



Résumé technique du Guide de bonnes pratiques pour la maîtrise de la sismicité induite par les opérations de géothermie profonde

ELEMENTS SUR LE CONTEXTE ET LES OBJECTIFS VISES PAR L'EDITION DE CE GUIDE

En 2023, à la demande de la direction générale de la prévention des risques (DGPR) et de la direction générale de l'énergie et du climat (DGEC), respectivement au sein du ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires et du ministère de la transition énergétique, l'Ineris et le BRGM ont édité un « Guide de bonnes pratiques pour la maîtrise de la sismicité induite par les opérations de géothermie profonde » (dénommé « guide » dans la suite du présent résumé).

Ce guide se veut un reflet de l'état de l'art sur la sismicité induite par les opérations de géothermie profonde. Il s'adresse en priorité aux professionnels de la géothermie car il fait appel au vocabulaire technique et scientifique du domaine (un glossaire est toutefois présent au chapitre 10 du guide). Il vise aussi à éclairer l'ensemble des parties prenantes (associations, riverains, autorités compétentes y compris les DREAL...) sur le risque sismique et les moyens de minimiser la sismicité induite.

Le présent résumé technique reprend les éléments essentiels du guide pour faciliter sa prise en main en mettant l'accent sur les points et les recommandations clés qu'il contient. Il débute par une courte synthèse des chapitres sur les éléments de base concernant l'exploitation des réservoirs géothermiques, y compris le cadre réglementaire applicable aux activités d'exploration et d'exploitation des gîtes géothermiques, les

spécificités de la sismicité induite par injection de fluide et le retour d'expérience dans le domaine. Ce résumé reprend ensuite avec plus de détails les chapitres opérationnels. Il décrit ainsi les grandes lignes de la méthode pour évaluer l'aléa incident sismique, selon la typologie de réservoir géothermique et la méthode d'exploitation envisagée, ainsi que la stratégie de révision itérative de l'aléa à chaque phase clé de développement d'un projet géothermique. Enfin, il synthétise les recommandations concernant les données indispensables à acquérir à chaque étape d'un projet et selon son niveau d'aléa, permettant de dimensionner et gérer un réseau de surveillance microsismique, quand le niveau d'aléa le nécessite. Enfin, des recommandations pour mieux piloter les opérations au regard de la microsismicité détectée sont rappelées.

Il convient de préciser que ce résumé n'a pas vocation à se substituer au guide ; il comprend des renvois aux sections spécifiques du guide pour faciliter la recherche d'informations détaillées correspondantes.

SYNTHESE SUR LES DEFINITIONS, LE CADRE REGLEMENTAIRE ET LE RETOUR D'EXPERIENCE (CHAPITRES 2 A 5)

Le chapitre 2 présente les éléments clés concernant l'exploitation de la géothermie profonde. Il décrit les différentes typologies de contextes géothermiques et présente la classification en trois types de systèmes géothermiques adoptée dans ce guide : systèmes contrôlés par les failles et les fractures, systèmes contrôlés par porosité et perméabilité matricielle et systèmes à contrôle mixte par la porosité matricielle et par la perméabilité de failles et fractures. Ce chapitre décrit aussi les technologies associées à l'exploitation de la ressource géothermale profonde et rappelle succinctement les étapes clés menant à l'exploitation de l'énergie géothermique profonde en rappelant le cadre réglementaire applicable.

Le chapitre 3 décrit les conditions d'occurrence de la sismicité induite par les activités industrielles impactant le sous-sol, en particulier les opérations de géothermie profonde. Les définitions des termes de sismicité naturelle et sismicité induite sont rappelées, ainsi que la description des grandeurs caractéristiques pour mesurer les séismes. Ce chapitre se termine avec une synthèse des cas de sismicité induite à travers le monde et des caractéristiques clés de la sismicité induite par géothermie profonde.

Le chapitre 4 débute par la définition de l'incident sismique, qui est un événement sismique dont l'intensité est de nature à provoquer des nuisances pour la population et les enjeux exposés et à affecter les conditions de déroulement voire la poursuite d'un projet géothermique. Il se poursuit par une vue d'ensemble des incidents sismiques associés à la géothermie profonde comparés au nombre de projets, en France et à l'étranger. Il comprend aussi la présentation des cas d'étude utilisés dans le chapitre suivant. Ce chapitre se termine par une discussion sur la pertinence et la représentativité de ces cas d'études.

Le chapitre 5 identifie les facteurs naturels et anthropiques qui jouent un rôle significatif dans le déclenchement de la sismicité à partir du retour d'expérience des cas d'études présentés au chapitre précédent. Ceux-ci permettent de mettre en évidence deux familles de facteurs de prédisposition de l'aléa de sismicité induite : les facteurs intrinsèques, tels que les facteurs géologiques, hydrogéologiques et structuraux, ainsi que les paramètres opérationnels, tels que les pressions, débits et volumes en jeu ou encore les méthodes d'exploitation. Ce chapitre se conclut sur une vue de synthèse de ces facteurs qui agissent de manière concomitante et complexe sur l'occurrence et l'intensité de la sismicité. Ils sont utilisés dans la suite du guide pour formuler les recommandations et les bonnes pratiques pour évaluer l'aléa et maîtriser la sismicité induite.

SYNTHESE SUR LA METHODE D'EVALUATION DE L'ALEA, LES RECOMMANDATIONS ET BONNES PRATIQUES (CHAPITRES 6 A 8)

L'évaluation de l'aléa incident sismique à tous les moments clés d'un projet (chapitre 6)

La méthode d'évaluation de l'aléa incident sismique s'applique à tous les systèmes géothermiques et à toutes les méthodes d'exploitation. Elle est associée à 4 niveaux d'aléa, indexés de 0 (aléa très faible) à 3 (aléa fort), qui caractérisent la prédisposition de l'occurrence d'un incident sismique (cf Tableau 1). Il relève de la responsabilité de l'opérateur de définir l'incident sismique pour son projet. Lorsque le projet de géothermie est projeté au sein d'une zone urbanisée, l'incident sismique pourrait par exemple correspondre à l'occurrence d'un événement induit d'intensité \geq III sur l'échelle EMS (European Macroseismic Scale). Lorsque le projet de géothermie profonde est projeté au sein d'une zone à faibles enjeux (e.g. zone rurale faiblement urbanisée et industrialisée), l'intensité de référence pour les événements induits redoutés pourrait être plus élevée, par exemple \geq IV.

Tableau 1 : Niveau d'aléa incident sismique, qualification et préconisations associées.

Niveau d'aléa	0	1	2	3
Qualification	Très faible	Faible	Modéré	Fort
Préconisation / recommandation globale	Aucune mesure spécifique n'est à prendre. Application des bonnes pratiques et recommandations définies dans Hamm et al. (2019) ¹	Mise en place de mesures préventives et correctives (surveillance, bonnes pratiques...) adaptées (section 7.3 et chapitre 8 du guide)	Ajustement impératif du programme de travail pour diminuer le niveau d'aléa et éviter autant que possible l'incident sismique	

Pour chaque niveau d'aléa incident sismique, des recommandations spécifiques sont données pour la maîtrise de la sismicité induite (Tableau 1). Un projet qui atteindrait le niveau d'aléa 3, quel que soit le moment où ce niveau est atteint, se verra nécessairement temporairement suspendu de façon à ajuster le programme de travaux afin que le projet repasse à un niveau d'aléa d'au plus 2.

La méthode d'évaluation de l'aléa incident sismique s'appuie sur une démarche itérative illustrée en Figure 1 : l'évaluation initiale intervient avant le premier forage, de préférence lors de la demande d'ouverture des travaux. La réévaluation est ensuite effectuée dès lors que l'évaluation initiale conduit

¹ Hamm, V., Bugarel, F., Giuglaris, E., Goyénèche, O., Guttierrez, A., 2019. Guide de "bonnes pratiques" sur les retours d'expérience des forages géothermiques profonds (No. BRGM/RP-65443-FR).

à un niveau d'aléa > 0 . Dans ce cas, l'aléa incident sismique est nécessairement ré-évalué, autant de fois que nécessaire, à toutes les étapes (ou jalons) clés d'un projet, telles que celles reportées en Figure 1 pour la phase de réalisation des travaux (avant la mise en exploitation). Ainsi, le niveau d'aléa est amené à évoluer au cours de la vie du projet (cf. section 6.4 du guide), grâce à l'acquisition de connaissances sur le réservoir et sa réponse aux opérations de forage et de développement.

Les critères d'évaluation de l'aléa incident sismique à tous les moments clés d'un projet (chapitre 6)

A chaque étape clé d'un projet des arbres de décision définissent les critères à évaluer pour déterminer le niveau d'aléa incident sismique lors de la phase de réalisation des travaux avant la mise en exploitation. Pour les phases d'exploitation et d'arrêt en fin de vie, des recommandations sont formulées pour la réévaluation de l'aléa.

- **Évaluation initiale avant tout forage (Figure 2)** : L'évaluation initiale doit être réalisée pour tous les projets avant la réalisation du premier forage dans le réservoir visé. Cette évaluation peut être adossée au dossier de demande d'autorisation environnementale de travaux miniers. L'évaluation initiale de l'aléa repose sur l'arbre de décision relatif à l'évaluation du niveau d'aléa d'un projet avant tout forage profond (cf. Figure 2) qui se base sur 7 critères (de E0 à E6) et dont l'explication détaillée est donnée dans la section 6.5.1 du guide. La clé d'entrée de cette évaluation est guidée par le type de système géothermique visé qui définit le moteur dominant la circulation des fluides. Ainsi, le critère E0 distingue les systèmes contrôlés par porosité et perméabilité matricielle des systèmes contrôlés par failles et fractures ou à contrôle mixte. Si la circulation de fluide est principalement contrôlée par des failles/fractures, alors le niveau d'aléa ne pourra pas être égal à 0, il est de fait de niveau 1 ou 2. La discrimination entre ces deux niveaux d'aléa dépendra de l'existence ou non de fluides en circulation dans le réservoir (critère E2), de la présence de failles (critère E3) et de leur état de chargement (critères E4) et de la connexion hydraulique avec le socle (critère E5), ainsi que du niveau de sismicité naturelle autour du site (critère E6).
- **Évaluation de l'aléa post forage (Tableau 2)** : la réévaluation du niveau d'aléa après un forage et les premiers essais et tests permettant de caractériser le réservoir est préconisée pour les projets initialement cotés en niveau d'aléa 1 ou 2 au jalon précédent. Elle peut être adossée au programme d'essais de production et repose sur les trois critères (de F0 à F2) décrits dans le **Tableau 2**. Ces critères s'appuient sur les connaissances nouvelles, notamment sur la réponse mécanique et sismique du réservoir aux premiers test hydrauliques, ainsi que sur les structures du réservoir proche puits, acquises après la réalisation du forage. Ces critères, décrits en détail dans la section 6.5.2 du guide, reposent essentiellement sur l'état de chargement des failles/fractures recoupées par le forage ou à proximité (critère F0), sur l'éventuelle occurrence de sismicité induite lors du forage (critère F1), ainsi que sur les premières informations concernant l'injectivité du système puits-réservoir (critère F2).

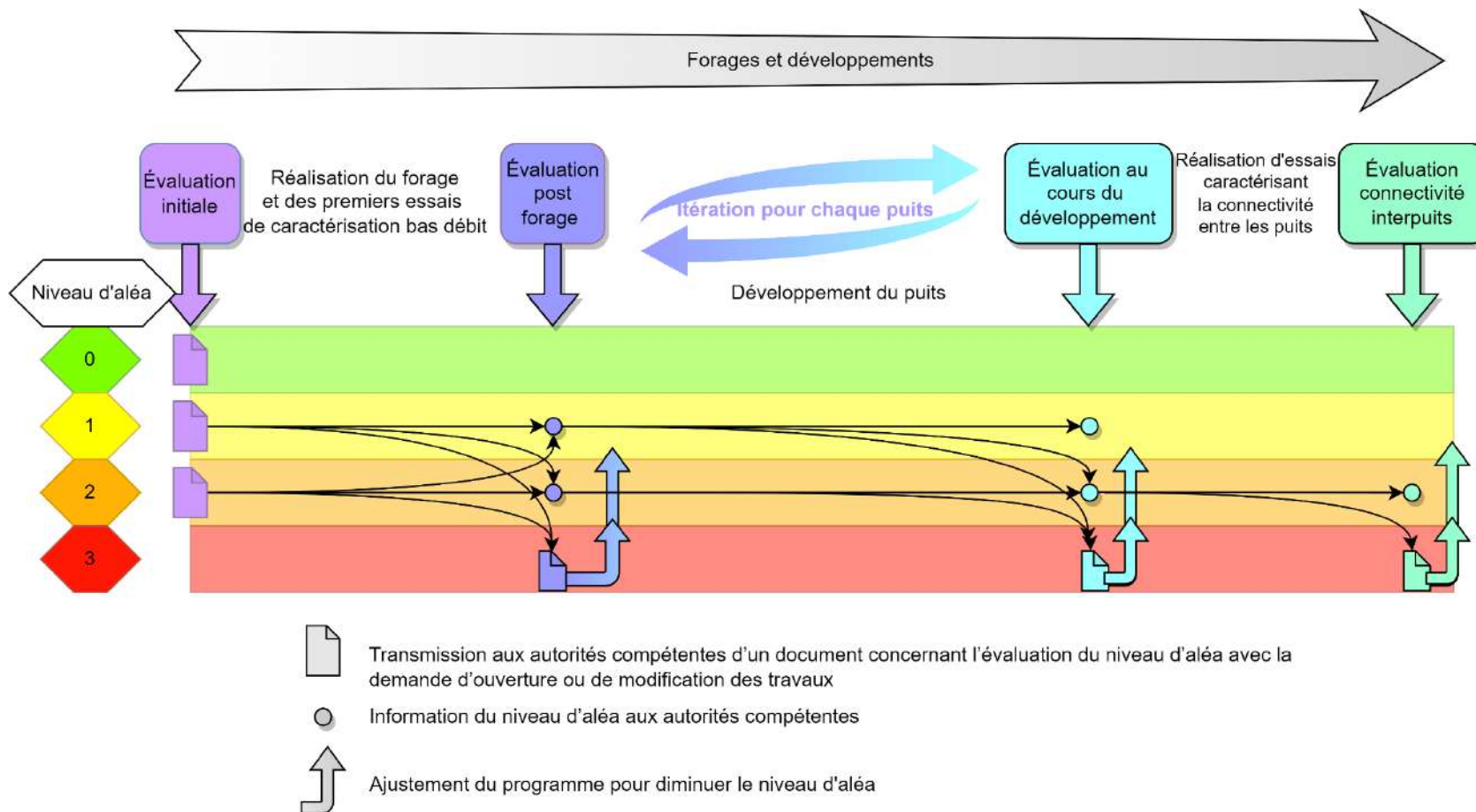


Figure 1 :

Vue schématique de la temporalité et des possibilités d'évaluation du niveau d'aléa incident sismique au cours des étapes les plus sensibles du projet. Une évaluation initiale de l'aléa à transmettre aux autorités compétentes avec la demande d'autorisation environnementale des travaux miniers. Ensuite, tant que le projet reste à un niveau d'aléa incident sismique inférieur ou égal à 2, seule une information aux autorités compétentes est recommandée. Si le projet atteint le niveau 3, il est fortement recommandé de revoir et d'ajuster le programme de travail afin que le projet repasse à un niveau d'aléa d'au plus 2.

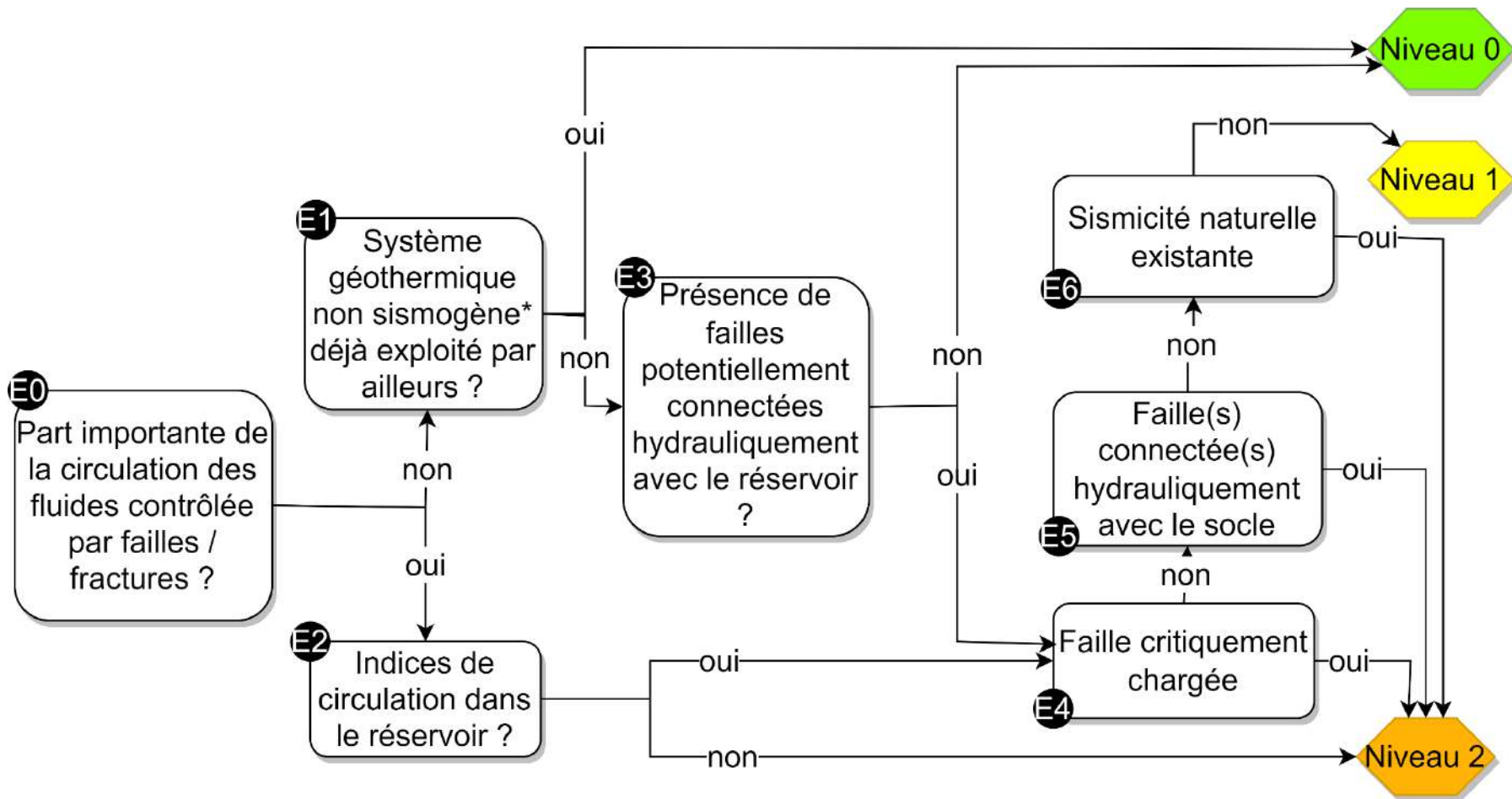


Figure 2 : Arbre de décision pour l'évaluation du niveau d'aléa d'un projet avant tout forage profond. Cette évaluation se fait à partir des données disponibles sur le réservoir géothermique ciblé (e.g. publications scientifiques) ainsi qu'à l'aide des données acquises lors de la phase de prospection (voir section 7.1.1 du guide).

**pas d'incident sismique répertorié, pas de sismicité induite de magnitude $M > 1.5$ enregistrée.*

- **Evaluation de l'aléa au cours du développement (Figure 3)** : le niveau d'aléa incident sismique doit être réévalué après les tests hydrauliques et avant toute opération visant à accroître les capacités de production ou de réinjection du puits, en utilisant des technologies EGS ou non-EGS². Ce protocole d'évaluation de l'aléa est itératif, il est donc préconisé de réitérer cette démarche avant et après la mise en œuvre d'opérations pour accroître l'injectivité / la productivité. Cette réévaluation est préconisée pour les projets initialement cotés en niveau 1 ou 2 lors du jalon précédent et pour lesquels l'indice initial d'injectivité et/ou de productivité apparaissait insuffisant (critère D0). Il s'agit ensuite, d'évaluer la réponse mécanique du réservoir aux sollicitations précédemment mises en œuvre et de prévoir son comportement sous de nouvelles sollicitations (critère D1). En fonction du retour des analyses sur le critère D1, l'exploitant peut choisir de mettre en place un nouveau protocole d'amélioration de l'injectivité/productivité qui mènera à classer le projet en niveau d'aléa 2 si des technologies EGS sont envisagées (critère D2), ou de maintenir le niveau d'aléa précédent, si des technologies non-EGS sont mises en œuvre (critère D3). L'explication détaillée de chacun de ces critères est donnée dans la section 6.5.3 du guide.
- **Evaluation de l'aléa au regard de la connectivité interpuits (cf. section 6.5.4 du guide)** : ce jalon se pose uniquement en cas d'exploitation par sites et non pas par champs³, quand au moins un des puits est en niveau d'aléa 2. Spécifiquement pour ce jalon, l'aléa incident sismique est évalué pour l'intégralité du projet et non plus puits par puits, comme c'était le cas pour toutes les autres évaluations décrites précédemment. L'aléa doit être évalué une fois un essai de connectivité (essai d'interférence par exemple) réalisé, en prenant en compte tous les essais précédemment réalisés sur ces puits. Il s'agit de vérifier que la connexion en pression entre les puits est effective à des pressions correspondant à la pression d'exploitation prévue ; dans le cas contraire le projet doit passer en niveau d'aléa 3.
- **Evaluation de l'aléa au cours de l'exploitation du réservoir** : L'aléa incident sismique sera évalué à ce jalon pour l'intégralité du projet et non plus puits par puits. Lors de la mise en circulation de la boucle, il est recommandé que le niveau d'aléa reste le même que pour les opérations précédentes. Si deux puits (ou plus) ont des niveaux d'aléa différents il est préconisé de prendre le niveau d'aléa le plus élevé pour le projet dans son ensemble. Lors de l'exploitation, l'aléa devra être réévalué tous les ans pendant 5 ans, puis tous les 5 ans après 5 ans d'exploitation. L'aléa sera également systématiquement évalué avant toute opération provoquant des modifications importantes sur la circulation, ainsi qu'en cas de sismicité forte et/ou inattendue (voir la section 6.5.5 du guide). Si au bout de 5 ans aucun incident (sismicité ressentie et/ou seuil rouge du TLS⁴ dépassé) n'a été répertorié, le niveau l'aléa pourra diminuer d'un niveau. Par exemple, pour un projet de niveau 1, si au bout de 5 ans le niveau de sismicité induite est négligeable (niveau de sismicité enregistré identique au niveau enregistré dans les 6 mois précédents le premier forage),

² Les technologies non-EGS visent à adapter la géométrie du puits aux caractéristiques du réservoir (puits déviés, forages horizontaux, etc.), alors que le terme EGS (*Enhanced/Engineered Geothermal System*) fait ici référence aux stimulations hydrauliques, thermiques et/ou chimiques réalisées à des pressions de fluide significativement supérieures à la pression initiale du réservoir.

³ Par site d'exploitation on entend un projet géothermique formé d'un forage de production unique ou regroupant quelques forages proches (doublets, triplets, etc.) organisés en forages de production et forages de réinjection. Un champ d'exploitation désigne un projet qui comprend plusieurs forages de production et éventuellement quelques forages de réinjection (voir la section 2.1.2.2 du guide).

⁴ TLS (*Traffic Light Systems*) : Systèmes indiquant un niveau de vigilance ou d'alerte basé sur des critères et seuils déclenchant des feux de signalisation vert, (parfois jaune), orange ou rouge afin d'atténuer la sismicité induite.

le niveau d'aléa pourra être ramené à 0. Ainsi, il sera possible pour un projet de niveau 2, sans sismicité, de passer au niveau d'aléa 0 au bout de 10 ans.

- **Evaluation de l'aléa avant l'arrêt définitif de l'exploitation** : dans le cas de l'arrêt définitif en fin de vie d'un projet, il est recommandé de maintenir le niveau d'aléa précédent durant la phase d'arrêt de l'exploitation. Si le projet est arrêté alors qu'il est en niveau d'aléa 1 ou 2, celui-ci fait nécessairement l'objet d'une surveillance par un réseau sismique permanent (cf. chapitre 7 du guide). Ainsi, une fois l'exploitation arrêtée, il est recommandé de poursuivre la surveillance pendant au moins 1 an et de suivre l'évolution de la sismicité. Les recommandations détaillées sur les conditions de changement de niveau d'aléa en phase d'arrêt et sur la poursuite de la surveillance sismique sont précisées dans la section 6.5.6 du guide. A noter que le guide ne traite pas le cas d'arrêt définitif en cours de développement d'un forage ou de l'arrêt définitif d'exploitation à la suite d'un incident sismique. Dans une telle situation, il conviendra d'évaluer la situation au cas par cas.

En outre, Il appartient à l'opérateur d'informer les autorités compétentes du niveau d'aléa incident sismique du projet *a minima* à chacun des jalons identifiés en Figure 1. Par ailleurs, si les données opérationnelles mènent à une divergence significative avec le niveau d'aléa précédemment estimé, il est alors recommandé de procéder à une réévaluation de l'aléa même si cette divergence ne se produit pas lors d'un jalon.

Tableau 2 : Arbre de décision pour l'évaluation du niveau d'aléa d'un projet après un forage et les premiers essais de caractérisation du réservoir. *En cas de sismicité ressentie pendant le forage le niveau d'aléa passe immédiatement à 3.

FO – Faille critique ment chargée	F1 – Microsismicité pendant le forage*	F2 – Indice d'injectivité "insuffisant"	Niveau d'aléa
oui	oui	oui	3
		non	2
	non	oui	2
		non	2
non	oui	oui	2
		non	2
	non	oui	Si technologies EGS 2, sinon 1
		non	1

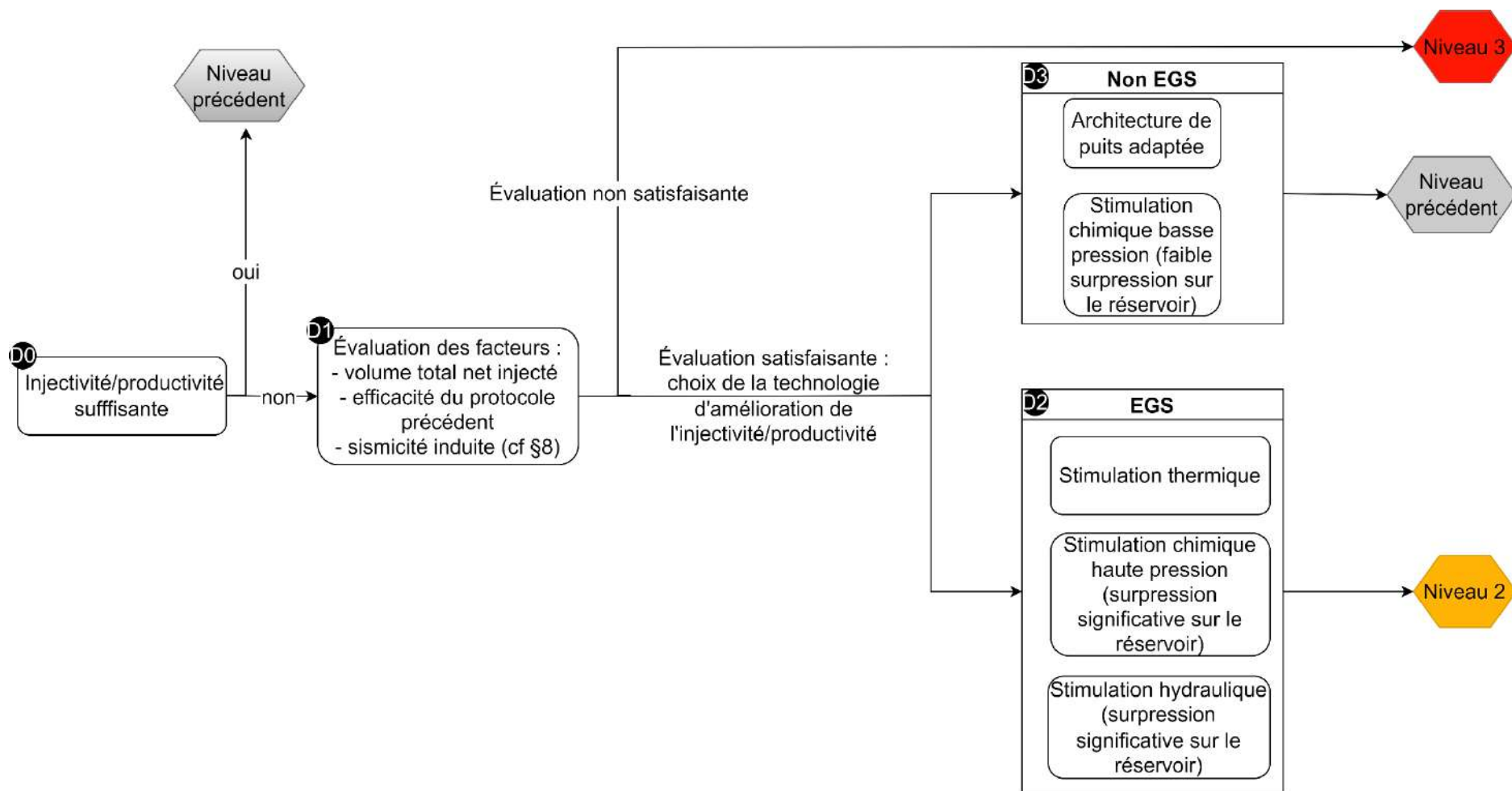


Figure 3 : Arbre de décision au cours du développement du puits.

Recommandations sur les mesures, données, savoirs et les modèles (cf. chapitre 7 du guide)

Le chapitre 7 du guide fournit les recommandations pour une meilleure acquisition et une meilleure utilisation des connaissances techniques et scientifiques nécessaires à l'évaluation du niveau d'aléa d'incident sismique (cf. chapitre 6 du guide), ainsi que pour faciliter l'aide à la décision durant le déroulement des différentes opérations (cf. chapitre 8 du guide). Ainsi, ce chapitre rassemble les mesures, données et savoirs qu'il est nécessaire d'acquérir, ceci en fonction des différentes phases du projet et de son niveau d'aléa, afin de mieux connaître, appréhender et anticiper, autant que possible, le comportement du réservoir face aux sollicitations qui lui sont imposées. Les recommandations formulées visent donc à couvrir plusieurs domaines d'investigations tels que les aspects hydrauliques, géologiques, structuraux, géomécaniques, physico-chimiques et sismiques des réservoirs géothermiques. Pour la liste complète des données et connaissances recommandées à chaque étape d'un projet de géothermie profonde, il convient de se référer au chapitre 7 du guide.

Les données et connaissances acquises doivent être interprétées et utilisées afin d'élaborer des modèles visant à obtenir un pronostic pertinent du comportement du réservoir face aux différentes sollicitations prévues au cours de la vie du projet. Selon la complexité du réservoir et le niveau de connaissance acquis, ces modèles peuvent aller de calculs analytiques relativement simples, aux simulations numériques multiphysiques les plus complexes. Ainsi, dans le guide sont listés les données et savoirs nécessaires au moins pour élaborer, alimenter et mettre à jour, à chaque étape du projet, des modèles de réservoir. Ces modèles doivent nécessairement s'accompagner de l'identification des incertitudes associées et de leur évaluation.

Compte tenu de la spécificité de chaque projet de géothermie profonde, la liste des données et savoir à acquérir proposée dans le guide peut ne pas être exhaustive. Il est de la responsabilité de l'opérateur de se donner les moyens d'acquérir les données pertinentes et nécessaires à l'évaluation et à la gestion de l'aléa incident sismique pour son projet, ainsi que pour alimenter et faire évoluer les modèles de réservoir.

Ce chapitre propose enfin des recommandations pour la bonne gouvernance des données et modèles, qui devraient être idéalement gérés en suivant le principe FAIR (*Findable / trouvable, Accessible / accessible, Interoperable / interopérable, Reusable / réutilisable*) tout au long de la vie d'un projet. Il rappelle aussi l'intérêt de mutualiser les connaissances entre opérateurs d'un même réservoir, ainsi que de rendre publics, en temps quasi-réel, sur des sites internet avec accès libre, les catalogues sismiques enregistrés (avec information sur la localisation, le temps d'occurrence et la magnitude) ainsi que la carte des épicrocentres.

Recommandations pour la surveillance microsismique (cf. chapitre 7)

Les recommandations concernant la surveillance microsismique formulées au chapitre 7 ne s'appliquent qu'aux projets en niveau d'aléa 1 et 2. Cette surveillance repose sur le déploiement d'un réseau sismique dédié de base, qui devra être renforcé sous certaines conditions (cf. Tableau 3). Ce renforcement peut se faire soit par l'ajout de stations permanentes soit par l'installation d'un réseau temporaire (ou les deux). Le renforcement du réseau sismique est notamment nécessaire dans les cas suivants :

- en cas d'occurrence d'événement de $M > 0,5$ et $PGV > 0.5$ mm/s à au moins deux stations dans un rayon de 1 km pendant la phase de forage, si le réseau n'est pas déjà renforcé ;
- systématiquement en phase de développement quand des technologies EGS sont employées (projets en niveau d'aléa 2), ce renforcement peut se faire à tout moment avant les stimulations EGS ;
- en cas de dépassement du seuil orange du TLS (voir section 8.2.2 du guide) en phase de développement (hors application de technologies EGS) et/ou en phase d'exploitation ;

- en cas d'occurrence d'une sismicité ressentie en surface⁵ (indépendamment de sa magnitude) à tout moment du projet.

Tableau 3 : Synthèse des recommandations pour les réseaux sismiques en fonction du niveau d'aléa et de la phase des projets géothermiques. M fait référence à la magnitude des événements.

	Phase avant forage	Phase de forage	Phase de développement ¹	Phase d'exploitation
Projets en niveau d'aléa 0				
Réseau de base	Ne s'applique pas			
Réseau renforcé ³				
Projets en niveau d'aléa 1				
Réseau de base	Oui (6 mois avant)	Oui	Oui	Oui
Réseau renforcé ³	Non	Si M > 0,5 et PGV > 0,5 mm/s	Si dépassement seuil orange du TLS ²	Si dépassement seuil orange du TLS ²
Projets en niveau d'aléa 2				
Réseau de base	Oui (6 mois avant)	Oui	Oui	Oui
Réseau renforcé ³	Non	Si M > 0,5 et PGV > 0,5 mm/s	Toujours	Si dépassement seuil orange du TLS ²

¹ à noter que pour les projets en niveau d'aléa 1 la phase de développement n'implique pas nécessairement l'application de technologies de type EGS, alors que cela est toujours le cas pour la phase de développement des projets en niveau d'aléa 2 ; ² voir le chapitre 8 du guide pour le pilotage des opérations par un système TLS (Traffic Light System). ³ le réseau renforcé peut être installé à tout moment avant la phase à laquelle il est nécessaire.

Le Tableau 4 regroupe les objectifs et les performances techniques pour les réseaux sismiques en fonction du niveau d'aléa des projets de géothermie profonde. Pour le réseau de base, il est préconisé une magnitude de complétude $M_c \leq 0,5$ pour un minimum de 5 stations sismiques, équipées de géophones, pour les projets en niveau d'aléa 1, et 7 stations, pour les projets en niveau d'aléa 2. Cette magnitude de complétude est attendue en fonctionnement normal, c'est-à-dire en dehors des opérations de forage dont le bruit pourrait perturber l'enregistrement de la sismicité. Les projets de niveau d'aléa 2 comprendront également *a minima* une station accélérométrique de surface pour permettre l'enregistrement d'éventuels événements forts ($M > 3$) qui pourraient saturer les vélocimètres.

Avant l'installation du réseau de surveillance (de base et/ou renforcé) et préalablement à toutes modifications d'un réseau existant, il sera indispensable de réaliser une étude de conception basée sur des simulations numériques pour déterminer la géométrie optimale (nombre et position des capteurs) du réseau sismique en fonction de la magnitude de complétude et de l'erreur de localisation visées (cf. section 7.3.3 du guide pour plus de précisions sur l'étude de conception).

⁵ Il convient de remarquer que l'occurrence d'une sismicité ressentie en surface en phase de forage est un phénomène très rare, peu documenté en littérature.

Tableau 4 : Synthèse des objectifs et des performances techniques pour les réseaux sismiques en fonction du niveau d'aléa des projets géothermiques.

Objectifs et performances techniques visés		
	Projets en niveau d'aléa 1	Projets en niveau d'aléa 2
Réseau de base	<p>Détecter, localiser et estimer la magnitude de la microsismicité avec une magnitude de complétude $M_c \leq 0,5$ à l'aide de 5 stations sismiques.</p> <p>Précision de localisation de ± 300 m horizontalement et ± 1 km verticalement dans les 2 km autour du forage.</p> <p>Garantir une localisation précise des événements potentiellement ressentis avec une précision inférieure à l'extension de l'exploitation.</p> <p>Permettre le fonctionnement d'un système TLS (section 8.2 du guide) pour le pilotage des opérations.</p>	<p>Détecter, localiser et estimer la magnitude de la microsismicité avec une magnitude de complétude $M_c \leq 0,5$ à l'aide de 7 stations sismiques, dont au moins un accéléromètre.</p> <p>Précision de localisation de ± 100 m horizontalement et ± 500 m verticalement dans les 2 km autour du forage.</p> <p>Permettre l'estimation des paramètres à la source et des mécanismes focaux pour les événements les plus forts ($M > 1,5$).</p> <p>Permettre le suivi et la caractérisation de l'évolution spatio-temporelle et énergétique de la microsismicité (statistiques sismiques), ainsi que le pilotage par un TLS avec approche prédictive pour les stimulations EGS.</p>
Réseau renforcé	<p>Améliorer les performances du réseau en termes de détectabilité et de localisation</p> <p>Élargir la zone de couverture du réseau sismique</p>	

Recommandations pour le pilotage des opérations (chapitre 8)

Les projets en niveau d'aléa 1 et 2 doivent être équipés d'un TLS (*Traffic Light Systems*) pour la maîtrise de la sismicité. Il est recommandé que le TLS soit basé sur un plan d'action à trois seuils (Vert, Orange et Rouge) pour les projets ne nécessitant pas de stimulation EGS et à quatre seuils (Vert, Jaune, Orange et Rouge) exclusivement durant les phases de stimulation EGS (voir Figure 4). Comme détaillé dans la section 8.2.2 du guide, une stratégie de mitigation adaptée au projet doit être mise en place pour chaque seuil du TLS. Cette stratégie doit reposer sur des variables sismiques et hydrauliques clés pour lesquelles il faut définir des valeurs limites (voir les sections 8.2.3 et 8.2.4 du guide pour plus de détails).

En phase de stimulation avec application de technologies EGS (uniquement pour les projets en niveau d'aléa 2), il est recommandé d'introduire une approche prédictive (statistique et/ou empirique) dans le TLS. En pratique, cela revient à imposer un suivi dynamique (qui évolue au cours du temps) des variables sismiques en fonction des paramètres opérationnels tels que le volume, le débit ou la pression. Pour plus de détail sur les TLS combinés à des approches statistiques et/ou empiriques prédictives, le lecteur est renvoyé à la section 8.1.2 du guide.

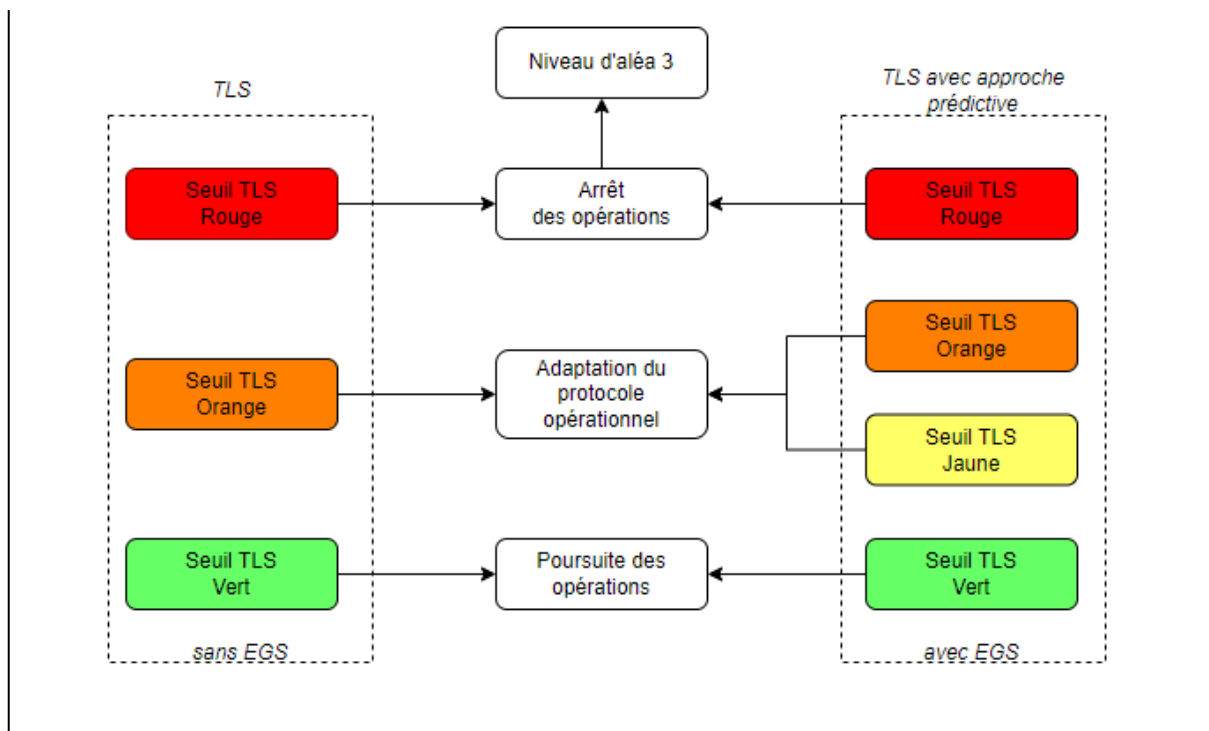


Figure 4 : représentation schématique du lien entre les seuils TLS et la conduite des opérations géothermiques. Le seuil Jaune n'intervient que durant les phases de stimulation EGS ; celles-ci nécessitent aussi d'introduire une approche prédictive dans le TLS.

Pour chaque phase d'un projet de géothermie profonde, le Tableau 5 regroupe les variables sismiques et paramètres opérationnels clés, ainsi que les modalités de pilotage des opérations. Dans quelques cas particuliers, comme par exemple en phase de forage, où le TLS ne s'applique pas, des préconisations spécifiques sont formulées à la section 8.3 du guide.

Les opérations doivent être menées sur la base de protocoles opérationnels adaptés au projet, au système géothermique, aux technologies mises en œuvre et aux objectifs visés. Il est recommandé qu'un protocole opérationnel soit défini avant de commencer une opération. Pour cela, il s'agit notamment de s'appuyer sur :

- les retours d'expérience des projets proches ou dans des contextes analogues ;
- les résultats des modèles hydrauliques et géomécaniques, en conservant un esprit critique quant à la validité et la significativité des modèles au regard des incertitudes ;
- l'historique éventuel des opérations déjà réalisées, les volumes cumulés, les pressions d'activation des failles, ainsi que les caractéristiques de la sismicité éventuellement déjà enregistrée.

Tableau 5 : Synthèse des paramètres et modalités pour le pilotage des opérations à chaque étape d'un projet.
Tableau valable pour les projets en niveau d'aléa 1 et 2. M indique la magnitude des événements sismiques.

	Phase de forage	Phase de développement (hors technologies EGS)	Phase de développement (technologies EGS)	Phase d'exploitation
Mode de pilotage	Pas de TLS	TLS	TLS avec approche prédictive	TLS
Nombre recommandé de seuils TLS	-	3	4	3
Variables sismiques d'intérêt (a minima)¹	M	M, PGV (Distance de la sismicité, taux de sismicité, etc.) ²	M, PGV, application d'une loi prédictive (type McGarr, Galis et al., van der Elst et al., etc.)	M, PGV
Paramètres opérationnels et hydrauliques d'intérêt	Poids de boue de forage	Volumes injectés Surpression réservoir Indice d'injectivité	Volumes injectés Surpression réservoir Vitesse de variation des surpressions Indice d'injectivité Pression de réactivation des failles	Volumes injectés Surpression réservoir

¹ Ces variables sismiques doivent être estimées en quasi-temps réel, elles sont donc à la base de la chaîne de traitement des données sismiques en temps réel ; ² d'autres critères sismiques pourront être proposés par les opérateurs pour renforcer les TLS, notamment pour les projets en niveau d'aléa 2.

De manière générale, toutes les étapes consécutives à la phase de forage doivent faire l'objet d'un protocole opérationnel précis. Les recommandations pour son élaboration sont formulées aux sections 8.4.2 et 8.4.3 du guide. Ce protocole s'accompagne nécessairement d'une stratégie d'adaptation des opérations en cas d'atteinte d'un des seuils du TLS.

Enfin, la rétro-analyse croisée des données sismiques et de forçage est recommandée à chaque étape d'un projet géothermique pour les projets en niveau d'aléa 1 ou 2. Le Tableau 6 synthétise les préconisations formulées à cet égard.

Tableau 6 : Synthèse des rétro-analyses réalisables sur les données à chaque étape d'un projet.
Tableau valable uniquement pour les projets en niveau d'aléa 1 et 2.

	Phase de forage	Phase de développement (hors technologies EGS)	Phase de développement (technologies EGS)	Phase d'exploitation
Rétro-analyses sur les données sismiques et opérationnelles (a minima)	Corrélation de la localisation de la sismicité avec les imageries de puits et les modèles	Corrélation de la localisation de la sismicité avec les imageries de puits et les modèles Analyse croisée de la sismicité avec les paramètres de forçage et l'indice d'injectivité	Corrélation de la localisation de la sismicité avec les imageries de puits et les modèles Analyse croisée de la sismicité avec les paramètres de forçage et l'indice d'injectivité ; Mécanismes focaux ; Relocalisation par double différence	Analyse croisée de la sismicité avec les paramètres de forçage

CONCLUSIONS

Les sujets liés à la maîtrise de la sismicité induite dans le contexte de la géothermie profonde, tels que traités dans le guide, sont de nature complexe. La mise en application des recommandations formulées dans le guide nécessite des compétences spécifiques ainsi qu'une expertise technique pointue. C'est pourquoi, il est ici rappelé que l'opérateur peut faire appel à des experts externes, s'il n'a pas les compétences nécessaires en interne, y compris pour constituer tout ou partie du dossier de demande d'autorisation environnementale de travaux miniers. De plus, il est rappelé que conformément à l'article 11-1 du décret n°2006-649 du 2 juin 2006 relatif aux travaux miniers, aux travaux de stockage souterrain et à la police des mines et des stockages souterrains, le dossier de demande d'autorisation peut faire l'objet aux frais de l'exploitant, par un organisme tiers expert accepté par l'exploitant, d'une analyse critique de tout ou partie des pièces du dossier de demande d'autorisation d'ouverture de travaux, des études, données techniques, programmes ou rapports qui justifient des vérifications particulières.