

Dossier comprenant deux demandes conjointes d'ouverture de travaux minier et de permis d'exploitation (DAOTM-PEX)

Mémoire précisant les mesures mises en œuvre et celle envisagées pour connaître la géologie du sous-sol impacté par les travaux et comprendre les phénomènes naturels, notamment sismique susceptibles d'être activés par les travaux

Sommaire

1. Introduction.....	4
2. Généralités sur la sismicité anthropique et focus sur le contexte de la géothermie profonde.....	6
2.1. Généralités.....	6
2.2. Sismicité anthropique dans le cadre de la géothermie profonde	7
2.3. Quelques généralités sur les mécanismes à l'origine de la sismicité dans le cadre de la géothermie profonde.....	8
2.4. Classification et exploitation de la ressource géothermale profonde – liens avec la sismicité induite	9
2.5. Exploitation de la ressource géothermale et approches de stimulation	12
2.6. Phénomènes de sismicités induites dans les Systèmes Aquifères.....	14
2.7. Mesures mises en œuvre pour connaître la géologie du sous-sol impacté par les travaux	15
3. Autres risques potentiels induits par une opération de géothermie profonde	16
4. Conclusions	19

Liste des Figures

Figure 1 : Activités industrielles liées à l'occurrence de sismicité induite (a) et mécanismes physiques associés..... 6

Figure 2 : Mécanismes physiques associés aux activités industrielles induisant de la sismicité induite (b). Les trois extrémités du triangle en (b) indiquent des variations de la pression de pore (Δp), de la contrainte tangentielle ($\Delta \sigma_{\tau}$) et de la contrainte normale ($\Delta \sigma_n$) (source : INERIS)..... 7

Figure 3 : Représentation schématique des principaux mécanismes à l'origine de la sismicité induite dans les systèmes géothermiques..... 9

Figure 4 : Schéma simplifié des différents types de systèmes géothermiques (source : INERIS)..... 11

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Synthèse des caractéristiques géologiques et tectoniques pour différents types de réservoirs géothermiques. La couleur de chaque ligne du tableau indique le mécanisme à la base du transfert de chaleur dans chaque réservoir : rose pour les réservoirs à convection et bleu pour les réservoirs à conduction (modifié d'après Moeck, 2014)..... 12

1. Introduction

La présente Annexe est le mémoire précisant les mesures mises en œuvre et celles envisagées pour connaître la géologie du sous-sol impacté par les travaux et comprendre les phénomènes naturels, notamment sismiques, susceptibles d'être activés par les travaux, en réponse à l'article 74 de la LOI n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets.

La géothermie profonde consiste à exploiter la ressource géothermale du sous-sol, à des profondeurs généralement supérieures ou égales à 1000 mètres, pour la production d'électricité et/ou de chaleur. Les réservoirs géothermiques présentent des caractéristiques assez différentes selon l'environnement géologique et tectonique et l'on distingue généralement trois grandes catégories de systèmes géothermiques :

- ▶ les aquifères en zones sédimentaires où le fluide géothermal, généralement en phase liquide, présente des températures variables entre environ 30°C et 150°C. **Les projets dans le Bassin Parisien et le Bassin aquitain s'inscrivent dans cette catégorie.**
- ▶ les réservoirs à dominante vapeur et liquide mixte, en roches sédimentaires, volcaniques ou métamorphiques fracturées, à haute température (> 200°C), associés aux phénomènes volcaniques (avec ou sans magmatisme) ;
- ▶ les réservoirs en roches cristallines (socle) ou mixtes, denses et à haute température (entre 150°C et 200°C) caractérisés par l'absence ou par des volumes relativement faibles de fluide géothermal.

Les technologies nécessaires à l'exploitation de la ressource géothermale sont variables selon le type de réservoir cible, mais toutes requièrent la réalisation d'un ou plusieurs forages pour remonter le fluide géothermal à la surface, ainsi que d'un ou plusieurs puits pour l'injection ou la réinjection dans le réservoir.

Le projet se situe sur la commune du Chesnay-Rocquencourt. Dans le cadre de ce projet, deux doublets géothermiques multidrains seront réalisés dans le Bassin Parisien qui est un bassin sédimentaire. Il s'agit d'un système de formation rocheuse sédimentaire peu profonde (1 – 4 km) et perméable où le fluide géothermal (30 – 150°C) peut circuler naturellement grâce aux failles et fractures existantes ou par porosité du milieu, permettant le transfert de chaleur par conduction¹. Ce type de systèmes géothermiques se retrouve généralement dans les régions tectoniques passives, sans volcanisme ou activité tectonique récente.

Comme d'autres activités industrielles d'exploitation du sous-sol, la géothermie profonde peut conduire à l'occurrence d'événements sismiques d'origine anthropique, c'est-à-dire de séismes non tectoniques se développant en réponse aux opérations humaines. **Cette sismicité, inhérente au processus d'exploitation de la ressource géothermale, est généralement de faible magnitude ($M < 2$).** Cependant, dans certains cas, des événements de magnitude plus importante, parfois ressentis en surface, peuvent être observés. A titre d'exemple, les essais de mise en service du projet Fonroche à Vendenheim (67) auraient entraîné des séismes, a priori induits, au cours des années 2019 et 2020

¹ Le transfert d'énergie thermique est provoqué par une différence de température entre deux zones du réservoir et se réalise sans déplacement de matière.

(séismes des 28 octobre et 12 novembre 2019 à Strasbourg, des 4 et 25 décembre 2020 à Vendenheim).

Outre les risques de sismicité induite, d'autres risques naturels sont susceptibles d'être activés ou engendrés par des travaux de forage de géothermie profonde et notamment :

- ▶ L'éruption de fluides souterrains en surface,
- ▶ La fuite ou le débordement d'un réservoir en surface,
- ▶ Une fuite sur le circuit primaire ou secondaire,
- ▶ L'émission d'un volume excessif de gaz dissous,
- ▶ La mise en communication d'aquifères,
- ▶ L'intrusion de fluide dans un aquifère,
- ▶ La surrection ou soulèvement de la surface du sol,
- ▶ La subsidence ou l'abaissement de la surface du sol,
- ▶ Un glissement de terrain

Pour mémoire, il est rappelé que le projet de géothermie du Chesnay-Rocquencourt, consiste à forer deux doublets géothermiques en multidrains, pour l'exploitation du Dogger.

En outre, **le contexte géologique du projet de géothermie du Chesnay-Rocquencourt est très bien appréhendé par la connaissance très précise du sous-sol** grâce au retour d'expérience dans le Bassin Parisien et aux coupes géologiques traversant la zone d'étude. Les travaux de cet ouvrage n'ont en parallèle mis en évidence **aucune problématique listées plus haut lors de la réalisation des travaux et lors de la surveillance des ouvrages depuis.**

2. Généralités sur la sismicité anthropique et focus sur le contexte de la géothermie profonde

Ce chapitre est issu des travaux récents de l'INERIS²

2.1. Généralités

L'occurrence d'événements sismiques en réponse aux activités anthropiques est un phénomène observé pour différents types d'opérations industrielles tels que (Figure 1) :

- ▶ l'exploitation des hydrocarbures (I),
- ▶ le gaz de schiste (II)
- ▶ la ressource géothermale (III),
- ▶ l'exploitation minière (IV), en surface et en souterrain,
- ▶ le stockage de CO₂ (V)
- ▶ les barrages (VI).

En effet, **toutes ces activités anthropiques induisent des modifications thermo-hydro-mécaniques** dans le milieu environnant qui peuvent générer des **phénomènes de rupture** et conduire à l'occurrence **événements sismiques**. Généralement, la sismicité anthropique est liée à une **modification de l'état de contrainte et/ou de la pression de pore** en réponse aux activités humaines.

Les mécanismes dominants peuvent être distingués en fonction du type d'activité industrielle (Figure 2).

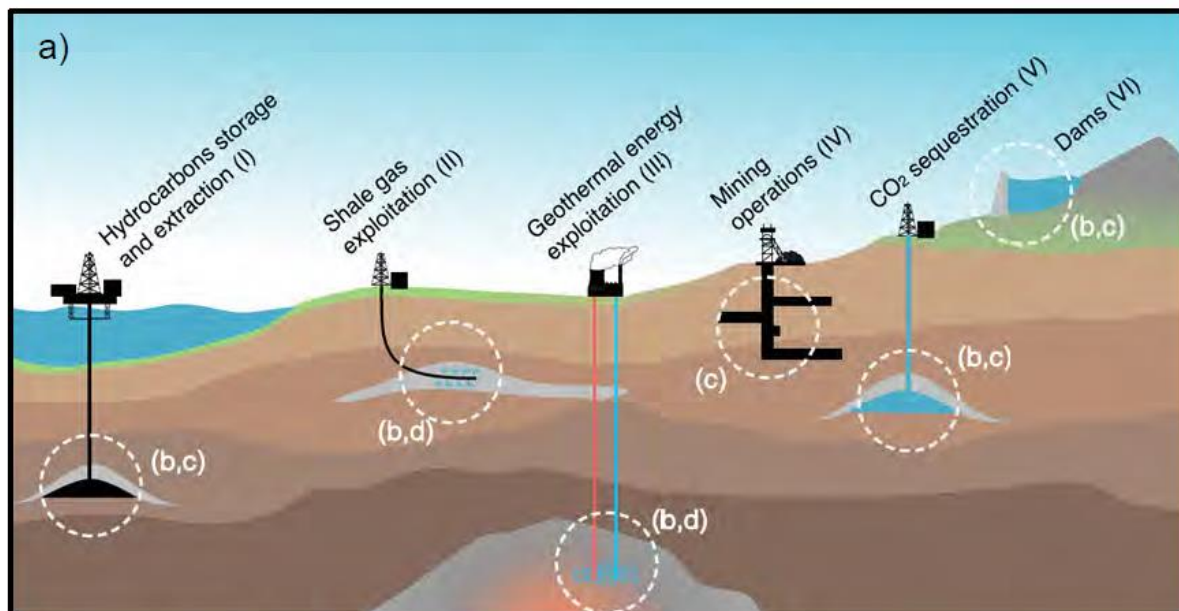


Figure 1 : Activités industrielles liées à l'occurrence de sismicité induite (a) et mécanismes physiques associés

² Analyse de cas de sismicité liée à l'exploitation de la géothermie profonde. Rapport Ineris 200953 - 2503220 - v2.0, juillet 2021

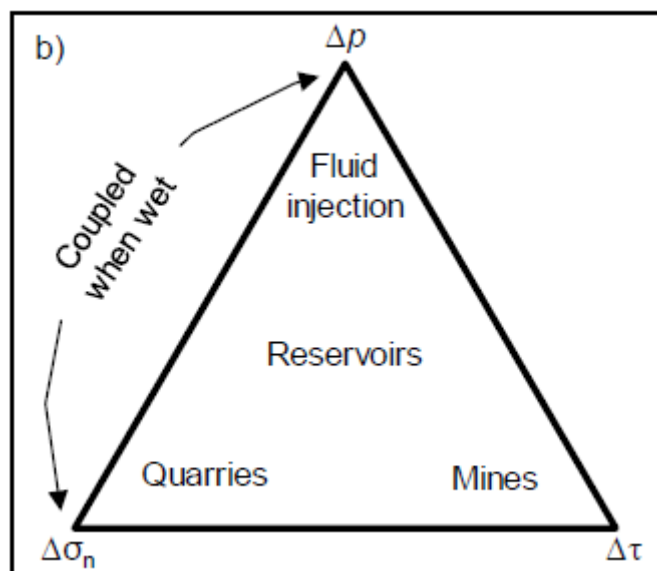


Figure 2 : Mécanismes physiques associés aux activités industrielles induisant de la sismicité induite (b).
Les trois extrémités du triangle en (b) indiquent des variations de la pression de pore (Δp), de la contrainte tangentielle ($\Delta \tau$) et de la contrainte normale ($\Delta \sigma_n$) (source : INERIS)

Si les causes à l'origine de la sismicité anthropique (c'est-à-dire les activités humaines) sont différentes de celles à l'origine de la sismicité tectonique (i.e. naturelle), les mécanismes physiques de rupture sismique sont communs aux deux types de sismicité et, par conséquent, il est souvent difficile de distinguer les séismes anthropiques et naturels (Wiemer et al., 2017). Cela est particulièrement le cas lorsque les activités industrielles se localisent dans des zones tectoniques actives, caractérisées par un niveau de sismicité naturelle élevé, **ce qui n'est pas le cas dans le Bassin Parisien.**

L'approche usuellement utilisée pour discriminer sismicités anthropique et tectonique repose sur l'analyse des corrélations spatio-temporelles entre l'activité industrielle et la sismicité observée. Les événements sismiques seront généralement considérés comme induits s'ils sont suffisamment proches, à la fois dans l'espace et dans le temps, de l'activité industrielle.

2.2. Sismicité anthropique dans le cadre de la géothermie profonde

Les opérations anthropiques visant à exploiter la ressource géothermale du sous-sol peuvent, dans certains cas, être associées à l'occurrence d'événements sismiques induits. Cette sismicité peut parfois intervenir dès les opérations de forages ou apparaître **en conséquence directe des opérations de stimulation lorsqu'il est nécessaire d'améliorer l'injectivité des puits**, ainsi que la perméabilité naturelle des réservoirs géothermiques. Il peut également arriver que la sismicité soit observée pendant la phase opérationnelle de production des centrales géothermiques, lorsque le fluide ne fait que circuler dans le réservoir à faible pression. En comparaison avec la sismicité induite par d'autres types d'activités industrielles (tels que les mines souterraines, les barrages et l'exploitations des hydrocarbures), **les magnitudes maximales des séismes induits par les opérations**

géothermiques montrent des valeurs généralement plus faibles, au moins pour les sites en Europe centrale.

Contrairement aux autres types d'activités industrielles, la sismicité induite dans le cadre de la géothermie profonde n'est pas seulement un effet indésirable des opérations anthropiques, elle est, au contraire, **dans certains types de systèmes géothermiques**, un outil nécessaire à l'exploitation des réservoirs. En effet, le principe des **stimulations hydrauliques, employées dans certains types de systèmes géothermiques**, listés plus bas est d'induire le glissement des fractures préexistantes afin d'en améliorer la perméabilité et ainsi augmenter l'échange de chaleur entre les roches chaudes du réservoir et le fluide injecté. Dans ce processus, le déclenchement d'événements sismiques induits est inhérent aux opérations mises en œuvre. Par conséquent, afin d'optimiser les opérations de stimulations, il est indispensable de maîtriser la sismicité, en limitant la magnitude des événements induits, tout en permettant d'améliorer la perméabilité des réservoirs.

2.3. Quelques généralités sur les mécanismes à l'origine de la sismicité dans le cadre de la géothermie profonde

Comme pour toutes les activités industrielles impactant le sous-sol, y compris les opérations géothermiques, les mécanismes physiques à l'origine de la sismicité sont contrôlés par **les variations de contraintes induites par les activités anthropiques**. Ces variations de contraintes s'ajoutent aux contraintes tectoniques préexistantes et **modifient l'état de contrainte du milieu**, induisant des **phénomènes sismiques et asismiques dans la roche**, en fonction de sa rhéologie. En effet, la rupture d'une faille ou la fracturation de la roche intacte, qui entraînent généralement le déclenchement d'une sismicité, **peuvent avoir lieu si les critères de ruptures associés sont atteints du fait d'une variation de l'état de contrainte**. Plusieurs lois existent pour décrire le comportement des roches et des discontinuités (simples fractures ou faille majeure), ainsi que les critères de rupture associés. Pour les discontinuités, on retient classiquement un critère de rupture en traction et un critère en cisaillement de type **Mohr-Coulomb**. La rupture en cisaillement, qui se traduit par le glissement irréversible le long d'une discontinuité, est décrite par une relation entre la contrainte de cisaillement et la contrainte normale au plan de rupture.

Suivant la nature de la matrice rocheuse, différents critères de ruptures peuvent être proposés. Certains, comme par exemple le critère de Griffith, permettent de décrire **l'initiation et la propagation d'une rupture (en traction ou en cisaillement) dans la roche intacte**, c'est-à-dire dans la roche initialement non fracturée. Dans ce cas, la rupture aura lieu pour des seuils de résistance plus élevées que dans le cas d'une rupture le long d'un plan de discontinuité, celles-ci ayant une cohésion significativement moins élevée que celle de la roche intacte. Dans un milieu fracturé non homogène, comme la plupart des roches du sous-sol, **les failles et fractures préexistantes représentent des plans de faiblesse où les phénomènes de rupture, et donc la sismicité induite, peuvent avoir lieu de préférence**. La variation de contrainte nécessaire pour réactiver ces discontinuités dépendra de la contrainte initiale, de la cohésion et du coefficient de frottement (dans le cas d'un critère de Mohr- Coulomb), mais aussi de l'orientation de ces discontinuités préexistantes par rapport à celle de l'état de contrainte. Dans le contexte de la géothermie profonde, plusieurs mécanismes ont été mis en évidence dans la littérature scientifique (Figure 3) pour expliquer l'occurrence de la sismicité induite :

- ▶ Augmentation de la pression interstitielle et diffusion de la pression le long d'une faille, à la suite de l'injection dans la zone de faille :
 - Il s'agit du mécanisme de perturbation des contraintes le plus fréquemment observé dans les systèmes géothermiques.

- Il est lié à l'augmentation de la pression de pore directement induite par l'injection de fluide dans le sous-sol. En effet, l'augmentation de la pression interstitielle entraîne une diminution de la contrainte effective agissant sur les failles et fractures du milieu, ce qui induit le glissement de ces structures quand la résistance de la roche est dépassée,
- Les ruptures ont lieu le long des structures préexistantes en libérant une fraction de la contrainte tectonique accumulée
- ▶ Existence d'une connexion hydraulique entre la zone d'injection et la faille,
- ▶ Perturbation de l'état de contraintes dans la roche environnante par effets poroélastiques et thermoélastiques qui entraînent des déformations volumétriques dans le réservoir

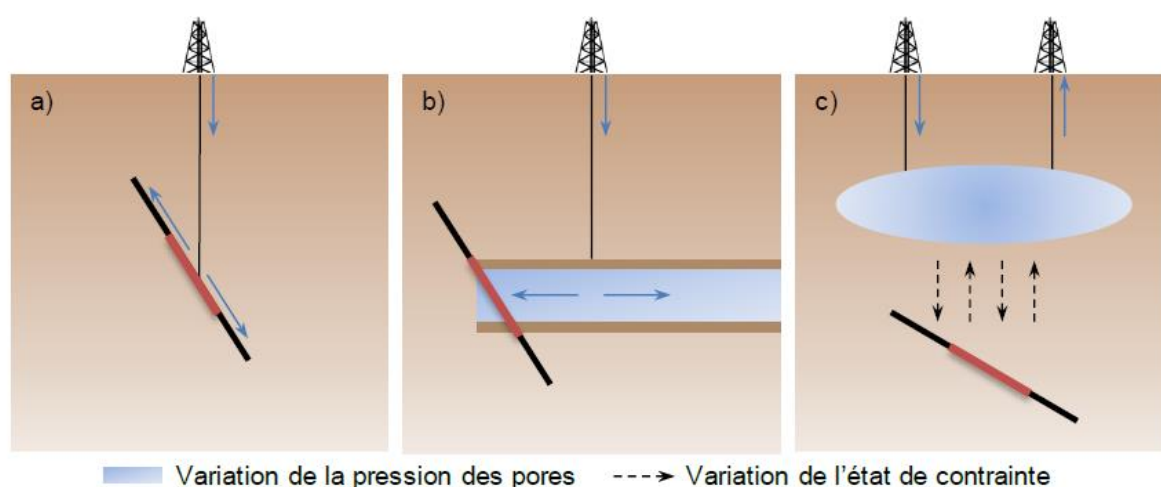


Figure 3 : Représentation schématique des principaux mécanismes à l'origine de la sismicité induite dans les systèmes géothermiques

2.4. Classification et exploitation de la ressource géothermale profonde – liens avec la sismicité induite

Plusieurs approches existent pour classifier la ressource géothermale. La classification la plus fréquente distingue les sites à basse, moyenne et haute enthalpie, sur la base de la température des réservoirs ; d'autre approches prennent en compte le type de production (chaleur et/ou électricité) ou reposent sur une classification juridique, fonction de la profondeur et de la température. Ces classifications ne prennent en revanche pas en compte des caractéristiques géologiques, tectoniques et hydrothermales qui peuvent être très variables d'un site à l'autre et qui ont une influence directe sur le choix de **la méthode d'exploitation de la ressource géothermale**, qui à son tour a un **impact sur les caractéristiques et l'occurrence de la sismicité induite**.

Aussi, une autre classification proposée dans le rapport de l'INERIS distingue :

- ▶ Les **champs géothermiques conventionnels** (Conventional Geothermal Fields – GF, aussi appelés systèmes hydrothermaux dans la littérature) : réservoirs souterrains fracturés à haute température (>200°C) et peu profonds (< 3 km), situés dans les régions volcaniques (avec ou sans magmatisme) ou tectoniques actives où le transfert de chaleur se fait par convection³.

³ Conduction : Le transfert d'énergie thermique est dû au mouvement du fluide présent dans le réservoir

Des processus naturels, tels que l'infiltration des eaux météoriques, permettent la recharge en eau des réservoirs qui peuvent être à dominante liquide ou vapeur. La perméabilité élevée de la matrice et/ou des fractures, ainsi que les volumes importants de fluide géothermal, permettent l'exploitation de ces réservoirs via des puits producteurs qui transportent en surface les fluides chauds.

- ▶ Les **aquifères sédimentaires** (Sedimentary Aquifers - SA) : formation rocheuse sédimentaire peu profonde (1 – 4 km) et perméable où le fluide géothermal (30 – 150°C) peut circuler naturellement grâce aux failles et fractures existantes ou par porosité du milieu, permettant le transfert de chaleur par conduction⁴. Ce type de systèmes géothermiques se retrouve généralement dans les régions tectoniques passives, sans volcanisme ou tectonisme récent ; **généralement les projets dans le Bassin parisien entrent dans cette catégorie, notamment celui du projet du Chesnay-Rocquencourt.**
- ▶ Les **systèmes pétrothermaux (PS)** : roches cristallines ou sédimentaires denses à haute température (>150°C) et faible perméabilité naturelle, caractérisées par l'absence ou par des volumes relativement faibles de fluides, où le transfert de chaleur se fait par conduction⁴. Des opérations de stimulation sont nécessaires pour améliorer la perméabilité du système et augmenter le volume de fluide, à travers des injections sous pression. Font partie de cette catégorie, les systèmes HDR (Hot-Dry Rock) et EGS (Enhanced Geothermal Systems). Il est à noter que la distinction entre les systèmes HDR et EGS n'est pas nette, la définition des deux concepts variant selon les auteurs. Le concept de HDR, introduit dans les années 70, a été utilisé pour désigner la ressource géothermale contenue dans les socles cristallins caractérisés par la présence de roches chaudes, intactes et pratiquement sèches. En revanche, le concept de EGS, plus récent, désigne plus généralement tous les réservoirs, fracturés ou intacts, avec ou sans fluides, dans des roches à faible perméabilité et/ou porosité et qui doivent être stimulés artificiellement afin d'être exploités (Breede et al., 2013). Dans ce sens, les systèmes HDR peuvent être vus comme un cas particulier des EGS (e.g. Olasolo et al., 2016) et, très souvent, l'appellation initiale de HDR a été remplacée par EGS pour les projets géothermiques anciens. Cependant, certains auteurs différencient les concepts de HDR et EGS sur la base des méthodes de stimulation utilisées. Par exemple, selon Jung (2013), dans les systèmes HDR les puits injecteur et producteur sont mis en connexion par fracturation hydraulique⁵ (hydrofracking ou hydraulic fracturing en anglais), alors que dans les systèmes EGS l'augmentation de la perméabilité est obtenue par stimulation hydraulique (hydroshearing en anglais). Dans la suite, l'appellation de HDR ne sera pas utilisée et l'acronyme EGS sera utilisé comme synonyme de PS (systèmes pétrothermaux). Les termes PS et EGS seront donc employés, sauf indication contraire, pour désigner le même type de système géothermique.
- ▶ Les **systèmes EGS dans le contexte des champs géothermiques conventionnels (GF-EGS)** : dans certains cas particuliers, les systèmes géothermiques conventionnels (GF) requièrent des technologies de type EGS afin d'améliorer la perméabilité des réservoirs et ainsi permettre l'exploitation de la ressource géothermale.

géothermique.

⁴ Conduction : Le transfert d'énergie thermique est provoqué par une différence de température entre deux zones du réservoir et se réalise sans déplacement de matière.

⁵ Technique qui permet de fracturer la roche intacte par rupture en traction, en injectant à une pression dépassant la contrainte principale minimale de la roche.

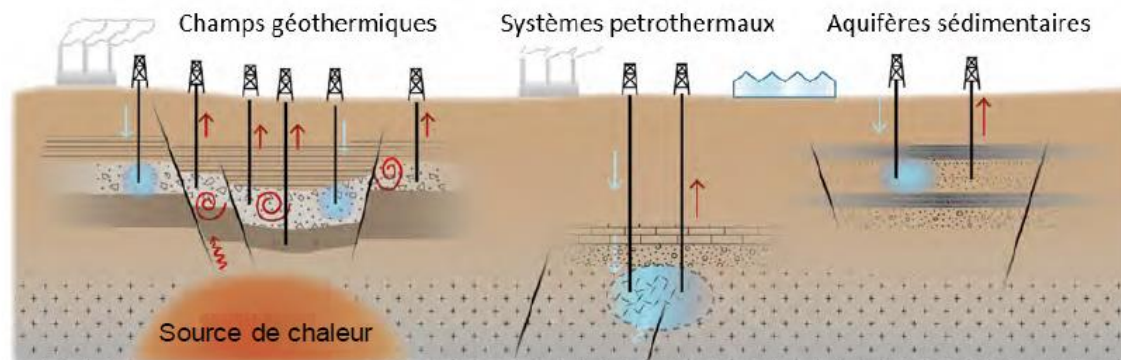


Figure 4 : Schéma simplifié des différents types de systèmes géothermiques (source : INERIS)

Les systèmes géothermiques précédemment décrits peuvent se rencontrer dans différents environnements géologiques et tectoniques. Ces derniers caractérisent le type de réservoir géothermique ciblé (**Tableau 1**). Les réservoirs géothermiques, où le transfert de chaleur se fait par convection, sont la cible principale des systèmes géothermiques de type GF et PS et sont localisés dans des régions avec un niveau de sismicité naturelle généralement élevé. **En revanche, les réservoirs à conduction, typiques des régions tectoniques passives avec une faible sismicité naturelle, sont caractérisés par la présence d'aquifères sédimentaires perméables, exploités dans les systèmes géothermiques de type SA**, mais aussi par la présence d'inclusions magmatiques (plutons) chaudes ciblées par des systèmes géothermiques de type PS (zone bleue dans le **Tableau 1**). En fonction de l'environnement géologique, la perméabilité naturelle des réservoirs géothermiques peut être contrôlée soit par les réseaux naturels de failles et fractures, soit par la porosité de la matrice elle-même, ou encore par un mélange des deux. Généralement, les réservoirs dans les bassins intracratoniques et dans les ceintures orogéniques (voir **Tableau 1**), **liés à la présence d'aquifères sédimentaires, ont une perméabilité naturelle due à la porosité de la matrice pour les réservoirs gréseux, ou à la présence de failles pour les réservoirs dans les calcaires compacts** (Breede et al., 2015). **C'est le cas du Bassin Paris, et du projet du Chesnay-Rocquencourt.**

Dans tous les autres types de réservoirs, la perméabilité naturelle est essentiellement liée aux failles et fractures (Buijze et al., 2019b).

Tableau 1 : Synthèse des caractéristiques géologiques et tectoniques pour différents types de réservoirs géothermiques. La couleur de chaque ligne du tableau indique le mécanisme à la base du transfert de chaleur dans chaque réservoir : rose pour les réservoirs à convection et bleu pour les réservoirs à conduction (modifié d'après Moeck, 2014)

Type de réservoir	Type de système	n° de sites	Contexte géologique possible	Sismicité naturelle	Source de chaleur	Exemples
Volcanique	GF	9	Arcs volcaniques / Dorsales océaniques / Panaches de	Elevée	Chambre magmatique dans les champs volcaniques actifs	Berlin (Salvador) Sites
	PS	1	manteau (Hot Spots)			Islandais
Plutonique	GF	5	Marges de convergence avec plutonisme récent		Cristallisation du magma / Éléments producteurs de chaleur dans la roche	The Geysers (Etats-Unis) Sites Italiens
Zone d'extension	PS	7	Complexe à noyau métamorphique / Bassin en pull-apart / Fossé d'effondrement (graben)		Elévation du manteau dû à l'amincissement de la croûte terrestre	Soulz (France) Pohang (Corée du Sud)
	GF	4				
Bassins intracratoniques	SA	2	Rift continental / Marge passive	Faible	Subsidence et amincissement de la lithosphère	Balmatt (Belgique) Californië (Pays-Bas)
	PS	0				
Ceintures orogéniques	SA	3	Bassin d'avant-pays / Ceinture de pliage et de poussé		Subsidence crustale significative dans les séquences sédimentaires	Unterhaching (Allemagne) Saint-Gall (Suisse)
Socle cristallin	PS	4	Inclusions magmatiques (plutons) dans le sous-sol		Éléments producteurs de chaleur dans la roche	Habanero (Australie) Paralana (Australie)

2.5. Exploitation de la ressource géothermale et approches de stimulation

Les méthodes d'exploitation de la ressource géothermale sont différentes selon le type de systèmes géothermiques :

- Champs géothermiques conventionnels : l'exploitation de la ressource géothermale se fait via l'implantation d'un grand nombre de puits de production (généralement plus de 10) pour extraire en surface le fluide géothermal. Ces systèmes géothermiques ont une emprise au sol très étendue, généralement de plusieurs dizaines de km² et présentent les taux de production les plus élevés. Pour compenser les grands volumes de fluide extraits, et ainsi limiter l'épuisement des réservoirs et la subsidence des terrains de surface, le fluide géothermal

refroidi, ainsi que des eaux de rejets industriels, sont réinjectés dans le sous-sol à l'aide des puits d'injection répartis sur le site. Certains puits de champs géothermiques conventionnels soient stimulés après foration dans le but d'en améliorer l'injectivité, mais aussi afin de mettre les puits en connexion hydraulique avec les zones perméables du réservoir qui ne sont pas directement traversées par le forage. Cela est, par exemple, une pratique courante dans les projets géothermiques islandais.

- ▶ Les **aquifères sédimentaires (SA)** sont généralement exploités par doublets géothermiques, **comme les projets réalisés dans le Bassin Parisien**. Le doublet est un couple de puits, l'un injecteur et l'autre producteur, entre lesquels le fluide géothermal est mis en circulation à **faibles pressions**. Dans quelques cas, des stimulations chimiques (acidifications) peuvent être employées avant la mise en circulation, c'est le cas de l'**aquifère du Dogger en région parisienne** à 1500+/-200m de profondeur où fonctionne actuellement depuis les années 80 plus de 50 doublets, sans qu'**aucun phénomène de sismicité induite n'ait été observé. Il en est de même de la dizaine de doublet du Bassin aquitain**.

- ▶ **Systèmes pétrothermaux** : le principe du doublet géothermique est également employé. Avant de mettre le doublet en circulation, les puits injecteur et producteur doivent être stimulés afin d'améliorer la perméabilité du réservoir et assurer une bonne connexion hydraulique entre les puits. Plusieurs techniques de stimulation peuvent être appliquées aux réservoirs pétrothermaux. La stimulation hydraulique est la méthode la plus couramment utilisée, indépendamment du type de roche du réservoir. Elle consiste à injecter des grands volumes de fluide à des pressions relativement élevées, et permet d'améliorer la perméabilité du réservoir même à plusieurs centaines de mètres de distance des puits d'injection (Breede et al., 2015). Différents mécanismes physiques peuvent être responsables de l'amélioration de la perméabilité lors des stimulations hydrauliques. Pour les systèmes EGS, il est généralement reconnu que la perméabilité est améliorée par cisaillement des fractures préexistantes, qui sont amenées au glissement par effet de l'augmentation de la pression de pore due à l'injection. Dans ce mécanisme, certaines des fractures préexistantes peuvent également casser en traction (c'est-à-dire que les fractures tendent à s'ouvrir), alors que la création et la propagation de nouvelles fractures dans la roche intacte est inexistante ou alors elle joue un rôle mineur (McClure et Horne, 2014a). Des modèles de stimulation mixte ont également été proposés dans la littérature. En particulier, McClure et Horne (2014a) ont interprété les résultats des stimulations conduites sur différents sites EGS en supposant l'occurrence de mécanismes mixtes, avec la mobilisation d'un réseau de fractures complexe composé à la fois de nouvelles fractures et de fractures préexistantes. Dans ce modèle, la création de nouvelles fractures n'a pas lieu à proximité du puits d'injection, car elles s'initient à partir des fractures préexistantes qui sont amenées à s'ouvrir et/ou à glisser par effet de l'injection. Pour ce qui concerne les stimulations chimiques, elles permettent à la fois d'améliorer la perméabilité à proximité (quelques dizaines de mètres environ) du puits d'injection, mais aussi de nettoyer les puits des éventuels débris de forage. Le principe des stimulations chimiques est d'ajouter des acides, tels que l'acide chlorhydrique (HCL) et l'acide fluorhydrique (HF), au fluide injecté, afin de réagir et dissoudre les carbonates et les silicates respectivement (Breede et al., 2015). Cette technique de stimulation peut être employée dans tous les types de systèmes géothermiques.

2.6. Phénomènes de sismicités induites dans les Systèmes Aquifères

Le paragraphe ci-dessous décrit les phénomènes de sismicité induites uniquement dans les systèmes aquifères.

On se référera au rapport de l'INERIS pour une description des phénomènes de sismicité induites dans les autres systèmes géothermiques.

Dans les systèmes aquifères, les phénomènes de sismicité induite sont très rares. **Tous les sites géothermiques développés dans ces systèmes aquifères sont caractérisés par la quasi-absence de sismicité induite : c'est le cas du Bassin Parisien (aquifère du Dogger) et du Bassin aquitain.**

Seuls 5 événements de sismicité induite ont été relevés dans le monde mais sont liés à des conditions très particulières qui ne se rencontrent pas au niveau du Bassin Parisien. La sismicité se localise à des profondeurs **significativement plus importantes par rapport à la profondeur maximale des forages** et se développe en grande partie, **dans le socle cristallin** sous-jacent la couche sédimentaire ciblée par les opérations géothermiques. **Dans le Bassin Parisien, le socle cristallin se développe à environ 3000 mètres de profondeur, soit à plus de 1500 m sous les forages reconnaissant le Dogger.** Pour les séismes observés en Californie, Suisse et Allemagne, c'est **la présence dans le socle de failles soumises à des contraintes élevées, mais aussi l'existence d'une connexion hydraulique entre la zone d'injection et les couches plus profondes, jouent un rôle primordial dans le déclenchement des événements sismiques pour ce type de systèmes géothermiques.**

C'est également ce mécanisme qui expliquerait l'absence de sismicité pour les sites SA développés dans le Bassin Parisien (Dogger).

Les travaux de l'INERIS ont montré que **la proximité des réservoirs géothermiques avec le socle cristallin, est plus propice à l'occurrence de sismicité**, apparaît comme un facteur aggravant vis-à-vis de la sismicité anthropique. Cela est le cas pour les sites qui exploitent des réservoirs directement dans le socle, ainsi lorsque le réservoir ciblé est à la frontière entre la couche sédimentaire et le socle sous-jacent. Dans ce cas, la sismicité se localise principalement ou entièrement au niveau du socle, alors que la réponse aux opérations géothermiques de la partie haute du réservoir, dans la couche sédimentaire, reste asismique. L'injection dans le réservoir de Dogger, s'effectuera bien au-dessus du socle cristallin.

La littérature consultée par les auteurs ne fait état d'aucun événement sismique ressenti en surface lorsque les systèmes SA exploitent des réservoirs en roches sédimentaire poreuses, ce qui sera le cas pour le projet du Chesnay-Rocquencourt dans le Bassin Parisien car l'injection sera réalisée dans un réservoir calcaire oolithique donc poreux.

2.7. Mesures mises en œuvre pour connaître la géologie du sous-sol impacté par les travaux

La nature même des travaux de forage permettra de connaître la géologie du sous-sol et d'en comprendre les phénomènes naturels :

- ▶ Remontée des cuttings (débris issus de la foration) permettant de dresser une coupe géologique précise du sous-sol,
- ▶ Réalisation de diagraphies pour préciser les propriétés du sous-sol (densité, teneur en argiles etc.)
- ▶ Réalisation d'essai de puits et de pompage d'essai et d'essai d'injection pour connaître les limites de l'aquifère, les propriétés hydrogéologiques des réservoirs, et l'identification de limites dans le sous-sol (influence des failles etc.).

On notera également que l'aquifère du Dogger a fait l'objet de nombreux travaux et d'exploitation de forages pour les besoins de chauffage sur le territoire parisien. De même, il est rappelé que ce réservoir a fait l'objet de nombreuses recherches et est exploité dans le secteur.

D'après le retour d'expérience dans le Bassin Parisien, les travaux de pompage d'essai n'ont pas mis en évidence d'influence des failles de la région (transparence hydraulique).

Il n'a pas été observé une quelconque sismicité induite par les travaux de forages géothermiques depuis les années 80 dans la région parisienne.

3. Autres risques potentiels induits par une opération de géothermie profonde

Le tableau ci-dessous recense l'ensemble des risques potentiels induits par l'opération de géothermie profonde du projet du Chesnay-Rocquencourt dans le Bassin Parisien. Les données sont issues des travaux de l'INERIS⁶.

⁶ *Etat des connaissances sur les risques, impacts et nuisances potentiels liés à la géothermie profonde. Rapport INERIS DRS-16-157477-00515A, 2017.*

Risque Identifié	Origine	Commentaire																										
Eruption de fluides souterrains en surface	<p>Une éruption (blowout) est une sortie incontrôlée de fluide hors d'un forage. Ce fluide peut être gazeux ou liquide. Si le point de sortie de l'effluent se situe en tête du forage, on parle « d'éruption de surface ».</p> <p>Le risque d'éruption est plus faible en géothermie que dans d'autres domaines des forages profonds, comme par exemple dans le cas des forages pétroliers ou gaziers. Une des raisons à cela est qu'il est moins fréquent, lors d'un forage de géothermie profonde, de traverser des horizons contenant des hydrocarbures gazeux ou d'autres gaz sous pression, que dans le cas d'un forage pétrolier.</p> <p>Dans la plupart des contextes en France, que ce soit dans le Bassin parisien ou aquitain ou dans le fossé d'effondrement alsacien, les réservoirs géothermiques sont peu pressurisés, ce qui limite le risque d'éruption.</p>	<p>Risque nul</p> <p>La succession géologique au droit du projet est connue par les travaux réalisés sur des forages existant.</p> <p>Il n'existe aucun horizon contenant des hydrocarbures gazeux entre le réservoir du Dogger et les réservoirs sus-jacents.</p>																										
Fuite ou le débordement d'un réservoir en surface	<p>Il s'agit ici de fuites susceptibles de survenir sur des bassins de stockage de fluide géothermal, de fluide de forage, d'hydrocarbures (carburants, huiles) ou de divers additifs présents sur le chantier de forage, ou à l'occasion des transferts de tels produits en vue de leur élimination ou de l'approvisionnement du site. Notons qu'un tel risque est inhérent à tout chantier de forage, quelle que soit sa finalité.</p>	<p>Risque maîtrisé et abordé dans l'étude d'impact du DAOTM</p>																										
Fuite sur le circuit primaire ou secondaire	<p>Une fuite sur le circuit primaire ou secondaire est de nature à répandre à l'extérieur le fluide qui y circule.</p> <p>Dans les phases de foration et d'essai, il peut s'agir de fluide de forage, de fluide géothermal ou d'un fluide de stimulation (eau éventuellement chargée d'additifs, dont des acides).</p> <p>En phase d'exploitation, le problème concernera le fluide géothermal, dans le circuit primaire, ou le fluide caloporteur, dans le circuit secondaire.</p>	<p>Risque maîtrisé et abordé dans l'étude d'impact du DAOTM</p>																										
Emission d'un volume excessif de gaz dissous	<p>Il s'agit ici du risque induit par un dégazage important (non attendu) du fluide géothermal, avec surtout des conséquences en milieu confiné (intoxication, asphyxie). Cela peut se produire en phase d'essais, alors que le fluide géothermal est remonté directement à la surface, ou en phase d'exploitation.</p>	<p>Risque maîtrisé et abordé dans l'étude d'impact du DAOTM</p> <p>En phases de foration, d'essais et d'exploitation, les principales mesures de maîtrise des risques consistent à disposer de détecteurs de gaz afin de prévenir le personnel d'une arrivée anormale de gaz (H2S) ou d'une teneur anormalement faible en oxygène.</p> <p>En phase post-abandon, il s'agira plutôt de disposer de procédures rigoureuses pour la mise en place des bouchons, de combler les forages avec une cimentation de qualité (ciment résistant au fluide géothermal)</p>																										
Mise en communication d'aquifères	<p>Lors du creusement d'un forage profond, qu'il soit ou non réalisé dans un objectif de géothermie, il est fréquent de recouper différents niveaux aquifères.</p> <p>Le sous-sol du bassin de Paris est le siège de différents grands aquifères régionaux :</p> <div><table><tr><th colspan="2">PÉRIODES</th><th colspan="2">AQUIFÈRES</th></tr><tr><td rowspan="8">SECONDAIRE</td><td>TERTIAIRE 65 millions d'années</td><td></td><td></td></tr><tr><td rowspan="2">CRÉTACÉ 140 millions d'années</td><td>NÉOCRÉTACÉ</td><td></td></tr><tr><td>ÉOCRÉTACÉ</td><td>Sables de l'Albien Sables du Néocomien</td></tr><tr><td rowspan="3">JURASSIQUE 195 millions d'années</td><td>MALM</td><td>Calcaires du Lusitanien</td></tr><tr><td>DOGGER</td><td>Calcaires du Dogger</td></tr><tr><td>LIAS</td><td></td></tr><tr><td>TRIAS 225 millions d'années</td><td>TRIAS</td><td>Grès du Retien Grès de Lorraine à l'est Grès fluviatiles à l'ouest</td></tr><tr><td>PRIMAIRE</td><td></td><td></td></tr></table></div>	PÉRIODES		AQUIFÈRES		SECONDAIRE	TERTIAIRE 65 millions d'années			CRÉTACÉ 140 millions d'années	NÉOCRÉTACÉ		ÉOCRÉTACÉ	Sables de l'Albien Sables du Néocomien	JURASSIQUE 195 millions d'années	MALM	Calcaires du Lusitanien	DOGGER	Calcaires du Dogger	LIAS		TRIAS 225 millions d'années	TRIAS	Grès du Retien Grès de Lorraine à l'est Grès fluviatiles à l'ouest	PRIMAIRE			<p>Risque maîtrisé et abordé dans l'étude d'impact du DAOTM</p> <p>La mise en communication artificielle des niveaux aquifères entre eux est contrôlée par le dimensionnement lui-même des forages : les horizons aquifères seront isolés par tubages cimentés aux terrains, de façon à éviter toute communication entre les différentes zones perméables régionalement isolées. Il est rappelé que les travaux du forage producteur portent sur un work-over et ne consisteront pas à réaliser une foration au droit de différents niveaux aquifères.</p> <p>Pour améliorer la protection et garantir l'isolement des forages, il sera mis en place des tubes en acier de grade suffisamment élevé pour garantir un niveau de protection équivalente.</p>
PÉRIODES		AQUIFÈRES																										
SECONDAIRE	TERTIAIRE 65 millions d'années																											
	CRÉTACÉ 140 millions d'années	NÉOCRÉTACÉ																										
		ÉOCRÉTACÉ	Sables de l'Albien Sables du Néocomien																									
	JURASSIQUE 195 millions d'années	MALM	Calcaires du Lusitanien																									
		DOGGER	Calcaires du Dogger																									
		LIAS																										
	TRIAS 225 millions d'années	TRIAS	Grès du Retien Grès de Lorraine à l'est Grès fluviatiles à l'ouest																									
	PRIMAIRE																											

Intrusion de fluide dans un aquifère	<p>L'intrusion de fluide dans un aquifère sensible peut se produire lors de toutes les phases de vie d'une installation géothermique et résulter des différents mécanismes suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> en phase de foration, une éruption souterraine de gaz, provenant d'une formation sous-jacente, suite à une venue mal contrôlée : cas dont la probabilité est nulle ici au vu de la nature des travaux et du sous-sol (cf. Evénement « Eruption de fluides souterrains en surface ») en phase d'essai ou d'exploitation, une intrusion de fluide géothermal ou de fluide de stimulation suite à un défaut d'étanchéité latéral du forage 	<p>Risque maîtrisé et abordé dans l'étude d'impact du DAOTM</p> <p>Un suivi de la corrosion est prévu sur le doublet, les mesures prévues pour supprimer, réduire ou éviter la survenance d'un tel accident interviennent à trois niveaux :</p> <ul style="list-style-type: none"> à la conception de l'ouvrage (déroulement des travaux de forage par phases successives de forage, puis de pose de tubages cimentés par phases – mise en place d'un double tubage au droit de l'aquifère de l'Albien) ; en cours d'exploitation (utilisation d'un produit inhibiteur de corrosion) ; lors des contrôles périodiques réglementaires (inspection des tubages par diagraphie).
Surrection ou soulèvement de la surface du sol	<p>Le principal risque de surrection important est lié au gonflement d'une formation sensible suite à une intrusion d'eau. Ce type d'évènement n'est pas spécifique à la géothermie et rejoint le problème général de l'isolation entre elles des formations traversées par un forage.</p>	Risque maîtrisé et abordé dans l'étude d'impact du DAOTM
Subsidence ou l'abaissement de la surface du sol	<p>Ce type d'évènement peut intervenir essentiellement en phase d'exploitation et résulter de plusieurs mécanismes : rabattement excessif de l'aquifère, perte de matière par entraînement de particules fines, dissolution d'une formation évaporitique, réinjection incomplète ou absente du fluide géothermal dans le réservoir. Ces mécanismes ne sont pas spécifiques à la géothermie mais concernent l'ensemble des activités d'exploitation par forages.</p> <p>La réalisation d'un forage profond, quelle que soit sa finalité, peut intercepter des couches évaporitiques solubles (sel, potasse, gypse). En cas d'intrusion d'un fluide en déséquilibre chimique avec la formation, on peut craindre une dissolution locale de ces évaporites.</p> <p>Un rabattement de nappe excessif peut engendrer des affaissements au droit de forages mis en pompage à fort débit au sein de formations sédimentaires. Il résulte du tassement des particules formant le réservoir aquifère suite à un fort rabattement induit par une baisse de pression hydrostatique. Dans le contexte géothermique, il n'est susceptible de se produire qu'en phase d'exploitation, au droit du forage de production. Cet effet tend à s'estomper dans le cas de pompages profonds mais, en cas de connexion du réservoir géothermique profond avec un aquifère plus superficiel, l'impact pourrait être partiellement transféré à ce dernier.</p>	<p>Risque maîtrisé et abordé dans l'étude d'impact du DAOTM</p> <p>La coupe géologique du forage du projet du Chesnay-Rocquencourt indique qu'il n'y a pas de formations solubles concernées par le projet.</p> <p>Il n'y a pas de connexion entre le réservoir du dogger et les réservoirs sus-jacents.</p> <p>Quarante ans d'exploitation du réservoir en doublet et triplet dans la région parisienne garantissent l'absence de risques liés à l'exploitation de ce réservoir vis-à-vis des tassements en surface</p>
Glissement de terrain	<p>Il s'agit du risque de déclenchement d'un glissement de terrain susceptible d'atteindre un forage géothermique ou d'avoir été engendré par une opération géothermique. Ce risque n'est pas spécifique à la géothermie. Il relève du choix général de la zone d'implantation d'un forage par rapport aux risques naturels, en l'occurrence le risque de mouvements de terrain.</p>	<p>Risque maîtrisé et abordé dans l'étude d'impact du DAOTM</p> <p>Une plate-forme sera mise en place afin d'assurer le correct ancrage de l'appareil de forage et la gestion des eaux pluviales.</p>

4. Conclusions

D'après les travaux exhaustifs menés par l'INERIS, et les retours d'expériences des opérations de géothermie profonde similaires dans les Bassins Parisien et aquitain depuis plus de 40 ans n'ayant jamais fait l'objet de sismicité induite :

- ▶ Les projets de géothermie profonde dans le Bassin aquitain et dans le Bassin Parisien doivent être clairement distingués des projets de géothermie profonde de type systèmes pétrothermaux tels ceux du fossé rhénan,
- ▶ **Les quarante années d'exploitation en Ile de France ou dans le Bassin aquitain apportent une forte garantie concernant les risques de sismicité induite dans ces bassins sédimentaires.**

Par ailleurs, les travaux de forage de géothermie profonde aux alentours du projet du Chesnay-Rocquencourt, notamment les forages de Vélizy-Villacoublay, Bagneux, et Châtenay, déjà réalisés et dont les coupes géologiques sont connues, n'ont jamais engendré ou révélé :

- ▶ La présence de problématiques de sismicité induite,
- ▶ La présence de problématiques d'hydrocarbures gazeux dans le réservoir ou dans les formations sus-jacentes,
- ▶ La présence de formation solubles (évaporites).

De même, la connaissance du réservoir du Dogger dans le Bassin Parisien apporte les mêmes garanties en termes de risques induits par une opération sur ce réservoir.

Il peut être conclu, que les données recensées dans la littérature sur les risques liés aux opérations de géothermie profonde et les retours d'expérience d'exploitation sur le bassin de Paris apportent de fortes garanties sur le fait que **les risques de sismicité liés aux projets soient négligeables. Il en est de même des risques suivants, négligeables ou maîtrisés** par la mise en place de mesure détaillées dans l'analyse d'impact du DAOTM pour le projet du Chesnay-Rocquencourt :

- ▶ Eruption de fluides souterrains en surface,
- ▶ Fuite ou le débordement d'un réservoir en surface,
- ▶ Fuite sur le circuit primaire ou secondaire,
- ▶ Emission d'un volume excessif de gaz dissous,
- ▶ Mise en communication d'aquifères,
- ▶ Intrusion de fluide dans un aquifère,
- ▶ Surrection ou soulèvement de la surface du sol,
- ▶ Subsidence ou l'abaissement de la surface du sol,
- ▶ Glissement de terrain.