



# Etat des connaissances concernant les aléas et les risques liés à la sismicité anthropique

I. Contrucci & E. Klein



CFMR, Séance technique : Sismicité induite

le 14/03/2019



INERIS

maîtriser le risque  
pour un développement durable

# Qu'entend-t-on par sismicité anthropique ?

## Définitions et terminologie

### Sismicité naturelle

- Générée par les forces tectoniques (mouvements des plaques continentales)

### Sismicité anthropique

- **Sismicité induite**

- L'énergie libérée est d'origine anthropique
- Elle ne serait jamais apparue sans l'intervention de l'homme
- Généralement de faible intensité

- **Sismicité déclenchée**

- L'énergie libérée est principalement d'origine tectonique
- Activité sismique naturelle accélérée par l'intervention humaine
- Elle serait probablement intervenue naturellement à plus ou moins long terme

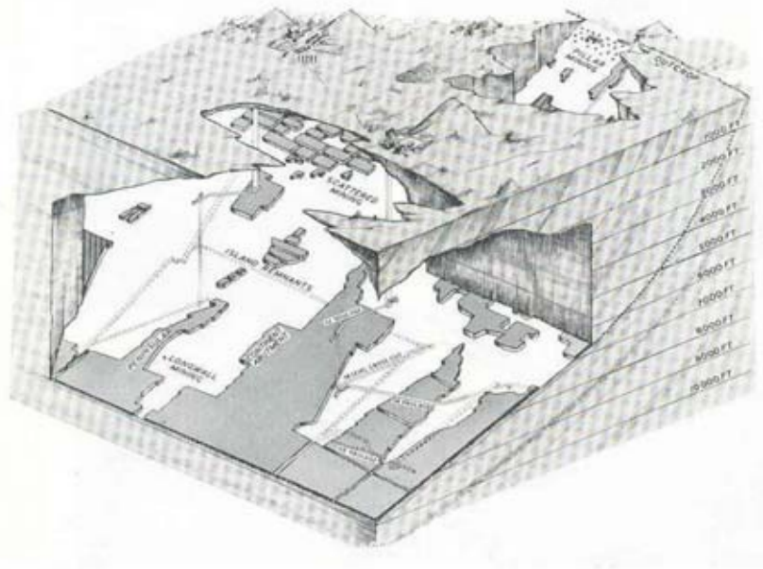


# L'homme peut-il générer des tremblements de terre ?

## Historique :

- Afrique du sud, Johannesburg 1894 :
  - Sismicité induite par l'exploitation d'une mine d'or : phénomène alors inconnu qui a mis 14 ans à être relié aux chantiers miniers
- USA, Nevada, Barrage de Hoover (lac Mead), 1935
  - mise en évidence de la relation entre sismicité et mise en eau de grands barrages

Mine d'or (Afrique du Sud)



Layout of a gold mine (Cook et al., 1966).



Barrage de Hoover (USA)

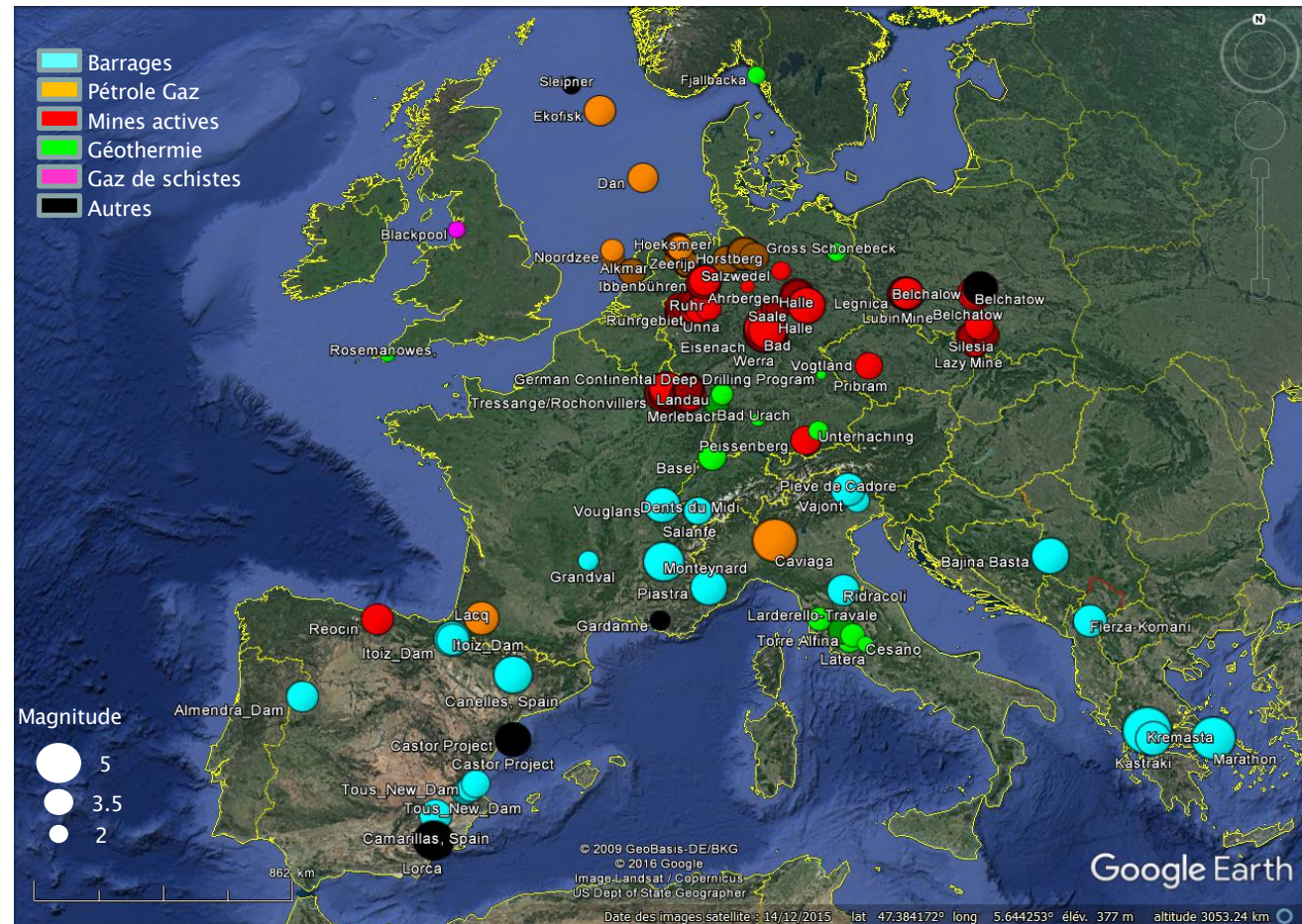


# Qu'en est-il aujourd'hui ?

L'accroissement de la demande mondiale en énergie et en matières premières

- Augmentation de l'exploitation des ressources du sous-sol et de son utilisation à des fins de stockage
- Développement d'énergies conventionnelles et non-conventionnelles
- Augmentation des profondeurs et des taux d'extraction minière
- Multiplication du nombre de situations génératrices d'une sismicité d'origine anthropique
- Même si le nombre de cas reste faible par rapport au nombre total de projets industriels

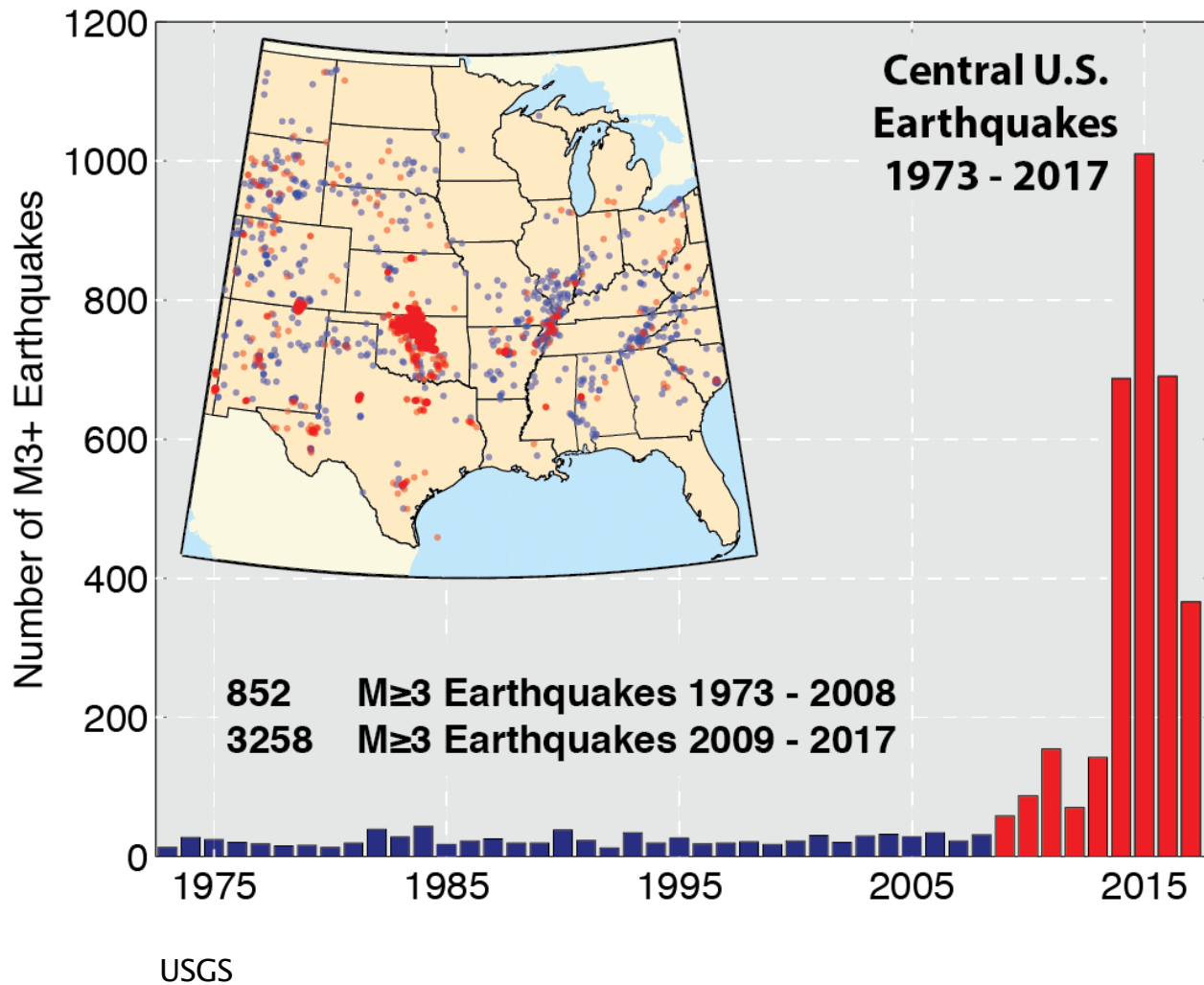
Localisation de la sismicité induite par les activités anthropiques



Synthèse INERIS non exhaustive

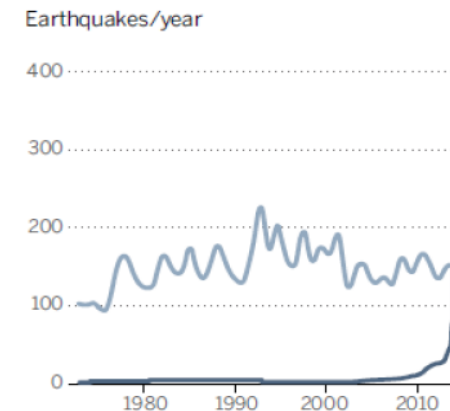


# Pourquoi cette sismicité pose problème ?



Nombre de tremblement de terre de magnitude  $\geq 3$  devenu plus important en **Oklahoma** qu'en Californie ces 5 dernières années en lien avec l'extraction non conventionnelle d'hydrocarbures

## Seismic surge in Oklahoma



Annual rate of earthquake sequences with at least one  $M \geq 3$  earthquake in California (light blue) and Oklahoma (dark blue) since 1973. (Based on USGS earthquake catalog data from <http://earthquake.usgs.gov>.)

McGarr, A., et al., Coping with Earthquakes Induced by Fluid Injection, Science, V 347, p.830-831, 2015.

# Pourquoi cette sismicité pose problème ?

## Risque pour la sécurité publique

### 2016 Pawnee, Oklahoma, M 5.8

pas de décès, quelques blessés, dégâts modérés à graves autour de l'épicentre

- Origine : injection en profondeur d'eau de rejet issues d'exploitation d'hydrocarbures conventionnels et non conventionnels

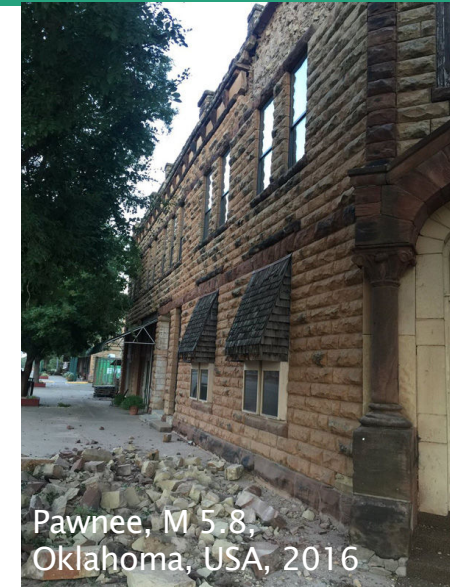
### 2011 Lorca, Espagne, M 5.1

décès de 9 personnes, ~130 blessés et 15 000 personnes laissées sans abris

- Origine : exploitation d'un réservoir d'eau douce par pompage

Un séisme naturel de magnitude 5.8 en Californie ou au Japon ne provoque pas de dégâts

→ Occurrence de Séismes, à faible profondeur, dans des zones où le bâti n'est pas conçu pour résister aux vibrations



Pawnee, M 5.8,  
Oklahoma, USA, 2016

<https://www.express.co.uk>



Lorca, M5.1, Espagne, 2011

zmescience.com

**INERIS**

maîtriser le risque  
pour un développement durable



# Acceptabilité sociale et risques financiers

## 2013, projet Castor, Espagne

### Contexte :

- Stockage souterrain de gaz en mer au NE de l'Espagne (2013), profondeur 2 km
- Ancien gisement de pétrole dépleted
- Faible sismicité naturelle

### Description :

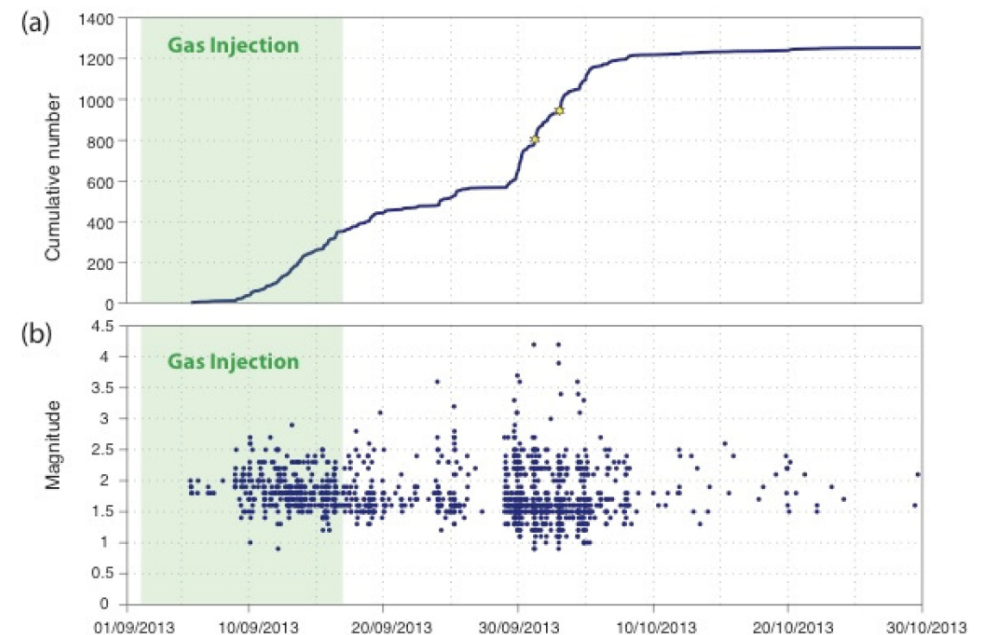
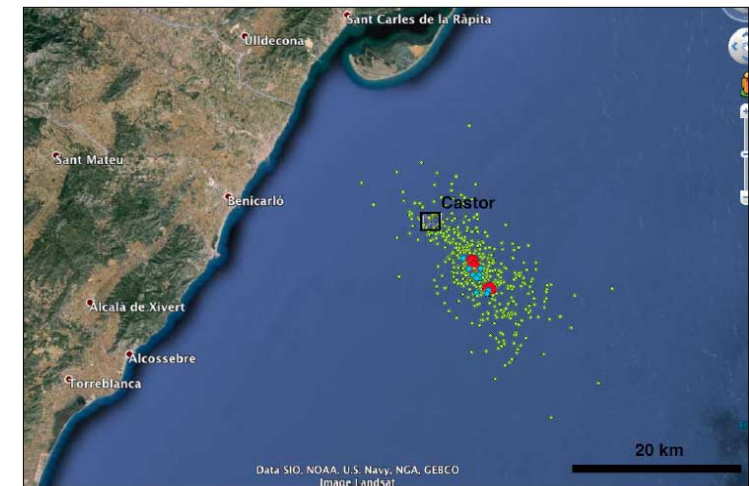
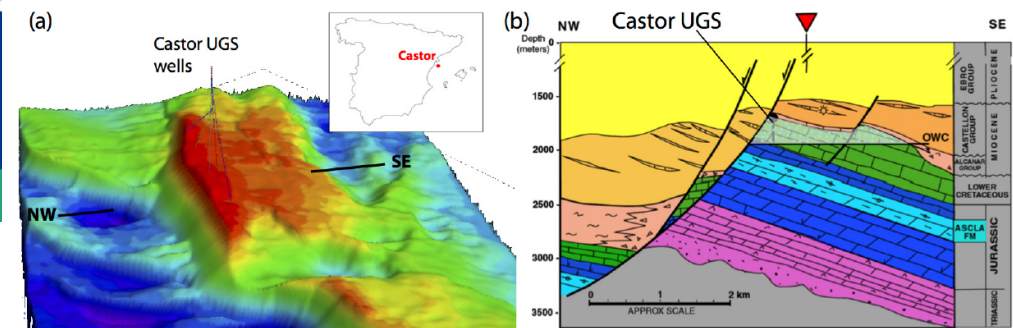
- Sismicité dès les premières phases d'injection
- Occurrence d'événements de magnitude 4, deux semaines après l'arrêt de l'injection de gaz
- Réactivation d'une faille non identifiée initialement

### Conséquences

- **Pas de dégâts**
- **MAIS Sismicité ressentie par les populations côtières**
- **Suspension puis abandon du projet de stockage**
- **Pertes estimées à ~1,6 milliards d'euros**

### Références :

- Cesca, et al., 2014; del Potro and Diez, 2015.



# Un exemple en France de faible amplitude : ennoyage des mines, mines abandonnées

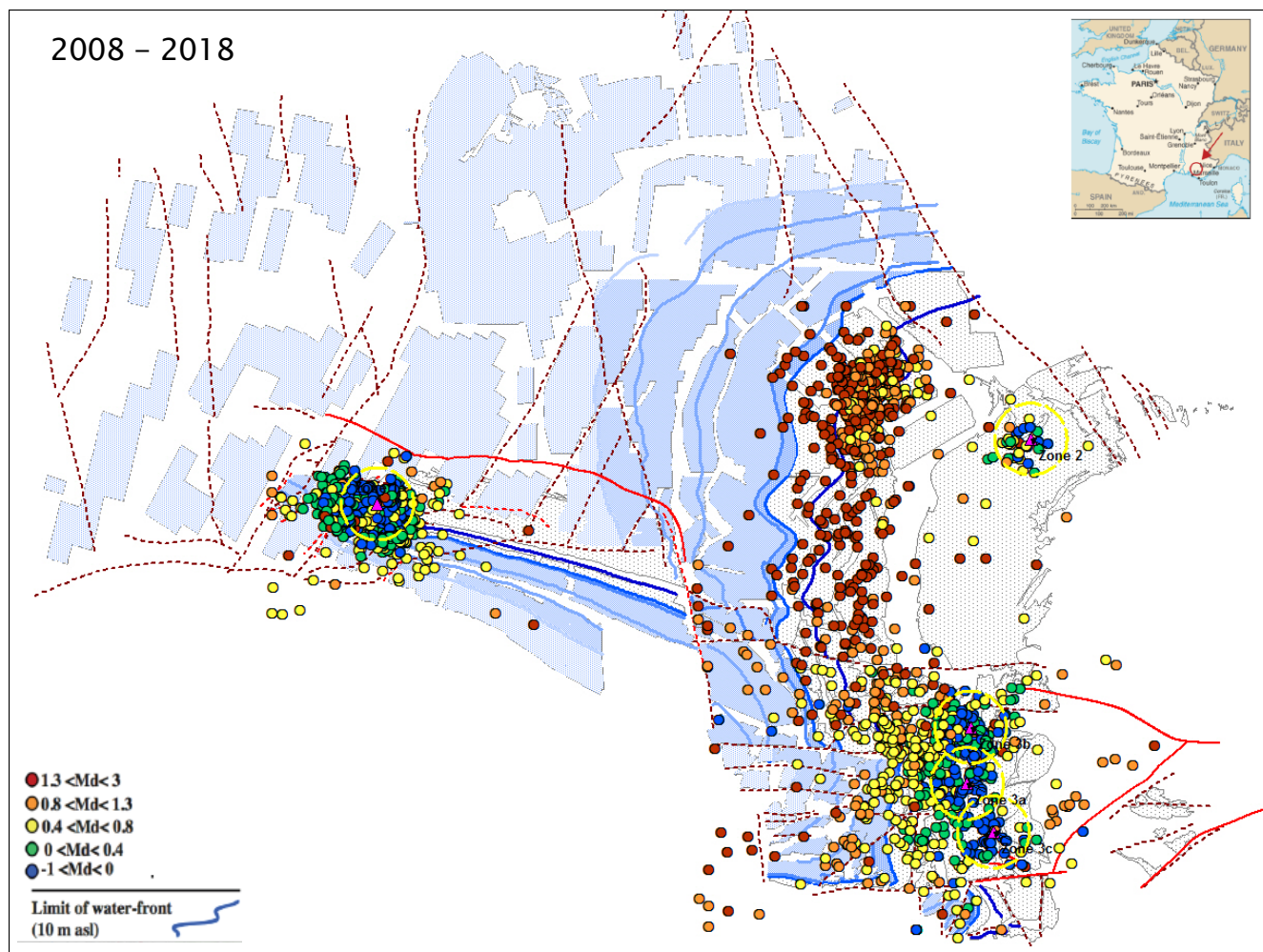
## Sismicité qui perdure longtemps après l'arrêt l'exploitation minière en 2003

### Faits

- Ennoyage des travaux miniers
- Sismicité importante, ~ 2500 événements depuis 2008
- Situés principalement au niveau du front d'ennoyage
- 3 crises sismiques ressenties en novembre 2012, décembre 2014 et janvier 2017
- Avec des magnitudes ~ 2
- Mécanismes à l'origine de cette sismicité
- Implications Aléa / Risque sismique
- Sujet de thèse INERIS

### Références :

- INERIS : Kinscher et al. 2016, 2017; Matrullo et al. 2015; Contrucci et al. 2013
- En collaboration avec GéoRessources, le BRGM et l'IPGP





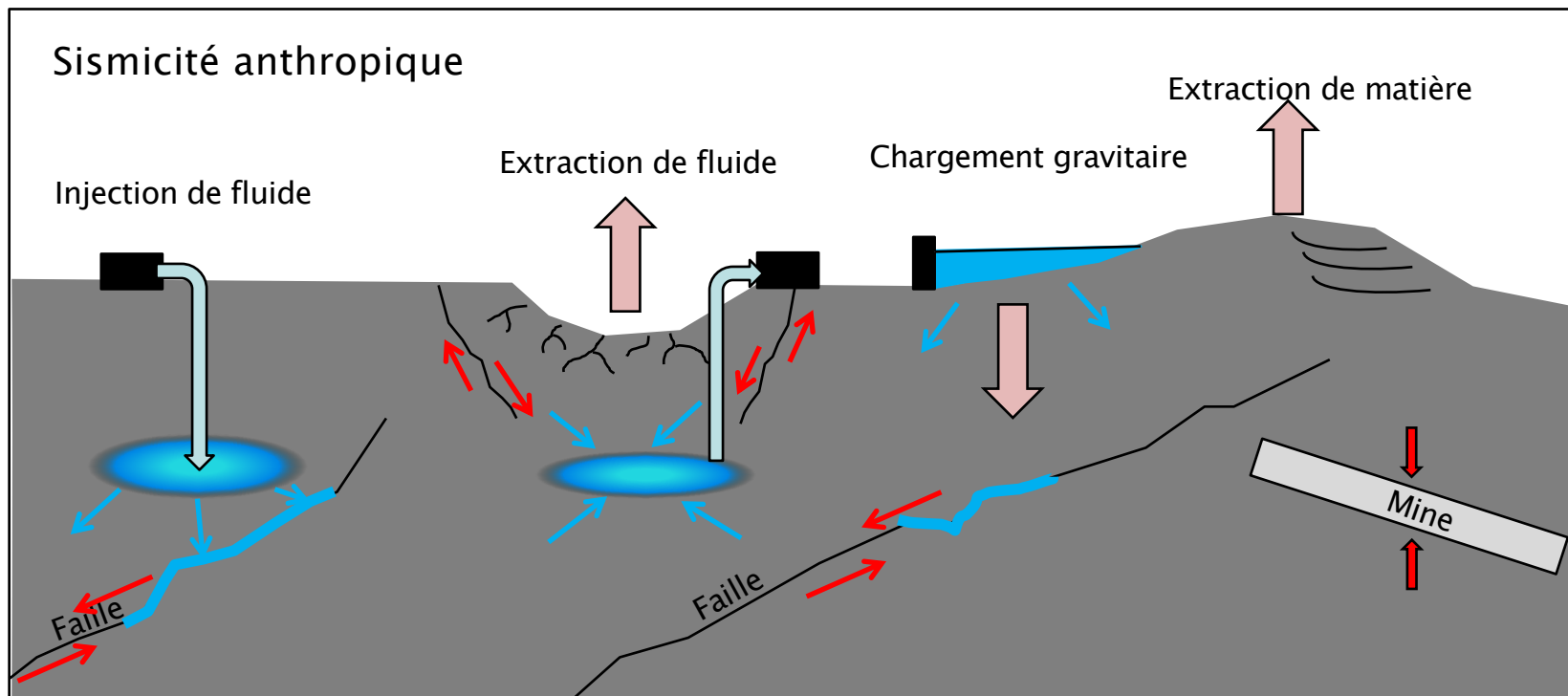
# Comment les séismes anthropiques se produisent ?

Phénomènes les plus dangereux :

- **sismicité déclenchée** : réactivation d'une faille proche de l'état critique
- **sismicité induite** à proximité des enjeux : e.g. coups de terrain en mine

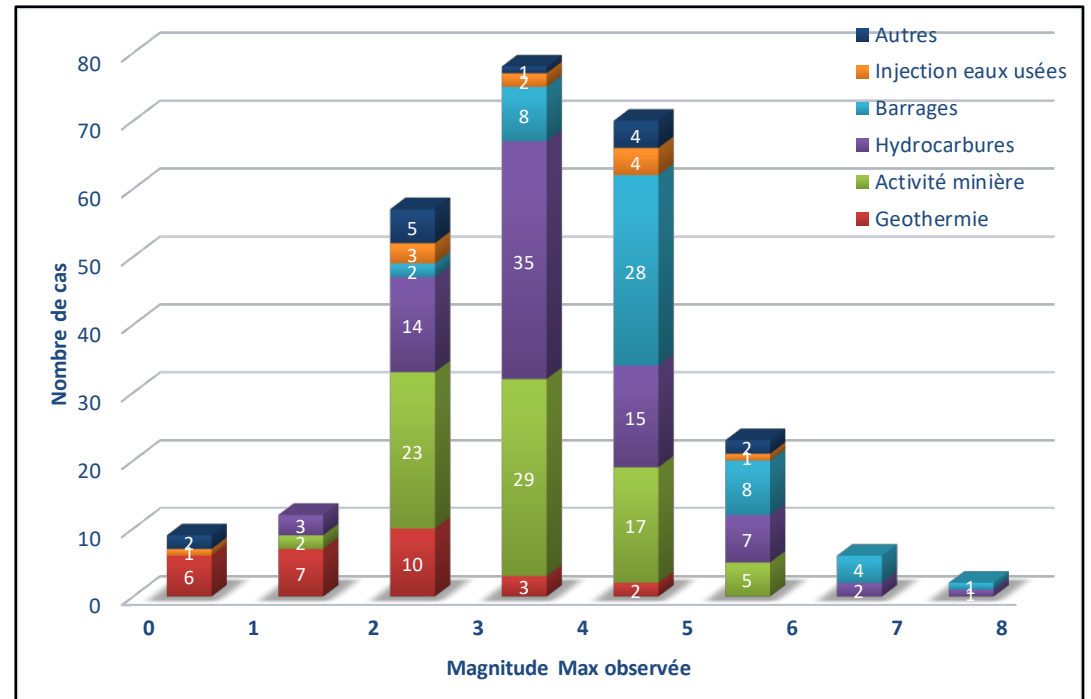
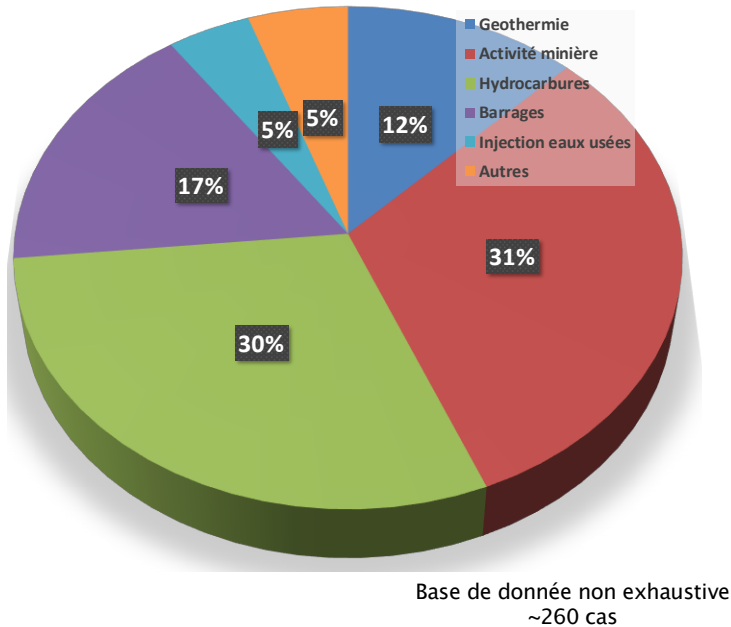
Processus physiques :

- **chargement ou déchargement gravitaire**
- **variation de la pression d'eau interstitielle**
- **Couplage des deux phénomènes** : remplissage de barrage, ennoyage des mines



D'après Ellworth et al. 2013 et McGarr et al., 2002

# Quelles sont les industries qui peuvent produire des séismes ?



## Quelques exemples :

- Exploitation minière  
2008, **Vallée de la Sarre**, Allemagne : M 4.3  
2014, **Orkney**, Afrique du Sud, M 5.5
- Production de pétrole  
1976, **Gazli**, Ouzbékistan : M 7
- Exploitation de gaz naturel  
2014, **Groningen**, Hollande : M 3.6  
2016, **Lacq**, France: M 4
- Injection souterraine d'eau de rejet  
2011, **Prague**, USA : M 5.7  
2016, **Pawnee**, USA : M 5.8
- Fracturation hydraulique  
2011, **Blackpool**, Grande Bretagne : M 2.1
- Géothermie profonde  
2006, **Bale**, Suisse : M 3.4
- Stockage de gaz  
2013, **Projet CASTOR**, Offshore Espagne : M 4
- Séquestration CO<sub>2</sub>  
**Sleipner**, Mer du Nord, M 2.5
- Envoilage des mines abandonnées  
2012, 2014 et 2017 **Provence**, France : M ~ 2  
2005, **Stilfontein**, Afrique du Sud : M 5.3
- Barrages hydrauliques  
1967, **Koyna**, Inde : M 6.3  
2008, **Sichuan**, Chine : M 7.9

- Toutes les industries utilisant le sous sol sont concernées
- Le nombre de cas de sismicité est faible par rapport à la totalité des projets
- Les magnitudes sont en générale modérées



# Comment gérer le risque de sismicité anthropique ?

$$\text{RISQUE} = \text{ALEA} \times \text{ENJEUX}$$



## Identification des failles

### Modifications du processus industriel

#### ▪ Maitrise chargement / déchargement gravitaire

- Limitation hauteur barrage / vitesse remplissage
- Optimisation séquences d'extraction/ design des travaux miniers
- Techniques de relaxation des contraintes
- ...

#### ▪ Maitrise de la pression interstitielle en profondeur

- Injection à faible pression
- Équilibre des volumes injectés / extraits
- Séquestration de fluides: Formation géologique perméable
- Viscosité du fluide
- Géométrie du réservoir
- ...

**Possibilité de la présence d'une faille, en état sub-critique, située en profondeur, NON identifiée au préalable**

## Enjeux de surface

- Sismicité ressentie
- Dommages mineurs (non structuraux)
- **Risque important pour la sécurité publique (selon vulnérabilité) :**
  - Renforcement du bâti → adaptation des normes parasismiques à la sismicité anthropique
  - Relocalisation du projet
  - Abandon du projet

## Communication et information du public

- Programme de communication et d'information auprès notamment de la population
- Implication du public dans les décisions et leur mise en œuvre

## Sécurité au travail des mineurs

- Diminution de l'exposition des mineurs
- Diminution des conséquences des dommages : technologies de renforcement des ouvrages

**Surveillance microsismique**

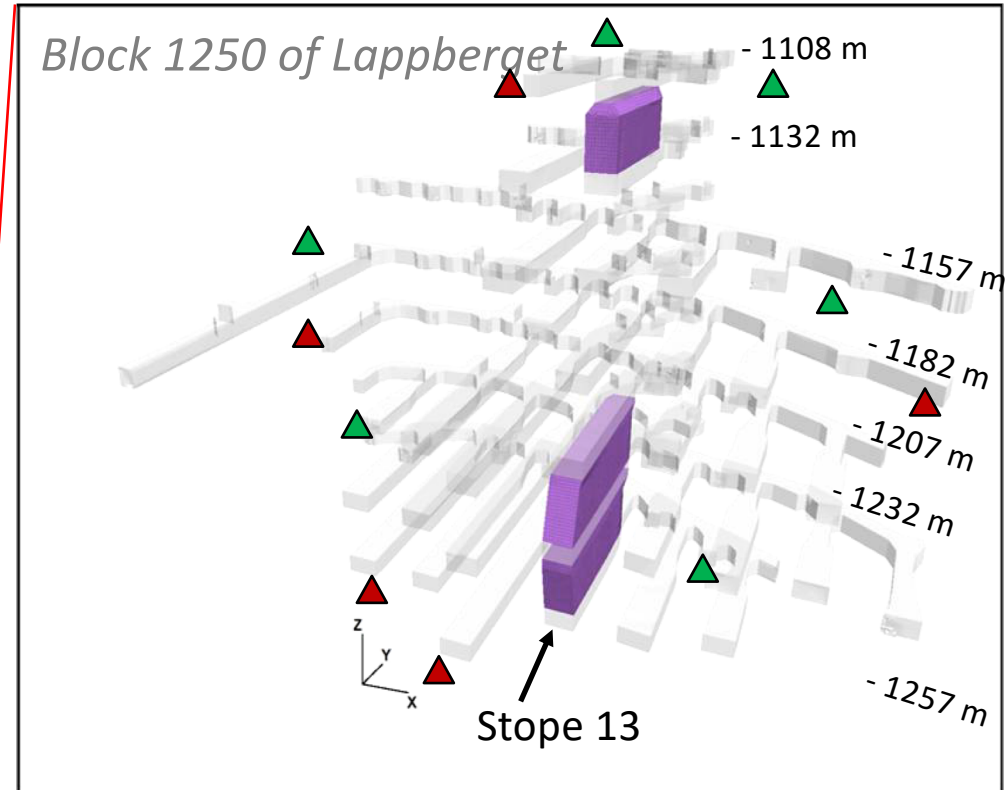
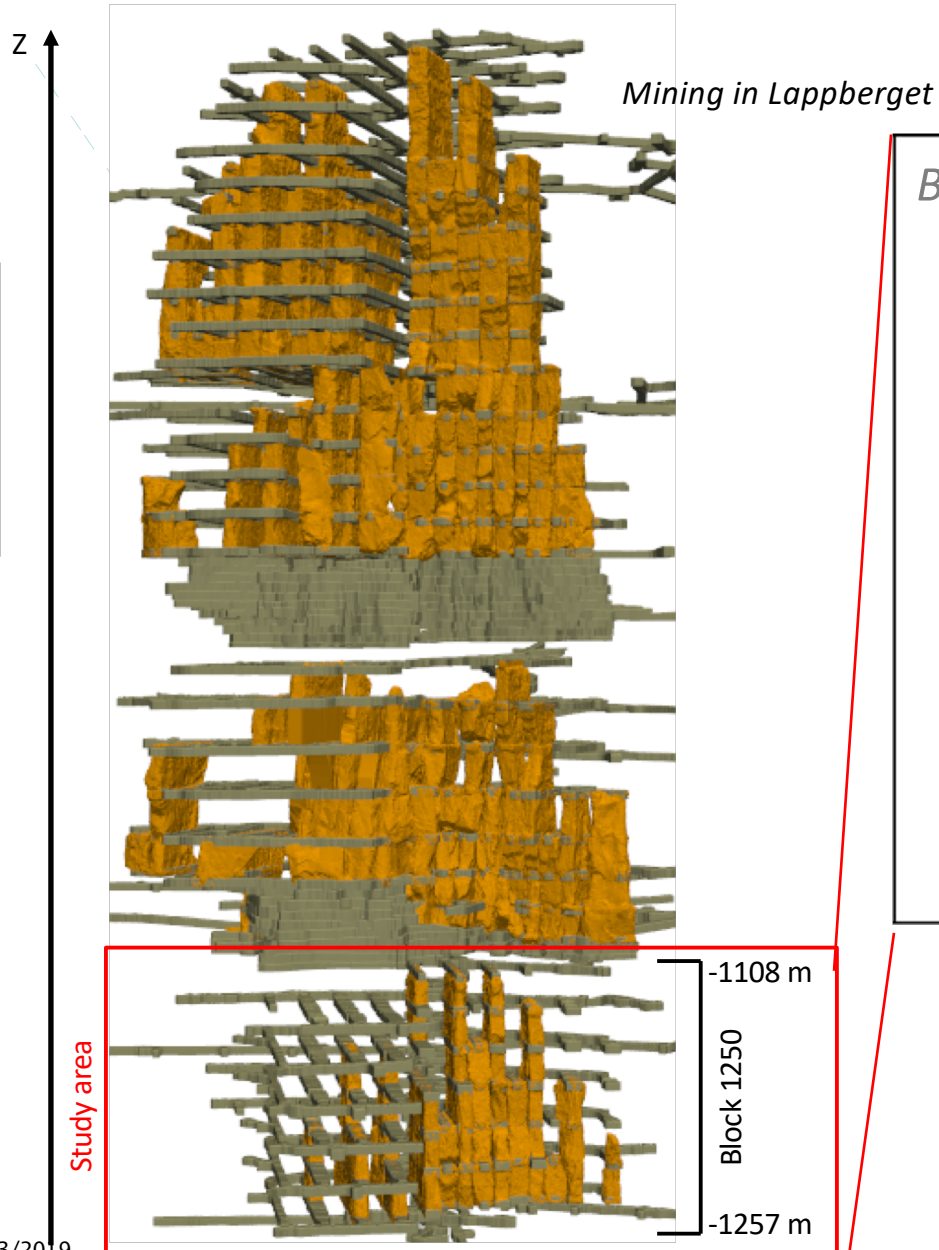
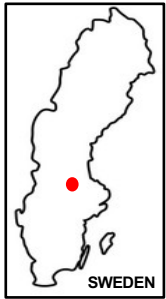
# Quand & Comment surveiller ?

## Surveillance microsismique : Outil privilégié de la gestion du risque

- **Avant** : Caractérisation de l'**état initial** avant l'installation d'une opération industrielle
- **Pendant** : **Suivi** pendant l'activité industrielle
- **Après** : Suivi du **retour à la normale** après l'arrêt de l'activité
  
- **Réseau local** et dense plus performant (détectabilité et d'erreur de localisation) que les réseaux nationaux :
  - Quantification du **niveau de vibrations**
  - Transmission des données en **temps réel**
  - **Localisation** précise des événements
  
- Mise en place de **système d'alerte** pour la conduite des opérations industrielles et la sécurité des personnels

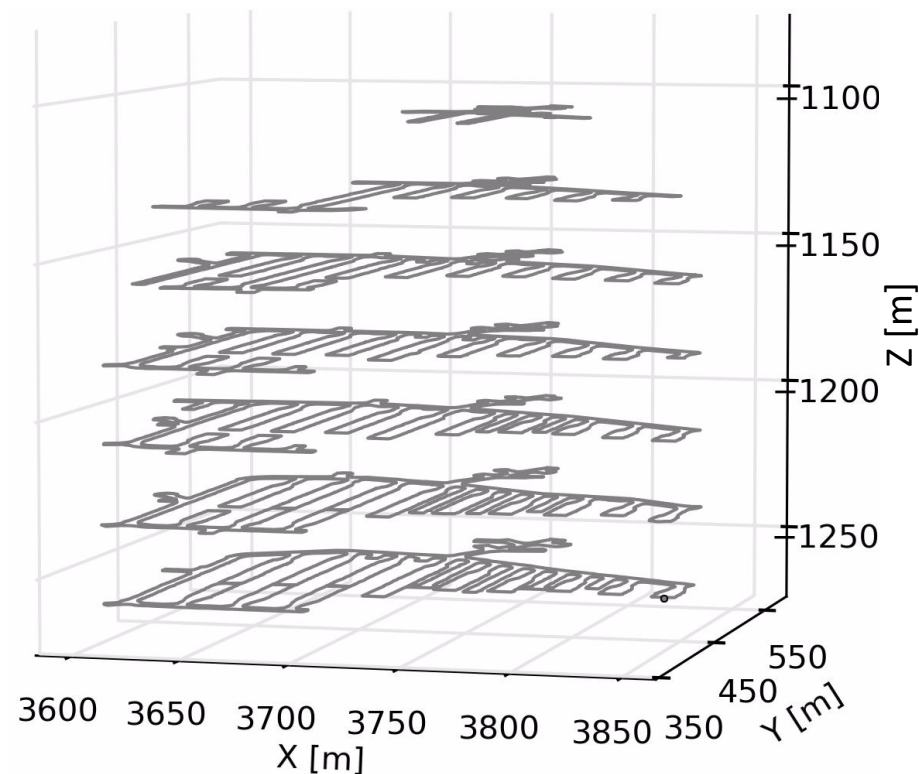
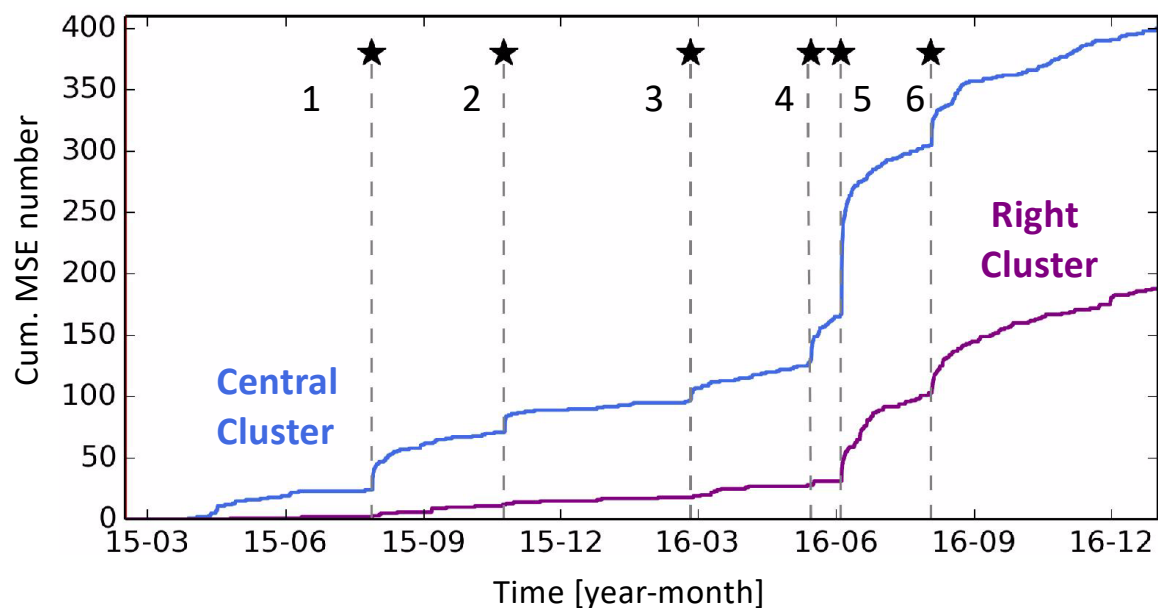


# Surveillance microsismique : Prévention risque sismique en mine profonde



# Surveillance microsismique : Prévention risque sismique en mine profonde

Suivi spatio-temporel de la réponse sismique à l'extraction  
Sécurité des mineurs



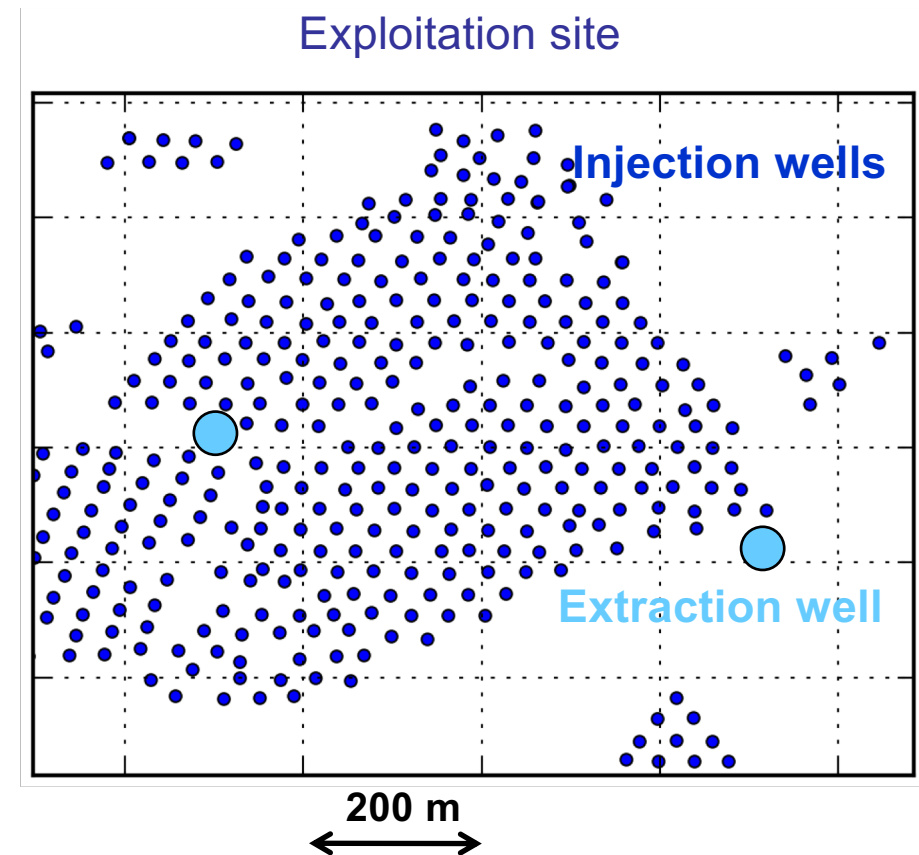
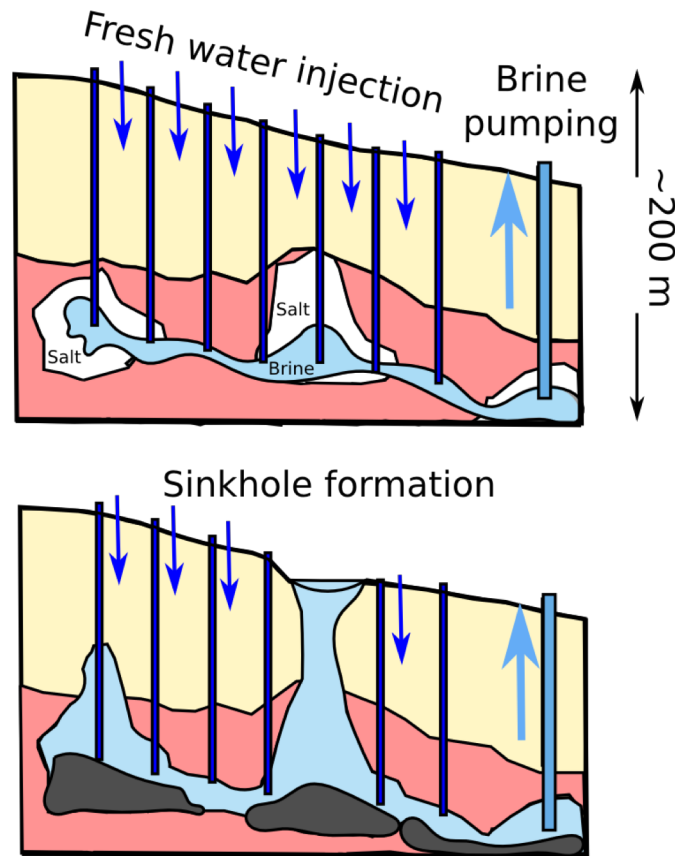
De Santis et al., 2019  
Tonnellier et al., 2016



# Surveillance microsismique : Prévention du risque d'effondrement localisé dans les exploitations de sel par dissolution

Surveillance microsismique pour la mitigation du risque d'effondrement localisé (fontis) et assurer la sécurité du personnel

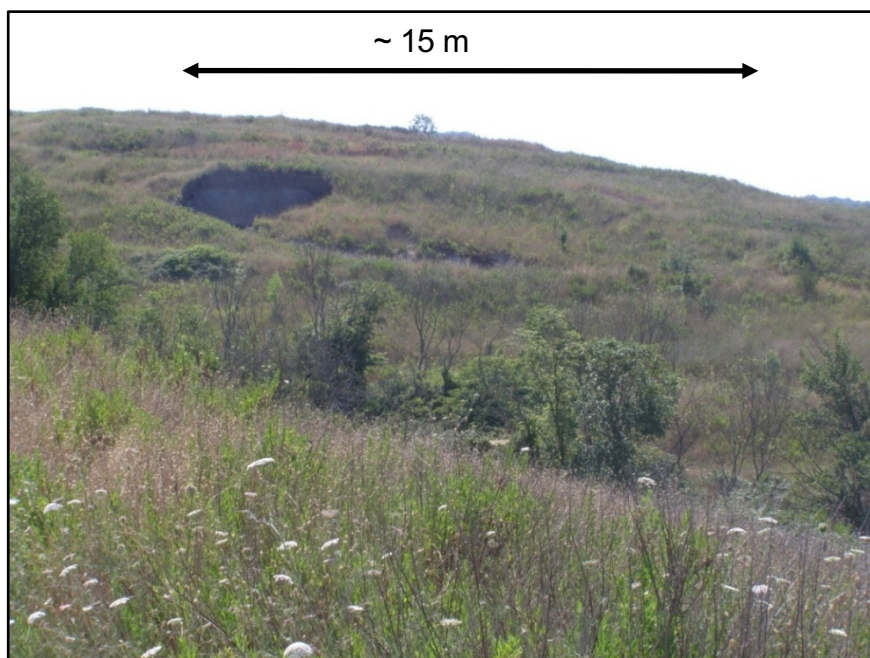
La complexité géologique empêche une prédiction précise et fiable de l'occurrence de ces effondrements



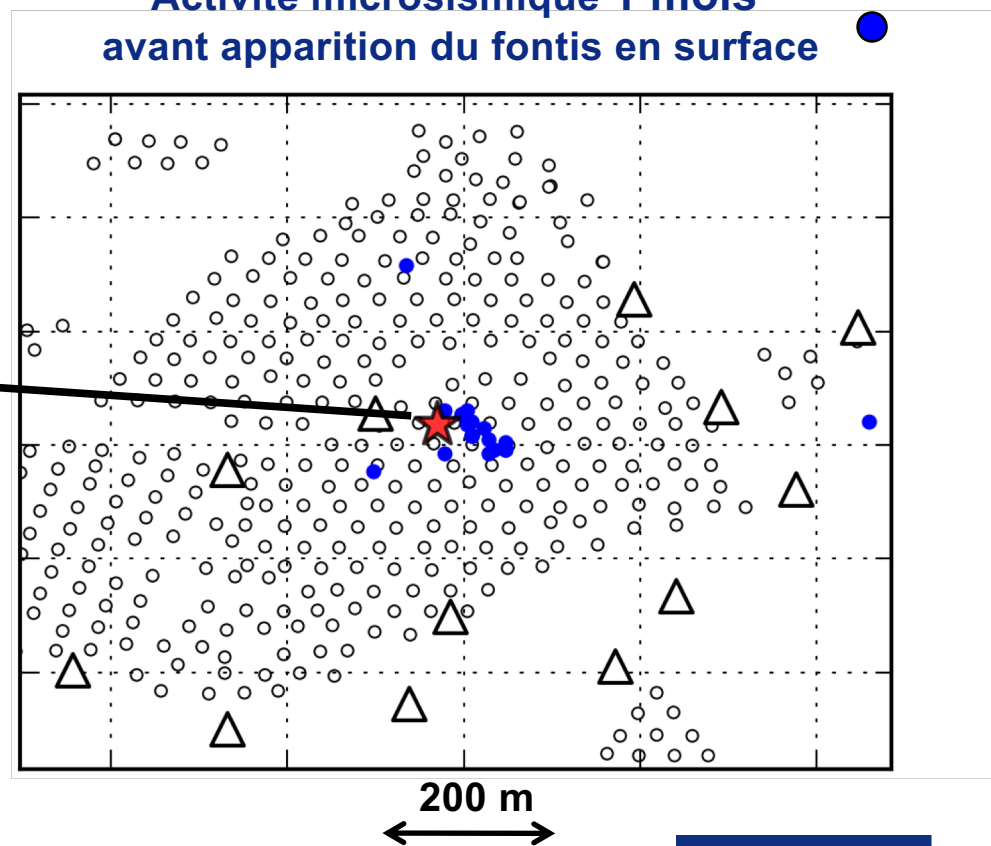
# Anticipation des effondrements par la surveillance microsismique

⇒ Anticipation des fontis quelques jours à quelques semaines avant qu'ils ne débouchent en surface

Exemple fontis ★



Activité microsismique 1 mois avant apparition du fontis en surface ●

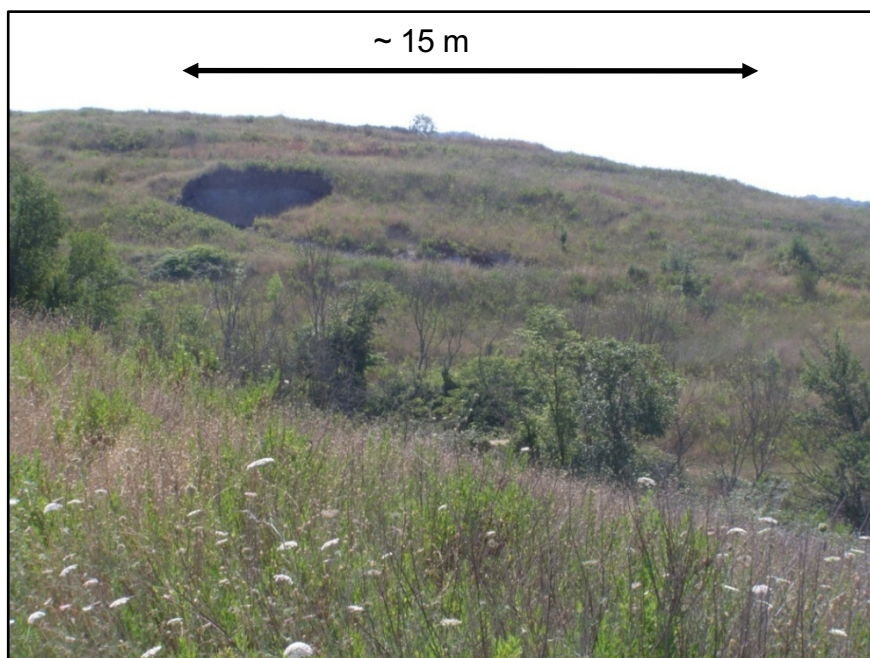


Kinscher et al., 2017

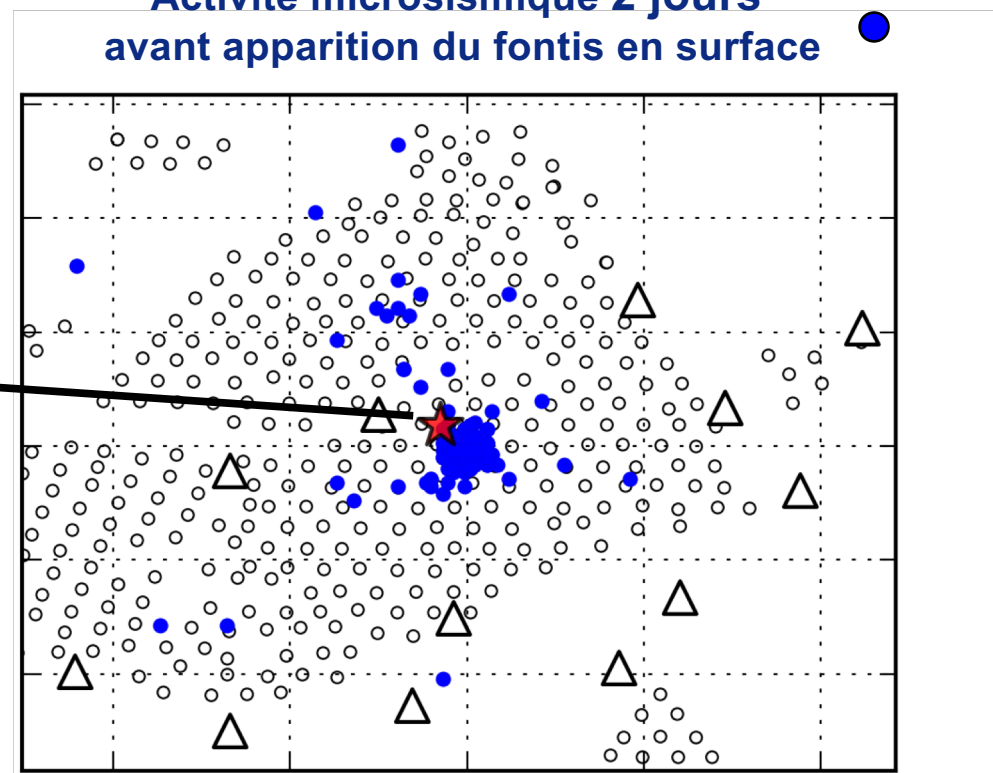
# Anticipation des effondrements par la surveillance microsismique

⇒ Anticipation des fontis quelques jours à quelques semaines avant qu'ils ne débouchent en surface

Exemple fontis ★



Activité microsismique 2 jours avant apparition du fontis en surface



200 m

Kinscher et al., 2017



# Sismicité anthropique : Nouveaux défis

## Connaissance et d'évaluation de l'aléa

Site industriel est déjà en exploitation : est-il à l'origine ou non de la sismicité observée ?

Projet futur : produira-t-il ou non une sismicité sur un site donné ?

- Complexité de la structure du sous-sol → difficultés sur la connaissance de ses propriétés hydro-géo-mécaniques et de son état de contrainte
  - Acquérir des mesures et données de qualité → difficultés de mise en œuvre et cout financier important

## Maitrise de l'aléa

Comment maitriser du processus industriel pour réduire la sismicité ?

- Modèles prédictifs de la sismicité anthropique → Repose sur les données
  - Quantifier/modéliser de l'effet du processus industriel sur la nucléation des séismes et leur intensité

## Gestion du risque

Comment surveiller ?

- Calibrage des dispositifs d'alerte

Comment diminuer la vulnérabilité ? Comment prendre en compte le risque sismicité anthropique ?

- Constructions parasismiques adaptées (normes pour séismes naturels, pas nécessairement adaptées aux séismes anthropiques)
- Cartes d'aléa sismiques (zonage sismique) en zone de sismicité naturelle faible

# Conclusions

- Toutes les géo-industries peuvent générer des séismes → **phénomène rare mais difficile à prédire**
- Risques pour la « sécurité publique » → **régions à sismicité naturelle faible, où le bâti n'est pas conçu pour résister aux vibrations**
- Risques pour la « sécurité des travailleurs » → **proximité des travailleurs par rapport au phénomène**
- Problèmes d'acceptabilité sociale et rejet de certains projets, **même avec une sismicité faible à modérée, ne provoquant pas de dégâts**
- Gestion du risque → caractérisation de l'aléa, maîtrise processus industriel, REX, enjeux (réduction vulnérabilité), **surveillance microsismique**

## Rapport de synthèse Ineris :

[https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/DRS-17-149681-07390D-RAP-sismicite%C3%A9\\_induite-EKI-ICo\\_2.pdf](https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/DRS-17-149681-07390D-RAP-sismicite%C3%A9_induite-EKI-ICo_2.pdf)  
<https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/Publication%20Ineris-DRS-18-171539-05280A-RAP.pdf>



maîtriser le risque  
pour un développement durable



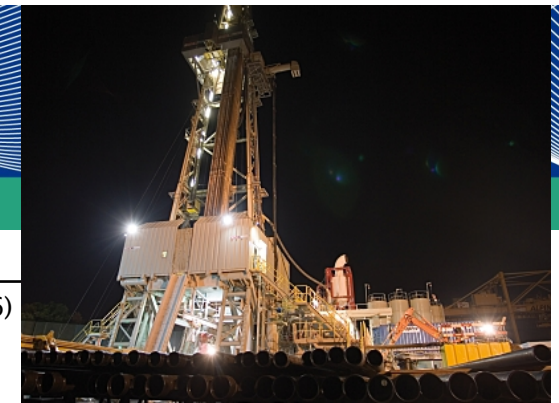
Merci pour votre attention



# En France

| Localisation                   | Magnitude maximum | Type d'industrie (à l'origine du séisme) | Année            |
|--------------------------------|-------------------|--|------------------|
| <b>Soultz-Sous-Forêts</b>      | 2,7 - 2,9         | Géothermie profonde                      | 2003 – 2005      |
| <b>Rochonvillers</b>           | 4                 | Activité minière                         | 1974             |
| <b>Saar</b>                    | 3,7               | Activité minière                         | 2008             |
| <b>Lacq</b>                    | 4,2               | Exploitation d'hydrocarbures             | 1979             |
| <b>Grandval</b>                | Ressenti          | Barrage hydraulique                      | 1963             |
| <b>Monteynard</b>              | 4,9               | Barrage hydraulique                      | 1963             |
| <b>Vouglans</b>                | 4,4               | Barrage hydraulique                      | 1971             |
| <b>Rochonvillers</b>           | 4,3               | Activité minière                         | 1974             |
| <b>Merlebach</b>               | 3,9               | Activité minière                         | 1986             |
| <b>Merlebach</b>               | 4                 | Activité minière                         | 2001             |
| <b>Ronchonvillers</b>          | 5,2               | Activité minière                         | 1975             |
| <b>Gardanne</b>                | ~ 3               | Activité minière                         | 1994 - 2001      |
| <b>Gardanne</b>                | ~ 2               | Mine abandonnée                          | 2012, 2014, 2017 |
| <b>Cerville-Buissoncourt</b>   | 0,9               | Sel par dissolution                      | 2008             |
| <b>Tressange/Rochonvillers</b> | 4,3               | Activité minière                         | 1973             |

# Acceptabilité sociale et risques financiers



## 2006, Bâle, Suisse, Géothermie profonde

### Contexte

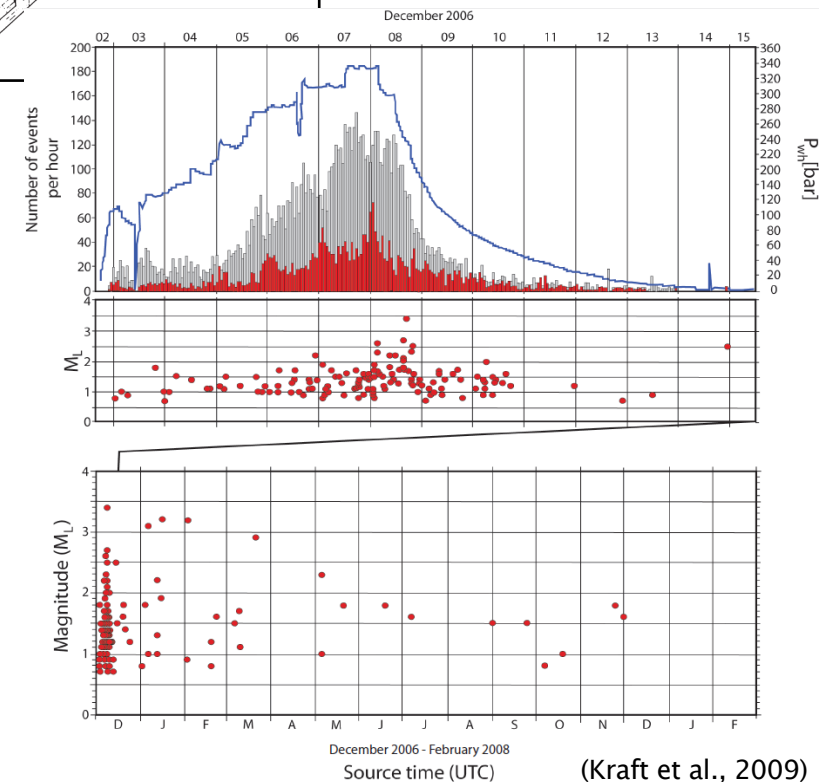
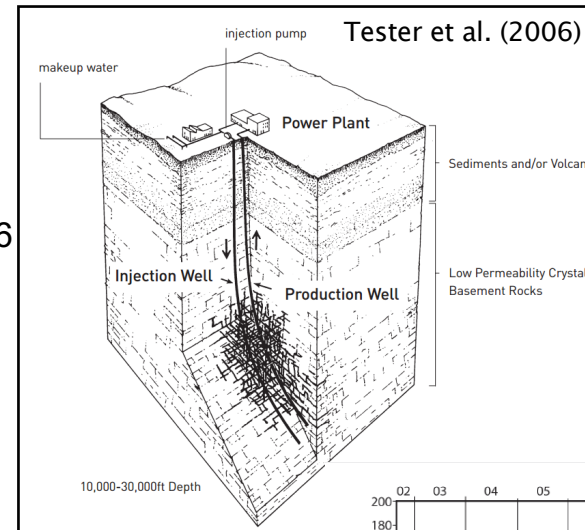
- 11 500 m<sup>3</sup> d'eau injectés en 6 jours (du 02/12/2006 au 08/12/2006) à 5 km de profondeur
- Forage situé au centre de la ville de Bâle

### Faits

- Occurrence de séismes de magnitudes > 2.6 → arrêt de l'injection
- Occurrence d'un séisme de magnitude 3.4, 5h après l'arrêt de l'injection – clairement ressenti
- 3 séismes de magnitude > 3 sur une période de 56 jours

### Conséquences

- **Sismicité ressentie par la population**
- **Suspension puis Abandon du projet**
- **~ 9 millions € pris en charge par les compagnies d'assurance**
- **Retour de la sismicité à un niveau normal dans 10 à 20 ans**



Ref. : Kraft et al., 2009

# Géothermie Profonde de Soultz-sous-Forêts

Microséismes à chaque stimulation (plusieurs milliers)

Magnitudes :  $-2 \leq M \leq 2,9$  dont plusieurs séismes ressentis

2003 : Magnitude Max de 2,9

- Modification des protocoles de stimulation

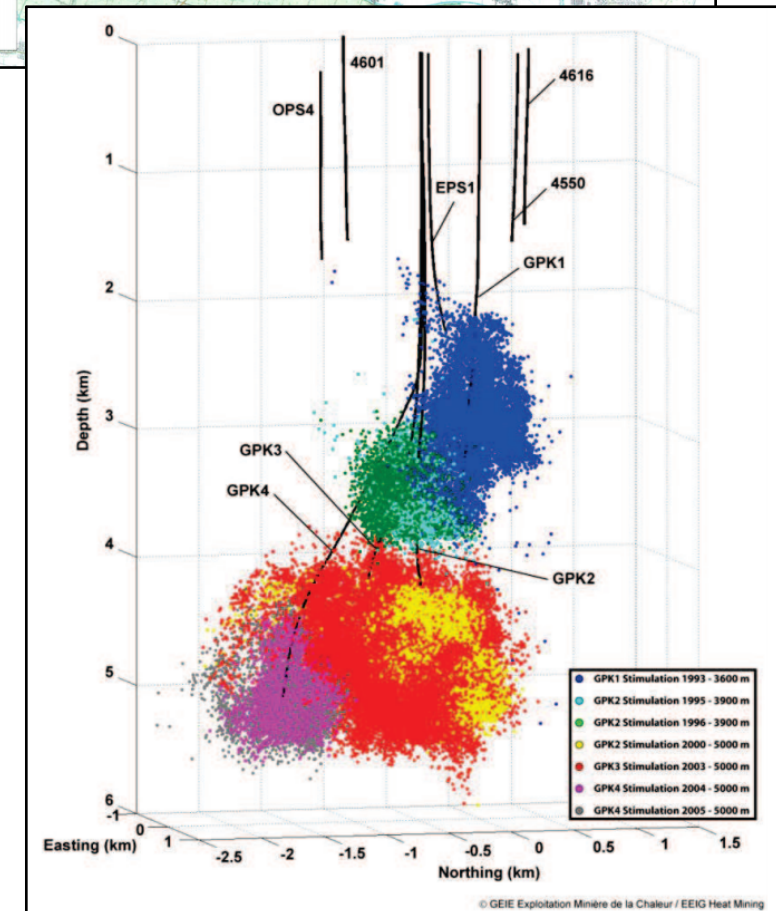
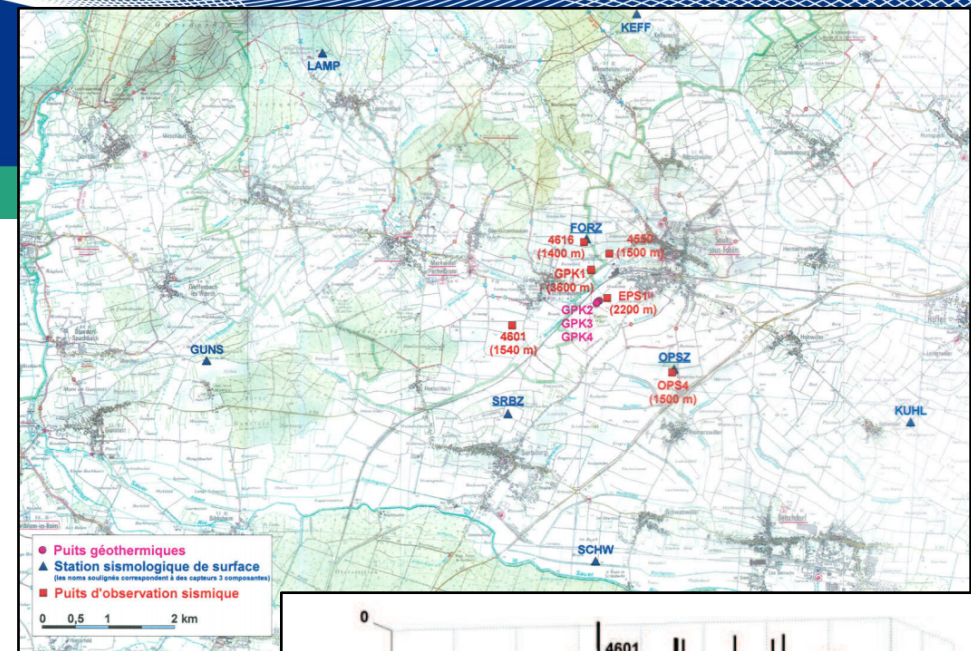
2004 – 2005 : diminution des pressions et des volumes injectés

- Sismicité réduite mais toujours ressentie magnitude max  $\sim 2,6$

2006 – 2007 : techniques de stimulation chimique permettant la réduction des volumes injectés

- Sismicité réduite

2016 : site en phase de production



Cuenot & Genter, 2013  
Portier et al., 2009



# Séisme Anthropique ou Naturel ?

Même processus mis en jeu : glissement le long d'une faille

- Distinction difficile à partir de la seule analyse du signal sismologique
- Naturelle :
  - localisation en générale plus profonde
- Anthropique :
  - probabilité forte lorsque l'activité industrielle et la sismicité sont corrélées dans le temps et dans l'espace
- Corrélation qui n'est pas toujours respectée lorsque les fluides sont impliqués dans le processus industriel
- Approche statistique
  - Variation du taux de sismicité par rapport à un niveau de référence

→ Responsabilité de l'exploitant ou du maitre d'ouvrage