

Dans un contexte de réchauffement climatique, la question des énergies renouvelables devient cruciale. Une source prometteuse d'énergie est la géothermie. En effet, elle est disponible partout et est une source de chaleur continue, contrairement à l'éolien ou le solaire qui sont des sources intermittentes. Son avenir dépend de nombreux facteurs comme l'efficacité ou le coût. Mais un paramètre dont il est rarement question est la sécurité de celles et ceux qui habitent à proximité des sites d'exploitation. Nous nous plaçons dans le cadre de la géothermie profonde.

## POURQUOI LA GÉOTHERMIE INQUIÈTE?

Après plusieurs décennies avec un taux de sismicité très stable, les Etats-Unis connaissent depuis 2001 une augmentation significative de l'activité sismique, passant d'environ 21 séismes de magnitude  $M \geq 3$  par an à plus de 180 en 2011. L'activité humaine est suspectée d'être responsable de cette augmentation.

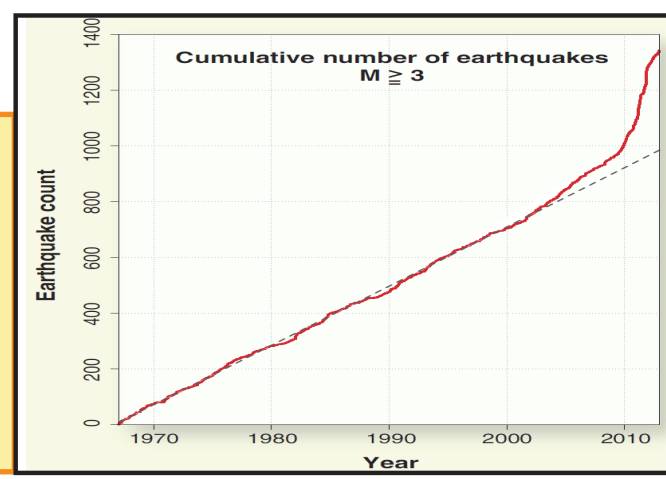


Figure 1 : Séismes de magnitude  $\geq 3$  aux Etats-Unis entre 1967 et 2012. William L. Ellsworth, 2013

## UN EXEMPLE

En 2011, un séisme de magnitude 5,6 se déclenche dans le centre de l'Oklahoma. 14 maisons ont été détruites et 2 personnes blessées. Il a très certainement été provoqué par le forage d'un puits de traitement des eaux usées à proximité.



Forage. Image libre de droits

## QU'EST-CE QUE LA SISMICITÉ INDUITE?

On parle de sismicité induite lorsque les secousses sismiques sont dues partiellement ou totalement à l'activité humaine. On peut distinguer 2 types de sismicité induite :

- **Induced Seismicity** : La plus grande partie de l'énergie libérée est d'origine anthropogénique : le changement de contrainte induit par l'activité humaine est équivalent à la contrainte de cisaillement le long de la faille.
- **Triggered Seismicity** : La plus grande partie de l'énergie libérée est d'origine naturelle.

La quantité d'énergie sismique libérée due à l'activité humaine est difficile à évaluer, toutefois on sait qu'elle peut être déclenchée de différentes manières.

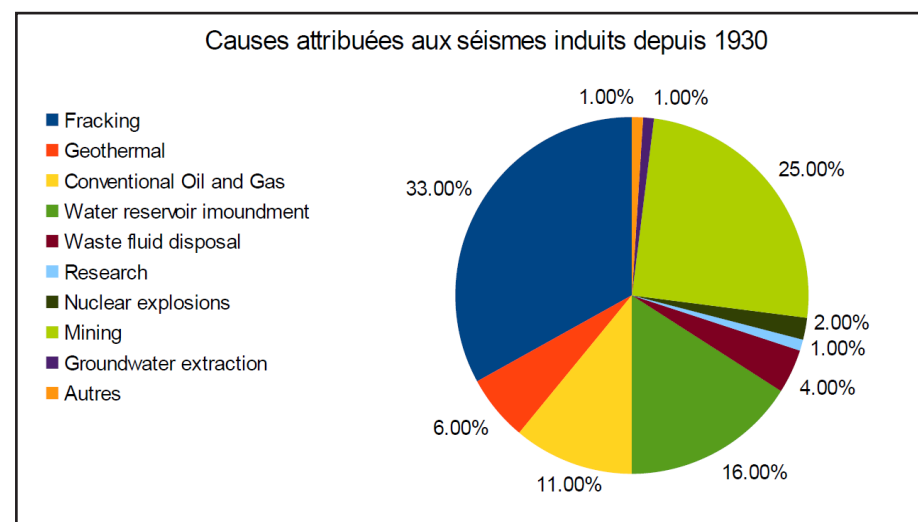


Figure 2 : Foulger, G. R., Wilson, M., Gluyas, J., Julian, B. R., & Davies, R. (2018)

La figure 2 recense tous les cas de sismicité induite depuis les années 1930. On voit ici que la majorité de la sismicité induite est due à l'activité minière et à la fracturation hydraulique. La géothermie ne représente que 6% des cas pour 64 séismes enregistrés. La fracturation et la stimulation représentent donc 40% de la sismicité induite: c'est donc de loin la plus grande cause de sismicité induite. On peut l'expliquer car ces 2 méthodes fonctionnent en faisant jouer des failles déjà existantes et qui sont des zones de fortes contraintes qui peuvent facilement bouger avec des modifications des champs de pression. Ce qu'on peut voir ici, c'est que la très grande majorité de la sismicité induite est due à l'utilisation des ressources souterraines, ce qui modifie les champs de contraintes dans le sous-sol et peut entraîner des glissements le long des failles.

La figure 3 permet de recenser le nombre de séismes en fonction de leur magnitude et de leur origine. On voit que la majorité des séismes induits ont une magnitude inférieure à 5 ce qui représente au maximum des dommages très légers. Pour la géothermie, la majorité est inférieure à une magnitude de 3, ce qui représente des séismes détectés mais non ressentis. Ainsi, la sismicité induite ne représente pas un danger immédiat pour les habitants proches des sites d'exploitation. Même si ce genre d'exploitation des sols suscite de nombreux débats, elle reste relativement sûre, mais doit être contrôlée.

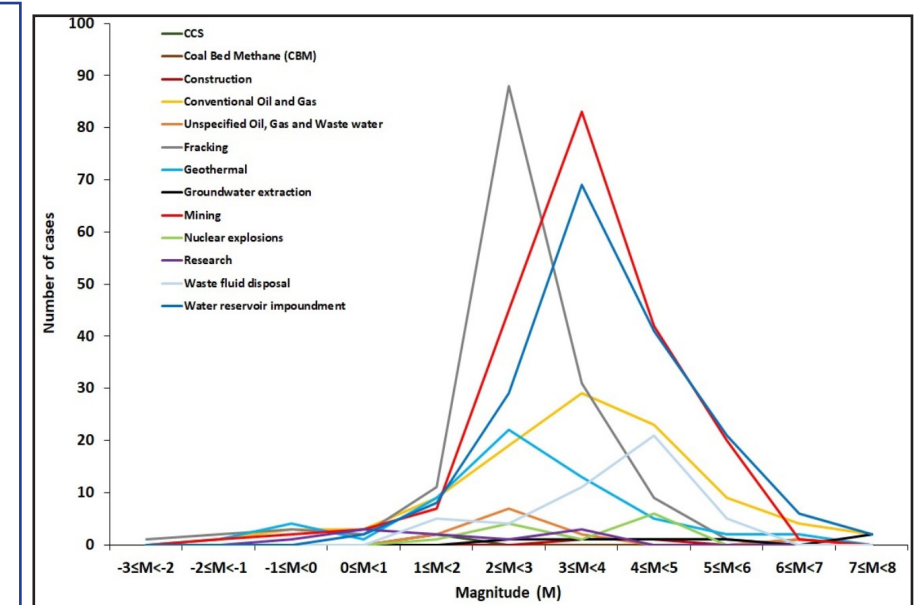


Figure 3 : Foulger, G. R., Wilson, M., Gluyas, J., Julian, B. R., & Davies, R. (2018)

## CAS RÉCENT: FONROCHE À STRASBOURG, UNE SISMICITÉ INDUITE PAR L'HOMME ?

### PRINCIPE DE LA STIMULATION HYDRAULIQUE ET DIFFUSION D'UN FLUIDE

Pour faire de la géothermie, on injecte de l'eau dans le sous-sol : elle s'infiltré dans celui-ci en particulier le long des failles. On peut cependant avoir besoin d'augmenter artificiellement la perméabilité des roches ; par exemple lorsqu'on fait de la géothermie à grande profondeur, où la roche est plus compacte. C'est ce que permet la stimulation hydraulique : en injectant de l'eau à haute pression dans le sous-sol, on peut agrandir les failles déjà existantes (voire en créer de nouvelles, lorsqu'on fait de la fracturation hydraulique). L'eau injectée occupe donc ce réseau de faille et diffuse dans la roche : la pression du fluide dans la roche varie selon l'équation de diffusion suivante :

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \text{div}(D \nabla P)$$

où P est la pression du fluide;  
D le coefficient de diffusivité.

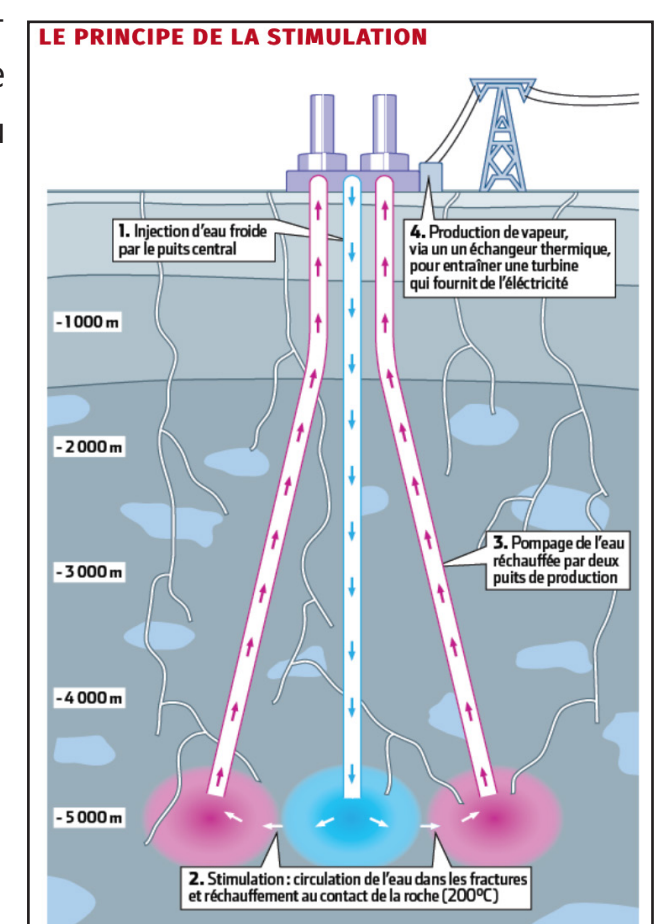
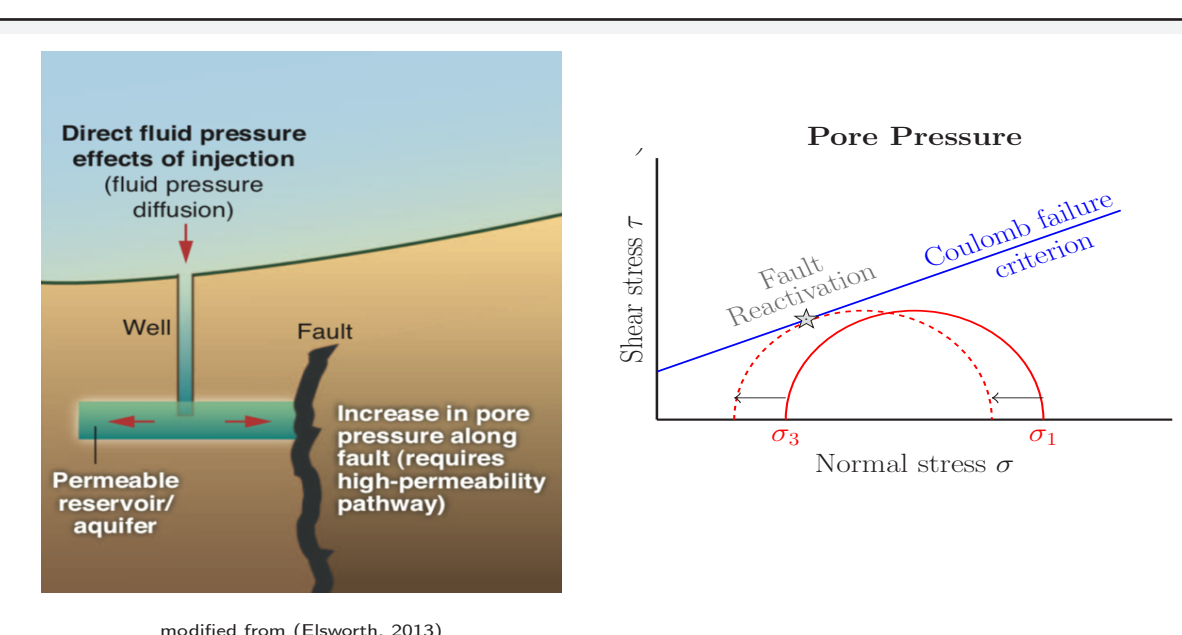


Figure 4 : Schéma représentant la stimulation hydraulique

### SISMICITÉ INDUITE EN FRANCE : LE CAS FONROCHE GÉOTHERMIE

Un séisme de magnitude 3,1, suivi d'un deuxième de magnitude 2,6 ont eu lieu le 13 Novembre 2019, à Strasbourg. Cette activité sismique a vite été liée à la société Fonroche, qui exploite un site de géothermie profonde à proximité. Ce lien de causalité a cependant été entièrement rejeté par M. Soulé, Directeur Général de Fonroche Géothermie, qui affirme que l'épicentre des séismes se situait trop loin de leur exploitation (5 km) pour qu'il puisse être mis en cause. De plus, M. Soulé explique que l'injection d'eau sous-pression avait cessé le 9 novembre, bien avant les séismes, preuve selon lui de la non-culpabilité de Fonroche.



### LIEN ENTRE PRESSION DU FLUIDE DANS LA ROCHE ET SISMICITÉ INDUITE

Un séisme est un glissement instable des roches le long d'une faille préexistante. Or, avec la stimulation hydraulique, on injecte de l'eau à haute pression le long de failles déjà présentes. On augmente donc la pression du fluide au niveau des failles. La contrainte normale effective  $\sigma_{eff} = \sigma_n - \alpha P_f$  diminue lorsque la pression du fluide augmente. D'après la loi de Mohr-Coulomb, un critère de rupture, si cette contrainte atteint un seuil de rupture, il y a un glissement des roches le long de la faille, c'est-à-dire un séisme. Cette loi est illustrée par le schéma à gauche (figure 5). Une augmentation de la pression du fluide déplace le demi-cercle rouge vers la gauche. Si ce demi-cercle coupe la droite bleue, il y a un séisme. On comprend donc que la stimulation hydraulique, peut induire (au moins en partie) des séismes. De plus, cette sismicité induite a un lien direct avec la pression du fluide injecté, c'est pourquoi nous nous sommes intéressés à l'évolution de la pression dans le milieu, en fonction du temps. Dans un cas simple, cette évolution est donnée directement par l'équation de diffusion définie plus haut :

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \text{div}(D \nabla P)$$

### Résolution numérique de l'équation de diffusion

#### Equation de diffusion:

Afin de déterminer l'évolution de la pression du fluide au cours du temps autour du puits d'injection, nous nous sommes limités à un modèle unidimensionnel. L'équation de diffusion devient :

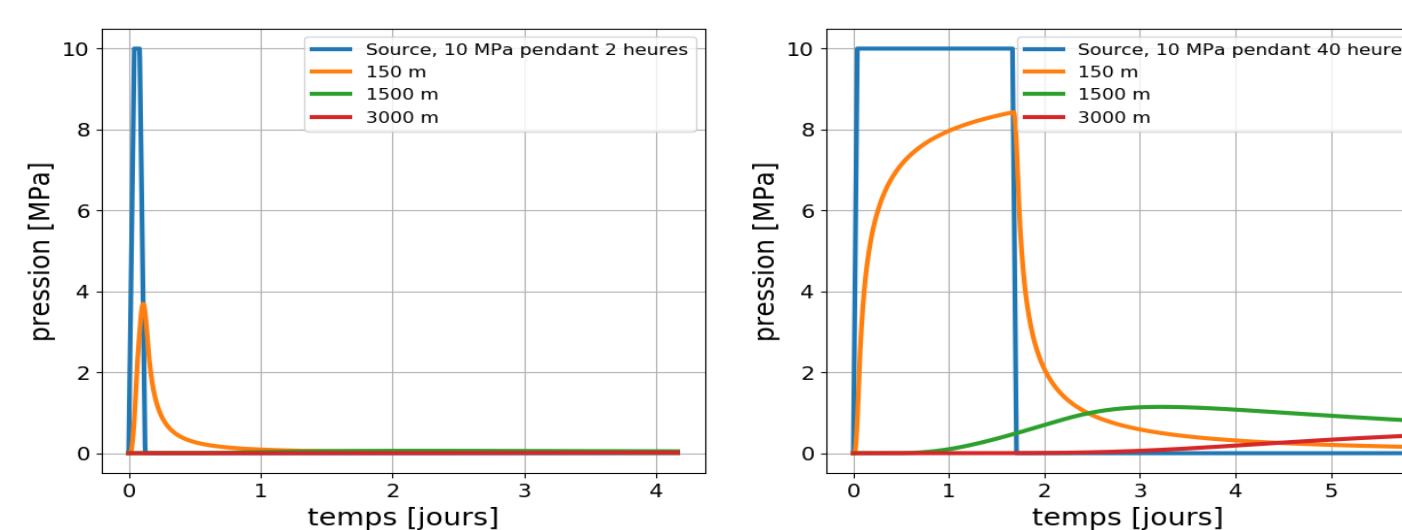
$$\frac{\partial p}{\partial t} = D \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \text{ avec } \begin{cases} p(x_{source}, t) = p_s(t) \\ \frac{\partial p}{\partial x}(x_{bord}) = 0 \end{cases}$$

#### Hypothèses :

- La pression à la source est un palier constant à 10 MPa pendant un nombre d'heures d, avec des rampes croissantes et décroissantes.
- Le coefficient de diffusion est isotrope et constant.
- Les aspects mécaniques intervenant dans la diffusion ne sont pas pris en compte. Seuls les aspects hydrauliques sont modélisés.

#### Résultats :

Diffusion de la pression à plusieurs distances du puits d'injection



La durée d'injection est un paramètre clef. Si cette durée est suffisamment grande, il est possible d'obtenir une variation de pression > 0.5 MPa à 3 km de distance et 5 jours après l'arrêt de l'injection."

#### Limites du modèle:

- Le modèle 1D entraîne une surestimation de la pression.
- Le coefficient de diffusion D n'est en réalité pas isotrope : il prend de très grandes valeurs au niveau des failles et dépend globalement du type de roches traversées.
- Les contraintes mécaniques préexistantes sont totalement ignorées ; or elles conditionnent la diffusion du fluide et le déclenchement d'un séisme selon leur orientation, leur force, etc.

## MESURES PRÉVENTIVES -- CONCLUSION

Le « Traffic Light System » est aujourd'hui le système le plus utilisé pour contrôler la sismicité induite. Il a fait ses preuves au Royaume-Uni, toutefois il est toujours sujet à débat comme à Bâle où malgré les moyens de contrôles le puits de forage a été fermé en 2011. Il y avait eu à l'époque une série de plusieurs séismes de magnitude inférieure à 3, ce qui avait décidé les politiques d'arrêter le projet de géothermie, (qui devait alimenter 2700 ménages en chauffage et 10000 en électricité), afin de répondre à l'inquiétude des riverains. Il existe également des méthodes prédictives pour limiter les magnitudes des séismes induits. (figure 4)

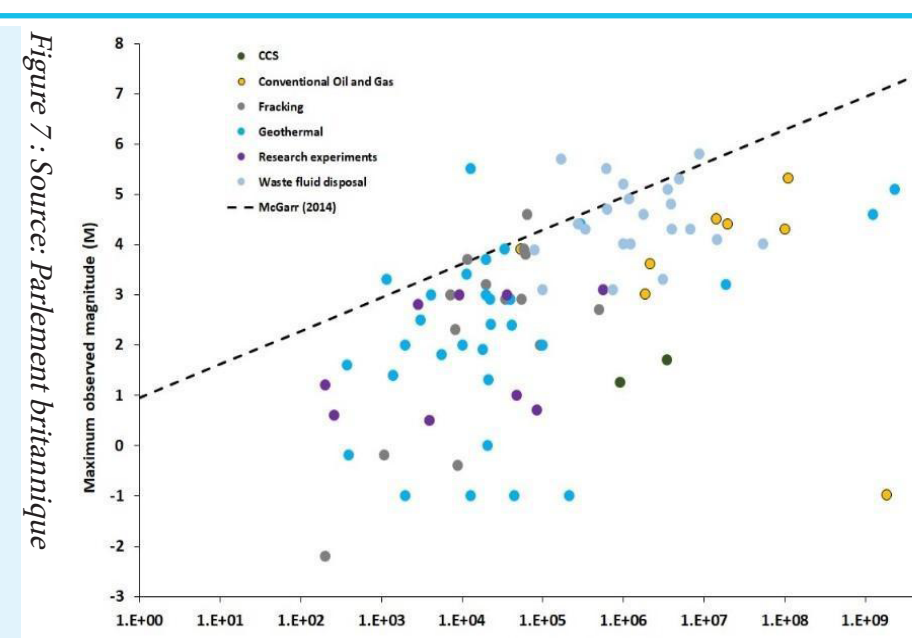
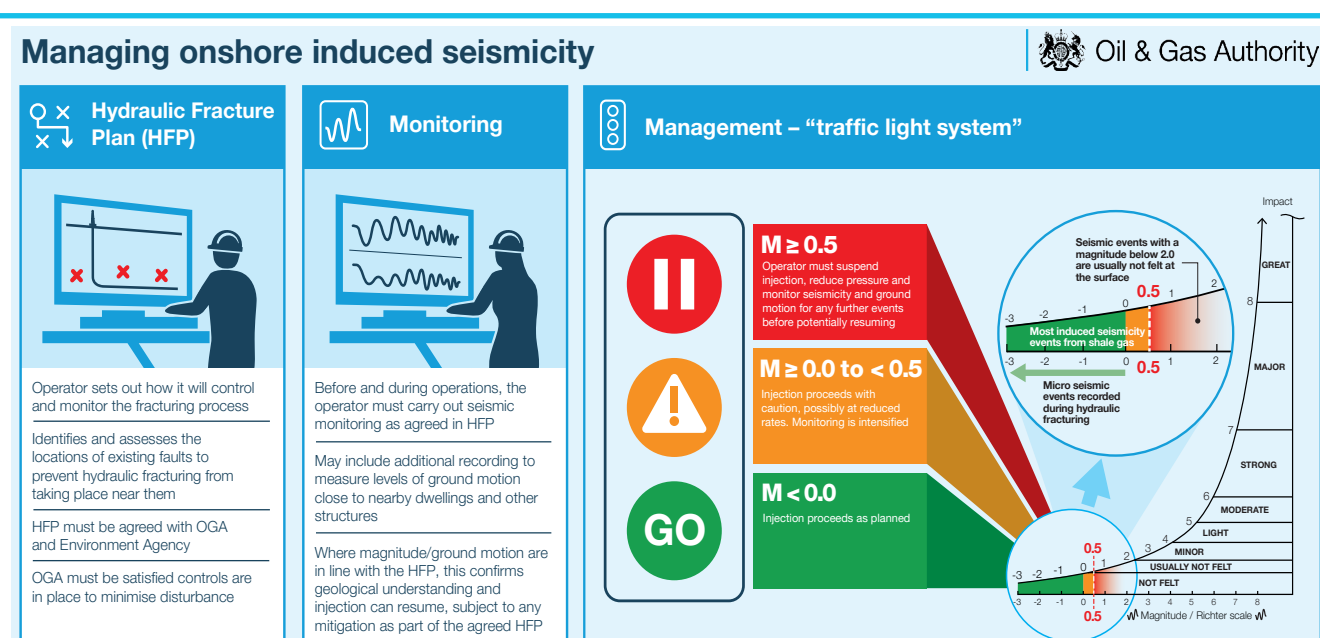


Figure 7 : Source: Pétroleur britannique

McGarr propose une relation affine entre le volume injecté en sous-sol et la magnitude maximale possible des séismes induits. On remarque que même si dans la majorité des cas réels cette théorie est confirmée, elle ne peut pas s'appliquer pour tous comme on le voit sur le graphe. Ainsi, la sismicité induite reste compliquée à détecter et à prouver car on ne peut jamais être sûr de ce qui déclenche un séisme. La sismicité induite provoque des séismes de faibles magnitudes et généralement pas ressentis. Le danger de ces exploitations n'est pas immédiat et on peut penser que ces fermetures d'usines sont surtout une réponse à la peur des populations. Ainsi le développement de la géothermie passera par un contrôle plus important.

BIBLIOGRAPHIE : <https://science.sciencemag.org/content/341/6142/1225942> : Injection-Induced Earthquakes - William L. Ellsworth <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/journal/21699356> : Journal of Geophysical Research

[https://en.wikipedia.org/wiki/Induced\\_seismicity](https://en.wikipedia.org/wiki/Induced_seismicity) Induced earthquakes | induced earthquakes. (s. d.). <http://inducedearthquakes.org/> Foulger, G. R., Wilson, M., Gluyas, J., Julian, B. R., & Davies, R. (2018). Global review of human-induced earthquakes. Earth-Science Reviews, 178, 438-514. McGarr, A. (2014). Maximum magnitude earthquakes induced by fluid injection, Jour-

nal of Geophysical Research : Solid Earth, 119, 1008-1019. What is induced seismicity? | esg solutions : A spectris company. (s. d.). <https://www.esgsolutions.com/technical-resources/microseismic-knowledgebase/what-is-induced-seismicity>

