



Comité Français de Mécanique des Roches  
14 Mars 2019, CNAM, Paris



## SISMICITE INDUITE

# Activités humaines et déclenchement des séismes

**Jean Sulem, Ioannis Stefanou**

Laboratoire Navier-CERMES, Ecole des Ponts ParisTech, IFSTTAR, CNRS, Université Paris-Est,  
Marne-la-Vallée, France  
[jean.sulem@enpc.fr](mailto:jean.sulem@enpc.fr)



IFSTTAR



UNIVERSITÉ  
— PARIS-EST



European Research Council  
Established by the European Commission



CoQuake.com

# Quelques définitions

## Sismicité induite et sismicité naturelle

### Sismicité 'induite' et sismicité 'déclenchée'

***Sismicité induite*** : Les secousses sismiques sont dues partiellement ou entièrement à l'activité humaine

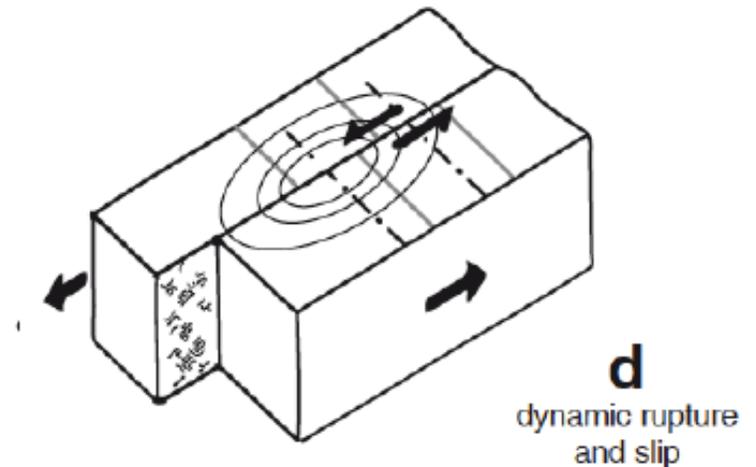
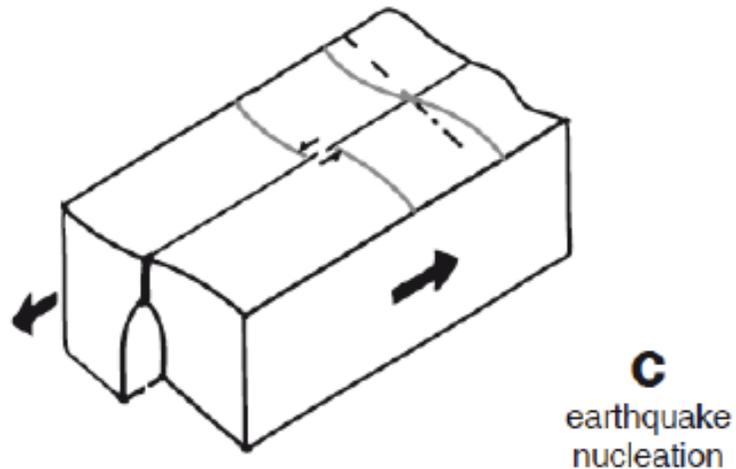
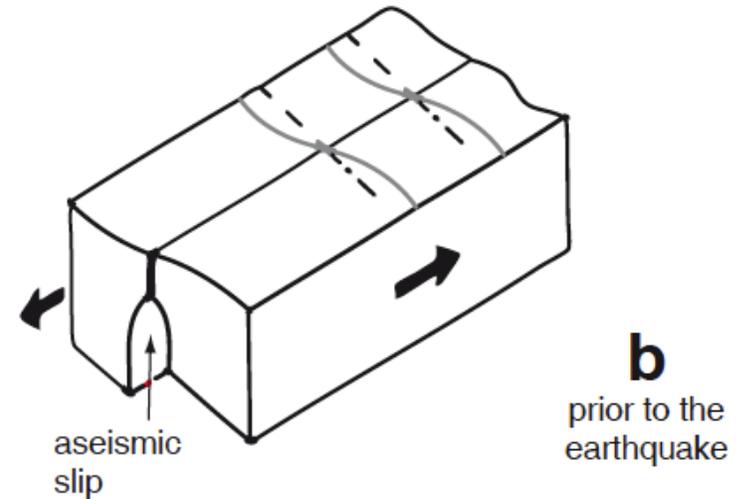
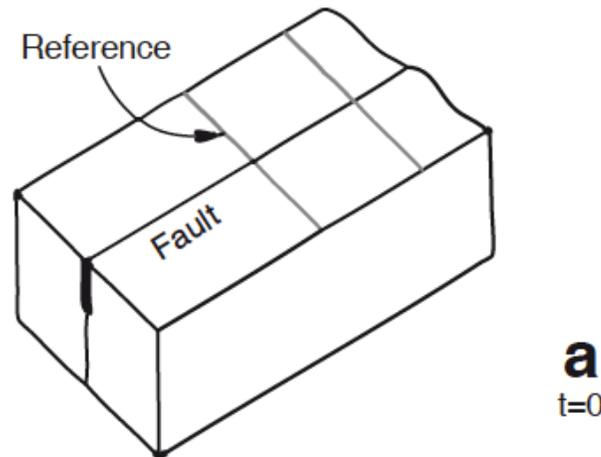
***'Induced seismicity'*** : La plus grande partie de l'énergie libérée est d'origine anthropogénique c.à.d. le changement de contrainte induit par l'activité humaine est comparable à la contrainte de cisaillement qui induit le glissement le long de la faille

***'Triggered seismicity'*** : La plus grande partie de l'énergie libérée est d'origine naturelle

**La part de l'énergie sismique libérée due à l'activité humaine est souvent difficile à évaluer !**

L'activité humaine ne peut pas être la cause (*induce*) des grand séismes mais elle peut contribuer à les déclencher (*trigger*)

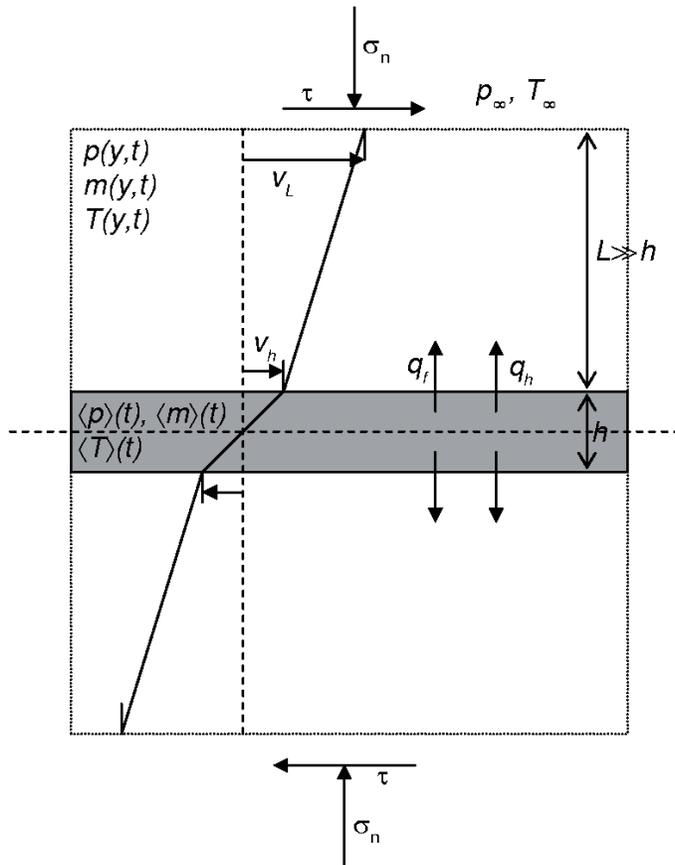
# Mécanismes de déclenchement des séismes



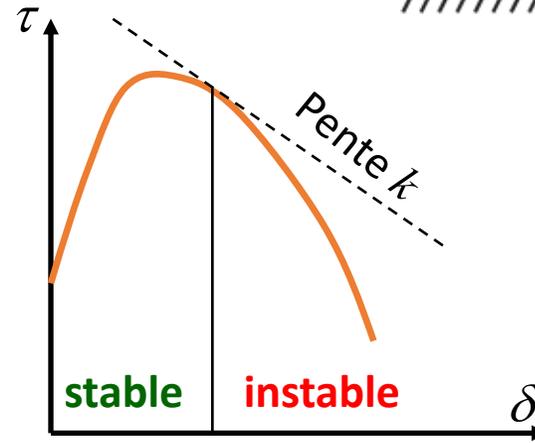
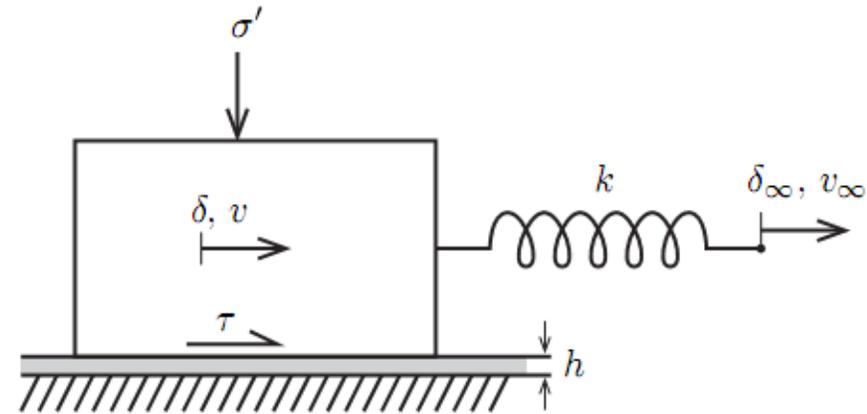
# Mécanismes de déclenchement des séismes

Séisme : Glissement instable le long d'une faille pré-existante

## Zone de faille dans un bloc crustal élastique



## Modèle conceptuel patin-ressort



$$\tau = \tau_0 + \mu(\sigma_n - p)$$

Paramètre clé : Affaiblissement de la résistance au cisaillement de la zone de faille

# Mécanismes de déclenchement des séismes

## Augmentation de la pression de fluide :

Opérations d'injection de fluides

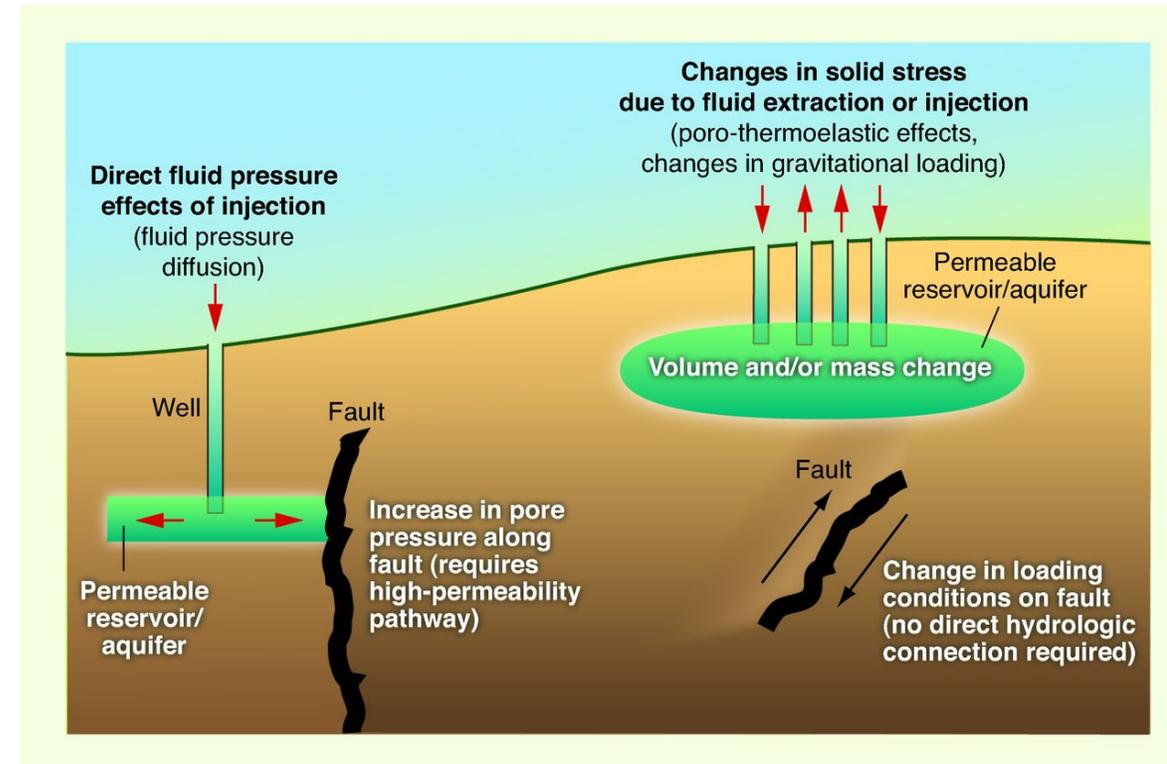
## Réduction de la contrainte normale :

Opérations de déplétion de fluides, mines, carrières

## Augmentation de la contrainte de cisaillement :

Perturbations de l'état de contraintes (chargements en surface, barrages, excavations, explosions ...)

+ effets thermiques (température des fluides injectés)

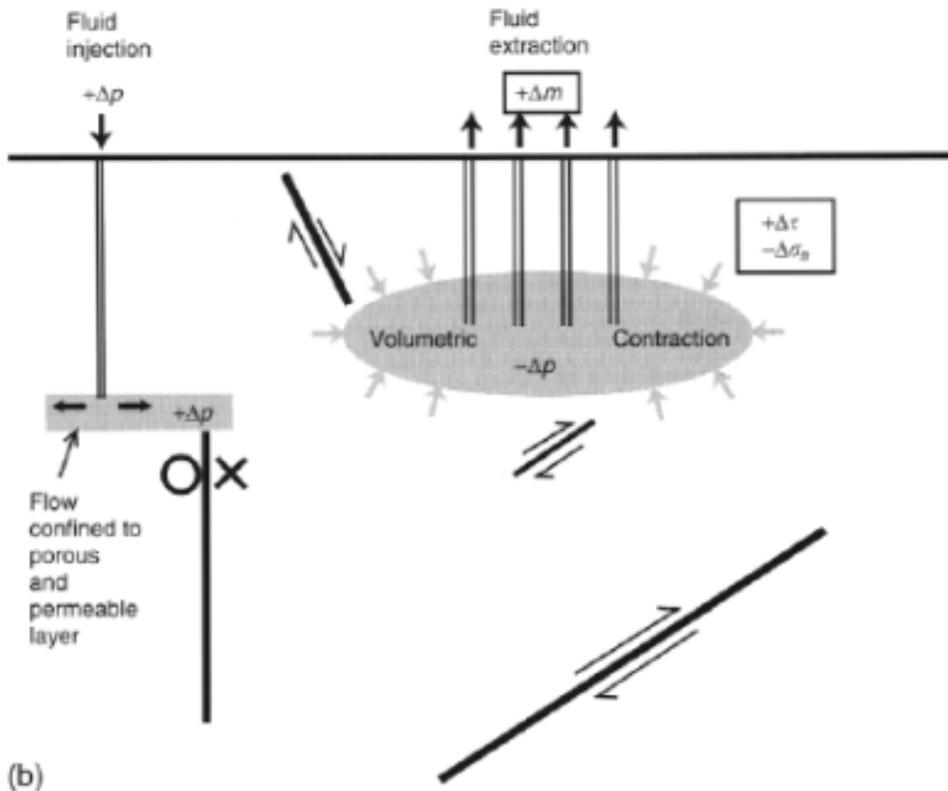


[https://en.wikipedia.org/wiki/Induced\\_seismicity](https://en.wikipedia.org/wiki/Induced_seismicity)

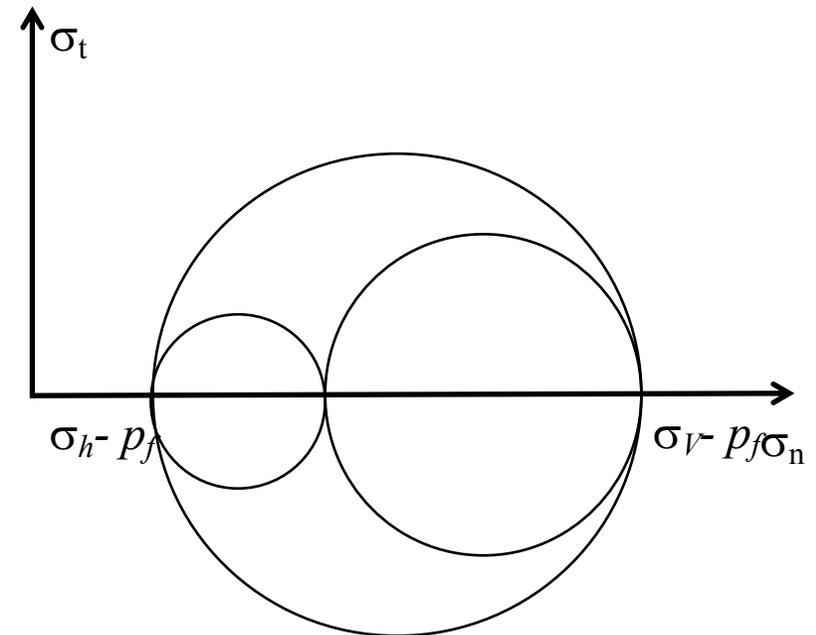
# Analyse poroélastique de l'effet d'un changement de pression dans un réservoir en conditions oedométriques

Réservoir sous un état de contrainte oedométrique:

- Contrainte verticale :  $\sigma_V$
- Contraintes horizontales :  $\sigma_H$  ,  $\sigma_h$
- Pression fluide :  $p_f$



From McGarr et al. 2002



# Analyse poroélastique de l'effet d'un changement de pression dans un réservoir en conditions oedométriques

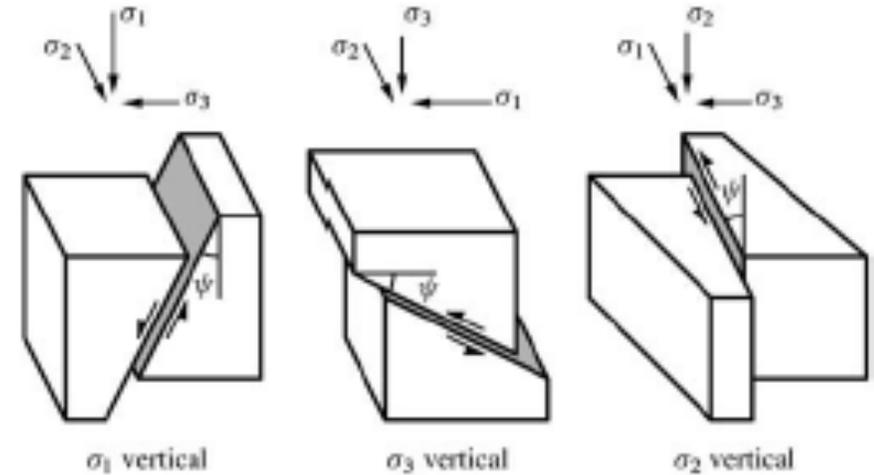
$$\varepsilon_h = \varepsilon_H = 0 \text{ (condition oedométrique)}$$

$$\Delta\sigma_V = 0 \text{ (contrainte verticale constante)}$$

$$\Delta\sigma_h = \Delta\sigma_H = b \frac{1-2\nu}{1-\nu} \Delta p_f,$$

$b$  est le coefficient de Biot

$\nu$  est le coefficient de Poisson



Faïlle normale    Faïlle inverse    Faïlle décrochante

## Modification des contraintes effectives de Terzaghi

$$\sigma'_V = \sigma_V - p_f - \Delta p_f$$

$$\sigma'_H = \sigma_H - p_f - \left(1 - b \frac{1-2\nu}{1-\nu}\right) \Delta p_f$$

$$\sigma'_h = \sigma_h - p_f - \left(1 - b \frac{1-2\nu}{1-\nu}\right) \Delta p_f$$

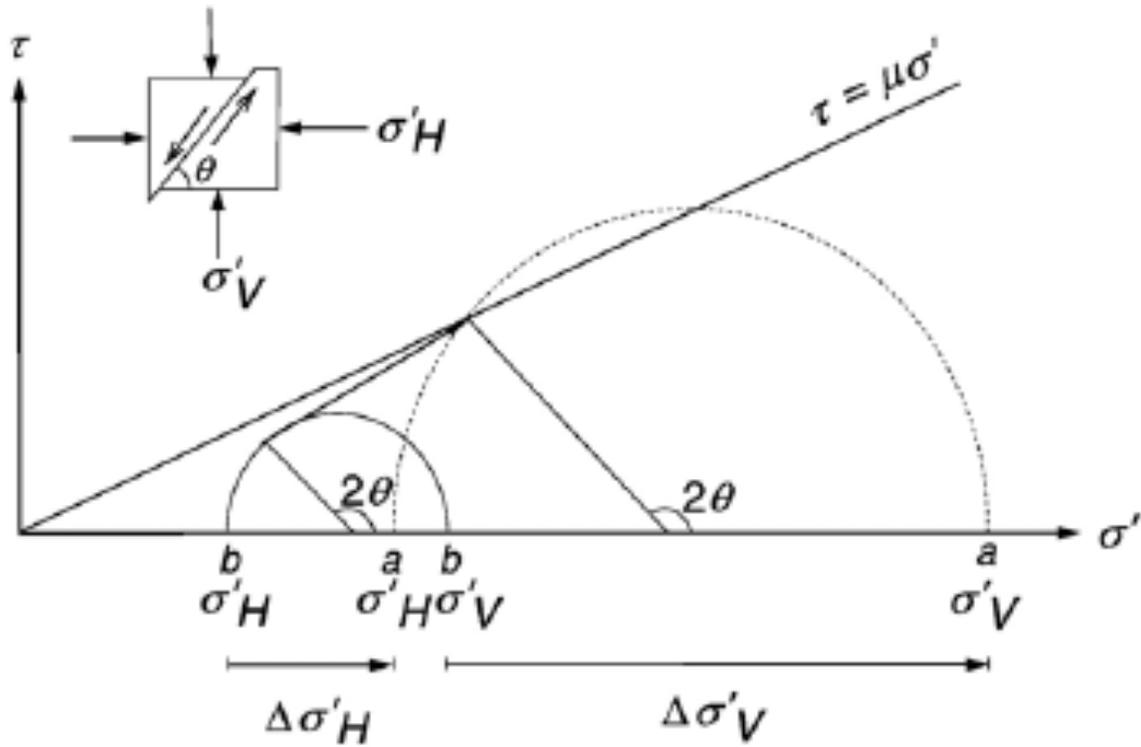
Déplacement du centre des cercles de Mohr et modification du diamètre

si  $\sigma_h \leq \sigma_H \leq \sigma_V$ ,  $-b \frac{1-2\nu}{1-\nu} \Delta p_f$ , positif en dépletion

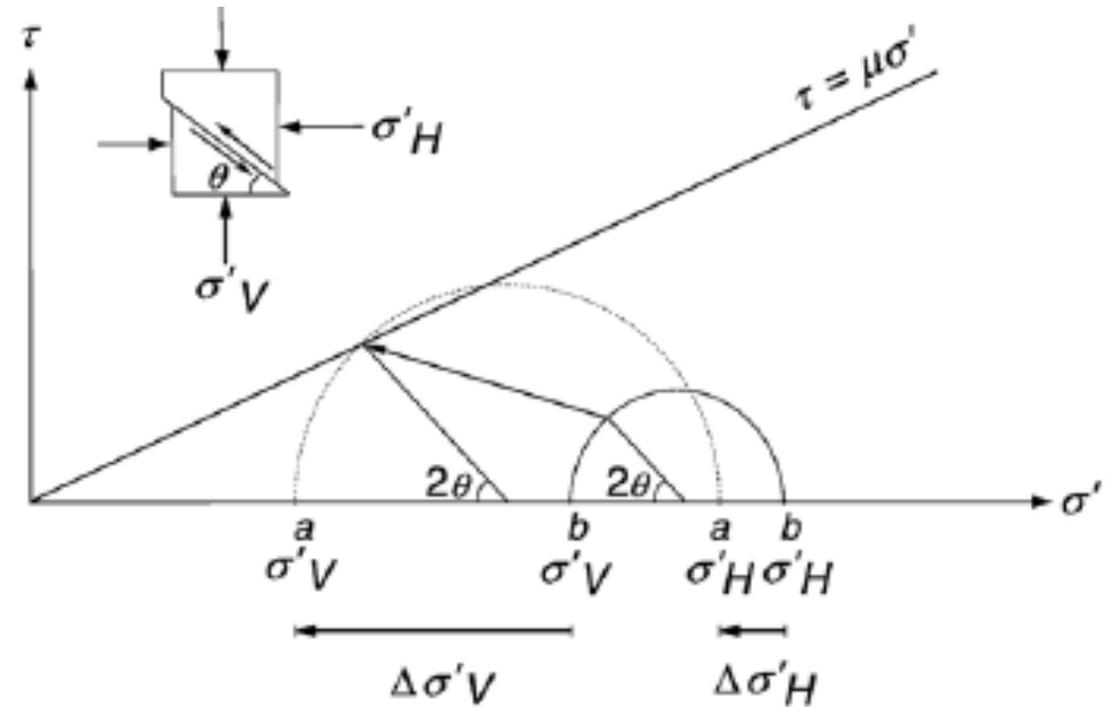
si  $\sigma_V \leq \sigma_h \leq \sigma_H$ ,  $b \frac{1-2\nu}{1-\nu} \Delta p_f$ , positif en injection

si  $\sigma_h \leq \sigma_V \leq \sigma_H$ , aucun changement

# Analyse poroélastique de l'effet d'un changement de pression dans un réservoir en conditions oedométriques



Faille normale sous déplétion



Faille inverse sous injection

# Base de données sur les séismes déclenchés par l'activité humaine

*[www.inducedearthquakes.org](http://www.inducedearthquakes.org)*



# Base de données sur les séismes déclenchés par l'activité humaine :

## Opérations de surface :

- ✓ Chargement : Mise en eau des barrages, remblais côtiers
- ✓ Déchargement : Mines, érosion côtière

## Extraction du sous-sol :

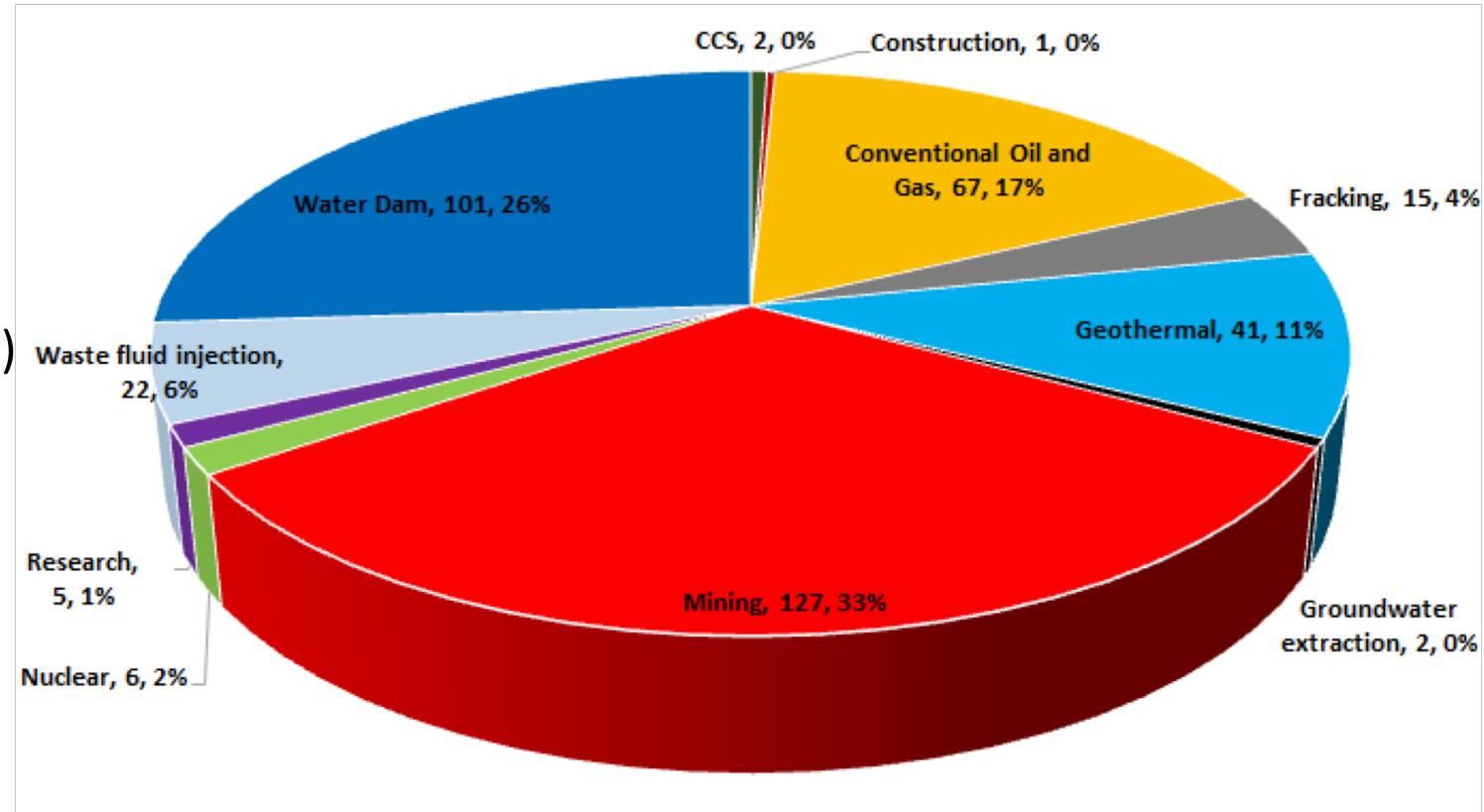
- ✓ Pompage des aquifères
- ✓ Mines
- ✓ Exploitation Hydrocarbures
- ✓ Géothermie (pompage de fluides, chaleur)

## Injection dans le sous sol :

- ✓ Stimulation des réservoirs
- ✓ Injection d'eaux usées ou de production
- ✓ Fracturation hydraulique
- ✓ Géothermie (injection de fluides)
- ✓ Stockage de gaz,
- ✓ Séquestration de CO2

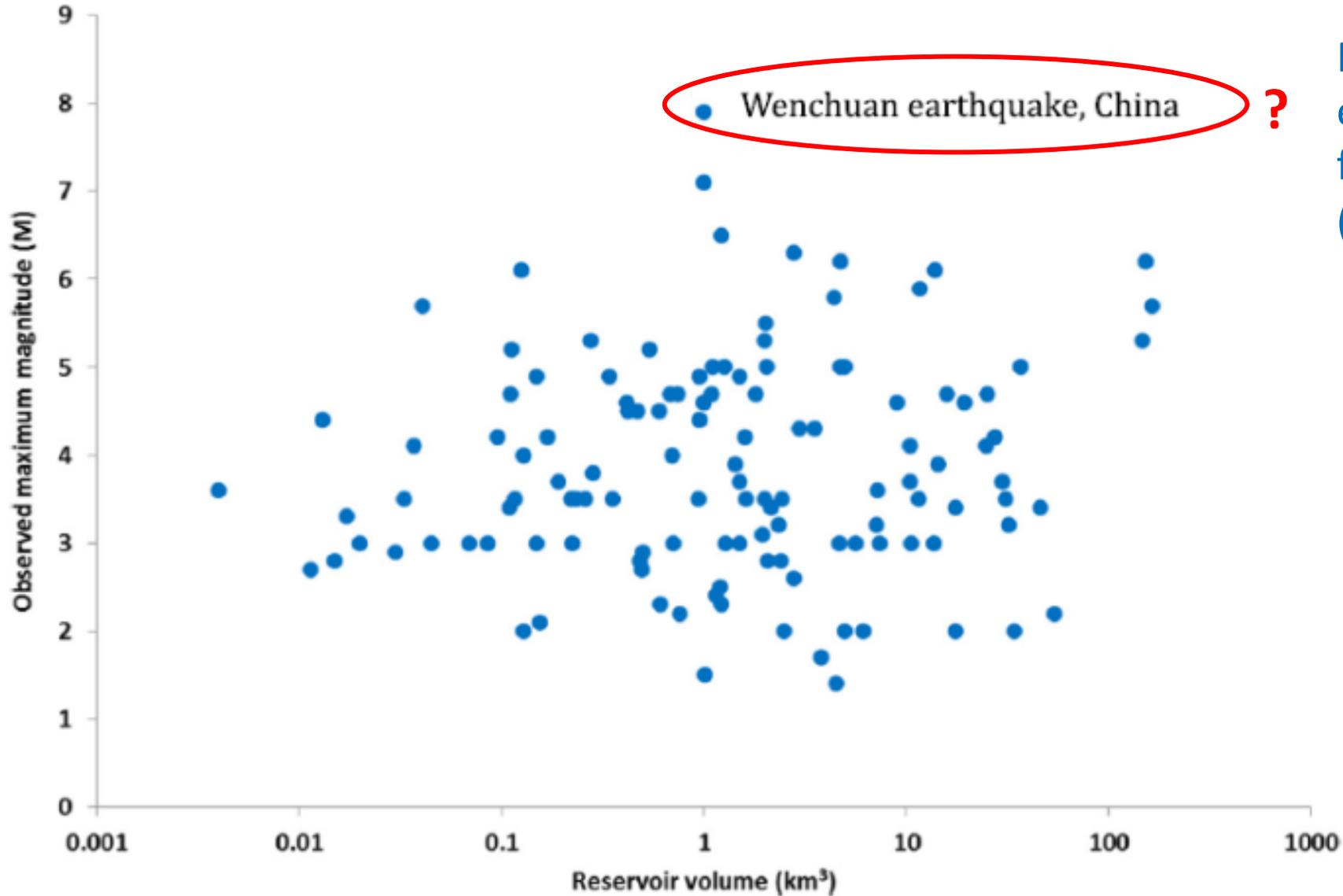
## Explosions :

- ✓ Nucléaire
- ✓ Chimique



Foulger et al, 2018

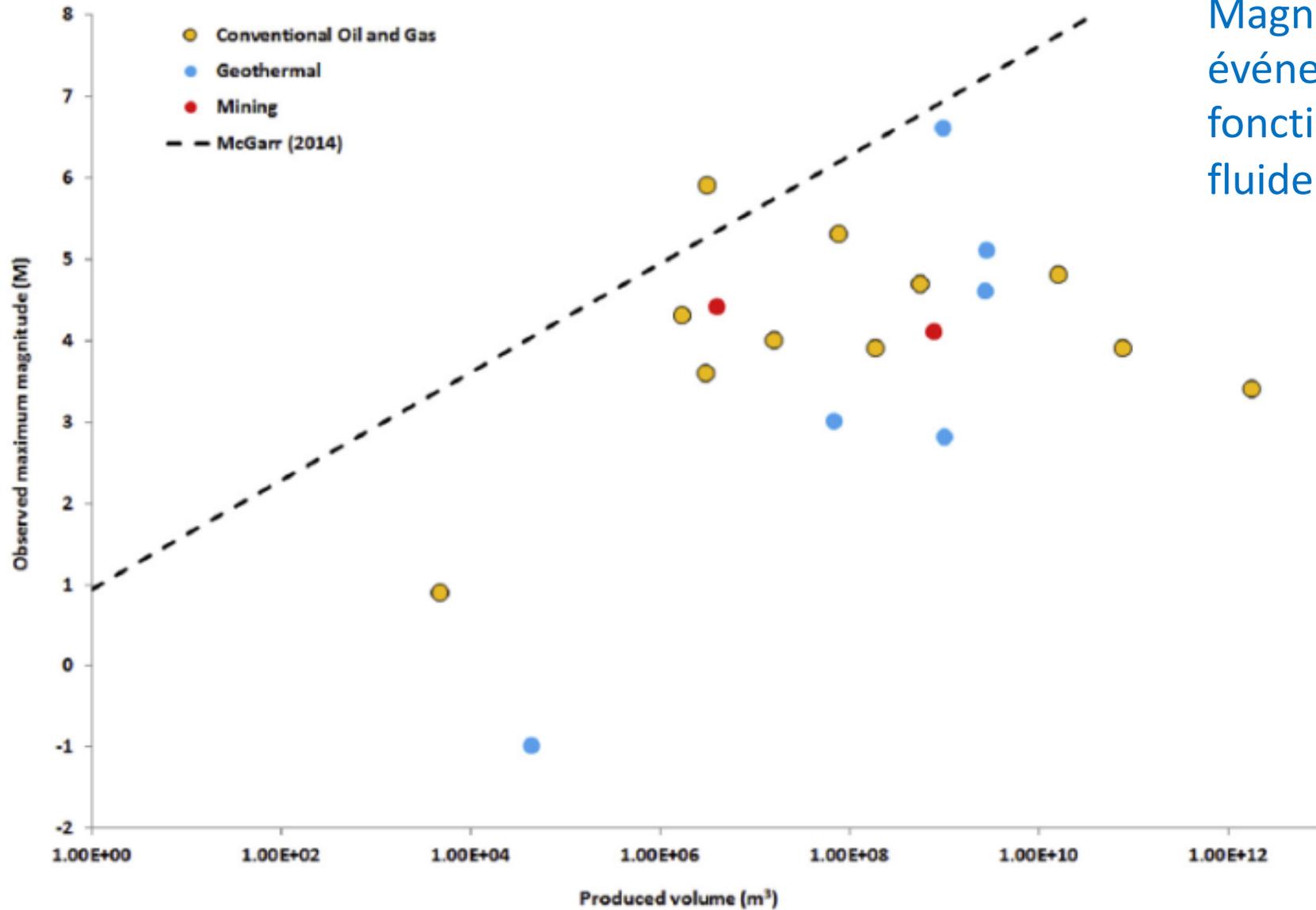
# Sismicité induite par les barrages



Magnitude maximale des événements sismiques en fonction du volume du réservoir (126 cas)

Foulger et al, 2018

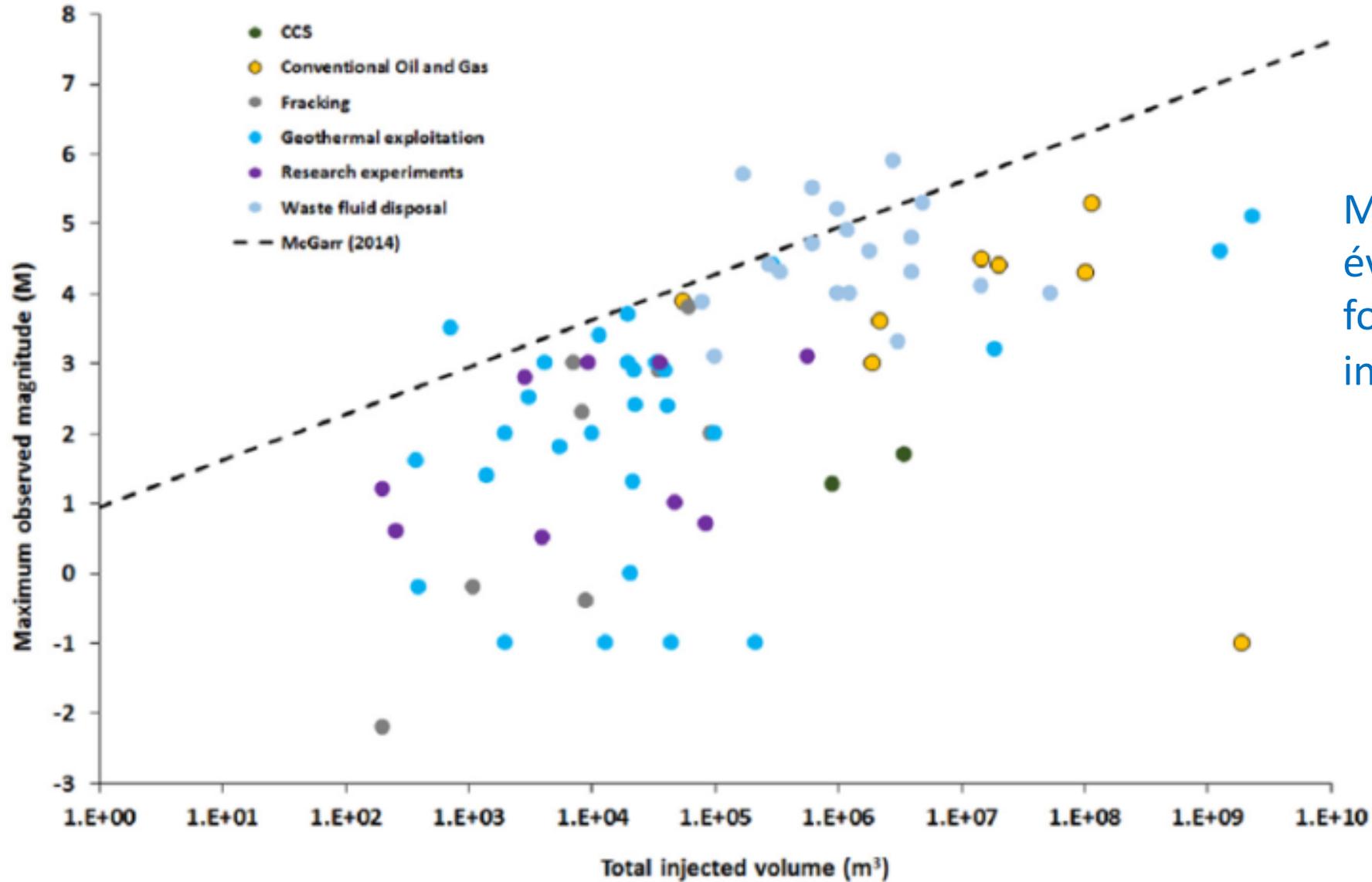
# Opérations d'extraction



Magnitude maximale des événements sismiques en fonction du volume de fluide extrait (23 cas)

Foulger et al, 2018

# Opérations d'injection



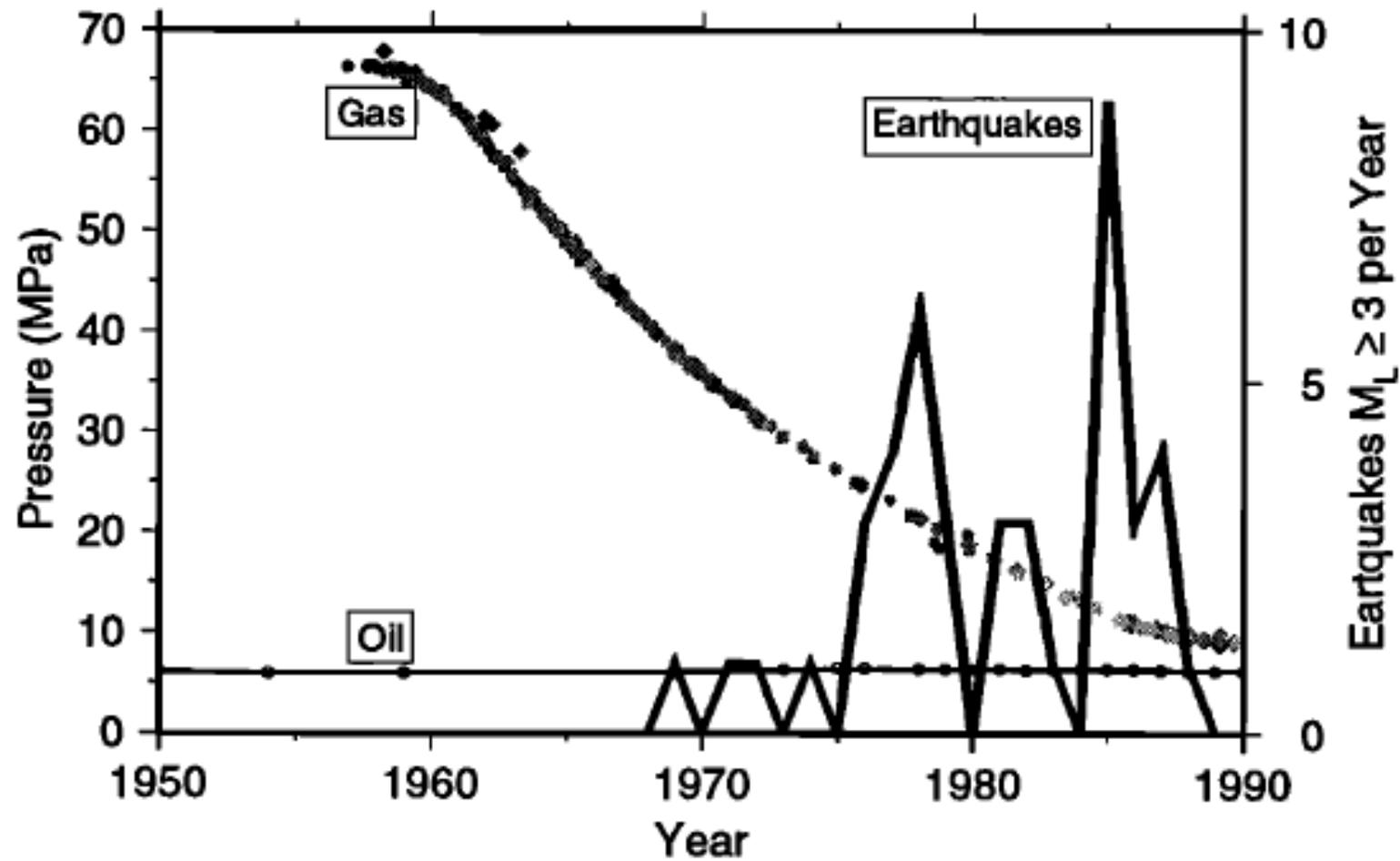
Magnitude maximale des événements sismiques en fonction du volume de fluide injecté (69 cas)

Foulger et al, 2018

Quelques exemples :

- Sismicité induite par l'extraction de fluide du sous-sol

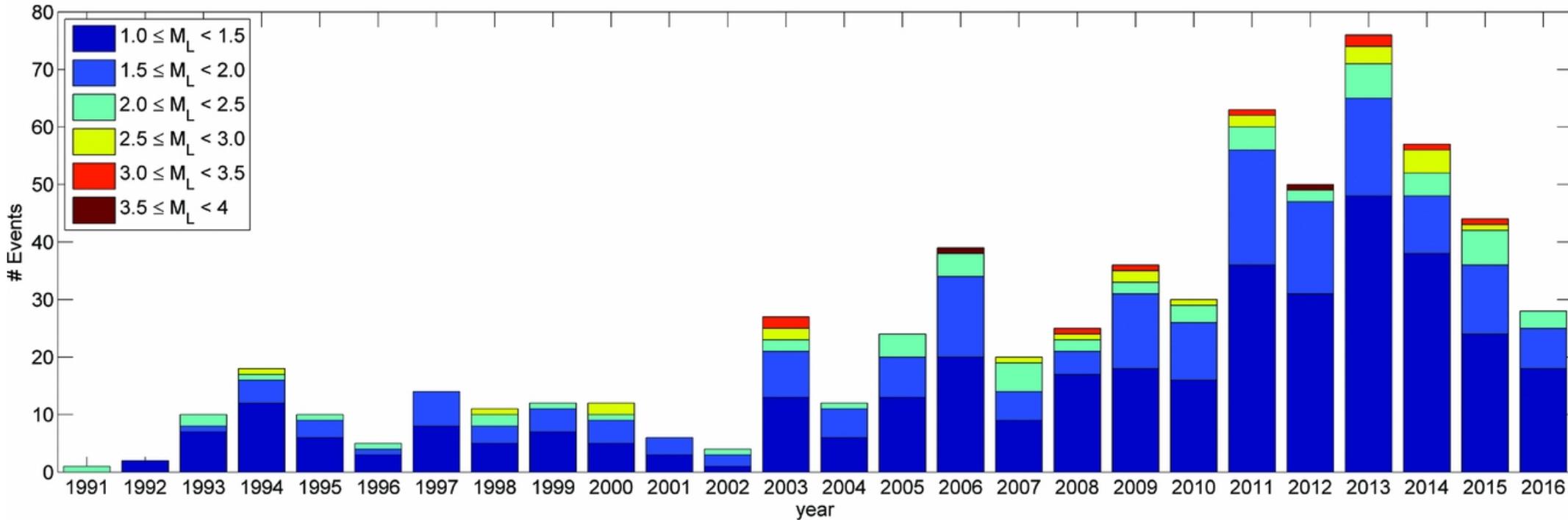
# Pressure in the gas and oil reservoirs at Lacq



Segall et al. 1994

# Exemple du champ gazier de Groningen, Hollande

Netherlands Journal of Geosciences, 2017, Volume 96, Special Issue 5



1963: Début de la production ; **Décembre 1991: Premier événement sismique enregistré**

2012: Séisme à Huizinge, Groningen, de magnitude 3.6, dommages causés à des bâtiments .

En 2013,  $53.9 \times 10^9 \text{m}^3$  de gaz naturel était extrait du champs de Groningen.

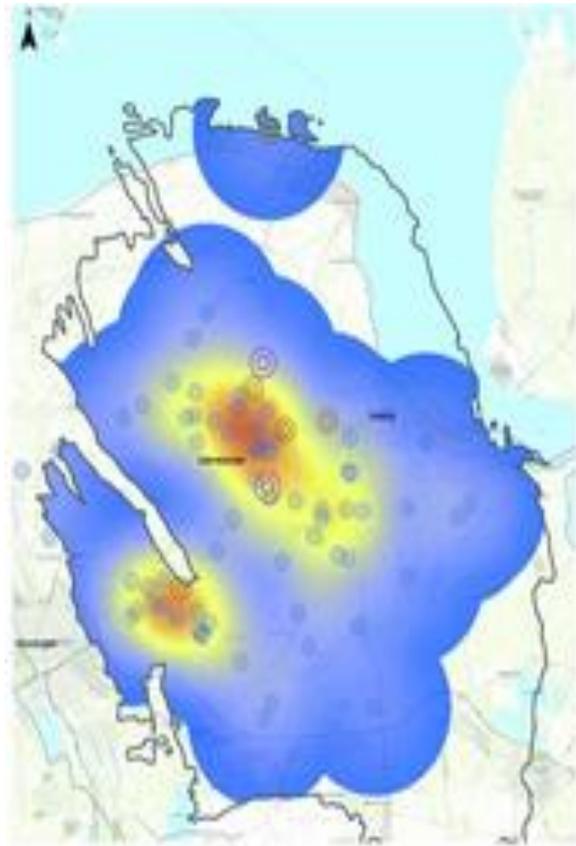
En Janvier 2014, le gouvernement réduit la production de  $42.5 \times 10^9 \text{m}^3$  début 2014 à  $27 \times 10^9 \text{m}^3$  pour les années 2015/2016, puis à  $21.6 \times 10^9 \text{m}^3$  pour les années 2017/2018.

**La réduction de la production depuis Janvier 2014 s'est accompagnée d'une diminution du nombre d'événements sismiques.**

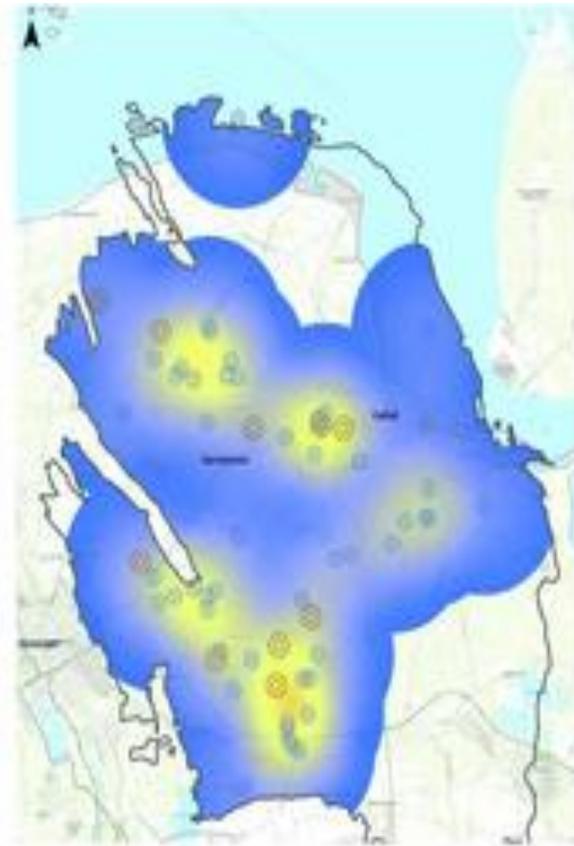
Mars 2013–Mars 2014

Mars 2014–Mars 2015

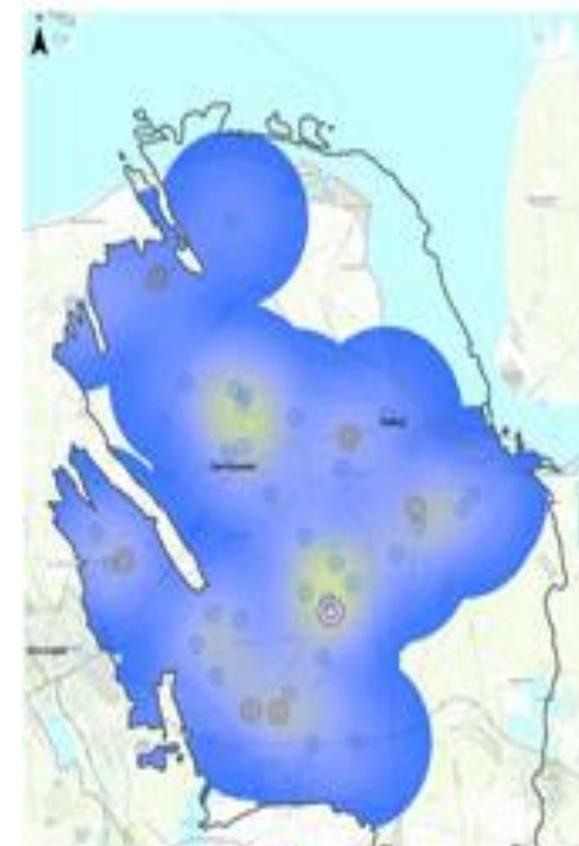
Mars 2015–Mars 2016



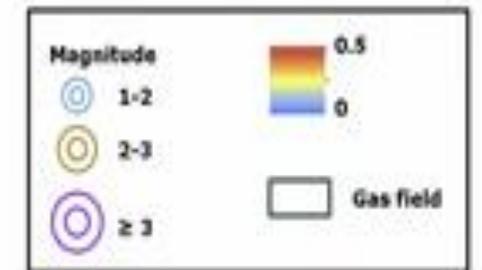
(A)



(B)



(C)



Carte de densité des événements sismiques dans le champ gazier de Groningen

Echelle de couleur de 0 (bleu) à 0.5 événements par km<sup>2</sup> (rouge).

## Quelques exemples :

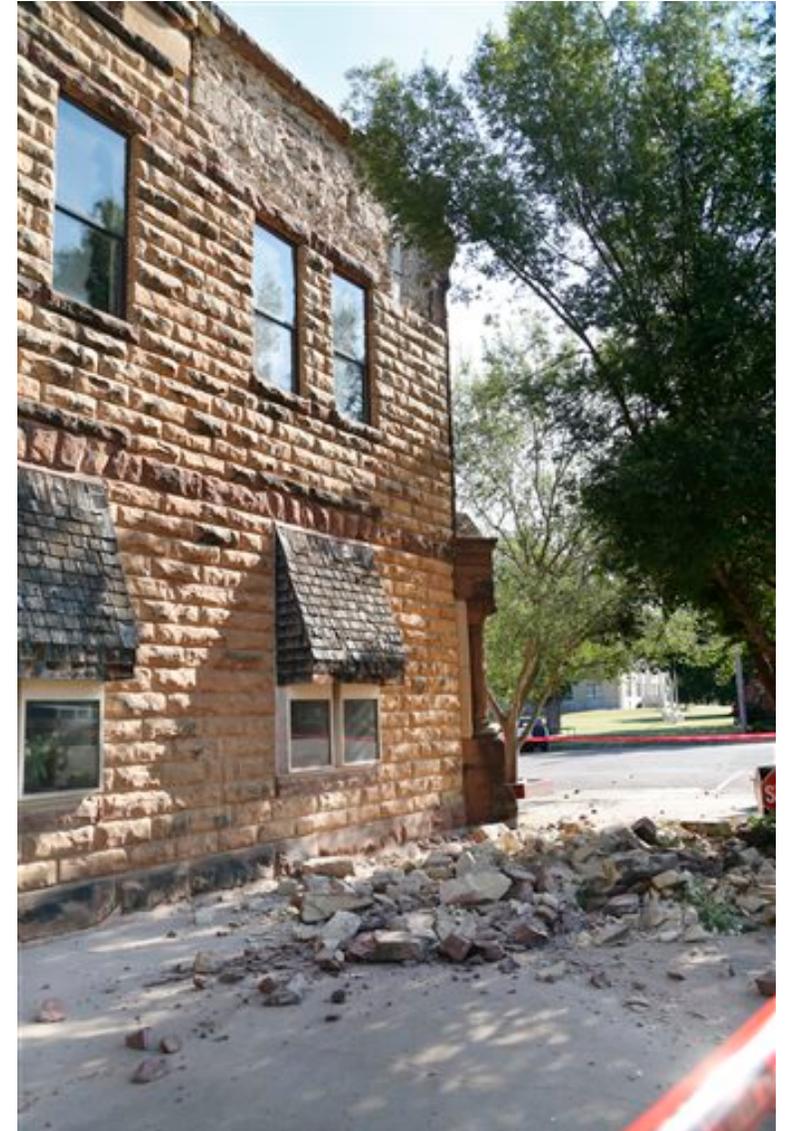
- Sismicité induite par l'injection de fluide dans le sous-sol

## Sismicité induite par des opérations d'injection

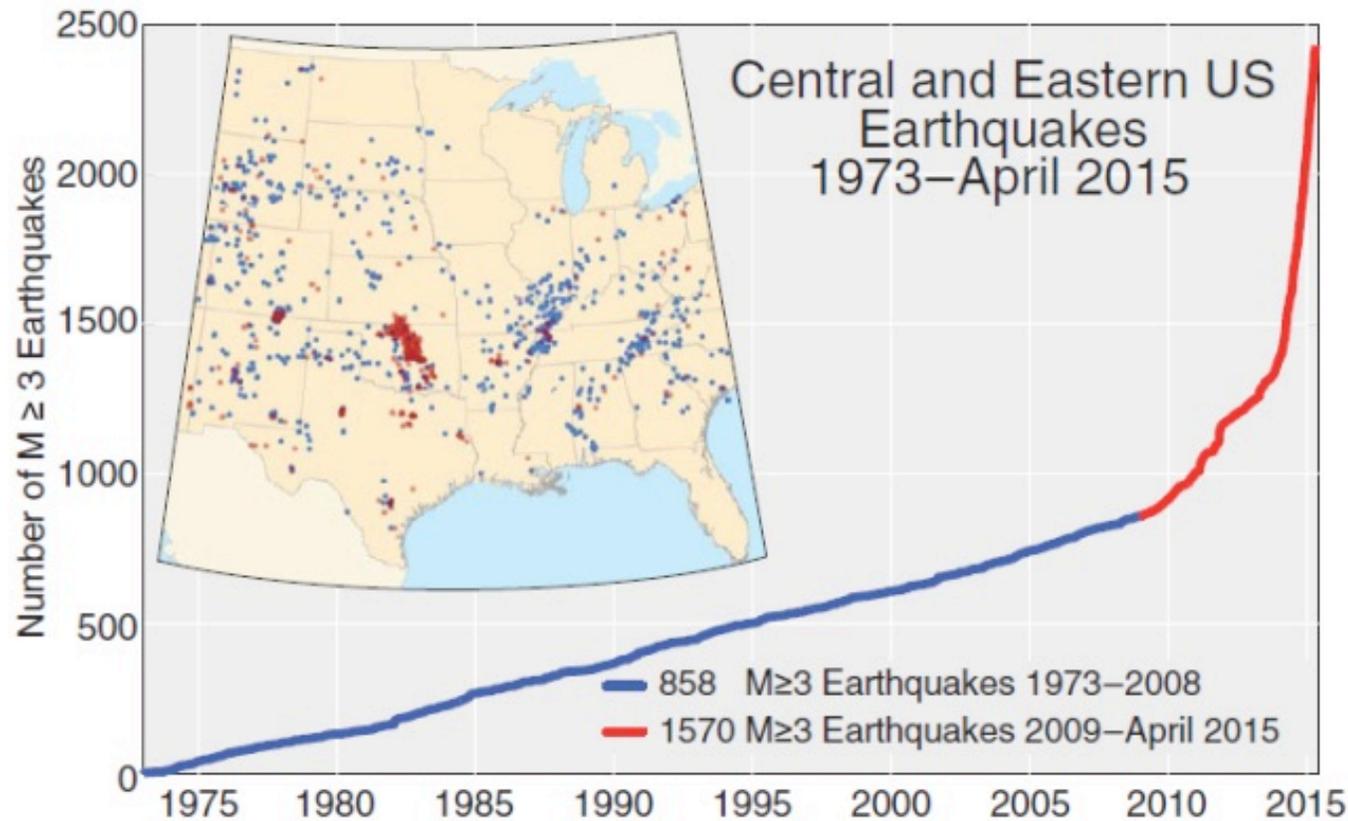
Exemple : Séismes de magnitude  $> 5$  dans l' Oklahoma déclenchés par l'injection d'eau de production en relation avec l'exploitation de pétrole et de gaz naturel (U.S. Geological Survey)

*“The 2016 Fairview, Pawnee and Cushing earthquakes all appear to be the result of wastewater injection, with some key differences in their sequences and timing related to changes in injection rate. In particular, a magnitude 5.7 earthquake near the Cushing area cannot be ruled out, based on the large volume of injected fluid—about 14.5 million cubic meters so far—in a region that has already seen faults reactivated by injection.”*

<https://phys.org/news/2016-10-usgs-oklahoma-quake-wastewater-disposal.html#jCp>

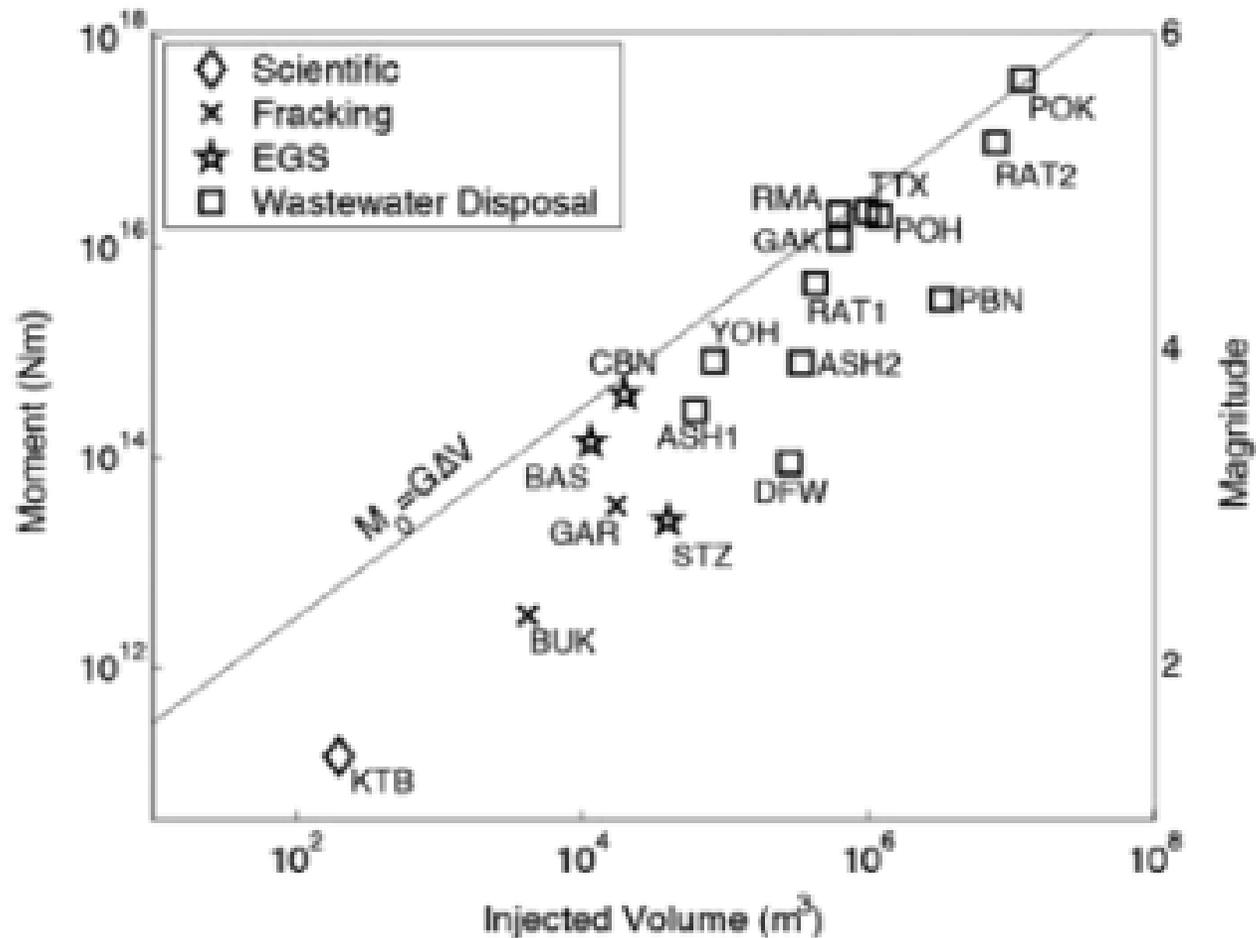


## Sismicité induite par des opérations d'injection



▲ **Figure 1.** Count of  $M \geq 3$  earthquakes in the central and eastern United States from 1973 to April 2015. Two abrupt increases in the earthquake rate occurred in 2009 and 2013. (Inset) Spatial distribution of earthquakes. Red dots represent earthquakes that occurred between 2009 and April 2015, and blue dots represent earthquakes that occurred between 1973 and 2008. Red color becomes brighter when there are more earthquakes in the area. The earthquake rate and distribution of earthquakes changed in 2009. Prior to 2009, earthquakes were spread across the United States. Beginning in 2009 the earthquakes are tightly clustered in a few areas (central Oklahoma, southern Kansas, central Arkansas, southeastern Colorado and northeastern New Mexico, and multiple parts of Texas).

Rubinstein, J. L., & Mahani, A. B. (2015). Myths and Facts on Wastewater Injection, Hydraulic Fracturing, Enhanced Oil Recovery, and Induced Seismicity. *Seismological Research Letters*, 86(4), 1060–1067.



*“Wastewater disposal is responsible for inducing the majority of large earthquakes. Increased fluid pressure is the driving mechanism to induce earthquakes.*

*Wastewater disposal wells can **raise fluid pressures more, over longer periods of time and over larger areas**, than either of the other injection methods”*

McGarr A. (2014). Maximum magnitude earthquakes induced by fluid injection. J Geophys Res Solid Earth

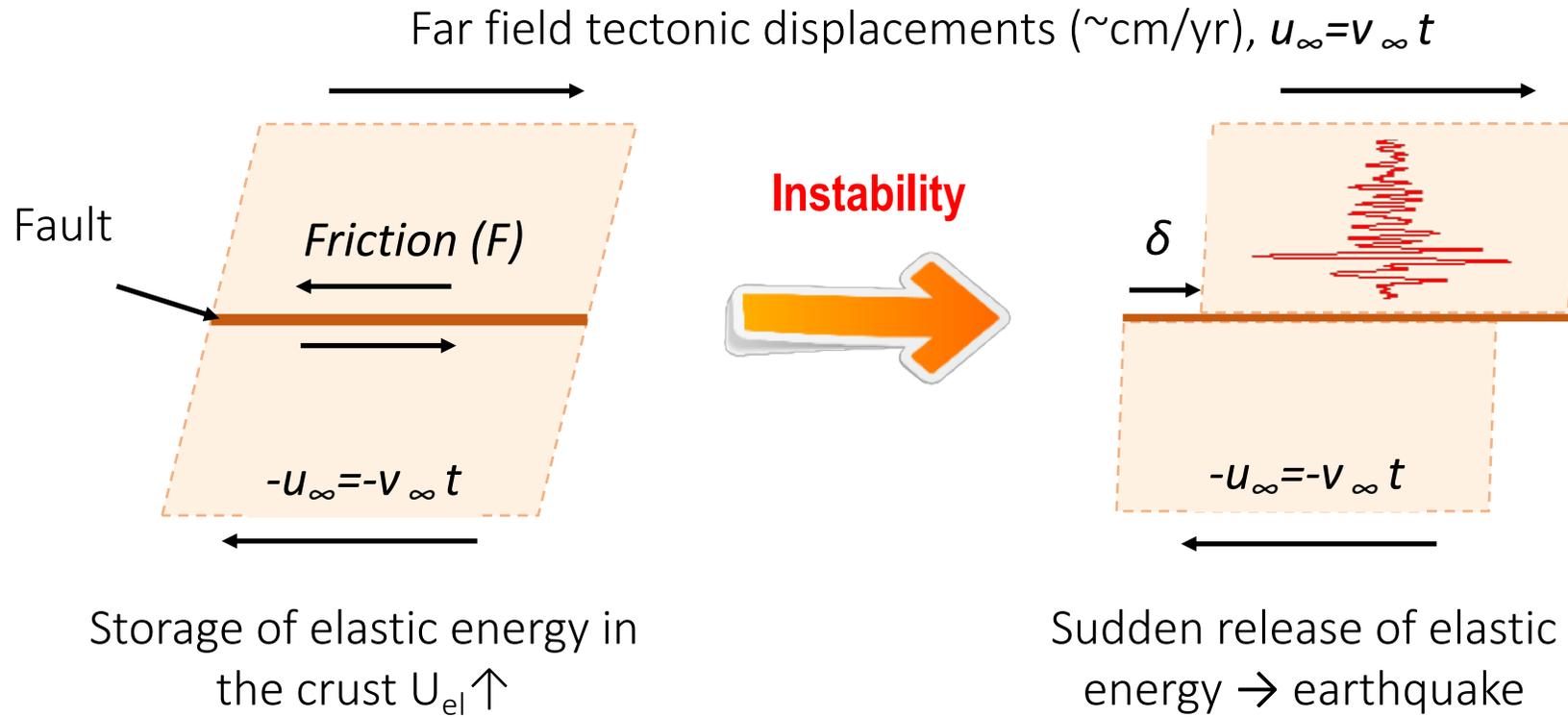
Sismicité induite ou naturelle?

*Un sujet controversé*

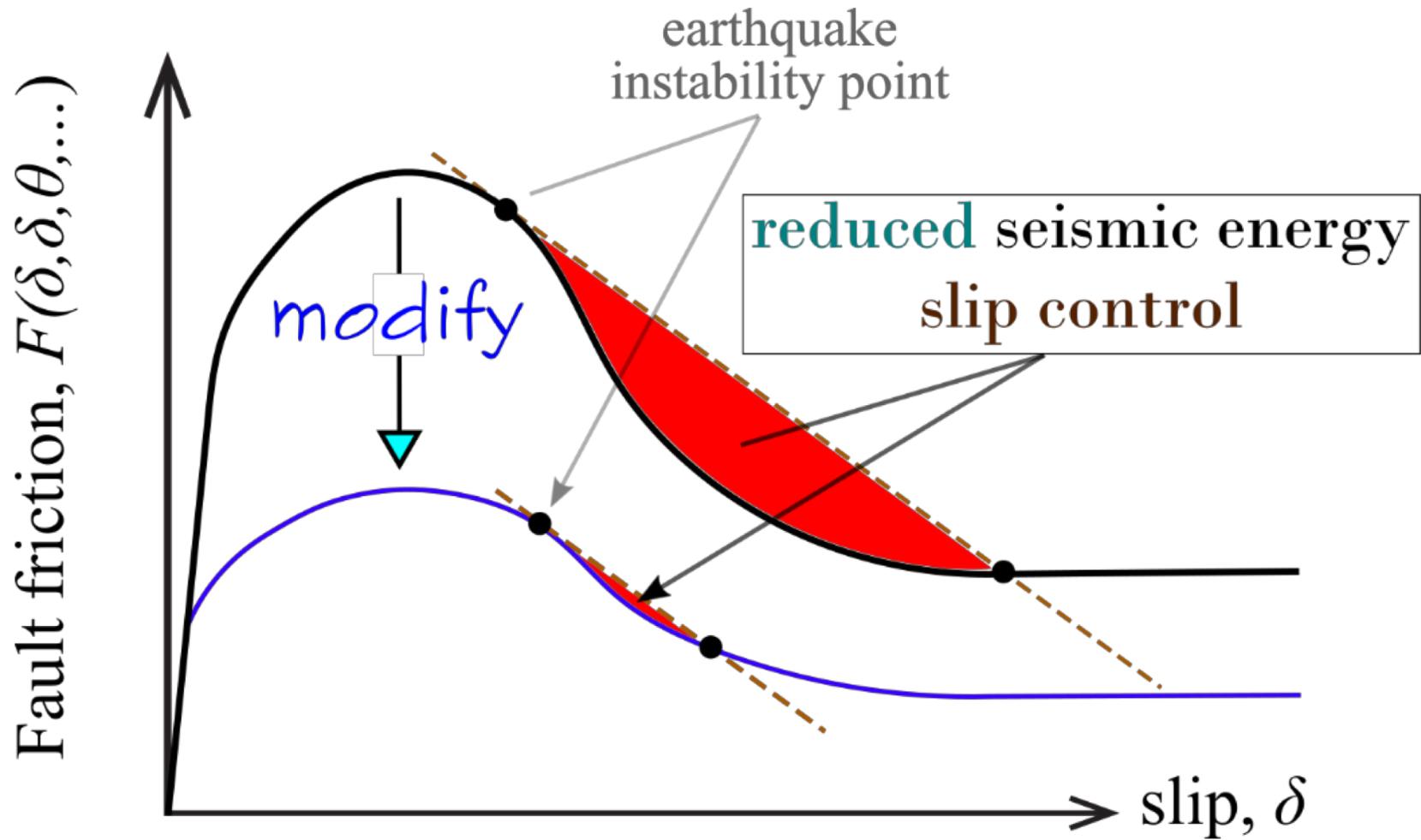
- Difficultés d'évaluation et de jugement
- Affirmations controversées (exemple séisme de Wenchuan, Mw 8, Chine et mise en eau d'un barrage ou séisme de Lorca, Mw 5.1, Espagne et pompage hydraulique)
- Critères d'appréciation
  - Histoire sismique de la région (séismes induits dans des zones réputées asismiques)
  - Correspondance temporelle entre l'activité industrielle et l'augmentation de l'activité sismique
  - Proximité spatiale et faible profondeur de l'épicentre
- Nuisances et dommages potentiellement importants dans des zones non préparées à une activité sismique
- Importance de l'auscultation sismique

Peut-on contrôler les séismes?

# Nucléation des séismes : une instabilité dynamique



# Transition d'un régime de glissement sismique à un glissement asismique



# Rêve ou réalité ?

- Premières études par C. B. Raleigh et al. dans les années '70

## **An Experiment in Earthquake Control at Rangely, Colorado**

C. B. Raleigh, J. H. Healy, J. D. Bredehoeft

The discovery in 1966 that injection of fluid underground at high pressure was responsible for the triggering of earthquakes near Denver, Colorado, led to speculations that earthquakes might be controllable (1).

locations and focal plane solutions for the earthquakes, and most important (iv) to be confident that the active phase of the experiment would not materially increase the likelihood of a damaging earthquake. In

### **The Rangely Field**

The Rangely structure consists of a doubly plunging anticline in Mesozoic and Paleozoic sedimentary rocks (Table 1 and Fig. 1a). The Cretaceous Mancos shale is exposed at the surface, and is underlain at 900 m below the surface by an 800-m section of Mesozoic sandstones and siltstones. The Pennsylvanian and Permian Weber sandstone, the principal oil reservoir rock, is 350 m thick and is encountered at a depth of about 1700 m. The Paleozoic sandstones and limestones beneath the Weber rest on crystalline basement rock at a depth of about 3000 m.

There is little evidence of faulting in the Rangely area. At the western end of the field, drainage patterns are aligned along a

Science, 1976

Expérience réussie

## Beaucoup d'inconnues encore...

- Comportement THMC d'une faille (plusieurs questions ouvertes)
- Modélisation prédictive multi-échelle (gouge, faille, système des failles - échelles du  $\mu\text{m}$  à km)
- Expérimentation au laboratoire
- Conception du système d'intervention pour contrôler l'instabilité dynamique

# ERC Starting Grant Project: Controlling earthQuakes (CoQuake)



**European Research Council**  
Established by the European Commission



CoQuake.com

## Quelques références ...

- Avouac, J.-P. (2012). Human-induced shaking. *Nature Geoscience*, 5(11), 763–764.  
<https://doi.org/10.1038/ngeo1609>
- McGarr, A., Simpson, D., & Seeber, L. (2002). 40 Case histories of induced and triggered seismicity. In: *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology* (Vol. 81, pp. 647–661).  
[https://doi.org/10.1016/S0074-6142\(02\)80243-1](https://doi.org/10.1016/S0074-6142(02)80243-1)
- McGarr, A. (2014). Maximum magnitude earthquakes induced by fluid injection. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(2), 1008–1019. <https://doi.org/10.1002/2013JB010597>
- Foulger, G. R., Wilson, M. P., Gluyas, J. G., Julian, B. R., & Davies, R. J. (2018). Global review of human-induced earthquakes. *Earth-Science Reviews*, 178(January 2017), 438–514.  
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.008>
- National Research Council (2013). *Induced Seismicity Potential in Energy Technologies*. Washington, D.C.: National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/13355>
- Segall, P., Grasso, J.-R., & Mossop, A. (1994). Poroelastic stressing and induced seismicity near the Lacq gas field, southwestern France. *Journal of Geophysical Research*, 99, 15423–15438.  
<https://doi.org/10.1029/94JB00989>