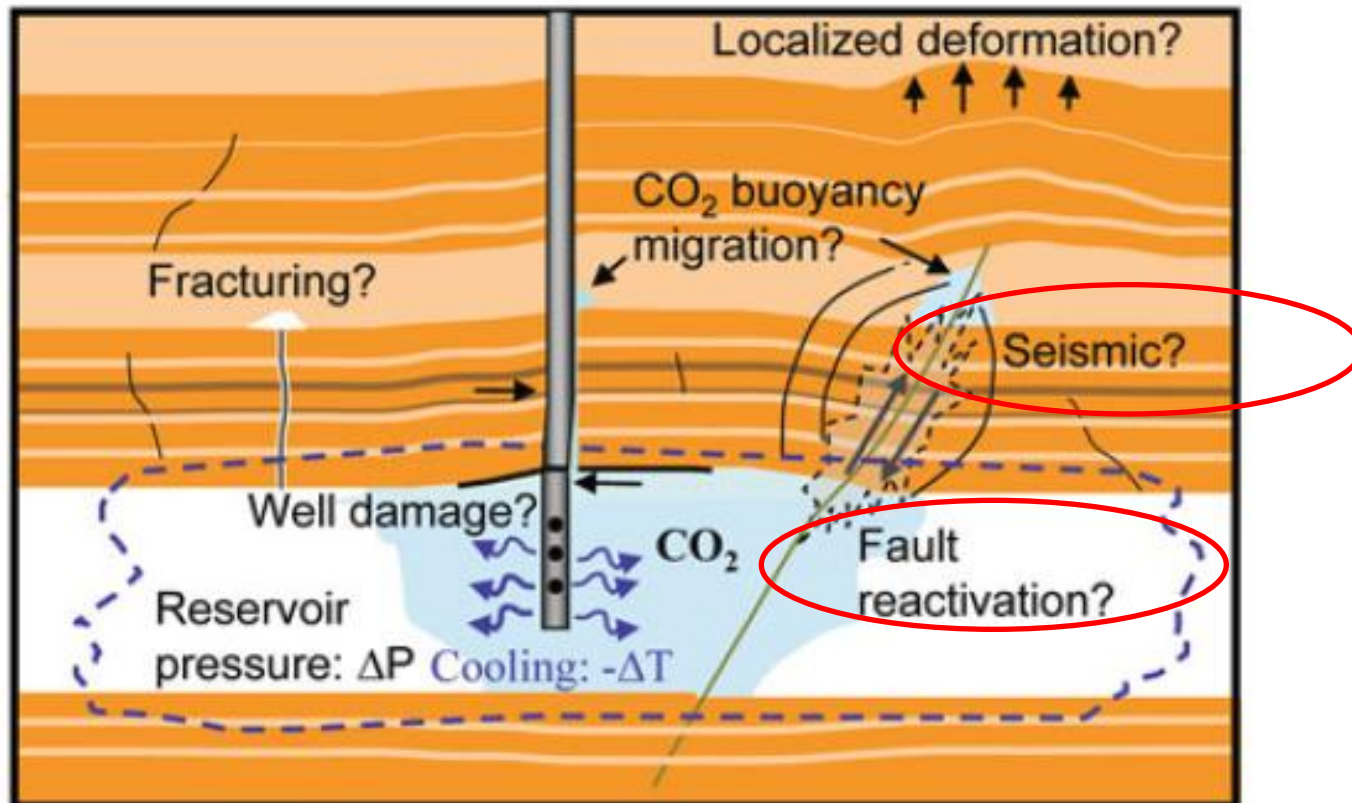
Unwanted mechanical changes



Risque lié à la perte d'intégrité de la couverture (fracturation / réactivation de failles mineures / fractures)

Multiple risks géomécaniques

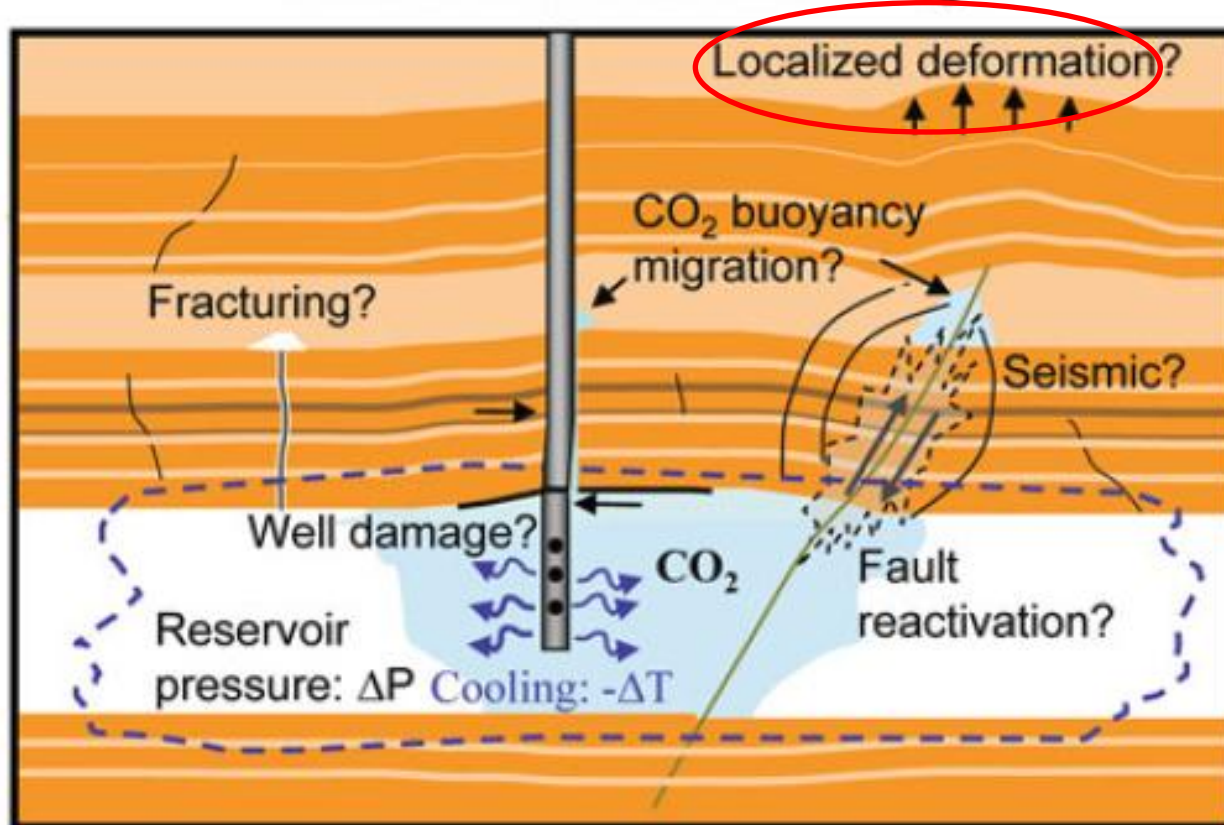
Unwanted mechanical changes



Risque lié à la réactivation de failles majeures et possible sismicité induite

Multiple risks géomécaniques

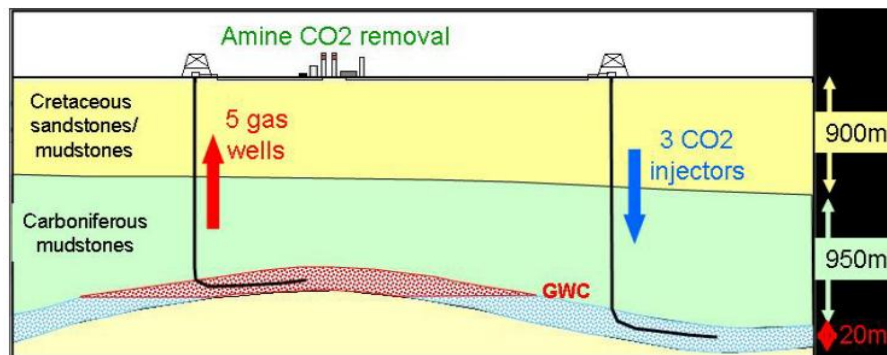
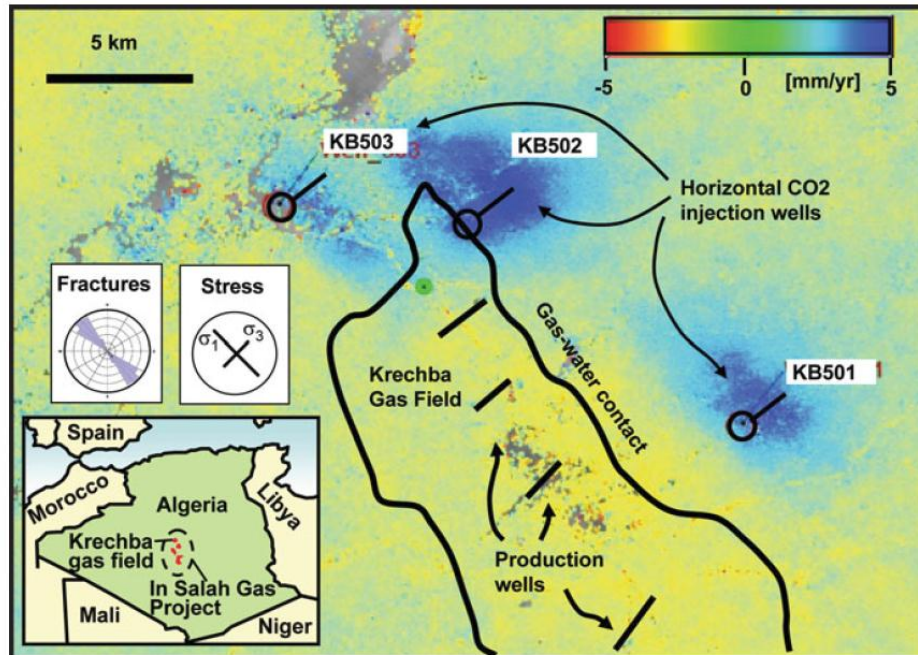
Unwanted mechanical changes



Risque de surrection des terrains

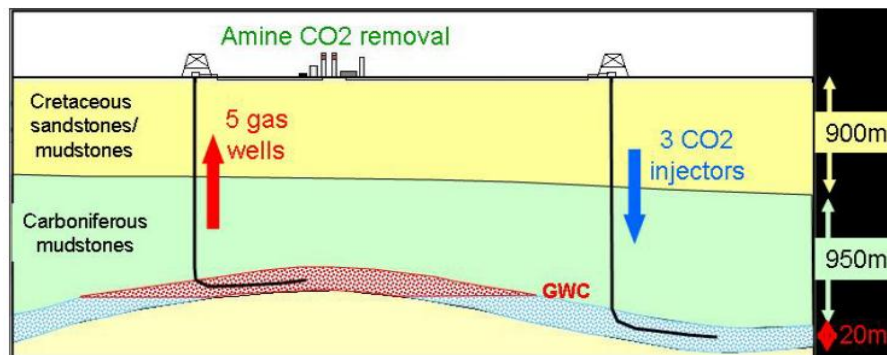
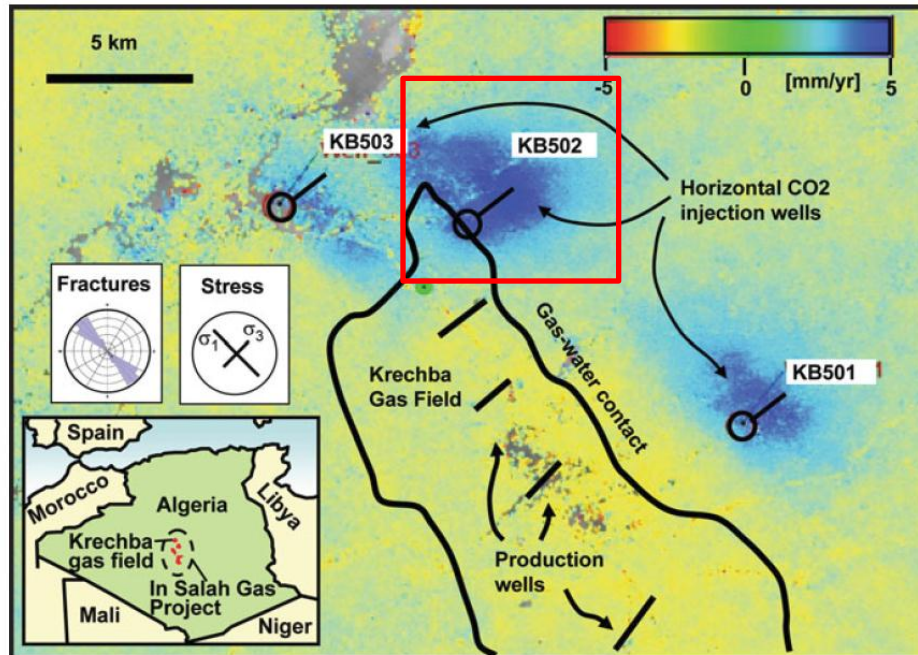
Exemple site de stockage de CO2 à In-Salah (Algérie)

- Données InSAR (TRE, période d'injection 2004-2007)
- Fracture orientation (Ringrose 2010)
- Stress orientation (Darling 2006)

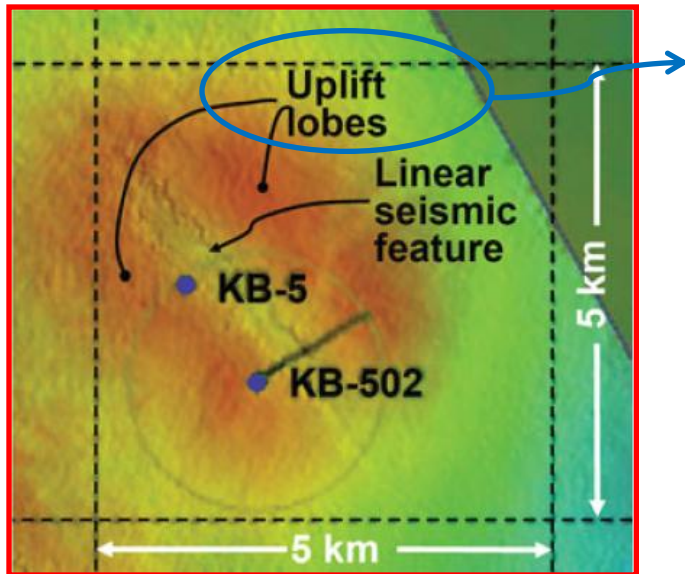


Exemple site de stockage de CO2 à In-Salah (Algérie)

- Données InSAR (TRE, période d'injection 2004-2007)
- Fracture orientation (Ringrose 2010)
- Stress orientation (Darling 2006)

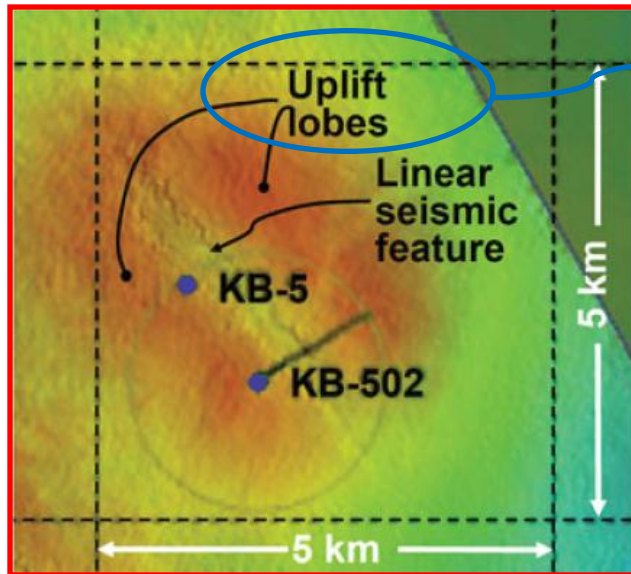


Exemple site de stockage de CO2 à In-Salah (Algérie)

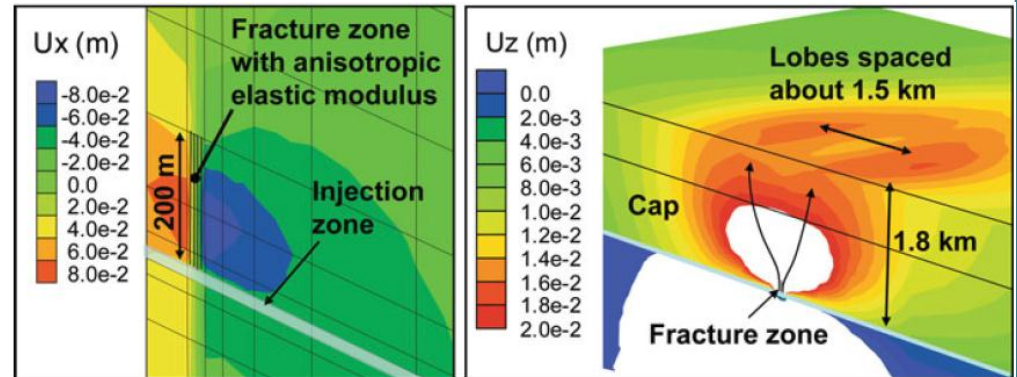


Données InSAR MDA & Pinnacle tech. (Wright 2011)

Exemple site de stockage de CO₂ à In-Salah (Algérie)



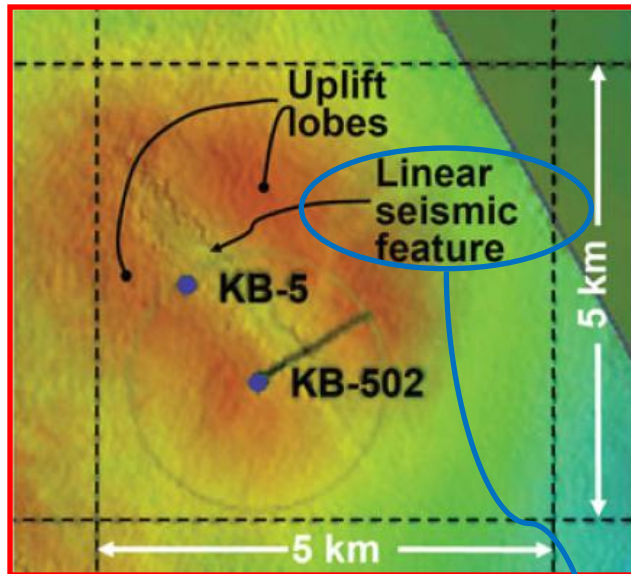
Possible explication: zone fracturée



Rutqvist et al. 2011

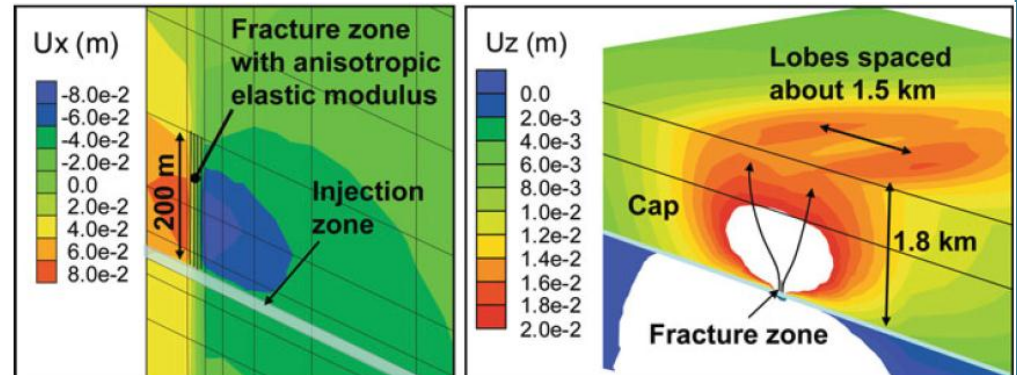
Données InSAR MDA & Pinnacle tech. (Wright 2011)

Exemple site de stockage de CO₂ à In-Salah (Algérie)



Données InSAR MDA & Pinnacle tech. (Wright 2011)

Possible explication: zone fracturée



Rutqvist et al. 2011

Campagne sismique: ouverture d'une zone fracturée, largeur ~ 100m ? (Gibson-Poole and Raikes, 2010)

Réactivation de faille, ...

un sujet « **récurrent** » des activités d'extraction / injection

- > Exploitation des hydrocarbures
- > Stockage saisonnier de gaz naturel
- > Géothermie profonde
- > ...

Réactivation de faille, ...

un sujet « **récurrent** » des activités d'extraction / injection

- > Exploitation des hydrocarbures
- > Stockage saisonnier de gaz naturel
- > Géothermie profonde
- > ...

Les **caractéristiques** du stockage de CO₂ amènent des **questions**

- de natures similaires
- ou nouvelles

Caractéristique 1: le multiphasique

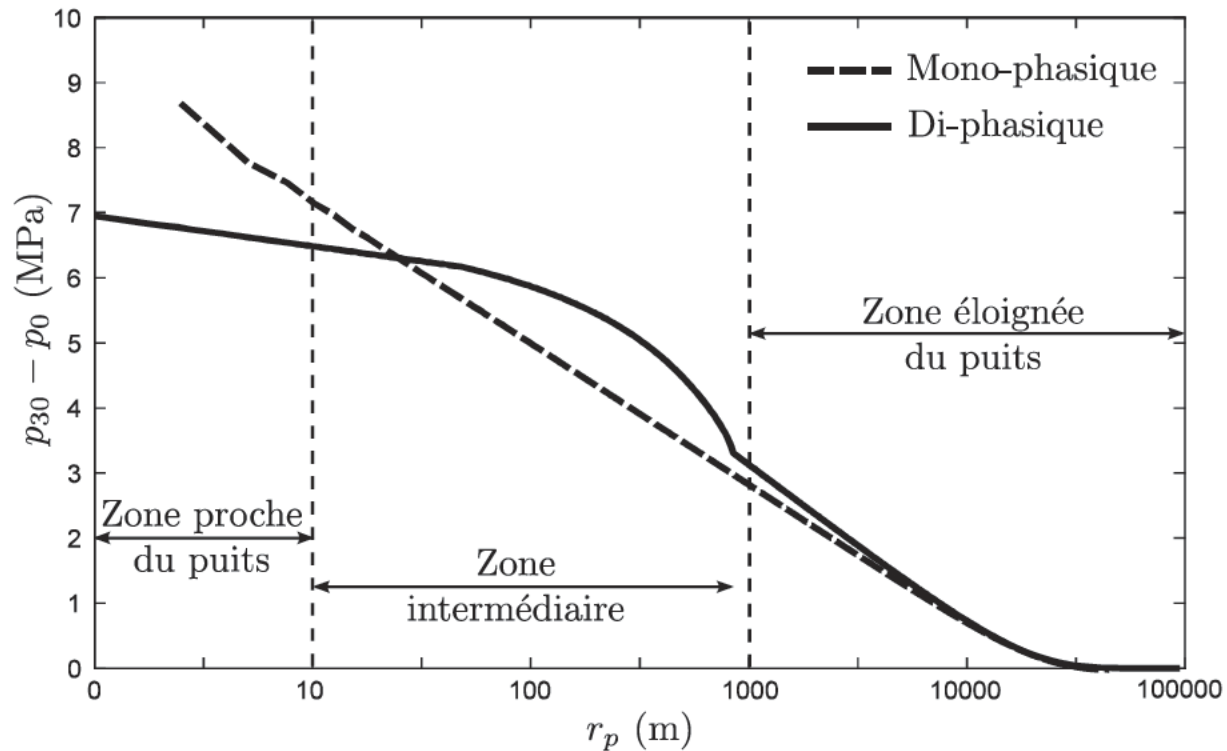
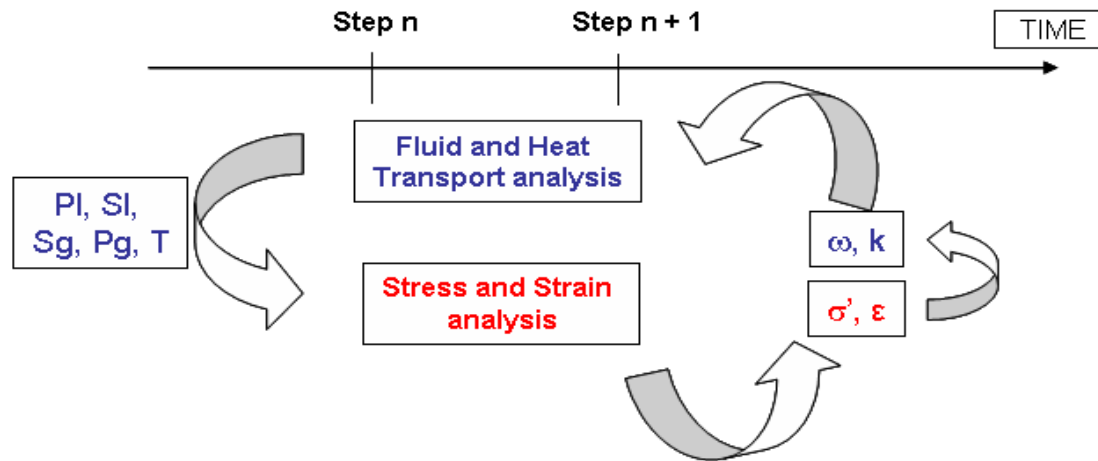


FIG. 5.8 : Evolution du niveau de pression avec le logarithme de la distance au puits après 30 ans de chargement.

Caractéristique 1: le multiphasique

Un outil possible : le chainage séquentiel



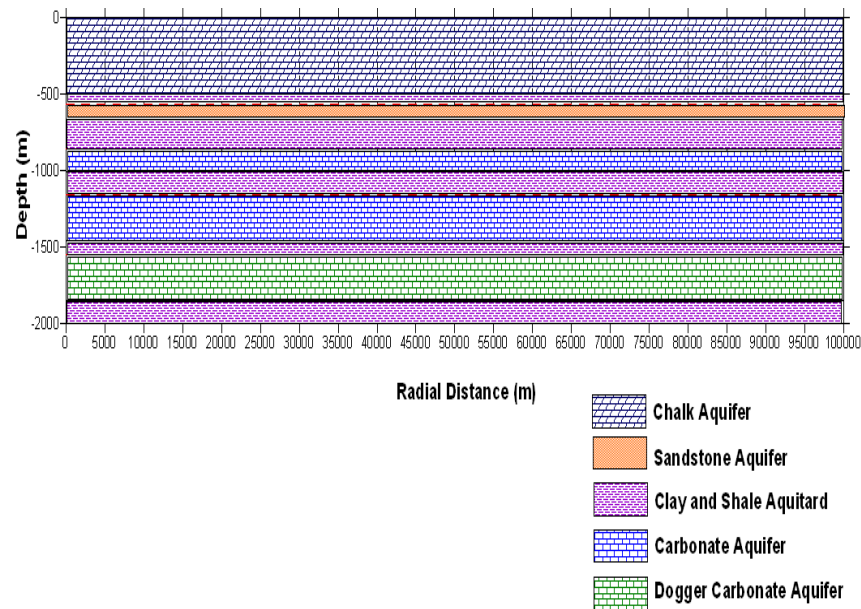
> Fluid and Heat Transport analysis

- Tough2 (Pruess et al., 1999)
- Fluid property module ECO2N of water–NaCl–CO₂ mixtures (Pruess, 2005)

> Stress and Strain analysis

- Finite element thermo-hydro-mechanical calculation code : Code_Aster® (e.g. Chavant *et al.*, 2002)

Exemple: injection dans le bassin de Paris (idéalisé)



11 couches; Extension 100 kms,
Prof 2000m; >99 variables d'entrée

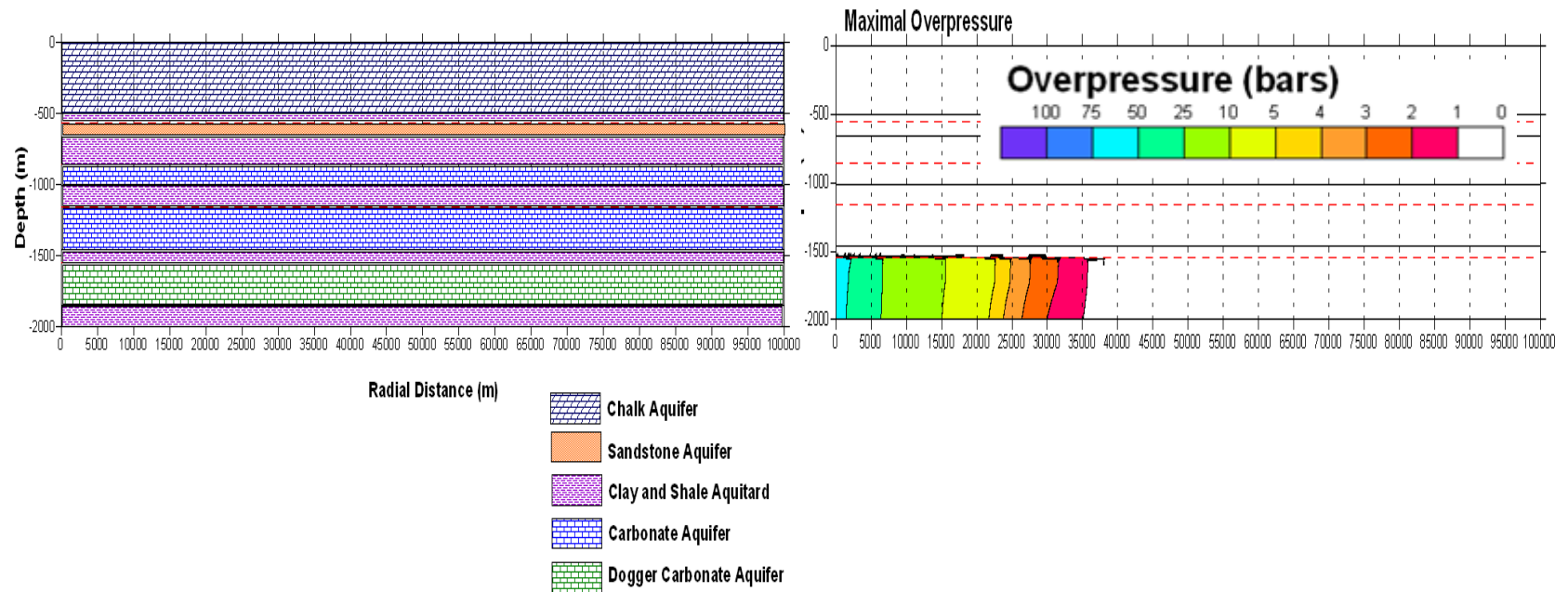
→ Maillage H: > 15000 elts

→ Maillage M: > 30000 elts

Injection 10ans, 10 Mt/an

→ Temps calcul 6-12 hrs

Exemple: injection dans le bassin de Paris (idéalisé)



11 couches; Extension 100 kms,
Prof 2000m; >99 variables d'entrée

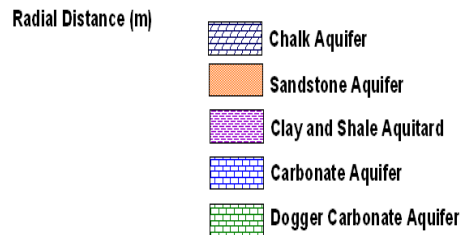
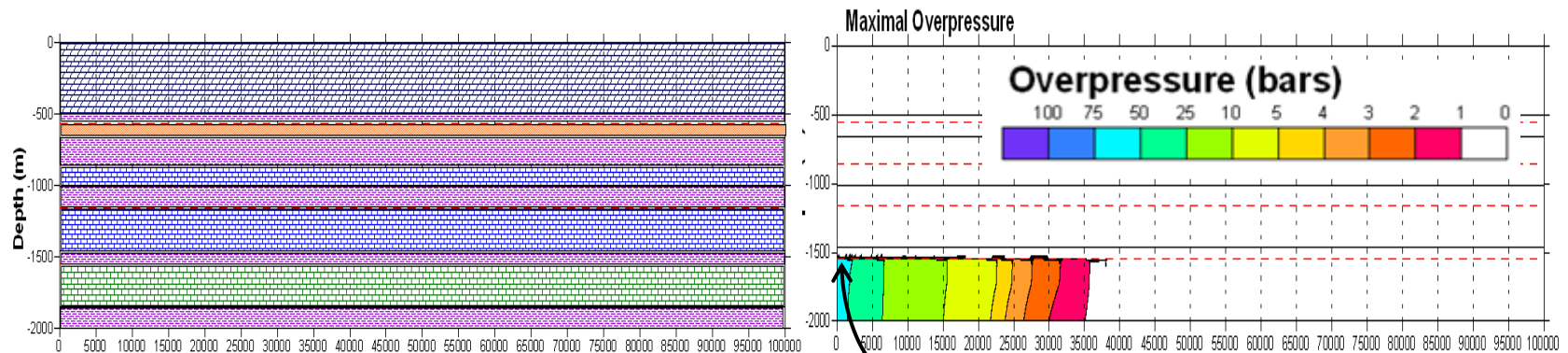
→ Maillage H: > 15000 elts

→ Maillage M: > 30000 elts

Injection 10ans, 10 Mt/an

→ Temps calcul 6-12 hrs

Exemple: injection dans le bassin de Paris (idéalisé)



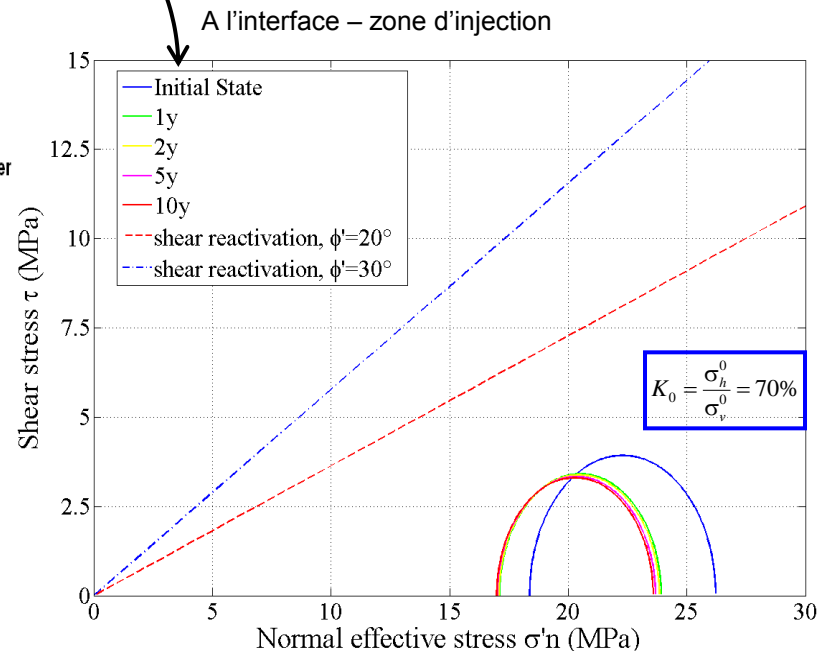
11 couches; Extension 100 kms,
Prof 2000m; >99 variables d'entrée

→ Maillage H: > 15000 elts

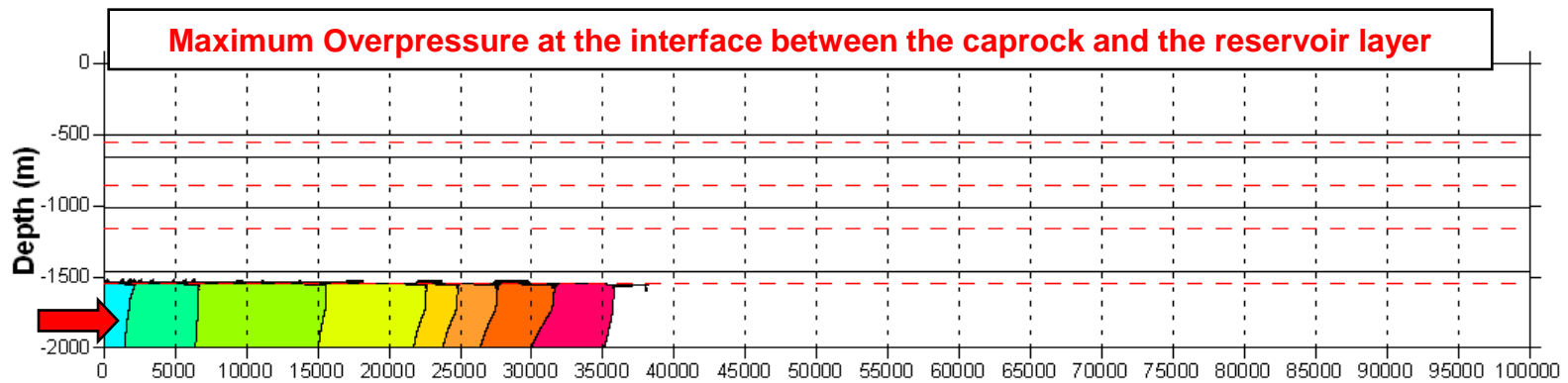
→ Maillage M: > 30000 elts

Injection 10ans, 10 Mt/an

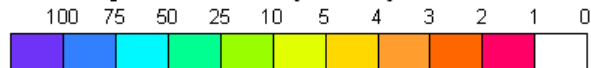
→ Temps calcul 6-12 hrs



Caractéristique 2: l'étendue spatiale

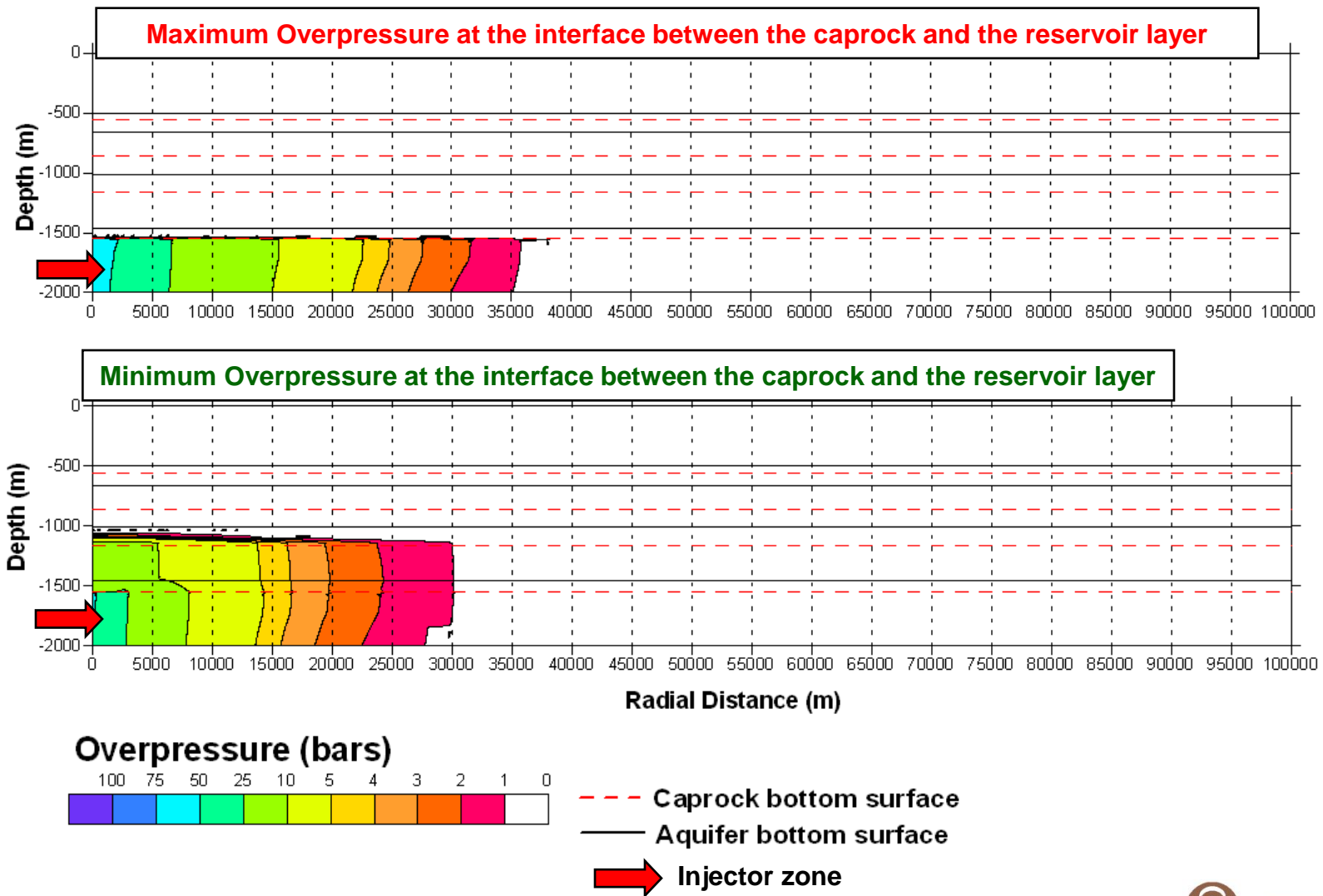


Overpressure (bars)



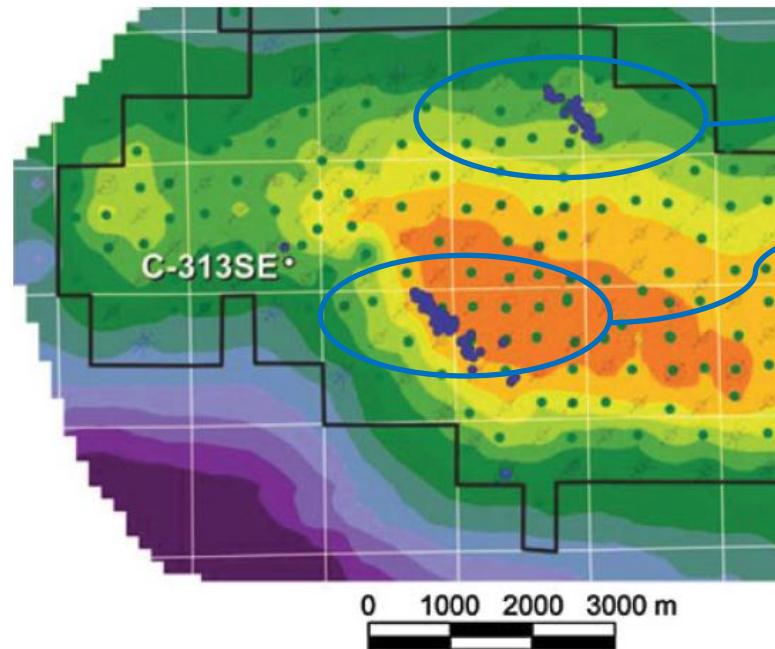
- - - Caprock bottom surface
- Aquifer bottom surface
- ➔ Injector zone

Caractéristique 2: l'étendue spatiale



Caractéristique 2: l'étendue spatiale

→ Problème de sismicité induite **loin de la zone d'injection**



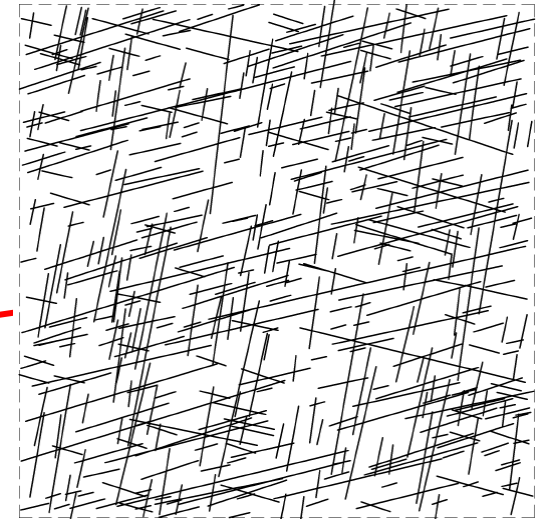
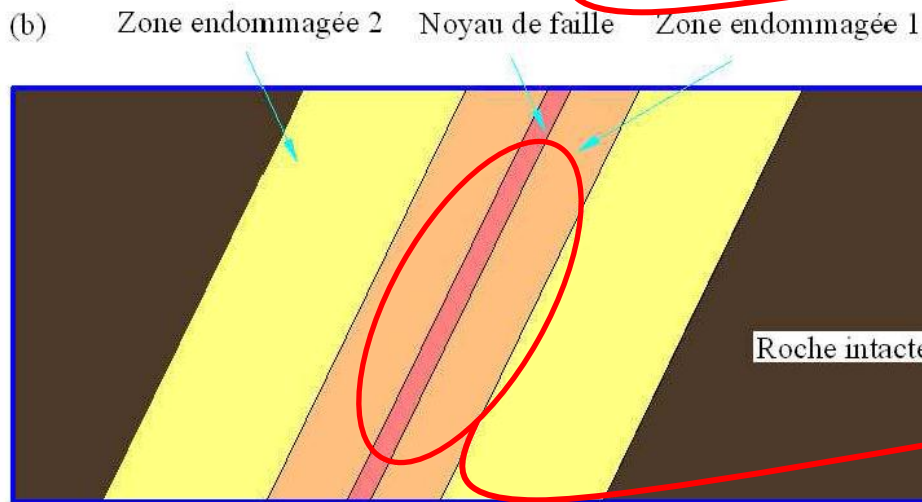
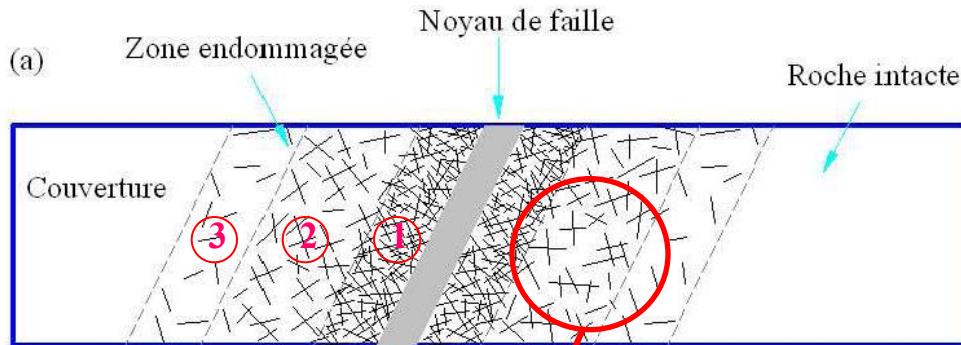
Evts microsismiques en dehors de la zone d'injection

- cluster
- Magnitude -1 à 0
- Activité max 10 evts / jour
- Alignement sur les failles ?

**Observations sur le site
EOR Aneth (Utah)**

Fig. 6 Structural contour map of the Aneth reservoir (Utah) showing microseismic event locations (*blue dots*) recorded in a passive seismic array. Southern cluster interpreted to be related to stress-induced fracturing ahead of CO₂ front, northern cluster interpreted as stress induced fault reactivation or stress arching in the overburden (Zhou et al. 2010; Rutledge et al. 2009)

Influence de la structure de la faille

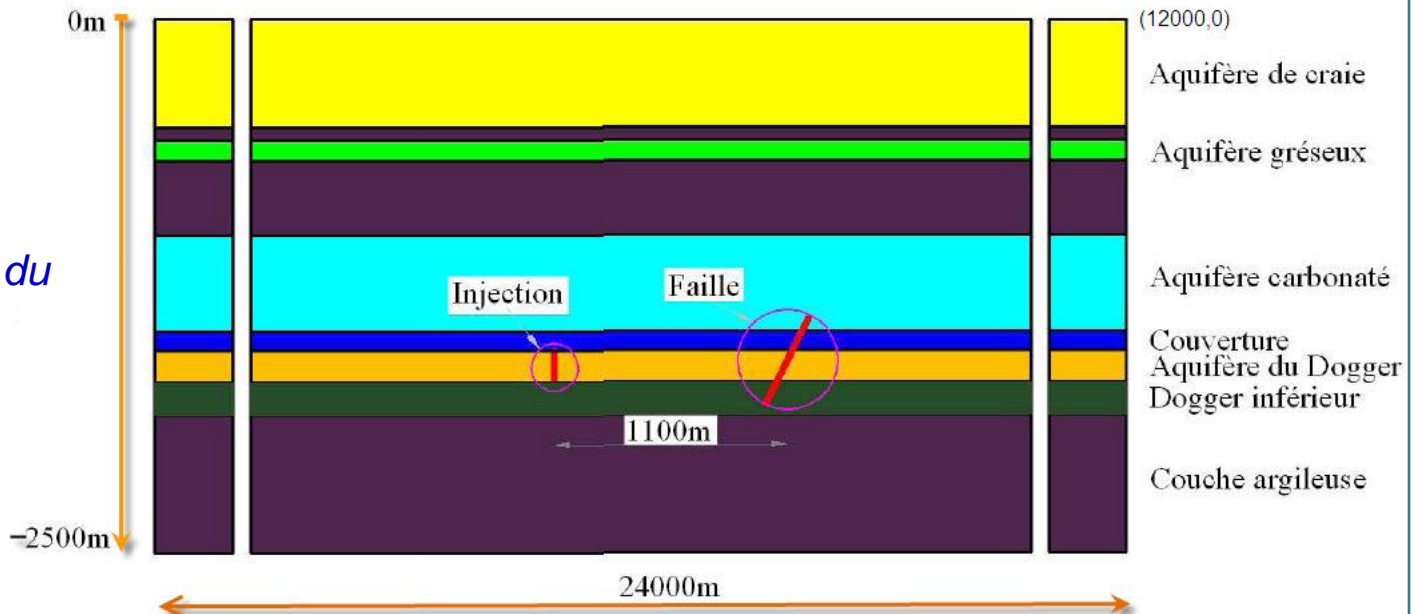


Distribution statistique des fissures dans la zone endommagée

Matériaux argileux imperméable

Influence de la structure de la faille

Site géologique
similaire à celui du
Bassin Parisien

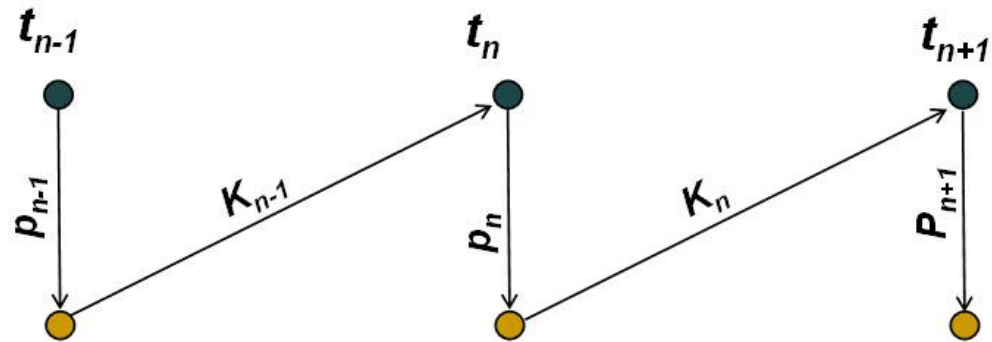


Calcul hydromécanique global

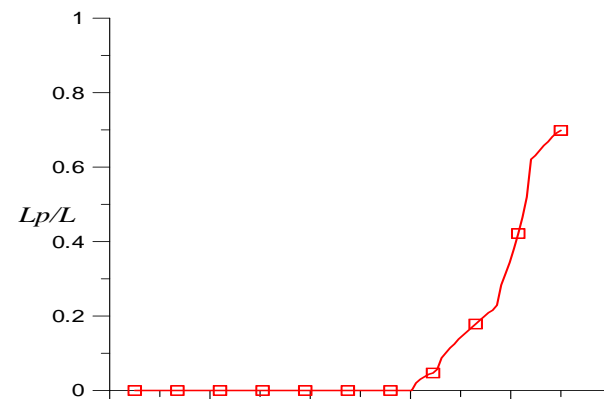
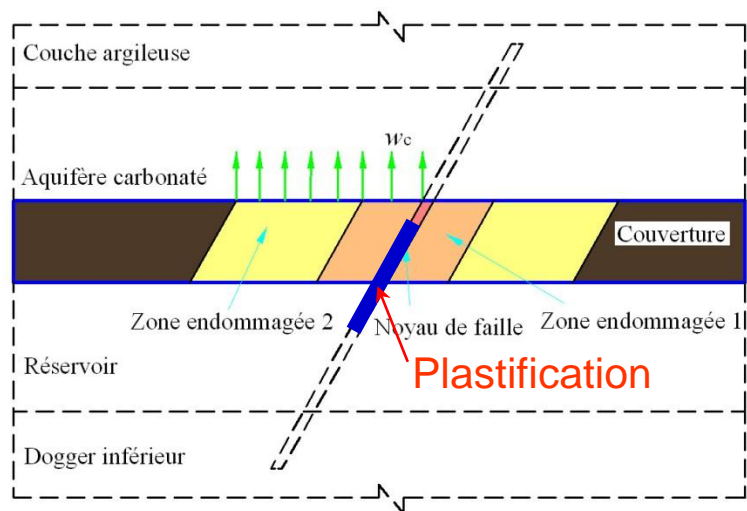
Code_Aster - HM

Calcul de la perméabilité
des zones fracturées

PermSIE – Mise à jour de K



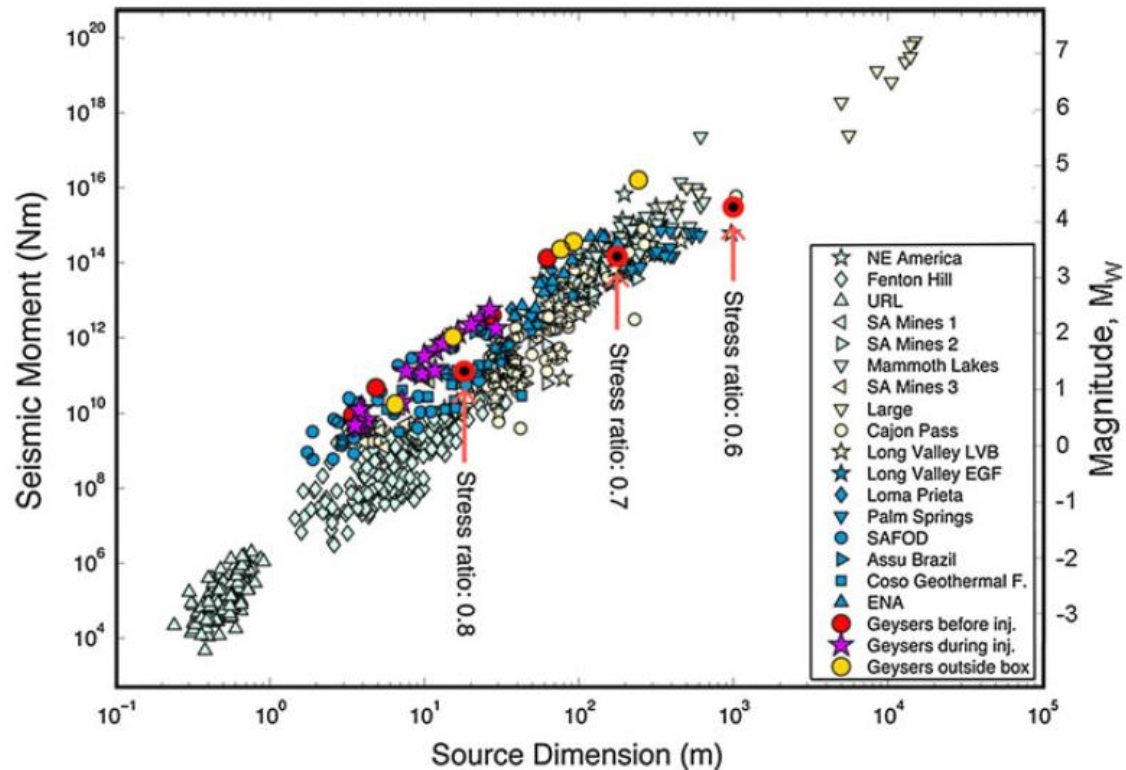
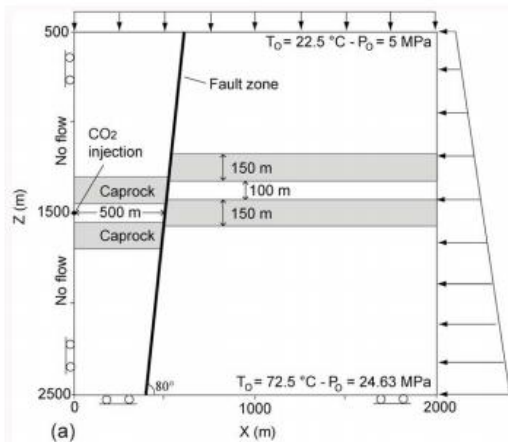
Influence de la structure de la faille



Evolution de la taille de plastification vs P_{inj} (résultats préliminaires non publiés)

Caractéristique 2: l'étendue spatiale

➔ Problème de sismicité induite loin de la zone d'injection



Comparaison des evts simulés avec ceux naturels ou induits sur d'autres exploitations

Un sujet à débat...

Earthquake triggering and large-scale geologic storage of carbon dioxide

www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1202473109

Mark D. Zoback^{a,1} and Steven M. Gorelick^b

Departments of ^aGeophysics and ^bEnvironmental Earth System Science, Stanford University, Stanford, CA 94305

The risk of induced seismicity: is cap-rock integrity on shaky ground?

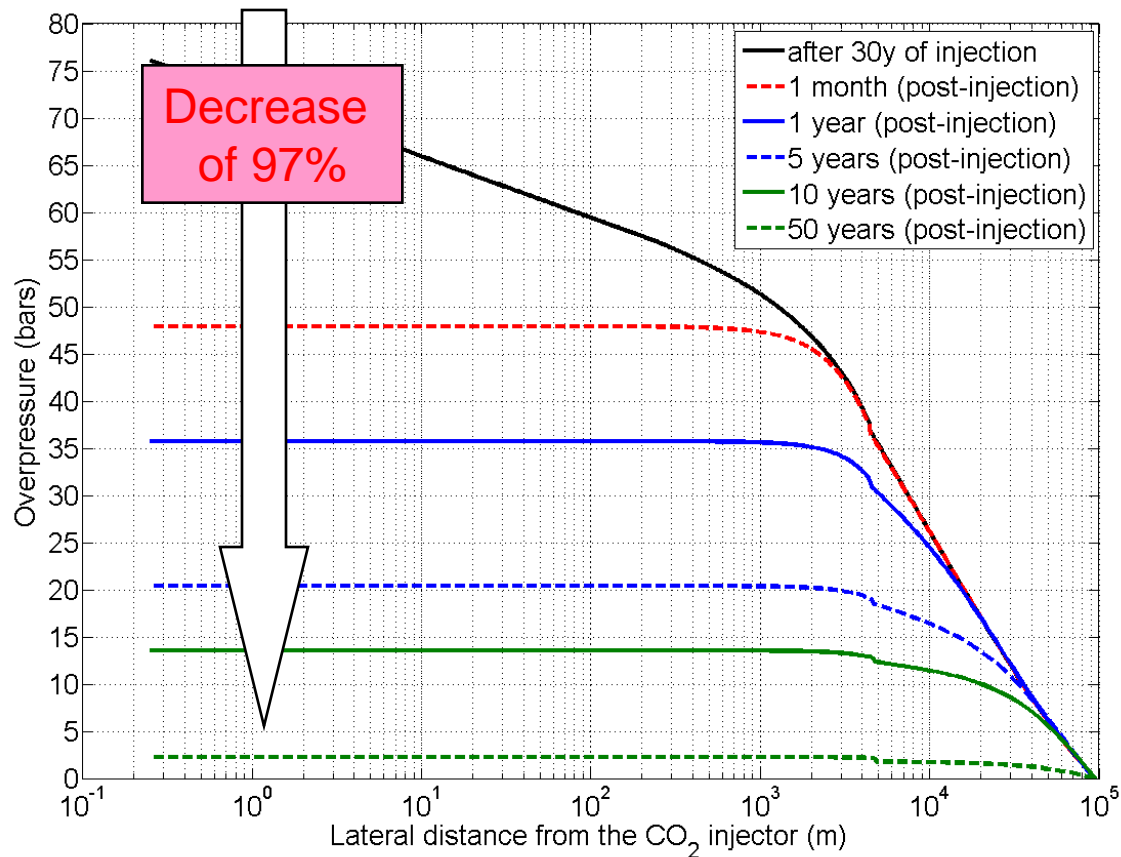
Curtis M. Oldenburg,



In Review

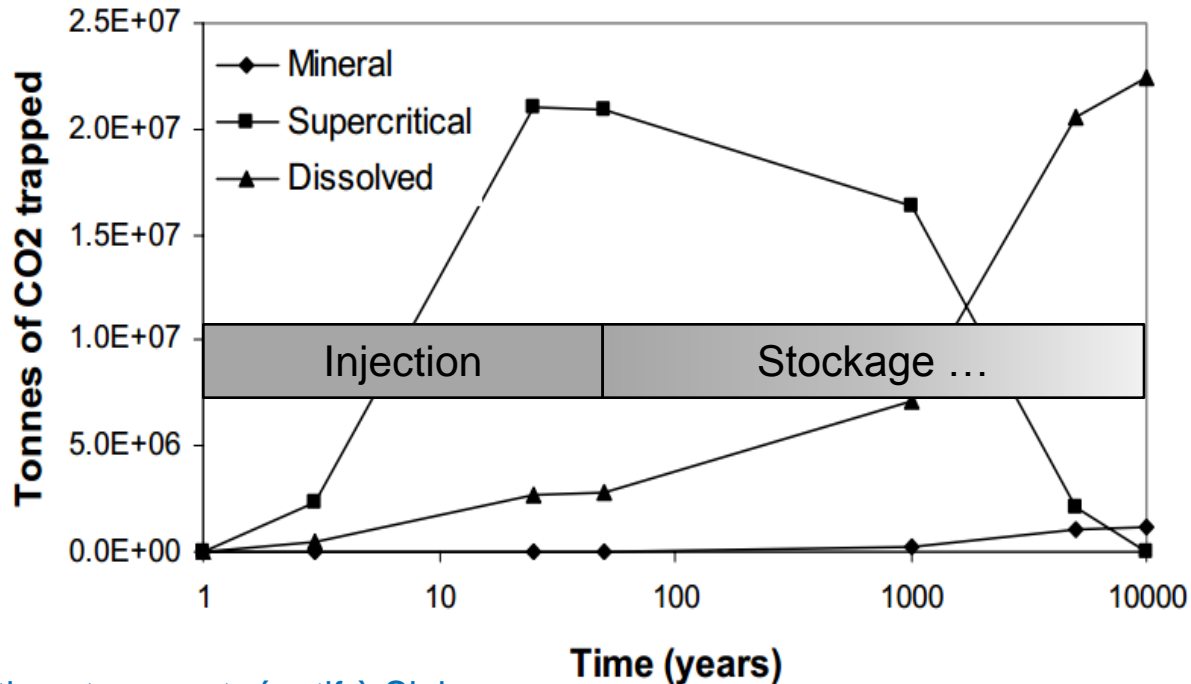
1. No geologic evidence that seismicity causes fault leakage that would render large-scale carbon capture and storage unsuccessful.
R. Juanes, B. H. Hager, and H. J. Herzog, Submitted for publication.

Caractéristique 3: le temps



1D model of 1 Mt/y CO₂ injection in the Dogger (Paris basin)

Caractéristique 3: le temps



Simulations transport réactif à Sleipner
(Mer du Nord),
Audigane et al. 2007

→ CO₂(aq) avec l'eau forme une fluide acide → **Dissolution / Précipitation des minéraux**

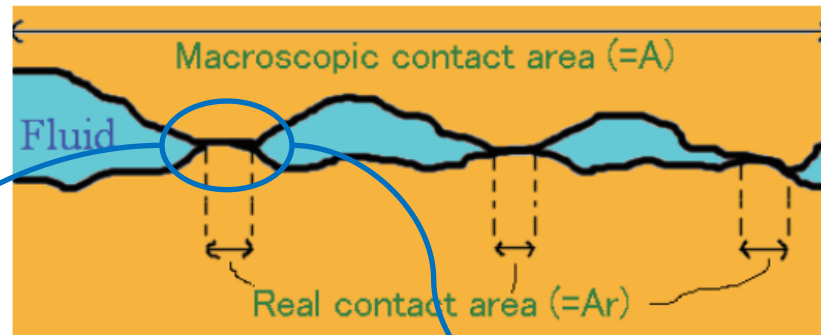
Caractéristique 3: le temps et la réactivité du CO₂ (aq)

- Plusieurs processus chimiques peuvent avoir un impact mécanique (dégradation) en **compétition, tps caractéristiques différents**

Caractéristique 3: le temps et la réactivité du CO₂ (aq)

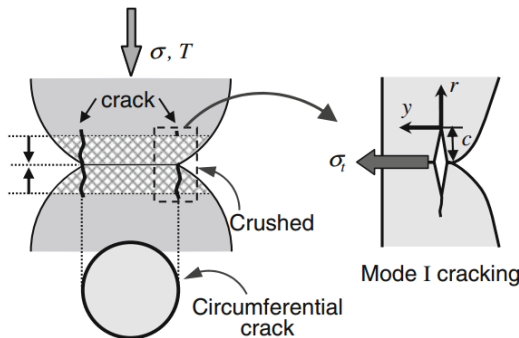
- Plusieurs processus chimiques peuvent avoir un impact mécanique (dégradation) en **compétition**, tps caractéristiques différents

Exemple dans les fractures:

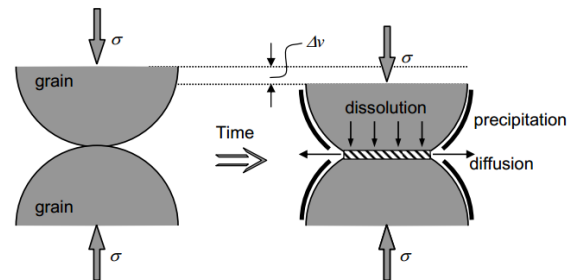


Mesure sur fracture (syst. Siliceux)
Yasuhara et Elsworth (2008)

Corrosion ss contraintes



Dissolution ss pression



Et / Ou

ur une Terre durable



Caractéristique 3: le temps et la réactivité du CO₂ (aq)

- Plusieurs processus chimiques peuvent avoir un impact mécanique (dégradation) en **compétition, tps caractéristiques différents**
 - Processus de **dissolution sous pression**
 - Influence sur la **propagation sous-critique** des fractures ;

Qqs données sur les réservoirs en conditions « CO₂ » ...

Enhanced deformation of limestone and sandstone in the presence of high P_{co₂} fluids

JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 112, B05421, doi:10.1029/2006JB004637, 2007

Y. Le Guen,^{1,2} F. Renard,^{1,3} R. Hellmann,¹ E. Brosse,² M. Collombet,⁴
D. Tisserand,¹ and J.-P. Gratier¹

Influence of pore fluid salt content on compaction creep of calcite aggregates in the presence of supercritical CO₂

Emilia Liteanu*, Christopher J. Spiers Chemical Geology 265 (2009) 134–147

Influence of CO₂ on the long-term chemomechanical behavior of an oolitic limestone

D. Grgic¹ JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 116, B07201, doi:10.1029/2010JB008176, 2011

Caractéristique 3: le temps et la réactivité du CO₂ (aq)

- Plusieurs processus chimiques peuvent avoir un impact mécanique (dégradation) en **compétition**, tps caractéristiques différents
 - Processus de **dissolution sous pression**
 - Influence sur la **propagation sous-critique** des fractures ;

Qqs données sur les réservoirs en conditions « CO₂ » ...

Enhanced deformation of limestone and sandstone in the presence of high P_{co₂} fluids JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 112, B05421, doi:10.1029/2006JB004637, 2007

Y. Le Guen,^{1,2} F. Renard,^{1,3} R. Hellmann,¹ E. Brosse,² M. Collombet,⁴
D. Tisserand,¹ and J.-P. Gratier¹

Influence of pore fluid salt content on compaction creep of calcite aggregates in the presence of supercritical CO₂

Emilia Liteanu*, Christopher J. Spiers Chemical Geology 265 (2009) 134–147

Influence of CO₂ on the long-term chemomechanical behavior of an oolitic limestone

D. Grgic¹ JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 116, B07201, doi:10.1029/2010JB008176, 2011

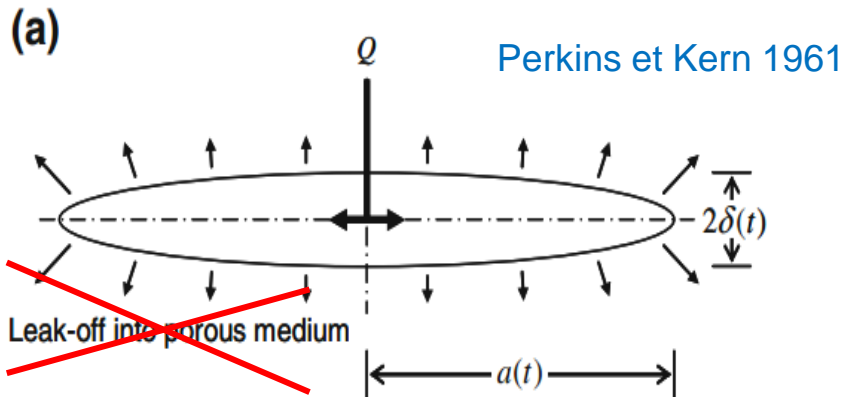
Perspective: améliorer la connaissance en particulier dans les fractures

Caractéristique 3: le temps et la réactivité du CO₂ (aq)

- Plusieurs processus chimiques peuvent avoir un impact mécanique (dégradation) en **compétition, tps caractéristiques différents**
 - Influence sur la **propagation sous-critique** des fractures ;
 - Processus de **dissolution sous pression**
 - **Pression de cristallisation** → fracturation?
 - **Modification des propriétés** (e.g. résistances ↓)
 - ...

Perspective: améliorer la connaissance en particulier dans les fractures

Ordres de grandeurs (très simplifié!)



Sack 1946; Williams 1984

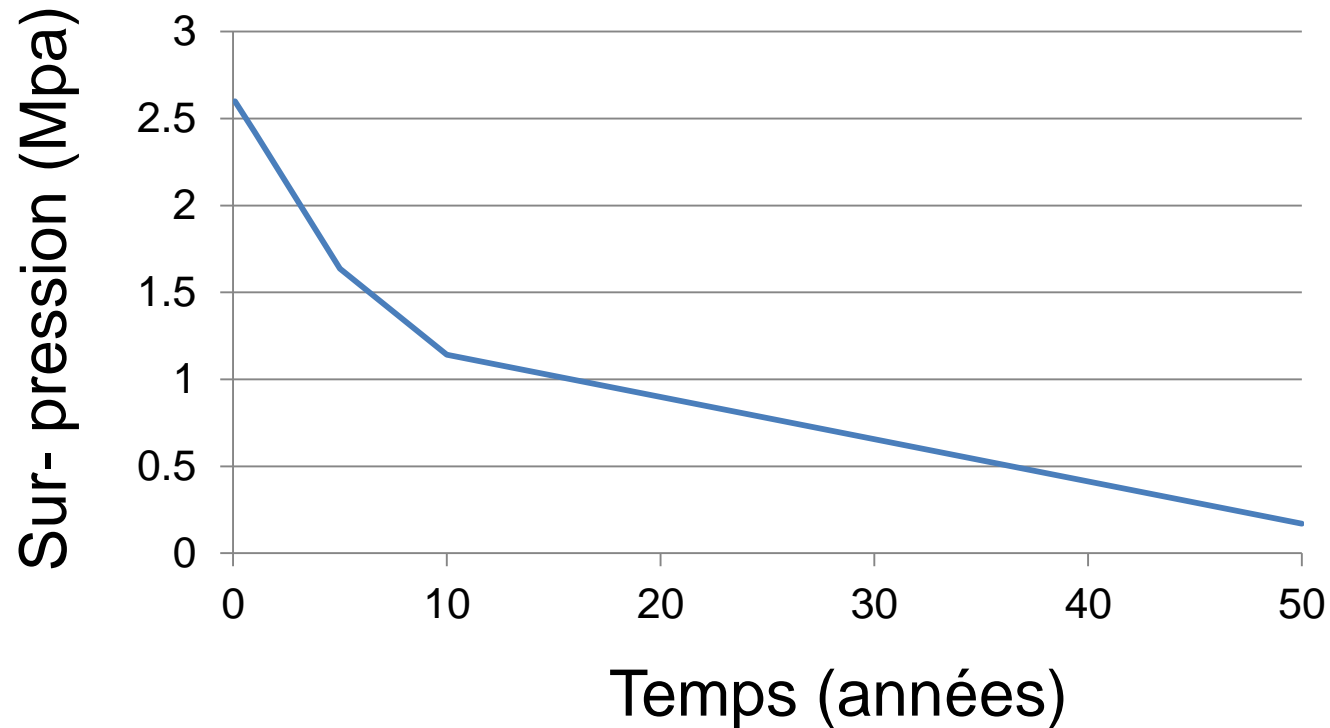
$$G = P_{\max}^2 \frac{2(1-\nu^2)a}{\pi E} \quad K_{IC}^2 = E.G$$

P_{\max} : chargement uniforme nécessaire pour la propagation

K_{IC} ténacité; G énergie (critique) spécifique de surface
 E, ν modules élastiques

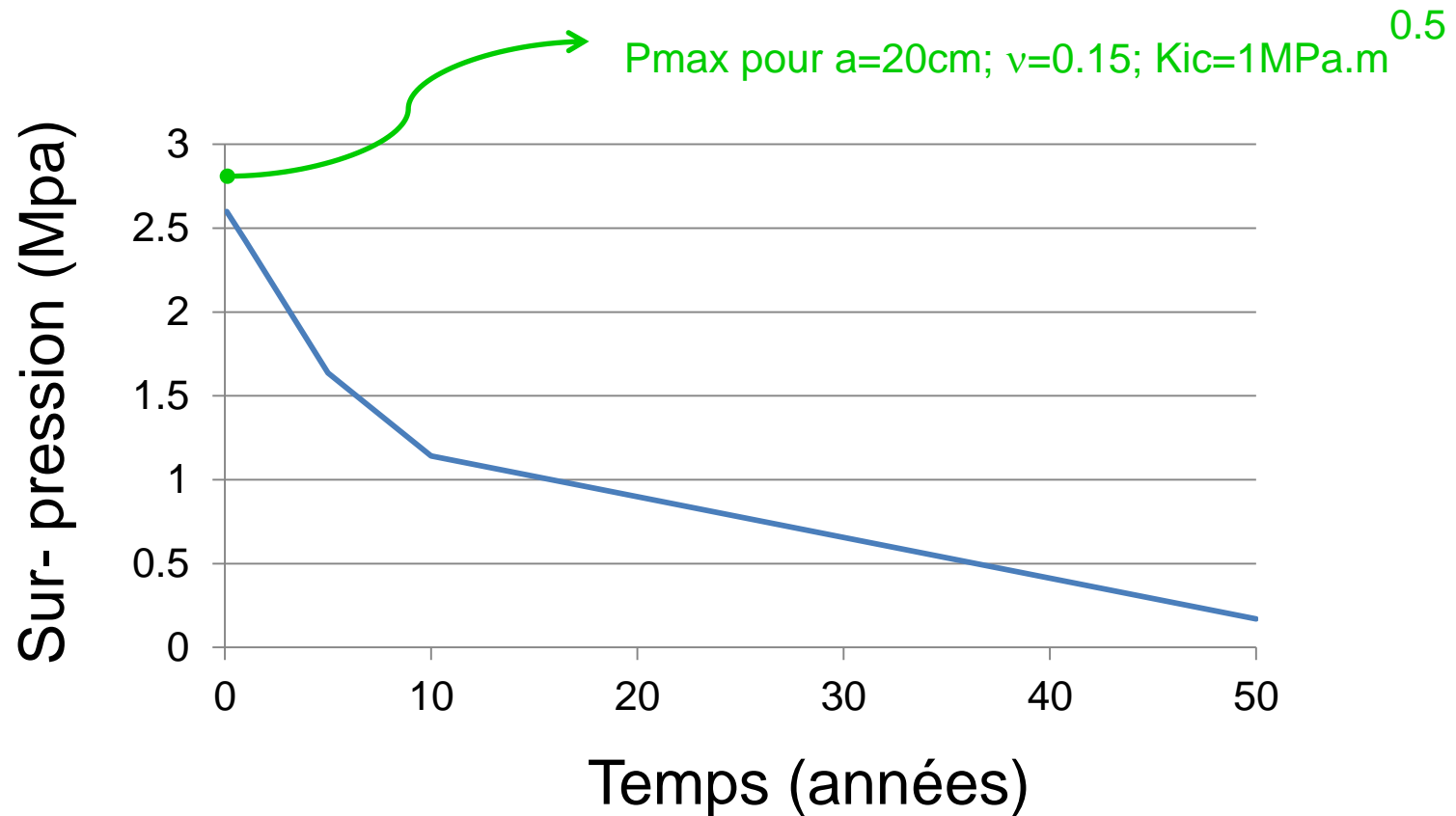
Ordres de grandeurs (très simplifié!)

Evolution de la surpression en phase de stockage à 10 kms du point d'injection



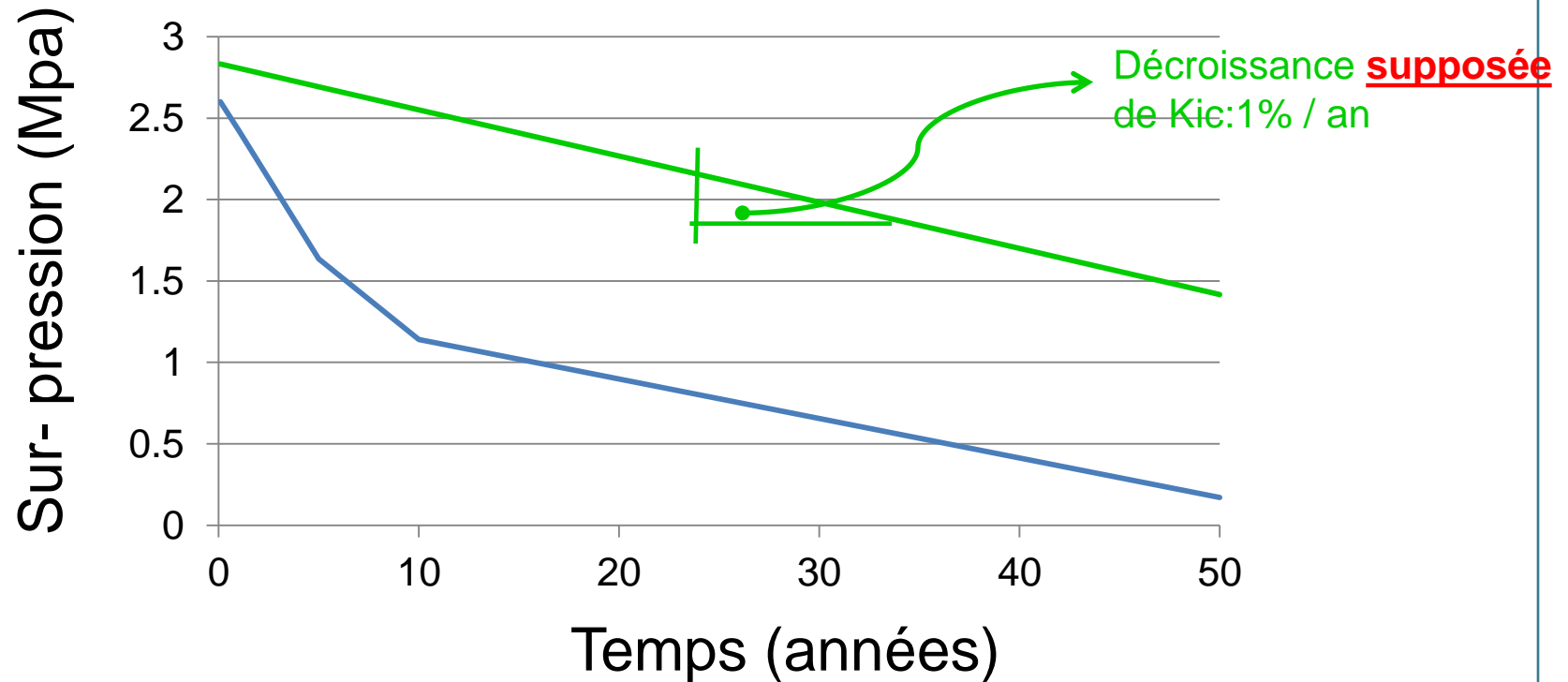
Hypothèse (discutable): sur-pression = chargement uniforme au sein de la fracture

Ordres de grandeurs (très simplifié!)



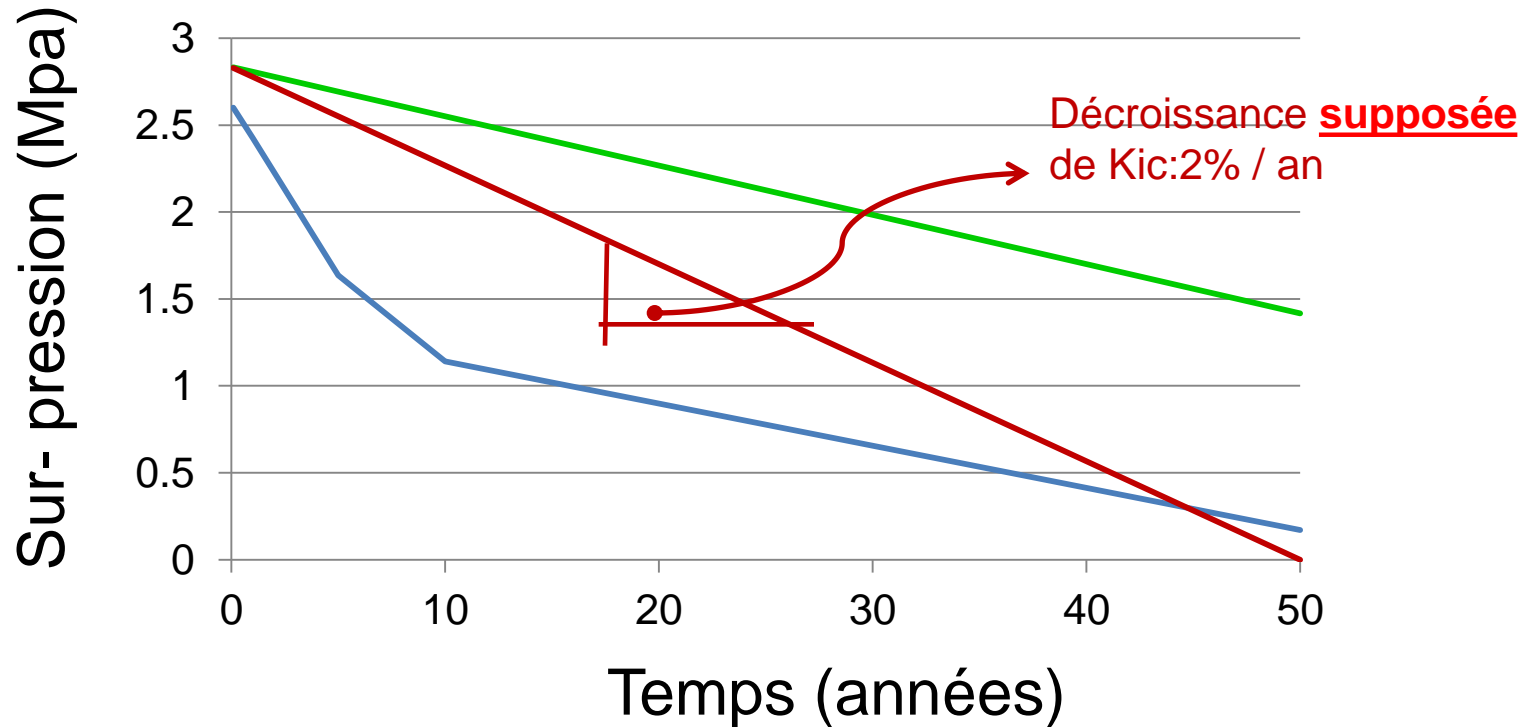
$$G = P_{\max}^2 \frac{2(1-\nu^2)a}{\pi E} \quad K_{IC}^2 = E.G$$

Ordres de grandeurs (très simplifié!)



$$G = P_{\max}^2 \frac{2(1-\nu^2)a}{\pi E} \quad K_{IC}^2 = E.G$$

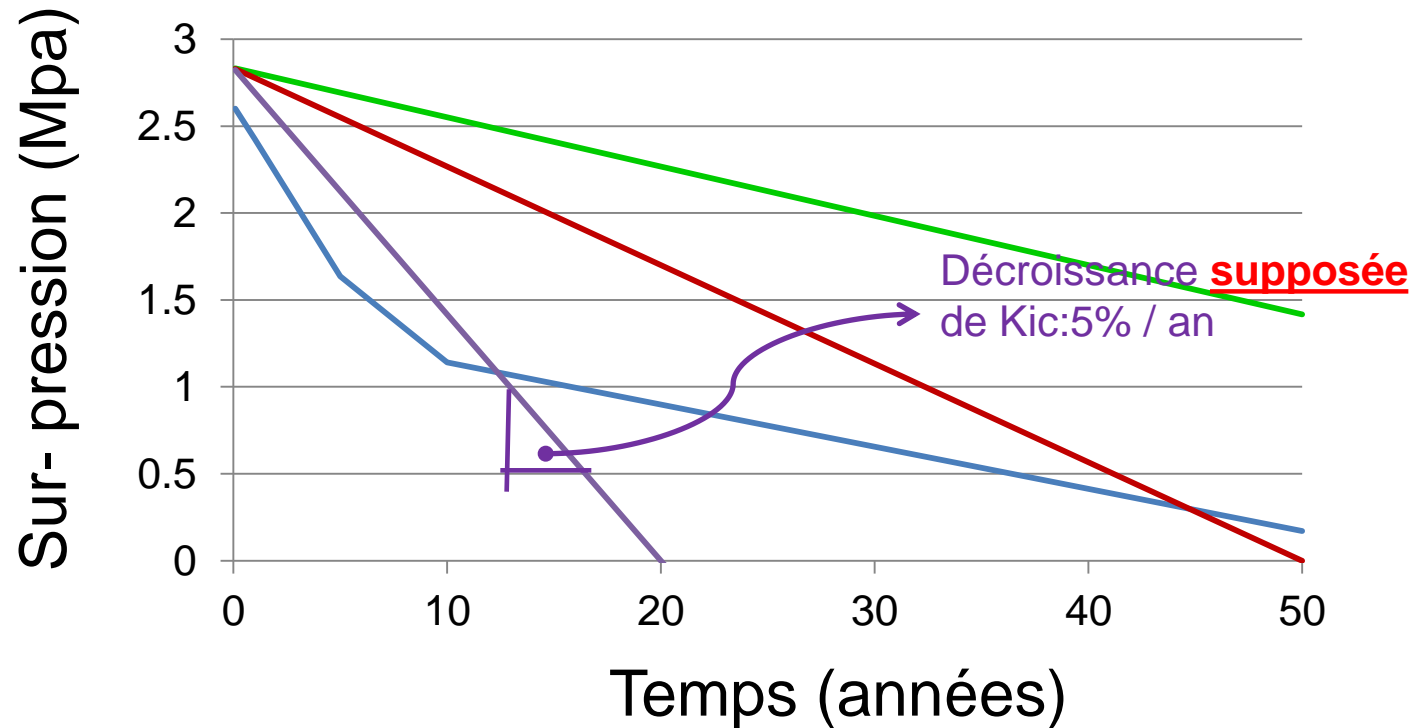
Ordres de grandeurs (très simplifié!)



$a=20\text{cm}$; $\nu=0.15$; $K_{ic}(t=0)=1\text{MPa.m}^{0.5}$

$$G = P_{\max}^2 \frac{2(1-\nu^2)a}{\pi E} \quad K_{IC}^2 = E.G$$

Ordres de grandeurs (très simplifié!)



$a=20\text{cm}; \nu=0.15; K_{IC}(t=0)=1\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$

$$G = P_{\max}^2 \frac{2(1-\nu^2)a}{\pi E} \quad K_{IC}^2 = E.G$$

L'évaluation du risque de réactivation de faille

Un objet complexe

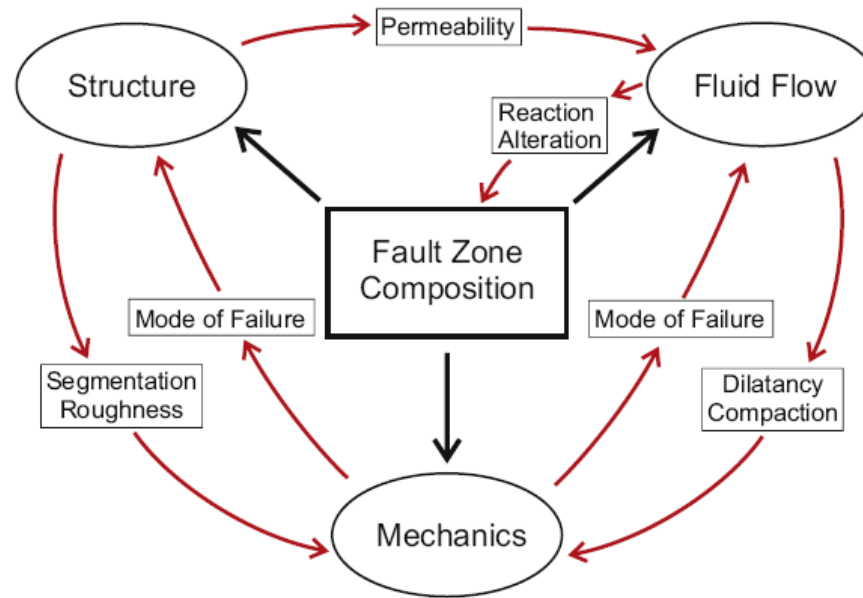


Fig. 1. Flow diagram showing inter-relationships among the three main topics of structure, mechanics and fluid flow. Mode of failure refers to whether or not seismic slip occurs.

Faulkner et al. 2010

L'évaluation du risque de réactivation de faille

Un objet complexe

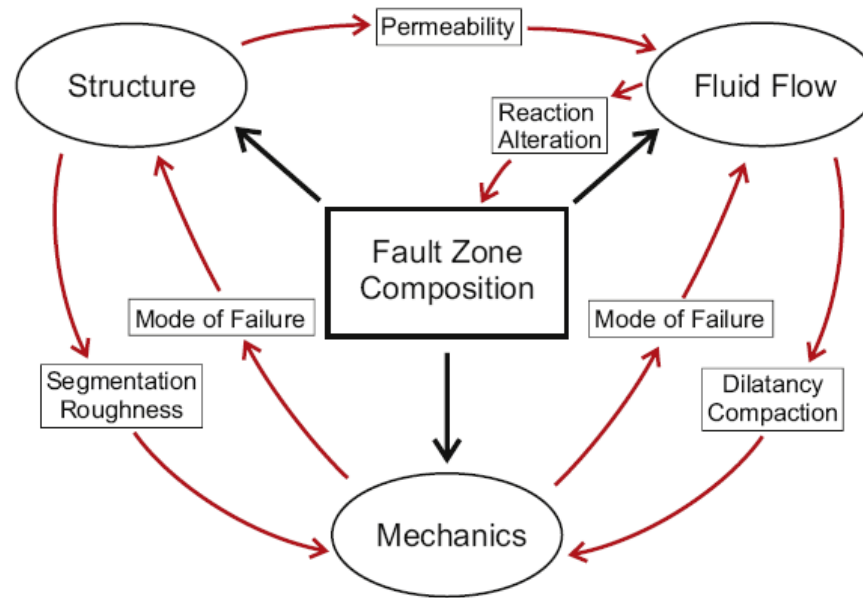


Fig. 1. Flow diagram showing inter-relationships among the three main topics of structure, mechanics and fluid flow. Mode of failure refers to whether or not seismic slip occurs.

Faulkner et al. 2010

Bonnes avancées en **phase d'injection** (confrontation simulations versus observations en particulier à In-Salah, Weyburn)

Perspective

Un objet complexe

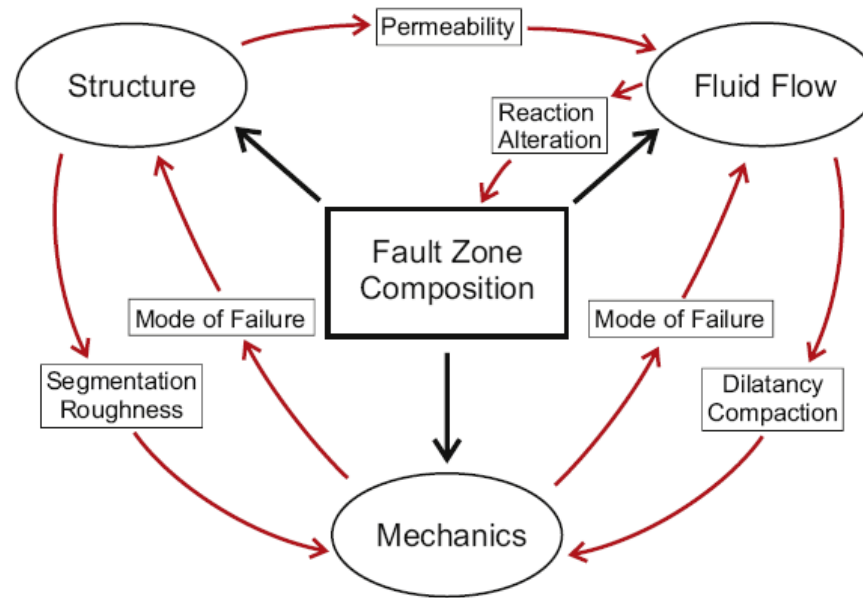


Fig. 1. Flow diagram showing inter-relationships among the three main topics of structure, mechanics and fluid flow. Mode of failure refers to whether or not seismic slip occurs.

Faulkner et al. 2010

Champ ouvert: le risque à long terme de réactivation de failles liés aux perturbations (pression - réactivité) des stockages de CO₂ ?

Merci de votre attention !

Remerciements: **ANR-FISIC**



ANR- 11-0003-01
Prg SEED 2011
2012-2015

www.anr-fisic.fr



Références

- Pascal Audigane, Irina Gaus, Isabelle Czernichowski-Lauriol, Karsten Pruess and Tianfu Xu (2007) Two-dimensional reactive transport modeling of CO₂ injection in a saline aquifer at the Sleipner site, North Sea. *AJS Online* September 2007 vol. 307 no. 7 974-1008
- Stefan Bachu, Legal and regulatory challenges in the implementation of CO₂ geological storage: An Alberta and Canadian perspective, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Volume 2, Issue 2, April 2008, Pages 259-273
- Cappa F, Rutqvist J (2011) Impact of CO₂ geological sequestration on the nucleation of earthquakes. *Geophys Res Lett* 38:L17313
- Gibson-Poole CM, Raikes S (2010) Enhanced understanding of CO₂ storage at Krechba from 3D seismic. In: *Proceedings of 9th annual conference on carbon capture and sequestration*, Pittsburgh, Pennsylvania, May 10–13, 2010
- GIEC (2005) - IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 p.
- Nicolas Guy, Darius Seyed, François Hild (2010) Hydro-mechanical modelling of geological CO₂ storage and the study of possible caprock fracture mechanisms. *Georisk* 4, 3 (2010) 110-117
- IEA (2009) - Technology Roadmap – Carbon Capture and Storage, IEA, Paris, 46 p.
- IEA-GHG (2007a) - IEA Greenhouse Gas R&D Programme. Role of Risk Assessment in Regulatory Framework for Geological Storage of CO₂: Feedback from Regulators and Implementers, Report 2007/2, 88 p.
- Perkins, T.K., Kern, L.R.: Widths of hydraulic fractures. *J. Pet. Technol.* 937–949 (1961)
- Rohmer J., Seyed D., Guy, N. (2009) Addressing caprock failure tendency in deep saline aquifers through large scale hydromechanical analysis – Application in the Paris Basin case, *International Conference on Deep Saline Aquifers for Geological*, rencontres de l'IFP, mai 2009. Storage of CO₂ and Energy
- Rohmer J., Seyed D., (2010) Coupled large scale hydromechanical modelling for caprock failure risk assessment of CO₂ storage in deep saline aquifers, *Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP*, 65(3), 503-517.
- Rutqvist J, Liu H-H, Vasco DW, Pan L, Kappler K, Majer E (2011) Coupled non-isothermal, multiphase fluid flow, and geomechanical modeling of ground surface deformations and potential for induced micro-seismicity at the In Salah CO₂ storage operation. *Energy Procedia* 4:3542–3549
- Rutqvist, J., (2012) The Geomechanics of CO₂ Storage in Deep Sedimentary Formations. *Geotech Geol Eng* (2012) 30:525–551
- Vu, M-N. (2012) Modélisation des écoulements dans les milieux poreux fissurés par la méthode des équations intégrales singulières. Thèse Paris-Est (directeur A. Pouya, encadrant D. Seyed)
- Yasuhara, H., and Elsworth, D. (2008) Compaction of a fracture moderated by competing roles of stress corrosion and pressure solution. *Pure and Appl. Geophys.*, Vol. 165, No. 7. pp. 1289 – 1306.
- Wright I (2011) In Salah CO₂ storage JIP lessons learned. 10th annual conference on carbon capture and sequestration, Pittsburgh, Pennsylvania, May 2–5, 2011