

RAPPORT D'ÉTUDE  
DRS-17-149681-07390D

01/12/2017

**ÉTAT DES CONNAISSANCES CONCERNANT LES ALEAS ET  
LES RISQUES LIÉS À LA SISMICITÉ ANTHROPIQUE**

**INERIS**

maîtriser le risque |  
pour un développement durable |



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

Direction des Risques du Sol et du Sous-Sol (INERIS)

Liste des personnes ayant participé à l'étude : Cyrille Balland, Franz Lahaie et Marwan Al Heib.

## PREAMBULE

Ce document a été réalisé dans le cadre de la mission d'appui de l'INERIS au Ministère de la Transition écologique et solidaire. Il a été établi sur la base de l'expérience de l'INERIS, ainsi que des données, scientifiques et techniques, disponibles dans la littérature.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

Ce rapport a fait l'objet d'une relecture scientifique avisée par MM. Pascal Bernard, Physicien du Globe à l'Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP, France) et Arnaud Mignan, Sismologue à l'École polytechnique fédérale de Zurich (ETHZ, Suisse), experts dans le domaine de la sismicité anthropique, qu'ils soient remerciés pour leurs nombreux conseils et remarques pertinentes qui ont permis d'améliorer nettement le présent rapport d'étude.

Ce rapport a également été relu par M. Benjamin Leroux de l'Institut National de l'Environnement industriel et des Risques (INERIS). Nous le remercions pour son regard perspicace qui a bénéficié à la qualité du rapport.

|         | Rédaction  | Vérification  | Approbation   |
|---------|--|---|---|
| NOM     | I. CONTRUCCI<br>E. KLEIN   | S. COCCIA<br>C. FRANCK  | P. BIGARRE  |
| Qualité | Ingénieur à<br>Responsable de<br>l'Unité Auscultation et<br>Surveillance<br>Géotechnique et<br>Géophysique   | Ingénieur à l'Unité<br>Auscultation et<br>Surveillance<br>Géotechnique et<br>Géophysique<br>Délégué Appui<br>Technique à la Direction<br>des Risques du Sol et<br>du Sous-Sol | Directeur à la Direction<br>des Risques du Sol et<br>du Sous-Sol                      |
| Visa    | <br> | <br>   |  |

## RESUME

Le lien entre activité industrielle dans le sous-sol et sismicité a été mis en évidence dès le début du XX<sup>ème</sup> siècle dans les mines d'or profondes d'Afrique du Sud. Aujourd'hui, l'accroissement de la demande mondiale en énergie, en ressources et en matières premières conduit à la multiplication de projets potentiellement générateurs de sismicité anthropique ressentie. Ces cas, rares au regard du nombre de projets à travers le monde, sont pour les plus emblématiques, présentés dans ce rapport, qui s'intéresse également aux questions relatives à la caractérisation de l'aléa de sismicité anthropique, à la mitigation des risques et à la réglementation.

Les mécanismes en jeu sont relativement bien connus, et l'on distingue maintenant la sismicité induite, dont le principal moteur est la perturbation anthropique du sous-sol, de la sismicité déclenchée, consécutive à la réactivation de failles géologiques naturelles en quasi équilibre limite, en partie du fait de l'activité industrielle. Cette sismicité anthropique peut mettre en péril la sécurité publique, notamment lorsqu'elle a lieu dans des régions de sismicité naturelle faible où il n'existe aucune prescription parasismique. De plus, l'acceptabilité sociale peut rapidement être remise en cause, et conduire à l'arrêt voire l'abandon de projets industriels y compris dans le cas de rares séismes ressentis de très faible intensité. Dans certains cas, cette sismicité peut perdurer longtemps après l'arrêt des opérations industrielles, voire se produire à plusieurs kilomètres des opérations. Ces situations ont été observées notamment lorsque des opérations d'injections / extractions de fluides sont en jeu. La sismicité dite déclenchée reste tout de même le phénomène le plus redouté car potentiellement le plus destructeur.

Des solutions, basées sur la surveillance microsismique couplée au pilotage du processus industriel, peuvent être envisagées par les exploitants pour maîtriser l'aléa de sismicité anthropique. Ainsi différentes stratégies sont développées autour des paramètres d'exploitation, pour optimiser le schéma d'extraction du gisement, diminuer les pressions de fluide dans le sous-sol, ou optimiser le chargement ou déchargement gravitaire en profondeur et/ou en surface. De même des solutions existent pour réduire la vulnérabilité des enjeux (bâti, infrastructures ...) quand la relocalisation du projet n'est pas possible. Concernant la sécurité des mineurs au travail, les opérateurs disposent de différentes approches pour limiter l'exposition des travailleurs.

Le monde industriel et la communauté scientifique sont néanmoins face à plusieurs défis. On peut citer notamment la caractérisation de l'aléa de sismicité anthropique et la capacité à différencier les séismes naturels des séismes anthropiques qui présentent un intérêt scientifique évident et un impact important notamment pour tout ce qui relève de la responsabilité de l'exploitant. D'autre part, la réussite et l'acceptabilité d'un projet industriel potentiellement générateur de sismicité nécessite la plus grande transparence, tout au long de la vie du projet, par la mise en place d'un programme de communication et d'information cohérent auprès des différentes parties prenantes et en particulier de la population locale.

## MOTS-CLES

Industrie, mines, hydrocarbures, géothermie, sismicité, aléa, risque, gestion, acceptabilité sociale.

## TERRITOIRE

France, Europe, Monde

## **ABSTRACT**

The relation between underground industrial activity and seismicity has been highlighted at the beginning of the twentieth century in the deep gold mines of South Africa. Today, as the demand for mineral resources and energy keeps increasing, the number and size of industrial projects as well as new emerging underground industries that can potentially induce seismicity is also raising. Some of the most illustrating cases are presented in this report. This report also deals with the issues related to seismic hazard assessment, risk mitigation and emerging regulations in the context of anthropogenic seismicity.

The mechanisms of anthropogenic seismicity are now relatively well understood, and researchers suggest distinguishing induced events which results from the anthropogenic underground disturbance itself, from triggered events, which are related to the reactivation of natural geological faults due to industrial activity. In some extreme situations, anthropogenic seismicity can endanger public safety, especially when man-triggered earthquakes occur in regions with low natural seismicity and poor seismic prescription and sensitivity of the populations. In addition, social acceptability can quickly be challenged, and lead to the cessation or abandonment of industrial projects even when only rare earthquakes with very low intensity are felt. In some cases, induced seismicity can persist long after the ending of the underground operations. It can even occur several kilometers from the operations. These situations have been observed especially during fluid injection and extraction activities. The so-called triggered seismicity remains the potentially most destructive threat to public safety.

Currently microseismic monitoring has become a prominent tool for managing the risk of anthropogenic seismicity. The near to real-time processing of microseismic data, coupled with the monitoring of industrial parameters offers a helpful approach to decision making. Similarly, solutions exist to reduce the vulnerability of buildings and infrastructures, when the relocation of the project is not possible. Regarding the safety of minors at work, operators have developed numerous approaches to limit worker exposure.

Both the world of industry and the world of research are nevertheless facing several challenges. One of them concerns the characterization of the anthropogenic seismic hazard and the capability to distinguish natural earthquakes from anthropogenic earthquakes. This is of obvious interest for all parties involved; it may also have a significant impact in terms of responsibility of the operator. The success of future deep projects depends obviously on how well anthropogenic seismicity is managed and communicated to be acceptable to all stakeholders.

## **KEYWORDS**

Industry, mines, hydrocarbons, geothermal, seismicity, hazard, risk, management, social acceptance.

## **TERRITORY**

France, Europe, World

# TABLE DES MATIÈRES

|  |           |
|--|-----------|
| <b>RESUME</b> .....  | <b>3</b>  |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | <b>4</b>  |
| <b>TABLE DES MATIÈRES</b> .....  | <b>5</b>  |
| <b>1. INTRODUCTION</b> .....   | <b>7</b>  |
| <b>2. HISTORIQUE, DEFINITIONS ET NOTIONS UTILES</b> .....  | <b>9</b>  |
| 2.1 Historique .....   | 9         |
| 2.2 Définition de la sismicité anthropique.....  | 9         |
| 2.3 Principales caractéristiques d'un séisme.....  | 10        |
| 2.3.1 La magnitude .....   | 10        |
| 2.3.2 L'intensité .....  | 11        |
| 2.3.3 Les pics d'accélération ou de vitesse du sol.....  | 12        |
| 2.4 Les mécanismes et facteurs en jeu.....   | 13        |
| 2.4.1 Lors de l'extraction de ressources minérales.....  | 13        |
| 2.4.2 Par l'injection de fluide.....   | 14        |
| 2.4.3 Par l'extraction de fluide .....   | 14        |
| 2.4.4 Les cas complexes .....  | 15        |
| <b>3. CAS D'ETUDES</b> .....   | <b>17</b> |
| 3.1 Industrie minière.....   | 18        |
| 3.2 Géothermie profonde à haute température .....  | 20        |
| 3.3 Stockage de gaz .....  | 22        |
| 3.4 L'exploitation conventionnelle d'hydrocarbures .....   | 23        |
| 3.4.1 Sismicité due à la déplétion de réservoirs de gaz.....   | 23        |
| 3.4.2 Sismicité due à l'extraction de pétrole .....  | 25        |
| 3.5 Exploitation d'hydrocarbures non conventionnels : Gaz de schiste et<br>Fracturation hydraulique..... | 27        |
| 3.6 Injection pour l'élimination d'effluents industriels.....  | 28        |
| 3.7 Remplissage de barrages hydrauliques .....   | 31        |
| 3.8 Séquestration de CO <sub>2</sub> .....   | 33        |
| 3.9 Autres cas de sismicité anthropique.....   | 34        |
| 3.10 Synthèse sur les études de cas et le type d'industrie associée.....                                 | 34        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>4. COMMENT EVALUER L'ALEA DE SISMICITE ANTHROPIQUE .....</b>                                     | <b>39</b> |
| 4.1 Données d'entrée classiques .....   | 39        |
| 4.2 Modèles prédictifs : approches déterministe et probabiliste .....                               | 40        |
| 4.3 Révision des cartes d'aléa sismique à l'échelle d'un territoire.....                            | 41        |
| 4.4 Caractérisation de l'aléa sismique dans l'industrie minière .....                               | 42        |
| <b>5. RISQUES LIES A LA SISMICITE ANTHROPIQUE .....</b>   | <b>43</b> |
| 5.1 Spécificité de la sismicité anthropique et lois d'atténuation.....                              | 43        |
| 5.2 Risque pour le bâti et les infrastructures de surface .....                                     | 44        |
| 5.3 Risques sur les installations industrielles .....   | 46        |
| 5.4 Risque pour les ouvrages souterrains.....   | 46        |
| 5.5 Risque pour les forages et les pipelines.....   | 47        |
| 5.6 Impacts sur l'environnement .....   | 47        |
| 5.7 Risques psycho-sociaux et financiers .....  | 48        |
| <b>6. PREVENTION ET MITIGATION DES RISQUES.....</b>   | <b>51</b> |
| 6.1 Surveillance microsismique.....   | 51        |
| 6.2 Surveillance multi-paramètres.....  | 52        |
| 6.3 Système de feu de signalisation.....  | 53        |
| 6.4 Contrôle du processus industriel / maîtrise de l'aléa .....                                     | 54        |
| 6.5 Mitigation du risque sismique dans les mines .....  | 55        |
| 6.6 Retour d'expérience de l'utilisation de l'outil microsismique pour l'aide à la<br>décision..... | 56        |
| 6.7 Gérer le risque de séismes anthropiques comme celui de la sismicité<br>naturelle ? .....        | 57        |
| 6.8 Aspects réglementaires.....   | 59        |
| 6.8.1 La situation en France .....  | 59        |
| 6.8.2 Quelques exemples de situations règlementaires à l'étranger .....                             | 60        |
| <b>7. VEROUS ET PISTES DE RECHERCHE .....</b>   | <b>63</b> |
| <b>8. CONCLUSIONS .....</b>   | <b>65</b> |
| <b>9. LISTE DES ANNEXES .....</b>   | <b>67</b> |
| <b>10. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>  | <b>69</b> |

## **1. INTRODUCTION**

Depuis la révolution industrielle, la demande mondiale en énergie fossile comme en matières premières a engendré une augmentation considérable de l'exploitation des ressources du sous-sol. Ainsi, la multiplication des sites, l'envergure croissante des projets, ainsi que les utilisations nouvelles du sous-sol augmentent d'autant la probabilité de générer une sismicité dite anthropique. Ces nouvelles utilisations sont aussi diverses que l'exploitation conventionnelle et non-conventionnelle d'hydrocarbures, leur stockage, l'injection définitive d'eau de rejet, la géothermie profonde, l'extraction minière, la séquestration géologique du CO<sub>2</sub>, le remplissage de retenues de barrages ou encore l'abandon et l'envoyage d'ouvrages souterrains. Par ailleurs, les progrès technologiques réalisés conduisent à repousser sans cesse les limites du sous-sol profond exploité, et augmentent le risque de générer des séismes anthropiques de ce fait. L'accroissement des cadences de production d'hydrocarbures, en particulier de gaz de schistes, est un autre facteur aggravant car il entraîne le stockage de volumes d'eau de rejet de plus en plus importants dans le sous-sol profond.

Nous verrons dans ce rapport que les opérations industrielles dans le sous-sol génèrent des modifications du champ de contraintes naturelles et/ou du champ de pression hydraulique dans le massif encaissant. Lorsque ces modifications hydromécaniques excèdent les propriétés de résistance des roches encaissantes, elles peuvent être à l'origine de phénomènes de rupture engendrant la sismicité. Celle-ci est en général de faible magnitude (< 2) et n'est que rarement ressentie en surface. Mais, sous certaines conditions, ces perturbations peuvent également réactiver des failles naturelles présentes sur un site et déclencher des séismes de plus forte magnitude.

Si le lien avec les activités anthropiques est clairement établi, et les mécanismes de rupture connus, la prédiction de ces aléas reste un objectif difficile à atteindre, comme pour les séismes naturels. Ainsi, pour une opération industrielle donnée, il est difficile d'estimer la date d'occurrence, la localisation et l'intensité d'un séisme anthropique de magnitude significative susceptible d'engendrer des risques. Les travaux de recherche menés aujourd'hui montrent qu'il reste de nombreuses inconnues sur la connaissance des paramètres qui gouvernent leur occurrence.

Ce rapport, établi dans le cadre du programme d'appui aux pouvoirs publics EAT-DRS06 CENARIS « Centre National de Surveillance des Risques du Sol et du Sous-sol », a pour objectif de dresser un état de l'art des connaissances actuelles et des travaux de recherche sur la sismicité anthropique. C'est un sujet d'intérêt tant pour le monde industriel que pour la communauté scientifique et qui est, comme nous le verrons, également une source croissante d'inquiétude pour les populations.

Ce rapport s'appuie sur une importante étude bibliographique et le retour d'expérience de nombreuses études de cas récentes ou emblématiques. Il débute par un rappel historique du phénomène de sismicité anthropique et la définition de quelques notions utiles à la compréhension des phénomènes et mécanismes en jeu. Puis, il décrit des cas d'accidentologie parmi les plus emblématiques, en couvrant les différents types d'industries. Les approches et les questions pour l'évaluation de l'aléa et du risque ainsi que les méthodes et solutions de surveillance sont présentées. Enfin, ce rapport décrit les différentes stratégies de mitigation des risques de séismes anthropiques et/ou déclenchés et apporte des éléments d'information quant à la réglementation en vigueur.



## **2. HISTORIQUE, DEFINITIONS ET NOTIONS UTILES**

### **2.1 HISTORIQUE**

Les premiers cas avérés de sismicité d'origine anthropique ont été répertoriés en 1894, en Afrique du Sud, après que des tremblements de terre ont été ressentis dans la ville de Johannesburg (Deichmann and Giardini, 2009). L'influence directe de l'exploitation de mines d'or sur le déclenchement de ces séismes a cependant été longtemps niée, et il a fallu près de 14 ans pour que ce phénomène soit relié clairement aux chantiers miniers du Witwatersrand, qui produisaient près de 40 % de l'or mondial au début des années 1910.

La sismicité anthropique par l'exploitation minière souterraine a été reconnue en Europe à la même époque, et le premier observatoire sismologique de surveillance de ces phénomènes a été déployé en 1908 à Bochum (Allemagne) dans le bassin carbonifère de la Ruhr. Le premier réseau sismique a été installé dans le bassin houiller d'Haute Silésie en Pologne à la fin des années 1920 (Gibowicz and Kijko, 1994). Depuis, de nombreuses mines exploitées à travers le monde, notamment à grande profondeur (au-delà de 1 000 m et jusqu'à presque 4 000 m pour la plus profonde) sont équipées de réseaux de surveillance sismique appliqués à la prévention du risque sismique au niveau des chantiers.

La relation entre sismicité et mise en eau de grands barrages a été faite pour la première fois dans les années 30 lors du remplissage du lac Mead (barrage de Hoover – Nevada) (Carder, 1945). La sismicité liée à l'injection d'effluents ou de fluides à partir de forages profonds, est bien connue et documentée depuis les années 1960 par le cas de Rocky Mountains Arsenal (Healy J. H. et al., 1968; Hoover D.B. and J.A., 1969), près de Denver (Etats-Unis). L'arsenal américain avait alors injecté d'importants volumes de produits chimiques à plus de 4 000 m de profondeur, pour s'en débarrasser. Entre 1962 et 1966, date à laquelle l'injection a cessé, on avait rapporté treize secousses de magnitude 4 ou plus. En août 1967, soit plus d'un an après l'arrêt de l'injection, deux événements sismiques de magnitude 5,2 et 5,3 avaient eu lieu, provoquant des dégâts notables en surface.

### **2.2 DEFINITION DE LA SISMICITE ANTHROPIQUE**

Si le lien entre l'activité humaine et certains événements sismiques n'est aujourd'hui plus discuté, le vocabulaire technique et les définitions font toujours débat au sein de la communauté scientifique. Ainsi, selon les études et auteurs, une distinction peut être faite entre sismicités induite, déclenchée et naturelle alors même que la définition de ces termes n'est pas unanime (Cesca et al., 2013; Dahm et al., 2013; Dahm et al., 2010).

Cependant, les définitions généralement utilisées par les auteurs (Cornet, 2007; Grasso, 1993; Majer et al., 2007; McGarr et al., 2002) sont les suivantes :

- **la sismicité induite** est une activité sismique engendrée par une activité humaine dans un milieu supposé géologiquement stable et qui ne serait jamais apparue sans l'intervention de l'homme. On l'associe à la création de nouvelles failles ou fractures. Ce type de sismicité peut se manifester dans les zones où l'activité industrielle s'inscrit dans un sous-sol peu affecté par des failles ou autres discontinuités géologiques. Elle est généralement de faibles magnitude et intensité, et se manifeste à proximité des perturbations industrielles les plus fortes transférées aux terrains géologiques encaissants ;
- **la sismicité déclenchée** est une activité sismique provoquée ou accélérée par l'intervention humaine dans un milieu prédisposé. On entend par le terme « prédisposé » la présence de failles à proximité du site proches de l'équilibre limite. Autrement dit un événement sismique naturel serait probablement intervenu à plus ou moins à long terme, sans cette cause extérieure. Cette sismicité se produit donc, de préférence, dans des zones où les failles sont proches de l'état de rupture, mais qui ne sont pas nécessairement ré-activables par le chargement tectonique. Elle se traduit

par une augmentation sensible voire très importante de la sismicité en fréquence et en magnitude ;

- **la sismicité naturelle** est une activité sismique observée à l'échelle du globe, en relation avec les mouvements des plaques tectoniques (zones de collision, de subduction et d'arcs volcaniques) mais également de manière plus diffuse, au sein ou à proximité de failles ou discontinuités préexistantes. Son moteur reste les forces tectoniques. La sismicité naturelle est généralement plus profonde, pouvant atteindre plusieurs dizaines à centaines de kilomètres ;
- **la microsismicité** désigne tout type d'activité sismique dont la magnitude est inférieure à la magnitude de détection des réseaux sismologiques nationaux. Cette magnitude de détection, est en général de l'ordre de  $M=2$ , et correspond à peu près à la magnitude à partir de laquelle un événement sismique naturel ou induit peut être ressenti par les populations en surface.

Dans ce rapport, le terme **sismicité anthropique** sera utilisé pour désigner à la fois la sismicité induite et la sismicité déclenchée.

Notons également que le terme d'**aléa** fait référence à un phénomène naturel d'occurrence et d'intensité données comme défini en prévention des risques. C'est le terme consacré dans la littérature internationale.

## 2.3 PRINCIPALES CARACTERISTIQUES D'UN SEISME

### 2.3.1 LA MAGNITUDE

La magnitude permet de quantifier la force d'un séisme ; elle est directement reliée à l'énergie libérée par la source du séisme et est corrélée à la surface mobilisée lors du phénomène et au déplacement moyen (Hanks and Kanamori, 1979), c'est à dire au moment sismique. Une augmentation de 1 en magnitude implique en moyenne une augmentation de 10 de la surface de rupture, de 3 du déplacement (Tableau 1) et équivaut à multiplier par 32 l'énergie libérée (Wells and Coppersmith, 1994).

La magnitude est généralement utilisée pour comparer les séismes entre eux. Il existe en réalité plusieurs méthodes pour la calculer, et de ce fait plusieurs échelles, dont la plus connue est de celle de Richter<sup>1</sup>. Cependant, la plus utilisée aujourd'hui, est la magnitude de moment  $M_w$  qui permet de quantifier de manière univoque l'énergie émise par un séisme.

Rappelons ici également que la magnitude peut être négative ou positive et que l'échelle de magnitude est une échelle ouverte, sans bornes a priori autres que les limites physiques de la cassure intragranulaire dans une roche ( $M_w \approx -5$  à  $-4$ ) à celle d'une faille intercontinentale ( $M_w \approx 8$  à  $9$ ). En général, seuls les séismes naturels de magnitude  $M_w > 2$  sont ressentis en surface, à condition que la source ne soit pas trop profonde.

Dans ce rapport, la magnitude fait en général référence à la magnitude de moment notée  $M$  ou  $M_w$ . Dans le cas contraire, cela sera précisé dans le texte par l'emploi du terme « magnitude locale » ou  $M$ .

---

<sup>1</sup> Echelle historiquement introduite par C. F. Richter pour les séismes californiens dans les années 1930.

| Magnitude de moment $M_w$ | Surface de rupture $\text{km}^2$ | Longueur de rupture X extension (km, km) | Déplacement (m) | Durée de la rupture (s) | Nombre global par an |
|---------------------------|----------------------------------|--|-----------------|-------------------------|----------------------|
| 1                         | 0,001                            | 0,03 x 0,03                              | 0,01            | 0,01                    |                      |
| 2                         | 0,01                             | 0,1 x 0,1                                | 0,03            | 0,03                    |                      |
| 3                         | 0,1                              | 0,3 x 0,3                                | 0,1             | 0,1                     | >> 20 000            |
| 4                         | 1                                | 1 x 1                                    | 0,3             | 0,3                     | 20 000               |
| 5                         | 10                               | 3 x 3                                    | 1               | 1                       | 2 000                |
| 6                         | 100                              | 10 x 10                                  | 3               | 3                       | 200                  |
| 7                         | 1000                             | 30 x 30                                  | 10              | 10                      | 20                   |
| 8                         | 10 000                           | 200 x 50                                 | 60              | 60                      | 1                    |
| 9                         | 100 000                          | 670 x 150                                | 200             | 200                     | 0,05                 |

Tableau 1 : Ordres de grandeur des paramètres de rupture de séismes de magnitude de moment variant de 1 à 9 (Gibson and Sandiford, 2013).

### 2.3.2 L'INTENSITE

L'intensité d'un séisme, à ne pas confondre avec la magnitude, permet de quantifier les effets produits en surface par un tremblement de terre. Elle est généralement estimée sur la base du ressenti des populations, d'observations locales des mouvements du sol et des éventuels dommages sur le bâti et les infrastructures.

L'intensité en un point donné dépend de la distance de ce point à la source sismique ; elle est la plus forte à l'épicentre, c'est-à-dire à la verticale de la source sismique et elle décroît en s'en éloignant. Elle dépend également des conditions géologiques locales qui peuvent dans certains contextes donner lieu à des effets de site. On entend par effet de site, une configuration géologique ou topographique propice à l'amplification des ondes et donc à une forte intensité. La présence de terrains meubles, faiblement consolidés en surface, par exemple, a souvent pour effet d'amplifier l'amplitude et la durée des secousses sismiques. Dans les bassins sédimentaires ou vallées, des phénomènes de réverbération des ondes peuvent aussi donner lieu à une amplification des secousses.

Notons enfin que dans certaines conditions défavorables (formations sableuses ou saturées en eau), un phénomène de liquéfaction peut apparaître. Dans ce cas de figure, les édifices ne sont plus maintenus et peuvent subir d'importants dommages par basculement.

Il existe plusieurs échelles dont l'échelle de Mercalli (1902), l'échelle MSK (1964, modifiée en 1981, Tableau 2) et l'échelle macrosismique européenne (EMS 98) qui est la plus complète. Toutes les trois possèdent 12 niveaux. Citons également l'échelle d'intensité d'Arias, liée à l'énergie de la vibration.

| Intensité | Dégâts observés  |
|-----------|--|
| I         | Seuls les sismographes très sensibles enregistrent les vibrations.                 |
| II        | Secousses à peine perceptibles ; quelques personnes au repos ressentent le séisme. |
| III       | Vibrations comparables à celles provoquées par le passage d'un petit camion.       |
| IV        | Vibrations comparables à celles provoquées par le passage d'un gros camion.        |
| V         | Séisme ressenti en plein air. Les dormeurs se réveillent.                          |
| VI        | Les meubles sont déplacés.   |
| VII       | Quelques lézardes apparaissent dans les édifices.                                  |
| VIII      | Les cheminées des maisons tombent.   |
| IX        | Les maisons s'écroulent. Les canalisations souterraines sont cassées.              |
| X         | Destruction des ponts et des digues. Les rails de chemin de fer sont tordus.       |
| XI        | Les constructions les plus solides sont détruites. Grands éboulements.             |
| XII       | Les villes sont rasées. Bouversements importants de la topographie.                |

Tableau 2 : Echelle MSK de l'intensité d'un séisme et dommages associés.

### 2.3.3 LES PICS D'ACCELERATION OU DE VITESSE DU SOL

Les pics d'accélération ou de vitesse du sol, nommés PGA (Pick Ground Acceleration) ou PGV (Pick Ground Velocity) respectivement, sont deux grandeurs physiques qui permettent de quantifier le niveau de vibrations générés par un séisme. Le PGA ou le PGV correspondent à l'amplitude maximale enregistrée sur un sismogramme (en accélération ou en vitesse) sur un site donné. Cette mesure n'est pas une évaluation de l'énergie totale d'un séisme comme la magnitude, mais une mesure ponctuelle de la vibration en un point donné.

Cette mesure peut être associée à l'échelle de Mercalli (Tableau 2 et Tableau 3), même si la corrélation n'est pas toujours directe. En effet, l'intensité d'un séisme est estimée à partir des témoignages et observations de terrain, alors que la mesure du PGA ou du PGV est une mesure physique, indépendante de la perception humaine. Cette grandeur physique est l'entrée de base pour le dimensionnement des structures et infrastructures en génie parasismique. Les valeurs de PGV et de PGA sont directement comparées aux dommages observés à la surface et peuvent donc être calibrés à l'échelle d'intensité EMS 98.

| Secousses perçues       | Non ressentie | Faible   | Légère | Modérée     | Forte  | Très Forte | Sévère         | Violente | Extrême     |
|-------------------------|---------------|----------|--------|-------------|--------|------------|----------------|----------|-------------|
| Dommages potentiels     | Non           | Non      | Non    | Très légers | Légers | Modérés    | Modérés/Lourds | Lourds   | Très lourds |
| PGA (%g)                | < 0,05        | 0,3      | 2,8    | 6,2         | 12     | 22         | 40             | 75       | > 139       |
| PGV (cm/s)              | < 0,02        | 0,1      | 1,4    | 4,7         | 9,6    | 20         | 41             | 86       | > 178       |
| Intensité instrumentale | I             | II – III | IV     | V           | VI     | VII        | VIII           | IX       | X+          |

Tableau 3 : Relation échelle intensité Mercalli et vibration du sol en PGV et PGA d'après l'USGS (Worden et al., 2012).

## 2.4 LES MECANISMES ET FACTEURS EN JEU

Avec les activités humaines qui perturbent l'état de contraintes et la pression interstitielle dans les massifs rocheux, des secousses sismiques plus ou moins importantes peuvent apparaître. Il existe néanmoins une très grande variabilité dans les conditions d'apparition de ces instabilités.

On distingue ainsi généralement trois grandes familles de sismicité selon le mécanisme en jeu (voir annexe A pour plus de détails) : 1- celle provoquée par l'extraction de matière (e.g. mine), 2- celle liée à l'injection de fluide (e.g. stockage d'effluents ou géothermie) ou 3- celle associée à l'extraction de fluide (e.g. exploitation d'hydrocarbures) (Figure 1). Dans certains cas de figures complexes, plusieurs mécanismes peuvent être mis en jeu, comme nous le verrons à la fin cette section.

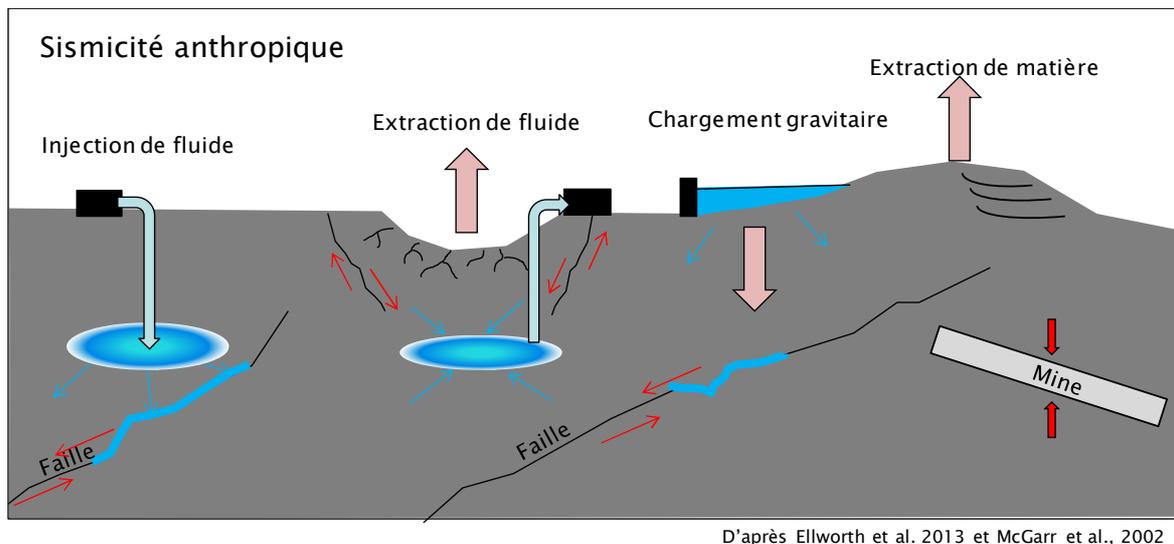


Figure 1 : Schéma simplifié illustrant les différentes sollicitations d'origine anthropique auxquelles peut être soumis un massif rocheux.

### 2.4.1 LORS DE L'EXTRACTION DE RESSOURCES MINERALES

L'extraction souterraine de gisements miniers entraîne des changements importants du champ de contraintes (annexe A) autour des vides créés par déchargement gravitaire (Figure 1). Le réajustement de ces contraintes s'accompagne habituellement d'événements sismiques dont la fréquence, la magnitude et l'intensité ont tendance à s'amplifier avec l'augmentation du volume de minerai extrait ainsi qu'avec la profondeur de l'exploitation (Hudyma, 2008).

Les événements sismiques peuvent être classés en deux catégories (Gibowicz et al., 1990; Gibowicz and Renata, 2009) :

- la première concerne les événements induits directement par les opérations de creusement, qui se localisent en général à proximité du front de taille. Dans ce cas, la réponse sismique au creusement est proportionnelle à la dimension de l'excavation (Hudyma, 2008). Le réajustement des contraintes est local et se produit peu de temps après les opérations d'extraction. Ces événements sismiques, contrairement aux séismes naturels, peuvent présenter des mécanismes à la source qui ne sont pas en cisaillement (Hasegawa et al., 1989; Sileny and Milev, 2008), c'est-à-dire qui ne correspondent pas au coulissement le long d'une discontinuité préexistante. En effet, dans le domaine minier, des ondes sismiques peuvent être générées par des phénomènes tels que la rupture et

l'effondrement du toit d'une cavité (chute de blocs), par des coups de terrain (rockburst) et/ou des ruptures de piliers (pillar burst). Des fractures peuvent également se développer au niveau du front de taille dans une roche saine ;

- la seconde catégorie d'événements sismiques, dits déclenchés, concerne le réajustement des contraintes à plus grande échelle. Les événements sont plus rares mais en général plus énergétiques que les premiers car ils impliquent des mouvements sur des discontinuités géologiques majeures préexistantes (Figure 1). Dans ce cas, la masse rocheuse est déjà dans un état d'équilibre quasi-instable de part et d'autre de la faille, et il suffit d'une faible variation de l'état de contrainte, induite par les opérations minières situées dans le champ d'influence du segment de faille à l'état critique, pour déclencher un mouvement sismique potentiellement de grande ampleur (Gibowicz and Renata, 2009; Hudyma, 2008).

#### **2.4.2 PAR L'INJECTION DE FLUIDE**

L'injection de fluide en profondeur est un processus utilisé dans différents contextes industriels, comme par exemple la géothermie profonde, l'exploitation d'hydrocarbures conventionnels et non-conventionnels ainsi que le stockage de gaz, la séquestration de CO<sub>2</sub>, l'exploitation de sel par dissolution, la séquestration d'eau usée etc. Ces activités peuvent générer une sismicité provoquée par l'augmentation de la pression de fluide en profondeur (Mignan, 2016). Comme précédemment, deux types de sismicité peuvent être observées, l'une, induite, directement liée à l'injection et l'autre, déclenchée, provoquée par la remobilisation d'une faille préexistante.

Concernant la sismicité induite, elle est souvent observée lors de la phase d'ouverture de failles préexistantes de la roche par stimulation hydraulique, dans le cas de la géothermie. Dans le cas de l'exploitation de gaz de schistes, le processus est un peu différent, car il est nécessaire de fracturer la roche (fracturation hydraulique<sup>2</sup>) en général avec des pressions plus fortes pour extraire le gaz. Cependant, dans les deux cas, cette sismicité est généralement de faible magnitude et se produit souvent avec un mécanisme en ouverture notamment proche du puits d'injection (Cuenot et al., 2008). D'autres mécanismes, notamment en cisaillement, peuvent également être observés (Cuenot et al., 2008).

Concernant la sismicité déclenchée, l'injection de fluide peut provoquer l'augmentation de pression de fluide sur un plan de faille. Ce phénomène est à l'origine de la diminution de la résistance à la friction, permettant ainsi le glissement de la faille. Ce processus est possible lorsqu'une faille proche de l'état critique, c'est-à-dire proche de la rupture, et orientée favorablement par rapport au champ de contrainte régional, est impactée par l'augmentation de pression de fluide. Tous les processus industriels précités sont susceptibles de remobiliser des failles par ce mécanisme. Dans ce cas de figure, une décorrélation spatio-temporelle peut être observée entre l'occurrence de la sismicité et l'installation industrielle, liée à l'équilibrage dans le sous-sol de la pression interstitielle.

#### **2.4.3 PAR L'EXTRACTION DE FLUIDE**

Dans ce cas de figure, l'extraction du fluide d'un réservoir provoque la diminution de la pression interstitielle dans le sous-sol (Figure 1). Dans le domaine de l'exploitation d'hydrocarbures par exemple, cette diminution de pression provoque une contraction du réservoir à grande échelle, ce qui provoque une variation de contrainte au niveau de la roche encaissante (Segall, 1989). Une subsidence de la surface est souvent observée, avec une remobilisation en faille inverse de structures géologiques préexistantes. Ce type de mécanisme a également été documenté dans le cas de l'effondrement provoqué d'une

---

<sup>2</sup> Notons que ce procédé est actuellement interdit en France depuis 2011.

cavité saline par dissolution (Kinscher et al., 2016). Le mécanisme de déchargement gravitaire, lié à l'extraction de fluide peut également être à l'origine de la remobilisation d'une faille (McGarr et al., 2002).

Les magnitudes générées par le mécanisme d'extraction de fluide peuvent être importantes, car les variations de contraintes peuvent se produire sur des surfaces relativement importantes, qui ont la même taille que celle du réservoir (McGarr et al., 2002).

#### **2.4.4 LES CAS COMPLEXES**

Parmi les autres cas de sismicité anthropique, citons celui du remplissage de grand barrages hydrauliques. Ce cas, particulièrement complexe, combine deux principaux mécanismes : le chargement gravitaire lié au remplissage du réservoir et l'augmentation de la pression interstitielle dans les terrains sous-jacents, similaire à celui décrit dans les processus d'injection de fluide (2.4.2).

Ainsi lors du remplissage du réservoir, la pression de la colonne d'eau modifie le champ de contraintes dans l'encaissant et son sous-sol, notamment lorsque le barrage présente une grande hauteur, et/ou lorsque les variations du niveau d'eau sont importantes et rapides. Ce processus s'accompagne d'une activité sismique qui apparaît rapidement en réponse au chargement. Les observations montrent que cette sismicité dépasse rarement la magnitude de 5. Par ailleurs, l'augmentation de la pression interstitielle dans les terrains sous-jacents peut se traduire par une réponse sismique différée, qui peut être de plusieurs années. Cette réponse dépend de la vitesse de diffusion de la pression interstitielle depuis le réservoir. Les séismes les plus forts ont été observés dans cette situation, lorsque le contexte tectonique est favorable.

Le cas de l'ennoyage des mines, au moment de leur fermeture, est, d'un point de vue physique, assez similaire à celui du remplissage des barrages. Il faut cependant tenir compte des modifications géo-mécaniques qui ont lieu lorsque la mine était encore en activité pour caractériser l'origine de la sismicité. Ce paramètre supplémentaire rend l'identification des mécanismes particulièrement difficile dans ce cas de figure.



### 3. CAS D'ETUDES

La littérature sur la sismicité liée aux activités anthropiques est importante, et il est difficile d'en dresser ici une liste exhaustive. Pour cette étude, nous avons constitué et examiné une base de données d'environ 260 cas d'études publiés (Annexe B). De nombreuses synthèses ont aussi récemment été publiées. On peut citer les documents suivants qui sont particulièrement bien construits et pédagogiques :

- le rapport de synthèse du "Committee on Induced Seismicity Potential in Energy Technologies of National Academy of Sciences" (NRC, 2013) sur les industries utilisant l'injection ou l'extraction de fluides dans le sous-sol ;
- concernant la sismicité induite par l'exploitation d'hydrocarbures, les travaux de Davies et al (2013) et Suckale (2009) et Grasso and Wittlinger (1990) ;
- concernant la sismicité induite par l'injection d'eau usée dans des formations profondes, de nombreuses études menées par l'USGS (United States Geological Survey) avec McGarr et al. (2015) et Rubinstein et al. (2014) ;
- sur la sismicité induite par la géothermie : Evans et al. (2012); Majer et Peterson (2007), Majer et al. (2014), Grunthal (2014) ainsi que le projet EU « GEISERS »<sup>3</sup> ;
- sur la sismicité induite par les activités de stockage du CO<sub>2</sub> : Nicol et al. (2013) et Zoback and Gorelick (2015) ;
- sur la sismicité induite par les activités minières : Gibowicz (2009), Hasegawa et al. (1989), Hudyma and Potvin (2004), Li et al. (2007) et Richardson and Jordan (2002) ;
- sur la sismicité liée au remplissage de barrage hydraulique : CHEN (2009); Deng et al. (2010) et Gupta (2002).

Ce sujet fait également l'objet de nombreux workshops, conférences et congrès, parmi lesquels on peut citer :

- le « Schatzalp Workshop on Induced Seismicity » à Davos (Suisse) en mars 2017, qui a rassemblé plus d'une centaine de contributions, toutes accessibles en ligne<sup>4</sup> ;
- le « Anthropogenic Seismicity Workshop<sup>5</sup> » à Nancy (France) en septembre 2016, organisé par l'INERIS et le laboratoire GeoRessources.

Les différents cas d'études emblématiques illustrant les différents moteurs de la sismicité d'origine anthropique et présentés ci-après portent sur la sismicité générée par différents types d'industrie, à savoir :

- les activités d'extraction minière et la sismicité résiduelle liée aux mines abandonnées ;
- la géothermie profonde ;
- le stockage géologique de gaz ;
- l'exploitation conventionnelle d'hydrocarbures : gaz et pétrole ;
- l'exploitation non conventionnelle d'hydrocarbures : gaz de schistes ;
- l'injection définitive en forage profond dans des roches poreuses et perméables d'effluents industriels, issus par exemple des industries chimiques ou de l'exploitations des gaz de schistes par fracturation hydraulique ;

---

<sup>3</sup> <http://www.geiser-fp7.fr/GEISERForBeginners/Pages/Presentation.aspx>

<sup>4</sup> <http://www.seismo.ethz.ch/research/groups/schatzalp/> et <http://www.seismo.ethz.ch/en/research-and-teaching/schatzalp-workshop/download-2017/>

<sup>5</sup> <http://www.ineris.fr/en/about-ineris/news/anthropogenic-seismicity-workshop-nancy/166105>

- le remplissage de barrages hydrauliques.

D'autres cas seront également mentionnés, concernant le stockage géologique de CO<sub>2</sub>, l'exploitation de sel par dissolution et l'extraction d'eau.

### 3.1 INDUSTRIE MINIERE

La littérature sur la sismicité générée par l'industrie minière est très importante. C'est la sismicité anthropique la plus étudiée car elle est à l'origine d'un bilan humain et économique important à travers le monde (Gibowicz and Kijko, 1994; Gibowicz et al., 2001; Gibowicz and Renata, 2009). C'est aussi cette industrie qui est la source du plus grand nombre de séismes induits dans le monde.

L'impact de l'extraction minière s'explique par les perturbations considérables du champ de contraintes autour des vides créés par les chantiers. L'excavation de galeries et de volumes massifs de minerai en profondeur est sans aucun doute la manière la plus « traumatisante » d'exploiter le sous-sol profond, provoquant fractures, cassures et remobilisation de failles naturelles.

Le bassin houiller de Haute-Silésie (Pologne) est l'un des bassins miniers les plus actifs au niveau sismique dans le monde, bien que situé dans une zone dont la sismicité naturelle est faible. Les observations sismologiques montrent que plus de 55 900 secousses d'origine minière, de magnitude supérieure à 1,5, ont été enregistrées entre 1950 et 2005 (Stec, 2007). Dans les années 80, cette sismicité a diminué grâce à la mise en place de nouvelles méthodes d'exploitation et de techniques de détente des terrains à l'avancement des chantiers miniers (Patynska, 2013). Mais depuis les années 2000, la sismicité s'est de nouveau accrue du fait de l'augmentation des profondeurs d'exploitation, au-delà de 1 000 mètres, et de cadences de production plus rapides.

En Australie, un séisme de magnitude 5,6, en 1989, à Newcastle, est suspecté d'avoir pour origine directe l'exploitation de charbon (Klose, 2007). Une faille majeure, située à 10 km de profondeur, aurait été réactivée par l'extraction minière, mais également par le pompage massif d'eau nécessaire pour assécher les travaux miniers. Ce séisme est l'un des plus dévastateurs qu'ait connu l'Australie, avec 13 personnes tuées, 160 blessés et 4 milliards de dollars de dommages. Les dégâts ont été d'autant plus importants que le pays, situé dans une zone de faible aléa sismique, n'est pas doté de constructions parasismiques.

Aux États-Unis, le 6 août 2007 a eu lieu un important effondrement souterrain dans la mine de charbon de Crandall Canyon dans l'Utah. Au même moment, un événement de magnitude 4,1 a été enregistré au même endroit. Les exploitants ont déclaré au moment de l'accident, qui a causé la mort de 9 mineurs, qu'un tremblement de terre naturel avait causé l'effondrement des travaux miniers. Cependant une étude détaillée, menée par l'université de l'Utah (Pechmann et al., 2008), a démontré que l'effondrement minier était bien l'événement à l'origine du séisme. Suite à cela, l'exploitant a été condamné pour violation des règles de sécurité.

Enfin, citons en Europe, le séisme du 21 juin 2001, de magnitude 3,7 qui a eu lieu à Freyming-Merlebach (France) et dont l'origine est un coup de terrain<sup>6</sup> dans les travaux miniers qui a causé la mort d'un mineur et plusieurs blessés. Le chantier, situé à 1 200 mètres de profondeur, avait alors été stoppé pendant plusieurs mois. Un autre exemple est celui du séisme du 23 février 2008, à Saarwellingen (près de Sarrelouis, en Allemagne, Figure 2). Ce séisme de magnitude 4,3 a provoqué des dégâts matériels importants (Alber and Fritschen, 2011; Fritschen, 2010). Le montant des dommages et

---

<sup>6</sup> Phénomène associé à un événement sismique, qui cause des dommages soudains et violents à une excavation

l'émoi des populations ont conduit les autorités fédérales allemandes à arrêter définitivement l'exploitation de la dernière mine en activité dans le bassin de la Sarre.



Figure 2 : Exemple de dommages dans la ville de Saarwellingen suite au séisme de magnitude 4,3 du 23 février 2008, source <http://www.saarwellingen.de/archivos/index.php?id=452>.

Il est important de noter que la sismicité liée aux travaux miniers peut perdurer longtemps après l'arrêt de l'exploitation. En effet, la fermeture des mines peut conduire à l'abandon d'ouvrages souterrains et vides miniers importants susceptibles d'instabilités avec le temps, ainsi qu'avec l'ennoyage progressif des vides. Selon les conditions géologiques du bassin, cette mise en eau des vides souterrains peut s'accompagner de la subsidence ou de l'effondrement des terrains sus-jacents, ou de leur surrection, et ainsi générer potentiellement de la sismicité. Selon leur ampleur, ces phénomènes peuvent affecter la sécurité des personnes et des biens, et éventuellement compromettre le développement économique du territoire concerné. La notion communément utilisée en France dans ce cas de figure, est celle de l'aléa résiduel.

On peut ainsi citer le cas récent du bassin houiller de Gardanne en Provence (France) où l'exploitation minière s'est arrêtée en 2003 et où les travaux miniers ont été progressivement ennoyés. Depuis 2008, date à laquelle un réseau de surveillance microsismique a été installé, plus de 2 000 événements ont été détectés (Figure 3), localisés principalement au niveau du front d'ennoyage, et plusieurs crises microsismiques ont été enregistrées en 2012, 2014 et 2017 avec de nombreux événements ressentis par la population ( $M_l \approx 2,5$  ;  $M_w \sim 1,8$ ). Cette sismicité qui persiste reste toutefois bien plus faible que celle enregistrée durant l'exploitation ; elle semble être en lien avec les fluctuations saisonnières de la nappe dans les travaux miniers qui ont modifié de manière significative le système hydrogéologique naturel. Ces modifications pourraient être à l'origine de changements de l'état de contrainte des failles en présence, par chargement gravitaire et/ou par augmentation de la pression interstitielle, menant à leurs ruptures (Contrucci et al., 2013; Kinscher et al., 2017; Matrullo et al., 2015).

Citons enfin un cas en Afrique du Sud, à Stilfontein, où le 9 mars 2005, un événement sismique d'origine minière de magnitude 5,3 a causé des dommages en surface d'une gravité exceptionnelle, détruisant partiellement de nombreux bâtiments, blessant plusieurs dizaines d'habitants, et causant la mort de 2 mineurs dans les chantiers de la mine d'or du Klerksdorp district. Cet événement sismique d'une magnitude importante est attribué à d'anciens travaux miniers abandonnés situés à proximité de la mine active (Durrheim et al., 2007).

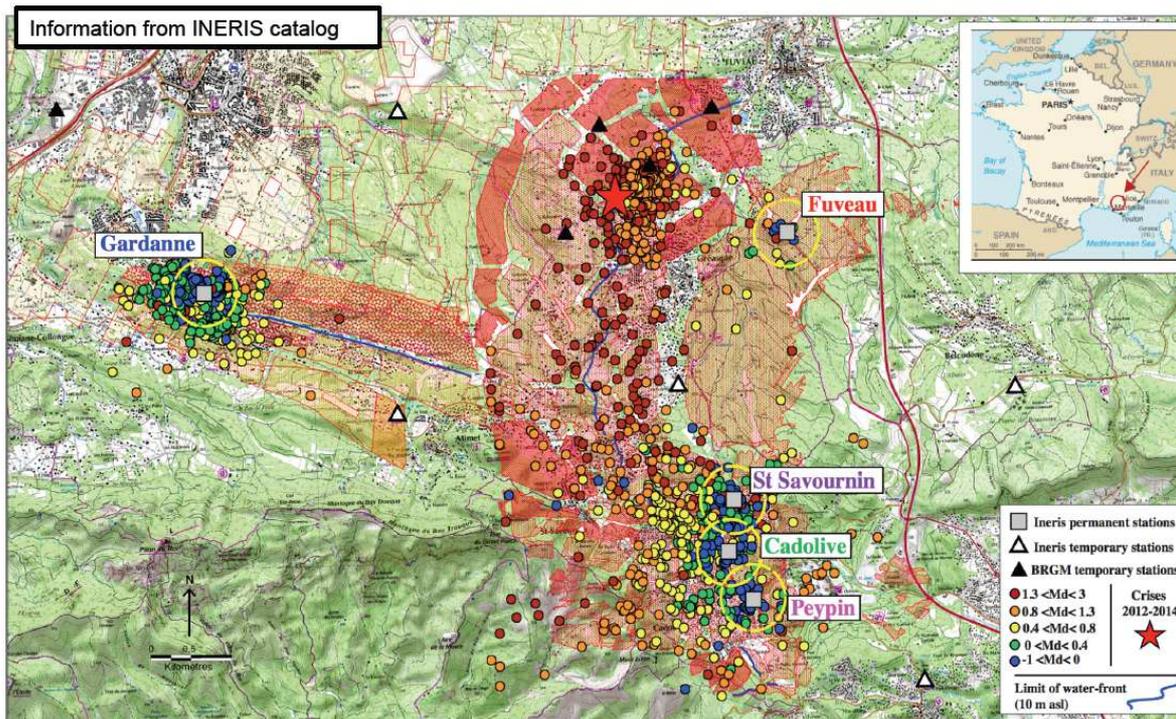


Figure 3 : Sismicité post-minière enregistrée dans l'ancien bassin houiller de Gardanne entre 2008 et 2015 (Matrullo et al. 2015). Les cercles représentent la localisation des événements sismiques, les couleurs associées correspondent à la magnitude, la ligne bleue au centre du bassin figure le niveau d'ennoyage dans les travaux miniers, les carrés ainsi que les triangles correspondent aux stations sismologiques et les surfaces rouges correspondent à l'emprise des anciens travaux miniers.

### 3.2 GEOTHERMIE PROFONDE A HAUTE TEMPERATURE

La géothermie profonde consiste à utiliser le potentiel thermique du sous-sol pour produire de l'électricité. Cette technique industrielle n'est rentable que dans les régions où les zones à haute température (> 100° C) se situent à des profondeurs faibles (3 à 5 km). C'est le cas du graben du Rhin où se situe le site géothermique de Soultz-Sous-Forêts (France). C'est également le cas à Bâle (Suisse), dans la partie sud-est du fossé rhénan, où a été installé un site de géothermie profonde.

L'exploitation du potentiel thermique du réservoir n'est en général possible qu'après une stimulation, qui consiste à augmenter la perméabilité du réservoir ainsi que la connexion hydraulique entre les puits d'injection et de production. Cette stimulation se fait par l'injection de fluides qui cause une augmentation de la pression interstitielle, et une diminution de la contrainte normale, dans la masse rocheuse, au niveau des joints et/ou fractures préexistantes. La variation de pression interstitielle ainsi créée, liée à l'injection d'eau et d'adjuvants chimiques, modifie l'état de contraintes et peut être à l'origine d'une sismicité induite.

Sur le site de Soultz-Sous-Forêts, la stimulation du réservoir a généré des séismes dont la magnitude maximum a atteint 2,9 en 2003, et qui étaient pour les plus forts ressentis par la population environnante (Cuenot et al., 2008). Suite aux plaintes des riverains, les protocoles de stimulations ont été modifiés : en 2004 et 2005 la pression et les volumes injectés ont été réduits avec tout de même encore quelques séismes ressentis à cette période. Puis, en 2006-2007, des techniques de stimulation chimique ont été adoptées, permettant de réduire encore les volumes injectés et ainsi la sismicité associée (Portier et

al., 2009). Depuis le printemps 2016, le site est entré dans sa phase de production industrielle<sup>7</sup> d'électricité et alimente en énergie l'équivalent de 2 400 logements.

Le projet « Deep heat Mining » à Bâle en Suisse n'a pas connu le même succès. En effet, en 2006, la stimulation du forage profond (5 km) s'est accompagnée de nombreux séismes et ce, dès le début des opérations d'injection (Figure 4). Elles ont été stoppées deux jours après la détection de deux événements de magnitude 2,6 et 2,7 (Deichmann and Giardini, 2009; Haering et al., 2008). Cependant, l'activité sismique a continué avec notamment un événement de magnitude 3,4 cinq heures après l'arrêt des stimulations. Ce séisme a été clairement ressenti par la population (Kraft et al., 2009; Majer et al., 2007). Puis trois séismes de magnitude supérieure à 3 ont eu lieu dans les deux mois après l'arrêt de l'injection. Le projet a été d'abord suspendu pour enquête, puis définitivement abandonné 3 ans plus tard suite à des études de risque (Baisch et al., 2009; Mignan et al., 2017). On estime que l'activité sismique du site ne retrouvera un niveau « normal » que dans 10 à 20 ans (Bachmann et al., 2011).

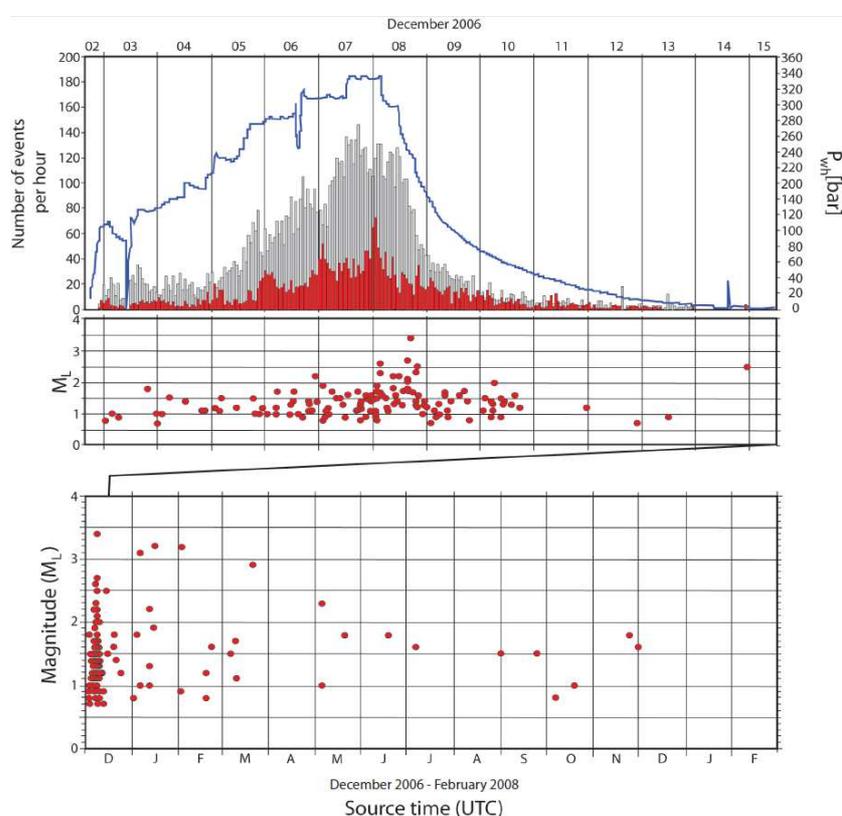


Figure 4 : Sismicité anthropique enregistrée par le réseau de surveillance installé sur le site de géothermie profonde de Bâle et volume d'eau injecté pendant les opérations de stimulation du réservoir (Kraft et al., 2009). En rouge : événements sismiques localisés. En gris : totalité des événements sismiques.

Pour Bâle, l'aléa de sismicité anthropique avait été estimé en grande partie sur la base d'une comparaison avec le projet de Soultz-Sous-Forêts, où la magnitude de 2,9 n'a pas été dépassée (Cuenot et al., 2008). L'analyse de risque pour un tel séisme, ou pour des séismes de magnitude supérieure, n'avait pas été réalisée au préalable (Kraft et al., 2009). Cette région est pourtant connue pour avoir subi un séisme dévastateur en 1356 dont la magnitude a été estimée, sur la base de témoignages historiques, entre 6,2 et 6,7.

<sup>7</sup> <http://france3-regions.francetvinfo.fr/alsace/geothermie-profonde-soultz-sous-foret-1092809.html>

Notons que le montant d'environ ~ 9 millions d'euros de dommages pris en charge par les compagnies d'assurances, suite au séisme de magnitude 3,4, a été jugé exagéré en comparaison de ce qui avait été payé par le passé en Suisse, suite à l'occurrence de séismes de taille comparables (Kraft et al., 2009).

### 3.3 STOCKAGE DE GAZ

Différents types de réservoirs géologiques peuvent être utilisés pour le stockage souterrain de gaz, comme par exemple les gisements déplétés de pétrole et de gaz, les aquifères ou les cavités salines ou minières. Les exemples documentés de sismicité induite par l'injection de gaz dans la littérature restent néanmoins peu nombreux. Le cas le plus étudié récemment est celui du projet CASTOR en Espagne. Ce site de stockage de gaz est un ancien réservoir pétrolier déplété situé en mer des Baléares, région où la sismicité naturelle est faible. Ce réservoir pétrolier a été exploité entre 1973 et 1989.

Sur ce site, la troisième séquence d'injection de gaz en septembre 2013 a généré une sismicité de faible ampleur (Figure 5), mais deux semaines après l'arrêt de l'injection, cette sismicité s'est amplifiée avec plus de 1 000 événements sur 40 jours, atteignant des magnitudes allant jusqu'à 4,3 avant de revenir à un niveau normal (Cesca et al., 2014). L'événement le plus important de la séquence a eu lieu durant cette phase de post-injection à moins de 2 km du point d'injection et à une profondeur anormalement faible (moins de 3 km sous le niveau de la mer) au même niveau que le fond du puits d'injection. Les études menées par la suite ont montré qu'une faille mineure située à proximité du site d'injection a probablement été remobilisée suite aux variations de pression interstitielle (Cesca et al., 2014). Le projet CASTOR a finalement été abandonné compte tenu de la difficulté à cerner le risque industriel au regard de l'aléa sismique qui avait été sous-estimé. Même si aucun dégât n'a été recensé, ni sur l'installation industrielle, ni sur la côte urbanisée située à environ 40 km, les séismes les plus forts ont été nettement ressentis par les populations, provoquant de l'émoi suivi d'une mobilisation importante. Notons cependant qu'une étude détaillée de la géologie structurale et une surveillance sismologique du site pendant deux ans avaient été réalisées préalablement aux opérations d'injection de gaz par l'exploitant du site. Ces investigations indiquaient une stabilité du site, notamment au regard des faibles pressions d'injection, qui étaient inférieures à 2,5 bars (del Potro and Diez, 2015).

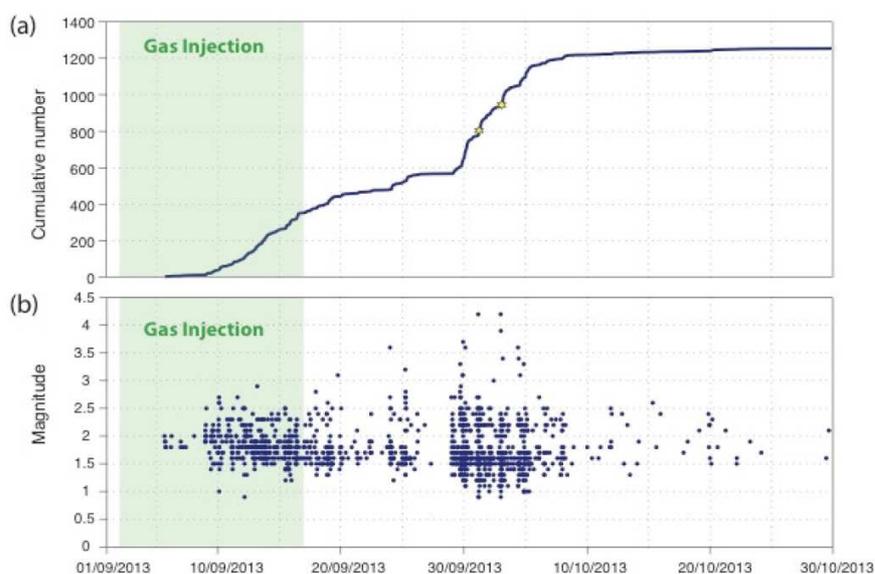


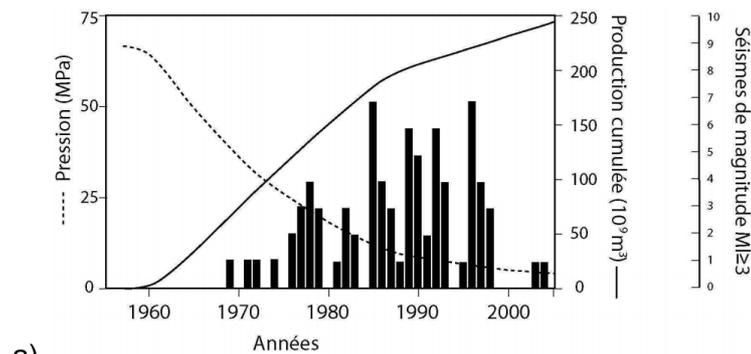
Figure 5 : a) Nombre d'événements sismiques cumulés et b) magnitude des événements enregistrés du 1<sup>er</sup> septembre au 30 octobre 2013 (del Potro and Diez, 2015). La partie verte représente la période d'injection du gaz. Notez que la majeure partie de l'activité a eu lieu après que les opérations d'injection ont été stoppées.

### 3.4 L'EXPLOITATION CONVENTIONNELLE D'HYDROCARBURES

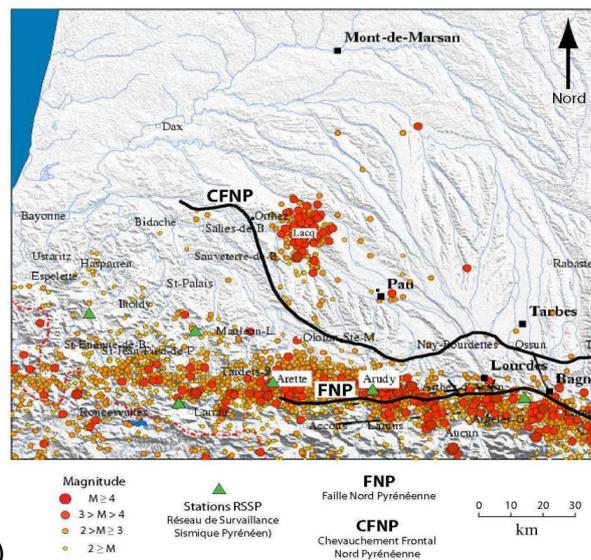
#### 3.4.1 SISMICITE DUE A LA DEPLETION DE RESERVOIRS DE GAZ

Parmi les séismes les plus importants d'origine anthropique, on peut citer ceux générés par l'exploitation du champ de gaz de Gazli en Ouzbékistan, dans une région considérée auparavant comme sismiquement calme (Bossu, 1996). Entre 1976 et 1984, trois séismes de magnitude  $\sim 7$  ont affecté la région : le 8 avril 1976, le 17 mai 1976 et le 20 mars 1984. Les trois épicentres se situaient à 20 km au nord du champ de gaz, à des profondeurs de l'ordre de 10 à 15 km (Adushki et al., 2000). La diminution de pression dans le réservoir est le processus considéré comme étant à l'origine de ces tremblements de terre (Simpson and Leith, 1985).

Le champ gazier de Lacq situé dans le sud-ouest de la France (Figure 6) dans lequel l'exploitation a commencé en 1957 est un autre exemple. C'est un des cas d'étude les mieux documentés de sismicité induite par la déplétion d'un gisement de gaz (Bardainne, 2005; Bardainne et al., 2008; Grasso, 1993; Grasso and Wittlinger, 1990; Lahaie and Grasso, 1999; Segall et al., 1994). Entre 1974 et 1997, plus de 2 000 événements locaux ont été enregistrés par les réseaux de surveillance sismique (Bardainne, 2005) et la sismicité perdure encore aujourd'hui. D'après les différents auteurs, la sismicité de Lacq n'est clairement pas liée au contexte tectonique naturel des Pyrénées qui se situent à 30 km au sud du gisement. De plus les premiers événements dans cette zone ont été ressentis après le début de l'exploitation de gaz.



a)



b)

Figure 6 : a) Production, pression du gaz et séismes de Magnitude  $M \geq 3$  par année du site de Lacq (Bardainne, 2005). b) Sismicité pyrénéenne enregistrée entre 1989 et 2005 et localisée par l'Observatoire Midi-Pyrénées (Bardainne, 2005). L'essaim sismique de Lacq est apparu au moment de la mise en production du réservoir de gaz.

Citons enfin, le cas de la sismicité dans les gisements gaziers néerlandais, dont le plus important est celui de Groningue au nord du pays (Figure 7). Ce gisement est le plus important d'un seul tenant au monde avec une superficie de 900 km<sup>2</sup>, et se situe à une profondeur de 3 km environ. La production sur ce site a commencé en 1963 et le premier événement a été enregistré en 1991 (magnitude ~2,4). Puis pendant les dix ans qui suivirent, la sismicité a été faible avec 5 événements de magnitude supérieure à 1,5 enregistrés par an (van Thienen-Visser and Breunese, 2015). C'est en 2012 qu'a eu lieu le plus important événement, de magnitude 3,6, qui a causé le plus de dommages à ce jour. Les études montrent qu'il y a un lien étroit entre la génération de la sismicité et la compaction du réservoir résultant de l'extraction du gaz (van Thienen-Visser and Breunese, 2015; Van Wees et al., 2014). En effet, ce procédé engendre des changements de contrainte sur les failles et discontinuités géologiques préexistantes. Notons que les modélisations numériques ont montré que les failles n'étaient probablement pas proches de la rupture au moment de l'initiation de l'exploitation du gaz (Van Wees et al., 2014). Cela explique le délai observé entre le début de l'exploitation et l'occurrence de la sismicité. A contrario, si ces failles avaient été en état sub-critique, il aurait pu y avoir de la sismicité dès le début de l'exploitation, comme cela a pu être observé sur le site de Lacq. En janvier 2014, il a été décidé de réduire la production de gaz dans la partie centrale du réservoir de Groningue, à l'endroit où la subsidence est la plus forte. En contrepartie, la production a été augmentée à la périphérie du réservoir où il y a moins de compaction. Ces mesures ont été prises dans l'objectif de diminuer la sismicité.

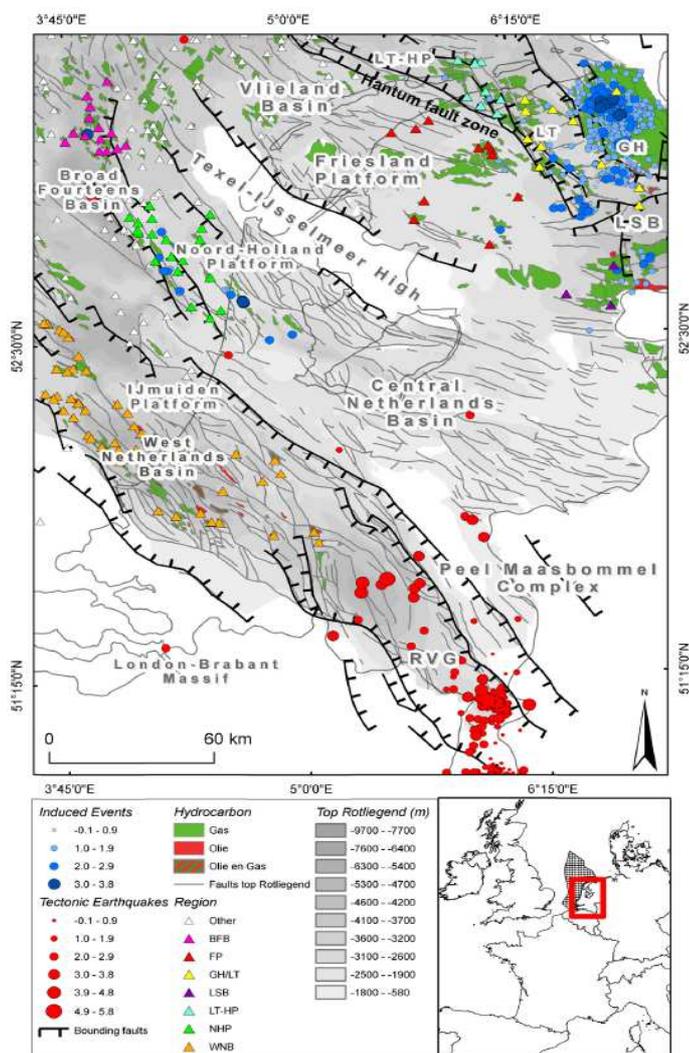


Figure 7 : Carte tectonique générale des champs d'exploitation de gaz en Hollande. La sismicité naturelle est représentée par des cercles rouges, la sismicité induite / déclenchée par des cercles bleus (Van Wees et al., 2014). Le gisement de Groningue se situe au nord-est de la carte et génère une sismicité qui a commencée presque 30 après la mise en production.

### 3.4.2 SISMICITE DUE A L'EXTRACTION DE PETROLE

Une série de séismes, avec quatre événements de magnitude supérieure à 5, a eu lieu au nord de l'Italie dans la région d'Emilia en mai – juin 2012. Ces séismes sont à l'origine du décès de 24 personnes, de l'évacuation temporaire de 14 000 personnes et de nombreux dégâts sur le bâti et les infrastructures. La liquéfaction des sols a été un des plus importants effet de ces séismes (Di Manna et al., 2012). Cette région, située dans la plaine du Pô, présente un risque sismique relativement important à cause d'un régime tectonique actif (chaîne des Apennins).



Figure 8 : Exemple de dégâts sur le bâti historique de la région d'Emilia suite à la série de séismes de 2012 considérée comme ayant été déclenchée par une activité anthropique dans le sous-sol (Gasparini, 2015).

Une commission internationale scientifique et technique (ICHESE, 2014) a été saisie pour évaluer les relations possibles entre les différentes activités industrielles (extraction de pétrole, géothermie et stockage de gaz) dans cette région et cette séquence sismique (Figure 9). La commission a conclu qu'on ne pouvait écarter que l'extraction de pétrole (réalisée par injection de fluide) du site le plus proche du système de failles, probablement réactivé, soit à l'origine de la séquence sismique. En conséquence de ces événements (Gasparini, 2015), la production de pétrole dans la zone a été stoppée et le site a été reconverti en laboratoire<sup>8</sup>. La commission a recommandé l'implémentation de systèmes de monitoring dans les champs pétroliers situés dans les zones tectoniquement actives de l'Italie. Un guide de bonnes pratiques définissant les procédures de monitoring des activités d'exploitations d'hydrocarbures et de stockage souterrain en termes de sismicité, pression interstitielle et déformation des terrains a été élaboré par un groupe de travail (MiSE, 2014). Ce guide a été diffusé aux autorités locales et aux compagnies d'exploitations d'hydrocarbures présentes sur le territoire italien. Enfin une loi a été votée (MiSE, 2015), imposant aux compagnies de surveiller les champs d'hydrocarbures en activité en suivant les recommandations de ce guide. Notons que l'étude de ce séisme a fait l'objet de plusieurs publications scientifiques et son origine est toujours débattue (Albano et al., 2017; Grigoli et al., 2017; Grimaz, 2014; Juanes et al., 2016; Lavecchia et al., 2015).

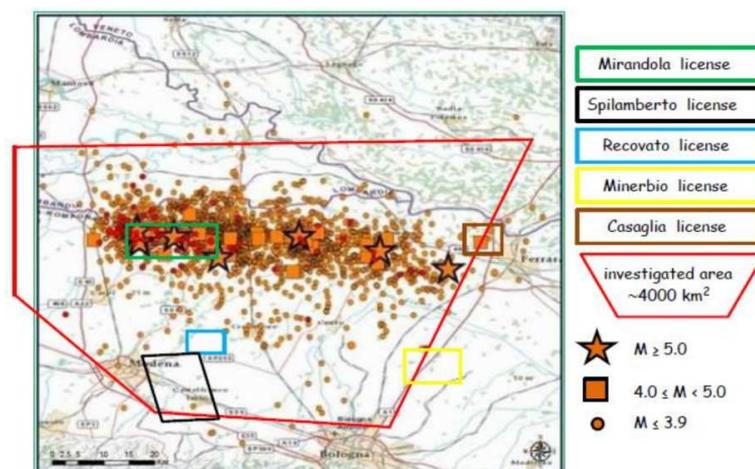


Figure 9 : Localisation de l'essai sismique et des principales géo-industries de la région qui ont été examinées par la commission d'enquête pour évaluer laquelle était susceptible d'être à l'origine du déclenchement de l'essai sismique (Gasparini, 2015).

<sup>8</sup> "Laboratorio Cavone", <http://labcavone.it/>

On peut citer également le séisme d'Ekofisk situé dans un champ pétrolier offshore en mer du Nord (Norvège), (Cesca et al., 2011; Ottemöller et al., 2005). Cet événement de magnitude 4,3 a probablement été causé par l'injection d'eau pour maintenir la pression dans le réservoir. Un bourrelet topographique a été observé sur le fond marin et une surpression dans les terrains a été mesurée après le séisme. La rupture a eu lieu à faible profondeur le long d'une faille subhorizontale qui se situe au-dessus du réservoir, dans un contexte de subsidence des terrains due à la production de pétrole.

### **3.5 EXPLOITATION D'HYDROCARBURES NON CONVENTIONNELS : GAZ DE SCHISTE ET FRACTURATION HYDRAULIQUE**

Selon la synthèse du conseil américain de la recherche (NRC, 2013), le processus de fracturation hydraulique tel qu'il est actuellement mis en œuvre pour la récupération de gaz de schiste, ne soulève pas de risque élevé en terme de sismicité induite ou déclenchée, et donc de génération de séismes de magnitude supérieure à 2. Cet avis est tiré du retour d'expérience de 35 000 puits de production de gaz de schiste exploités aux Etats-Unis. Quelques cas ont certes été documentés par l'USGS<sup>9</sup>, mais une seule séquence de séismes ressentis en Oklahoma a été attribuée directement à la fracturation hydraulique pour la production de gaz de schiste (Holland, 2011).

Un cas documenté en Angleterre, dans le Lancashire, région réputée sismiquement calme, confirme le lien entre l'occurrence de séismes et la production de gaz de schiste par fracturation hydraulique. Ces événements localisés au nord-ouest près de la ville de Blackpool, de magnitude 2,3 et 1,5 pour les deux plus forts, ont été détectés respectivement les 1<sup>er</sup> avril et 27 mai 2011 par le réseau régional du BGS<sup>10</sup> (De Pater and Baisch., 2011; Green and Styles, 2012). Ressentis par la population, ils ont été largement relayés dans la presse avec pour conséquence la suspension des activités. Des études approfondies menées a posteriori ont montré que l'activité sismique avait été causée par l'injection de fluide dans une zone de failles probablement dans un état proche de la rupture (De Pater and Baisch., 2011). Cette activité sismique locale a eu lieu plus loin que prévu, à 500 mètres environ du point d'injection. Des recommandations en ont été tirées ; elles préconisent notamment la mise en place d'un système de surveillance avant, pendant et après les opérations de fracturation hydraulique avec un système dit de « Traffic light » pour la mitigation du risque (Green and Styles, 2012). Un guide de bonnes pratiques pour les industriels a également été publié ; il couvre l'ensemble du cycle de vie d'un projet, depuis l'évaluation de l'aléa (« hazard ») jusqu'aux mesures de contrôle et de mitigation du risque de sismicité anthropique pour les exploitations de gaz de schistes au Royaume-Uni (UKOOG, 2013).

Ce bilan est très différent de celui tiré dans le bassin sédimentaire de l'ouest canadien, l'une des plus grandes réserves mondiales d'hydrocarbures (Figure 10), où l'augmentation significative de la sismicité enregistrée depuis 2010 est principalement attribuée au processus de fracturation hydraulique (Atkinson et al., 2016). Atkinson et al. (2016) affirment que près de 60% des séismes de magnitude supérieure à 3 enregistrés dans cette région sont attribués aux opérations de fracturation hydraulique. Ils relèvent aussi que près de 30% des séismes sont induits par l'injection des eaux usées et qu'environ 10% sont d'origine tectonique. Les auteurs soulignent par ailleurs qu'une faible proportion (0,3%) des forages destinés à la fracturation hydraulique produit une sismicité. Cependant, comme plusieurs milliers de forages sont réalisés chaque année dans cette région, les conséquences pour l'évaluation du risque sont importantes.

---

<sup>9</sup> United States Geological Survey

<sup>10</sup> British Geological Survey

Cet écart important de retour d'expérience s'explique, comme cela est évoqué dans la section suivante, par le fait que les scientifiques de l'USGS<sup>9</sup> attribuent l'augmentation de sismicité dans le centre des Etats-Unis non pas à la fracturation hydraulique mais à l'injection définitive des effluents industriels issus de la production de gaz de schistes.

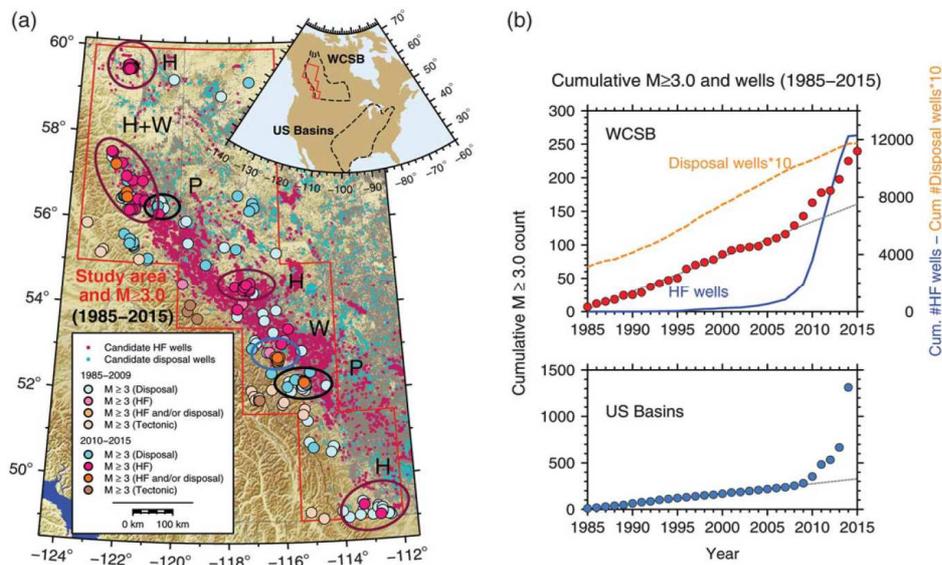


Figure 10 : (a) Représentation de la sismicité du bassin sédimentaire de l'ouest canadien (cercle de couleur, où les points roses représentent la localisation des forages où est pratiquée l'hydro-fracturation pour l'exploitation de gaz de schistes et les points bleu turquoise représentent la localisation des forages d'injection définitive des effluents. (b) 2 graphes qui représentent l'augmentation de la sismicité dans l'ouest canadien (en haut) et dans le centre des USA (en bas) pour comparaison de 1985 à 2015. Notez dans les deux cas l'augmentation de l'activité un peu avant 2015 avec le développement de l'exploitation des gaz de schistes. Cette augmentation est attribuée au Canada à la fracturation hydraulique (HF wells en bleu) alors qu'elle est attribuée à l'injection des eaux usées aux USA.

En France, il n'existe pas de cas similaire, puisque le processus de fracturation hydraulique est interdit sur le territoire national par la loi Jacob du 13 juillet 2011, validée en 2013 par le Conseil Constitutionnel.

### 3.6 INJECTION POUR L'ELIMINATION D'EFFLUENTS INDUSTRIELS

L'injection définitive d'eaux usées dans des formations souterraines profondes est une méthode très développée pour éliminer de grandes quantités d'eau, en général salée et polluée, générée notamment par la production d'hydrocarbures conventionnels comme non-conventionnels. En effet, la production de chaque baril d'huile s'accompagne de la production de trois à cinq barils d'eau en moyenne au niveau mondial et ce ratio peut atteindre 10 à 14 dans certaines zones de réservoirs matures (IFPEN, 2011). Aux Etats-Unis, environ 40% de ces eaux de reflux sont injectées massivement en profondeur (2 à 3 km) sous les réservoirs en production, dans des formations perméables, pour une séquestration permanente. Les volumes injectés sont estimés à plusieurs millions de m<sup>3</sup> par an (NRC, 2013). Ainsi, les volumes injectés le sont définitivement, contrairement aux autres procédés où un équilibre est maintenu entre les volumes injectés et extraits (hydro-fracturation, géothermie, récupération secondaire des hydrocarbures). Si cette injection se produit à proximité d'un système de faille favorablement orienté et proche de l'état critique, la probabilité de déclencher un séisme ressenti en surface est importante, en l'absence, à proximité, de système d'extraction permettant d'équilibrer la pression dans le sous-sol (Rubinstein and Mahani, 2015). Des séismes pouvant atteindre des magnitudes proches de 6 ont ainsi été observés dans ce cas de figure.

Les cas récents de sismicité générée par l'injection d'eaux de reflux les mieux documentés se situent aux Etats-Unis où cette pratique est autorisée. Depuis les années 2000, une augmentation significative du nombre de séismes de magnitude modérée ( $\geq 3$ ) à forte ( $\sim 5,7$ ), a été observée dans le centre et l'est du pays, régions pourtant considérées à faible sismicité naturelle. En Oklahoma par exemple, après des décennies marquées par un taux moyen de tremblement de terre de 21 événements / an, l'activité a bondi à 188 secousses en 2011 (Ellsworth, 2013) et a culminé à 688 en 2014 (Rubinstein and Mahani, 2015). A tel point que le nombre de séismes de magnitude supérieure à 3 est devenu plus important en Oklahoma qu'en Californie (McGarr et al., 2015) (Figure 11). Plusieurs séismes ont provoqué d'importants dommages en 2011 : à Prague (Oklahoma) M 5,6, à Trinidad (Colorado) M 5,3, à Guy-Greenbrier, (Arkansas) M 4,7 (Rubinstein and Mahani, 2015). Citons également le cas du séisme de Pawnee en 2016, de magnitude 5,6, toujours en Oklahoma.

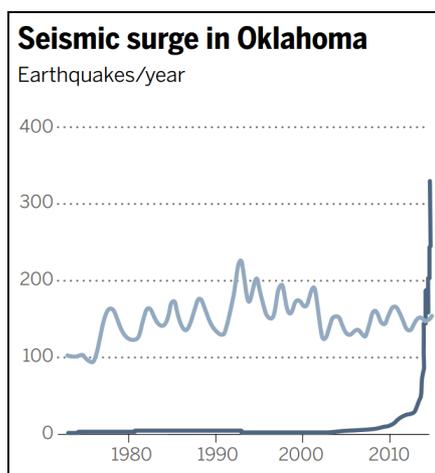


Figure 11 : Nombre de séismes de magnitude  $\geq 3$ , en Californie (bleu clair) et en Oklahoma (bleu foncé) depuis 1973 (McGarr et al., 2015)

Les études menées pour comprendre l'origine de cette augmentation brutale de la sismicité démontrent que le développement important des exploitations non conventionnelles de gaz de schistes, depuis les années 2000, a doublé la quantité de volume d'eau injectés dans le sous-sol et par conséquent, a augmenté la probabilité d'occurrence de séismes importants (Rubinstein and Mahani, 2015). On lit régulièrement dans la presse que la fracturation hydraulique pour l'exploitation des gaz de schistes est à l'origine de cette sismicité (par exemple sur le site du Monde, article du 15/01/16, (Bussard, 2016)). Pourtant, la fracturation hydraulique ne provoque en général que des séismes de faible amplitude, non ressentis en surface<sup>11</sup> sur le territoire des États-Unis. C'est de fait la gestion des effluents de cette industrie par injection des eaux de reflux sur des sites généralement situés à proximité de sites de production d'hydrocarbures non-conventionnels (où ont lieu les fracturations hydrauliques), pour des raisons économiques évidentes. Ainsi, une confusion est née dans la perception des risques associés à chacune de ces opérations, qui sont néanmoins par nature très distincte (Rubinstein and Mahani, 2015).

Néanmoins, comme mentionné dans le paragraphe précédent, dans l'ouest canadien, l'augmentation de la sismicité depuis 2010 est attribuée principalement aux activités de fracturation hydraulique (Atkinson et al., 2016). Les auteurs de cette étude suggèrent que l'extraction d'hydrocarbures aux Etats-Unis, et plus particulièrement en Oklahoma,

<sup>11</sup> Seuls quelques cas dans le monde ont été recensés où la fracturation hydraulique a été considérée comme étant à l'origine de séismes importants (cf. § 6.5).

nécessite des volumes d'eau nettement plus importants, avec pour conséquence une production de volumes d'effluents à injecter nettement plus importants qu'au Canada. Ils suggèrent que cette injection massive de fluide aux Etats-Unis masquerait le signal de la sismicité causée directement par la fracturation hydraulique.

Un des cas d'étude les mieux documentés de sismicité induite par l'injection de fluide est celui de « Paradox Valley » (Colorado, USA, Figure 12-a), où de la saumure produite naturellement est réinjectée via un forage depuis 1996 (Ake et al., 2005; Block et al., 2014; Block et al., 2015; Yeck et al., 2015). L'objectif est d'éviter que cette saumure ne s'écoule dans le fleuve du Colorado et n'en modifie sa salinité<sup>12</sup>. Le forage permet l'injection de la saumure à une profondeur d'environ 4 500 mètres (Figure 12-b). C'est presque 8 millions de mètres cubes de saumure qui ont été injectés à cet endroit (Figure 12-c). De 1997 à 2014, environ 6 000 événements sismiques ont été détectés, avec des magnitudes variant de 0,5 à 4,4. Cette sismicité s'est d'abord localisée autour du forage à la même profondeur que le point d'injection, puis de plus en plus loin du forage, pour atteindre une distance de 16 km en 2002. Le dernier séisme de magnitude 4,4 a eu lieu en janvier 2013 à plus de 8 km au nord-ouest du point d'injection. Localisé à proximité de la ville de Paradox (Colorado, USA), il a été fortement ressenti par les populations, mais n'a causé que des dégâts mineurs.

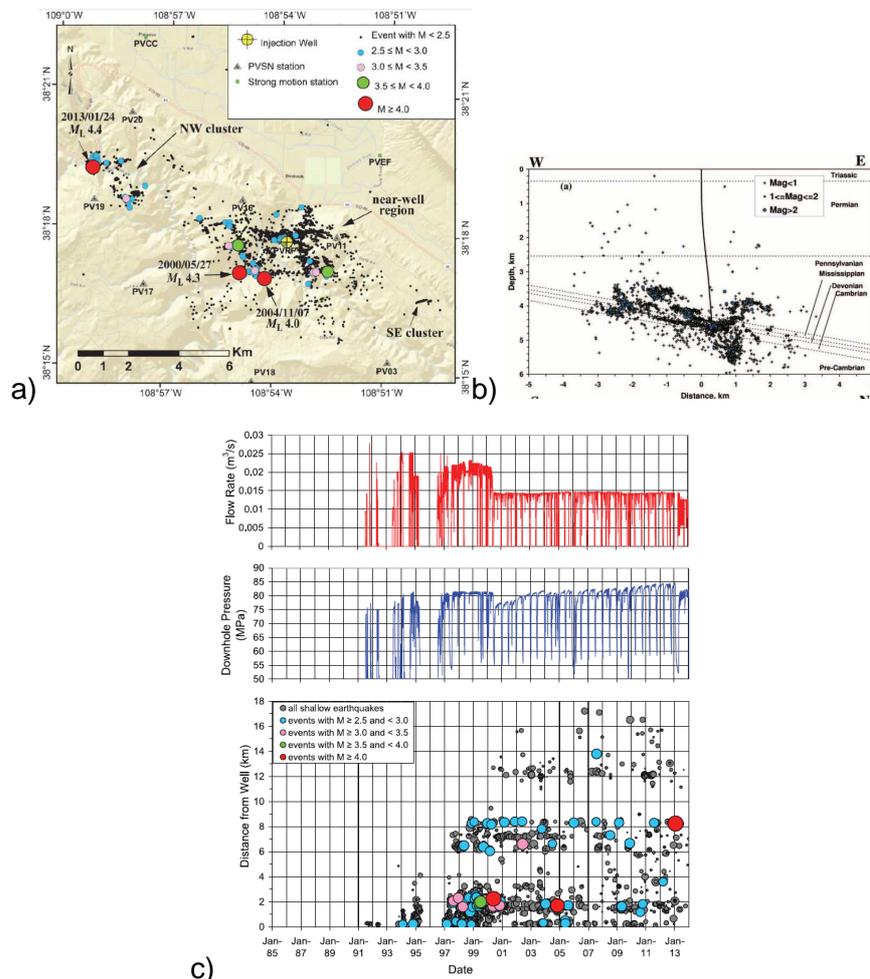


Figure 12 : a) Localisation de la sismicité sur le site de Paradox Valley (Block et al., 2014). b) forage d'injection et sismicité associée (Ake et al., 2005). c) historique d'injection, de pression en fond de puits d'injection et sismicité associée représentée en fonction de la distance au puits d'injection (Block et al., 2015).

<sup>12</sup> "Colorado River Basin Salinity Control", <http://www.coloradoriversalinity.org/index.php>

Le « Bureau of Reclamation<sup>13</sup> » en charge du site a fait stopper immédiatement les opérations d'injection. Puis des changements dans le protocole d'injection ont été réalisés pour réduire la probabilité à court terme de provoquer de nouveaux séismes. Le problème est que la quantité de sel rejetée dans le fleuve du Colorado augmente inévitablement. De plus, à long terme, les pressions souterraines augmenteront, si l'injection se poursuit même à rythme moindre, et par conséquent le risque de provoquer de nouveaux séismes reste entier. Si le site d'injection actuel devenait totalement inopérant, la salinité dans le bassin inférieur du Colorado (qui alimente les villes de Las Vegas, Los Angeles, San Diego, Phoenix etc.) augmenterait, provoquant des pertes annuelles évaluées à 24 millions de dollars (PVU, 2015). Ces pertes pourraient être plus sévères pendant les périodes de sécheresse. Des solutions alternatives sont à l'étude, avec un nouveau site d'injection et/ou la construction de bassins d'évaporation (PVU, 2015).

En France, on compte deux sites d'injection d'effluent industriel en profondeur, à savoir :

- Le site de Lacq dans les Pyrénées Atlantiques, où l'injection d'effluents industriels est réalisée dans la structure géologique dite Crétacé 4000 (forage C4000)<sup>14</sup>, en substitution du gaz naturel. Ce site est opéré par Geopétrol ;
- Le site de Grandpuits-Bailly-Carrois, en Seine-et-Marne opéré par une industrie de production d'engrais (GPN), qui élimine ses eaux usées par injection en puits profond dans la nappe du Dogger.

Le premier site réalise une injection depuis 1974, et est équipé d'un réseau de surveillance microsismique depuis 2004. La sismicité enregistrée est de faible magnitude, en général inférieure à 2.

L'usine d'engrais de Grandpuits, élimine ses eaux usées par injection en puits profond dans la nappe du Dogger, à cause de l'absence d'exutoire à proximité. Ces effluents sont salins et rejetés dans une nappe d'eau saline, selon l'exploitant. L'injection est réalisée depuis les années 70. Il n'y a pas de phénomène de sismicité anthropique connu. En revanche l'impact d'un séisme naturel seul a été pris en compte dans l'étude de demande de pérennisation de l'injection en puits profond<sup>15</sup>.

### 3.7 REMPLISSAGE DE BARRAGES HYDRAULIQUES

La relation entre sismicité et mise en eau de grands barrages a été faite pour la première fois dans les années 30 lors du remplissage du lac Mead (barrage de Hoover – Nevada) (Carder, 1945). Depuis, ce phénomène a été particulièrement étudié et est bien documenté dans la littérature (Asadollahfardi et al., 2013; Chen et al., 2014; Chen and Talwani, 2001; Gupta, 2002; Gupta and Rajendran, 1986; Hui-Hong et al., 2015; Tao et al., 2015). Le bulletin n° 137 de la CIGB<sup>16</sup>, qui présente un état des connaissances complet sur ces phénomènes, relève que ces cas de sismicité sont peu nombreux au regard du nombre de grands barrages dans le monde.

Une centaine de barrages dans le monde a été reliée à des tremblements de terre (Gupta, 2002). 28 barrages ont déclenché des séismes de magnitude comprise entre 4 et

---

<sup>13</sup> <http://www.usbr.gov/>, Le « Bureau of Reclamation », fondé en 1902, relève du Département de l'Intérieur des États-Unis et supervise la gestion des ressources en eau.

<sup>14</sup> <http://www.pyrenees-atlantiques.gouv.fr/content/download/7629/47452/file/Geopetrol-ProjetArretePrefectoral.pdf> et [http://www.pyrenees-atlantiques.gouv.fr/content/download/17980/118331/file/Presentation\\_Geopetrol.pdf](http://www.pyrenees-atlantiques.gouv.fr/content/download/17980/118331/file/Presentation_Geopetrol.pdf)

<sup>15</sup> Dossier de demande de pérennisation de l'injection en puits profond : [http://www.seine-et-marne.gouv.fr/content/download/2234/15596/file/Dossier\\_puits\\_profond\\_GPN\\_V1\\_20120206\\_synt\\_hese-2.pdf](http://www.seine-et-marne.gouv.fr/content/download/2234/15596/file/Dossier_puits_profond_GPN_V1_20120206_synt_hese-2.pdf)

<sup>16</sup> Commission Internationale des Grands Barrages <http://www.icold-cigb.org/GB/ICOLD/icold.asp>

4,9 et 10 ont déclenché des séismes de magnitude entre 5 et 5,9 (Gupta, 2002). Enfin, il y a 4 cas de séismes de magnitude supérieure à 6 avérés qui ont été répertoriés, à savoir :

- le barrage de Koyna (Inde), hauteur 103 m, séisme de magnitude 6,3 en 1967 ;
- le barrage de Kremasta (Grèce), hauteur 120 m, séisme de magnitude 6,3 en 1967 ;
- le barrage de Hsingfengchian (ou Xinfengjiang, Chine), hauteur 105 m, séisme de magnitude 6,1 en 1962 ;
- le barrage de Kariba (Zambie), hauteur 122 m, séisme de magnitude 6,25 en 1963.

Un cinquième séisme de magnitude 7,9, qui a eu lieu le 12 mai 2008 dans la région du Sichuan (ou Wenchuan, Chine) est suspecté d'avoir été déclenché par le barrage de Zipingpu (hauteur 156 m). Actuellement, l'origine naturelle ou anthropique de ce séisme est toujours débattue (Deng et al. (2010) versus Ge et al. (2009)). En effet, ce barrage est situé à proximité d'importantes failles de la chaîne himalayenne, dans le contexte de tectonique active de la collision continentale Inde-Asie (Figure 13-a). Dans cette région, le séisme se serait donc produit de toute façon, mais certains auteurs estiment que la construction du barrage aurait accéléré l'occurrence de ce séisme (Ge et al., 2009; Klose, 2012). Klose (2012) estime que le chargement de 300 millions de tonnes d'eau correspond à 60 ans de chargement tectonique équivalent dans cette région, provoquant selon lui le déclenchement anticipé du séisme. Les partisans de la cause naturelle du séisme avancent notamment que la variation de contrainte induite par le barrage à la profondeur de la source du séisme (~ 20 km) est négligeable (Deng et al., 2010). De plus, la séquence de séismes du tremblement de terre du Sichuan est très différente de celles déclenchées par d'autres barrages à travers le monde (CHEN, 2009) (Figure 13-b). Enfin la magnitude de presque 8 semble disproportionnée par rapport aux magnitudes maximum répertoriées et corrélées sans ambiguïté à la mise en eau d'autres grands barrages, de l'ordre de 6,3, soit une énergie dégagée 200 fois moins importante (CHEN, 2009).

Notons que ce séisme a eu lieu presque trois ans après le remplissage débuté en 2005. Il est considéré comme l'un des séismes les plus dévastateurs de ces 30 dernières années en Chine, avec environ 90 000 victimes, 380 000 blessés, 15 millions de personnes évacuées et 5 millions de personnes sans abri. La perte économique totale a été estimée à 67 milliards d'euros.

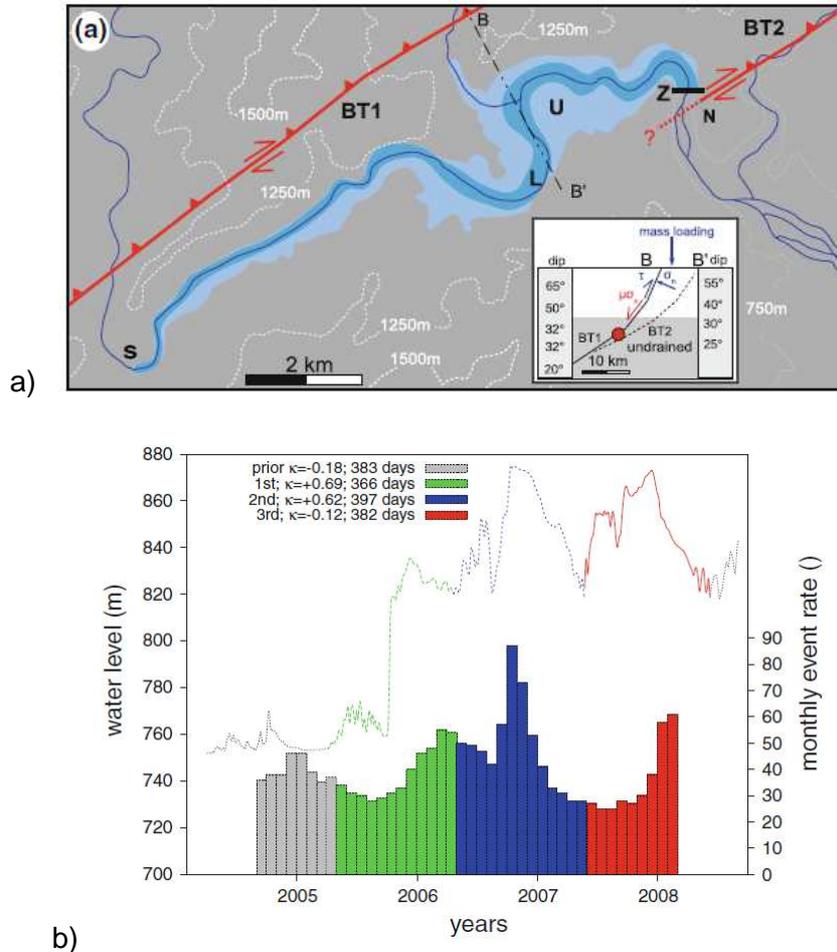


Figure 13 : a) Carte du contexte tectonique et de la localisation du barrage du Zipingpu qui pourrait être à l'origine du séisme de Sichuan (Chine) de magnitude 7.9. b) historique du niveau d'eau du réservoir et taux de sismicité mensuelle. Le niveau d'eau est indiqué en mètres au-dessus du niveau marin (cote NGF) (Klose, 2012; LEI Xing-lin, 2008).

En France, on peut noter le cas du barrage de Monteynard (Vercors), d'une hauteur de 135 m, à l'origine d'un séisme de magnitude 4,5 en 1963. En Europe, le remplissage du barrage d'Itoiz en Navarre (hauteur 122 m), dans les Pyrénées occidentales espagnoles, est à l'origine d'un séisme de magnitude 5,2 le 18 septembre 2004 (Jiménez et al., 2009). Le dernier séisme ressenti sur ce site est de magnitude 3,7 il a eu lieu le 7 mai 2010.

### 3.8 SEQUESTRATION DE CO<sub>2</sub>

Pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, une des solutions industrielles possibles est sa séquestration souterraine. Plusieurs types de formations géologiques peuvent être utilisés pour réaliser ce stockage, comme par exemple des aquifères, des veines de charbons inexploitées, ou des réservoirs d'hydrocarbures déplétés. Dans le principe, ce procédé est susceptible de générer une sismicité qui peut être de magnitude importante si le contexte tectonique est favorable (Zoback and Gorelick, 2012). En effet, les projets existants, ou en cours d'élaboration, prévoient d'injecter d'importants volumes, à haute pression, sur une longue période de temps. Le risque d'augmentation de la pression interstitielle dans le réservoir, comme nous l'avons vu dans d'autres contextes, est probable, d'autant que les volumes injectés ne sont pas équilibrés. Les interactions hydro-chimico-mécaniques qui se produisent dans le réservoir, tels que la dissolution minérale, pourraient également amplifier le problème (Espinoza et al., 2011).

Cependant, pour le moment, il n'existe pas de cas répertoriés de séismes ressentis en surface par des opérations de stockage souterrain de CO<sub>2</sub>. La principale explication est qu'il existe très peu de projets de ce type dans le monde (NRC, 2013). En Europe, on recense deux sites, celui de Sleipner<sup>17</sup> en mer du nord (Arts et al., 2004), en Norvège, et celui de Ketzin<sup>18</sup>, à 40 km à l'ouest de Berlin, en Allemagne (Martens et al., 2013). Ces deux stockages sont situés dans un aquifère salin. Sur le site de Sleipner, où 15,5 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> ont été injectés entre 1996 et 2015, plusieurs séismes de magnitude 2 à 3 ont été détectés dans les 50 km autour de la plateforme d'injection (Evans et al., 2012). Le site pilote de Ketzin n'a pas produit de sismicité ressentie (Evans et al., 2012).

Citons également le pilote de Lacq-Rousse, réalisé par Total et opéré de 2010 à 2013. Les opérations ont consisté à capturer le CO<sub>2</sub> à Lacq puis à le transporter sur 40 km avant de le stocker à Rousse dans un réservoir de gaz naturel déplété, à 4 500 m de profondeur. Avec la modeste quantité de 90 000 tonnes injectées, il s'agissait uniquement d'un pilote, cependant il a positionné la France comme acteur du stockage de CO<sub>2</sub> sur le plan international. Une faible sismicité a été enregistrée pendant et après les opérations d'injection<sup>19</sup>.

### 3.9 AUTRES CAS DE SISMICITE ANTHROPIQUE

Quelques cas de séismes associés à l'exploitation du sel par dissolution sont mentionnés dans la littérature (Nicholson and Wesson, 1992). Dans cette méthode d'exploitation, de l'eau est injectée dans des forages atteignant la couche de sel, pour le dissoudre. Puis la saumure est récupérée pour en extraire le sel. Cette méthode crée des cavités qui peuvent atteindre des tailles critiques. Le plus fort séisme associé à ce procédé, de magnitude 5,3 a eu lieu à Attica (New York, USA) en 1929. D'autres séismes de moindre magnitude ont également eu lieu sur ce site en 1966 et 1967. A Cerville, en Lorraine (France), où cette méthode d'exploitation est également utilisée, l'effondrement provoqué d'une cavité saline créée par dissolution en 2008, n'a pas généré de séismes suffisamment forts pour être ressenti (Contrucci et al., 2011; Kinscher et al., 2015).

Un séisme de magnitude 5,1, probablement déclenché par l'extraction d'eau souterraine, est décrit dans la littérature (Gonzalez et al., 2012). Ce séisme a eu lieu à proximité de Lorca en Espagne, le 11 mai 2011. Cette secousse est à l'origine du décès de 9 personnes, d'au moins 130 blessés et de 15 000 personnes laissées sans-abri. De magnitude pourtant modérée, ce séisme a été particulièrement dévastateur à cause de la faible profondeur de son épocentre (~ 2,5 km). La cordillère bétique, où se trouve la ville de Lorca, est une des zones les plus sismiquement actives de la péninsule Ibérique. L'eau pompée depuis les années 60, a fait baisser le niveau d'eau du réservoir naturel souterrain de 250 mètres. Ce déchargement massif, sur une courte période de temps, de plus à proximité d'une faille probablement proche de l'état critique, aurait créé une variation de contrainte suffisante pour déclencher le séisme d'après les auteurs (Gonzalez et al., 2012).

### 3.10 SYNTHÈSE SUR LES ÉTUDES DE CAS ET LE TYPE D'INDUSTRIE ASSOCIÉE

La Figure 14, réalisée à partir de la base de données constituée dans cette étude (cf. annexe B), représente la répartition des magnitudes maximales observées en fonction du processus industriel à l'origine de cette sismicité. On observe que les magnitudes se situent majoritairement entre 2 et 5 toutes activités confondues. Les cas de barrages

---

<sup>17</sup> <http://www.globalccsinstitute.com/projects/sleipner%C2%A0co2-storage-project>

<sup>18</sup> <http://www.co2ketzin.de/nc/en/home.html>

<sup>19</sup> <http://www.pole-avenia.com/wp-content/uploads/2017/01/OPERATIONS-03-Andr%C3%A9-MARBLE.pdf>

(dont Sichuan, M 7,9 dont l'origine anthropique est discutée), et d'extraction d'hydrocarbures (Gazli, M 7,3), correspondent aux magnitudes les plus fortes (supérieures à 6). Dans la tranche des magnitudes de 5 à 6, outre les cas de barrages hydrauliques, on trouve les cas d'extraction d'eau (séisme de Lorca, Espagne, M 5,1) et d'exploitation de sel par dissolution (séisme d'Attika, New York, USA, M 5,2). Les cinq magnitudes les plus fortes, en relation avec une activité anthropique, sont résumés dans le Tableau 4. La géothermie montre des magnitudes maximales modérées qui sont pour la plupart comprise entre 2 et 3. Elles sont inférieures en moyenne à celles observées pour l'activité minière. Les cas d'injection d'eaux usées considérés montrent des magnitudes qui peuvent être importantes (< 5). De manière générale, plus les opérations industrielles réalisées sont de grande ampleur et occupent une surface ou un volume important, plus la probabilité de déclencher un séisme de forte magnitude (sous conditions favorables) est importante (McGarr et al., 2002).

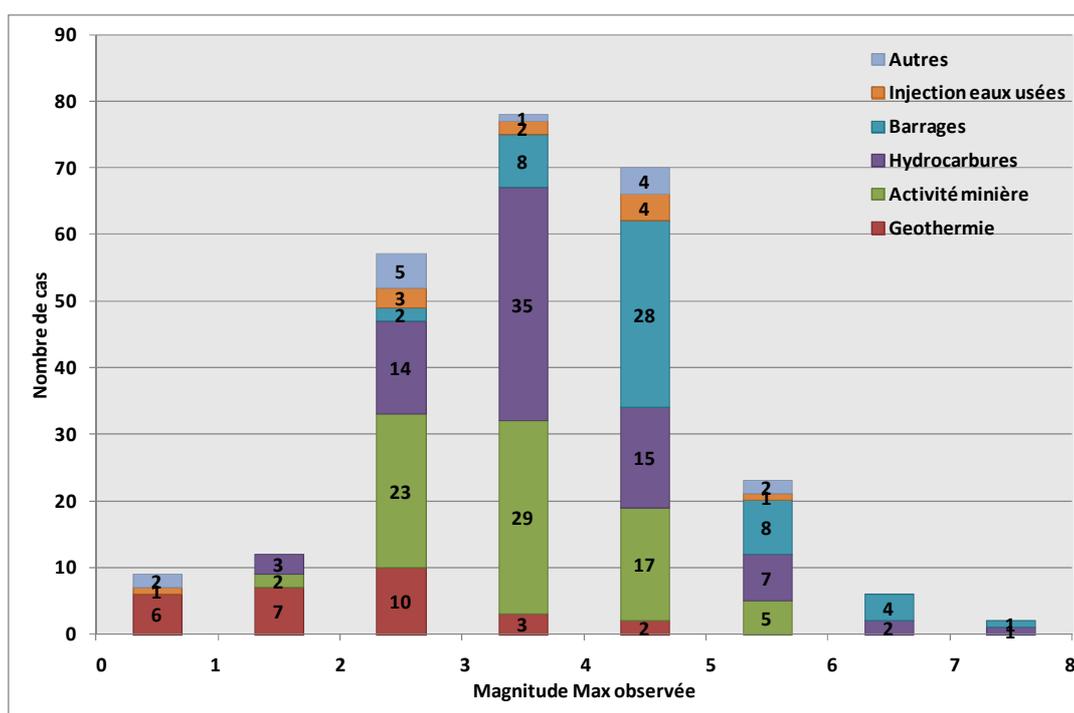


Figure 14 : Représentation des magnitudes maximales observées pour chaque type d'activité anthropique, basé sur la base de données non exhaustive présentée en annexe B de ce rapport. Les chiffres se réfèrent au nombre de cas observés.

| Site                 | Pays       | M   | Contexte industriel      | Référence              | Année |
|----------------------|------------|-----|--------------------------|------------------------|-------|
| Coalinga, California | USA        | 6,5 | Extraction hydrocarbures | (McGarr, 1991)         | 1983  |
| Gazli                | Uzbekistan | 7,3 | Extraction hydrocarbures | (Adushki et al., 2000) | 1976  |
| Koyna                | India      | 6,5 | Barrages hydrauliques    | (Gupta, 1983)          | 1967  |
| Kremasta             | Greece     | 6,3 | Barrages hydrauliques    | (Gupta, 2002)          | 1966  |
| Sichuan              | Chine      | 7,9 | Barrages hydrauliques    | (Huang et al., 2008)   | 2008  |

Tableau 4 : Les cinq événements sismiques les plus forts suspectés d'être associés à une activité anthropique.

Cette synthèse montre que toutes les activités industrielles de sub-surface qui modifient le champ de contrainte in situ peuvent potentiellement provoquer une sismicité induite et/ou déclenchée, sous certaines conditions favorables. Bien que les opérations industrielles soient de natures différentes, l'occurrence d'une sismicité est observée aussi bien dans les régions où la sismicité naturelle est déjà importante que dans celles où elle est plus faible. Les différents auteurs s'accordent sur le fait que l'état de contrainte initial du sous-sol et, en particulier, la présence de failles dans un état plus ou moins proche de l'état critique, sont les facteurs déterminants qui conditionnent l'occurrence de la sismicité, et le délai avec lequel elle apparaît. En effet, plus le système est proche de la rupture, moins il faut d'énergie pour le déstabiliser. Ainsi, une faible variation de contrainte générée par le processus industriel peut déstabiliser le système et générer des séismes. Dans ce cas, on peut observer une sismicité qui apparaît immédiatement après le début des opérations industrielles. A contrario, si le système n'est pas encore proche de cet état de rupture, c'est l'accumulation des variations de contraintes (par extraction, injection ...) sur une longue période, s'ajoutant au champ de contrainte préexistant, qui peut provoquer des ruptures. Le principal problème est que cet état de contraintes initial n'est en général pas, ou mal connu, et en particulier la présence de failles ainsi que leur état plus ou moins proche de la rupture.

La sismicité induite par le processus industriel lui-même est souvent de faible magnitude et n'est pas, ou très peu, ressentie en surface. Sous certaines conditions propices, c'est-à-dire lorsque l'orientation du champ de contrainte et celles des structures est favorable au glissement (cisaillement), des séismes de fortes magnitudes peuvent être déclenchés. Cela est possible lorsque la structure sollicitée par les variations de contraintes est de grande dimension, comme par exemple des failles préexistantes et des travaux miniers ou réservoirs qui s'étendent sur de larges étendues.

Une corrélation spatio-temporelle entre la localisation de la sismicité anthropique et le site des opérations est en général observée. Aussi, dès qu'un séisme a lieu à proximité d'une activité industrielle, celle-ci est généralement suspectée d'être à l'origine du séisme. Cela est d'autant plus vrai que le séisme s'est produit dans une région où l'activité sismologique naturelle est faible. Cependant, cette corrélation spatio-temporelle n'est pas toujours vérifiée. C'est notamment le cas lorsque la sismicité est déclenchée par l'injection ou l'infiltration de fluides dans le sous-sol, avec augmentation de la pression interstitielle : géothermie profonde, extraction d'hydrocarbures, injection d'eaux usées, stockage de gaz ou de CO<sub>2</sub>, ennoyage des mines, remplissage de barrage .... En effet, les études de cas ont montré que la sismicité peut se produire loin du point d'injection (jusqu'à plusieurs dizaines de kilomètres) et être différée dans le temps, jusqu'à plusieurs années. De plus, la diminution des vitesses d'injection et/ou l'arrêt de l'injection ne diminue pas toujours l'occurrence des séismes, ni leur magnitude. Les plus fortes magnitudes ont été observées dans les situations où les volumes injectés ne sont pas équilibrés par les volumes extraits. Les auteurs expliquent ces phénomènes par le rééquilibrage différé des pressions dans la masse rocheuse, en lien avec les conditions hydrogéologiques du site.

En France, la sismicité anthropique est de faible magnitude et n'a pas causé de dégâts notables. Seuls quelques événements ont été ressentis, comme par exemple, pour les plus récents, sur le site actif de géothermie profonde de Soultz-Sous-Forêts, ou dans l'ancien bassin houiller de Gardanne (Tableau 5).

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

*Tableau 5 : tableau récapitulatif de l'activité sismique anthropique en France. Les magnitudes maximales détectées pour chaque projet industriel ont été recensées.*



## **4. COMMENT EVALUER L'ALEA DE SISMICITE ANTHROPIQUE**

L'aléa sismique représente la probabilité, pour un lieu donné, d'occurrence d'un événement sismique d'une intensité donnée et permet de déterminer le mouvement du sol attendu, consécutivement à un séisme.

L'évaluation de l'aléa de sismicité naturelle intègre ainsi la magnitude, l'ampleur et la période de retour des séismes naturels. Elle repose sur l'hypothèse qu'un séisme qui s'est produit par le passé dans une région donnée peut se reproduire à l'avenir à l'identique.

L'évaluation de l'aléa de sismicité anthropique repose sur ce même principe, mais intègre également le rôle que peut jouer l'activité humaine dans l'occurrence de séismes (dans l'espace et dans le temps), notamment par la prise en compte de considérations liées au contexte considéré et aux activités en jeu. L'idée ici est d'anticiper, ou d'essayer de prédire, l'occurrence d'un séisme.

### **4.1 DONNEES D'ENTREE CLASSIQUES**

La première étape d'une étude d'aléa consiste à identifier, à l'échelle locale et régionale, les zones dites sismogènes et à caractériser les sources sismiques. Celle-ci repose généralement sur deux approches complémentaires :

- la cartographie aussi détaillée que possible des failles en présence, pour identifier les segments qui ont pu jouer dans des temps historiques et des temps plus récents et donc susceptibles de se réactiver. Il s'agit en particulier d'estimer la dimension, l'orientation par rapport au champ de contrainte régional, ainsi que la géométrie des failles en présence sur la base de relevés en surface ;
- l'étude de la sismicité naturelle régionale sur la base de catalogues de données instrumentales recueillies par les stations sismologiques des réseaux de surveillance nationaux et/ou régionaux et sur la base de catalogues de sismicité historique qui détaillent les caractéristiques de séismes anciens, tirées de récits et autres sources documentaires anciennes. Dans la pratique, ces catalogues de sismicité sont bien souvent incomplets ; ils peuvent également manquer de précision quant à la localisation et la magnitude de séismes passés. Ceci est d'autant plus vrai pour les zones peu actives sismiquement pour lesquelles les temps de récurrence de séisme sont grands.

Par ailleurs, l'organisation dans l'espace des failles de grandes dimensions étant souvent complexe, il peut être utile, pour affiner l'identification des zones sismogènes et sources sismiques, de mener des investigations complémentaires par exemple par :

- des techniques de prospection géophysique pour confirmer ou infirmer des indices indirects de la présence de faille en surface ou encore imager les structures de failles en profondeur ;
- photographie aérienne ou imagerie satellitaire pour compléter les observations de terrain par une estimation précise des champs de déplacements par des séismes passés, et appréhender les éventuelles interactions entre segments de failles locaux et régionaux ;
- des levés hydrologiques et géochimiques pour apporter des informations sur la circulation des eaux souterraines, une faille pouvant agir comme drain, barrière ou semi-barrière aux écoulements.

Précisons que le coût financier de ces investigations peut rapidement être élevé. Il peut se justifier lorsque le contexte sismotectonique et la dynamique actuelle sont compatibles avec l'occurrence de séisme de magnitude supérieure à 4 - 5. Notons aussi que ces

approches, mêmes si elles apportent des informations fondamentales, ne permettent pas d'identifier de manière exhaustive toutes les failles présentes sur un site.

Une fois les sources sismiques identifiées et caractérisées, il est nécessaire de se donner un modèle d'atténuation de l'amplitude du mouvement du sol représentatif du contexte géomorphologique du site y compris des éventuels effets de site qui peuvent modifier sensiblement le mouvement du sol (cf. §2.3.2).

## 4.2 MODELES PREDICTIFS : APPROCHES DETERMINISTE ET PROBABILISTE

L'aléa sismique peut être estimé à partir de deux méthodes différentes souvent opposées, mais pourtant basées sur les mêmes données d'entrée (cf. § 4.1) :

- l'approche déterministe (Reiter, 1990) pour calculer par modélisation numérique les effets et mouvements du sol sur la base d'un scénario de rupture clairement identifié (souvent l'on considère le cas défavorable des séismes de magnitudes les plus élevées). La modélisation prend en compte les caractéristiques géologiques, géo-mécaniques et hydrologiques locales des terrains, notamment la présence et la densité de failles, leur orientation par rapport au champ de contrainte et l'effet du processus industriel sur les variations du champ de contrainte local (historique de l'injection / extraction etc.) ;
- l'approche probabiliste (McGuire, 2004), historiquement basée sur la loi de répartition des séismes de Gutenberg-Richter<sup>20</sup>, qui fait le lien entre la magnitude des séismes et leur fréquence d'apparition. Cette approche fournit un niveau du mouvement du sol ayant une certaine probabilité d'être dépassé sur une certaine période de temps.

L'approche déterministe s'avère généralement complexe à mettre en œuvre puisque les données d'entrées sont entachées de nombreuses incertitudes, souvent difficiles à quantifier, notamment la localisation des failles en profondeur et leur état de contrainte. Les failles en tant que telles peuvent également être difficiles à modéliser car elles induisent des discontinuités numériques. Enfin, ces modèles de prévision de la sismicité doivent être validés par des mesures in situ, ce qui n'est pas toujours réalisable. Cette validation est pourtant fondamentale pour comprendre et quantifier le rôle de chacun des paramètres physiques dans le déclenchement d'un séisme, qu'il soit naturel ou induit (Alber and Fritschen, 2011). Dans le cas d'une activité sismique significative, il est parfois possible par les moyens de tomographie sismique, de détecter et d'imager la présence de failles en profondeur et apporter ainsi des données supplémentaires pour contraindre les modèles numériques (Baisch et al., 2009; Bruehl, 2007).

L'estimation probabiliste, applicable pour la sismicité anthropique et naturelle, consiste, sur la base de la fréquence d'occurrence des séismes, à estimer la probabilité qu'un séisme de magnitude ou intensité donnée se produise au moins une fois en un site donné sur un intervalle de temps donné. On cherche donc à estimer la probabilité d'occurrence de séismes en mettant en place des modèles statistiques empiriques (Mignan et al., 2017; Mignan et al., 2015). Dans cette approche, la complétude des catalogues de sismicité est une donnée d'entrée essentielle qui dépend fondamentalement de la qualité de l'instrumentation et des moyens techniques (configuration et densité du réseau).

Il n'existe pas actuellement de consensus sur le type d'approche à utiliser pour anticiper l'occurrence des séismes et de leur magnitude. Les deux approches, déterministe et probabiliste, pour l'estimation de l'aléa sismique sur un site particulier sont en général utilisées (Gaucher et al., 2015; Majer et al., 2012; Majer et al., 2014). Récemment, des modèles hybrides ont été développés, notamment en géothermie profonde, où les

---

<sup>20</sup> Cette relation décrit la distribution des séismes par classe de magnitude, ou encore le ratio entre les nombres de séismes de magnitude M et M+1.

données modélisées issues du modèle physique servent de données d'entrée au modèle probabiliste (Hossein Hakimhashemi et al., 2014).

### 4.3 REVISION DES CARTES D'ALEA SISMIQUE A L'ECHELLE D'UN TERRITOIRE

La restitution des études d'aléa se fait généralement sous forme de cartes d'isovaleurs d'un paramètre du mouvement du sol (accélération, vitesse, déplacement) pour une période de retour donnée. Elles sont utiles au dimensionnement des bâtiments, structures et infrastructures qui seront construits dans la zone concernée<sup>21</sup>. En effet, même si l'aléa sismique est faible, la vulnérabilité peut être importante en milieu urbain ou sur des sites avec des infrastructures sensibles.

De ce fait, les cartes sont révisées périodiquement sur la base de nouvelles connaissances acquises permettant de mieux tenir compte des incertitudes liées aux données de sismicité historique et de l'amélioration des connaissances sur la prise en compte de lois d'atténuation, effets de sites et autres paramètres d'entrée des études d'aléa (ex : mécanisme au foyer, effet du champ proche d'une faille etc.).

Malgré l'augmentation de la sismicité anthropique de par le monde, les études d'aléa n'intègrent pas la sismicité anthropique. Les catalogues de sismicité sont systématiquement nettoyés pour ne tenir compte que de la sismicité naturelle, puisque l'élaboration des cartes d'aléa repose sur l'hypothèse que la sismicité est un phénomène stationnaire dans le temps.

Avec l'augmentation de la sismicité anthropique de nouvelles questions se posent :

- comment prendre en compte dans l'estimation de l'aléa sismique, la sismicité anthropique, qui varie à la fois dans le temps et dans l'espace ?
- doit-on, comme pour les prévisions météorologiques, être capable de produire des cartes d'aléa sur la base de la sismicité de la semaine, du mois ou de l'année écoulée ?
- quelles sont les implications pour l'évaluation du risque, sa mitigation, et comment établir / définir les responsabilités et éventuelles mesures d'indemnisation ou de réparation des dommages selon que l'aléa soit naturel ou anthropique ?

La communauté scientifique s'est en partie saisie de ces questions, notamment l'USGS<sup>9</sup> qui a pour la première fois, produit une carte d'aléa (Petersen et al., 2015) intégrant des données de sismicité naturelle et anthropique à l'échelle du territoire américain. A la date de rédaction du présent rapport, ces cartes d'aléa sont réévaluées sur la base d'un temps de récurrence d'un an<sup>22</sup>. Elles montrent que du fait de la sismicité anthropique, la probabilité annuelle d'occurrence d'un séisme destructeur en Oklahoma est désormais comparable à celle observée en Californie (Figure 15).

---

<sup>21</sup> La France est soumise au code européen de construction parasismique, l'Eurocode 8 : <http://www.eurocode1.com/fr/eurocode8.html>

<sup>22</sup> <https://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr20161035>

#### USGS Forecast for Damage from Natural and Induced Earthquakes in 2016

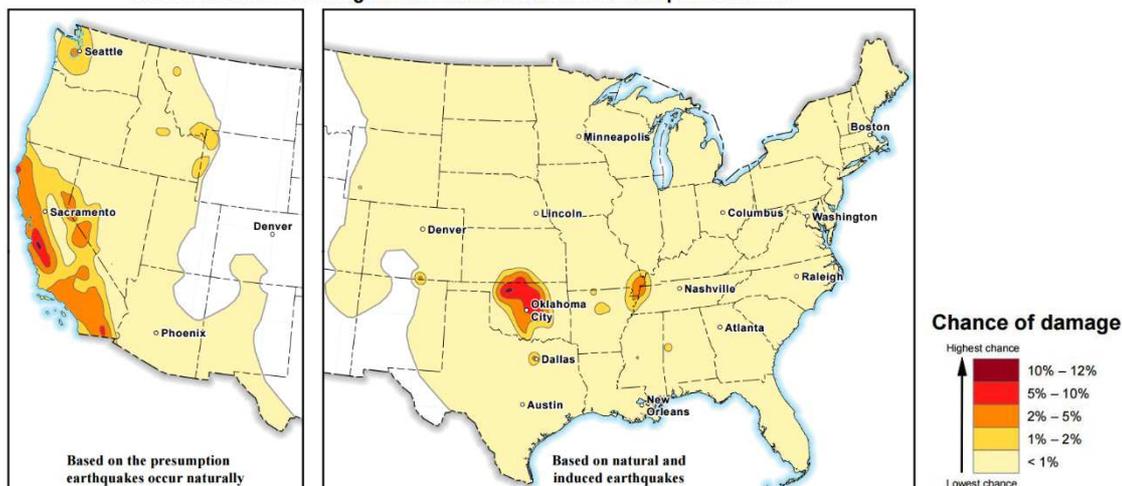


Figure 15 : Carte du risque sismique à l'échelle du territoire des Etats Unis produite par l'USGS montrant la probabilité de dommages causés par des séismes naturels et anthropiques en 2016. Les probabilités varient de moins de 1% à 12%.

#### 4.4 CARACTERISATION DE L'ALEA SISMIQUE DANS L'INDUSTRIE MINIERE

Le cas de l'industrie minière souterraine est tout-à-fait singulier car il en va de la sécurité des mineurs qui sont directement exposés au risque sismique. Dès le début du XX<sup>ème</sup> siècle, le secteur minier a ainsi contribué de manière décisive à l'amélioration des connaissances sur ce sujet et la prise en compte de l'aléa de sismicité anthropique dans les schémas d'exploitation.

D'importants progrès ont ainsi été réalisés au cours des dernières décennies, mais la problématique reste complexe. On observe aujourd'hui dans certaines mines d'or profondes d'Afrique du Sud, que les opérateurs miniers travaillent à estimer l'aléa sismique sur trois périodes de temps : long terme (annuel), moyen terme (mensuel) et court-terme (journalier) (Rebuli and van Aswegen, 2013; Spottiswoode, 2010).

Sur le long terme, l'aléa est estimé selon la planification des futurs chantiers à partir de modélisations numériques. A moyen terme il s'agit de détecter des réponses anormales du massif rocheux à l'exploitation. Dans ces deux approches, l'objectif est d'estimer la plus forte magnitude probable dans certains quartiers de la mine. Enfin, concernant le court terme, les cartes d'aléa sont réactualisées en fonction de l'avancement des travaux et des données sismologiques enregistrées au quotidien par des réseaux de surveillance. Il s'agit ici de détecter par exemple une anomalie géologique en front de chantier ou une zone locale en sur-contrainte du fait de la géométrie des travaux ou de discontinuités géologiques. Les variations de certains paramètres permettent le calcul de la probabilité d'occurrence de l'événement le plus fort sur la période considérée. Cette approche de prédiction à court terme a été mise en œuvre avec un certain succès, mais ne fonctionne pas de manière systématique (Rebuli and van Aswegen, 2013).

De manière générale, malgré les progrès considérables des technologies de surveillance ainsi que des connaissances réalisés ces dernières décennies, le risque sismique dans les mines profondes reste un risque majeur contre lequel seule la prévention avec le développement de bonnes pratiques d'exploitation et de mise en sécurité des chantiers permet de limiter l'impact.

## **5. RISQUES LIÉS À LA SISMICITÉ ANTHROPIQUE**

L'estimation du risque sismique consiste à décrire et quantifier les pertes et dommages qui pourraient être générés par l'impact des ondes sismiques sur les enjeux présents à proximité de la zone épiscopale. Ces enjeux concernent à la fois le bâti, les ouvrages d'arts, les infrastructures de surface et les réseaux enterrés. La morphologie même des sols et terrains peut être impactée lorsque des glissements de terrains sont déclenchés, ou provoquer la liquéfaction des sols. Les dommages ont en général lieu en surface, mais ils peuvent également toucher les infrastructures souterraines, même si celles-ci restent bien moins sensibles aux ondes sismiques compte tenu de leur confinement dans les couches souterraines. L'estimation du risque sismique repose à la fois sur l'évaluation de l'aléa sismique (localisation et magnitude) et celle de la présence d'enjeux et de leur vulnérabilité aux vibrations sismiques.

La problématique de la sécurité des personnes est fortement liée à la vulnérabilité des bâtis et ouvrages car c'est l'endommagement voire la destruction de ceux-ci qui met en danger la population. Dans l'industrie minière en milieu profond, c'est la destruction des galeries et chantiers de front de taille qui met en danger la sécurité des mineurs. La réduction de la vulnérabilité des enjeux passe par des normes de construction parasismiques dans le premier cas, par des techniques de renforcement des galeries minières dans le second cas.

Nous allons voir dans cette section quels sont les risques, en lien avec les vibrations générées, liés à la sismicité d'origine anthropique dans différents domaines.

### **5.1 SPECIFICITÉ DE LA SISMICITÉ ANTHROPIQUE ET LOIS D'ATTENUATION**

Les méthodes d'évaluation de l'impact en surface de séismes naturels ne peuvent pas être directement transférées à l'analyse des vibrations générées par les séismes anthropiques (Bommer et al., 2015). En effet, ces séismes sont peu profonds (profondeur < 5 km), et par conséquent il est difficile d'appliquer directement les lois d'atténuation (ou modèle de vibration au sol) établies à partir des séismes naturels. Ces lois relient magnitudes et distances à la source sismique aux valeurs de PGV ou PGA (cf. §2.3.3) attendues en un point de la surface. Ainsi, les secousses générées par ces séismes peu profonds peuvent être nettement plus nuisibles et dommageables que pour des séismes tectoniques de magnitude équivalente (NRC, 2013).

La Figure 16 illustre ce principe : un séisme de magnitude 3 ou 4 n'est pas (ou peu) ressenti en surface dans le cas d'un séisme tectonique, situé à 10 km de profondeur, alors qu'il peut l'être pour un séisme anthropique de même magnitude, situé à 2 km de profondeur. Un séisme de magnitude 5, pourra être ressenti dans les deux cas, mais sur une surface plus importante dans le cas d'un séisme anthropique peu profond.

De nombreux auteurs font le constat aujourd'hui que les événements de magnitude faible à modérée qui se produisent à de courtes distances hypocentrales méritent une évaluation minutieuse, pour la cartographie nationale du risque sismique (cf. § 4.3) et pour le dimensionnement du bâti (Atkinson, 2015; Bommer et al., 2015; Rubinstein et al., 2014).

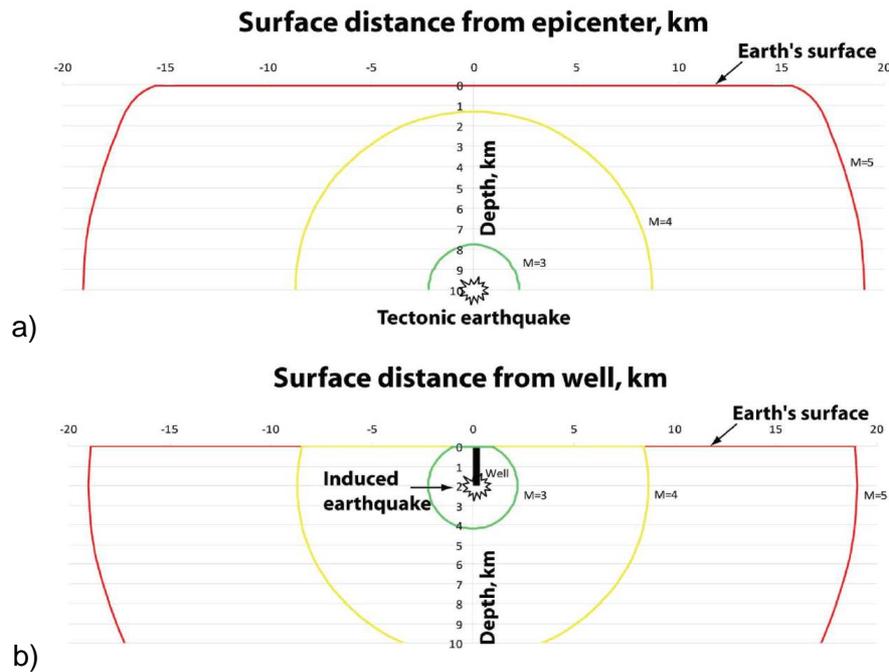


Figure 16 : Vues en coupe illustrant la distance maximale jusqu'à laquelle les secousses seront produites pour des séismes de magnitude 3 (ligne verte), 4 (ligne jaune) et 5 (ligne rouge) pour (a) un séisme tectonique situé à 10 km de profondeur ou (b) anthropique situé à 2 km de profondeur (NRC, 2013).

## 5.2 RISQUE POUR LE BATI ET LES INFRASTRUCTURES DE SURFACE

Un des problèmes majeurs de la sismicité anthropique est qu'elle peut se produire dans des régions où le risque est naturellement faible, et où, par conséquent, les constructions n'ont pas été dimensionnées pour résister à des séismes, même de faible intensité (Ellsworth, 2013). A titre de comparaison un séisme naturel de magnitude 5,6 en Californie ou au Japon ne cause aucun dégât, alors qu'un séisme de magnitude similaire (5,7) comme celui de Prague 2011, en Oklahoma, a causé quelques blessés et 10 millions de dollars de sinistres. Citons également, le séisme anthropique de Lorca (Espagne) en 2011, de magnitude encore moindre (5,1), qui a été particulièrement dévastateur, ou celui de Newcastle en Australie, en 1989, de magnitude 5,6 (cf. §3.9 et §3.1). Les lourdes pertes créées par ces deux derniers tremblements de terre, attribués à des opérations industrielles dans le sous-sol, résultent de l'exposition de nombreux bâtiments fragiles (notamment historiques) à de fortes secousses produites par des sources sismiques situées à faible profondeur (van Eck et al., 2006).

Les séismes, qu'ils soient naturels ou anthropiques se manifestent, par des vibrations, des déplacements et des accélérations du sol. Sollicitées de manière alternée, désordonnée, et à différentes fréquences, les structures sont soumises à des oscillations horizontales, verticales et en torsion, qui génèrent des efforts plus ou moins importants (Figure 17). Les forces qui s'exercent alors sont essentiellement des forces d'inertie, qui sont d'autant plus importantes que la masse de la construction est grande et que les accélérations du sol sont fortes. Il peut s'ensuivre une déformation, variable également selon les types de structures. Cette déformation peut être aggravée lorsque la nature fréquentielle du mouvement du sol coïncide avec la fréquence de résonance de la structure, car elle conduit à une amplification progressive des mouvements. La réponse d'un bâtiment aux sollicitations sismiques dépend de sa conception architecturale, notamment des matériaux utilisés et de la répartition des masses et volumes, des sections des éléments porteurs et de sa géométrie (hauteur en particulier).

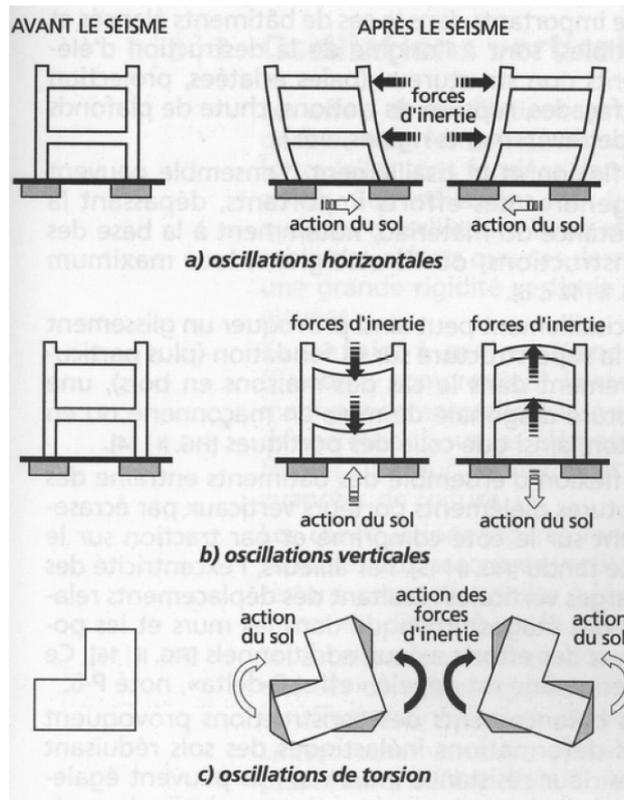


Figure 17 : Illustration des trois modes d'oscillation d'une structure soumise à un séisme (Zacek, 2004).

La connaissance de la vulnérabilité sismique du bâti peut être utile y compris dans des zones d'aléa sismique anthropique faible à modéré, le risque sismique pouvant en effet s'avérer élevé dans des secteurs fortement urbanisés et les centres historiques. Il existe différentes méthodes permettant une évaluation à grande échelle de la vulnérabilité d'un site et une analyse préliminaire pour identifier les structures nécessitant une étude détaillée. L'Association Française du Génie Parasismique (AFPS) propose une méthode basée sur 8 critères (Annexe C et Tableau 7). A chaque critère est associé un nombre de points dont le total « K » renseigne sur la vulnérabilité (Tableau 6) :

| Indice de vulnérabilité K | Diagnostic                |
|---------------------------|---------------------------|
| $K > 100$                 | très forte vulnérabilité  |
| $50 < K < 100$            | forte vulnérabilité       |
| $25 < K < 50$             | vulnérabilité moyenne     |
| $10 < K < 25$             | vulnérabilité faible      |
| $K < 10$                  | vulnérabilité très faible |

Tableau 6 : table d'indice de vulnérabilité de K (Zacek, 2004)

Une étude plus détaillée est conseillée lorsque l'indice K obtenu est supérieur à 50. Lorsqu'il est inférieur à 50, on estime un niveau de dommages en fonction de l'accélération maximale attendue du sol (PGA).

Notons que le PGA (Tableau 7) est estimé dans un domaine de fréquence donné, souvent avec un filtrage passe-bas vers 30 Hz. Ce domaine est défini pour les séismes naturels « lointains », qui ont en fait peu d'énergie au-dessus de 15 Hz. Cela pourrait ne plus être tout à fait pertinent pour les sources sismiques très proches en raison de l'atténuation moindre des plus hautes fréquences (entre 15 – 30 Hz).

| PGA   | $K < 10$                     | $10 < K < 25$        | $25 < K < 50$   |
|-------|------------------------------|----------------------|-----------------|
| 0,1 g | Dommmage nul à négligeable   | Dommmage négligeable | Dommmage léger  |
| 0,2 g | Dommmage négligeable à léger | Dommmage léger       | Dommmage modéré |
| 0,3 g | Dommmage léger à modéré      | Dommmage modéré      | Dommmage grave  |

Tableau 7 : Evaluation des dommages en fonction de l'accélération du sol pour les bâtiments caractérisés par un indice  $K < 50$  (d'après l'AFPS<sup>23</sup>).

### 5.3 RISQUES SUR LES INSTALLATIONS INDUSTRIELLES

Les séismes d'origine anthropique sont susceptibles d'occasionner les mêmes dégâts, ou des dégâts plus importants, que les séismes naturels. Etant donné que les séismes anthropiques ont une probabilité forte de se produire sur un site industriel, nous rappelons ici brièvement les conséquences qui pourraient être attendues sur différentes infrastructures sur la base d'une étude réalisée par l'INERIS (Ayrault, 2001).

Celle-ci montre que les réservoirs de stockages non ancrés sont plus exposés à un risque de fuites suite à une déformation de la base du réservoir. D'après l'accidentologie, d'autres équipements sont particulièrement exposés aux séismes, comme les canalisations, les matériels électriques ainsi que, dans une moindre mesure, les pompes, les compresseurs et les machines tournantes. Cette analyse montre également que des dégâts importants peuvent être générés par les incendies post séisme. Ces incendies peuvent être issus : de fuites de gaz, de propagations de feux dans certaines entreprises, d'inflammation de vapeurs d'hydrocarbures liquides. Ces incendies alourdissent énormément les dommages directs d'un séisme. D'autant plus qu'il est très difficile pour les pompiers d'intervenir sur ces feux, étant donné les difficultés d'accès et les dégradations subies par les réseaux d'eau incendie suite au séisme. Ainsi, il faut veiller à protéger les moyens de lutte contre l'incendie contre le risque sismique.

### 5.4 RISQUE POUR LES OUVRAGES SOUTERRAINS

Il est reconnu que les séismes naturels, basses fréquences et lointains, ont des effets bien moins sévères sur les ouvrages souterrains qu'en surface, compte tenu du confinement des ouvrages souterrains en couche géologique, à comparer aux degrés de liberté des bâtis et ouvrages ancrés par leurs seules fondations au sol en mouvement (Dowding and Rozan, 1978).

Cependant, les séismes anthropiques, situés à des profondeurs proches des ouvrages souterrains, peuvent générer des longueurs d'ondes comparables aux dimensions des structures. Dans ces conditions, des phénomènes de résonance peuvent apparaître et conduire à des dégâts (Dowding and Rozan, 1978). Comme attendu, les tunnels situés dans des massifs avec un fort potentiel de liquéfaction ou les entrées de tunnels situées à proximité de zones de glissement de terrain potentiel sont plus à risque que les tunnels situés dans des roches compétentes (Dowding and Rozan, 1978). Enfin, des dommages sévères sont inévitables lorsque l'ouvrage souterrain est intersecté par une faille le long de laquelle se produit le séisme (Dowding and Rozan, 1978).

<sup>23</sup> <http://www.afps-seisme.org/PUBLI/Cahiers-techniques/Cahier-Technique-25-Vulnerabilite-sismique-2005>

## 5.5 RISQUE POUR LES FORAGES ET LES PIPELINES

En général, les forages résistent bien aux séismes naturels et lointains, à cause de leur dimensionnement. En effet, ce sont des ouvrages confinés et de petites dimensions par rapport aux longueurs d'onde des séismes naturels. Ils ne sont donc pas très sensibles, dans ces conditions, à la rupture notamment qui serait provoquée par des ondes de cisaillement émises par un séisme lointain.

Théoriquement, les forages pourraient être endommagés par des séismes anthropiques, si, comme les ouvrages souterrains, ils étaient mis en résonance par des longueurs d'onde de mêmes dimensions (Dowding, 1996; Majer et al., 2014). Cela n'a à ce jour, à notre connaissance, pas été rapporté dans la littérature scientifique. Une étude menée par Dowding (1996) a montré que des tirs réalisés à proximité de puits produisant de l'eau n'entraînaient aucune perte de capacité de production avec des PGV atteignant jusqu'à 0,84 cm/s et aucune perte de niveau d'eau avec des PGV jusqu'à 14,1 cm/s (Dowding, 1996; Majer et al., 2014). Néanmoins, des dommages peuvent être constatés dans des forages traversant directement les plans de faille. Dans ce cas de figure, les dommages sont dus directement au mouvement différentiel du massif rocheux (Dowding, 1996; Pratt and Hustrulid, 1978). Quelques dommages ont été également observés sur des forages localisés en sub-surface (< 100 m de profondeur) et situés dans des sédiments non consolidés (Pratt and Hustrulid, 1978).

Les pipelines, contrairement aux forages, sont très sensibles aux séismes d'origine naturelle (Berrones and Liu, 2003), et a fortiori aux séismes anthropiques (Dowding, 1996; Majer et al., 2014). En effet, les pipelines sont de grandes structures horizontales qui sont par conséquent particulièrement affectées par les mouvements différentiels du sol provoqués par un séisme. Des contraintes de traction relativement importantes existent sur la paroi des tuyaux à cause du gaz, ou fluide, qui y circule à haute pression. Ces contraintes se superposent aux contraintes induites par le passage des ondes de mouvement du sol, et peuvent provoquer ainsi la rupture du pipeline. A cela, peuvent s'ajouter les défauts de conception, de soudure ou d'entretien qui fragilisent la structure. Ainsi, les effets des séismes doivent être pris en compte lors de la conception de pipelines sur un site industriel susceptible d'induire une sismicité.

## 5.6 IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT

Un séisme peut avoir des impacts différents sur le territoire. En termes de stabilité de terrain, il peut potentiellement provoquer le déclenchement de glissements de terrain ou d'éboulements rocheux, voire la liquéfaction des sols. Ce type de phénomène a été bien documenté pour les grands séismes naturels (Jibson, 1993; Keefer, 2002) mais reste difficile à prédire. Concernant les séismes anthropiques, notamment lorsqu'ils sont déclenchés, les niveaux de vibrations atteints peuvent être du même ordre de grandeur que pour les séismes naturels. Par conséquent, ils peuvent aussi provoquer des glissements de terrain. On peut citer par exemple, le séisme du Sichuan (Chine, 2008), dont l'origine naturelle ou déclenchée est toujours controversée (cf. §3.7), et qui est à l'origine de nombreux glissements de terrain (plus de 5 000) dans une région particulièrement montagneuse (Yin et al., 2009). Les auteurs de cette étude précisent qu'environ 20 000 décès ont été causés directement par les glissements de terrain déclenchés par ce séisme.

En termes de variation de la qualité des nappes phréatiques et de leur possible pollution, on peut citer un exemple aux Etats-Unis en Pennsylvanie, où plusieurs cas de contamination par le méthane ont été décelés à proximité de puits d'extraction de gaz de schiste et jusqu'à 1 kilomètre de distance (Jackson et al., 2013; Osborn et al., 2011). Le processus de fracturation hydraulique a été examiné pour savoir si la création de failles pouvait être à l'origine de cette contamination. Les auteurs ont montré que l'eau provenant des puits d'eau potable n'était pas contaminée directement par les fluides

utilisés dans le processus de fracturation, qui sont particulièrement toxiques. La raison de cette contamination est plutôt attribuée à de mauvaises pratiques de forage et/ou à la perte d'étanchéité d'anciens forages d'hydrocarbures situés à proximité. Cependant, ce risque ne peut pas être totalement exclu<sup>24</sup> (Howarth et al., 2011).

On peut citer également la possibilité d'une fuite de CO<sub>2</sub> provoquée par un séisme, lors de sa séquestration en profondeur. D'une manière générale, il existe toujours un risque de fuite ou de diffusion d'un produit polluant dès qu'une zone de faille est sollicitée sur un site industriel.

## 5.7 RISQUES PSYCHO-SOCIAUX ET FINANCIERS

Le niveau d'acceptabilité, par les populations, des nuisances créées par les vibrations et mouvements du sol est subjectif et difficile à quantifier. Certaines vibrations, ou le bruit, bien que de très faible amplitude, si elles sont répétées, peuvent créer des angoisses ou avoir un impact négatif sur la vie des personnes. La Figure 18, tirée de Bommer et al. 2006, illustre les niveaux de sensibilité humaine aux vibrations créées par des tirs, le trafic routier et des engins de travaux publics de type tarière.

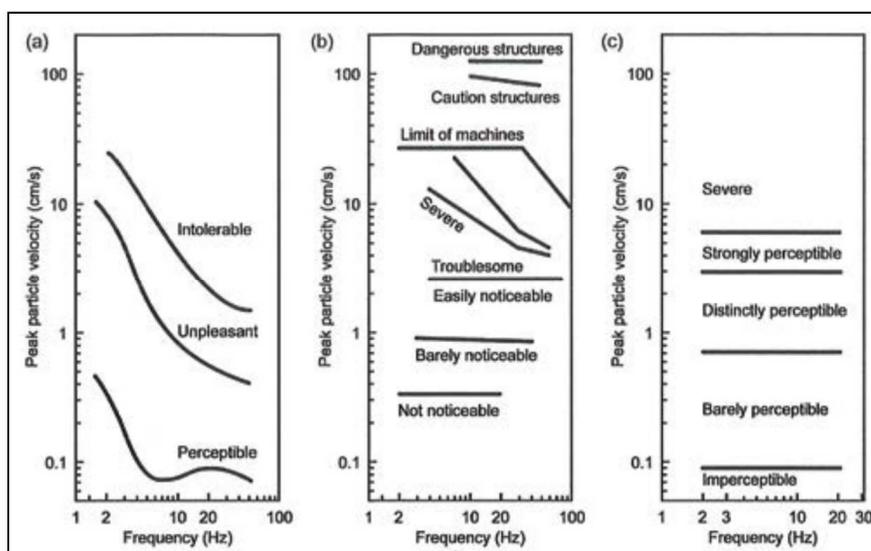


Figure 18 : Niveaux de sensibilité humaine à différentes sources de vibrations (a) des tirs, (b) trafic routier et (c) des engins de travaux publics de type tarière (Bommer et al., 2006)

La population peut ainsi ressentir de l'anxiété même lorsque le niveau de vibrations perçu est faible et ne cause peu ou pas de dommages physiques au bâti ou à l'environnement (Majer et al., 2014; van der Voort and Vanclay, 2015). Une étude réalisée auprès des résidents situés à proximité du champ gazier de Groninger (Hollande) montre que les impacts sociaux et émotionnels provoqués par la sismicité induite portent à la fois sur : les dommages matériels, la baisse des prix des maisons, des inquiétudes concernant la possibilité de rupture de pipelines, des sentiments d'angoisse et d'insécurité, des problèmes de santé, et de la colère (van der Voort and Vanclay, 2015). De plus, l'auteur précise que ces impacts sont exacerbés par la méfiance croissante des habitants de Groninger envers le gouvernement national et l'exploitant. L'occurrence des séismes a

<sup>24</sup> Série d'articles sur le sujet du New-York Times :

<http://www.nytimes.com/2011/02/27/us/27gas.html?hp>  
[http://www.nytimes.com/2011/08/04/us/04natgas.html?\\_r=1&ref=ianurbina](http://www.nytimes.com/2011/08/04/us/04natgas.html?_r=1&ref=ianurbina)

et

rouvert les discussions sur la répartition des bénéfices de la production de gaz et l'évaluation des avantages qui sont conservés localement.

De manière plus globale, on peut aujourd'hui considérer qu'en Europe, le risque sociétal lié à la sismicité anthropique existe. Ceci est vrai pour les territoires marqués par des séquelles industrielles du passé comme les anciens bassins miniers avec dans certains contextes, une sismicité qui perdure malgré la fermeture des exploitations (cf. 3.1). D'autres projets emblématiques récents ont également marqué durablement la mémoire collective. Par exemple, la perception du risque envers la géothermie profonde semble largement influencée par les expériences récentes de Bâle (§ 3.2) et Saint-Gall. A Soultz-Sous-Forêts, (cf. § 3.2) la population classe la sismicité anthropique comme l'une des deux sources majeures de « nuisances géothermiques » alors que la sismicité ressentie a été faible et n'a occasionné aucun dommage important au cours des 25 dernières années.

L'adhésion de la population est donc aujourd'hui primordiale et la prise en compte d'une communication appropriée de l'aléa et du risque de sismicité anthropique constitue un enjeu important pour la réussite d'un projet industriel. A défaut, les industriels courent le risque d'un blocage voire de l'abandon de projets, comme cela a été le cas aussi du site de stockage de gaz au large de l'Espagne (projet Castor, § 3.3), avec des pertes financières qui peuvent rapidement se compter en millions d'euros.



## **6. PREVENTION ET MITIGATION DES RISQUES**

Contrairement à la sismicité naturelle, gouvernée par les forces tectoniques, et pour laquelle la maîtrise des risques passe avant tout par la diminution de la vulnérabilité des enjeux, la sismicité anthropique devrait, autant que faire se peut, être maîtrisée en contrôlant les paramètres industriels à l'origine directe de l'aléa sismique. De nombreux travaux de recherche ont été réalisés dans cette optique, notamment dans le domaine minier - avant tout pour assurer la sécurité des mineurs - et en géothermie profonde pour réduire les risques environnementaux et favoriser l'acceptabilité sociale, ainsi que pour l'exploitation d'hydrocarbures et la séquestration de fluides dans le sous-sol. Nous présentons ici les concepts de prévention et de mitigation du risque de sismicité d'origine anthropique pour ce type d'opérations industrielles.

### **6.1 SURVEILLANCE MICROSISMIQUE**

Le suivi de l'activité microsismique par un réseau de surveillance local est l'outil privilégié pour la gestion du risque de sismicité anthropique. Bien dimensionné en termes de nombre, positions et types de capteurs, ce réseau peut permettre à la fois de localiser avec une précision suffisante et de caractériser les ruptures induites et déclenchées par les processus industriels, y compris celles de faibles magnitudes (au minimum 0 ou inférieures). Au vu du bilan des cas d'étude récents (cf. §3), il est recommandé par les experts de suivre l'activité microsismique tout au long du cycle de vie d'un projet industriel car cela présente plusieurs intérêts, à savoir :

- en phase exploratoire, avant exploitation, de permettre une meilleure caractérisation de la sismicité naturelle à l'échelle du site (microzonation sismique), pour l'évaluation de l'aléa sismique naturel et définir un niveau initial ou de référence de la sismicité ;
- durant l'exploitation :
  - de détecter et suivre les microséismes ( $M_w < 2$ ) non détectables par les réseaux régionaux et nationaux, généralement d'une maille de couverture trop importante. Rappelons ici qu'en moyenne, pour un événement de magnitude N, 10 événements de magnitude N-1 peuvent être détectés, et 100 de magnitude N-2, etc. Il est donc primordial de disposer d'un réseau de surveillance local dédié à la collecte et au traitement de l'information microsismique disponible ;
  - de détecter, localiser et d'étudier précisément les séismes plus importants ( $M_w > 2$ ) potentiellement ressentis pendant l'exploitation par la population locale et détectés par le réseau régional ou national, pour déterminer s'il s'agit bien de séismes induits par l'exploitation ou naturels ;
  - de mettre en œuvre un système d'alerte précoce permettant si possible de coupler le suivi de la répartition spatio-temporelle de la sismicité avec l'activité industrielle et ainsi pouvoir ajuster voire stopper les opérations en cours (e.g. modification des pressions d'injection, du schéma ou planning d'exploitation minière, modification du niveau de remplissage des barrages) en fonction de l'activité détectée (cf. §6.2 et 6.3).
- après l'exploitation, durant et après la phase de fermeture, de s'assurer que le site retrouve un état d'équilibre, avec un niveau de sismicité acceptable.

Dans la pratique, les capacités de détection et de localisation des réseaux de surveillance sont étroitement liées au nombre, à la répartition spatiale et aux types des sondes de mesures déployées. Ce dimensionnement est guidé par des objectifs de performances attendues et in fine contraint par les conditions de terrain (géologie, zones urbanisées par exemple) et coûts financiers correspondants. En particulier, la précision en profondeur des localisations peut rapidement se dégrader en l'absence de capteurs positionnés en

forage, dans et autour de la zone d'influence des activités industrielles (configuration courante dans le cas des projets de géothermie profonde, de production d'hydrocarbures ou d'injection d'effluents).

Le retour d'expérience récent montre qu'il est important de compléter la détection et l'analyse des microséismes par l'enregistrement en continu du signal sismique. L'archivage des données continues laisse en effet la possibilité de rétro-analyser si nécessaire les données. De plus, l'analyse des traces continues par de nouvelles techniques telles que la corrélation de bruit, peut potentiellement permettre de détecter des phénomènes asismiques ou de faibles variations des propriétés du milieu (Obermann et al., 2015; Olivier et al., 2015), et ainsi le cas échéant, modifier la conduite des opérations industrielles.

Notons dans tous les cas que les réseaux régionaux ne sont pas adaptés à la détection et la localisation de microséismes. Mais, il est avantageux de les utiliser pour appréhender l'activité sismique régionale, grâce notamment aux données historiques instrumentales. Ils peuvent être également utilisés pour étudier les séismes importants produits par un site industriel qui ne serait pas équipé d'un réseau de surveillance local, mais la localisation serait alors entachée d'une erreur importante. Les données régionales ou nationales peuvent aussi servir de base à l'implantation possible de futures industries comme cela a été fait sur le territoire anglais pour les exploitations de gaz de schiste (Wilson et al., 2015).

Enfin, un réseau de surveillance local permettra de mieux discriminer l'origine d'un séisme (naturel ou anthropique). Ceci présente non seulement un intérêt scientifique, mais peut engager, ou a contrario écarter, la responsabilité de l'exploitant. Comme nous avons pu le voir dans les études de cas, cette discrimination n'est pas toujours évidente. La profondeur d'un séisme et sa distance par rapport aux activités industrielles sont les premiers paramètres considérés. S'ils ne permettent pas de trancher, des méthodes probabilistes permettant d'affecter une probabilité à l'origine du séisme (tectonique ou anthropique) peuvent être utilisées (Dahm et al., 2015; Passarelli et al., 2013).

## **6.2 SURVEILLANCE MULTI-PARAMETRES**

Si la surveillance de l'activité sismique sur un site est essentielle pour la mitigation du risque de sismicité anthropique, le suivi d'autres paramètres s'avère également particulièrement utile. Ce suivi permet de mieux caractériser la réaction du massif rocheux aux contraintes générées par le processus industriel considéré et ainsi de mieux analyser la microsismicité enregistrée.

Ainsi, pour la géothermie profonde comme nous le verrons dans le paragraphe suivant, la surveillance microsismique est généralement couplée au suivi des volumes injectés et extraits, ainsi qu'aux mesures de pression d'injection et mesures de pression de fluide in situ. Ce couplage est important aussi dans les situations de séquestration définitive de fluides de rejet.

Dans le domaine minier, le suivi multi-paramètres peut concerner les paramètres d'exploitation tels que le tonnage de minerai extrait, la position des chantiers ou encore la quantité d'explosifs utilisée pour l'abattage. Il peut également intégrer le suivi de mesures géotechniques pour la surveillance des déformations asismiques, par l'utilisation de mesures de contraintes en continu, de déplacement, de fissuration etc. Le couplage en temps quasi-réel de ces différentes variables permet d'avoir une vision de l'état d'équilibre chantier par chantier afin d'analyser et quantifier de manière croisée les champs de contraintes induits, les zones proches de la rupture pour la prévention des coups de terrains (cf. détails en section 6.5).

### 6.3 SYSTEME DE FEU DE SIGNALISATION

L'outil de mitigation du risque sismique dans les opérations d'injection dans le sous-sol, conseillé par de nombreux auteurs (Green and Styles, 2012; Mignan et al., 2017; Raziperchikolae and Miller, 2015; Walters et al., 2015), repose sur la mise en place d'un « traffic light system » ou « système de feu de signalisation ». Ce système est constitué d'un réseau sismologique, dont les mesures sont analysées en quasi temps réel pour indiquer à l'exploitant l'évolution tendancielle de la sismicité induite et donc la marche à suivre pour limiter au maximum l'occurrence de séismes importants. En effet, les études de cas ont montré que la sismicité ne s'atténue pas immédiatement après l'arrêt de l'injection (cf. §3.2), il faut un certain temps de réponse du réservoir à la diffusion de la pression. De plus, il a été observé que la magnitude des séismes, notamment en géothermie profonde, peut être contrôlée grâce à la régulation du volume injecté (Baisch et al., 2009; Mignan et al., 2017), (Figure 19).

Cela suggère qu'il est préférable de diminuer les pressions progressivement jusqu'à atteindre un niveau de sismicité acceptable. Ainsi, par analogie à un feu de signalisation routière, lorsque le feu est vert, les niveaux de vibration ne sont pas perceptibles en surface, et les opérations d'injection peuvent continuer comme prévu. Lorsque le feu est orange, les vibrations peuvent être ressenties en surface sans provoquer de dégâts, et les pressions d'injection doivent alors être diminuées. Lorsque le feu est rouge, les vibrations attendues peuvent provoquer des dommages structurels et l'injection doit être stoppée immédiatement. Le calibrage du système est réalisé en amont, sur la base de l'étude d'aléa et grâce à des tests de stimulation in situ qui permettent de fixer les valeurs de seuil du système de feu de signalisation.

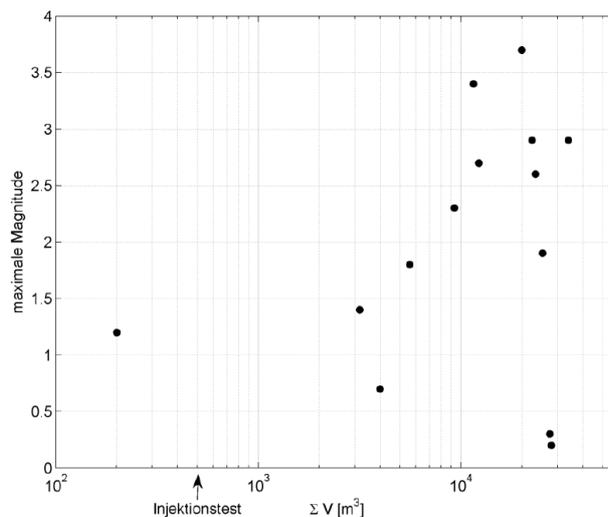


Figure 19 : Magnitude sismique maximale observée en fonction du volume injecté sur le site de géothermie profonde de Bâle (Baisch et al., 2009). Des séismes potentiellement dommageables n'ont été déclenchés qu'après avoir injecté 10 000 m<sup>3</sup> d'eau.

L'expérience montre cependant que la sismicité continue d'augmenter après l'arrêt de l'injection avec l'occurrence de séismes de magnitude plus importante (cf. § 3.2) (Baisch et al., 2009). La prise en compte de cette phase, nommée « effet de traîne » dans les systèmes de gestion du risque par feux de signalisation est à l'étude (Mignan et al., 2017). L'une des idées avancées vise à accompagner l'arrêt d'injection d'une baisse de la pression dans le réservoir. Une autre vise à adopter une marge de sécurité en fixant des seuils de magnitude sous la valeur déterminée par l'analyse de risque.

Mignan et al. 2017 proposent une méthode qui modélise ce risque sur la base d'un modèle de sismicité qui dépend du profil de fluide injecté, ainsi que du modèle d'aléa et de risque. Cette approche fournit un outil d'aide à la décision qui calcule directement la

magnitude à laquelle il faut stopper les opérations pour qu'une norme de sécurité bien précise soit respectée. Cette approche statistique a été validée sur de nombreux cas.

#### 6.4 CONTROLE DU PROCESSUS INDUSTRIEL / MAITRISE DE L'ALEA

Avec le développement massif de l'exploitation d'hydrocarbures non conventionnels et l'augmentation des volumes d'injection des eaux de rejet associées, ainsi que l'émergence de nouveaux projets en géothermie profonde, c'est dans le domaine de l'injection de fluide que les travaux sur la mitigation du risque de sismicité anthropique sont les plus nombreux depuis la fin des années 2000. Sur la base de la compréhension des mécanismes à l'origine de cette sismicité, un certain nombre de recommandations génériques ont été proposées (NRC, 2013; Zoback, 2012; Zoback and Gorelick, 2015). Plus particulièrement en géothermie profonde, plusieurs recommandations et stratégies ont été proposées. On peut citer les documents produits par l'USGS<sup>25</sup> (Majer et al., 2012; Majer et al., 2014), les recommandations issues du projet GEISER<sup>26</sup>, celles du projet SERIANEX<sup>27</sup> relatif à l'étude de risque du site de Bâle (Suisse) ou du futur projet de Haute-Sorne<sup>28</sup> (Suisse) qui devrait être opérationnel en 2020.

La première recommandation est d'éviter d'injecter un fluide directement dans une faille active, ou dans une faille localisée dans le socle cristallin. Si l'étude de danger a été correctement menée (cf. § 4), les failles ont normalement été identifiées. Cependant on ne peut jamais exclure totalement la possibilité de la présence d'une faille, en état sub-critique, située en profondeur, non cartographiée au préalable, et qui serait réactivée par les opérations d'injection. Notons que des failles de taille kilométrique, qui peuvent potentiellement générer des séismes de magnitude 4, sont souvent aveugles, c'est-à-dire non visibles depuis la surface, et donc indétectables, sauf in situ par des techniques d'imagerie qui ne sont pas toujours entièrement fiables. Les failles déca-kilométriques qui potentiellement peuvent déclencher des séismes de magnitude 5,5 sont aussi souvent aveugles, et indétectées.

La seconde recommandation repose sur le fait de limiter l'augmentation de la pression interstitielle en profondeur, grâce à l'équilibrage des volumes injectés et récupérés. Ce principe est utilisé en géothermie profonde, mais n'est pas possible pour le stockage ou l'élimination des eaux de rejet. Dans ce cas, le choix d'une formation géologique particulièrement perméable et/ou à fort potentiel d'emménagement, comme les aquifères salins ou des formations gréseuses peu cimentées, permet de diminuer l'augmentation de la pression interstitielle en profondeur. La viscosité du fluide influe également sur la génération de la sismicité, ainsi il est conseillé d'utiliser un fluide à faible viscosité. Une autre approche, en géothermie profonde, repose sur la modification de la géométrie du réservoir d'échange thermique. Ce concept a été proposé pour le futur projet de Haute-Sorne. Plutôt que de créer une seule grande surface d'échange thermique susceptible de générer un important séisme si elle est entièrement mobilisée, le futur exploitant<sup>29</sup> propose de stimuler plusieurs petites surfaces parallèles qui représentent au total la même surface, avec une probabilité plus faible de générer d'importantes magnitudes (Figure 20). Cela est rendu possible grâce à la réalisation de forages horizontaux.

---

<sup>25</sup> <http://escholarship.org/uc/item/3446g9cf>

<sup>26</sup> [http://www.geiser-fp7.fr/ReferenceDocuments/Deliverables/GEISER\\_D5.6.pdf](http://www.geiser-fp7.fr/ReferenceDocuments/Deliverables/GEISER_D5.6.pdf)

<sup>27</sup> [http://www.wsu.bs.ch/dms/wsu/download/abgeschlossene-dossiers/serianex\\_appendix\\_6.pdf](http://www.wsu.bs.ch/dms/wsu/download/abgeschlossene-dossiers/serianex_appendix_6.pdf)

<sup>28</sup> [https://www.jura.ch/Htdocs/Files/v/17095.pdf/Departements/DEE/SDT/Amenagement\\_Territoire/Geothermie\\_profonde/D\\_06\\_RIE\\_Annexe\\_9\\_4\\_Sismicite.pdf](https://www.jura.ch/Htdocs/Files/v/17095.pdf/Departements/DEE/SDT/Amenagement_Territoire/Geothermie_profonde/D_06_RIE_Annexe_9_4_Sismicite.pdf)

<sup>29</sup> <http://www.geo-energie.ch/fr/>

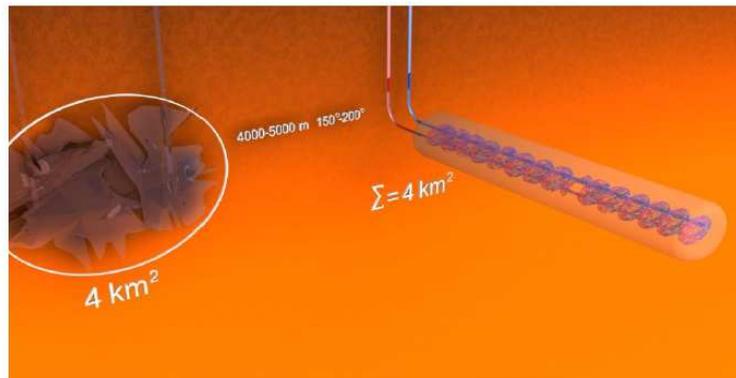


Figure 20 : Représentation schématique du réservoir géothermique de Bâle (à gauche) et celui du réservoir du futur site géothermique de Haute – Sorne (à droite). Source Geo-Energie.

La troisième recommandation repose sur l'installation d'un réseau de surveillance sismologique adapté à un suivi de bonne qualité métrologique en termes de détection et localisation (cf. §6.1). Enfin, les protocoles d'injection doivent être établis au préalable pour définir comment les opérations d'injection doivent être modifiées si de la sismicité est générée lors des opérations d'injection. C'est sur ce principe que reposent les « systèmes de feu de signalisation », (cf. §6.3). Notons que ce type de système n'est pas toujours utilisé dans les projets qui peuvent potentiellement générer une sismicité anthropique (NRC, 2013), sauf dans le domaine minier (cf. §6.5) pour assurer la sécurité des mineurs. En effet, le déploiement d'un réseau de surveillance microsismique dédié et suffisamment performant nécessite un investissement financier significatif, une équipe de spécialistes, une gestion centralisée des données sismiques et en parallèle, la gestion des données industrielles.

## 6.5 MITIGATION DU RISQUE SISMIQUE DANS LES MINES

La mitigation du risque sismique dans les mines profondes est d'autant plus importante que les mineurs sont directement exposés au risque toujours plus élevé en front de chantier, là où l'extraction de minerai et la création de vides sont en cours. De plus, en marge de la sécurité au travail, les conséquences économiques consécutives à un coup de terrain grave peuvent être sérieuses si la production est ralentie ou stoppée sur une longue période. Dans ce contexte, la gestion du risque sismique dans les mines profondes est devenue une priorité pour les exploitants miniers dans tous les pays modernes (Potvin and Wesseloo, 2013).

Comme exposé dans le paragraphe 6.1, la surveillance sismique est un des outils principaux de la mitigation du risque. Il permet de caractériser et de gérer l'aléa sismique. Cependant, la diminution de l'aléa, à proprement parler, est difficile à réaliser dans les mines. En effet, certains paramètres déterminants dans le déclenchement de microséismes dans les terrains fortement perturbés par l'extraction massive de minerai, paramètres tels que la rhéologie locale de l'encaissant, la géologie structurale locale, ou le champ de contrainte naturel peuvent difficilement être anticipés. Le risque sismique augmente avec la profondeur d'exploitation (i.e. les contraintes naturelles) qui devient aujourd'hui de plus en plus importante. Ce risque est d'autant plus important dans les mines excavées dans des encaissants rocheux qui emmagasinent les pressions au lieu de se déformer progressivement. Potvin et Wesseloo (2013) synthétisent les différentes approches utilisées par les exploitants miniers pour la gestion du risque sismique, que nous résumerons brièvement ici.

La première approche repose sur la réduction de l'aléa sismique, grâce à l'optimisation de la méthode et des séquences d'extraction ainsi que le design des travaux miniers. L'idée

est de limiter l'accumulation de contraintes sur des zones sensibles (failles, dykes, zones de contact ...). La modélisation numérique est l'outil privilégié pour évaluer et optimiser la redistribution de contraintes provoquée par une séquence minière en fonction des caractéristiques du gisement. Cette approche offre l'avantage considérable de pouvoir comparer de nombreux scénarios d'exploitation et retenir celui qui sera optimal en fonction de critères de sécurité.

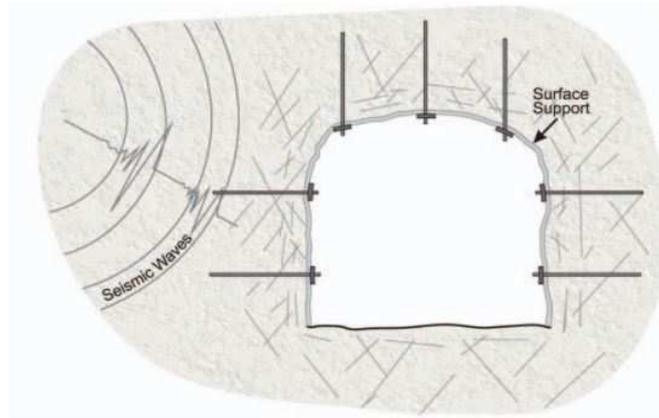
La réduction de l'aléa sismique par l'utilisation de techniques de relaxation des contraintes est une autre méthode utilisée par les exploitants. Cette approche repose sur la création de fractures dans la masse rocheuse grâce à un pré-conditionnement réalisé soit par fracturation hydraulique soit par des tirs de délestage des contraintes. Ce pré-conditionnement a pour objectif de limiter la réponse sismique de la roche au creusement dans l'environnement immédiat des chantiers évalués à risque. Il est pratiqué dans le domaine minier depuis plusieurs décennies mais reste difficile à quantifier précisément et est encore considéré comme relevant plus de l'art que de la science.

La réduction du risque sismique peut également être réalisée par la réduction de la vulnérabilité, grâce à la diminution des conséquences des dommages et la diminution de l'exposition des mineurs. Ainsi, les ouvrages miniers peuvent être sécurisés par des travaux de soutènement (pose de boulons ou de câbles d'ancrage à forte résilience dynamique, de grillage d'acier et projection de béton, Figure 21) tandis que les tailles peuvent être remblayées. Cela permet de limiter les modifications des champs de contraintes et les dommages causés par un coup de terrain. La mise en œuvre de méthodes d'extraction hautement mécanisées et contrôlées à distance permet de réduire l'exposition des mineurs. D'autre part, des règles de sécurité drastiques sont en général appliquées au moment du dynamitage du massif exploité si la méthode de creusement est à l'explosif. En effet, c'est après cette opération que la réponse sismique observée est en général la plus importante. Cette réponse sismique qui suit chaque tir d'abattage peut aussi être utilisée à quantifier la susceptibilité de la zone exploitée à l'aléa sismique fort. Ainsi, les protocoles de sécurité établis par les exploitants visent à éloigner les mineurs des zones sensibles, jusqu'à ce que la sismicité soit revenue à un niveau acceptable (niveau du bruit de fond), signifiant que les contraintes ont été redistribuées et que le massif a retrouvé une certaine forme d'équilibre (Hudyma, 2008). A titre d'exemple dans une mine australienne (mine de Tasmanie), particulièrement sujette aux coups de terrain, une période de 24h d'exclusion était adoptée après chaque période de tir pour réduire l'exposition des mineurs à la sismicité induite par le dynamitage (Potvin and Wesseloo, 2013).

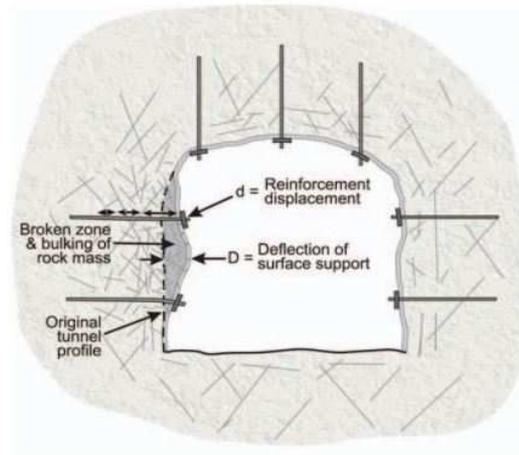
## **6.6 RETOUR D'EXPERIENCE DE L'UTILISATION DE L'OUTIL MICROSISMIQUE POUR L'AIDE A LA DECISION**

Les cas d'étude présentés ci-avant montrent que la surveillance microsismique est de plus en plus considérée comme un outil d'aide à la décision pour la conduite des opérations industrielles.

Son apport a pu être démontré dans le domaine de la géothermie profonde (cf. §3.2), par exemple pour évaluer les pressions maximales d'injection à ne pas dépasser et adapter les volumes injectés. A Soultz-Sous-Forêts, cette surveillance a également entraîné une modification des processus de stimulation pour réduire le nombre de séismes ressentis et atteindre un niveau de vibration acceptable. Dans le cas de Bâle, il a été possible d'interrompre les opérations industrielles avant que des séismes ne soient ressentis et tout laisse à penser, que sans cette mesure de prévention, des séismes de magnitudes plus importantes auraient pu avoir lieu et causer de nombreux dégâts. Cela n'a certes pas empêché l'occurrence d'événements de magnitudes légèrement supérieures à 3 par la suite, mais ils ont été sans danger pour la population.



(a)



(b)

Figure 21 : Exemple de travaux de soutènement dans une galerie de mine, résistant au chargement dynamique, pour réduire les dommages causés par un événement sismique ou un coup de terrain (Potvin and Wesseloo, 2013).

De la même façon, pour le projet Castor de stockage de gaz (cf. §3.3), l'arrêt de l'injection dès l'observation d'une activité sismique anormale a probablement permis de réduire la magnitude des séismes qui ont eu lieu après l'arrêt des opérations d'injection.

Dans le domaine minier (§ 3.1), l'outil microsismique est utilisé en routine à des fins de sécurité. Les techniques d'extraction ont ainsi été modifiées pour diminuer l'occurrence de coups de terrains. Notons que la profondeur toujours croissante de l'extraction induit un niveau de sismicité relativement important qui rend indispensable l'utilisation de l'outil microsismique pour la gestion du risque.

Enfin, la surveillance microsismique constitue un instrument essentiel de la gestion des risques liés à l'après-mine en France depuis la fin des années 1990. Appliquée à la détection des ruptures dans les anciens travaux miniers, elle permet d'anticiper la progression des désordres vers la surface (§ 3.1).

## 6.7 GERER LE RISQUE DE SEISMES ANTHROPIQUES COMME CELUI DE LA SISMICITE NATURELLE ?

Certains auteurs proposent de quantifier et gérer le risque de sismicité anthropique, suivant la même approche que celle utilisée pour le risque de sismicité naturelle. En effet, comme nous l'avons vu, la sismicité anthropique ne peut être complètement contrôlée à cause du nombre trop important d'inconnues relatives aux propriétés du sous-sol.

La Figure 22 extraite de Bommer et al. (2015), résume les différentes réponses proposées aux différents niveaux de risque causés par les séismes anthropiques.

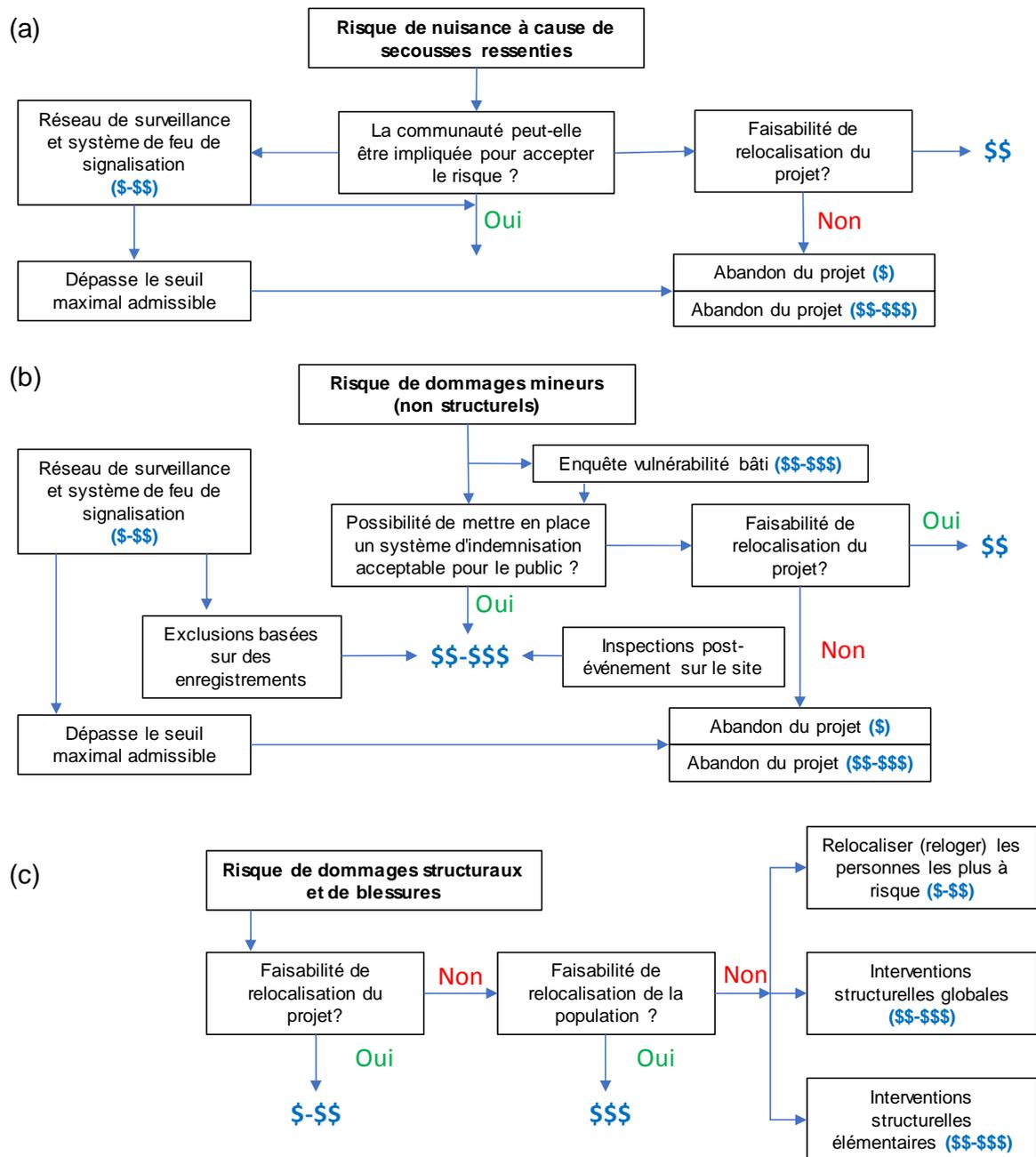


Figure 22 : Organigramme indiquant les options proposées pour la gestion du risque de sismicité anthropique provoquant a) la gêne, b) des dommages non-structuraux à l'origine de coûts de réparation, et c) dommages structuraux qui pourraient menacer la vie et l'intégrité physique. Dans chaque cas, la gamme de coûts possibles associés à chaque option est indiquée (\$: faible; \$\$: moyen; \$\$\$: haut) (Bommer et al., 2015).

Lorsque le risque est estimé à des dommages non structuraux et lorsque la relocalisation du projet n'est pas possible, le risque peut être pris en charge par une compensation financière appropriée. Si le risque constitue une menace pour la vie et l'intégrité physique, alors il peut être réduit grâce à l'application de mesures de renforcement sur le bâti, dont le coût peut être mis en regard des bénéfices économiques qui seront réalisés par le projet industriel. Cependant, en raison des caractéristiques spécifiques des séismes anthropiques, qui peuvent se produire dans des régions où il y a peu ou pas de sismicité

naturelle, les auteurs suggèrent que les procédures et normes utilisées en génie parasismique soient modifiées pour l'application à la sismicité anthropique.

## **6.8 ASPECTS REGLEMENTAIRES**

La sismicité anthropique est un aléa dont la nature est telle qu'il est difficile de réglementer de manière uniforme toutes les industries sismogènes. En pratique chaque projet industriel s'inscrit dans un contexte géologique spécifique, dont la connaissance structurale, tectonique, géomécanique et hydrologique reste à la fois limitée et évolutive dans l'espace et dans le temps. Dans le cas usuel où les travaux d'exploitation s'inscrivent dans le long terme, il est en effet probable que les technologies et les paramètres d'exploitation évoluent, modifiant ainsi la susceptibilité sismogénique et donc le risque sismique du site. En d'autres termes, imaginer une réglementation unique et précise adaptée à toutes les situations possibles en France, ou dans un autre pays, sans risque de pénaliser lourdement chaque projet industriel, paraît difficile.

### **6.8.1 LA SITUATION EN FRANCE**

En France, les principaux cas de sismicité anthropique ont été rencontrés et étudiés jusqu'à présent sur les sites d'exploitation de gaz naturel de Lacq (Midi-Pyrénées), des mines de charbon des Houillères de Lorraine (Grand Est) et de Centre-midi (Provence-Alpes-Côte d'Azur) et de géothermie profonde haute température à Soultz-Sous-Forêts (Alsace) (cf. Tableau 5). On peut citer également le cas du barrage de Monteynard en 1963, avec l'occurrence d'un événement de magnitude 4,9 après le remplissage du réservoir.

D'un point de vue purement réglementaire, pour les quatre premiers sites cités ci-dessus, c'est le code minier qui régit l'ensemble des opérations industrielles qui s'y sont exécutées ou qui s'y poursuivent encore aujourd'hui. Ce code régit toutes les opérations visant à exploiter les géoressources minérales et énergétiques classées comme stratégiques, en y incluant la géothermie, différenciée selon qu'il s'agisse de haute ou de basse température. Notons que le cas du stockage souterrain relève du code de l'environnement car c'est une Installation Classée pour la Protection de l'Environnement (ICPE).

Sans rentrer dans le détail du code minier, hors propos du présent rapport, on peut rappeler que celui-ci prévoit une procédure générale basée sur le dépôt de dossiers de demande d'autorisation d'ouverture de travaux, d'exploration d'abord puis d'exploitation ensuite, de la part du pétitionnaire. Après enquête publique et consultation des commissions idoines, l'administration autorise les travaux par un arrêté préfectoral, qui fixe notamment les prescriptions visant à réduire au maximum les risques liés aux travaux, y compris le risque de sismicité anthropique si celui-ci est avéré. Les risques étant différents d'un contexte à un autre, ces prescriptions seront spécifiques à chaque site et proportionnées au niveau de risque estimé.

En cas d'incident ou d'accident, le code minier prévoit les dispositions importantes suivantes :

- il rend l'exploitant responsable des dégâts causés par son activité ;
- en cas de disparition ou de défaillance du responsable, l'État est garant de la réparation des dommages causés par l'activité minière.

Lorsqu'il s'agit de dégâts suspectés d'avoir pour origine un ou des séismes locaux, le litige éventuel entre les parties peut se régler par une tierce expertise qui devra répondre au moins à la première sinon aux deux questions suivantes, à savoir :

- le niveau de vibration du sol provoqué par les ondes sismiques peut-il expliquer les dégâts relevés sur tel ou tel bâti ? (cf. § 5.2)

- les événements sismiques en cause sont-ils d'origine naturelle ou induite par l'opération industrielle ? (cf. § 2.4)

Aujourd'hui, afin d'anticiper ces questions et les responsabilités qui en découlent, toutes les opérations industrielles sismogènes avec impact possible sur des enjeux de surface ont comme prescription particulière celle d'opérer un dispositif de surveillance microsismique. Ce dispositif doit permettre, a minima, de détecter et localiser la sismicité locale avec un niveau de détectabilité le plus bas possible, et de mesurer les niveaux de vibrations sismiques aux stations. A travers cette prescription, il s'agit :

1. de classer de manière aussi univoque que possible les séismes naturels (généralement profonds) des séismes anthropiques (plutôt situés dans la zone d'influence des travaux) ;
2. d'étudier précisément toute relation potentielle de corrélation et de cause à effet entre les paramètres d'exploitation et l'activité sismique détectée (taux d'extraction ou d'injection, tirs de mine, etc) ; les mesures de déformation du sol peuvent s'avérer importantes pour compléter l'analyse ;
3. d'estimer statistiquement le niveau de vibrations atteint en n'importe quel point de la surface pour chaque événement sismique localisé et classé en magnitude à partir d'une loi d'atténuation établie à l'échelle locale ou régionale ;
4. de cartographier les constructions potentiellement vulnérables aux vibrations liées à un séisme localisé à un endroit défini et de magnitude donnée afin de déterminer si des dommages observés sur des constructions particulières peuvent avoir pour origine la sismicité anthropique.

### **6.8.2 QUELQUES EXEMPLES DE SITUATIONS REGLEMENTAIRES A L'ETRANGER**

La situation dans les autres pays modernes ne diffère pas fondamentalement de celle de la France. Compte tenu de la nécessité de réglementer en termes de risques des industries aux procédés très différents et opérant dans des contextes géologiques très distincts, chaque projet industriel est traité comme un cas particulier au travers de prescriptions issues des autorités en charge de délivrer les autorisations soit en amont du projet, soit en cours du projet lors de l'occurrence d'un incident significatif par exemple.

En Italie, un cadre légal national relatif au risque de sismicité anthropique générée par l'exploitation de champs pétrolifères a été défini en 2015 à la suite des événements dramatiques de 2012 à Mirandola en Emilie Romagne (cf. 3.4.2) et l'élaboration en 2014 d'un guide par une commission internationale d'experts à la demande du Ministère du Développement Economique. Ce guide présente les recommandations pour la bonne mise en œuvre d'une surveillance instrumentale opérationnelle des sites de production à l'échelle du territoire concerné, situés ou non en zone de sismicité naturelle. Il s'appuie sur un important retour d'expérience national et international et s'adresse aux parties prenantes, i.e. le ministère, les autorités régionales compétentes, les industriels et la société civile.

Aux Pays-Bas, le code minier (Mining Act), révisé en 2003, régit les travaux d'exploration et de production de minerais. Concernant l'exploitation des champs gaziers, si la réglementation prévoit que l'exploitant fournisse un état zéro du niveau du sol avant le démarrage de la phase de production d'un nouveau champ, elle ne prévoit rien pour ce qui concerne le risque lié à la sismicité anthropique. Le paramètre d'affaissement cumulé maximal est crucial compte tenu des enjeux fondamentaux qu'implique la situation géographique et topographique du pays en regard du niveau de la mer. Mais l'accroissement depuis 1991 de la sismicité induite avec, en 2012, l'occurrence d'un événement de magnitude 3,6 sur le champ de Groningue, événement classé d'intensité VI et ayant provoqué des dommages sur de nombreuses habitations, a conduit les autorités à lancer d'abord des études approfondies sur les raisons de cette sismicité en hausse (cf.

§ 3.4.1). La relation entre l'affaissement cumulé du sol (compaction des roches profondes) et la sismicité ayant été a priori établie (la relation de cause à effet fait toujours l'objet d'études), il a été décidé de revoir complètement le schéma de production du champ de Groningue, en privilégiant la production dans les zones à faible affaissement cumulé et en délaissant les zones ayant subi un affaissement cumulé élevé (cf. § 3.4.1).

Aux Etats-Unis, l'émergence depuis 2005 d'un taux de sismicité induite élevé dû à l'industrie du gaz de schiste comme une véritable problématique sociétale a conduit à l'élaboration de réponses réglementaires opérationnelles variant d'un état à l'autre (cf. § 3.4 et 3.5). Rappelons ici que contrairement à la plupart des pays miniers y compris la France, le propriétaire privé d'un terrain l'est aussi du sous-sol. C'est au travers de la loi sur la salubrité de l'eau potable (Safe Drinking Water Act) qui régit le contrôle des puits d'injection d'effluents que la loi fédérale distingue six types de puits d'injection, de classe I à VI, sujets à différentes réglementations. Pour certains types de puits d'injection, les dossiers de demande doivent inclure une analyse de la sismicité naturelle passée dans la zone dite d'intérêt. Le Bureau fédéral de l'Aménagement du Territoire a aussi publié un règlement relatif à l'usage de la fracturation hydraulique sur les terres fédérales et indiennes obligeant les pétitionnaires à une licence à soumettre un dossier d'information géologique permettant d'analyser le risque de sismicité anthropique.

De nombreux Etats producteurs d'énergies fossiles où sont menées des opérations de fracturation hydraulique, tels que l'Arkansas, la Californie ou l'Oklahoma, s'ils disposent aujourd'hui de réglementations différentes, prescrivent désormais tous des études préalables de susceptibilité à l'aléa de sismicité anthropique ainsi que, selon les cas, des obligations de surveillance opérationnelle, incluant la définition d'un protocole de gestion du risque sismique ainsi que la fourniture régulière de données d'exploitation (volume, pression, etc.) à la commission d'Etat idoine en charge du suivi et contrôle des activités pétrolières sur le territoire.



## **7. VEROUS ET PISTES DE RECHERCHE**

Comme nous l'avons vu, le risque de sismicité anthropique pose de nouveaux défis en termes de connaissance et d'évaluation de l'aléa et de gestion du risque.

Concernant l'aléa, les questions qui se posent portent sur la façon d'appréhender le lien de cause à effet entre une activité industrielle et la sismicité observée ou future (si le projet n'est pas encore en activité). Ainsi, lorsqu'un site industriel est déjà en exploitation, ou démantelé, est-il à l'origine ou non de la sismicité observée ? ou est-ce qu'un projet futur produira ou non sur un site donné, une sismicité ? Répondre à ces questions, comme nous l'avons vu, est un exercice difficile. Cette difficulté réside principalement dans la complexité de la structure du sous-sol qui rend délicate la connaissance de ses propriétés hydro-géo-mécaniques et de son état de contrainte. Le retour d'expérience montre que pour mieux appréhender le problème, il est d'abord nécessaire d'acquérir des mesures et données de qualité. Cependant, ces données ne sont pas toujours faciles à acquérir et peuvent représenter un investissement financier conséquent.

Les modèles prédictifs de la sismicité anthropique possible d'un site reposent sur ces données de base. Elles sont essentielles pour réaliser des modélisations relativement précises pour prédire les variations de contraintes produites par le processus utilisé. Ainsi avant, ou pendant l'exploitation, il est possible d'estimer théoriquement si les pressions utilisées, dans le cas de l'injection de fluide, seront susceptibles ou non de générer des séismes. Dans le cas de l'extraction de matière, et plus particulièrement dans les mines, cette approche permet de déterminer si la séquence d'exploitation définie est susceptible de générer des variations de contraintes suffisantes pour déclencher une sismicité. Cependant, il reste encore des avancées à réaliser pour être capable de modéliser à la fois la déformation géomécanique et la génération de séismes associés, en termes de nombre et de magnitude des séismes. Cela permettrait de mieux appréhender les processus à l'origine des séismes ainsi que les paramètres qui contrôlent leur intensité. Ainsi, les activités industrielles pourraient être mieux maîtrisées afin qu'elles génèrent un niveau de vibration acceptable pour le bâti et les infrastructures.

Notons que la maîtrise de l'aléa peut se révéler difficile, même lorsque des études détaillées ont été réalisées préalablement au choix d'un site. En effet, on ne peut jamais exclure totalement la probabilité de réactiver une faille proche de l'état critique dans le sous-sol. Cette revue bibliographique a montré que cela se produit généralement sur des failles non identifiées préalablement et/ou dont on ne connaissait pas l'état de contrainte initial. Les processus industriels qui utilisent l'injection de fluide, à des fins de séquestration, sont particulièrement problématiques car des failles relativement lointaines (quelques kilomètres) du site peuvent être réactivées et cela plusieurs années après le début des opérations.

Comme nous l'avons également vu, l'activité microsismique de faible amplitude ne pose pas de problèmes de sécurité publique. Par contre, lorsqu'un événement de forte magnitude a lieu, même loin de l'activité industrielle, le public concerné est en droit de se poser la question de savoir s'il n'a pas été produit par l'homme, notamment dans les régions faiblement sismiques. Ainsi différencier les séismes naturels des séismes anthropiques est aussi un des défis importants de la caractérisation de l'aléa. La réponse à cette question n'est pas toujours évidente. L'examen seul d'un signal sismique ne permet pas toujours de distinguer les deux types de sismicité. S'il y a une corrélation spatio-temporelle entre l'occurrence de la sismicité et le début d'une activité industrielle, sans activité sismique connue sur le site auparavant, alors la probabilité est forte pour que la sismicité soit d'origine anthropique. Mais, il y a des situations, notamment celles liées au processus impliquant des circulations de fluides, où cette corrélation n'est pas respectée. L'activité sismique peut se déclencher tardivement après le début des opérations et loin du site. Dans ce cas, il est nécessaire de mettre en œuvre des approches basées sur des modèles soit mécaniques, soit statistiques ou qui combinent les deux approches pour espérer identifier la source probable. Cependant, ces approches

nécessitent aussi d'avoir des données d'entrée de qualité et une certaine expertise dans l'analyse des données.

Notons que la réponse à cette question, naturelle ou anthropique, ne représente pas seulement un intérêt scientifique mais peut avoir des conséquences importantes en termes juridiques et impliquer la responsabilité de l'exploitant et aussi impacter le secteur des assurances. Les conséquences économiques pour l'ensemble des parties prenantes peuvent être d'autant plus importantes que la sismicité anthropique se produit dans des régions où le risque sismique naturel est faible. En effet, dans ces régions, les constructions ne sont pas dimensionnées pour résister à des séismes, même de faible intensité. Un des défis qui se posent concerne la prise en compte de la sismicité anthropique pour le zonage de l'aléa sismique dans ces régions.

Concernant la mitigation du risque, la surveillance microsismique apparait comme l'élément clef de la gestion du risque, quel que soit le secteur industriel concerné. Les réseaux nationaux, dimensionnés pour la surveillance de la sismicité naturelle à l'échelle d'un territoire, ne permettent pas de détecter des signaux de faibles magnitudes qui témoigneraient de la mise en place d'une instabilité ou de conditions favorables à l'occurrence d'un séisme de plus forte ampleur. Nous avons vu que dans les pays dits modernes, la réglementation va dans ce sens. Le couplage des données microsismiques avec des paramètres industriels pertinents, voire comme on l'a évoqué d'autres données de terrain, est maintenant largement préconisé. La mise en œuvre de système de « feu de signalisation » en géothermie en est une illustration. Ceci étant on ne peut exclure que les conditions d'un site conduisent à s'écarter des phénomènes et ordres de grandeur envisagés. Les données collectées doivent donc régulièrement être confrontées aux études initiales et les systèmes de gestion du risque recalibrés tout au long de la durée de vie du projet. Les processus en jeu étant complexes et spécifiques à chaque projet, l'un des défis actuels consiste donc à améliorer encore la fiabilité des dispositifs de gestion du risque, y compris par l'apprentissage tiré d'échecs.

Enfin, il apparait nécessaire, pour concilier les performances technologiques et financières de la surveillance microsismique, de poursuivre les efforts d'innovation. L'objectif est de développer des capteurs à moindres coûts, robustes, résistants aux conditions de pression et de température et permettant de combiner directement d'autres de type de mesures comme la pression, les contraintes ou les déformations. Ces progrès techniques doivent également concerner le traitement et l'analyse des données toujours plus nombreuses et s'intéresser au développement de nouvelles techniques basées sur l'analyse du bruit sismique.

## **8. CONCLUSIONS**

La sismicité anthropique est rarement observée lors d'opérations industrielles utilisant le sol et le sous-sol, au regard du nombre de projets existants de par le monde. Toutefois la perception du risque de sismicité anthropique est aujourd'hui de nature à remettre en cause un certain nombre de projets.

Les études de cas synthétisées dans le présent rapport ont montré que la sismicité la plus forte en magnitude est produite par le remplissage de barrages hydrauliques et la production d'hydrocarbures. Cependant, l'exploitation minière et la production d'hydrocarbures sont les industries qui produisent le plus grand nombre d'événements. Cela s'explique, comme attendu, par le nombre important de ce type d'exploitations à travers le monde mais aussi par les profondeurs de plus en plus importantes atteintes. Depuis 10 ans, une recrudescence de séismes a été observée sur le territoire américain, en lien avec le développement exponentiel des gisements non conventionnels d'hydrocarbures.

La réactivation d'une ou d'un système de failles proche de l'état critique par le processus industriel est à l'origine des séismes observés les plus forts. Ce phénomène peut se produire aussi bien dans les régions à forte sismicité naturelle que dans celles où elle est plus faible. Dans les régions à risque naturel faible, ce phénomène peut-être particulièrement problématique car le bâti ainsi que les infrastructures ne sont pas dimensionnés pour résister aux séismes. L'exposition de nombreux bâtiments fragiles à de fortes secousses est à l'origine de lourdes pertes, matérielles comme humaines, lors des séismes de Lorca en 2011 en Espagne ou celui de Newcastle en Australie en 1989. Comment prendre en compte alors la sismicité d'origine anthropique dans l'élaboration des cartes d'aléa sismique à l'échelle d'un territoire ? Aux États-Unis, depuis 2015, les cartes d'aléa sismique tiennent compte de la sismicité anthropique et sont réactualisées chaque année. En France, seuls les séismes naturels sont pris en compte pour l'évaluation de ce risque à l'échelle du territoire. Dans l'industrie minière, notamment en Afrique du Sud, à plus petite échelle, des cartes dites d'aléa (« hazard ») sont élaborées à long, moyen et court terme, pour la sécurité des travailleurs qui sont particulièrement exposés.

La mitigation du risque sismique anthropique repose à la fois sur la caractérisation sismique du site, sur la surveillance, sur le contrôle du processus industriel et sur la réduction de la vulnérabilité. Le système de surveillance est l'élément clef sur lequel repose l'amélioration de la caractérisation de l'aléa, et donc la gestion du risque. Composé en général d'un réseau microsismique, suffisamment sensible, il permet de suivre l'évolution spatio-temporelle de la sismicité. L'écart à l'activité sismique naturelle préalablement étudiée doit permettre de quantifier l'effet d'une utilisation industrielle du sous-sol. Enfin après l'arrêt de l'activité la surveillance doit permettre de savoir si le sous-sol a retrouvé ou non son état d'équilibre. Des dispositifs de mesures de contraintes in situ, installés en forage ou directement dans les ouvrages miniers, par exemple, peuvent compléter le dispositif microsismique.

Les industries, qui utilisent l'injection de fluide en profondeur, préconisent la réduction des pressions en profondeur pour minimiser la génération de sismicité, grâce à l'équilibrage des volumes injectés et récupérés. En géothermie profonde, des systèmes dits de « feu de signalisation » ont été élaborés pour maîtriser ces pressions en fonction de l'activité sismique enregistrée. Pour les opérations d'injection dont l'objectif est le stockage définitif d'eaux usées, l'utilisation de formations géologiques particulièrement perméables, comme les aquifères salins ou des formations gréseuses peu cimentées, est une des recommandations principales.

Dans l'industrie minière, où les mineurs sont directement exposés au phénomène, la mitigation du risque sismique repose sur plusieurs approches, qui touchent à la fois à la planification des chantiers, à l'évolution des schémas d'exploitation, à la mise en œuvre de techniques de confortement et renforcement, à l'utilisation croissante d'engins automatisés, et bien entendu à la surveillance microsismique et géotechnique. La mitigation repose également sur la caractérisation de l'aléa à différentes échelles temporelles de manière à anticiper au mieux le risque.

D'une manière plus générale, la quantification et la gestion du risque de sismicité anthropique peuvent également être abordées en suivant la même approche que celle utilisée pour le risque de sismicité naturelle. Cela est possible avec la réalisation de constructions parasismiques, lorsque la relocalisation du projet n'est pas possible. De plus, la réussite et l'acceptabilité d'un projet industriel susceptible de générer de la sismicité repose sur la mise en place d'un programme de communication et d'information auprès des différentes parties prenantes du projet et en particulier la population locale.

## **9. LISTE DES ANNEXES**

| <b>Repère</b> | <b>Désignation</b>  | <b>Nombre de pages</b> |
|---------------|---|------------------------|
| Annexe A      | Mécanismes et facteurs des séismes  | 4 A4                   |
| Annexe B      | Catalogue non exhaustif de séismes anthropiques générés par différents processus industriels et références bibliographiques associées | 16 A4                  |
| Annexe C      | Evaluation qualitative de l'indice de vulnérabilité K des bâtiments sur la base d'observations (d'après l'AFPS)                       | 2 A4                   |



## 10. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adushki, V.V., Rodionov, V.N., Turuntnev, S. and Yodin, A.E., 2000. Seismicity in the oil field. *Oilfield Review*, Summer: 2-17.
- Ake, J., Mahrer, K., O'Connell, D. and Block, L., 2005. Deep-injection and closely monitored induced seismicity at Paradox Valley, Colorado. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(2): 664-683.
- Albano, M., Barba, S., Tarabusi, G., Saroli, M. and Stramondo, S., 2017. Discriminating between natural and anthropogenic earthquakes: insights from the Emilia Romagna (Italy) 2012 seismic sequence. *Scientific Reports*, 7.
- Alber, M. and Fritschen, R., 2011. Rock mechanical analysis of a  $M_L=4.0$  seismic event induced by mining in the Saar District, Germany. *Geophysical Journal International*, 186(1): 359-372.
- Arts, R., Eiken, O., Chadwick, A., Zweigel, P., van der Meer, L. and Zinszner, B., 2004. Monitoring of CO<sub>2</sub> injected at Sleipner using time-lapse seismic data. *Energy*, 29(9-10): 1383-1392.
- Asadollahfardi, G., Aghda, M.F. and Rahbar, M., 2013. Case Study of Reservoir Triggered Seismicity, Latian Dam, Tehran, Iran. *Journal of the Geological Society of India*, 82(5): 553-560.
- Atkinson, G.M., 2015. Ground-Motion Prediction Equation for Small-to-Moderate Events at Short Hypocentral Distances, with Application to Induced-Seismicity Hazards. *Bulletin of the Seismological Society of America*.
- Atkinson, G.M., Eaton, D.W., Ghofrani, H., Walker, D., Cheadle, B., Schultz, R., Shcherbakov, R., Tiampo, K., Gu, J., Harrington, R.M., Liu, Y.J., van der Baan, M. and Kao, H., 2016. Hydraulic Fracturing and Seismicity in the Western Canada Sedimentary Basin. *Seismological Research Letters*, 87(3): 631-647.
- Ayrault, N., 2001. Synthèse sur les risques dus aux séismes, inondations, mouvements de terrain et tempêtes - accidentologie, INERIS DRA- NAY- 2001-28654/01.
- Bachmann, C.E., Wiemer, S., Woessner, J. and Hainzl, S., 2011. Statistical analysis of the induced Basel 2006 earthquake sequence: introducing a probability-based monitoring approach for Enhanced Geothermal Systems. *Geophysical Journal International*, 186(2): 793-807.
- Baisch, S., Carbon, D., Dannwolf, U., Delacou, B., Devaux, M., Dunand, F., Jung, R., Koller, M., Martin, C. and Sartori, M., 2009. SERIANEX, Deep heat mining basel: seismic risk analysis, <http://www.wsu.bs.ch/dossiers/abgeschlossene-dossiers/geothermie.html>. SERIANEX Group, Departement für Wirtschaft, Soziales und Umwelt des Kantons Basel-Stadt, Basel.
- Bardainne, T., 2005. Etude de la sismicité de Lacq et analyse des formes d'ondes par décomposition en chirplets, 1 vol. (241 p.) pp.
- Bardainne, T., Dubos-Sallee, N., Senechal, G., Gaillot, P. and Perroud, H., 2008. Analysis of the induced seismicity of the Lacq gas field (southwestern France) and model of deformation. *Geophysical Journal International*, 172(3): 1151-1162.
- Berrones, R.F. and Liu, X.L., 2003. Seismic vulnerability of buried pipelines. *Geofisica Internacional*, 42(2): 237-246.
- Block, L.V., Wood, C.K., Yeck, W.L. and King, V.M., 2014. The 24 January 2013  $M_L4.4$  Earthquake near Paradox, Colorado, and Its Relation to Deep Well Injection. *Seismological Research Letters*, 85(3): 609-624.
- Block, L.V., Wood, C.K., Yeck, W.L. and King, V.M., 2015. Induced seismicity constraints on subsurface geological structure, Paradox Valley, Colorado. *Geophysical Journal International*, 200(2): 1170-1193.
- Bommer, J.J., Crowley, H. and Pinho, R., 2015. A risk-mitigation approach to the management of induced seismicity, *Journal of Seismology*. 19(2): 623-646.
- Bommer, J.J., Oates, S., Cepeda, J.M., Lindholm, C., Bird, J., Torres, R., Marroquín, G. and Rivas, J., 2006. Control of hazard due to seismicity induced by a hot fractured rock geothermal project. *Engineering Geology*, 83(4): 287-306.
- Bossu, R., 1996. Etude de la sismicité intraplaque de la région de Gazli (Ouzbékistan) et localisation de la déformation sismique, Université Joseph-Fourier - Grenoble I.

- Bruel, D., 2007. Using the migration of the induced seismicity as a constraint for fractured Hot Dry Rock reservoir modelling. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(8): 1106-1117.
- Bussard, S., 2016. Dans l'Oklahoma, le gaz de schiste provoque des séismes à répétition, *Le monde*, [http://www.lemonde.fr/planete/article/2016/01/15/dans-l-oklahoma-le-gaz-de-schiste-provoque-des-seismes-a-repetition\\_4847904\\_3244.html](http://www.lemonde.fr/planete/article/2016/01/15/dans-l-oklahoma-le-gaz-de-schiste-provoque-des-seismes-a-repetition_4847904_3244.html).
- Byerlee, J., 1978. Friction of rocks. *pure and applied geophysics*, 116(4-5): 615-626.
- Carder, D.S., 1945. Seismic investigations in the Boulder Dam area, 1940-1944, and the influence of reservoir loading on local earthquake activity. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 35(4): 175-186, NP1, 187-192.
- Cesca, S., Dahm, T., Juretzek, C. and Kühn, D., 2011. Rupture process of the 2001 May 7 MW 4.3 Ekofisk induced earthquake. *Geophysical Journal International*, 187(1): 407-413.
- Cesca, S., Dost, B. and Oth, A., 2013. Preface to the special issue "Triggered and induced seismicity: probabilities and discrimination". *Journal of Seismology*, 17(1): 1-4.
- Cesca, S., Grigoli, F., Heimann, S., Gonzalez, A., Buforn, E., Maghsoudi, S., Blanch, E. and Dahm, T., 2014. The 2013 September-October seismic sequence offshore Spain: a case of seismicity triggered by gas injection? *Geophysical Journal International*, 198(2): 941-953.
- Chen, H.Q., Li, D.Y. and Guo, S.S., 2014. Damage-Rupture Process of Concrete Dams Under Strong Earthquakes. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 14(7).
- Chen, L. and Talwani, P., 2001. Mechanism of Initial Seismicity Following Impoundment of the Monticello Reservoir, South Carolina. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(6): 1582-1594.
- CHEN, Y., 2009. Did the reservoir impoundment trigger the Wenchuan earthquake? *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52(4): 431-433.
- Contrucci, I., Bennani, M., Bigarré, P. and Dominique, P., 2013. *Activité microsismique et caractérisation de la détectabilité des réseaux de surveillance du bassin houiller de Gardanne*, AGAP, Nancy.
- Contrucci, I., Klein, E., Cao, N.T., Daupley, X. and Bigarre, P., 2011. Multi-parameter monitoring of a solution mining cavern collapse: First insight of precursors. *Comptes Rendus Geoscience*, 343(1): 1-10.
- Cornet, F.H., 2007. Introduction to the special section on induced seismicity. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(8): 1077-1078.
- Cuenot, N., Dorbath, C. and Dorbath, L., 2008. Analysis of the microseismicity induced by fluid injections at the EGS site of Soultz-sous-Forets (Alsace, France): Implications for the characterization of the geothermal reservoir properties. *Pure and Applied Geophysics*, 165(5): 797-828.
- Dahm, T., Becker, D., Bischoff, M., Cesca, S., Dost, B., Fritschen, R., Hainzl, S., Klose, C.D., Kuhn, D., Lasocki, S., Meier, T., Ohrnberger, M., Rivalta, E., Wegler, U. and Husen, S., 2013. Recommendation for the discrimination of human-related and natural seismicity. *Journal of Seismology*, 17(1): 197-202.
- Dahm, T., Cesca, S., Hainzl, S., Braun, T. and Kruger, F., 2015. Discrimination between induced, triggered, and natural earthquakes close to hydrocarbon reservoirs: A probabilistic approach based on the modeling of depletion-induced stress changes and seismological source parameters. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 120(4): 2491-2509.
- Dahm, T., Hainzl S, Becker D, Bischoff M, Cesca S, Dost R, Fritschen R, Kühn D, Lasocki S, Klose Chr, Meier Th, Ohrnberger M, Rivalta E, Shapiro S and U, W., 2010. How to discriminate induced, triggered and natural seismicity., *Proceedings of the workshop "Induced Seismicity"*. J. Ritter and A. Oth. *Cahier du Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie*, (Academic Press, Waltham, MA, 2002), Nov 15–17, 2010, Luxembourg, Vol. 30, pp 69–76.
- Davies, R., Foulger, G., Bindley, A. and Styles, P., 2013. Induced seismicity and hydraulic fracturing for the recovery of hydrocarbons. *Marine and Petroleum Geology*, 45: 171-185.
- De Pater, C.J. and Baisch., S., 2011. *Geomechanical Study of Bowland Shale Seismicity—Synthesis Report*. Prepared for Cuadrilla Resources. November 2. Available at [http://www.cuadrillaresources.com/wp-content/uploads/2012/02/Geomechanical-Study-of-Bowland-Shale-Seismicity\\_02-11-11.pdf](http://www.cuadrillaresources.com/wp-content/uploads/2012/02/Geomechanical-Study-of-Bowland-Shale-Seismicity_02-11-11.pdf) (accessed June 2012).

- Deichmann, N. and Giardini, D., 2009. Earthquakes Induced by the Stimulation of an Enhanced Geothermal System below Basel (Switzerland). *Seismological Research Letters*, 80(5): 784-798.
- del Potro, R. and Diez, M., 2015. Induced Seismicity in Underground Gas Storage - The Case of Castor, Offshore NE Spain, 77th EAGE Conference & Exhibition, 1 – 4 June, Madrid.
- Deng, K., Zhou, S., Wang, R., Robinson, R., Zhao, C. and Cheng, W., 2010. Evidence that the 2008 Mw 7.9 Wenchuan Earthquake Could Not Have Been Induced by the Zipingpu Reservoir. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(5B): 2805-2814.
- Di Manna, P., Guerrieri, L., Piccardi, L., Vittori, E., Castaldini, D., Berlusconi, A., Bonadeo, L., Comerci, V., Ferrario, F., Gambillara, R., Livio, F., Lucarini, M. and Michetti, A.M., 2012. Ground effects induced by the 2012 seismic sequence in Emilia: implications for seismic hazard assessment in the Po Plain. 2012, 55.
- Dieterich, J.H., 1979. Modeling of rock friction: 1. Experimental results and constitutive equations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84(B5): 2161-2168.
- Dowding, C., 1996. *Construction vibrations*, 610. Prentice Hall Upper Saddle River, NJ.
- Dowding, C.H. and Rozan, A., 1978. Damage to rock tunnels from earthquake shaking. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 104(2): 175-191.
- Durrheim, R.J., Anderson, R.L., Cichowicz, A., Ebrahim-Trollope, R., Hubert, G., Kijko, A., McGarr, A., Ortlepp, W.D. and Van der Merwe, N., 2007. The Risks to Miners, Mines and the Public Posed by Large Seismic Events in the Gold Mining Districts of South Africa, Chapter 4 in *Challenges in Deep and High Stress Mining*, Y Potvin, J Hadjigeorgiou and D Stacey (editors), Australian Centre for Geomechanics, pp. 33-40. .
- Ellsworth, W.L., 2013. Injection-Induced Earthquakes. *Science*, 341(6142).
- Espinoza, D.N., Kim, S.H. and Santamarina, J.C., 2011. CO2 geological storage—geotechnical implications. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15(4): 707-719.
- Evans, K.F., Zappone, A., Kraft, T., Deichmann, N. and Moia, F., 2012. A survey of the induced seismic responses to fluid injection in geothermal and CO2 reservoirs in Europe. *Geothermics*, 41: 30-54.
- Fritschen, R., 2010. Mining-Induced Seismicity in the Saarland, Germany. *Pure & Applied Geophysics*, 167(1/2): 77-89.
- Gasparini, P., 2015. The ICHESE report on the relationship between Hydrocarbon Exploration and the May 2012 earthquakes in the Emilia Region (Italy) and their consequences, Schatzalp Workshop on Induced Seismicity, <http://www.seismo.ethz.ch/static/schatzalp/2015/Gasparini.pdf>, Davos Schatzalp, Switzerland.
- Gaucher, E., Schoenball, M., Heidbach, O., Zang, A., Fokker, P.A., van Wees, J.-D. and Kohl, T., 2015. Induced seismicity in geothermal reservoirs: A review of forecasting approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52: 1473-1490.
- Ge, S., Liu, M., Lu, N., Godt, J.W. and Luo, G., 2009. Did the Zipingpu Reservoir trigger the 2008 Wenchuan earthquake? *Geophysical Research Letters*, 36(20): L20315.
- Gibowicz, S.J., 2009. Seismicity induced by mining: recent research. *Advances in Geophysics*, 51: 1-53.
- Gibowicz, S.J., Harjes, H.P. and Schafer, M., 1990. SOURCE PARAMETERS OF SEISMIC EVENTS AT HEINRICH ROBERT MINE, RUHR BASIN, FEDERAL-REPUBLIC-OF-GERMANY - EVIDENCE FOR NONDOUBLE-COUPLE EVENTS. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 80(1): 88-109.
- Gibowicz, S.J. and Kijko, A., 1994. *An introduction to mining seismology*. Academic Press, Inc., San Diego, California.
- Gibowicz, S.J., Lasocki, S., Dmowska, R. and Saltzman, B., 2001. Seismicity induced by mining: Ten years later, *Advances in Geophysics*, Vol. 44, pp. 39-181.
- Gibowicz, S.J. and Renata, D., 2009. Chapter 1 - Seismicity Induced by Mining: Recent Research, *Advances in Geophysics*. Elsevier, pp. 1-53.
- Gibson, G. and Sandiford, M., 2013. *Seismicity and Induced Earthquakes* Melbourne Energy Institute, Melbourne, Australia, 33 pp.

- Gonzalez, P.J., Tiampo, K.F., Palano, M., Cannavo, F. and Fernandez, J., 2012. The 2011 Lorca earthquake slip distribution controlled by groundwater crustal unloading. *Nature Geosci*, 5(11): 821-825.
- Grasso, J.-R., 1993. Fluides et instabilités sismiques: implications pour le comportement mécanique de la croûte supérieure = Fluid induced seismic instabilities: implication for the mechanical behavior of the uppercrust, 343 pp.
- Grasso, J.R. and Wittlinger, G., 1990. Ten years of seismic monitoring over a gas field. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 80(2): 450-473.
- Green, C.A. and Styles, P., 2012. Preese Hall shale gas fracturing: Review and recommendations for induced seismicity mitigation.
- Grigoli, F., Cesca, S., Priolo, E., Rinaldi, A.P., Clinton, J.F., Stabile, T.A., Dost, B., Fernandez, M.G., Wiemer, S. and Dahm, T., 2017. Current challenges in monitoring, discrimination, and management of induced seismicity related to underground industrial activities: A European perspective. *Reviews of Geophysics*, 55(2): 310-340.
- Grimaz, S., 2014. Can earthquakes trigger serious industrial accidents in Italy? Some considerations following the experiences of 2009 L'Aquila (Italy) and 2012 Emilia (Italy) earthquakes. *Bollettino Di Geofisica Teorica Ed Applicata*, 55(1): 227-237.
- Grunthal, G., 2014. Induced seismicity related to geothermal projects versus natural tectonic earthquakes and other types of induced seismic events in Central Europe. *Geothermics*, 52: 22-35.
- Gupta, H.K., 1983. Induced seismicity hazard mitigation through water level manipulation at Koyna, India: A suggestion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73(2): 679-682.
- Gupta, H.K., 2002. A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna, India. *Earth-Science Reviews*, 58(3-4): 279-310.
- Gupta, H.K. and Rajendran, K., 1986. Large artificial water reservoirs in the vicinity of the Himalayan Foothills and reservoir-induced seismicity. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 76(1): 205-215.
- Haering, M.O., Schanz, U., Ladner, F. and Dyer, B.C., 2008. Characterisation of the Basel 1 enhanced geothermal system. *Geothermics*, 37(5): 469-495.
- Hanks, T.C. and Kanamori, H., 1979. A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 84(B5): 2348-2350.
- Hasegawa, H.S., Wetmiller, R.J. and Gendzwill, D.J., 1989. Induced seismicity in mines in Canada : An overview. *pure and applied geophysics*, 129(3-4): 423-453.
- Healy J. H., Rubey, W.W., Griggs, D.T. and Raleigh, C.B., 1968. The Denver Earthquakes. Disposal of waste fluids by injection into a deep well has triggered earthquakes near Denver, Colorado. *Science*, 161(3848): 1301-1310.
- Holland, A., 2011. Examination of Possibly Induced Seismicity from Hydraulic Fracturing in the Eola Field, Garvin County, Oklahoma. Oklahoma Geological Survey Open-File Report OF1-2011. Available at [www.ogs.ou.edu/pubsscanned/openfile/OF1\\_2011.pdf](http://www.ogs.ou.edu/pubsscanned/openfile/OF1_2011.pdf) (accessed February 2012).
- Hoover D.B. and J.A., D., 1969. Seismic activity during the 1968 test pumping at the rocky mountain arsenal disposal well. *Geological survey circular* 613.
- Hossein Hakimhashemi, A., Schoenball, M., Heibach, O., Zang, A. and Grünthal, G., 2014. Forward modelling of seismicity rate changes in georeservoirs with a hybrid geomechanical-statistical prototype model. *Geothermics*, 52: 185-194.
- Howarth, R.W., Ingraffea, A. and Engelder, T., 2011. Natural gas: Should fracking stop? *Nature*, 477(7364): 271-275.
- Huang, Y., Wu, J.-P., Zhang, T.-Z. and Zhang, D.-N., 2008. Relocation of the M 8.0 Wenchuan earthquake and its aftershock sequence. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 51(12): 1703-1711.
- Hudyma, M., 2008. Analysis and interpretation of clusters of seismic events in mines, University of western Australia.
- Hudyma, M. and Potvin, Y., 2004. Seismic hazard in western Australian mines. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 104(5): 265-275.

- Hui-Hong, C., Huai, Z. and Yao-Lin, S.H.I., 2015. Comprehensive Understanding of the Zipingpu Reservoir to the MS8.0 Wenchuan Earthquake. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(4): 387-403.
- ICHESE, International Commission on Hydrocarbon Exploration and Seismicity in the Emilia Region, 2014. Report on the Hydrocarbon Exploration and Seismicity in Emilia Region, [http://mappegis.regione.emilia-romagna.it/gstatico/documenti/ICHESE/ICHESE\\_Report.pdf](http://mappegis.regione.emilia-romagna.it/gstatico/documenti/ICHESE/ICHESE_Report.pdf).
- IFPEN, 2011. L' eau dans la production de carburants, Panorama 2011.
- Jackson, R.B., Vengosh, A., Darrah, T.H., Warner, N.R., Down, A., Poreda, R.J., Osborn, S.G., Zhao, K. and Karr, J.D., 2013. Increased stray gas abundance in a subset of drinking water wells near Marcellus shale gas extraction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(28): 11250-11255.
- Jibson, R.W., 1993. Predicting earthquake-induced landslide displacements using Newmark's sliding block analysis. *Transportation research record*(1411).
- Jiménez, A., Tiampo, K.F., Posadas, A.M., Luzón, F. and Donner, R., 2009. Analysis of complex networks associated to seismic clusters near the Itoiz reservoir dam. *The European Physical Journal Special Topics*, 174(1): 181-195.
- Juanes, R., Jha, B., Hager, B.H., Shaw, J.H., Plesch, A., Astiz, L., Dieterich, J.H. and Frohlich, C., 2016. Were the May 2012 Emilia-Romagna earthquakes induced? A coupled flow-geomechanics modeling assessment. *Geophysical Research Letters*, 43(13): 6891-6897.
- Keefer, D.K., 2002. Investigating landslides caused by earthquakes—a historical review. *Surveys in geophysics*, 23(6): 473-510.
- Kinscher, J., Bernard, P., Contrucci, I., Mangeney, A., Pigué, J.P. and Bigarre, P., 2015. Location of microseismic swarms induced by salt solution mining. *Geophysical Journal International*, 200(1): 337-362.
- Kinscher, J., Cesca, S., Bernard, P., Contrucci, I., Mangeney, A., Pigué, J.P. and Bigarré, P., 2016. Resolving source mechanisms of microseismic swarms induced by solution mining. *Geophysical Journal International*.
- Kinscher, J., Contrucci, I., Dominique, P., Klein, E. and Bigarré, P., 2017. On the variety of post-deformation phenomena in abandoned mining districts: Insights from seismic source analysis, Schatzalp Workshop on Induced Seismicity, Davos (Switzerland).
- Klose, C.D., 2007. Geomechanical modeling of the nucleation process of Australia's 1989 M5.6 Newcastle earthquake. *Earth and Planetary Science Letters*, 256(3–4): 547-553.
- Klose, C.D., 2012. Evidence for anthropogenic surface loading as trigger mechanism of the 2008 Wenchuan earthquake. *Environmental Earth Sciences*, 66(5): 1439-1447.
- Kraft, T., Mai, P.M., Wiemer, S., Deichmann, N., Ripperger, J., Kästli, P., Bachmann, C., Fäh, D., Wössner, J. and Giardini, D., 2009. Enhanced Geothermal Systems: Mitigating Risk in Urban Areas. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 90(32): 273-274.
- Lahaie, F. and Grasso, J.R., 1999. Loading rate impact on fracturing pattern: Lessons from hydrocarbon recovery, Lacq gas field, France. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 104(B8): 17941-17954.
- Lavecchia, G., de Nardis, R., Costa, G., Tiberi, L., Ferrarini, F., Cirillo, D., Brozzetti, F. and Suhadolc, P., 2015. Was the Mirandola thrust really involved in the Emilia 2012 seismic sequence (northern Italy)? Implications on the likelihood of triggered seismicity effects. *Bollettino Di Geofisica Teorica Ed Applicata*, 56(4): 461-488.
- LEI Xing-lin, M.S.-I., WEN Xue-ze, SU Jin-rong, DU Fang, 2008. INTEGRATED ANALYSIS OF STRESS AND REGIONAL SEISMICITY BY SURFACE LOADING; A CASE STUDY OF ZIPINGPU RESERVOIR. *SEISMOLOGY AND GEOLOGY*, 30(4): 1046-1064.
- Li, T., Cai, M.F. and Cai, M., 2007. A review of mining-induced seismicity in China. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(8): 1149-1171.
- Majer, E., Nelson, J., Robertson-Tait, A., Savy, J. and Wong, I., 2012. A Protocol for Addressing Induced Seismicity Associated with Enhanced Geothermal Systems (EGS). [http://esd.lbl.gov/FILES/research/projects/induced\\_seismicity/egs/EGS-IS-Protocol-Final-Draft-20120124.PDF](http://esd.lbl.gov/FILES/research/projects/induced_seismicity/egs/EGS-IS-Protocol-Final-Draft-20120124.PDF).

- Majer, E., Nelson, J., Robertson-Tait, A., Savy, J. and Wong, I., 2014. Best Practices for Addressing Induced Seismicity Associated with Enhanced Geothermal Systems (EGS), <http://escholarship.org/uc/item/3446g9cf>.
- Majer, E.L., Baria, R., Stark, M., Oates, S., Bommer, J., Smith, B. and Asanuma, H., 2007. Induced seismicity associated with enhanced geothermal systems. *Geothermics*, 36(3): 185-222.
- Majer, E.L. and Peterson, J.E., 2007. The impact of injection on seismicity at The Geysers, California Geothermal Field. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44(8): 1079-1090.
- Martens, S., Liebscher, A., Möller, F., Hennings, J., Kempka, T., Lüth, S., Norden, B., Prevedel, B., Szizybalski, A., Zimmer, M., Kühn, M. and Group, K., 2013. CO2 Storage at the Ketzin Pilot Site, Germany: Fourth Year of Injection, Monitoring, Modelling and Verification. *Energy Procedia*, 37: 6434-6443.
- Matrullo, E., Contrucci, I., Dominique, P., Bennani, M., Aochi, H., Kinsher, J., Bernard, P. and Bigarré, P., 2015. Analysis and Interpretation of Induced Micro-seismicity by Flooding of the Gardanne Coal Basin (Provence – Southern France), 77th EAGE Conference & Exhibition 2015, Madrid, Spain.
- McGarr, A., 1991. On a possible connection between three major earthquakes in California and oil production. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 81(3): 948-970.
- McGarr, A., Bekins, B., Burkardt, N., Dewey, J., Earle, P., Ellsworth, W., Ge, S., Hickman, S., Holland, A., Majer, E., Rubinstein, J. and Sheehan, A., 2015. Coping with earthquakes induced by fluid injection. *Science*, 347(6224): 830-831.
- McGarr, A., Simpson, D. and Seeber, L., 2002. 40 Case histories of induced and triggered seismicity, *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, Academic Press, Waltham, MA, 2002, Vol. 8, Chap. 40.
- McGuire, R.K., 2004. "Seismic hazard and risk analysis", Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.
- Mignan, A., 2016. Static behaviour of induced seismicity. *Nonlin. Processes Geophys.*, 23(2): 107-113.
- Mignan, A., Broccardo, M., Wiemer, S. and Giardini, D., 2017. Induced seismicity closed-form traffic light system for actuarial decision-making during deep fluid injections. *Scientific Reports*, 7(1): 13607.
- Mignan, A., Landtwing, D., Kästli, P., Mena, B. and Wiemer, S., 2015. Induced seismicity risk analysis of the 2006 Basel, Switzerland, Enhanced Geothermal System project: Influence of uncertainties on risk mitigation. *Geothermics*, 53(Supplement C): 133-146.
- MiSE, Ministero dello Sviluppo Economico, 2014. Guidelines for monitoring seismicity, ground deformation and pore pressure in subsurface industrial activities. English version. (disponible à [http://unmig.mise.gov.it/unmig/agenda/upload/151\\_238.pdf](http://unmig.mise.gov.it/unmig/agenda/upload/151_238.pdf) (dernier accès en décembre, 2017)).
- MiSE, Ministero dello Sviluppo Economico, 2015. Decreto Ministeriale 25 Marzo 2015. Aggiornamento del disciplinare tipo in attuazione dell'articolo 38 del Decreto Legge 12 Settembre 2014, n. 1133, convertito, con modificazioni, dalla legge 11 Novembre 2014, n. 164; Roma - May 6, 2015. Disponibile à: [http://unmig.mise.gov.it/unmig/agenda/upload/133\\_300.pdf](http://unmig.mise.gov.it/unmig/agenda/upload/133_300.pdf), dernier accès en décembre 2017.
- Nicholson, C. and Wesson, R.L., 1992. Triggered earthquakes and deep well activities. *pure and applied geophysics*, 139(3): 561-578.
- Nicol, A., Gerstenberger, M., Bromley, C., Carne, R., Chardot, L., Ellis, S., Jenkins, C., Siggins, T. and Viskovic, P., 2013. Induced Seismicity; Observations, Risks and Mitigation Measures at CO2 Storage Sites. *Energy Procedia*, 37: 4749-4756.
- NRC, N.R.C., 2013. Induced Seismicity Potential in Energy Technologies. The National Academies Press, Washington, DC, 262 pp.
- Obermann, A., Kraft, T., Larose, E. and Wiemer, S., 2015. Potential of ambient seismic noise techniques to monitor the St. Gallen geothermal site (Switzerland). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(6): 4301-4316.

- Olivier, G., Brenguier, F., Campillo, M., Lynch, R. and Roux, P., 2015. Body-wave reconstruction from ambient seismic noise correlations in an underground mine. *GEOPHYSICS*, 80(3): KS11-KS25.
- Osborn, S.G., Vengosh, A., Warner, N.R. and Jackson, R.B., 2011. Methane contamination of drinking water accompanying gas-well drilling and hydraulic fracturing. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(20): 8172-8176.
- Ottmöller, L., Nielsen, H.H., Atakan, K., Braunmiller, J. and Havskov, J., 2005. The 7 May 2001 induced seismic event in the Ekofisk oil field, North Sea. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B10): n/a-n/a.
- Passarelli, L., Maccaferri, F., Rivalta, E., Dahm, T. and Boku, E.A., 2013. A probabilistic approach for the classification of earthquakes as 'triggered' or 'not triggered' Application to the 13th Jan 1976 Kopasker Earthquake on the Tjornes Fracture Zone, Iceland. *Journal of Seismology*, 17(1): 165-187.
- Patynska, R., 2013. THE CONSEQUENCES OF ROCK BURST HAZARD FOR SILESIAN COMPANIES IN POLAND. *Acta Geodyn. Geomater.*, 10(170): 227-235.
- Pechmann, J.C., Arabasz, W.J., Pankow, K.L., Burlacu, R. and McCarter, M.K., 2008. Seismological report on the 6 August 2007 Crandall Canyon mine collapse in Utah. *Seismological Research Letters*, 79(5): 620-636.
- Petersen, M.D., Mueller, C.S., Moschetti, M.P., Hoover, S.M., Rubinstein, J.L., Llenos, A.L., Michael, A.J., Ellsworth, W.L., McGarr, A.F., Holland, A.A. and Anderson, J.G., 2015. Incorporating induced seismicity in the 2014 United States National Seismic Hazard Model—Results of 2014 workshop and sensitivity studies: U.S. Geological Survey Open-File Report 2015–1070, 69 p., <http://dx.doi.org/10.3133/ofr20151070>.
- Portier, S., Vuataz, F.-D., Sanjuan, B., Nami, P. and Gérard, A., 2009. Chemical stimulation techniques for geothermal wells: experiments on the three-well EGS system at Soultz-sous-Forêts. *Geothermics*, 38: 349-359.
- Potvin, Y. and Wesseloo, J., 2013. Improving seismic risk management in hardrock mines. In: A.a.D. Malovichko (Editor), *Rockbursts and seismicity in mines*, 8th international symposium, RaSiM8, Saint-Petersburg, Moscow, Russia.
- Pratt, H.R. and Hustrulid, W.A.S., D.E., 1978. Earthquake damage to underground facilities. DP-1513; TRN: 79-002720 United States 10.2172/6441638 TRN: 79-002720 Dep. NTIS, PC A05/MF A01. SRS English, ; Du Pont de Nemours (E.I.) and Co., Aiken, SC (USA). Savannah River Lab.
- PVU, 2015. Paradox Valley Unit - Briefing Document - 2015, Forum, <http://www.coloradoriversality.org/docs/PVU%20Briefing%20Document%202015-04-30.pdf>.
- Raziperchikolaee, S. and Miller, J.F., 2015. Modeling pressure response into a fractured zone of Precambrian basement to understand deep induced-earthquake hypocenters from shallow injection. *The Leading Edge*, 34(6): 684-689.
- Rebuli, D.B. and van Aswegen, G., 2013. SHORT TERM SEISMIC HAZARD ASSESSMENT IN S.A. GOLD MINES, 8th International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines, At Russia, Saint-Petersburg-Mascow, pp. 323-331.
- Reiter, L., 1990. *Earthquake Hazard Analysis: Issues and Insights*.
- Richardson, E. and Jordan, T.H., 2002. Seismicity in deep gold mines of South Africa: Implications for tectonic earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(5): 1766-1782.
- Rubinstein, J.L., Ellsworth, W.L., McGarr, A. and Benz, H.M., 2014. The 2001-Present Induced Earthquake Sequence in the Raton Basin of Northern New Mexico and Southern Colorado. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(5): 2162-2181.
- Rubinstein, J.L. and 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.
- Segall, P., 1989. Earthquakes triggered by fluid extraction. *Geology*, 17(10): 942-946.
- Segall, P., Grasso, J.R. and Mossop, A., 1994. POROELASTIC STRESSING AND INDUCED SEISMICITY NEAR THE LACQ GAS-FIELD, SOUTHWESTERN FRANCE. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 99(B8): 15423-15438.

- Sileny, J. and Milev, A., 2008. Source mechanism of mining induced seismic events - Resolution of double couple and non double couple models. *Tectonophysics*, 456(1-2): 3-15.
- Simpson, D.W. and Leith, W., 1985. The 1976 and 1984 Gazli, USSR, earthquakes—were they induced? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75(5): 1465-1468.
- Spottiswoode, S.M., 2010. Mine seismicity: Prediction or forecasting? *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 110: 11-20.
- Stec, K., 2007. Characteristics of seismic activity of the Upper Silesian Coal Basin in Poland. *Geophysical Journal International*, 168(2): 757-768.
- Suckale, J., 2009. Chapter 2 - Induced Seismicity in Hydrocarbon Fields, *Advances in Geophysics*. Elsevier, pp. 55-106.
- Tao, W., Masterlark, T., Shen, Z.-K. and Ronchin, E., 2015. Impoundment of the Zipingpu reservoir and triggering of the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake, China. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(10): 2014JB011766.
- UKOOG, UK Onshore Operators Group, 2013. UK Onshore Shale Gas Well Guidelines, Exploration and appraisal phase, Issue 1, ([https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/185935/UKOOGShaleGasWellGuidelines.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/185935/UKOOGShaleGasWellGuidelines.pdf)).
- van der Voort, N. and Vanclay, F., 2015. Social impacts of earthquakes caused by gas extraction in the Province of Groningen, The Netherlands. *Environmental Impact Assessment Review*, 50: 1-15.
- van Eck, T., Goutbeek, F., Haak, H. and Dost, B., 2006. Seismic hazard due to small-magnitude, shallow-source, induced earthquakes in The Netherlands. *Engineering Geology*, 87(1-2): 105-121.
- van Thienen-Visser, K. and Breunese, J.N., 2015. Induced seismicity of the Groningen gas field: History and recent developments. *The Leading Edge*, 34(6): 664-671.
- Van Wees, J.D., Buijze, L., Van Thienen-Visser, K., Nepveu, M., Wassing, B.B.T., Orlic, B. and Fokker, P.A., 2014. Geomechanics response and induced seismicity during gas field depletion in the Netherlands. *Geothermics*, 52: 206-219.
- Walters, R.J., Zoback, M.D., Baker, J.W. and Beroza, G.C., 2015. Characterizing and Responding to Seismic Risk Associated with Earthquakes Potentially Triggered by Fluid Disposal and Hydraulic Fracturing. *Seismological Research Letters*, 86(4): 1110-1118.
- Wells, D.L. and Coppersmith, K.J., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4): 974-1002,A1-A4,B1-B11,C1-C49.
- Wilson, M.P., Davies, R.J., Foulger, G.R., Julian, B.R., Styles, P., Gluyas, J.G. and Almond, S., 2015. Anthropogenic earthquakes in the UK: A national baseline prior to shale exploitation. *Marine and Petroleum Geology*, 68, Part A: 1-17.
- Yeck, W.L., Block, L.V., Wood, C.K. and King, V.M., 2015. Maximum magnitude estimations of induced earthquakes at Paradox Valley, Colorado, from cumulative injection volume and geometry of seismicity clusters. *Geophysical Journal International*, 200(1): 322-336.
- Yin, Y., Wang, F. and Sun, P., 2009. Landslide hazards triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China. *Landslides*, 6(2): 139-152.
- Zoback, M.D., 2012. Managing the seismic risk posed by wastewater disposal, <http://www.earthmagazine.org/article/managing-seismic-risk-posed-wastewater-disposal>. *Earth Magazine*: 38-43.
- Zoback, M.D. and Gorelick, S.M., 2012. Earthquake triggering and large-scale geologic storage of carbon dioxide. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(26): 10164.
- Zoback, M.D. and Gorelick, S.M., 2015. To prevent earthquake triggering, pressure changes due to CO2 injection need to be limited. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(33): E4510.

# **Annexe A**



## Mécanismes et Facteurs des séismes

De façon générale, un **séisme naturel**, ou tremblement de terre, est créé par le coulissement rapide d'une fracture ou faille préexistante, le long de laquelle se sont accumulées des contraintes de plus en plus fortes, à la limite de la résistance que la faille oppose aux forces tectoniques en jeu. Le séisme correspond donc à un relâchement brutal des contraintes sur une surface plus ou moins étendue de faille. Rappelons ici que la croûte terrestre est un milieu hétérogène et discontinu, traversée par de nombreux réseaux de fractures et de failles de différentes tailles et d'orientations, liées à l'histoire tectonique longue et complexe d'une région.

Un séisme d'origine anthropique, résulte de la réactivation artificielle de failles préexistantes et/ou de la création de nouvelles fractures, lors des modifications du champ de contraintes naturelles générées par l'activité industrielle située dans son champ d'influence.

Afin de comprendre pourquoi des séismes peuvent être générés lors de travaux souterrains, il est nécessaire de préciser quels sont les facteurs responsables de l'initiation d'un séisme et qui en contrôlent la magnitude.

### 1. Conditions de l'occurrence d'un séisme

#### a. Mécanismes de rupture

Le glissement sur une faille a lieu lorsque les contraintes de cisaillement appliquées sur cette faille dépassent la résistance due à la friction de la faille. Le critère de rupture de Mohr - Coulomb est l'équation qui permet de quantifier les conditions critiques de l'occurrence d'un séisme :

$$\tau < \mu (\sigma_n - p) \quad (1)$$

Avec  $\tau$  : contrainte de cisaillement, parallèle à la faille ;  
 $\mu$  : coefficient de friction, généralement compris entre 0.6 et 1 (Byerlee, 1978; Dieterich, 1979) ;  
 $\sigma_n$ : contrainte normale, perpendiculaire à la faille ;  
 $p$  : pression de fluide ou interstitielle.

Ainsi, la faille est stable tant que la contrainte de cisaillement ( $\tau$ ) est inférieure à la force de friction, qui est représentée par le terme  $\mu (\sigma_n - p)$ . Le terme  $(\sigma_n - p)$  est appelé contrainte effective (Figure 23-a). Les paramètres qui contrôlent l'initiation d'un glissement sont donc :

- la contrainte de cisaillement, qui tend à faire coulisser les lèvres de la faille l'une contre l'autre ;
- la contrainte normale, qui tend à les plaquer l'une contre l'autre ;
- la pression de fluide au niveau du plan de faille, qui tend à les écarter.

Ainsi, un séisme peut avoir lieu :

- si la contrainte de cisaillement  $\tau$ , chargeant la faille, augmente ;
- ou si la contrainte effective  $(\sigma_n - p)$  diminue, soit à cause d'une diminution de la contrainte normale  $(\sigma_n)$  soit à cause d'une augmentation de la pression de fluide  $(p)$  (Figure 23-b).

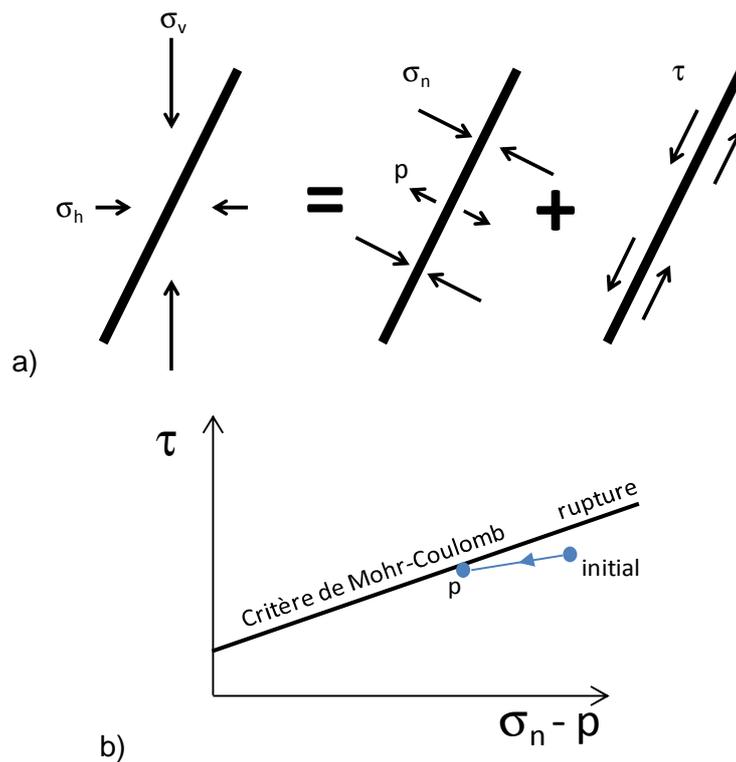


Figure 23 : a) représentation des contraintes horizontales ( $\sigma_h$ ) et verticales ( $\sigma_v$ ) qui s'exercent sur un plan de faille et décomposition de ce champ de contrainte en composante normale ( $\sigma_n$ ,  $p$ ) et de cisaillement ( $\tau$ ). b) représentation du critère de rupture de Mohr-Coulomb, la courbe bleue illustre une augmentation de la pression de fluide provoquant l'atteinte du critère de rupture.

La Figure 24 présente un diagramme ternaire (McGarr et al., 2002) où les trois paramètres,  $\tau$ ,  $\sigma_n$  et  $p$ , forment un domaine dans lequel peuvent être placés les différents types de sismicité en fonction du paramètre dominant. Dans certains cas, l'identification d'un seul mécanisme est simple. Par exemple, la sismicité causée par l'augmentation de la pression interstitielle  $p$  liée à l'injection de fluide dans le sous-sol. Dans d'autres cas, par exemple celui du remplissage de barrages hydrauliques, la relation peut être plus complexe. Dans ce cas, plus d'un paramètre sont impliqués (contrainte de cisaillement et pression interstitielle) ou couplés (par exemple la contrainte normale et la pression interstitielle).

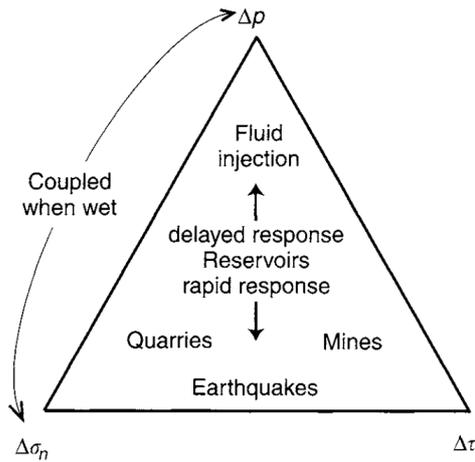


Figure 24 : classification simplifiée des trois paramètres contrôlant la sismicité anthropique et déclenchée (McGarr et al., 2002). Carrières de surface, mines profondes et tremblements de terre régionaux entraînent un accroissement de la sismicité principalement par le biais des modifications au champ de contrainte élastique. L'augmentation de la pression interstitielle (ou de fluide) est le facteur dominant pour l'injection de fluide en profondeur. Le remplissage de réservoir peut entraîner des changements dans les trois paramètres pour générer des tremblements de terre. La déplétion de pétrole et de gaz produit principalement des changements dans l'état de contrainte au sein de la masse rocheuse entourant les réservoirs.

D'autre part, les contraintes normales ( $\sigma_n$ ) et de cisaillement ( $\tau$ ) qui s'appliquent sur un plan de faille dépendent de l'orientation de celle-ci par rapport à l'état de contrainte du massif rocheux (Figure 23-a). Les roches dans la croûte terrestre continentale sont généralement sous contraintes à cause du poids des terrains et des forces tectoniques. Ce champ de contrainte varie donc verticalement avec la profondeur mais aussi horizontalement en fonction de la direction. Par contre, pour un fluide au repos, l'état de contrainte est hydrostatique, c'est-à-dire que la contrainte est la même dans toutes les directions et aucune contrainte de cisaillement ne peut être transmise.

Si la contrainte verticale ( $\sigma_v$ ) peut être estimée, en première approche, comme le poids des terrains, il n'en est pas de même pour des contraintes horizontales. En effet, celles-ci varient d'un point à un autre de la terre en fonction de la lithologie des terrains, des failles préexistantes et des autres discontinuités de la croûte terrestre. Aussi, la détermination de l'état de contrainte in situ des terrains de subsurface est un exercice complexe et en général coûteux. Cette information lorsqu'elle existe est souvent partielle ce qui rend difficile la connaissance exacte du champ de contrainte qui s'exerce sur une faille et donc d'en prévoir son glissement.

## 2. Autres mécanismes de rupture

Le mécanisme de rupture sismique en cisaillement est le modèle le plus couramment utilisé par les géophysiciens pour décrire l'événement à sa source. Ce mode de rupture n'entraîne pas de changement de volume des terrains. En revanche, dans l'industrie minière souterraine, où les vides créés par l'extraction de minerai peuvent être très importants, d'autres modes de ruptures, en traction ou compression par exemple (instabilités de toit et/ou de piliers d'exploitations souterraines), peuvent entrer en jeu. Ces considérations sortent du cadre du présent rapport et ne sont pas détaillées ici.



## **Annexe B**



| Date       | Site/Ville/Etat                          | Pays        | Max Magnitude | Technologie à l'origine de la sismicité | Référence   | Lat °   | Lon °    |
|------------|--|-------------|---------------|---|---|---------|----------|
| 2002       | Bad Urach                                | Germany     | 1,8           | Géothermie                              | Evans et al. (2012)                                       | 48,49 N | 9,40 E   |
| -          | Basel                                    | Switzerland | 3,4           | Géothermie                              | Giardini (2011)   | 47,56 N | 7,59 E   |
| 16/09/2003 | Berlin, Usulutàn                         | El Salvador | 4,4           | Géothermie                              | Bommer et al. (2006)                                      | 13,49 N | 88,53 W  |
| 31/05/1905 | Cesano                                   | Italy       | 2             | Géothermie                              | Evans et al. (2012)                                       | 42,50 N | 12,34 E  |
| 14/11/2003 | Cooper Basin                             | Australia   | 3,7           | Géothermie                              | Majer et al. (2007)                                       | 27,82 S | 140,76 W |
| 01/03/2005 | Coso, California                         | USA         | 2,6           | Géothermie                              | Julian et al. (2007);<br>Foulger et al. (2008)            | 35,98 N | 117,93 W |
| 04/06/2011 | Desert Peak, Nevada                      | USA         | 0,74          | Géothermie                              | Chabora et al. (2012)                                     | 39,19 N | 118,83 W |
| -          | Fenton Hill, New Mexico                  | USA         | 1             | Géothermie                              | Nicholson and Wesson<br>(1992)                            | 35,90 N | 106,67 W |
| 1989       | Fjallbacka                               | Sweden      | -0,2          | Géothermie                              | Evans et al. (2012)                                       | 58,60 N | 11,29 E  |
| 16/06/1905 | German Continental Deep Drilling Program | Germany     | 1,2           | Géothermie                              | Evans et al. (2012);<br>Emmerman and<br>Lauterjung (1997) | 49,56 N | 12,04 E  |
| 1982       | Geysers, California                      | USA         | 4,6           | Géothermie                              | Majer et al. (2007)                                       | 38,79 N | 122,82 W |
| 2007       | Gross Schonebeck                         | Germany     | -1,1          | Géothermie                              | Evans et al. (2012)                                       | 52,91 N | 13,53 E  |
| 2003       | Hellisheidi                              | Iceland     | 2,4           | Géothermie                              | Evans et al. (2012)                                       | 64,04 N | 21,40 W  |
| -          | Hijiori                                  | Japan       | 0,3           | Géothermie                              | Kaieda et al. (2010)                                      | 38,61 N | 140,17 E |
| 2003       | Horstberg                                | Germany     | 0             | Géothermie                              | Evans et al. (2012)                                       | 52,90 N | 10,33 E  |
| 09/04/2010 | Insheim                                  | Germany     | 2,3           | Géothermie                              | Grünthal (2013)   | 49.15 W | 8.15 E   |
| 2004       | Krafla                                   | Iceland     | 2             | Géothermie                              | Evans et al. (2012)                                       | 65,72 N | 16,80 W  |
| 2007       | Landau                                   | Germany     | 2,7           | Géothermie                              | Evans et al. (2012)                                       | 49,20 N | 8,12 E   |
| 1977       | Larderello-Travale                       | Italy       | 3             | Géothermie                              | Evans et al. (2012)                                       | 43,24 N | 10,88 E  |
| 1984       | Latera                                   | Italy       | 2,9           | Géothermie                              | Evans et al. (2012)                                       | 42,62 N | 11,82 E  |
| 22/05/1905 | Monte Amiata                             | Italy       | 3,5           | Géothermie                              | Evans et al. (2012)                                       | 42,89 N | 11,62 E  |
| -          | Mutnovsky, Kamchatka                     | Russia      | 2             | Géothermie                              | Kugaenko et al. (2005)                                    | 52,45 N | 158,20 E |
| 1991       | Ogachi                                   | Japan       | 2             | Géothermie                              | Kaieda et al. (2010)                                      | 39,17 N | 140,41 E |

| Date       | Site/Ville/Etat      | Pays    | Max Magnitude | Technologie à l'origine de la sismicité | Référence                               | Lat °     | Lon °      |
|------------|----------------------|---------|---------------|---|---|-----------|------------|
| 1987       | Rosemanowes,         | UK      | 2             | Géothermie                              | Evans et al. (2012)                     | 50,17 N   | 5,11 W     |
| 1993       | Soultz               | France  | 2,9           | Géothermie                              | Evans et al. (2012)                     | 48,94 N   | 7,88 E     |
| 10/06/2003 | Soultz sous Forêts   | France  | 2,7           | Géothermie                              | Grünthal (2013)                         | 48.93 N   | 7.87 E     |
| 1977       | Torre Alfina         | Italy   | 3             | Géothermie                              | Evans et al. (2012)                     | 42,75 N   | 11,94 E    |
| 03/07/2008 | Unterhaching         | Germany | 2,4           | Géothermie                              | Evans et al. (2012);<br>Grünthal (2013) | 48,07 N   | 11,62 E    |
| -          | Blackpool            | UK      | 2,3           | Fracturation Hydraulique                | de Pater and Baisch<br>(2011)           | 53,82 N   | 3,03 W     |
| 01/18/2011 | Eola field, Oklahoma | USA     | 2,8           | Fracturation Hydraulique                | Holland (2011)                          | 34,57 N   | 97,43 W    |
| 13/06/2003 | Bouchard-Hébert      | Canada  | 2,5           | Extraction minière                      | Hudyma(2008)                            | 48,37 N   | 78,9 W     |
| 05/11/2005 | Brunswick            | Canada  | 3,3           | Extraction minière                      | Hudyma(2008)                            | 47.48 N   | 65.87 W    |
| 28/09/1985 | Camflo               | Canada  | 2             | Extraction minière                      | Hudyma(2008)                            | 48,15 N   | 78,04 W    |
| 06/03/2004 | Campbell             | Canada  | 3             | Extraction minière                      | Hudyma(2008)                            | 51.06 N   | 93.74 W    |
| 03/08/1996 | Chimo                | Canada  | 3,1           | Extraction minière                      | Hudyma(2008)                            | 48.01 N   | 77.26 W    |
| 29/12/2001 | Craig                | Canada  | 3,2           | Extraction minière                      | Hudyma(2008)                            | 46.63 N   | 81.37 W    |
| 29/11/2006 | Creighton            | Canada  | 4,1           | Extraction minière                      | Hudyma(2008)                            | 46.5 N    | 80.97 W    |
| 06/08/2007 | Crandall (Utah)      | USA     | 4,1           | Extraction minière                      | Kubacki et al., 2014                    | 39.4675 N | 111.2248 W |
| 03/02/1995 | Trona Mine (Wyoming) | USA     | 5,1           | Extraction minière                      | Pechmann et al. (1995)                  | 41,623    | -109,773   |
| 11/12/1987 | Denison              | Canada  | 2,7           | Extraction minière                      | Hudyma(2008)                            | 46,49 N   | 82,6 W     |
| 28/05/1995 | Dickenson            | Canada  | 2,6           | Extraction minière                      | Hudyma(2008)                            | 51,06 N   | 93,73 W    |
| 25/04/1992 | Falconbridge         | Canada  | 2,7           | Extraction minière                      | Hudyma(2008)                            | 46.58 N   | 80.81 W    |
| 19/01/1996 | Frood Stobie         | Canada  | 2,9           | Extraction minière                      | Hudyma(2008)                            | 46.53 N   | 81 W       |
| 21/01/1996 | Garson               | Canada  | 2,5           | Extraction minière                      | Hudyma(2008)                            | 46.57 N   | 80,87 W    |
| 17/12/1989 | Gaspé                | Canada  | 2,7           | Extraction minière                      | Hudyma(2008)                            | 48.97 N   | 65.52 W    |
| 30/04/1999 | Heath Steel          | Canada  | 2,6           | Extraction minière                      | Hudyma(2008)                            | 47,28 N   | 66,07 W    |
| 06/01/2003 | Ibbenbüren           | Germany | 3,9           | Extraction minière                      | Grünthal (2013)                         | 52.33 N   | 7.76 E     |

| Date       | Site/Ville/Etat | Pays    | Max Magnitude | Technologie à l'origine de la sismicité | Référence       | Lat °   | Lon °   |
|------------|-----------------|---------|---------------|---|-----------------|---------|---------|
| 30/09/1997 | Kerr-Addison    | Canada  | 3,5           | Extraction minière                      | Hudyma(2008)    | 48.14 N | 79.58 W |
| 30/09/2004 | Kidd Creek      | Canada  | 3             | Extraction minière                      | Hudyma(2008)    | 48,69   | 81.37 W |
| 01/12/1990 | Lac Shortt      | Canada  | 2,8           | Extraction minière                      | Hudyma(2008)    | 49.61 N | 75.86 W |
| 02/03/2007 | Laronde         | Canada  | 2,8           | Extraction minière                      | Hudyma(2008)    | 48.25 N | 78.25 W |
| 30/12/2010 | Legnica         | Poland  | 4,2           | Extraction minière                      | Grünthal (2013) | 51.51 N | 16.14 E |
| 12/05/1989 | Levack          | Canada  | 2,7           | Extraction minière                      | Hudyma(2008)    | 46.65 N | 81.37 W |
| 01/07/1974 | Rochonvillers   | France  | 4             | Extraction minière                      | Grünthal (2013) | 49.29 N | 5.96 E  |
| 03/03/2002 | Louvicourt      | Canada  | 2,6           | Extraction minière                      | Hudyma(2008)    | 48.1 N  | 77,66 W |
| 12/04/1997 | Macassa         | Canada  | 3,7           | Extraction minière                      | Hudyma(2008)    | 48.14 N | 80.07 W |
| 04/06/1996 | MacLeod         | Canada  | 2,5           | Extraction minière                      | Hudyma(2008)    | 48,02 N | 84,76 W |
| 10/02/2007 | Mouska          | Canada  | 3             | Extraction minière                      | Hudyma(2008)    | 48,28   | 78.57 W |
| 14/03/2001 | Musselwhite     | Canada  | 2,2           | Extraction minière                      | Hudyma(2008)    | 52.61 N | 90,37 W |
| 28/04/2005 | Niobec          | Canada  | 2,2           | Extraction minière                      | Hudyma(2008)    | 48,53 N | 71,16 W |
| 08/01/1994 | Onaping         | Canada  | 2,5           | Extraction minière                      | Hudyma(2008)    | 46,63 N | 81,38 W |
| 16/09/1967 | Peissenberg     | Germany | 3,8           | Extraction minière                      | Grünthal (2013) | 47.83 N | 11.1 E  |
| 06/04/1986 | Quirke          | Canada  | 2,8           | Extraction minière                      | Hudyma(2008)    | 46.51 N | 82.63 W |
| 02/07/1983 | S-Harz          | Germany | 3,1           | Extraction minière                      | Grünthal (2013) | 51.42 N | 10.66 E |
| 11/09/1996 | Saale           | Germany | 4,6           | Extraction minière                      | Grünthal (2013) | 51.45 N | 11.85 E |
| 23/02/2008 | Saar            | France  | 3,7           | Extraction minière                      | Grünthal (2013) | 49.38 N | 6.84 E  |
| 03/11/1936 | Ruhr            | Germany | 4,1           | Extraction minière                      | Grünthal (2013) | 51.55 N | 7.3 E   |
| 10/05/1995 | Sigma           | Canada  | 3,6           | Extraction minière                      | Hudyma(2008)    | 48.1 N  | 77.75 W |
| 02/08/1986 | Strathcona      | Canada  | 3,2           | Extraction minière                      | Hudyma(2008)    | 46.63 N | 81.38 W |
| 13/04/2005 | Thayer lindsley | Canada  | 3,1           | Extraction minière                      | Hudyma(2008)    | 46.56 N | 81 W    |
| 13/03/1989 | Werra           | Germany | 5,4           | Extraction minière                      | Grünthal (2013) | 50.8 N  | 10.05 E |

| Date       | Site/Ville/Etat         | Pays           | Max Magnitude | Technologie à l'origine de la sismicité | Référence            | Lat °  | Lon °  |
|------------|-------------------------|----------------|---------------|---|----------------------|--------|--------|
| 11/04/2000 | LubinMine               | Poland         | 4,21          | Extraction minière                      | IGFPAS <sup>30</sup> | 51,47  | 16,14  |
| 21/06/2001 | Merlebach               | France         | 4             | Extraction minière                      | SZGRF <sup>31</sup>  | 49,14  | 6,73   |
| 18/07/2000 | RudnaMine               | Poland         | 4,16          | Extraction minière                      | IGFPAS               | 51,506 | 16,136 |
| 13/06/2002 | Lazy Mine               | Czech republic | 3,8           | Extraction minière                      | IGCAS <sup>32</sup>  | 49,89  | 18,47  |
| 19/03/2013 | PolkoviceMine           | Poland         | 4,6           | Extraction minière                      | IGFPAS               | 51,51  | 16,06  |
| 23/02/2008 | Saarbruecken-West       | Germany        | 4             | Extraction minière                      | BGR <sup>33</sup>    | 49,38  | 6,84   |
| 06/08/2003 | Sterkrade-Nord          | Germany        | 3             | Extraction minière                      | KNMI <sup>34</sup>   | 51,587 | 6,825  |
| 23/06/1975 | Ronchonvillers          | France         | 5,2           | Extraction minière                      | BGR                  | 49,286 | 5,957  |
| 20/04/1973 | Tressange/Rochonvillers | France         | 4,3           | Extraction minière                      | BGR                  | 49,4   | 6      |
| 16/05/1991 | Tecklenburg/Ibbenbueren | Germany        | 4,6           | Extraction minière                      | BGR                  | 52,28  | 7,7    |
| 21/08/1996 | Upper Silesia           | Poland         | 3,3           | Extraction minière                      | IGCAS                | 50,06  | 19,06  |
| 13/01/2005 | Silesia                 | Poland         | 3,8           | Extraction minière                      | IGFPAS               | 50,1   | 18,47  |
| 06/10/1980 | Mettingen               | Germany        | 2,8           | Extraction minière                      | BGR                  | 52,18  | 7,48   |
| 12/12/2007 | Moers                   | Germany        | 3,3           | Extraction minière                      | BGR                  | 51,409 | 6,566  |
| 02/12/2011 | Nw.Haltern              | Germany        | 3,3           | Extraction minière                      | KNMI                 | 51,767 | 7,098  |
| 05/03/1973 | OberesVogtland          | Germany        | 3,2           | Extraction minière                      | KNMI                 | 51,575 | 7,38   |
| 02/06/2003 | Orsoy                   | Germany        | 3,4           | Extraction minière                      | KNMI                 | 51,518 | 6,715  |
| 22/01/2010 | Belchatow               | Poland         | 4,5           | Extraction minière                      | IGFPAS               | 51,25  | 19,06  |
| 28/09/1981 | Recklinghausen          | Germany        | 3,4           | Extraction minière                      | BGR                  | 51,7   | 7,23   |

<sup>30</sup> IGFPAS : Institute of Geophysics Polish Academy of Sciences, <http://www.igf.edu.pl>

<sup>31</sup> SZGRF : The Seismological Central Observatory, <https://www.szgrf.bgr.de>

<sup>32</sup> Institute of Geophysics of the CAS : <http://www.ig.cas.cz/en/structure/observatories/west-bohemia-seismic-network-webnet/map-epicenters>

<sup>33</sup> BGR : Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, <https://www.bgr.bund.de>

<sup>34</sup> KNMI : Institut royal météorologique des Pays-Bas, <http://www.knmi.nl/>

| Date       | Site/Ville/Etat                | Pays           | Max Magnitude | Technologie à l'origine de la sismicité | Référence                        | Lat °              | Lon °          |
|------------|--------------------------------|----------------|---------------|---|----------------------------------|--------------------|----------------|
| 14/02/2007 | Rheinberg                      | Germany        | 3             | Extraction minière                      | KNMI                             | 51,513             | 6,575          |
| 03/11/1936 | Ruhrgebiet                     | Germany        | 3,9           | Extraction minière                      | BGR                              | 51,55              | 7,3            |
| 17/12/1965 | Unna                           | Germany        | 3,2           | Extraction minière                      | BGR                              | 51,567             | 7,833          |
| 24/11/1981 | Wesel/Rhein                    | Germany        | 3,4           | Extraction minière                      | BGR                              | 51,64              | 6,63           |
| 18/03/1888 | Ruhrgebiet                     | Germany        | 3,6           | Extraction minière                      | BGR                              | 51,53              | 7,45           |
| 12/09/1980 | Pribram                        | Czech republic | 3,5           | Extraction minière                      | IGCAS                            | 49,65              | 13,96          |
| 07/01/1965 | Reocin                         | Spain          | 4,1           | Extraction minière                      | IGN                              | 43,2               | -4,1           |
| 19/04/1983 | Ahrbergen                      | Germany        | 1,8           | Extraction minière                      | BGR                              | 52,134             | 9,528          |
| 04/04/1971 | Aschersleben,                  | Germany        | 4,6           | Extraction minière                      | BGR                              | 51,75              | 11,52          |
| 22/02/1953 | Bad                            | Germany        | 5             | Extraction minière                      | BGR                              | 50,917             | 10             |
| 02/07/1983 | Bleicherode,                   | Germany        | 3,5           | Extraction minière                      | BGR                              | 51,44              | 10,56          |
| 21/12/1984 | Salzwedel                      | Germany        | 2,6           | Extraction minière                      | BGR                              | 52,501             | 11,01          |
| 11/09/1996 | Halle                          | Germany        | 4,8           | Extraction minière                      | BGR                              | 51,448             | 11,858         |
| 13/03/1989 | Eisenach                       | Germany        | 5,6           | Extraction minière                      | BGR                              | 50,804             | 10,05          |
| 27/12/1989 | NewCastle                      | Australia      | 5,6           | Extraction minière                      | Klose (2007)                     | -<br>32,96416<br>7 | 151,6069<br>44 |
| 09/09/2001 | Alkmar                         | Netherlands    | 3,5           | Oil and gas extraction                  | Giardini (2011); Grünthal (2013) | 52.65 N            | 4.71 E         |
| 1986       | Assen                          | Netherlands    | 2,8           | Oil and gas extraction                  | Grasso (1992)                    | 53 N               | 6,56 E         |
| 15/07/2005 | Bassum                         | Germany        | 3,7           | Extraction hydrocarbures                | Grünthal (2013)                  | 52.89 N            | 8.75 E         |
| 09/09/2001 | Bergermeer Field               | Netherlands    | 3,5           | Extraction hydrocarbures                | van Eck et al. (2006)            | 52,64 N            | 4,73 E         |
| -          | Catoosa, Oklahoma <sup>1</sup> | USA            | 4,7           | Extraction hydrocarbures                | Nicholson and Wesson (1992)      | 36,19 N            | 95,74 W        |
| -          | Cleburne, Texas                | USA            | 2,8           | Extraction hydrocarbures                | Howe et al. (2010)               | 32,35 N            | 97,39 W        |
| 1983       | Coalinga, California           | USA            | 6,5           | Extraction hydrocarbures                | McGarr (1991)                    | 36,14 N            | 120,36 W       |
| -          | Dan                            | Denmark        | 4             | Extraction hydrocarbures                | Grasso (1992)                    | 55,42 N            | 5,26 E         |

| Date       | Site/Ville/Etat               | Pays              | Max Magnitude | Technologie à l'origine de la sismicité | Référence                              | Lat °   | Lon °    |
|------------|-------------------------------|-------------------|---------------|---|--|---------|----------|
|            | East Durant, Oklahoma         | USA               | 3,5           | Extraction hydrocarbures                | Nicholson and Wesson (1992)            |         |          |
| 20010507   | Ekofisk                       | Norway            | 4,3           | Extraction hydrocarbures                | Cescaetal2011GJI                       | 57,57   | 3,18     |
| -          | El Reno, Oklahoma4            | USA               | 5,2           | Extraction hydrocarbures                | Nicholson and Wesson (1992)            | 35,53 N | 97,95 W  |
|            | Flashing, Texas               | USA               | 3,4           | Extraction hydrocarbures                | Pennington et al. (1986)               |         |          |
| 17/05/1976 | Gazli                         | Uzbekistan        | 7,3           | Extraction hydrocarbures                | Adushkin et al. (2000)                 | 40,38 N | 63,47 E  |
|            | Goose Creek, Texas            | USA               | unknown5      | Extraction hydrocarbures                | Nicholson and Wesson (1992)            |         |          |
| 08/08/2006 | Groningen Field               | Netherlands       | 3,5           | Extraction hydrocarbures                | van Eck et al. (2006); Grünthal (2013) | 53,35 N | 6,69 E   |
|            | Grozny                        | Caucasus (Russia) | 3,2           | Extraction hydrocarbures                | Guha (2000)                            |         |          |
| -          | Gudermes                      | Caucasus (Russia) | 4,5           | Extraction hydrocarbures                | Smirnova (1968)                        | 43,34 N | 46,12 E  |
| -          | Imogene Field, Texas          | USA               | 3,9           | Extraction hydrocarbures                | Pennington et al. (1986)               | 28,91 N | 98,46 W  |
| -          | Kettleman North, California   | USA               | 6,1           | Extraction hydrocarbures                | McGarr (1991)                          | 36,02 N | 120,08 W |
| 1979       | Lacq                          | France            | 4,2           | Extraction hydrocarbures                | Grasso and Wittlinger (1990)           | 43,42   | -0,5     |
| -          | Lake Charles, Louisiana8      | USA               | 3,8           | Extraction hydrocarbures                | Nicholson and Wesson (1990)            | 30,24 N | 93,27 W  |
| 02/06/1993 | Minagish Field                | Kuwait            | 4,7           | Extraction hydrocarbures                | Bou-Rabee (1994)                       | 28,95 N | 47,55 E  |
| -          | Montebello, California        | USA               | 5,9           | Extraction hydrocarbures                | Nicholson and Wesson (1992)            | 34,03 N | 118,08 W |
| -          | Petroleum field               | Oman              | 2,1           | Extraction hydrocarbures                | Sze (2005)                             | 22,13 N | 56,01 E  |
|            | Orcutt Field, California      | USA               | 3,5           | Extraction hydrocarbures                | Nicholson and Wesson (1992)            |         |          |
| -          | Richland County, Illinois10   | USA               | 4,9           | Extraction hydrocarbures                | Nicholson and Wesson (1992)            | 38,71 N | 88,08 W  |
| -          | Rocky Mountain House, Alberta | Canada            | 3,4           | Extraction hydrocarbures                | Wetmiller (1986)                       | 52,38 N | 114,92 W |

| Date       | Site/Ville/Etat              | Pays        | Max Magnitude | Technologie à l'origine de la sismicité | Référence                        | Lat °   | Lon °    |
|------------|------------------------------|-------------|---------------|---|----------------------------------|---------|----------|
| 13/08/1997 | Rongchang, Chongqing         | China       | 5,2           | Extraction hydrocarbures                | Lei et al. (2008)                | 29,40 N | 105,59 E |
| 19/02/1997 | Roswinkel Field              | Netherlands | 3,4           | Extraction hydrocarbures                | van Eck et al. (2006)            | 52,84 N | 7,04 E   |
| 20/10/2004 | Rotenburg                    | Germany     | 4,3           | Extraction hydrocarbures                | Giardini (2011); Grünthal (2013) | 53.04 N | 9.54 E   |
| -          | Sleepy Hollow, Nebraska      | USA         | 2,9           | Extraction hydrocarbures                | Rothe and Lui (1983)             | 41,36 N | 96,01 W  |
| 02/06/1977 | Soltau                       | Germany     | 3,7           | Extraction hydrocarbures                | Grünthal (2013)                  | 52.94 N | 9.94 E   |
|            | South-central Texas          | USA         | 4,3           | Extraction hydrocarbures                | Davis et al. (1995)              |         |          |
| 26/03/1971 | Starogroznenskoe Oilfield    | Russia      | 4,7           | Extraction hydrocarbures                | Kouznetsov et al. (1994)         |         |          |
| -          | Strachan, Alberta            | Canada      | 3,4           | Extraction hydrocarbures                | Grasso (1992)                    | 52,26 N | 115,15 W |
| 1976/1979  | War Wink Field, Texas        | USA         | 2,9           | Extraction hydrocarbures                | Doser et al. (1992)              | 31,52 N | 103,38 W |
|            | West Texas                   | USA         | 3,1           | Extraction hydrocarbures                | Keller et al. (1987)             |         |          |
| -          | Whittier Narrows, California | USA         | 5,9           | Extraction hydrocarbures                | McGarr (1991)                    | 34,05 N | 118,07 W |
| 1951       | Wilmington Field, California | USA         | 3,3           | Extraction hydrocarbures                | Kouznetsov et al. (1994)         | 33,78 N | 118,26 W |
| 21/09/1994 | Alkmaar                      | Netherlands | 2,5           | Extraction hydrocarbures                | KNMI <sup>35</sup>               | 52,658  | 4,708    |
| 27/06/2011 | Hoeksmeer                    | Netherlands | 3,2           | Extraction hydrocarbures                | KNMI                             | 53,299  | 6,8      |
| 16/08/2012 | Huizinge                     | Netherlands | 3,4           | Extraction hydrocarbures                | KNMI                             | 53,35   | 6,673    |
| 09/10/2011 | Noordzee                     | Netherlands | 3,1           | Extraction hydrocarbures                | KNMI                             | 53,281  | 3,885    |
| 25/10/2000 | Roswinkel                    | Netherlands | 3,2           | Extraction hydrocarbures                | KNMI                             | 52,832  | 7,052    |
| 20/10/2004 | Rotenburg/Soltau             | Netherlands | 4,5           | Extraction hydrocarbures                | BGR <sup>36</sup>                | 53,039  | 9,537    |
| 10/11/2003 | Stedum                       | Netherlands | 3             | Extraction hydrocarbures                | KNMI                             | 53,325  | 6,69     |
| 15/07/2005 | Syke,                        | Netherlands | 3,8           | Extraction hydrocarbures                | BGR                              | 52,886  | 8,753    |
| 08/08/2006 | Westeremden                  | Netherlands | 3,5           | Extraction hydrocarbures                | KNMI                             | 53,35   | 6,697    |
| 08/05/2009 | Zeerijp                      | Netherlands | 3             | Extraction hydrocarbures                | KNMI                             | 53,354  | 6,762    |

<sup>35</sup> KNMI : Institut royal météorologique des Pays-Bas, <http://www.knmi.nl/>

<sup>36</sup> BGR : Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, <https://www.bgr.bund.de>

| Date       | Site/Ville/Etat                 | Pays         | Max Magnitude | Technologie à l'origine de la sismicité | Référence  | Lat °   | Lon °    |
|------------|---------------------------------|--------------|---------------|---|--|---------|----------|
| 1951       | Caviaga                         | Italy        | 5,5           | Extraction hydrocarbures                | Klose 2012 Jseismo                                       | 45,3    | 9,6      |
| 25/10/2000 | Roswinkel                       | Netherlands  | 3,2           | Extraction hydrocarbures                | OKNMI  | 52,832  | 7,052    |
| -          | Love County, Oklahoma           | USA          | 1,9           | Extraction hydrocarbures                | Nicholson and Wesson (1990)                              | 33,98 N | 97,22 W  |
|            | Apollo Hendrick Field, Texas    | USA          | 2             | Secondary recovery                      | Doser et al. (1992)                                      |         |          |
|            | Barsa-Gelmes-Wishka Oilfield    | Turkmenistan | 6             | Secondary recovery                      | Kouznetsov et al. (1994)                                 |         |          |
| -          | Cogdell Canyon Reef, Texas      | USA          | 4,6           | Secondary recovery                      | Davis and Pennington (1989); Nicholson and Wesson (1990) | 32,68 N | 100,93 W |
| -          | Cold Lake, Alberta              | Canada       | 2             | Secondary recovery                      | Nicholson and Wesson (1990)                              | 54,46 N | 110,17 W |
|            | Dollarhide, Texas               | USA          | 3,5           | Secondary recovery                      | Nicholson and Wesson (1992)                              |         |          |
|            | Dora Roberts, Texas             | USA          | 3             | Secondary recovery                      | Nicholson and Wesson (1992)                              |         |          |
|            | East Texas, Texas               | USA          | 4,3           | Secondary recovery                      | Nicholson and Wesson (1992)                              |         |          |
| -          | Fort St. John, British Columbia | Canada       | 4,3           | Secondary recovery                      | Horner et al. (1994)                                     | 56,25 N | 120,84 W |
| 30/12/1979 | Gobles Field, Ontario           | Canada       | 2,8           | Secondary recovery                      | Nicholson and Wesson (1990)                              | 43,15 N | 80,57 W  |
|            | Hunt Field, Mississippi7        | USA          | 3,6           | Secondary recovery                      | Nicholson and Wesson (1992)                              |         |          |
| -          | Inglewood Oil Field, California | USA          | 3,7           | Secondary recovery                      | Nicholson and Wesson (1992)                              | 34 N    | 118,38 W |
| -          | Kermit Field, Texas             | USA          | 4             | Secondary recovery                      | Nicholson and Wesson (1990)                              | 31,85 N | 103,04 W |
| -          | Keystone I Field, Texas         | USA          | 3,5           | Secondary recovery                      | Nicholson and Wesson                                     | 31,88 N | 102,96 W |

| Date       | Site/Ville/Etat                    | Pays        | Max Magnitude | Technologie à l'origine de la sismicité | Référence                   | Lat °   | Lon °    |
|------------|------------------------------------|-------------|---------------|---|-----------------------------|---------|----------|
|            |                                    |             |               |   | (1990)                      |         |          |
| -          | Keystone II Field, Texas           | USA         | 3,5           | Secondary recovery                      | Nicholson and Wesson (1990) | 31,88 N | 102,96 W |
|            | Lambert Field, Texas               | USA         | 3,4           | Secondary recovery                      | Nicholson and Wesson (1992) |         |          |
| -          | Love County, Oklahoma <sup>9</sup> | USA         | 2,8           | Secondary recovery                      | Nicholson and Wesson (1990) | 33,98 N | 97,22 W  |
| -          | Monahans, Texas                    | USA         | 3             | Secondary recovery                      | Nicholson and Wesson (1992) | 31,59 N | 102,89 W |
| -          | Northern Panhandle, Texas          | USA         | 3,4           | Secondary recovery                      | Nicholson and Wesson (1990) | 35,66 N | 101,39 W |
| -          | Rangely, Colorado                  | USA         | 3,1           | Secondary recovery                      | Nicholson and Wesson (1990) | 40,09 N | 108,80 W |
| -          | Renqiu oil field                   | China       | 4,5           | Secondary recovery                      | Genmo et al. (1995)         | 38,67 N | 116,10 E |
| -          | Romashkino, Tartarstan             | Russia      | 4             | Secondary recovery                      | Adushkin et al. (2000)      | 55,18 N | 50,73 E  |
| -          | Shandong                           | China       | 2,4           | Secondary recovery                      | Shouzhong et al. (1987)     | 36,67 N | 117,02 E |
| -          | Snipe Lake                         | Canada      | 5,1           | Secondary recovery                      | Nicholson and Wesson (1992) | 51,16 N | 108,64 W |
|            | Southern Alabama                   | USA         | 4,9           | Secondary recovery                      | Gomberg and Wolf (1999)     |         |          |
| -          | Ward-Estes Field, Texas            | USA         | 3,5           | Secondary recovery                      | Nicholson and Wesson (1992) | 31,56 N | 103,14 W |
| -          | Ward-South Field, Texas            | USA         | 3             | Secondary recovery                      | Nicholson and Wesson (1992) | 31,56 N | 103,14 W |
| 11/1964    | Akosombo                           | Ghana       | 5,3           | Barrages                                | Guha (2000)                 | 7,5 N   | 00,25 E  |
| 14/11/1981 | Aswan                              | Egypt       | 5,6           | Barrages                                | Guha (2000)                 | 23,95 N | 32,86 E  |
| 03/07/1967 | Bajina Basta                       | Yugoslavia  | 4,8           | Barrages                                | Guha (2000)                 | 43,97 N | 19,37 E  |
| 07/07/1966 | Benmore                            | New Zealand | 5             | Barrages                                | Guha (2000)                 | 44,40 S | 170,23 E |
| 15/09/1983 | Bhatsa                             | India       | 4,8           | Barrages                                | Guha (2000)                 | 19,51 N | 73,42 E  |

| Date       | Site/Ville/Etat   | Pays              | Max Magnitude | Technologie à l'origine de la sismicité | Référence       | Lat °   | Lon °    |
|------------|-------------------|-------------------|---------------|---|-----------------|---------|----------|
| 23/01/1972 | Cajuru, Brazil    | Brazil            | 4,7           | Barrages                                | Guha (2000)     | 20,30 S | 44,70 W  |
| 15/04/1964 | Camarillas, Spain | Spain             | 4,1           | Barrages                                | Guha (2000)     | 38,36 N | 01,65 W  |
| 09/06/1962 | Canelles, Spain   | Spain             | 4,7           | Barrages                                | Guha (2000)     | 42,03 N | 00,65 E  |
| 15/03/1977 | Charvak           | Uzbekistan        | 4             | Barrages                                | Guha (2000)     | -       | -        |
| 02/08/1974 | Clark Hill        | USA               | 4,3           | Barrages                                | Guha (2000)     | 33,85 N | 82,38 W  |
| 06/06/1962 | Coyote Valley     | USA               | 5,2           | Barrages                                | Guha (2000)     | 39,23 N | 123,17 W |
| 29/11/1973 | Danjiangkou       | China             | 4,7           | Barrages                                | Guha (2000)     | 32,69 N | 111,08 E |
| 14/04/1954 | Dents du Midi     | Switzerland       | 3,5           | Barrages                                | Grünthal (2013) | 46.18 N | 6.97 E   |
|            | Dhamni            | India             | 3,8           | Barrages                                | Guha (2000)     |         |          |
| 18/05/1959 | Eucumbene         | Australia         | 5             | Barrages                                | Guha (2000)     | 36,08 S | 148,72 E |
| 11/08/1963 | Foziling          | China             | 4,5           | Barrages                                | Guha (2000)     | -       | -        |
| 05/08/1963 | Grandval          | France            | unknown6      | Barrages                                | Gupta (2002)    | 44,97 N | 03,10 E  |
| 04/05/1939 | Hoover            | USA               | 5             | Barrages                                | Guha (2000)     | 36,0 N  | 114,8 W  |
| 18/03/1962 | Hsinfengchiang    | China             | 6,1           | Barrages                                | Guha (2000)     | 23,78 N | 114,58 E |
| -          | Idukki            | India             | 3,5           | Barrages                                | Guha (2000)     | 9,84 N  | 76,98 E  |
| 12/1979    | Ingouri           | Caucasus (Russia) | 4,4           | Barrages                                | Guha (2000)     | -       | -        |
| 13/05/1978 | ItezHITEZHI       | Zambia            | 4,2           | Barrages                                | Guha (2000)     | 15,79 S | 25,07 E  |
| 23/09/1963 | Kariba            | Zambia            | 6,2           | Barrages                                | Guha (2000)     | 16,93 S | 27,93 E  |
| -          | Kastraki          | Greece            | 4,6           | Barrages                                | Guha (2000)     | 38,67 N | 21,70 E  |
| -          | Kerr              | USA               | 4,9           | Barrages                                | Guha (2000)     | 47,70 N | 114,17 W |
| 13/04/1969 | Kinnersani        | India             | 5,3           | Barrages                                | Guha (2000)     | 17,68 N | 80,67 E  |
| 10/12/1967 | Koyna             | India             | 6,5           | Barrages                                | Gupta (1983)    | 17,62 N | 73,76 E  |
| 05/02/1966 | Kremasta          | Greece            | 6,3           | Barrages                                | Guha (2000)     | 38,90 N | 21,53 E  |
| 19/08/1961 | Kurobe            | Japan             | 4,9           | Barrages                                | Guha (2000)     | 36,53 N | 137,65 E |
| 23/10/1975 | Manicouagan       | Canada            | 4,1           | Barrages                                | Guha (2000)     | 50,11 N | 68,65 W  |
| 20/07/1938 | Marathon          | Greece            | 5,7           | Barrages                                | Guha (2000)     | 38,18 N | 23,90 E  |

| Date       | Site/Ville/Etat            | Pays        | Max Magnitude | Technologie à l'origine de la sismicité | Référence   | Lat °   | Lon °    |
|------------|----------------------------|-------------|---------------|---|---|---------|----------|
| 05/01/1974 | Mica, Canada               | Canada      | 4,1           | Barrages                                | Guha (2000)                                       | 52,07 N | 118,30 W |
|            | Montecillo, South Carolina | USA         | 2,8           | Barrages                                | Guha (2000)                                       |         |          |
| 25/04/1963 | Monteynard                 | France      | 4,9           | Barrages                                | Guha (2000)                                       | 44,90 N | 05,70 E  |
| 06/11/1972 | Nurek                      | Tadjikstan  | 4,6           | Barrages                                | Guha (2000)                                       | 38,42 N | 62,27 E  |
| 01/08/1975 | Oroville, California       | USA         | 5,7           | Barrages                                | Guha (2000)                                       | 39,53 N | 121,43 W |
| 07/04/1966 | Piastra                    | Italy       | 4,4           | Barrages                                | Guha (2000)                                       | 44,21 N | 07,21 E  |
| 13/01/1960 | Pieve de Cadore            | Italy       | 4,3           | Barrages                                | Guha (2000)                                       | 46,45 N | 12,41 E  |
| 24/02/1974 | Porto Colombia             | Brazil      | 5,1           | Barrages                                | Guha (2000)                                       | 20,12 S | 48,35 W  |
| 01/01/1954 | Salanfe                    | Switzerland | 3,5           | Barrages                                | Grünthal (2013)                                   | 46.18 N | 6.95 E   |
| 02/08/1968 | Sefia Rud                  | Iran        | 4,7           | Barrages                                | Guha (2000)                                       | 36,72 N | 49,37 E  |
| 02/12/1974 | Shenwo                     | China       | 4,8           | Barrages                                | Guha (2000)                                       | -       | -        |
|            | Sriramsagar                | India       | 3,2           | Barrages                                | Guha (2000)                                       |         |          |
| 09/10/1963 | Vajont                     | Italy       | 3             | Barrages                                | Guha (2000)                                       | 46,15 N | 12,70 E  |
| 09/03/1973 | Varragamba                 | Australia   | 5,4           | Barrages                                | Guha (2000)                                       | 33,97 S | 150,42 E |
| 21/06/1971 | Vouglans                   | France      | 4,4           | Barrages                                | Guha (2000)                                       | 46,35 N | 05,70 E  |
| 12/05/2008 | Wenchuan                   | China       | 7,9           | Barrages                                | Huang et al. (2008)                               | 30.99 N | 103.36 E |
| 20040918   | Itoiz_Dam                  | Spain       | 4,5           | Barrages                                | Ruizetal2006Tectonophys<br>ics+IGNESP_Catalogu    | 42,8508 | -1,4506  |
| 19730503   | Almendra_Dam               | Spain       | 4             | Barrages                                | IGN-ES  | 41      | -6,4     |
| 1985XXXX   | Ridracoli                  | Italy       | 4,1           | Barrages                                | Klose2012JSeismol,aproxi<br>mated_to_dam_location | 43,9    | 11,8     |
| 1986XXXX   | Fierza-Komani              | Albania     | 4,2           | Barrages                                | Klose2012JSeismol,aproxi<br>mated_to_dam_location | 42,1    | 20,3     |
| 20000423   | Tous_New_Dam               | Spain       | 3,5           | Barrages                                | Torcaletal2005GJ                                  | 39,239  | -0,418   |
| 1987       | Ashtabula, Ohio            | USA         | 3,6           | Injection d'eau usées                   | Armbruster et al. (1987)                          | 41,86 N | 80,79 W  |
| 16/05/2009 | Dallas Fort Worth, Texas   | USA         | 3,3           | Injection d'eau usées                   | Frohlich et al. (2010)                            | 32,79 N | 97,02 W  |
| 09/08/1967 | Denver, Colorado3          | USA         | 4,8           | Injection d'eau usées                   | Hermann et al. (1981);                            | 39,81 N | 104,87 W |

| Date       | Site/Ville/Etat                          | Pays    | Max Magnitude | Technologie à l'origine de la sismicité | Référence                   | Lat °     | Lon °      |
|------------|--|---------|---------------|---|-----------------------------|-----------|------------|
|            |  |         |               |   | Ellsworth (2013)            |           |            |
| -          | El Dorado, Arkansas                      | USA     | 3             | Injection d'eau usées                   | Cox (1991)                  | 33,21 N   | 92,67 W    |
|            | Guy and Greenbrier, Arkansas             | USA     | 4,7           | Injection d'eau usées                   | Horton (2012)               |           |            |
| 25/01/1970 | Matsushiro                               | Japan   | 2,8           | Injection d'eau usées                   | Ohtake (1974)               | 36,55 N   | 138,22 E   |
|            | Paradise Valley, Colorado                | USA     | 0,8           | Injection d'eau usées                   | Nicholson and Wesson (1992) |           |            |
| 27/05/2000 | Paradox Valley, Colorado                 | USA     | 4,3           | Injection d'eau usées                   | Ake et al. (2005)           | 38,32 N   | 108,86 W   |
| 24/01/2013 | Paradox Valley 2                         | USA     | 4,4           | Injection d'eau usées                   | Block et al. (2014)         | 38.3209 N | 108.9841 W |
| -          | Perry, Ohio                              | USA     | 2,7           | Injection d'eau usées                   | Nicholson and Wesson (1992) | 41,76 N   | 81,14 W    |
| -          | Rocky Mountain Arsenal, Denver, Colorado | USA     | 5,5           | Injection d'eau usées                   | Guha (2000)                 | 39,81 N   | 104,87 W   |
|            | Tomahawk Field, New Mexico               | USA     | Unknown11     | Injection d'eau usées                   | Nicholson and Wesson (1992) |           |            |
| 08/2000    | Vogtland                                 | Germany |               | Injection d'eau usées                   | Baisch et al. (2002)        | 49,81 N   | 12,12 E    |
|            | Southwest of Eisenbach                   | Germany | 5,8           | Autre                                   | Giardini (2011)             |           |            |
| -          | Belchalow                                | Poland  | 4,6           | Autre                                   | Giardini (2011)             | 51,37 N   | 19,36 E    |
| -          | Cleveland, Ohio2                         | USA     | 3             | Autre                                   | Nicholson and Wesson (1992) | 41,5 N    | 81,69 W    |
| -          | Dale, New York                           | USA     | 1             | Autre                                   | Nicholson and Wesson (1990) | 42,82 N   | 78,17 W    |
|            | Harz                                     | Germany | 3,5           | Autre                                   | Giardini (2011)             |           |            |
|            | LGDD                                     | Russia  | 4,2           | Autre                                   | Giardini (2011)             |           |            |
|            | Upper Silesian                           | Poland  | 4,45          | Other                                   | Giardini (2011)             |           |            |
| -          | Attica, New York                         | USA     | 5,2           | Exploitation par dissolution            | Nicholson and Wesson (1992) | 42,87 N   | 78,28 W    |

| <b>Date</b> | <b>Site/Ville/Etat</b> | <b>Pays</b> | <b>Max Magnitude</b> | <b>Technologie à l'origine de la sismicité</b> | <b>Référence</b>      | <b>Lat °</b>  | <b>Lon °</b> |
|-------------|------------------------|-------------|----------------------|--|-----------------------|---------------|--------------|
| 2008        | Cerville-Buissoncourt  | France      | 0,9                  | Exploitation par dissolution                   | Kinscher 2015 TZ      | 48,67667<br>6 | 6,322583     |
|             | Lorca                  | Spain       | 5,1                  | Extraction d'eau                               | Gonzalez et al., 2012 | 37,6946       | -1,6756      |
|             | Sleipner               | Norway      | 2,5                  | Stockage de CO2                                | Evans et al., 2012    | 58,44         | 1,66         |
| 01/10/2013  | Castor Project         | Spain       | 4,3                  | Stockage de gaz                                | Cesca et al. 2013     | 40,4          | 0,722        |
| 02/10/2013  | Castor Project         | Spain       | 4,3                  | Stockage de gaz                                | Cesca et al. 2014     | 40,4          | 0,722        |

- Adushkin, V.V., V.N. Rodionov, S. Turuntnev, and A.E. Yodin. 2000. Seismicity in the oil field. *Oilfield Review* Summer:2-17.
- Ake, J., K. Mahrer, D. O'Connell, and L. Block. 2005. Deep-injection and closely monitored induced seismicity at Paradox Valley, Colorado. *Bulletin of the Seismological Society of America* 95(2):664-683.
- Armbruster, J.G., L. Seeber, and K. Evans. 1987. The July 1987 Ashtabula earthquake (mb) 3.6 sequence in northeastern Ohio and a deep fluid injection well. Abstract. *Seismological Research Letters* 58(4):91.
- Baisch, S., M. Bohnhoff, L. Ceranna, Y. Tu, and H.-P. Harjes. 2002. Probing the crust to 9-km depth: Fluid-injection experiments and induced seismicity at the KTB superdeep drilling hole, Germany. *Bulletin of the Seismological Society of America* 92(6):2369-2380.
- Block, L. V., Wood, C. K., Yeck, W. L., and King, V. M., 2014, The 24 January 2013 ML 4.4 Earthquake near Paradox, Colorado, and Its Relation to Deep Well Injection: *Seismological Research Letters*, v. 85, no. 3, p. 609-624.
- Bommer, J.J., S. Oates, J.M. Cepeda, C. Lindholm, J. Bird, R. Torres, G. Marroquin, and J. Rivas. 2006. Control of hazard due to seismicity induced by a hot fractured rock geothermal project. *Engineering Geology* 83:287-306.
- Bou-Rabee, F. 1994. Earthquake recurrence in Kuwait induced by oil and gas extraction. *Journal of Petroleum Geology* 17(4):473-480.
- Chabora, E., E. Zemach, P. Spielman, P. Drakos, S. Hickman, S. Lutz, K. Boyle, A. Falconer, A. Robertson-Tait, N.C. Davatzes, P. Rose, E. Majer, and S. Jarpe. 2012. Hydraulic Stimulation of Well 27-15, Desert Peak Geothermal Field, Nevada, USA. *Proceedings of the Thirty-Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, CA, January 30-February 1.*
- Cox, R.T. 1991. Possible triggering of earthquakes by underground waste disposal in the El Dorado, Arkansas area. *Seismological Research Letters* 62(2):113-122.
- Davis, S.D., and W.D. Pennington. 1989. Induced seismic deformation in the Cogdell oil field of West Texas. *Bulletin of the Seismological Society of America* 79(5):1477-1494.
- Davis, S.D., P. Nyffenegger, and C. Frohlich. 1995. The 9 April 1993 earthquake in south-central Texas: Was it induced by fluid withdrawal? *Bulletin of the Seismological Society of America* 85(6):1888-1895.
- de Pater, C.J, and S. Baisch. 2011. Geomechanical Study of Bowland Shale Seismicity, Synthesis Report. Cuadrilla Resources Ltd. Available at [http://www.cuadrillaresources.com/wp-content/uploads/2012/02/Geomechanical-Study-of-Bowland-Shale-Seismicity\\_02-11-11.pdf](http://www.cuadrillaresources.com/wp-content/uploads/2012/02/Geomechanical-Study-of-Bowland-Shale-Seismicity_02-11-11.pdf) (accessed July 12, 2012).
- Doser, D.I., M.R. Baker, M. Luo, P. Marroquin, L. Ballesteros, J. Kingwell, H.L. Diaz, and G. Kaip. 1992. The not so simple relationship between seismicity and oil production in the Permian Basin, West Texas. *Pure and Applied Geophysics* 139(3/4):481-506.
- Ellsworth, W. L. 2013. Injection-induced earthquakes. *Science*, 341(6142), 1225942.
- Emmermann, R., & Lauterjung, J. 1997. The German continental deep drilling program KTB: overview and major results. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012), 102(B8), 18179-18201.
- Evans, K.F., A. Zappone, T. Kraft, N. Deichmann, and F. Moia. 2012. A survey of the induced seismic responses to fluid injection in geothermal and CO2 reservoirs in Europe. *Geothermics* 41:30-54.
- Foulger, G.R., B.R. Julian, and F.C. Monastero. 2008. Seismic monitoring of EGS tests at the Coso geothermal area, California, using accurate MEQ locations and full moment tensors. *Proceedings of the Thirty-Third Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, CA, January 28-30.*

- Frohlich, C., C. Hayward, B. Stump, and E. Potter. 2010. The Dallas-Fort Worth earthquake sequence: October 2008-May 2009. *Bulletin of the Seismological Society of America* 101(1):327-340.
- Genmo, Z., C. Huaran, M. Shuqin, and Z. Deyuan. 1995. Research on earthquakes induced by water injection in China. *Pure and Applied Geophysics* 145(1):59-68.
- Giardini, D. 2011. Induced Seismicity in Deep Heat Mining: Lessons from Switzerland and Europe. Presentation to the National Research Council Committee on Induced Seismicity Potential in Energy Production Technologies, Washington, DC, April 26.
- Gomberg, J., and L. Wolf. 1999. Possible cause for an improbable earthquake: The 1997 Mw 4.9 southern Alabama earthquake and hydrocarbon recovery. *Geology* 27(4):367-370.
- Grasso, J.-R. 1992. Mechanics of seismic instabilities induced by the recovery of hydrocarbons. *Pure and Applied Geophysics* 139(3/4):506-534.
- Grasso, J.-R., and G. Wittlinger. 1990. Ten years of seismic monitoring over a gas field. *Bulletin of the Seismological Society of America* 80:2450-2473.
- Grünthal, G. 2014. Induced seismicity related to geothermal projects versus natural tectonic earthquakes and other types of induced seismic events in Central Europe. *Geothermics*, 52, 22-35.
- Guha, S.K. 2000. *Induced Earthquakes*. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Gupta, H. K., 1983, Induced seismicity hazard mitigation through water level manipulation at Koyna, India: A suggestion: *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 73, no. 2, p. 679-682.
- Gonzalez, P. J., Tiampo, K. F., Palano, M., Cannavo, F., and Fernandez, J., 2012, The 2011 Lorca earthquake slip distribution controlled by groundwater crustal unloading: *Nature Geosci*, v. 5, no. 11, p. 821-825.
- Healy, J.H., W.W. Rubey, D.T. Griggs, and C.B. Raleigh. 1968. The Denver earthquakes. *Science* 161:1301-1310.
- Herrmann, R.B., S.-K. Park, and C.-Y. Wang. 1981. The Denver earthquakes of 1967-1968. *Bulletin of the Seismological Society of America* 71(3):731-745.
- Holland, A. 2011. Examination of Possibly Induced Seismicity from Hydraulic Fracturing in the Eola Field, Garvin County, Oklahoma. Oklahoma Geological Survey Open-File Report OF1-2011. Available at [www.ogs.ou.edu/pubsscanned/openfile/OF1\\_2011.pdf](http://www.ogs.ou.edu/pubsscanned/openfile/OF1_2011.pdf) (accessed July 12, 2012).
- Horner, R.B., J.E. Barclay, and J.M. MacRae. 1994. Earthquakes and hydrocarbon production in the Fort St. John area of northeastern British Columbia. *Canadian Journal of Exploration Geophysics* 30(1):39-50.
- Horton, S. 2012. Disposal of hydrofracking-waste fluid by injection into subsurface aquifers triggers earthquake swarm in central Arkansas with potential for damaging earthquake. *Seismological Research Letters* 83(2):250-260.
- Howe, A.M., C.T. Hayward, B.W. Stump, and C. Frohlich. 2010. Analysis of recent earthquakes in Cleburne, Texas (Abstract). *Seismological Research Letters* 81:379.
- Huang Y, Wu J-P, Zhang T-Z, Zhang D-N (2008). Relocation of the M 8.0 Wenchuan earthquake and its aftershock sequence. *Sci China Ser D Earth Sci* 51(12):1703
- Hudyma, M.R. 2008. Analysis and interpretation of clusters of seismic events in mines. P.h.D thesis, University of Western Australia.
- Julian, B.R., G.R. Foulger, and F. Monastero. 2007. Microearthquake moment tensors from the Coso geothermal field. Proceedings, 32nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, CA, January 22-24.
- Kaieda, H., S. Shunji Sasaki, and D. Wyborn. 2010. Comparison of characteristics of micro-earthquakes observed during hydraulic stimulation operations in Ogachi, Hijiori and Cooper Basin HDR projects. Proceedings, World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, April 25-29.

- Keller, G.R., A.M. Robers, and C.D. Orr. 1987. Seismic activity in the Permian Basin area of west Texas and southeastern New Mexico, 1975-1979. *Seismological Research Letters* 58(2):63-70.
- Kouznetsov, O., V. Sidorov, S. Katz, and G. Chilingarian. 1994. Interrelationships among seismic and short-term tectonic activity, oil and gas production, and gas migration to the surface. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 13:57-63.
- Kovach, R.L. 1974. Source mechanisms for Wilmington oil field, California, subsidence earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America* 64(3):699-711.
- Kubacki, T., Koper, K. D., Pankow, K. L., and McCarter, M. K., 2014, Changes in mining-induced seismicity before and after the 2007 Crandall Canyon Mine collapse: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v. 119, no. 6, p. 4876-4889.
- Kugaenko, Y., V. Saltykov, and V. Chebrov. 2005. Seismic situation and necessity of local seismic monitoring in exploited Mutnovsky steam-hydrothermal field (southern Kamchatka, Russia). *Proceedings, World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, April 24-29.*
- Lei, Z., G. Yu, S. Ma, X. Wen, and Q. Wang. 2008. Earthquakes induced by water injection at ~3 km depth within the Rongchang gas field, Chongqing, China. *Journal of Geophysical Research* 113:B10310.
- Majer, E.L., R. Baria, M. Stark, S. Oates, J. Bommer, B. Smith, and H. Asanuma. 2007. Induced seismicity associated with enhanced geothermal systems. *Geothermics* 36(3):185-222.
- McGarr, A. 1991. On a possible connection between three major earthquakes in California and oil production. *Bulletin of the Seismological Society of America* 81(3):948-970.
- Nicholson, C., and R.L. Wesson. 1990. Earthquake Hazard Associated with Deep Well Injection—A Report to the US Environmental Protection Agency. U.S. Geological Survey Bulletin 1951, 74 pp.
- Nicholson, C., and R.L. Wesson. 1992. Triggered earthquakes and deep well activities. *Pure and Applied Geophysics* 139(3/4):562-578.
- Ohtake, M. 1974. Seismic activity induced by water injection at Matsushiro, Japan. *Journal of Physics of the Earth* 22(1):163-176.
- Pennington, W.D., S.D. Davis, S.M. Carlson, J. DuPree, and T.E. Ewing. 1986. The evolution of seismic barriers and asperities caused by the depressuring of fault planes in oil and gas fields of south Texas. *Bulletin of the Seismological Society of America* 76(4):939-948.
- Pechmann, J. C., Walter, W. R., Nava, S. J., and Arabasz, W. J., 1995, The February 3, 1995, ML 5.1 Seismic Event in the Trona Mining District of Southwestern Wyoming: *Seismological Research Letters*, v. 66, no. 3, p. 25-34.
- Rothe, G.H., and C.-Y. Lui. 1983. Possibility of induced seismicity in the vicinity of the Sleepy Hollow oil field, southwestern Nebraska. *Bulletin of the Seismological Society of America* 73(5):1357-1367.
- Shouzhong, D., Z. Huanpeng, and G. Aixiang. 1987. Rare seismic clusters induced by water injection in the Jiao well 07 in Shengli oil field. *Earthquake Research in China* 1:313.
- Smirnova, M.N. 1968. Effect of earthquakes on the oil yield of the Gudermes field (northeastern Caucasus). *Izvestiya, Earth Physics* 12:760-763.
- Sze, E.K.-M. 2005. Induced seismicity analysis for reservoir characterization at a petroleum field in Oman. Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- van Eck, T., F. Goutbeek, H. Haak, and B. Dost. 2006. Seismic hazard due to small-magnitude, shallow-source, induce earthquakes in the Netherlands. *Engineering Geology* 87(1-2):105-121.
- Wetmiller, R.J. 1986. Earthquakes near Rocky Mountain House, Alberta and their relationship to gas production facilities. *Canadian Journal of Earth Sciences* 23. 172 pp.
- Zoback, M.D., and J.C. Zinke. 2002. Production-induced normal faulting in the Valhall and Ekofisk oil fields. *Pure and Applied Geophysics* 159:403-420.

Torcal, F., Serrano, I., Havskov, J., Utrillas, J.L., and Valero, J., 2005, Induced seismicity around the Tous New Dam (Spain): *Geophysical Journal International*, v. 160, p. 144–160, doi:10.1111/j.1365-246X.2005.02459.x.



# **ANNEXE C**



|                     |                           |   |   |   |   |   |   |                                   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |
|---------------------|---------------------------|---|---|---|---|---|---|-----------------------------------|---|--|---|---|---|---|---|---|---|
| A                   | Implantation du bâtiment  | 1 | Pente générale du terrain > 40 %<br>5                                       |   | 2   | Proximité d'un changement de pente<br>$D < 2H$ du bâtiment<br>15  |   | Observations                      |   |  |   |   |   |   |   |   |   |
| B                   | Environnement du bâtiment | 1 | Bâtiments accolés : joint = 0<br>ou rempli d'un matériau<br>25              |   | 2   | Joints entre blocs adjacents<br>2 à 4 cm<br>10<br>> 4 cm<br>5     |   |                                   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |
| C                   | Type de structure         | 1 | Murs en maçonnerie de blocs<br>15   | 2 | Murs en béton non armé<br>10  | 3   | Murs en béton armé<br>5   | 4                                 | Ossature poteaux-poutres sans remplissage<br>20                     | 5  | Ossature poteaux-poutres avec remplissage<br>25     | 6   | Système mixte murs en maçonnerie et ossature<br>20  | 7 | Panneaux de façade BA préfabriqués porteurs<br>10 | 8 | Ossature BA préfabriquée porteuse<br>50 |
| D                   | Forme en plan             | 1 | Irrégulière<br>5  |   | 2   | Etlancement en plan $L/l > 4$<br>5                                |   | 3                                 | Parties saillantes ou rentrantes<br>5                               |  |   |   |   |   |   |   |   |
| E                   | Forme en élévation        | 1 | Etages en encorbellement > 2 m<br>15  | 2 | Retrait en façade > 40 %<br>20  | 3   | Planchers d'un même étage situés à des hauteurs différentes<br>10 |                                   | 4   | Présence d'un plancher lourd ou d'une toiture lourde<br>10 |   | 5   | Absence de diaphragme horizontal en toiture<br>20   |   |   |   |   |
| F                   | Contreventement           | 1 | Variation verticale croissante des rigidités<br>0 à 100<br>(voir formule 1) |   | 2   | Dissymétrie : torsion<br><b>faible : 5</b><br><b>accusée : 50</b> |   | 3                                 | Absence de contreventement dans le sens des x ou y<br>100           |  | 4   | Densité de voiles de contreventement sens x ou y<br>0 à 100<br>(voir formule 2)                         |   |   |   |   |   |
| G                   | Zones ou éléments         | 1 | Descente de charge en baionnette<br>25                                      | 2 | Présence de poteaux courts ou partiellement bridés participant au contreventement<br>50 |   | 3   | Présence de poteaux élancés<br>10 |   | 4  | Percements inserts dans les poteaux $e > d/3$<br>25 | 5   | Percements inserts dans les poutres $e > d/3$<br>10 | 6 | Percements inserts dans les nœuds $e > d/3$<br>50 |   |   |
|                     | critiques                 | 7 | Présence d'un angle de façade affaibli<br>15                                |   | 8   | Axes poteaux et poutres non concourants $e > c/2$<br>10           |   | 9                                 | Diaphragmes horizontaux avec grandes ouvertures $s > 10 \% S$<br>10 |  | 10  | Absence de chaînages encadrant les murs de contreventement en MAC<br>verticaux : 25<br>horizontaux : 75 |   |   |   |   |   |
| H                   | Divers                    | 1 | Etat de conservation du gros œuvre médiocre : 10<br>mauvais : 25            |   | 2   | Risque de chute d'éléments non structuraux<br>5                   |   | 3                                 | Façade BA préfabriquée non porteuse<br>10                           |  |   |   |   |   |   |   |   |
| Total des pénalités |                           |   |   |   |   |   |   |                                   |   |  |   |   |   |   |   |   |   |

Tableau 8 : Evaluation qualitative de l'indice de vulnérabilité K des bâtiments sur la base d'observations (d'après l'AFPS).



**INERIS**

*maîtriser le risque  
pour un développement durable*

**Institut national de l'environnement industriel et des risques**

Parc Technologique Alata  
BP 2 - 60550 Verneuil-en-Halatte

Tél. : +33 (0)3 44 55 66 77 - Fax : +33 (0)3 44 55 66 99

E-mail : [ineris@ineris.fr](mailto:ineris@ineris.fr) - Internet : <http://www.ineris.fr>