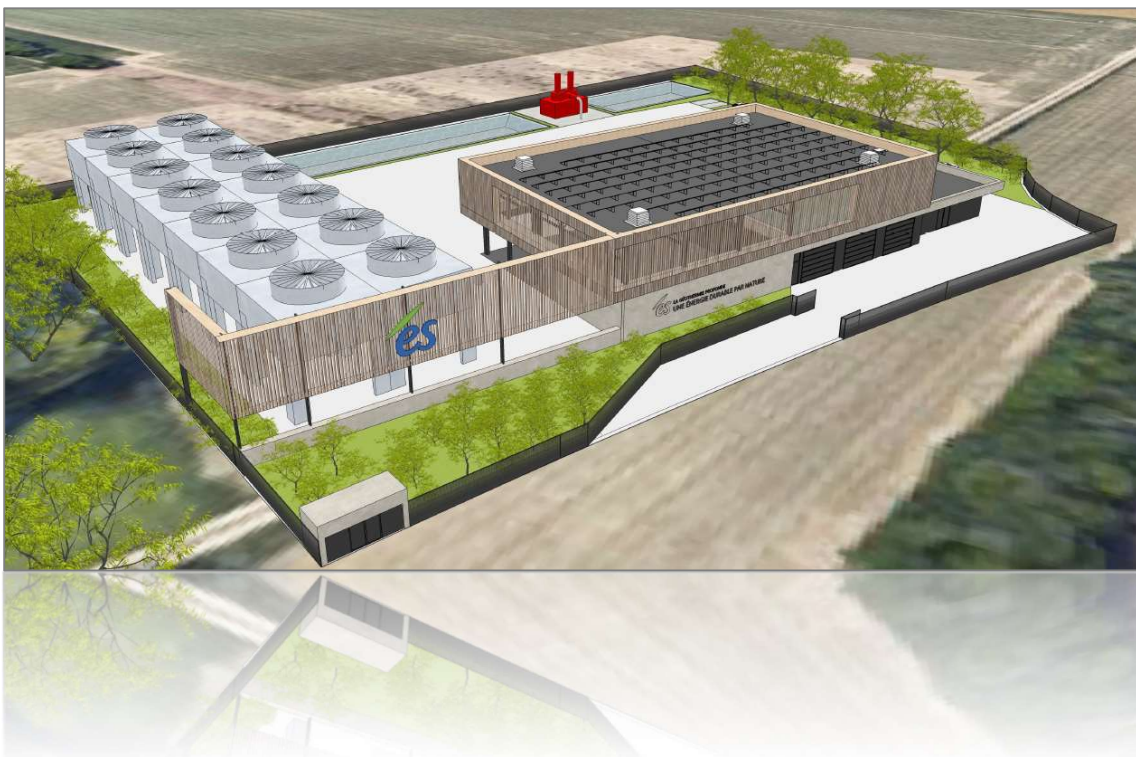


# ANNEXE ETUDE DE DANGER

## TRAITANT DU RISQUE SISMOLOGIQUE

### DAOTM RITTERSHOFFEN

NOVEMBRE 2024



*Les informations, quelle que soit leur nature et leur forme, contenues dans ce document et ses annexes sont la propriété des sociétés du Groupe ÉS.*

*Toute reproduction, modification ou utilisation de tout ou partie de son contenu, sans l'autorisation écrite d'Électricité de Strasbourg S.A, est strictement interdite*

#### **Électricité de Strasbourg SA**

S.A. au capital de 71 693 860 Euros  
26, boulevard du Président Wilson • F-67932 Strasbourg-Cedex 9  
RCS Strasbourg B 558 501 912 • APE 3513Z  
N° d'identification intracommunautaire (TVA) FR 13 558 501 912  
Tél + 33 (0) 3 88 20 60 20 • Fax + 33 (0) 3 88 20 60 10  
[www.es.fr](http://www.es.fr)



# ANNEXE ETUDE DE DANGER

## TRAITANT DU RISQUE SISMOLOGIQUE

### DAOTM RITTERSHOFFEN

### NOVEMBRE 2024

Référence	Version	Date	Rédacteur	Vérificateur	Approbateur
RIT_DA_22_02	V0	03/08/2022	MAURER Vincent	BAUJARD Clément	GENTER Albert
RIT_DA_22_02	V1 : suite expertise INERIS Wissembourg	22/09/2022	MAURER Vincent	BAUJARD Clément	GENTER Albert
RIT_DA_22_02	V2.1 : suite avis MRAe	18/11/2024	MAURER Vincent	MAZENS Clémence	JOSEPH Jonathan

Diffusion					
Destinataire	Titre	Organisme	Copie électronique	Nb	copies papier
M. le Préfet	Préfet	Préfecture du Bas-Rhin	3	3	
Emilie Jacquot		DREAL Grand Est Service Prévention des Risques Anthropiques Pôle Risques Miniers	1	0	



---

## TABLE DES MATIERES

---

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>ETAT DE L'ART DES CONNAISSANCES SUR LA SISMICITE INDUITE.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1</b>	<b>DEFINITION DE LA SISMICITE ANTHROPIQUE.....</b>	<b>7</b>
<b>2.2</b>	<b>PRINCIPALES CARACTERISTIQUES D'UN SEISME .....</b>	<b>8</b>
2.2.1	LA MAGNITUDE .....	8
2.2.2	L'INTENSITE.....	9
2.2.3	LES PICS D'ACCELERATION OU DE VITESSE DU SOL .....	10
<b>2.3</b>	<b>LES MECANISMES EN JEU.....</b>	<b>10</b>
<b>2.4</b>	<b>LES SOURCES DE SISMICITE ANTHROPIQUES .....</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>GEOOTHERMIE ET SISMICITE .....</b>	<b>13</b>
<b>3.1</b>	<b>PHASES D'UN PROJET DE GEOOTHERMIE.....</b>	<b>13</b>
<b>3.2</b>	<b>PARAMETRES IMPACTANT LE RISQUE DE SISMICITE .....</b>	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>SISMICITE NATURELLE DANS LE FOSSE RHENAN.....</b>	<b>17</b>
<b>5</b>	<b>CAS D'ETUDE DANS LE FOSSE RHENAN.....</b>	<b>19</b>
<b>5.1</b>	<b>SOULTZ-SOUS-FORETS (FRANCE 2000-2005).....</b>	<b>20</b>
<b>5.2</b>	<b>BALE (SUISSE – 2006) .....</b>	<b>21</b>
<b>5.3</b>	<b>SOULTZ-SOUS-FORETS (FRANCE DEPUIS 2016).....</b>	<b>21</b>
<b>5.4</b>	<b>RITTERSHOFFEN (FRANCE DEPUIS 2012) .....</b>	<b>22</b>
<b>5.5</b>	<b>LANDAU (ALLEMAGNE DEPUIS 2009) .....</b>	<b>23</b>
<b>5.6</b>	<b>INSHEIM (ALLEMAGNE DEPUIS 2012).....</b>	<b>23</b>
<b>5.7</b>	<b>VENDENHEIM (FRANCE 2019-2020) .....</b>	<b>24</b>
<b>5.8</b>	<b>ILLKIRCH (FRANCE 2019-2020) .....</b>	<b>24</b>
<b>6</b>	<b>ANALYSE DU RISQUE SISMOLOGIQUE .....</b>	<b>26</b>
<b>6.1</b>	<b>EVALUATION DE L'ALEA SISMIQUE EN AMONT DU PROJET .....</b>	<b>26</b>

<b>6.2</b>	<b>IDENTIFICATION DES RISQUES SISMOLOGIQUES .....</b>	<b>27</b>
6.2.1	INFLUENCE DE LA PROFONDEUR .....	27
6.2.2	INFLUENCE DE LA PRESSION D'INJECTION ET DU VOLUME INJECTE .....	29
6.2.3	INFLUENCE DE REPONSE DU RESERVOIR ET DE LA CONNEXION DU PUIITS AU RESERVOIR 29	
<b>6.3</b>	<b>ANALYSE PRIMAIRE DU RISQUE .....</b>	<b>29</b>
6.3.1	PROBABILITE D'APPARITION .....	29
6.3.2	GRAVITE .....	30
6.3.3	HIERARCHISATION DES RISQUES .....	31
<b>6.4</b>	<b>SCENARIOS D'ANALYSE DU RISQUE SISMOLOGIQUE .....</b>	<b>32</b>
<b>6.5</b>	<b>ANALYSE DU RISQUE SISMOLOGIQUE .....</b>	<b>33</b>
6.5.1	CAS 0 .....	33
6.5.2	CAS 1 .....	34
6.5.3	CAS 2 .....	36
<b>7</b>	<b>SYNTHESE DU RISQUE SISMOLOGIQUE .....</b>	<b>39</b>

## TABLE DES ILLUSTRATIONS

FIGURE 1 : CLASSEMENT DES MAGNITUDES MAXIMALES OBSERVEES SELON LES SOURCES DE SISMICITE EN EUROPE CENTRALE (TRADUIT D'APRES BRGM RP-69689). .....	12
FIGURE 2 : CARTE DU FOSSE RHENAN SUPERIEUR AVEC INDICATION DES FAILLES MAJEURES COTES FRANÇAIS (SEGMENTS NOIRS, SOURCE BRGM), SISMICITE NATURELLE ISSUE DU CATALOGUE DU RENASS ENTRE LE 28/01/1980 ET LE 18/05/2021 (CERCLES COLORES SELON LA MAGNITUDE, SOURCE : <a href="https://api.franceseisme.fr/fr/search">HTTPS://API.FRANCESEISME.FR/FR/SEARCH</a> ) ET LA LOCALISATION DES SITES GEOTHERMIQUES PROFONDS EXPLOITES, SUSPENDUS OU ARRETES DANS LA REGION (CARRES COLORES). LE CATALOGUE DE SISMICITE NE S'ETEND PAS A L'ENSEMBLE DES PAYS LIMITOPHES. ....	18
FIGURE 3 : PROFONDEUR DES SEISMES NATURELS DANS LE FOSSE RHENAN SUPERIEUR ENTRE 2008 ET 2021 (SOURCE RENASS) .....	28
FIGURE 4 : PROFIL DE TEMPERATURE EN FONCTION DE LA PROFONDEUR A SOULTZ-SOUS-FORETS .....	28
FIGURE 5 : GRILLE DE COTATION DES RISQUES. EN BLEU CLAIR, RISQUE AUTORISE ; EN BLEU INTERMEDIAIRE, RISQUE ACCEPTABLE ; EN BLEU FONCE, RISQUE CRITIQUE. ....	31
FIGURE 6 : ANALYSE DE RISQUE POUR LE CAS 0. R1 = $ML > 3.5$ DANS UN RAYON DE 5KM ; R2 = $2.5 < ML < 3.5$ DANS UN RAYON DE 2KM ; R3 = $1.5 < ML < 2.5$ DANS UN RAYON DE 1KM. ....	34

FIGURE 7 : ANALYSE DE RISQUE POUR LE CAS 1. R1 =  $ML > 3.5$  DANS UN RAYON DE 5KM ; R2 =  $2.5 < ML < 3.5$  DANS UN RAYON DE 2KM ; R3 =  $1.5 < ML < 2.5$  DANS UN RAYON DE 1KM.....36

FIGURE 8 : ANALYSE DE RISQUE POUR LE CAS 2. R1 =  $ML > 3.5$  DANS UN RAYON DE 5KM ; R2 =  $2.5 < ML < 3.5$  DANS UN RAYON DE 2KM ; R3 =  $1.5 < ML < 2.5$  DANS UN RAYON DE 1KM.....38

FIGURE 9 : COMPARAISON DES RISQUES POUR LES 3 CAS. R1 =  $ML > 3.5$  DANS UN RAYON DE 5KM ; R2 =  $2.5 < ML < 3.5$  DANS UN RAYON DE 2KM ; R3 =  $1.5 < ML < 2.5$  DANS UN RAYON DE 1KM.....40

## 1 INTRODUCTION

En vue de répondre au 8° du I de l'article 6 du décret n°2006-649 du 2 juin 2006 modifié qui exige la présence d'un « document exposant la compatibilité des risques industriels du projet avec la sécurité publique », il a été intégré au dossier initial une étude de dangers, avec des scénarios qui n'étudient pas précisément les risques de sismicité induite, alors qu'il s'agit d'un nouvel enjeu fort de tout projet de géothermie profonde.

Les événements récents survenus dans la région de l'Eurométropole de Strasbourg sur un autre site de géothermie (et relevant d'un autre opérateur) n'ont fait qu'accroître la sensibilité envers cette thématique et montrent la nécessité de mieux connaître, anticiper et maîtriser le phénomène de sismicité induite.

Cette annexe à l'étude de danger, vient ainsi compléter le document initial en traitant de scénarios liés à des événements sismiques induits générés par une activité de géothermie.

Ce document a été mis à jour suite à un retour d'expérience sur les événements sismologiques de mai et de juillet 2024 induits par la centrale géothermique de Rittershoffen. Les modifications sont identifiées en couleur bleu dans le document.

## 2 ETAT DE L'ART DES CONNAISSANCES SUR LA SISMICITE INDUITE

### 2.1 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 sismicité induite, déclenchée et naturelle alors même que la définition de ces termes n'est pas unanime. Cependant, les définitions généralement utilisées par les auteurs dans les revues scientifiques 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 ou à la réactivation de failles qui ne sont pas proches de l'équilibre de rupture. 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 ou dans un milieu naturellement fracturé qui n'est pas prédisposé (voir sismicité déclenchée). La sismicité induite est par conséquent caractérisée par des séismes de faibles magnitudes et intensités, 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 proche de l'équilibre limite. Autrement dit un événement sismique naturel se serait probablement produit 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 (encore) ré-activables par le chargement tectonique. Elle se traduit par



une augmentation sensible voire très importante de la sismicité et notamment 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 kilomètres à plusieurs dizaines, voire à centaines de kilomètres ;
- **La microsismicité** désigne tout type d'activité sismique non ressentie par les populations en surface. Sans que ce soit systématique, le seuil de magnitude de la microsismicité est en général de l'ordre de  $M=2$ .

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.

## 2.2 PRINCIPALES CARACTERISTIQUES D'UN SEISME

### 2.2.1 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. Il existe en réalité plusieurs méthodes pour la calculer, et de ce fait plusieurs échelles.

L'échelle la plus connue est de celle de Richter, basée sur la mesure de l'amplitude des ondes sismiques. Pour la microsismicité, la magnitude de Richter, encore appelée magnitude locale ( $M_L$ ) est le plus souvent utilisée. Rappelons ici également que la magnitude peut être négative ou positive et que l'échelle de magnitude est une échelle ouverte, sans bornes. En général, seuls les séismes naturels de magnitude  $M_L > 2$  sont ressentis en surface, à condition que la source ne soit pas trop profonde.

Une autre échelle utilisée aujourd'hui est la magnitude de moment  $M_w$  qui permet de quantifier l'énergie émise par un séisme.

Ces échelles sont logarithmiques. Ainsi, une augmentation de 1 point 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.

**Tableau 1 : Ordres de grandeur des paramètres de rupture de séismes de magnitude de moment variant de 1 à 9. Le nombre global par an donné en dernière colonne est donné à titre indicatif au niveau mondial (Source INERIS-DRS-17-149681-07390D)**

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

## 2.2.2 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 de l'atténuation des ondes sismique tout au long de leur parcours, mais 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 selon la géométrie du bassin. 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.

**Tableau 2 : Echelle MSK de l'intensité d'un séisme et dommages associés (Source INERIS-DRS-17-149681-07390D)**

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.

### 2.2.3 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 généré 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 (voir 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.

**Tableau 3 : Relation échelle intensité Mercalli et vibration du sol en PGV (en cm/s) et PGA (en %g) d'après l'USGS (service sismologique des Etats Unis) (Source INERIS-DRS-17-149681-07390D)**

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+

## 2.3 LES MECANISMES EN JEU

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. Selon la pression du fluide en profondeur, les opérations peuvent générer de la microsismicité.

En effet, l'injection de fluide provoque une augmentation de la pression de fluide dans les fractures pré-existantes, ce qui engendre une diminution de la résistance à la friction, permettant ainsi le glissement de la fracture, mouvement à l'origine d'un potentiel microséisme. 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. 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. Ainsi, si la sismicité induite peut être générée à une distance relativement importante d'un puits et après l'arrêt des injections. Les observations réalisées à Soultz-sous-Forêts et à Rittershoffen montrent que la majorité de la microsismicité induite est générée proche du puits (dans un rayon de moins d'un kilomètre) et qu'une diminution de la pression d'injection mène à un arrêt très rapide de la microsismicité induite.

## 2.4 LES SOURCES DE SISMICITE ANTHROPIQUES

La sismicité anthropique a de nombreuses sources, la géothermie n'est que l'une d'entre elles. Plusieurs études ont montré qu'il peut exister différentes origines anthropiques des séismes. Elles retiennent comme activités industrielles pouvant générer de la sismicité : l'injection d'eaux usées, les barrages, les hydrocarbures, l'activité minière incluant les tirs de carrière et la géothermie.

En France métropolitaine, une majorité de la sismicité anthropique est générée par les tirs de carrière. Les vibrations dans ce cas sont générées par des explosions en surface, et ont des magnitudes équivalentes allant jusqu'à  $M_L > 2$ , cependant l'intensité observée diminue très vite avec la distance de tir. Les tirs de carrière font déjà l'objet d'une réglementation spécifique (arrêté ministériel du 22 septembre 1994) qui impose une limitation de l'accélération maximale mesurée sur les bâtiments les plus proches du tir à moins de 10 mm/s. A titre de comparaison, en géothermie, les arrêtés préfectoraux en exploitation imposent un arrêt progressif des opérations en cours si une accélération maximale de 1.5 mm/s est observée sur deux stations sismologiques. Les seuils règlementaires sont ainsi bien plus sécurisants dans le cadre de la géothermie.

Les événements sismiques dus à la géothermie en Europe sont de plus faible magnitude que les événements de sismicité induite imputables à d'autres sources anthropiques (Figure 1). Cela signifie que la géothermie peut s'appuyer sur l'expérience de ces autres secteurs pour appréhender ce risque.

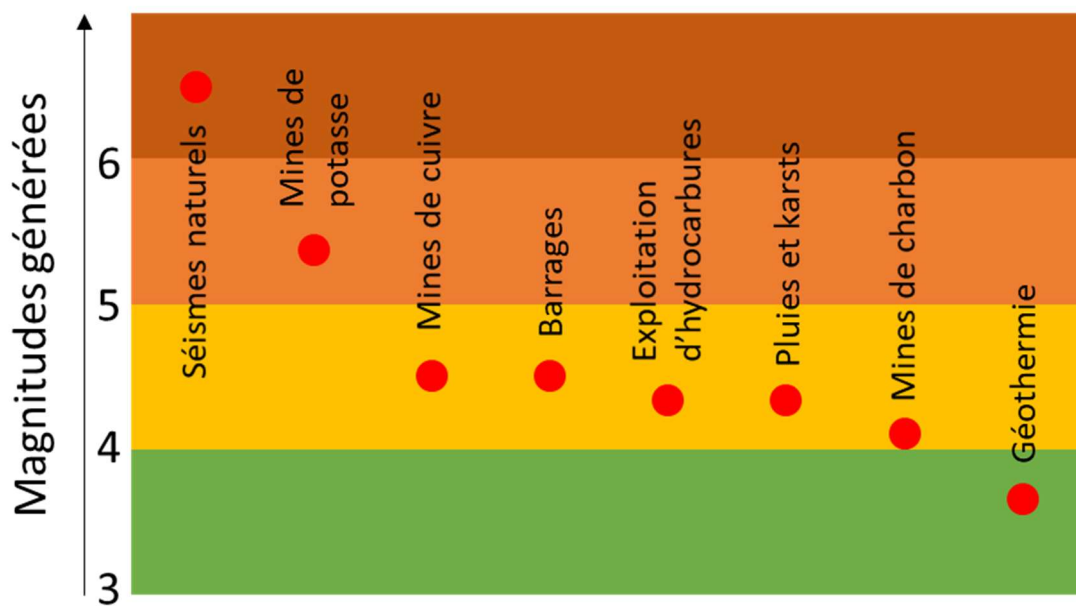


Figure 1 : Classement des magnitudes maximales observées selon les sources de sismicité en Europe centrale (Traduit d'après BRGM RP-69689).

### 3 GEOTHERMIE ET SISMICITE

Lors d'un projet de géothermie, du fluide est pompé dans un puits et réinjecté dans le sous-sol dans le second puits. Ces injections peuvent donc déclencher de la microsismicité. Le risque de sismicité varie suivant les phases d'un projet de géothermie et les caractéristiques géologiques, hydrauliques et mécaniques de la zone. Des mesures spécifiques de réduction du risque sont prises pour chaque phase.

#### 3.1 PHASES D'UN PROJET DE GEOTHERMIE

Un projet de géothermie profonde se déroule en plusieurs phases : l'exploration pour déterminer où se trouve la ressource, le forage pour atteindre la ressource, les tests d'injection pour évaluer la ressource, les éventuelles stimulations pour améliorer l'injectivité, l'exploitation et l'abandon.

1. Lors de la **phase d'exploration**, il n'y a pas de sismicité associée puisque l'on ne modifie pas le sous-sol.
2. Il est possible de générer de la sismicité induite lors de la **phase de forage** mais c'est généralement de la microsismicité et elle est très faible. Le risque sismique lors de la phase de forage a été classé peu probable par l'INERIS (Source INERIS-DRS-16-157477-00515A). Lors du forage des deux puits à Rittershoffen, de la microsismicité a été observée et associée à des pertes de boue à la traversée de zones perméables. La magnitude maximale observée était de  $M=1.0$ . A Illkirch en revanche, aucun microséisme n'a été observé en phase de forage.
3. La **phase de test et de développement du puits** est la phase durant laquelle le risque de sismicité anthropique est le plus avéré. La plupart des cas de sismicité anthropique enregistrés se sont produits durant cette phase. Lors de cette phase, les opérations réalisées visent à caractériser le puits et à améliorer ses propriétés hydrauliques (productivité ou injectivité). Cette phase est d'une durée limitée et la sismicité est surveillée étroitement pendant cette période. Cependant, tous les sites de géothermie profonde ne nécessitent pas d'opérations de développement. Par exemple le forage de production à Rittershoffen était déjà connecté au réservoir naturellement fracturé, montrait de très bonnes propriétés hydrauliques et aucune microsismicité n'a été observée lors des tests et de la mise en exploitation de ce puits.
4. La **phase d'exploitation** est la phase durant laquelle de la microsismicité est couramment enregistrée.

À la fin de la phase d'exploitation, les puits sont fermés et abandonnés selon une procédure encadrée par le code minier. Aucune sismicité n'est attendue lors de cette phase, puisque les interventions dans le sous-sol sont par définition arrêtées.

#### 3.2 PARAMETRES IMPACTANT LE RISQUE DE SISMICITE

Il y a plusieurs paramètres qui peuvent influencer l'occurrence de sismicité. Avant toute opération, certains paramètres, opérationnels et géologiques, peuvent donner une indication du comportement du réservoir :

1. **La profondeur** : le champ de contrainte variant avec la profondeur, il est observé que les systèmes profonds produisent des séismes anthropiques plus importants car le différentiel de contrainte (écart entre la contrainte maximale et la contrainte minimale)



augmente avec la profondeur. Cela signifie que l'énergie libérée lors d'un séisme induit sera plus importante à grande profondeur. De la même façon, les séismes naturels sont moins fréquents à faible profondeur (1 à 4 km de profondeur) qu'à grande profondeur (> 4km).

2. **Les caractéristiques hydrauliques du puits** : comme exposé ci-dessus, le risque de sismicité induite ou déclenchée est plus important pendant la phase de test et de développement du puits. Cela signifie que les sites qui n'ont pas besoin de stimulation présentent un risque de séisme anthropique beaucoup plus faible. Traduit dans le contexte du Fossé rhénan, de la sismicité induite ressentie a été observée à Soultz-sous-Forêts, à Bâle et à Vendenheim pendant cette phase de test et de développement. Cependant, ces opérations ont généré uniquement quelques microséismes, non ressentis, à Rittershoffen, Illkirch ou encore à Insheim et Landau en Allemagne, au Nord de Wissembourg. En effet, si des zones suffisamment perméables sont visées et atteintes par le forage, ces opérations ne sont pas nécessaires (comme dans le cas du puits GRT-2 de Rittershoffen). D'autre part, il existe des techniques qui permettent de limiter la probabilité d'occurrence de sismicité induite lors de ces opérations. Ces techniques ont été mises en œuvre avec succès sur le premier puits de Rittershoffen ou sur le puits réalisé à Illkirch par exemple.
3. **La pression d'injection** : plus la pression d'injection est élevée, plus la probabilité de générer de la micro-sismicité, voire de la sismicité induite ressentie, est élevée. Par exemple, la sismicité induite ressentie à Soultz-sous-Forêts dans les années 2000 est liée à des injections à haute pression (170 bar), de même qu'à Bâle (300 bar). Il existe en général pour un site donné une valeur seuil de pression au puits à partir de laquelle la sismicité induite va être générée. Cette valeur peut être estimée pendant le forage ou lors des premiers tests d'injection.
4. **Le volume de fluide injecté** : la probabilité d'affecter une faille et donc de déclencher un séisme ressenti est fonction du volume de roche mis en pression, qui est lié au volume injecté et au type de réservoir. Cette dépendance entre volume injecté et volume de roche impacté est tributaire des propriétés du milieu (perméabilité, porosité) et implique que pour deux sites d'injection différents, le risque d'induire un séisme sera différent. Par exemple, l'impact du volume injecté sur la sismicité induite sera nul ou très faible si le réservoir est ouvert ou infini avec une perméabilité importante, au contraire d'un réservoir fermé (voir également point 8 ci-dessous).
5. **Les changements de pression** : plus le différentiel de la pression varie et plus ces variations sont rapides, plus le risque de séisme induit est élevé. Cette variation de pression s'entend au niveau d'une faille. Le lien entre cette variation de pression dans la roche et la variation de pression mesurée dans un puits n'est pas direct, il dépend des propriétés de la roche et des fractures. Cette variation de pression se produit typiquement pendant les phases de stimulation mais aussi en phase de production, localement autour des forages. C'est pourquoi les arrêts d'injection ou les diminutions de débit d'injection doivent se faire de manière progressive, afin justement d'éviter d'accroître le risque de génération de sismicité, notamment lors des premières injections.
6. **Débit entrant vs débit sortant** : lorsqu'un puits de production et un puits d'injection sont utilisés, l'opération va atteindre un état d'équilibre permanent (régime de pression stabilisé) et le changement de pression reste confiné à un certain volume. La

microsismicité dans de tels systèmes se stabilise dans le temps. Des augmentations soudaines du taux de sismicité sont possibles quand des zones à la limite de la rupture sont atteintes par la variation de pression/déformation. En France métropolitaine, le fluide est totalement réinjecté dans le même réservoir géologique.

7. **La situation géomécanique du réservoir et les caractéristiques mécaniques des roches du réservoir** : les roches cristallines de socle sont généralement plus susceptibles de générer de la sismicité induite que les roches sédimentaires par leur propriétés mécaniques. Les projets géothermiques dans le Bassin parisien ou aquitain ont pour cible des horizons sédimentaires et aucun séisme n'a été ressenti dans ce contexte géologique, alors que les projets géothermiques en Alsace ont pour cible l'interface sédiment/socle. D'autre part, la capacité d'un plan de faille à entrer en glissement dépend de son orientation par rapport au champ de contraintes présent dans la roche, ainsi que des caractéristiques de ce dernier.
8. **Le type de réservoir et les caractéristiques hydrogéologiques du réservoir** : un réservoir en milieu poreux, où le fluide circule dans les pores de la roche, présente un risque moindre de sismicité anthropique comparé à un réservoir naturellement fracturé où le fluide circule majoritairement dans des failles et fractures. C'est ce qu'on observe en France, avec aucune microsismicité enregistrée dans le bassin de Paris malgré de multiples exploitations géothermiques mais une présence de microsismicité autour des sites géothermaux du Fossé rhénan. Dans le cas d'un réservoir naturellement fracturé, l'analyse des tests de puits donne des indications précieuses sur les caractéristiques du réservoir. Outre sa perméabilité, son extension va être caractérisée. Il existe différentes configurations ; un réservoir peut être infini, ouvert (c'est-à-dire connecté à une zone proche très perméable – l'équivalent d'une rivière pour une nappe de surface) ou fermé (présentant un volume limité au-delà duquel l'écoulement de fluide est très limité). La réponse en pression du puits et du réservoir, donc la sismicité induite générée, est fortement dépendante des caractéristiques du réservoir. Par exemple, dans le cas d'un réservoir ouvert, lorsque la surpression atteint une certaine distance du puits, à partir de laquelle elle peut librement se dissiper, la pression et le volume de roche mis en pression n'augmentent plus (comme c'est le cas à Soultz-sous-Forêts et à Rittershoffen). En revanche, dans le cas d'un réservoir fermé, la pression va continuellement augmenter dans le réservoir, sans pouvoir s'échapper, générant ainsi un risque accru de sismicité et en particulier de sismicité déclenchée.

Ces paramètres sont évalués en amont des opérations mais seront recalibrés au fur et à mesure que la connaissance du site s'affine. Le risque sismique sera ainsi réévalué avec ces nouvelles informations après chaque phase du projet.

Ces paramètres fournissent une indication de l'aléa de sismicité induite : plusieurs paramètres peuvent jouer en même temps pour chaque site, et ces paramètres peuvent avoir une importance variable d'un site à l'autre. Dans le cas de la France métropolitaine, la microsismicité plus importante dans le Fossé rhénan est due en premier lieu au besoin de stimulation (phase où le taux de sismicité est le plus important) puis aux caractéristiques hydrogéologiques des puits et à la profondeur. C'est pour cette raison qu'il est prévu dans le cadre de ce projet de :

- Forer à des profondeurs inférieures à 3.5km, soit à une profondeur verticale sous le toit du socle inférieure à 2 km ;



- Viser des zones les plus perméables identifiées grâce à l'imagerie 3D du sous-sol et aux modélisations hydrogéologiques et géomécaniques, limitant ainsi la nécessité de réaliser des opérations de stimulation ;
- Estimer la connexion du puits au réservoir et caractériser en détail la réponse hydrogéologique du réservoir (ouvert, infini, fermé) ;
- Limiter l'écart entre le volume injecté et le volume produit lors des phases de tests et de développement de puits.

## 4 SISMICITE NATURELLE DANS LE FOSSE RHENAN

Le Fossé rhénan supérieur est l'un des fossés d'effondrement les plus importants en France. Il appartient à un ensemble de fossés d'effondrement, se relayant depuis la Mer du Nord jusqu'à la Méditerranée, contenant entre autres les Fossés rhénan inférieur et supérieur, le Fossé de la Limagne et le Fossé bressan, qui constitue le système de Rift Cénozoïque Européen. Le Fossé rhénan s'étend sur 300 km entre les villes de Bâle (Suisse) et de Mayence (Allemagne). Ce couloir de 30 à 40 km de large en moyenne est bordé sur ses flancs par des massifs cristallins (Vosges, Forêt-Noire).

La structuration du Fossé rhénan est représentée par un modèle de référence de type rift. Le graben (ou fossé d'effondrement), en lui-même, est composé de sous-ensembles structuraux aux caractères bien individualisés. Les collines sous-vosgiennes ou « champ de fractures » correspondent aux formations géologiques qui s'étendent entre la Faille vosgienne à l'Ouest et la Faille rhénane à l'Est. Cette dernière est un accident majeur qui définit le Fossé proprement dit. Plus à l'intérieur, le socle granitique est de plus en plus profond jusqu'au centre du Fossé, à proximité du Rhin. Lorsqu'on s'éloigne du cœur du Fossé en direction de la bordure orientale, on retrouve une organisation structurale analogue.

Bien que le Fossé rhénan soit l'une des régions les plus sismiquement actives de France, la vitesse de déformation horizontale, estimée à partir de mesures GPS, est très faible, inférieure à 0,5-1,0 mm/an. L'évolution tectonique actuelle de la région apparaît ainsi dominée par la poussée alpine qui entraîne le décollement et le plissement du Jura, et une réactivation du Fossé rhénan se traduisant par le relèvement des Vosges du sud (et de la Forêt-Noire) et la subsidence (affaissement) relative du Fossé rhénan.

L'activité sismique du Fossé rhénan (voir Figure 2) est diffuse et difficilement corrélable à des accidents en surface. La sismicité augmente dans la zone de transition entre le Fossé rhénan et le Jura. L'événement marquant du Fossé rhénan est le séisme de Bâle (Suisse) du 18/10/1356, d'intensité épiscopale estimée à IX sur l'échelle de Mercalli (voir section 2.2.2), le plus important connu au nord des Alpes. Les séismes historiques connus qui ont marqué la région des Vosges sont ceux du 18/02/849 et du 12/05/1682, d'intensité épiscopale estimée à VIII. La sismicité historique liste par ailleurs 4 séismes d'intensité VII et plus d'une dizaine de séismes d'intensité VI à VI-VII. Pour la période instrumentale, trois crises sismiques majeures ont eu lieu dans la région des Vosges :

- Les crises de l'année 1973 dominées par l'événement du 22/02/1973 (ML=4,1),
- La crise de Remiremont de décembre 1984 avec son paroxysme le 29/12/1984 (ML=4,8)
- Et le séisme de Rambervillers (22 février 2003, ML= 5,4,) qui reste l'événement majeur de cette région depuis 1682.

Compte-tenu de cette activité, le zonage réglementaire de sismicité indique un risque modéré pour l'ensemble du Fossé rhénan, sauf pour son extrême sud, avec un risque sismique moyen dans la zone de transition entre le Fossé et le Jura.

Ainsi, le gradient géothermique particulièrement fort et lié à la présence de convection dans un réservoir naturellement fracturé, la sismicité naturelle modérée et la connaissance du sous-sol liée à une exploitation pétrolière historique ont constitué un contexte particulièrement favorable au développement de la géothermie dans le Fossé rhénan. Cela a débuté à Soultz-

sous-Forêts et l'expérience et les connaissances acquises ont bénéficié aux projets actuellement en cours d'exploitation, comme celui de Landau, Insheim ou encore Rittershoffen.

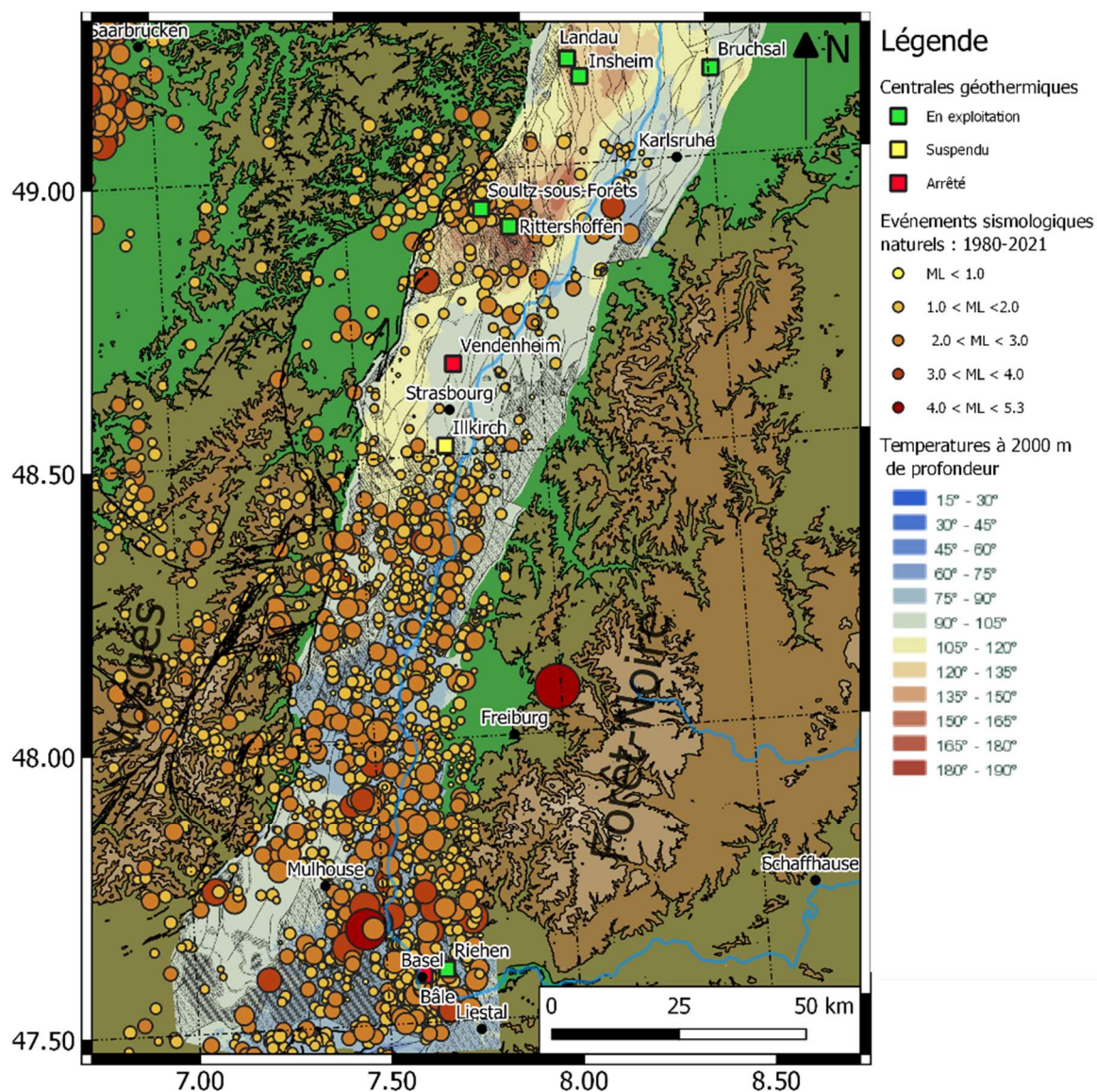


Figure 2 : Carte du Fossé rhénan supérieur avec indication des failles majeures côtés français (segments noirs, source BRGM), sismicité naturelle issue du catalogue du RéNaSS entre le 28/01/1980 et le 18/05/2021 (cercles colorés selon la magnitude, source : <https://api.franceseisme.fr/fr/search>) et la localisation des sites géothermiques profonds exploités, suspendus ou arrêtés dans la région (carrés colorés). Le catalogue de sismicité ne s'étend pas à l'ensemble des pays limitrophes.

## 5 CAS D'ETUDE DANS LE FOSSE RHENAN

Afin de caractériser le danger lié à l'aléa sismologique du projet exposé, il est proposé ci-dessous une revue de la sismicité induite dans le fossé Rhénan. Les projets sont détaillés ci-dessous et les principales informations résumées dans le Tableau 4.

**Tableau 4 : Tableau récapitulatif des projets de géothermie profonde dans le fossé Rhénan et de la sismicité induite.**

Site (année)	Prof.	Type de roche	Mag. Max. atteinte (selon observatoires nationaux)	Type d'opération sur le puits	Pression d'injection	Volume injecté
<b>Soultz-sous-Forêts (2003)</b>	5 km	Socle granitique	2.9	Injections haute pression	160 bar	37 000 m <sup>3</sup> injectés
<b>Bâle - CH (2006)</b>	5 km	Socle granitique	3.6	Injections haute pression	296 bar	11 500 m <sup>3</sup> injectés
<b>Rittershoffen (2012)</b>	2.5km	Grès / socle granitique	1.7	Injections	33 bar	4 500 m <sup>3</sup> injectés
<b>Vendenheim (2019-2020)</b>	5 km	Socle granitique	3.9	Injections haute pression / circulation	inconnue	inconnu
<b>Illkirch (2019-2020)</b>	3.3 km	Grès / socle granitique	1.6	Injections haute pression	100 bar	5 000 m <sup>3</sup> injectés
<b>Landau – DE (2009)</b>	3.3 km	Socle granitique	2.7	Exploitation	>50 bar	inconnu
<b>Insheim - DE (2012)</b>	4 km	Socle granitique	2.4	Exploitation	inconnue	inconnu
<b>Soultz-sous-Forêts (après 2016)</b>	5 km	Socle granitique	1.7	Exploitation	21 bar	5 000 000 m <sup>3</sup> circulés
<b>Rittershoffen (après 2016)</b>	2.5km	Grès / socle granitique	2.2	Exploitation	15 bar	16 250 000 m <sup>3</sup> circulés

Une analyse de ces informations est proposée en section 6 de ce rapport.

Les informations disponibles sur ces sites sont détaillées ci-dessous.

## 5.1 SOULTZ-SOUS-FORETS (FRANCE 2000-2005)

Le projet de Soultz-Sous-Forêts a débuté sous la forme d'un projet de recherche européen en 1986. Il a été initié par une équipe franco-allemande et était initialement financé par des fonds publics français, allemands, suisses et européens. À partir de 1996, il est de plus en plus cofinancé par l'industrie. Beaucoup de données ont été obtenues mais l'objectif initial était le développement de deux réservoirs dans le socle à 3,5 km et 5 km de profondeur.

Deux puits ont d'abord été forés (EPS-1 et GPK-1, 1987-1991) à faible profondeur (2 km) puis GPK-1 a été approfondi à 3,6 km et un troisième puits (GPK-2) a été foré à 3,9 km (1991-1998). Ce troisième puits a ensuite été approfondi et 2 autres puits (GPK-3 et GPK-4) ont été forés à 5 km de profondeur (1999-2005). Depuis 2016, GPK-2 est le puits producteur et le fluide est réinjecté dans GPK-3 et GPK-4.

Dans le réservoir profond (5 km), de la sismicité induite ressentie s'est produite durant les phases de recherche de ce projet, lors des stimulations hydrauliques de 2000 et de 2003 pour améliorer l'injectivité. Une phase de stimulation avait eu lieu précédemment en 1993 mais elle concernait la partie supérieure du réservoir, donc une zone différente.

Lors de la stimulation de 2000, le séisme induit de plus forte magnitude,  $M=2,6$ , s'est produit un jour après les injections. En 2003, les puits GPK-2 et GPK-3 ont été stimulés en plusieurs phases. La microsismicité a commencé à partir d'une surpression de 30 bar. Deux événements sismiques se sont produits, le 11 juin 2003, de magnitude  $M_L=2.9$  et 2.7. Ces deux événements se sont produits à la périphérie du réservoir.

### Résumé des paramètres :

- **Type de roche** : socle granitique
- **Type de réservoir** : réservoir fracturé
- **Profondeur** : 5 km
- **Type d'opération** : stimulations hydrauliques
- **Type d'environnement** : rural (villages)
- **Volume injecté** :
  - 23 400 m<sup>3</sup> en 2000
  - 37 300 m<sup>3</sup> en 2003
- **Débit** :
  - Paliers entre 30 et 50 l/s en 2000
  - Paliers entre 20 et 60 l/s avec un pic à 90 l/s en 2003
- **Pression maximale atteinte en tête de puits** :
  - 145 bar en 2000
  - 160 bar en 2003
- **Durée** :
  - 6 jours en 2000
  - 11 jours en 2003
- **Magnitude maximale atteinte** :
  - $M=2.6$  en 2000
  - $M= 2.9$  en 2003



## 5.2 BALE (SUISSE – 2006)

Le projet géothermal de cogénération de Bâle, Deep Heat Mining (DHM) a été initié en 2006. L'idée était de réaliser un site pilote de production de chaleur et d'électricité à une échelle commerciale, en utilisant le procédé de Roche chaude sèche (création d'un réservoir fracturé). Les températures dans le Fossé rhéan étaient réputées élevées. Un forage exploratoire à Bâle en 2001 avait permis d'obtenir une température d'environ 200 °C à 5 000 m de profondeur. Il était prévu de creuser un forage d'injection et deux forages de production à 5 000 m de profondeur. Le forage d'injection et le premier forage de production devaient être creusés en 2006-2007 et le second forage et la centrale réalisés en 2008-2009 si les deux premiers forages se révélaient un succès.

La sismicité s'est produite pendant la phase de stimulation. Ces stimulations hydrauliques ont été réalisées pour améliorer la perméabilité du réservoir. La stimulation elle-même a commencé le 2 décembre et a duré jusqu'au 8 décembre 2006. Elle s'est déroulée en 6 phases et 11 500 m<sup>3</sup> d'eau ont été injectés. Le débit d'injection a été augmenté progressivement jusqu'à 55 L.s<sup>-1</sup> ce qui a mené à une pression en tête de puits de 296 bar. La sismicité a augmenté en même temps et elle a finalement atteint un niveau qui requerrait de diminuer le débit. Le débit a été diminué le 8 décembre au matin, après 6 jours d'injection continue. Les stimulations ont été arrêtées (shut-in), sans diminution de la sismicité. Le séisme de ML= 3,4 s'est produit juste avant une procédure de purge du puits. Il n'y a pas eu de doute sur l'origine induite de l'événement comme la séquence de sismicité a commencé pendant la stimulation et que le séisme était très proche du puits. L'évènement de Bâle reste un cas d'étude car c'est le premier séisme induit par des opérations de géothermie d'une telle magnitude après l'expérience réussie de Soultz-Sous-Forêts. Par conséquent il a été beaucoup étudié pour comprendre son origine.

Le projet a été arrêté à la fin de 2009. Le puits a été fermé en avril 2011. Un an plus tard, et encore plus depuis 2016, l'activité sismique a augmenté à proximité du forage. Suite à cette augmentation de la microsismicité enregistrée, le puits a été rouvert en 2017 pour faire baisser la pression.

### Résumé des paramètres :

- **Type de roche** : socle granitique
- **Type de réservoir** : réservoir fracturé
- **Profondeur** : 5 km
- **Type d'opération** : stimulations hydrauliques
- **Type d'environnement** : urbain dense
- **Volume injecté** : 11 500 m<sup>3</sup>
- **Débit** : paliers jusqu'à 55 l/s
- **Pression maximale atteinte en tête de puits** : 296 bars
- **Durée** : 6 jours
- **Magnitude maximale atteinte** : M=3.4

## 5.3 SOULTZ-SOUS-FORETS (FRANCE DEPUIS 2016)

En 2008, une première centrale ORC (Organic Rankine Cycle) voit le jour d'une puissance de 1.5 MW<sub>e</sub>, mais fonctionne de manière discontinue. En 2016, une seconde centrale ORC d'une

puissance 1.7 MW<sub>e</sub> est inaugurée. Depuis 2016 le site est en exploitation commerciale de manière continue avec un taux de disponibilité supérieur à 90%. Depuis 2016, GPK-2 est le puits producteur et le fluide est réinjecté dans GPK-3 et GPK-4, répartissant ainsi la charge d'injection et donc la pression à l'injection. La magnitude maximale atteinte depuis 2016 a été de 1.7 avec un PGV associé de 0.17 mm/s. Aucun événement n'a été ressenti en surface.

#### Résumé des paramètres :

- **Type de roche** : socle granitique
- **Type de réservoir** : réservoir fracturé
- **Profondeur** : 5 km
- **Type d'opération** : exploitation
- **Type d'environnement** : rural
- **Volume circulé** : 5 000 000 m<sup>3</sup>
- **Débit** : 30 l/s
- **Pression maximale atteinte en tête de puits** : 21 bars
- **Durée** : 6 ans
- **Magnitude maximale atteinte** : M<sub>L</sub>= 1.7

#### 5.4 RITTERSHOFFEN (FRANCE DEPUIS 2012)

La centrale de Rittershoffen est exploitée pour une utilisation directe de la chaleur pour des besoins industriels. Elle est étudiée pour fournir une puissance de 24 MW<sub>th</sub>. Elle est constituée par un doublet de forage atteignant une profondeur de 2,5 km dans le socle fracturé. Suite à sa foration, l'indice d'injectivité du premier puits GRT-1 était en dessous de la cible attendue. Ce puits a été stimulé thermiquement, chimiquement et hydrauliquement. Cette série de stimulation a permis d'améliorer l'indice d'injectivité suffisamment pour continuer le projet. Durant la stimulation hydraulique, une série de paliers allant de 15 à 80 L/s a été injecté. La sismicité maximale atteinte a été de 1.6 durant la phase de shut-in. Aucun microséisme n'a été ressenti en surface durant cette phase. Aucune stimulation n'a été nécessaire suite à la foration du deuxième puits GRT-2, car son indice de productivité était suffisamment élevé.

L'exploitation de la centrale a démarré en 2016. Durant une année, le débit d'exploitation a été progressivement élevé jusqu'à atteindre le débit nominal d'exploitation, soit 70 L/s. Une sismicité régulière est observée depuis le début de l'exploitation. A plusieurs reprises au cours de l'exploitation, il a été décidé de réduire le débit d'injection afin de réduire le taux de sismicité. [Il est à noter le troisième seuil d'alerte défini par l'arrêté préfectoral d'exploitation \(PGV ≥ 1.5 mm/s observé sur 2 stations sismologiques du réseau de l'opérateur\) n'a jamais été franchi.](#) A chaque fois, la réduction du débit d'exploitation a permis réduire significativement le taux de sismicité. [La magnitude maximale atteinte depuis 2016 a été de M<sub>L</sub>=2.2 en 2024. Les événements ont été ressentis par la population avoisinante sans générer de dommages.](#)

#### Résumé des paramètres :

- **Type de roche** : socle granitique
- **Type de réservoir** : réservoir fracturé
- **Profondeur** : 2.5 km
- **Type d'opération** : stimulation/exploitation
- **Type d'environnement** : rural

- **Volume injecté/circulé :**
  - Stimulation hydraulique : 4000 m<sup>3</sup>
  - Circulation en exploitation : 16 250 000 m<sup>3</sup>
- **Débit :**
  - Stimulation hydraulique : palier de 15 à 80 l/s
  - Exploitation : 90 l/s
- **Pression maximale atteinte en tête de puits :** 33 bars
- **Durée :**
  - Stimulation hydraulique : 1j
  - Exploitation : 8 ans
- **Magnitude maximale atteinte :**  $M_L = 2.2$

### 5.5 LANDAU (ALLEMAGNE DEPUIS 2009)

La centrale de Landau produit de l'électricité et de la chaleur. La centrale produit 3 MWe pour environ 3 000 logements et 6-8 MWth pour environ 300 logements. La réduction de CO<sub>2</sub> annuelle est d'environ 6 000 tonnes. C'est la première centrale géothermale avec une production de l'ordre du mégawatt en Allemagne. Elle est en service depuis 2007. C'est un doublet géothermique. Entre 2005 et 2006, deux puits ont été forés jusqu'à 3 km de profondeur. Puis, des stimulations hydrauliques, qui n'ont pas généré de sismicité ressentie, ont eu lieu dans un des puits. Enfin, des tests de stimulation ont été réalisés en 2007. La centrale a ensuite été mise en production.

Entre février et novembre 2008, la centrale a été mise en production avec un débit de 70 l/s à une pression comprise entre 30 et 60 bars. En 2009, un séisme de  $M_L = 2.7$  s'est produit juste après l'arrêt de la centrale pour maintenance. Il a été localisé à 1,5-2 km de la centrale à une profondeur entre 2,3 et 3,3 km.

La production a repris en novembre 2009 avec une pression maximale abaissée à 45 bars.

#### Résumé des paramètres :

- **Type de roche :** socle granitique
- **Type de réservoir :** réservoir fracturé
- **Profondeur :** 3.3 km
- **Type d'opération :** exploitation
- **Type d'environnement :** ville
- **Volume circulé :** Non connu
- **Débit :** 70 l/s
- **Pression maximale atteinte en tête de puits :** 50 bar
- **Durée :** 13 ans
- **Magnitude maximale atteinte :**  $M_L = 2.7$

### 5.6 INSHEIM (ALLEMAGNE DEPUIS 2012)

La centrale géothermique d'Insheim (Allemagne dans le Palatinat) a été mise en service en 2012. Les puits ont été forés à 4 km de profondeur. Elle est maintenant opérationnelle. La localisation de la microsismicité induite durant l'exploitation de la centrale d'Insheim se situe



principalement autour du puits injecteur. Les premiers événements microsismiques ont été observés 7 jours après le début de l'exploitation. Une première période d'activité sismique, avec 84 événements induits détectés, s'est produite en novembre 2012, après moins d'un mois de fonctionnement. A partir de décembre 2012, le taux de sismicité a diminué. Les événements induits les plus importants observés dans le réservoir d'Insheim ont atteint des magnitudes comprises entre 2,1 et 2,4.

#### Résumé des paramètres :

- **Type de roche** : socle granitique
- **Type de réservoir** : réservoir fracturé
- **Profondeur** : 4 km
- **Type d'opération** : exploitation
- **Type d'environnement** : rural
- **Volume circulé** : > 10 000 m<sup>3</sup>, inconnu précisément
- **Débit** : 60 l/s
- **Pression maximale atteinte en tête de puits** : inconnue
- **Durée** : 10 ans
- **Magnitude maximale atteinte** :  $M_L = 2.4$

### 5.7 VENDENHEIM (FRANCE 2019-2020)

Le site de Vendenheim est situé dans la banlieue Nord de Strasbourg (France). En 2018-2019, un doublet de puits a été foré et cible une faille dans le socle granitique à ~5 km de profondeur.

En octobre 2020, des tests hydrauliques ont été lancés et un groupe d'événements sismiques avec des séismes ressentis s'est développé près des puits géothermiques. Il comprend le plus grand événement ( $M_L = 3.6$ ) qui a été induit le 4 décembre 2020 et a provoqué notamment l'édition d'un arrêté préfectoral visant l'arrêt du projet. En juin 2021, après la phase retour à l'équilibre du puits après l'arrêt des injections, un séisme de  $M_L = 3.9$  a encore été senti. Depuis lors et suite à l'arrêt de toute opération sur le site de Vendenheim, la sismicité dans cette zone s'est interrompue.

#### Résumé des paramètres :

- **Type de roche** : socle granitique
- **Type de réservoir** : réservoir fracturé
- **Profondeur** : 5 km
- **Type d'opération** : tests hydrauliques
- **Type d'environnement** : urbain dense
- **Volume circulé** : Non connu
- **Débit** : Non connu
- **Pression maximale atteinte en tête de puits** : inconnue
- **Durée** : plusieurs semaines
- **Magnitude maximale atteinte** :  $M_L = 3.9$

### 5.8 ILLKIRCH (FRANCE 2019-2020)

Le projet d'Illkirch porté par Électricité de Strasbourg vise à construire une centrale géothermique à Illkirch-Graffenstaden, au Sud de Strasbourg, afin d'alimenter un nouveau

réseau de chaleur de l'Eurométropole ainsi que de produire de l'électricité dont la production sera modulée en fonction de la demande saisonnière en chaleur. Au global, le projet vise à une capacité de 26 MWth. A l'issue du premier forage GIL-1 au Sud, le puits a bien recoupé une faille majeure ayant un fort rejet vertical à une profondeur proche de l'attendu. Cette structure met en contact les grès du Buntsandstein et le granite Paléozoïque, ce qui correspond à la cible conceptuelle initiale. Néanmoins, à l'issue des tests hydrauliques, le puits n'avait pas la productivité attendue. Un programme de stimulation chimique et hydraulique a alors été mis en œuvre en 2019 et 2020. Durant toutes les opérations de forage, tests de puits et stimulations, un protocole strict de monitoring et de prévention de la sismicité induite a été mis en œuvre, afin de limiter le niveau de micro-sismicité induite généré par ces opérations. Ce protocole a permis de garder le niveau de sismicité induite très faible durant toutes les opérations. La magnitude maximale enregistrée durant ces tests et stimulations a été de  $M_L=1.6$ . Aucun événement n'a été ressenti en surface.

Actuellement, le projet d'Illkirch est suspendu par Arrêté Préfectoral suite aux événements sismiques ressentis sur le projet de géothermie de Vendenheim, au Nord de Strasbourg.

#### Résumé des paramètres :

- **Type de roche** : Grès du Buntsandstein / socle granitique
- **Type de réservoir** : réservoir fracturé
- **Profondeur** : 3.3 km
- **Type d'opération** : stimulations
- **Type d'environnement** : péri-urbain
- **Volume injecté** : 5 000 m<sup>3</sup>
- **Débit** : paliers de 7 à 80 l/s
- **Pression maximale atteinte en tête de puits** : 100 bar
- **Durée** : plusieurs jours
- **Magnitude maximale atteinte** :  $M_L=1.6$

## 6 ANALYSE DU RISQUE SISMOLOGIQUE

### 6.1 EVALUATION DE L'ALEA SISMIQUE EN AMONT DU PROJET

L'évaluation de l'aléa sismique se base sur le type de réservoir, la connaissance de la géologie et hydrogéologie locale, sur la connaissance du réservoir visé, ainsi que sur le REX des sites voisins, notamment Soultz-sous-Forêts et Rittershoffen. Ce REX, exposé dans les sections précédentes ce de document met en évidence les caractéristiques principales de la sismicité enregistrées au cours des opérations (e.g. caractéristiques spatio-temporelles de la sismicité, principaux phénomènes déclenchants redoutés, distribution des magnitudes maximales, etc.) et le compare aux caractéristiques du réservoir ciblé dans ce projet, ainsi qu'avec les choix opérationnels au cours du temps.

- Cette analyse permet de définir les éléments et les facteurs qui peuvent jouer un rôle important dans l'aléa sismique :
- Type de réservoir ciblé : le réservoir ciblé est un réservoir fracturé et non poreux.
- Présence de failles majeures : des failles régionales majeures ont été identifiées grâce à la sismique 3D.
- État de chargement de contrainte des structures : certaines structures ont une direction et un pendage plus favorable au cisaillement.
- État de connaissance du réservoir : les données géophysiques et de puits disponibles sur la zone permettent un haut degré de connaissance du réservoir. Ces données sont exposées dans le document confidentiel « *Compléments techniques relatifs à la maîtrise de la sismicité* », qui a été expertisé par l'INERIS.
- État de compréhension des processus : de nombreuses études déjà réalisées et/ou en cours de réalisation permettent une bonne compréhension du réservoir. Ces études et leurs résultats sont exposés dans le document confidentiel « *Compléments techniques relatifs à la maîtrise de la sismicité* ».
- Connaissance de la sismicité naturelle et induite dans la zone : élevée grâce à un réseau installé depuis 2002 et grâce à l'opération des 2 centrales de Soultz-sous-Forêts et Rittershoffen, qui n'ont pas généré de sismicité élevée.
- Interactions potentielles entre sites voisins en termes d'aléa de sismicité induite : les interactions avec les sites voisins sont limitées (le site le plus proche étant le site de Soultz-sous-Forêts) et traitées dans le document confidentiel « *Compléments techniques relatifs à la maîtrise de la sismicité* ». La question de l'interaction des nouveaux puits avec les puits déjà existant à Rittershoffen est prise en compte lors de la définition des cibles des puits et est intégrée à la gestion du réservoir.

De ce fait, le niveau d'aléa sismique du projet peut être considéré comme modéré en amont du début des opérations (la nature du projet, en milieu fracturé étant pondérée par une profondeur de forage réduite et une connaissance initiale importante du réservoir). C'est pourquoi de nombreuses mesures visant à réduire cet aléa, avant le démarrage du projet et pendant sa réalisation sont prévues et détaillées dans ce document. Ce niveau d'aléa sera éventuellement revu à la baisse au cours du projet et notamment en fonction des observations et des stratégies opérationnelles mises en place sur les puits.

## 6.2 IDENTIFICATION DES RISQUES SISMOLOGIQUES

### 6.2.1 INFLUENCE DE LA PROFONDEUR

D'un point de vue factuel, on ne peut que constater, qu'à l'exception du projet de Landau les projets de géothermie situés dans le Fossé rhénan ayant atteint une profondeur supérieure à 4 km, ont pu générer une sismicité anthropique ayant été ressentie en surface.

Ainsi l'ensemble des projets de géothermie ayant atteint une profondeur supérieure à 4 km ou plus dans le socle granitique fracturé du Fossé rhénan ont donné lieu à de la sismicité ressentie en surface lors d'injections à haute pression. A contrario, certains autres projets n'ont jamais donné lieu à de la sismicité ressentie comme :

- A Soultz-sous-Forêts lors du développement du réservoir à 3,5 km de profondeur (TVD) entre GPK-1 et GPK-2 en 1993, 1995 et 1996
- A Rittershoffen lors du développement du puits GRT-1 ayant un réservoir situé à environ 2,5 km de profondeur TVD.
- Plus récemment à Illkirch lors des tests d'injection en 2019 ou 2020 afin de développer un réservoir naturellement fracturé situé à 3,3 km de profondeur TVD.

La profondeur des puits semble donc avoir un caractère important en relation avec la génération de sismicité induite ressentie. La Figure 3 montre la profondeur des séismes naturels observés par le réseau national de surveillance sismique (ReNaSS) entre 2008 et 2021. La plupart des séismes naturels se produisent à une profondeur comprise entre 4 et 15 km (zone sismogénique). Par conséquent, des puits à des profondeurs supérieures à 4 km sont plus susceptibles d'induire, voire de déclencher des événements pouvant être ressentis par les populations avoisinantes.

Il est probable qu'une sismicité importante soit liée à la profondeur des puits par rapport au toit du socle, et non à la profondeur absolue des puits. Dans ce premier cas, il s'agit de limiter la profondeur du puits par rapport au toit du socle. Le toit du socle étant situé à une profondeur de l'ordre de 1.5 à 2km sur la zone étudiée, la limitation des puits à des profondeurs de 3.5 km permet ainsi de limiter la distance au socle du puits à un maximum de 2 km, ce qui permet ainsi de limiter le risque sismologique induit.

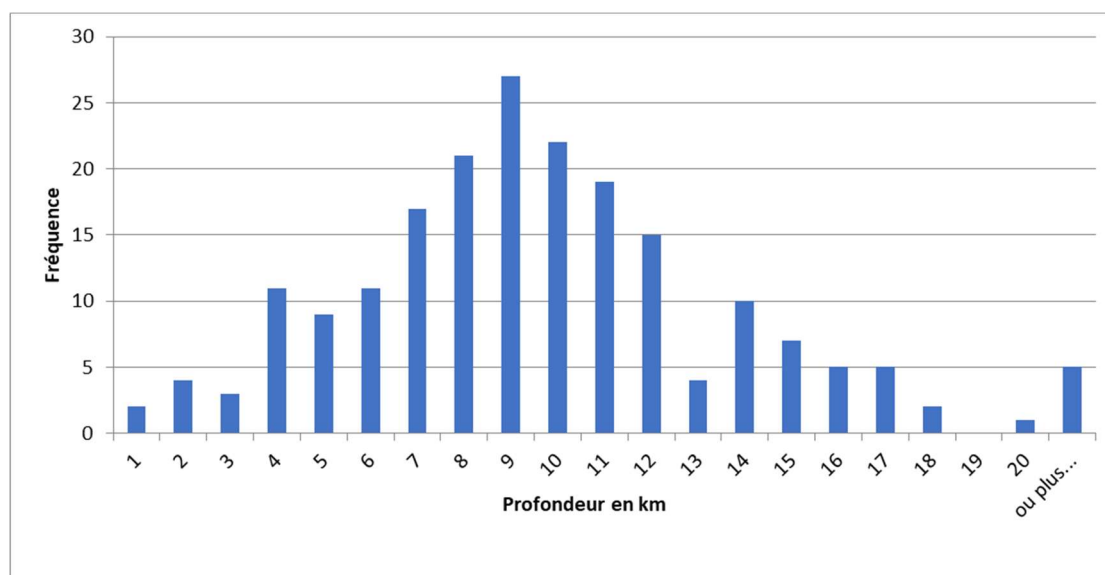


Figure 3 : Profondeur des séismes naturels dans le Fossé rhénan supérieur entre 2008 et 2021 (source ReNaSS)

Déjà au début des années 2010, lors de la conceptualisation du projet de Rittershoffen et suite au retour d'expérience du projet de Soultz-sous-Forêts, il avait été jugé inutile de continuer à réaliser des projets à 5 km de profondeur et cela pour plusieurs aspects :

- Le profil de température indiquant une zone de convection entre 3500 m et 1000 m, engendrant un gain très faible en température sur toute cette tranche de profondeur (Figure 4) ;
- L'aléa sismique accru à des profondeurs supérieures à 3500m ;
- Le coup exponentiel des forages en fonction de la profondeur.

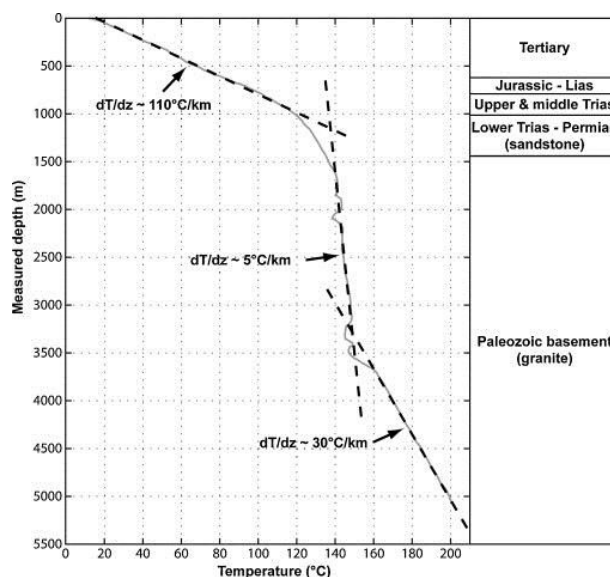


Figure 4 : Profil de température en fonction de la profondeur à Soultz-sous-Forêts

**C'est pourquoi Électricité de Strasbourg s'engage à ne pas réaliser de puits de profondeur supérieure à 3.5 km TVD (soit moins de 2km sous le toit du socle) afin de limiter cet effet, conformément à la DAOTM déjà déposée.**

### 6.2.2 INFLUENCE DE LA PRESSION D'INJECTION ET DU VOLUME INJECTE

Il apparait également à la lecture du Tableau 4 que la pression d'injection, associée à un volume important injecté soit un facteur de risque important. En effet les magnitudes les plus fortes sont associées à des projets ayant dépassé une pression d'injection de 100 bar et un volume supérieur à 10 000 m<sup>3</sup>.

### 6.2.3 INFLUENCE DE REPOSE DU RESERVOIR ET DE LA CONNEXION DU PUIXS AU RESERVOIR

La réponse du réservoir (ouvert ou fermé) ainsi que la connexion au réservoir semblent également jouer un rôle. En effet les événements observés à Soultz-sous-Forêts et à Bâle étaient liés à des réservoirs fermés et des puits mal connectés au réservoir. D'un autre côté, les sites de Rittershoffen et Illkirch montrent des réservoirs ouverts et des puits bien connectés, et n'ont pas généré de sismicité.

## 6.3 ANALYSE PRIMAIRE DU RISQUE

L'analyse du risque sismologique réalisée ici suit la méthodologie d'analyse de risque classique, telle qu'appliquée dans l'étude de risques générale du projet. Les grilles d'appréciation de probabilité et de gravité sont inchangées.

L'Analyse Préliminaire des Risques nécessite l'identification des éléments dangereux du système. L'analyse doit aboutir à une estimation des risques en vue de les hiérarchiser. Cette estimation est effectuée à partir :

- D'un niveau de probabilité que le dommage survienne ;
- D'un niveau de gravité de ce dommage.

### 6.3.1 PROBABILITE D'APPARITION

La grille d'appréciation de la probabilité d'apparition du dommage, dans ce cas la probabilité d'occurrence d'un séisme de magnitude donnée est montrée dans le Tableau 5.

**Tableau 5 : Appréciation qualitative de l'apparition d'un dommage (probabilité d'occurrence d'un séisme)**

Probabilité	Appréciation qualitative
<b>A</b>	Très forte
<b>B</b>	Forte
<b>C</b>	Moyenne
<b>D</b>	Faible
<b>E</b>	Très faible

**6.3.2 GRAVITE**

La grille d'appréciation du niveau de gravité d'un dommage est donnée dans le Tableau 6.

**Tableau 6 : Appréciation du niveau de gravité d'un dommage**

<b>Gravité</b>	<b>Personnes</b>	<b>Environnement</b>	<b>Biens</b>
<b>1 (modéré)</b>	Non ressenti	Pas d'effets significatifs	Pas d'effets significatifs
<b>2 (sérieux)</b>	Faiblement ressenti	Pas d'effets significatifs	Pas d'effets significatifs
<b>3 (important)</b>	Fortement ressenti	Impacts mineurs (perturbation temporaire)	Dommmages non-structuraux sur les bâtis
<b>4 (catastrophique)</b>	Personnes blessées	Impacts majeurs faible perturbation du paysage	Dommmages structurels sur les bâtis
<b>5 (désastreux)</b>	Personnes tuées	Modification significative du paysage	Destructions de bâtiments

### 6.3.3 HIERARCHISATION DES RISQUES

La cotation des risques est reportée dans une grille de criticité.

Cette grille permet de représenter graphiquement les risques présents pour chaque installation ou activité en reportant le repère placé dans la première colonne des tableaux d'analyse de risques. La grille se présente en 3 parties (voir Figure 5) :

- Une partie inférieure où le risque, en fonction de sa probabilité d'apparition et de sa gravité, est considéré « autorisé »,
- Une partie intermédiaire où le risque, apprécié selon les mêmes critères, est dit « acceptable » avec un suivi des barrières de sécurité,
- Une partie supérieure où le risque est considéré « critique », l'événement en question est alors retenu pour l'évaluation de l'intensité des effets.

A Courant					
B Probable					
C Improbable					
D Très Improbable					
E Extrêmement improbable					
Probabilité Gravité	1 Faible	2 Grave	3 Très grave	4 Catastro- phique	5 Désas- treux

Figure 5 : Grille de cotation des risques. En bleu clair, risque autorisé ; en bleu intermédiaire, risque acceptable ; en bleu foncé, risque critique.



#### 6.4 SCENARIOS D'ANALYSE DU RISQUE SISMOLOGIQUE

L'analyse de risques est présentée ci-dessous. 3 cas de projets sont étudiés :

- **Cas 0** : ce cas présente une analyse des risques pour un projet de géothermie profonde ne prenant pas en compte le retour d'expérience des différents projets (puits très profond dans le socle granitique uniquement, injections à haute pression, volumes injectés importants, etc.). Il s'agit d'un cas qui maximise les risques. L'objectif est de valider la méthodologie proposée en confrontant les résultats obtenus avec les observations.
- **Cas 1** : ce cas est basé sur les données du nouveau projet à Rittershoffen étudié (profondeur des puits limitée, identification des zones perméables, etc.) mais ne prend pas en compte de stratégie opérationnelle de réduction des risques. L'objectif est d'estimer les risques inhérents au projet sans mise en œuvre de stratégie de réduction des risques.
- **Cas 2** : ce cas est basé sur les données du nouveau projet à Rittershoffen étudié (profondeur des puits limitée, identification des zones perméables, etc.) et prend cette fois en compte les effets de la mise en œuvre de la stratégie opérationnelle de réduction des risques, telle qu'exposée dans le document RNT (études préliminaires poussées, mise à jour des études pendant la réalisation afin de prendre en compte les informations à chaque étape, procédure de tests adaptée, avec changements brusques de pression évités et adaptation du volume injecté en fonction de la réaction du réservoir, surveillance en temps réel de la sismicité et multiples critères de réaction, etc..)

Les hypothèses relatives à chaque cas étudié sont détaillées dans la section suivante.

Pour chaque cas de projet, le risque est analysé pour 3 risques :

- **Risque 1** : occurrence d'un séisme de magnitude supérieure à 3.5 dans un rayon de 5 km autour des puits. Ce scénario est représentatif des événements observés à proximité du site de forage de Vendenheim à coté de Strasbourg en 2019-2020. Dans ce scénario, le séisme serait fortement ressenti en surface et des dommages non-structuraux des bâtiments sont susceptibles d'être générés.
- **Risque 2** : occurrence d'un séisme de magnitude comprise entre 2.5 et 3.5 dans un rayon de 2 km autour des puits. Ce scénario est représentatif de ce qu'il s'est passé à Landau en 2009. Dans ce scénario, peu de dommages aux bâtiments sont susceptibles d'être générés, mais ce séisme serait ressenti en surface.
- **Risque 3** : occurrence d'un séisme de magnitude comprise entre 1.5 et 2.5 dans un rayon de 1 km autour des puits. Ce scénario est représentatif de la sismicité maximale susceptible d'être observé sur les sites de Illkirch, Rittershoffen et Soultz-sous-Forêts. Dans ce scénario, aucun dommage n'est attendu mais ce séisme serait possiblement ressenti en surface. Dans ce scénario de risque, les vibrations générées dépasseraient les seuils réglementaires et impliqueraient une réaction opérationnelle (diminution ou arrêt provisoire des injections).

Nota : Les événements sismologiques de 2024 à Rittershoffen ont conduit à ré-évaluer la valeur du seuil de passage du risque 3 au risque 2, afin de mettre en cohérence le descriptif du scénario de risque 3 avec la typologie des événements de 2024, qui sont assimilables à

cette catégorie. Ces évènements de 2024 ont par ailleurs montré que les niveaux de PGV atteints à des magnitudes de 2.2 sont bien inférieurs aux seuils susceptibles de générer de légers dommages aux bâtiments comme décrit dans le risque 2.

## 6.5 ANALYSE DU RISQUE SISMOLOGIQUE

### 6.5.1 CAS 0

Ce cas analyse le risque dans le cas d'un projet sans prise en compte du risque sismologique dans la planification, ni mise en œuvre d'une stratégie de réduction des risques. Les hypothèses de ce scénario de projet sont les suivantes :

- Puits à 5 km de profondeur ;
- Puits visant le socle granitique uniquement ;
- Absence d'études préliminaires approfondies, ne permettant pas de mettre en évidence des indicateurs clairs de perméabilité au niveau des cibles visées, impliquant la mise en œuvre d'opérations de développement du puits avec des injections hautes pressions ;
- Injection d'un volume de fluide injecté important (supérieur de plus de 10 000 m<sup>3</sup> au volume produit) ;
- Changements de pression brusques (arrêts brutaux)
- Pas de mise à jour des études en cours de projet, et prise en compte des observations en forage et lors des premiers tests insuffisante (pas de connexion au réservoir naturel - réservoir fermé)
- Stratégie opérationnelle de réduction du risque sismologique insuffisante (tests de production insuffisants, pas d'analyse du type et des limites du réservoir, absence de tests d'injection, non-respect des seuils, logigramme décisionnel inadapté ou absent, réseau sismologique inadapté, etc.)

Dans ce cas, l'analyse de risques montre les résultats suivants pour les 3 scénarios :

- **Risque 1 ( $M_L > 3.5$  dans un rayon de 5km)**
  - L'occurrence d'un tel événement est estimée « Probable », au vu du retour d'expérience des projets de Bâle et Vendenheim.
  - La gravité est estimée « Très grave » ; en effet de nombreuses personnes ressentiraient ce séisme, et des dommages sont attendus aux bâtiments.
- **Risque 2 ( $2.5 < M_L < 3.5$  dans un rayon de 2km)**
  - L'occurrence d'un tel événement est estimée « Très probable », au vu du retour d'expérience des projets de Landau, Insheim et Soultz-sous-Forêts en 2003.
  - La gravité est estimée « grave » ; en effet un certain nombre de personnes ressentiraient ce séisme, et des dommages très faibles et non structurels sont possibles aux bâtiments vulnérables.
- **Risque 3 ( $1.5 < M_L < 2.5$  dans un rayon de 1km)**
  - L'occurrence d'un tel événement est estimée « Très probable », au vu du retour d'expérience général.
  - La gravité est estimée « faible » ; en effet cet événement ne serait pas senti et ne générerait pas de dommages aux bâtiments.

L'analyse de risque pour ce cas est présentée en Figure 6. Cette analyse montre que 2 des risques sont considérés comme critiques, ce qui est confirmé par les observations liées au site de Vendenheim en 2019 et 2020.

A Courant	R3 ●	R2 ●			
B Probable			R1 ●		
C Improbable					
D Très Improbable					
E Extrêmement improbable					
Probabilité Gravité	1 Faible	2 Grave	3 Très grave	4 Catastro- phique	5 Désas- treux

Figure 6 : Analyse de risque pour le cas 0. R1 =  $ML > 3.5$  dans un rayon de 5km ; R2 =  $2.5 < ML < 3.5$  dans un rayon de 2km ; R3 =  $1.5 < ML < 2.5$  dans un rayon de 1km.

### 6.5.2 CAS 1

Ce cas analyse le risque dans le cas d'un projet similaire au projet proposé, c'est-à-dire prenant en compte le risque sismologique dans la planification, mais sans mise en œuvre d'une stratégie opérationnelle de réduction des risques. Les hypothèses de ce scénario de projet sont les suivantes :

- Puits à 3.5 km de profondeur maximum ;
- Puits visant la partie inférieure des couches sédimentaires et le socle granitique ;

- Présence d'études préliminaires approfondies, qui mettent en évidence des indicateurs clair de perméabilité au niveau des cibles visées, permettant de limiter les opérations de développement du puits avec des injections hautes pression ;
- Injection d'un volume de fluide injecté important (supérieur de plus de 10 000 m<sup>3</sup> au volume produit) ;
- Changements de pression brusques (arrêts brutaux) ;
- Pas de mise à jour des études en cours de projet, et prise en compte des observations en forage et lors des premiers tests insuffisantes (pas de connexion au réservoir naturel - réservoir fermé) ;
- Stratégie opérationnelle de réduction du risque sismologique insuffisante (tests de production insuffisants, pas d'analyse du type et des limites du réservoir, absence de tests d'injection, non-respect des seuils, logigramme décisionnel inadapté ou absent, réseau sismologique inadapté, etc.).

Dans ce cas, l'analyse de risques montre les résultats suivants pour les 3 scénarios :

- **Risque 1 ( $M_L > 3.5$  dans un rayon de 5km)**
  - L'occurrence d'un tel événement est estimée « Improbable », au vu du retour d'expérience des projets ; en effet aucun projet à une profondeur inférieure à 3.5 km n'a généré de telles magnitudes.
  - La gravité reste inchangée et est estimée « Très grave » ; en effet de nombreuses personnes ressentiraient ce séisme, et des dommages sont attendus aux bâtiments.
- **Risque 2 ( $2.5 < M_L < 3.5$  dans un rayon de 2km)**
  - L'occurrence d'un tel événement est estimée « Probable », au vu du retour d'expérience des projets de Landau et Insheim.
  - La gravité reste inchangée et est estimée « grave » ; en effet un certain nombre de personnes ressentiraient ce séisme, et des dommages limités sont attendus aux bâtiments.
- **Risque 3 ( $1.5 < M_L < 2.5$  dans un rayon de 1km)**
  - L'occurrence d'un tel événement est estimée « Très probable », au vu du retour d'expérience général (inchangé).
  - La gravité est estimée « faible » (inchangé) ; en effet cet événement ne serait pas ressenti et ne génèrerait pas de dommages aux bâtiments.

L'analyse de risque pour ce cas est présentée en Figure 7. Cette analyse montre que la limitation de la profondeur de forage et la réalisation d'études préliminaires détaillées, visant notamment à identifier les zones perméables permet de réduire la probabilité d'occurrence des risques 1 et 2.

A Courant	R3 ●				
B Probable		R2 ●			
C Improbable			R1 ●		
D Très Improbable					
E Extrêmement improbable					
Probabilité Gravité	1 Faible	2 Grave	3 Très grave	4 Catastro- phique	5 Désas- treux

Figure 7 : Analyse de risque pour le cas 1. R1 =  $ML > 3.5$  dans un rayon de 5km ; R2 =  $2.5 < ML < 3.5$  dans un rayon de 2km ; R3 =  $1.5 < ML < 2.5$  dans un rayon de 1km.

### 6.5.3 CAS 2

Ce cas analyse le risque dans le cas d'un projet similaire au projet proposé, c'est-à-dire prenant en compte le risque sismologique dans la planification, avec mise en œuvre d'une stratégie opérationnelle de réduction des risques similaire à celle proposée dans le cadre de ce projet. Les hypothèses de ce scénario de projet sont les suivantes :

- Puits à 3.5 km de profondeur maximum ;
- Puits visant la partie inférieure des couches sédimentaires et le socle granitique uniquement ;
- Présence d'études préliminaires approfondies, qui mettent en évidence des indicateurs clairs de perméabilité au niveau des cibles visées, permettant de limiter les opérations de développement du puits avec des injections hautes pression ;
- Lors des phases de tests et développement de puits, limitation du volume injecté par rapport au volume produit ;

- Limitation des changements brusques de pression lors des opérations ;
- Déploiement d'un réseau de surveillance permettant d'abaisser les seuils de détection et donc d'anticiper une hausse du taux de sismicité ;
- Mise à jour des études en cours de projet, et prise en compte des observations en forage afin de maximiser la perméabilité naturelle du réservoir à la cible et d'adapter les opérations de test du puits ;
- Stratégie opérationnelle de réduction du risque sismologique multicritères mise en œuvre par du personnel expérimenté, incluant :
  - La mise en place d'un réseau sismologique de surveillance adapté et de qualité ;
  - La réalisation avant toute opération de tests de production ;
  - Une analyse du type et des limites du réservoir permettant de confirmer les seuils de volume et pression préalablement définis ;
  - La réalisation préliminaire de tests d'injection permettant de quantifier la réponse sismologique du réservoir ;
  - Le respect des seuils fixés ;
  - Le respect d'un logigramme décisionnel multicritère précisant les chaînes de réaction ;
  - L'arrêt des opérations en cas d'identification d'un risque avant d'avoir atteint les seuils réglementaires.

Dans ce cas, l'analyse de risques montre les résultats suivants pour les 3 scénarios :

- **Risque 1 ( $M_L > 3.5$  dans un rayon de 5km)**
  - L'occurrence d'un tel événement est estimée « très improbable », au vu du retour d'expérience des projets ; en effet aucun projet à une profondeur inférieure à 3.5 km n'a généré de telles magnitudes. D'autre part, les observations réalisées pendant la réalisation ont pour objet de s'assurer que le réservoir est connecté et ainsi que la pression reste limitée et peut se diffuser sans obstacles dans le réservoir.
  - La gravité reste inchangée et est estimée « Très grave » ; en effet de nombreuses personnes ressentiraient ce séisme, et des dommages sont attendus aux bâtiments.
- **Risque 2 ( $2.5 < M_L < 3.5$  dans un rayon de 2km)**
  - L'occurrence d'un tel événement est estimée « Improbable », au vu du retour d'expérience des projets de Soultz-sous-Forêts (depuis la mise en exploitation), Rittershoffen et Illkirch, qui visent des profondeurs similaires et qui ont mis en œuvre la même stratégie de réduction du risque.
  - La gravité reste inchangée et est estimée « grave » ; en effet un certain nombre de personnes ressentiraient ce séisme, et des dommages limités sont attendus aux bâtiments.
- **Risque 3 ( $1.5 < M_L < 2.5$  dans un rayon de 1km)**
  - L'occurrence d'un tel événement est estimée « Probable », au vu du retour d'expérience général. En effet le retour d'expérience sur les sites de Rittershoffen et de Soultz-sous-Forêts montrent que l'occurrence d'un tel événement est rare à Rittershoffen (en général moins d'une fois par an) et très

rare à Soultz-sous-Forêts (pas d'événement d'une magnitude supérieure à 1.5 observé depuis avril 2019)

- La gravité est estimée « faible » (inchangé) ; en effet **cet événement serait possiblement ressenti mais ne générerait pas de dommages aux bâtiments.**

L'analyse de risque pour ce cas est présentée en Figure 8. Cette analyse montre que la prise en compte des observations réalisées pendant le forage et les premiers tests de puits, ainsi que la mise en œuvre d'une stratégie de réduction du risque similaire à Rittershoffen et à Illkirch, permet de réduire la probabilité d'occurrence des risques 1 et 2.

A Courant					
B Probable	R3 ●				
C Improbable		R2 ●			
D Très Improbable			R1 ●		
E Extrêmement improbable					
Probabilité Gravité	1 Faible	2 Grave	3 Très grave	4 Catastro- phique	5 Désas- treux

Figure 8 : Analyse de risque pour le cas 2. R1 =  $ML > 3.5$  dans un rayon de 5km ; R2 =  $2.5 < ML < 3.5$  dans un rayon de 2km ; R3 =  $1.5 < ML < 2.5$  dans un rayon de 1km.

## 7 SYNTHÈSE DU RISQUE SISMOLOGIQUE

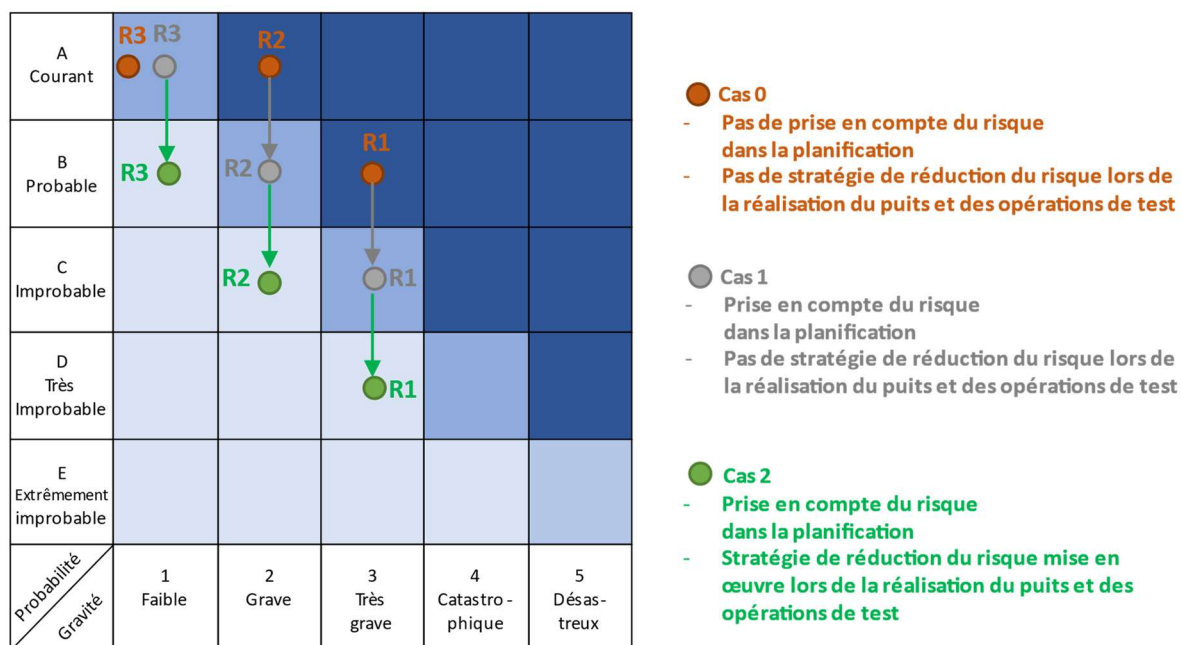
Il convient de rappeler ici que l'aléa sismique du projet peut être considéré comme modéré en amont du début des opérations (la nature du projet, en milieu fracturé étant pondérée par une profondeur de forage réduite et une connaissance initiale importante du réservoir). C'est pourquoi de nombreuses mesures visant à réduire cet aléa, avant le démarrage du projet et pendant sa réalisation sont prévues. Ce niveau d'aléa sera réévalué en cours de projet en fonction des observations.

Ainsi, les deux types de mesures de mitigations mises en œuvre permettent de réduire significativement le risque sismologique lié aux opérations (voir Figure 9). Ces 2 types de mesures sont les suivantes :

- Mesures de réduction du risque sismologique prises au stade de la planification du projet, à savoir :
  - Profondeur des puits limitée à 3.5 km, soit à une profondeur verticale sous le toit du socle inférieure à 2 km ;
  - Puits visant les couches sédimentaires et la partie supérieure du socle granitique ;
  - Recherche de zones perméables au niveau des cibles visées, ne nécessitant pas la mise en œuvre d'opérations de développement du puits avec des injections haute pression.
- Mesures de réduction du risque sismologique prises lors de la réalisation du projet, à savoir :
  - Déploiement d'un réseau de surveillance permanent temps-réel six mois avant toute opération de forage, et d'un réseau de surveillance temps-réel temporaire durant les opérations clés (forage, tests, développement du puits, circulation, mise en route de la centrale, ...). Ces réseaux de surveillance permettront d'abaisser les seuils de détection et donc d'anticiper une hausse du taux de sismicité ;
  - Lors des phases de tests et développement de puits, limitation du volume injecté par rapport au volume produit ;
  - Limitation des changements brusques de pression lors des opérations ;
  - Mise à jour des études en cours de projet, et prise en compte des observations en forage afin de maximiser la perméabilité naturelle du réservoir à la cible et d'adapter les opérations de test du puits ;
  - Mise en œuvre d'une stratégie opérationnelle de réduction du risque sismologique multicritères mise en œuvre par du personnel expérimenté, incluant :
    - La réalisation avant toute opération de tests de production ;
    - Une analyse du type et des limites du réservoir permettant de confirmer les seuils de volume et pression préalablement définis ;
    - La réalisation préliminaire de tests d'injection permettant de quantifier la réponse sismologique du réservoir ;
    - Le respect des seuils fixés ;
    - Le respect d'un logigramme décisionnel multicritère précisant les chaînes de réaction ;



- L'arrêt des opérations en cas d'identification d'un risque avant d'avoir atteint les seuils réglementaires.



**Figure 9 : Comparaison des risques pour les 3 cas. R1 =  $ML > 3.5$  dans un rayon de 5km ; R2 =  $2.5 < ML < 3.5$  dans un rayon de 2km ; R3 =  $1.5 < ML < 2.5$  dans un rayon de 1km.**

En synthèse, il est important de souligner plusieurs points permettant une maîtrise accrue du risque sismologique dans le cadre de ce projet :

- Tout d'abord, ce projet sera réalisé dans une zone dont la géologie est connue, grâce aux nombreux puits actuellement en exploitation dans cette zone et grâce à l'imagerie 3D réalisée.
- D'autre part, les mesures de réduction du risque proposées ont déjà montré leur efficacité sur les sites de Rittershoffen et Illkirch, pour lesquels aucun séisme n'a été ressenti pendant les phases de tests.
- Enfin, le retour d'expérience d'autres projets localisés dans le fossé Rhénan est pris en compte par l'intégration de mesures additionnelles (notamment une profondeur de forage moindre, la surveillance de la migration de la sismicité, l'analyse des limites de réservoir et la limitation des volumes injectés lors des phases de tests).