

## GÉOTHERMIE – ANALYSE DE RISQUES

### Evaluation des risques géothermiques projet Château Colpach

N° de référence	20250297-GC-HYDROGEOL-G001	
Suivi	Nom	Date
Rédigé par	Laurence PLÈNECASSAGNE	12/11/2025
	Yvan SILVERIO	12/11/2025
Vérifié par	Laurence PLÈNECASSAGNE	12/11/2025

#### Modifications

Indice	Description	Modifié par	Date



## Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>5</b>
1.1	Contexte, objectifs et cadre de l'analyse .....	5
1.2	Définition : Géothermie sur sondes – Principe et caractéristiques.....	5
1.3	Aspects législatifs.....	6
<b>2</b>	<b>Présentation des formations géologiques .....</b>	<b>7</b>
2.1	Aquifères du Trias Nord.....	7
2.1.1	Contexte géologique .....	7
2.1.2	Forage de reconnaissance hydrogéologique (FRE-805-17) à Colpach .....	8
2.2	Géologie des formations sous-jacentes : Formations du Dévonien.....	10
2.2.1	Contexte géologique .....	10
2.2.2	Hydrogéologie du socle Dévonien.....	11
<b>3</b>	<b>Revue des impacts de la réalisation des forages de sondes géothermiques sur les aquifères .....</b>	<b>12</b>
3.1	Origines des impacts : causes conceptuelles et organisationnelles.....	12
3.1.1	Risques liés à une connaissance géologique insuffisante .....	12
3.1.2	Conception inadaptée .....	12
3.2	Conséquences financières (et responsabilités) .....	13
3.3	Origine des impacts : mécanismes et conséquences .....	13
3.3.1	Cimentation défectueuse - Altération de l'étanchéité verticale.....	13
3.3.2	Mise en communication accidentelle de nappes .....	13
3.3.3	Réactions géochimiques dans les terrains traversés .....	14
3.3.4	Déstabilisation thermique et mécanique .....	14
3.3.5	Pollution par fluide caloporteur.....	14
3.3.6	Autres aléas liés aux forages.....	15
3.4	Conclusions sur les aléas .....	15
<b>4</b>	<b>Méthodologie d'analyse des risques appliquée aux aquifères du Trias Nord (différenciés et indifférenciés).....</b>	<b>16</b>
4.1	Notion de risque, d'aléa et d'enjeu .....	16

4.2	Méthode de calcul des risques associés à la géologie du faciès .....	16
4.2.1	Principe de notation.....	16
5	Analyse du risque dans les formations du Trias faciès de bordure et du Dévonien à Colpach .....	19
5.1	Présentation du projet .....	19
5.2	Relation entre la profondeur des sondes, leur nombre et les aquifères Trias-Dévonien .....	19
5.3	Cotation du risque .....	19
5.4	Conclusion - Valorisation des données du forage de reconnaissance (FRE-805-17) – Spécificités du faciès de bordure .....	23
6	Recommandations et mesures de prévention .....	24
6.1	Recommandations quant au dimensionnement du champ de sondes .....	24
6.2	Recommandations quant aux forages (préparation et phase chantier) .....	24
6.2.1	Techniques et outils de forage .....	24
6.2.2	Enregistrement des paramètres de forage .....	24
6.2.3	Méthodologies de forage spécifique .....	25
6.3	Cimentation des SGV.....	26
6.4	Type de fluide caloporteur .....	26
6.5	Contrôles, essais et documentation .....	27
	• Contrôles de la cimentation.....	27
	• Essais et contrôles des sondes géothermiques .....	27
	• Vérifications du circuit de raccordement.....	27
	• Suivi hydrogéologique si des ouvrages sont disponibles .....	27
7	Conclusion .....	28
8	Remarques finales.....	29
9	Références.....	30

## Liste des figures

Figure 1. Evolution latérale des faciès du Trias d'Est en Ouest (d'après (5)) .....	8
Figure 2. Position du forage de reconnaissance FRE-805-17 sur fond de carte géologique harmonisée ....	9
Figure 3. Photographies de carottes du FRE-805-17 – (1) Horizon géologique gréseux – (2) Horizon géologique conglomératique à matrice gréseuse.....	10
Figure 4. Photographie de carotte du FRE-805-17. Horizon géologique correspondant au toit du Dévonien (formation de Grumelange) à Colpach. ....	11

## Liste des tableaux

Tableau 1. Liste non-exhaustive des aléas potentiels d'ordre conceptuel .....	20
Tableau 2. Aléas potentiels selon les particularités géologiques du Trias faciès de bordure et du Dévonien .....	21
Tableau 3. Revue non exhaustive et cotation des risques liés à l'exécution d'un forage géothermique sur sondes traversant le Trias Randfazies et le Dévonien ( $S_{g3}$ ) (A. NV : Application des normes en vigueur NF X10-970, XP X10-950, SIA 384/6, VDI 4640) .....	22

## **1 Introduction**

### **1.1 Contexte, objectifs et cadre de l'analyse**

Dans le contexte actuel de transition énergétique et de développement des énergies renouvelables, la géothermie de faible profondeur connaît un essor significatif. Cependant, la multiplication des sondes géothermiques peut présenter certains risques notamment pour les eaux souterraines. Le projet de rénovation du château de Colpach-bas porté par la Croix-Rouge Luxembourgeoise prévoit la réalisation d'un champ de sondes géothermiques pour couvrir ses besoins en chauffage de 57 MWh/an.

À la suite d'un forage de reconnaissance et d'une réunion avec l'AGE, il a été décidé que, compte tenu des potentielles séparations hydrauliques de l'aquifère du trias (faciès de bordure) avec les eaux du Dévonien, une attention particulière doit être portée à la protection de la partie inférieure de l'aquifère lors de l'installation des sondes géothermiques. Le cumul entre projets et la multiplication de sondes géothermiques peut présenter certains risques notamment pour les eaux souterraines. C'est dans ce contexte que l'Administration de la Gestion de l'Eau a demandé la réalisation d'une analyse des risques géothermiques vis-à-vis des formations du Trias et du Dévonien appliquée au projet de la Croix-Rouge

La Croix-Rouge Luxembourgeoise a ainsi mandaté Géoconseils pour la réalisation de cette analyse.

Ce rapport a vocation à faciliter la prise de décision concernant la géothermie en phase d'autorisation du projet et sera joint aux demandes d'autorisations.

### **1.2 Définition : Géothermie sur sondes – Principe et caractéristiques**

Une installation géothermique sur sondes géothermiques verticales (SGV) vise à capter (en mode chauffage) et à dissiper (en mode climatisation) des calories dans les formations géologiques du sous-sol au moyen d'un échangeur thermique appelé « sonde géothermique verticale ». En effet, après quelques dizaines de mètres de profondeur, le sous-sol présente une température stable tout au long de l'année ce qui permet au système géothermique de bénéficier d'un rendement énergétique (COP) important et stable. Une sonde géothermique est constituée de tubes, généralement double U, en PEHD (Polyéthylène haute densité) installés à la verticale dans un forage dont le diamètre est compris entre 130 et 200 mm et liés au sous-sol par un ciment thermique.

Un fluide caloporteur circule en circuit fermé dans la sonde et échange des calories par conduction avec le sous-sol. Les sondes sont ensuite reliées par un réseau de canalisations jusqu'à une pompe à chaleur qui alimente en chaud et en froid le bâtiment.

La profondeur des sondes varie selon les besoins énergétiques du projet et les contraintes de dimensionnement mais est généralement de l'ordre de 50 à 200 m.

### **1.3 Aspects législatifs**

La réalisation de forages géothermiques sur sondes est encadrée par la réglementation luxembourgeoise.

De façon à assurer la pérennité de la ressource en eau et la durabilité des installations de géothermie de faible profondeur, l'Administration de la Gestion de l'Eau met à disposition du public sur le site <https://www.geoportail.lu/fr/> des données cartographiques au moyen d'une couche vectorielle renseignant l'admissibilité des sondes géothermiques dans tout le territoire du Grand-Duché de Luxembourg.

La réalisation de sondes géothermiques verticales est encadrée par plusieurs normes et notamment les normes européennes et guides de bonnes pratiques.

La réalisation de forages géothermiques sur sondes est régie au Luxembourg par la possession d'un agrément dans le domaine de l'eau délivré par le ministère de l'Environnement, du Climat et de la Biodiversité. Les travaux de forage sont à réaliser par du personnel qualifié et une société de forage certifiée suivant DVGW W120-2, Certiforage ou équivalent.

Cette condition est intégrée aux conditions données dans les arrêtés ministériels délivrés pour la réalisation de SGV (1).

## **2 Présentation des formations géologiques**

### **2.1 Aquifères du Trias Nord**

#### **2.1.1 Contexte géologique**

Les aquifères du Trias Nord, notamment ceux du Buntsandstein, du Muschelkalk supérieur et du faciès de bordure (Trias Randfazies) appartiennent à la région naturelle du Gutland. Celle-ci correspond à la partie sud du pays, dont la géologie est caractérisée par une succession de dépôts sédimentaires mésozoïques reposant en discordance sur le socle schisteux dévonien (2).

Dues aux variations d'environnements de dépôts, cette séquence stratigraphique n'est pas continue d'ouest en est au Grand-Duché. Les environs de Colpach se trouvent en bordure du bassin sédimentaire et les faciès géologiques ont leurs caractéristiques propres.

#### **Faciès de bordure du Trias Nord**

Cette entité correspond à un ensemble lithostratigraphique au sein duquel les formations du Buntsandstein et du Muschelkalk sont considérées comme indifférenciées. La délimitation géographique de cet aquifère est assez restreinte. Elle correspond à la présence du faciès de bordure du Trias ou « Trias Randfazies », dont l'extension latérale est limitée dans l'espace. La Figure 1 ci-dessous témoigne des passages latéraux de faciès du Trias selon l'axe Belgique-Luxembourg-Allemagne et de l'étendue géographique limitée du Trias Randfazies.

Ce faciès particulier résulte des conditions paléogéographiques qui régnaient au début du Mésozoïque : la région se situait alors à proximité des lignes de rivage d'une mer épicontinentale, dans un environnement de dépôt côtier. Cela a conduit à la mise en place de sédiments hétérogènes traduisant des variations latérales et verticales de faciès typiques des zones de transition entre domaines continentaux et marins (3).

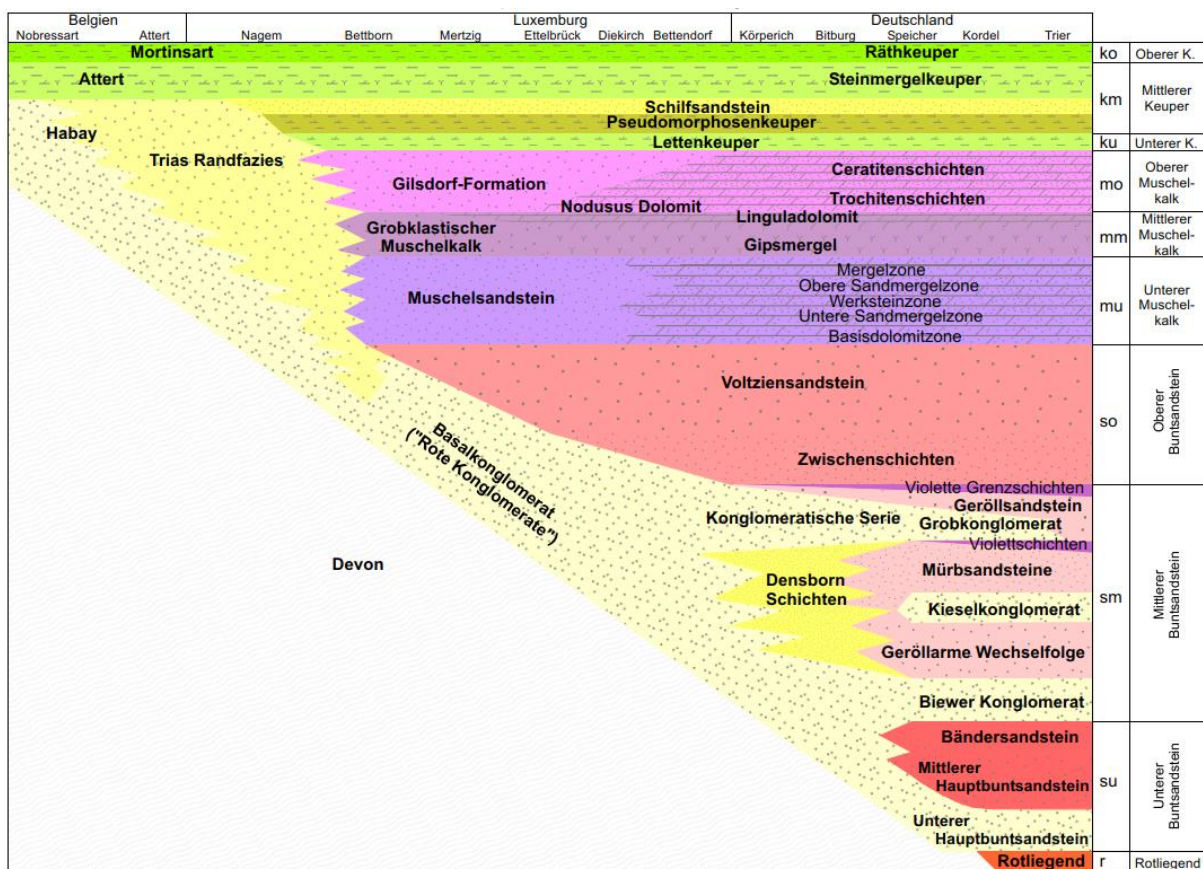


Figure 1. Evolution latérale des faciès du Trias d'Est en Ouest (d'après (4))

### 2.1.2 Forage de reconnaissance hydrogéologique (FRE-805-17) à Colpach

Un forage de reconnaissance carotté de 51m et des investigations hydrogéologiques ont été menées à Colpach dans le cadre du projet de rénovation du Château de Colpach qui projette la réalisation de forages géothermiques sur sondes (5).

L'objectif du forage et des investigations était de caractériser précisément la situation géologique et hydrogéologique, afin de déterminer si, au droit du site, les formations du Buntsandstein et du Muschelkalk forment un aquifère indifférencié tout en reconnaissant la base du Dévonien. Il s'agissait ainsi de vérifier si le site se situe bien dans le faciès de bordure du Trias, où ces deux formations sont généralement en continuité hydraulique, ou si elles constituent ici deux nappes distinctes et non communicantes.

La carte ci-dessous reprend la position du forage sur fond de carte géologique.



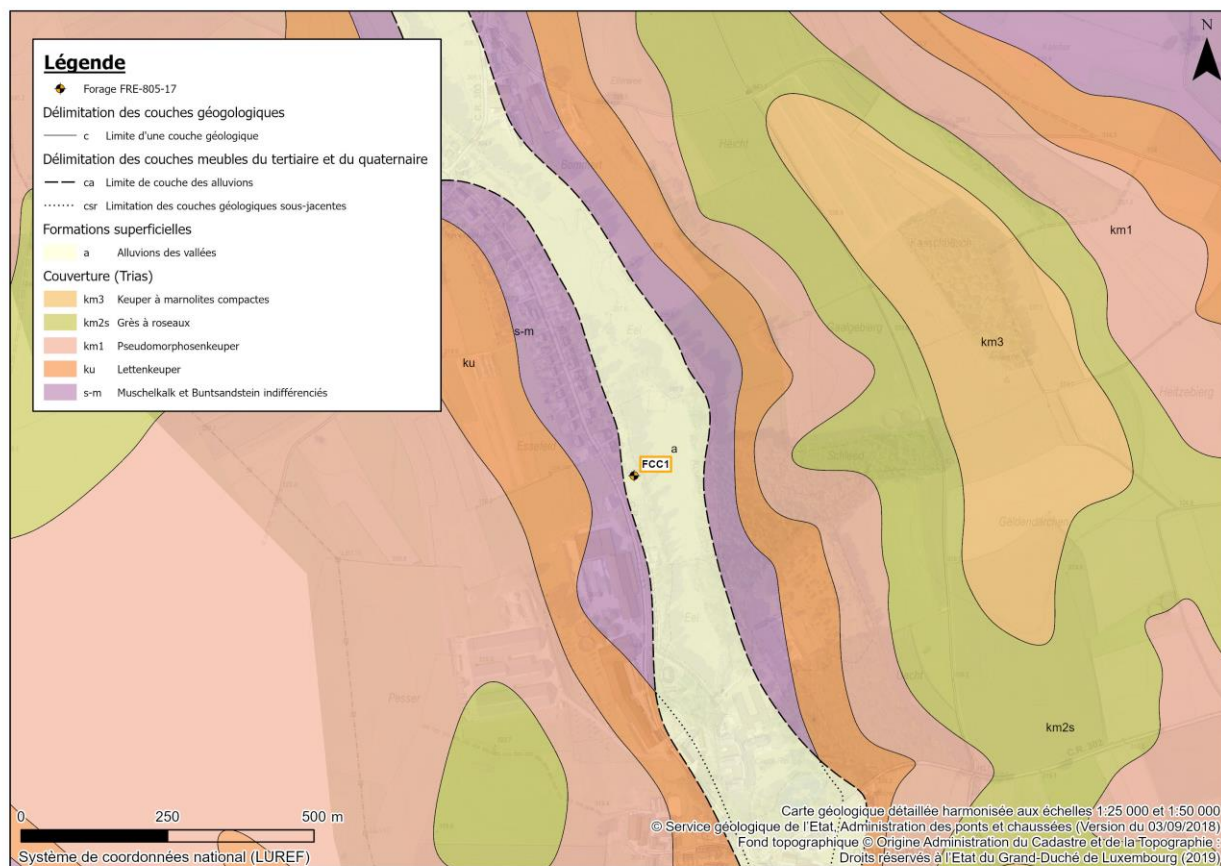


Figure 2. Position du forage de reconnaissance FRE-805-17 sur fond de carte géologique harmonisée

L'interprétation lithologique des carottes de forage a montré une succession géologique correspondant typiquement au faciès de bordure du Trias, avec la présence d'une succession de bancs gréseux rougeâtre, à passages dolomitiques et à intercalations de conglomérats à fragments anguleux et arrondis. Les photographies de carottes ci-dessous illustrent le faciès de bordure du Trias (*s-m* – Muschelkalk et Buntsandstein indifférenciés).



(1)



Figure 3. Photographies de carottes du FRE-805-17 – (1) Horizon géologique gréseux – (2) Horizon géologique conglomératique à matrice gréseuse.

Les investigations hydrogéologiques réalisées dans le cadre de ce forage avaient suggéré la présence d'un aquifère dont l'analyse des échantillons d'horizons différents montrait une homogénéité notable, avec une eau bicarbonatée, soulignant tout de même une évolution géochimique liée à la profondeur avec des eaux légèrement plus riches en chlorures et sulfates à la base de la formation. La productivité de cet aquifère semble également croître avec la profondeur si l'on croit les résultats des investigations de pompages réalisées sur l'ouvrage (rabattement spécifique de 0,4 m / m<sup>3</sup>/h à une profondeur de 45m contre 1,2 m / m<sup>3</sup>/h à 17m) (5).

## 2.2 Géologie des formations sous-jacentes : Formations du Dévonien

### 2.2.1 Contexte géologique

La sédimentation mésozoïque triasique repose, comme énoncé plus haut, sur le socle schisteux du Dévonien, de façon discordante.

Les formations dévoniennes de l'Eislek, sous-jacentes au Trias, correspondent au *Schiste de Stolzembourg* (E<sub>1a</sub>), présent vers le nord-est et localement à l'ouest, et au *Siegenien supérieur en général* (Sg<sub>3</sub>) sous-jacent.

#### Schiste de Stolzembourg (E<sub>1a</sub>)

Cette formation se définit par un faciès schisteux prédominant et de rares bancs de grès quartzeux et de quartzophyllades. Les schistes sont silteux à gréseux, gris foncé à gris bleu foncé. A l'image des couches métamorphiques dévoniennes du Luxembourg, l'épaisseur de cette formation peut atteindre plus du millier de mètres (6).

#### Siegenien supérieur en général (Sg<sub>3</sub>)

Cette formation se caractérise par un faciès de schiste compact, grossier, mal stratifié, avec de rares bancs de grès argileux. Elle se recoupe en plusieurs sous-formations dont notamment la formation de Grumelange (d<sub>26</sub>), que l'on trouve notamment sur la partie ouest du Trias Nord et dont le toit a été atteint sur le forage de reconnaissance carotté FRE-805-17 (cf. Figure 4). Cette dernière se définit par une alternance de phyllades, quartzophyllades et schistes gréseux rubanés, de grès fin et schistes gréseux vers le toit. (7)

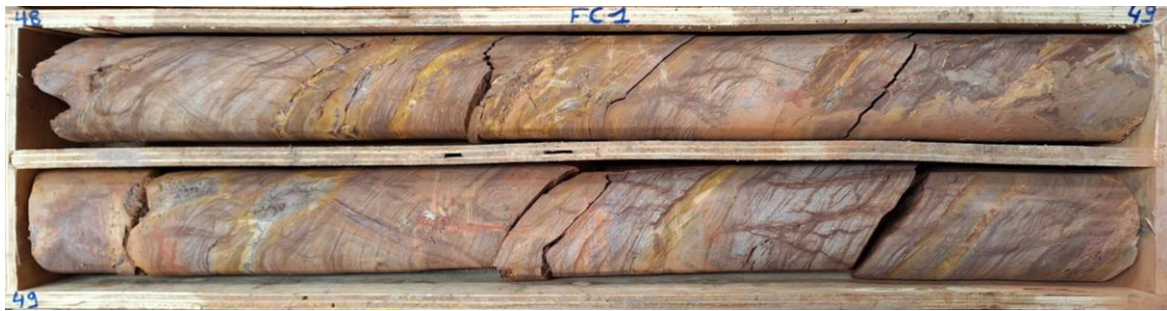


Figure 4. Photographie de carotte du FRE-805-17. Horizon géologique correspondant au toit du Dévonien (formation de Grumelange) à Colpach.

### 2.2.2 Hydrogéologie du socle Dévonien

L'hydrogéologie du socle Dévonien luxembourgeois est caractéristique de ce que l'on observe en contexte de socle, à savoir des aquifères discontinus et de faible extension se développant dans les horizons superficiels altérés et fracturés. En effet, la perméabilité et la porosité des formations géologiques du socle diminuent très fortement à partir d'une profondeur de quelques dizaines de mètres à mesure que l'altération s'estompe et que la densité de fractures diminue. Localement, des failles plus profondes peuvent cependant augmenter la productivité et jouer le rôle de drain. Néanmoins, la productivité de ce type de nappe reste généralement limitée et est fortement influencée par le régime des précipitations.

Au vu des carottes de forages obtenus lors de la réalisation du forage de reconnaissance à Colpach, visibles sur la Figure 6 ci-dessus, le toit du  $S_{g3}$  sous couverture ne semble ne présenter en ce point, qu'une faible fracturation et ainsi une très faible perméabilité.

Les eaux du Dévonien peuvent être considérées comme assez faiblement minéralisées, avec un titre hydrométrique faible en comparaison des eaux du Secondaire, et ne présentent pas de dominance anionique/cationique particulière de façon générale. Elles montrent des eaux légèrement acides, (pH de 6,5) et des conductivités électriques à 20°C inférieures à 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (8).

### **3 Revue des impacts de la réalisation des forages de sondes géothermiques sur les aquifères**

Le développement de la géothermie de surface par sondes verticales va entraîner une multiplication de forages de faible profondeur dans des contextes hydrogéologiques parfois sensibles. Bien que ces systèmes soient généralement à circuit fermé et considérés comme peu intrusifs, plusieurs incidents documentés en France, en Suisse et en Allemagne ont mis en évidence des impacts possibles sur les aquifères.

#### **3.1 Origines des impacts : causes conceptuelles et organisationnelles**

Les impacts les plus courants trouvent leur origine dans plusieurs causes premières, identifiées lors de retours d'expérience sur des projets de géothermie de faible profondeur :

##### **3.1.1 Risques liés à une connaissance géologique insuffisante**

Des hétérogénéités géologiques non identifiées en phase d'étude (variations de faciès, zones karstiques, lentilles sableuses, poches de gaz) peuvent compromettre la sécurité du forage. Une caractérisation insuffisante augmente le risque d'imprévus lors des forages et de la mise en service de l'installation.

##### **3.1.2 Conception inadaptée**

Le dimensionnement géothermique des installations constitue une étape clé dans la pérennité d'un système sur sondes (9). Une conception mal adaptée peut induire des conséquences néfastes sur le sous-sol exploité. Le dimensionnement du nombre de forages, de leur profondeur ou encore de l'écartement inter-sondes doit être adaptée aux besoins thermiques du bâtiment et à ses caractéristiques. Une surexploitation de l'installation en particulier en période hivernale lors du prélèvement de calories, peut notamment provoquer des cycles de gel/dégel du sous-sol au droit des forages. Ces cycles peuvent parfois altérer fortement la roche et par conséquent engendrer des affaissements voir des effondrements de terrain à proximité directe des forages géothermiques (10) (11). Il est ainsi crucial de bien comprendre les conséquences de l'exploitation du champ de sondes sur le sous-sol afin de garantir la pérennité des installations souterraines.

De manière générale, les calculs pour déterminer le nombre de mètres linéaires de sondes sont réalisés sur une puissance linéaire moyenne de 45 W/m de forage, et l'espacement inter-forages choisi est souvent le plus faible possible. Ainsi, les capacités du sous-sol à fournir sur le long terme les besoins du projet sans compromettre l'équilibre de la ressource en chaleur n'est pas pris en compte sur le long terme.

Par ailleurs, dans certains cas, en phase d'exécution, les sociétés de forages peuvent conseiller au maître d'ouvrage au démarrage du chantier une des profondeurs moindres afin de multiplier le nombre de forages. Ces conseils plus lucratifs pour la société de forages ne se font pas forcément au bénéfice de la ressource souterraine et du maître d'ouvrage.



### **3.2 Conséquences financières (et responsabilités)**

L'aspect financier d'un projet peut constituer un risque indirect d'impact dans la mesure où la pratique de l'appel au plus offrant lors des phases de soumission est souvent la norme. En effet, de nombreux maîtres d'ouvrage privilégient des procédures d'attribution basées uniquement sur le critère du prix le plus bas, qui peuvent se révéler au cours du temps au détriment de la qualité des projets.

La pression exercée sur les prix se répercute également sur les phases d'études et de conception. Les entreprises sont incitées à proposer des solutions « clés en main », avec un nombre réduit d'interlocuteurs et des délais serrés, ce qui limite la prise en compte des spécificités techniques et des contraintes réelles du projet. Les expertises plus pointues, essentielles pour anticiper les risques et optimiser les coûts globaux, sont ainsi souvent minimisées ou réalisées de manière tardive.

S'ajoutent des questions de responsabilité : si les spécifications sont trop strictes ou mal adaptées, le maître d'ouvrage peut avoir du mal à prouver la faute des prestataires, surtout si les solutions imposées s'avèrent inadaptées ou surdimensionnées. D'où la nécessité de trouver un équilibre entre recherche d'économies et cahiers des charges réalistes, garants de la qualité sans surcoût excessif.

### **3.3 Origine des impacts : mécanismes et conséquences**

A des impacts d'ordre organisationnel et conceptuel s'ajoutent des risques d'impacts opérationnels.

#### **3.3.1 Cimentation défectueuse - Altération de l'étanchéité verticale**

Première étape critique dans de nombreux incidents, la perte d'étanchéité verticale est généralement liée à une cimentation défectueuse. Lorsque l'espace annulaire de la sonde n'est pas suffisamment étanche, des échanges hydrauliques peuvent apparaître entre couches géologiques jusque-là isolées. Ce phénomène constitue souvent le point de départ d'impacts plus complexes (10) (12) (13).

#### **3.3.2 Mise en communication accidentelle de nappes**

Une conséquence directe de l'altération de l'étanchéité verticale est la mise en communication de deux nappes auparavant distinctes. Cette situation, créant une zone de discontinuité par rapport aux horizons géologiques naturels peut entraîner :

- Un déséquilibre brutal ou progressif des niveaux piézométriques,
- La remontée d'eau sous pression vers des formations supérieures (artésianisme),
- Des modifications du régime d'écoulement local,
- Des apports d'eau dans des formations géochimiquement instables.

Elle peut également engendrer des impacts indirects importants tels que :

- Un assèchement de captages d'eau à la suite d'une baisse importante du niveau piézométrique en amont de l'infrastructure,
- Un phénomène d'inondation par débordement dans le cas d'une élévation importante du niveau piézométrique de la nappe libre, conduisant à la saturation totale de l'aquifère.

Cette mise en communication est parfois temporaire, mais peut suffire à provoquer des réactions irréversibles (10).

### **3.3.3 Réactions géochimiques dans les terrains traversés**

Lorsque de l'eau s'infiltre dans des horizons sensibles, plusieurs réactions peuvent apparaître :

- Formation anhydritique : l'hydratation de l'anhydrite en gypse provoque un gonflement de volume pouvant parfois dépasser 50 %, avec pour effet un potentiel soulèvement du sol.
- Formation salifère : la dissolution du sel peut générer des cavités souterraines, susceptibles de conduire à des affaissements de surface.
- Milieux karstiques ou gazifères : des circulations non contrôlées peuvent entraîner l'érosion de terrains meubles, voire des remontées de gaz accidentelles.

Ces phénomènes **peuvent intervenir avec un délai entre le forage et l'apparition des impacts en surface.**

### **3.3.4 Déstabilisation thermique et mécanique**

En lien avec la conception ou l'exploitation de l'installation, une surexploitation thermique peut entraîner :

- Une congélation du sol à proximité des sondes,
- Une dilatation ou contraction différentielle des terrains,
- Des affaissements localisés lors de cycles de gel/dégel.

**Un dimensionnement inadapté ou une sous-estimation des contraintes thermiques accentue ces effets.**

L'aire d'influence thermique d'un champ de sondes peut grandement varier selon les contextes hydrogéologiques et selon le mode d'utilisation d'un champ de sondes. Cela peut susciter, dans certains cas, des conflits d'usages notamment lorsque d'autres utilisations de la ressource en eau existent. (10)

### **3.3.5 Pollution par fluide caloporteur**

#### Rupture de la sonde

La rupture d'une sonde peut survenir lorsqu'elle n'est pas adaptée aux contraintes du site, notamment :

- Lorsque le diamètre des boucles double U est inadapté.
- Lorsque la contrainte de pression de terrain est trop importante.

Cette rupture peut directement ou indirectement provoquer une pollution du sous-sol ou de l'aquifère par le fluide caloporteur si la cimentation de l'espace annulaire n'est pas homogène ou présente des vides.

#### Mauvaise étanchéification des raccordements

Une étanchéité insuffisante des raccordements peut résulter de :

- Une mauvaise mise en œuvre des raccords électro-soudables.
- L'utilisation de matériaux non adaptés aux contraintes physiques du site.

Cette situation peut également conduire à une pollution potentielle de l'aquifère par le fluide caloporteur.

### **3.3.6 Autres aléas liés aux forages**

#### Abandon de forage

Un forage laissé sans sécurisation adéquate constitue un point de faiblesse dans le sous-sol et peut créer un rôle drainant pour les fluides, compromettant la sécurité du sous-sol et risquant de mettre en communication hydraulique différentes formations géologiques.

#### Multiplication des forages

Une densité élevée de forage multiplie les interfaces entre sondes et formations souterraines et cela peut donc accentuer les perturbations hydrogéologiques potentielles. La réalisation de champ de sondes très dense et muni d'un nombre de forages très important pourrait être associée à un suivi hydrogéologique long terme du site dans le cas d'aquifères dont la ressource est exploitée ou protégée.

### **3.4 Conclusions sur les aléas**

Ces aléas fournissent un cadre général pour l'évaluation des risques et permettent de distinguer ce qui relève de la transversalité des installations de ce qui est spécifique à la géologie et aux caractéristiques propres à l'aquifère faciès de bordure du Trias, abordés dans la section suivante.

L'application d'une méthodologie objective dans une phase précoce du projet peut se révéler utile afin de d'analyser les risques d'un projet vis-à-vis du sous-sol et anticiper des débordements sur le projet lui-même.

Des recommandations et mesures existent pour limiter la probabilité d'occurrence de ces aléas. Celles-ci sont présentées dans le chapitre 6.

## **4 Méthodologie d'analyse des risques appliquée aux aquifères du Trias Nord (différenciés et indifférenciés)**

### **4.1 Notion de risque, d'aléa et d'enjeu**

Avant de présenter les risques spécifiques à l'aquifère étudié, il est important de rappeler la définition même du risque et la méthodologie utilisée pour son analyse.

Dans le cadre de l'étude des interactions sondes-aquifères, un risque ne peut être identifié que lorsqu'un aléa rencontre un enjeu :

- **Aléa** : événement incertain ou situation pouvant se produire, comme par exemple, une rupture de boucle de sondes, une fuite du fluide caloporteur ou une mauvaise conception des raccordements.
- **Enjeu** : ce qui peut être affecté par cet aléa, par exemple la sécurité, l'intégrité du sous-sol et de l'aquifère, la performance énergétique de l'installation, ou les coûts liés à des réparations.

Ainsi, **l'évaluation du risque** repose sur l'identification de ces deux composantes et sur la quantification de leur interaction, afin de déterminer la gravité potentielle et la probabilité d'occurrence.

### **4.2 Méthode de calcul des risques associés à la géologie du faciès**

L'analyse de risque concernant des formations géologiques attendues se fera en prenant en compte les problématiques propres aux différents faciès présents sur le site d'étude. Cette méthode de calcul proposée par Géoconseils a été validée par l'AGE au préalable de l'élaboration de ce rapport (14). Les principales problématiques rencontrées relèvent à la fois :

- D'aléas géologiques propres à ces formations (présence de niveaux altérés, karst, pseudomorphoses de sel, anhydrite, dolomie, argilites...);
- D'aléas hydrogéologiques liés à la présence d'eaux souterraines ;
- Et des conséquences indirectes sur la qualité, la durabilité et le fonctionnement des installations géothermiques verticales.

#### **4.2.1 Principe de notation**

Il s'agit d'établir un tableau regroupant les processus, l'impact, l'occurrence, le degré et le moyen de maîtrise du risque en leur attribuant des notes. Les paramètres suivants ont été considérés :

##### **Importance de l'impact :**

Plus la valeur est élevée, plus la gravité des conséquences est importante :

- 1 : impact faible, facilement réversible ;



- 2 : impact modéré à fort, réversible avec des moyens techniques et financiers variables ou naturellement à court terme ;
- 3 : impact majeur, difficilement réversible à court terme.

### **Occurrence :**

C'est la probabilité de réalisation de l'événement. Elle est, dans le cadre de la cotation des risques présentée au chapitre 5.3, adaptée selon les données géologiques obtenues à l'aide du forage de reconnaissance carotté FRE-805-17 réalisé à Colpach.

La classification est donc la suivante :

- 1 : occurrence faible, aléa dont l'origine (géologique ou anthropique) est conditionnée à la survenue d'un second facteur et donc assez peu probable ;
- 2 : occurrence modérée, aléa dont l'origine est anthropique et liée à une conception inadaptée ou dont l'origine géologique est plausible, régulièrement observée dans les formations du Trias/Dévonien, mais pas dans le Randfazies d'après les carottes du FRE-805-17 ;
- 3 : occurrence élevée, aléa dont l'origine géologique a été confirmée au moyen de la description des carottes du FRE-805-17 ou dont l'origine est anthropique et relative à la mise en œuvre des SGV.

**Le niveau de risque (1 à 9) est obtenu par le produit des notes de ces deux paramètres (Importance × Occurrence). La cotation pour un champ de sondes se fait par forage et le score final est fonction du nombre de forages projetés et des différentes variantes possibles.**

### **Degré et moyen de maîtrise :**

La connaissance des processus et la compréhension actuelle des aléas permet aujourd'hui de disposer d'éléments préventifs et opérationnels efficaces apportant la possibilité d'assurer une certaine maîtrise des risques, dont le degré varie cependant selon la nature des aléas.

Cet aspect à considérer dans l'analyse des risques a pu être intégré de façon complémentaire aux critères de notation mentionnés ci-dessus et sera donc retrouvé dans l'analyse de risque appliquée dans ce document à travers deux facteurs :

- Le degré de maîtrise :

Plus le degré est élevé plus le risque paraît maîtrisable :

- 1 : Maîtrise faible, il n'existe pas de solutions préventives ou opérationnelle permettant de réduire de façon importante le risque existant ;

- 2 : Maîtrise modérée, des solutions préventives ou opérationnelles existent et peuvent influencer sur le risque sans toutefois assurer un contrôle complet et durable ;
- 3 : Maîtrise élevée – des solutions préventives et opérationnelles éprouvées permettent de réduire significativement le risque et d'en assurer une gestion efficace dans la durée.

- Le moyen de maîtrise :

Cette donnée applique directement une solution préventive ou opérationnelle adaptée lorsque l'aléa est raisonnablement maîtrisable.

Nous allons maintenant, dans le chapitre suivant, illustrer cette méthode à travers l'analyse du cas concret des faciès de bordure du Trias nord. Notons que cette notion reste partiellement subjective et dépend de la qualité des intervenants sur place. En effet, l'expérience, le professionnalisme et le respect des normes en vigueur par les intervenants jouent un rôle prépondérant dans les moyens de maîtrise.

## **5 Analyse du risque dans les formations du Trias faciès de bordure et du Dévonien à Colpach**

### **5.1 Présentation du projet**

D'après les éléments fournis à Géoconseils en date du 09/10/2025 et complétées le 28/10/2025 par le bureau Jean Schmit Engineering, les besoins thermiques en chaud représentent 57 000 kWh/an pour le chauffage. Dans la phase APS actuelle, il est prévu de réinjecter du chaud pendant la période estivale afin de recharger le champ de sondes. Les besoins en eau chaude sanitaire seront quant à eux couverts par une chaudière à biomasse.

L'avant-projet détaillé prévoit de soutirer 95 kW sur base de 15 sondes de 200 m. Les calculs ont été réalisés en prenant une puissance moyenne des sondes de 45 W/ml et des besoins horaires types sur 1 année.

Le plan du bureau Jean Schmit Engineering n°22013-R0-HK-GEO-J prévoit de réaliser les 15 sondes sous le parking avec une interdistance entre les sondes de 10 m en moyenne.

### **5.2 Relation entre la profondeur des sondes, leur nombre et les aquifères Trias-Dévonien**

Le choix de la profondeur et du nombre de sondes géothermiques ne relève pas uniquement de considérations énergétiques, mais également de la maîtrise des risques hydrogéologiques.

La question peut alors se formuler sur base de deux scénarios : Vaut-il mieux faire plus de sondes de moindre profondeur (et rester dans une seule formation géologique) ou des sondes plus profondes et moins nombreuses (et donc traverser plusieurs formations géologiques) ?

Dans le cas de la transition Trias Randfazies – Dévonien, l'aquifère de la formation Mésozoïque, d'importance régionale, doit être traversé lors du forage. Ce niveau peut comporter des horizons évaporitiques susceptibles d'accroître les aléas géologiques (dissolution, gonflement, instabilités, pertes de boue, etc.), bien que ces derniers n'aient pas été observés à Colpach, sur les carottes du forage de reconnaissance FRE-805-17 présenté plus haut. Une vigilance accrue doit tout de même être appliquée dans cette région en présence de cette situation géologique. Il apparaît donc que si l'on peut généraliser une partie des critères, une connaissance locale du système peut se révéler très utile pour l'anticipation de certains risques.

### **5.3 Cotation du risque**

Les tableaux suivants énumèrent les différents aléas qui ne sont pas directement liés aux formations géologiques rencontrées mais qui peuvent avoir des conséquences indirectes sur les opérations de réalisation des sondes.

**Tableau 1. Liste non-exhaustive des aléas potentiels d'ordre conceptuel**

<b>Impact amont : Phase de concept</b>	<b>Information disponible pour le projet Colpach</b>	<b>Aléa possible identifié</b>
Mauvaise connaissance du sous-sol et de la géologie/ hydrogéologie au droit du site.	Oui (forage de reconnaissance)	Conception inadaptée à la zone d'étude (profondeur des sondes, risques pour un aquifère stratégique ....
Conception inadaptée : Dimensionnement thermique du champ de sondes	Oui	Conception inadaptée par rapport au besoin du projet
Dimensionnement géologique du champ de sondes : modélisation thermique dynamique	Non	Risques d'épuisement du sous-sol au cours du temps entraînant une baisse des performances du champ de sonde, voire des dysfonctionnements.
Rechargement du sous-sol	Oui	Appauvrissement des capacités thermiques du sous-sol au cours du temps

Le Trias constitue une séquence stratigraphique regroupant les lithologies du Keuper, du Muschelkalk et du Buntsandstein, parfois de manière indifférenciée, à l'image du Randfazies. On retrouve en discordance, les couches schisteuses du Dévonien sous-jacentes. L'analyse de risque concernant ces formations se fera, outre les aléas communs aux installations de SGV sur aquifères, en prenant en compte les aléas propres aux spécificités géologiques des différents faciès potentiellement rencontrés.

Le tableau suivant énumère les différents éléments géologiques pouvant être à l'origine d'aléas en cas de mise en œuvre de forages géothermiques dans ces formations. Il détaille la succession d'événements qui peut être à l'origine de l'incident.

**Tableau 2. Aléas potentiels selon les particularités géologiques du Trias faciès de bordure et du Dévonien**

Formation géologique	Présence de nappe	Particularité géologique	Processus géophysique	Cause	Aléa identifié
Trias Randfazies	Oui	Présence d'anhydrite	Hydratation, gonflement	Cimentation défectueuse	Soulèvement des terrains
		Présence de pseudomorphoses de sel	Hydratation, dissolution	Cimentation défectueuse	Effondrement des terrains
		Présence de karst ou de cavité	Mise en communication d'aquifères	Cimentation défectueuse	Assèchement de captage/inondation
Dévonien	Présence d'aquifère continu non avérée et généralement peu productif, nappe d'eau possible localement	Présence de fractures et/ou de cavités	Mise en communication d'aquifères	Cimentation défectueuse	Assèchement de captage/inondation

Pour quantifier le risque en lien avec les aléas identifiés ci-dessus et afin d'étudier la possibilité de mettre en œuvre des ouvrages traversant ces deux entités (Trias en faciès de bordure et Dévonien), une classification, illustrée par le tableau ci-dessous a été dressée. Celle-ci reprend également les risques mentionnés comme communs à tous les aquifères lors de la mise en œuvre exécutive de sondes géothermiques.

La notation utilisée dans le tableau ci-dessous suit le principe de notation présenté dans le 4.2.1.

**Tableau 3. Revue non exhaustive et cotation des risques liés à l'exécution d'un forage géothermique sur sondes traversant le Trias Randfazies et le Dévonien ( $S_{g3}$ ) (A. NV : Application des normes en vigueur NF X10-970, XP X10-950, SIA 384/6, VDI 4640)**

Processus/ cause	Aléa	Probabilité Occurrence	Importance de l'impact	Risque résultant	Degré de maitrise	Moyen de maitrise
Mauvaise connaissance du sous-sol	Refroidissement du sol, effondrements/ soulèvements artésianisme, ...	2	2	4	2	Forage de reconnaissance préalable; études géologiques ou hydrogéologiques disponibles à proximité
Conception inadaptée : Epuisement thermique du sous-sol	Refroidissement du sol/ gel des installations de surface	2	3	6	1	Rééquilibrer les apports thermiques du sous-sol (par ex climatisation)
Conception inadaptée : Espacement intersondes insuffisant	Refroidissement du sol/ gel des installations de surface	2	3	6	1	Modélisation thermique dynamique
Conception inadaptée : profondeur des sondes	Refroidissement du sol/ gel des installations de surface	2	3	6	2	Modélisation thermique dynamique
Hydratation - Gonflement	Soulèvement des terrains	1	3	3	2	A .NV, diagraphie espace annulaire, étude hydro/géologique préliminaire
Hydratation - Dissolution	Effondrement des terrains	1	3	3	2	A .NV, diagraphie espace annulaire, étude hydro/géologique préliminaire
Mise en communication s d'aquifères	Assèchement de captage/Inondati ons	1	2	2	2	A .NV, diagraphie espace annulaire, étude hydro/géologique préliminaire, enregistrement des paramètres de forage, suivi piézométrique
Mise en communication s d'aquifères	Artesianisme	1	1	1	2	Adaptation des techniques de forage et de la cimentation
Rupture d'une sonde	Pollution par fluide caloporteur	3	2	6	3	A .NV, choix d'un fluide caloporteur éligible selon la liste <i>Wärmeträger Positivliste</i>
Mauvaise étanchéité des raccords		3	1	3	3	A .NV, choix d'un fluide caloporteur éligible selon la liste <i>Wärmeträger Positivliste</i>
TOTAL par forage				40	20	
Cotation maximale possible				90	30	
Taux de risques et de maitrise (%)				44	67	

**Le degré de maitrise par forage est 1,5 fois plus élevé que le risque global.**

#### **5.4 Conclusion - Valorisation des données du forage de reconnaissance (FRE-805-17) – Spécificités du faciès de bordure**

Bien que le forage de reconnaissance mis en œuvre à Colpach ait permis d'obtenir une meilleure compréhension lithologique du Trias Randfazies, l'information qu'apporte un sondage reste locale et ne garantit en rien l'homogénéité de la zone d'étude.

Le sondage met en évidence l'absence de niveau imperméable notable au sein de la formation ce qui révèle l'existence d'une seule et même nappe au sein de ce faciès triasique indifférencié. Cela est également vérifié par les résultats obtenus lors des analyses d'eaux, similaires chimiquement. La description des carottes réalisée par Géoconseils n'a pas révélé la présence de niveaux d'évaporites. Quelques bancs dolomitiques sont observés mais aucun réseau d'altération marqué n'a pu être observé. L'absence d'anhydrite ou de dolomies karstifiées dans le sondage n'exclut pas la possibilité d'occurrence de ces dernières en d'autres points au sein du Trias Randfazies.

Bien qu'un maillage de reconnaissance plus fin soit requis pour affiner l'identification de ces éléments lithologiques au sein du faciès local, leur absence dans les investigations actuelles suggère une probabilité réduite d'occurrence des aléas associés dans la zone d'étude (centre Croix-rouge - château de Colpach).

Dans ce contexte, il apparaît préférable de réduire le nombre de sondes en privilégiant une plus grande profondeur individuelle, accompagnée de méthodes de forage renforcées et adaptées, afin de limiter le nombre d'interactions avec cet aquifère sensible. En effet, la formation dévonienne sous-jacente, ne constitue pas un aquifère reconnu, la présence d'eau n'y est donc pas nécessairement avérée et est peu documentée.

Le Dévonien présente ainsi des aléas moindres en comparaison avec ceux du Trias en faciès de bordure, ne constitue pas un enjeu majeur en termes de protection, ce qui conforte l'intérêt d'un développement géothermique orienté vers des sondes plus profondes mais moins nombreuses.

## **6 Recommandations et mesures de prévention**

Pour garantir la sécurité des ouvrages géothermiques et préserver l'équilibre hydrogéologique, le respect des règles de l'Art décrites dans les normes en vigueur et l'application de bonnes pratiques sont essentiels. La mise en place de recommandations techniques à chaque étape ; de la conception à l'exploitation, constitue un levier décisif pour prévenir les incidents, limiter les impacts sur l'environnement, la ressource en eau, tout en assurant la durabilité et la performance des installations géothermiques.

Une telle démarche n'est possible que si le rôle des acteurs de la filière est clairement défini et que les responsabilités sont conformément réparties et strictement encadrées.

### **6.1 Recommandations quant au dimensionnement du champ de sondes**

Le dimensionnement d'un champ de sondes géothermiques doit permettre de couvrir les besoins énergétiques du bâtiment tout en préservant l'équilibre thermique du sous-sol. Un calcul et une modélisation appropriés conditionnent à la fois la performance durable du système et la prévention de déséquilibres irréversibles des températures souterraines.

Pour cela, la modélisation des champs de sondes par simulations thermiques dynamiques, via des outils référencés permet d'obtenir l'évolution à 25-30 ans des températures du fluide caloporteur et des parois de forages. Ainsi, une dégradation thermique du sous-sol peut être anticipée et le dimensionnement ajusté.

Ce procédé s'avère nécessaire afin d'ajuster le nombre de SGV nécessaires au bon fonctionnement de l'installation sur le long terme, et ainsi d'éviter toute surexploitation du champ susceptible d'entraîner des conséquences sur le sous-sol. Celles-ci pouvant être de nature géotechnique (affaissements potentiels dus au gel/dégel du sol suite au sous-tirage trop important de calories), ou géochimiques (sur l'aquifère).

### **6.2 Recommandations quant aux forages (préparation et phase chantier)**

#### **6.2.1 Techniques et outils de forage**

Le choix de la technique de forage s'avère être un élément déterminant dans la bonne réalisation d'un forage géothermique sur sonde verticale. Le choix du procédé de forage est généralement laissé à l'appréciation de l'entreprise en charge de la réalisation des forages (15) (16).

Le forage au marteau fond de trou, à l'air et au rotary à l'eau ou à la boue sont les deux procédés de forage les plus communs et les plus référencés pour la réalisation de sondes géothermiques. L'outil doit être fonction des formations géologiques et des conditions hydrogéologiques locales (présence d'eau ou non).

#### **6.2.2 Enregistrement des paramètres de forage**

Afin de vérifier la bonne exécution des travaux et de disposer d'une traçabilité complète du forage, les paramètres de fonctionnement de la foreuse pourraient être enregistrés de manière continue et



instantanée. Ces données permettraient de contrôler la qualité de l'avancement et de détecter rapidement d'éventuelles anomalies liées au terrain (cavités, fracturation importante) ou à la technique employée.

Les principaux paramètres à relever sont notamment :

- La vitesse d'avancement ;
- Le couple de rotation appliqué à l'outil de forage ;
- La pression sur l'outil de forage ;
- La pression d'injection du fluide de forage ;

L'ensemble de ces informations doit être centralisé et intégré au rapport de forage pour garantir la traçabilité de l'ouvrage et constituer une base utile pour les étapes de contrôle et d'interprétation ultérieures. (17)

### **6.2.3 Méthodologies de forage spécifique**

Pour limiter les risques de mise en communication accidentelle entre aquifères de différents horizons géologiques, certaines méthodes permettent d'assurer une étanchéité inter-formations tout au long de la réalisation du forage géothermique et de l'installation des sondes.

Forage télescopique : Le forage est réalisé par séquences successives de diamètres décroissants.

Chaque phase comprend :

- Le forage d'un premier tronçon de grand diamètre,
- La mise en place d'une cimentation pour isoler les zones traversées,
- Le re-forage dans un diamètre inférieur pour atteindre la profondeur finale.

Cette technique est particulièrement adaptée lorsque l'on connaît précisément la position des aquitards ou des formations sensibles à protéger. Elle permet également d'isoler plusieurs niveaux productifs au sein d'un même aquifère. Elle pourrait, par exemple, être envisagée sur le site Croix-Rouge à Colpach pour isoler les horizons productifs bien que les analyses d'eau effectuées suggèrent que ces différents niveaux appartiennent à un aquifère homogène. Il serait également possible d'isoler, par cette méthode, les faciès triasiques par rapport au Dévonien.

Si la configuration géologique d'un site est peu connue ou mal documentée, l'utilité de cette technique peut être moindre.

Tubage à l'avancement : Le tubage est descendu simultanément à la progression du forage. Cette méthode réduit le risque de transfert horizontal d'eau entre formations et limite également, dans une certaine mesure, les communications verticales et les risques d'éboulement du trou de forage.

### 6.3 Cimentation des SGV

La cimentation des sondes constitue un point critique susceptible de déclencher des désordres majeurs. Il est donc essentiel que les intervenants du chantier de forage, le bureau d'études et le maître d'ouvrage accordent une attention particulière à cette étape clé. Si cette phase est mieux contrôlée et réalisée avec rigueur, une part significative des problèmes identifiés ; communication entre nappes, réactions géochimiques ou affaissements, pourrait être évitée ou fortement limitée. Cette vigilance est d'autant plus nécessaire lorsque la géologie présente des disparités lithologiques ou de structures, comme c'est le cas dans les faciès du Trias au Luxembourg.

Le coulis de comblement mis en œuvre dans les forages géothermiques verticaux doit assurer à la fois :

- Un transfert thermique efficace entre l'échangeur et le sous-sol,
- Une étanchéité parfaite du forage jusqu'à la surface,
- Une isolation hydraulique des aquifères traversés.

La cimentation doit être réalisée de bas en haut à l'aide d'un coulis injecté en continu, sans inclusion d'air ni interruption, conformément aux normes VDI 4640, SIA 384/6, NF X10-970 et XP X10-950 (18) (16) (15) (19).

Le remplissage du trou de forage **doit intervenir aussitôt que la sonde géothermique est mise en place**, conformément aux indications données dans les documents normatifs (15) (16) (18).

Le coulis utilisé devra être conforme aux préconisations du fabricant, notamment en ce qui concerne la formulation (mélange eau/ciment/bentonite ou produit prêt à l'emploi) et les conditions d'emploi.

En zone de pertes, fissurées ou fracturées, certaines préconisations particulières peuvent s'appliquer afin d'assurer un remplissage homogène du trou de forage. Compte tenu des caractéristiques géologiques des formations triasiques, de telles pertes peuvent subvenir et des adaptations pourront s'avérer nécessaires.

### 6.4 Type de fluide caloporteur

Comme développé en 3.3.5, lorsqu'il ne s'agit pas d'eau pure, le choix du type de fluide antigel utilisé dans une installation de SGV peut s'avérer déterminant pour limiter le risque de pollution accidentelle, de répercussion sur les aquifères et sur l'environnement.

Pour cela, il est primordial de respecter les avis émis par l'AGE lors du dimensionnement et l'arrêté ministériel lors de la mise en œuvre du champ de sondes. Les fluides éligibles sont disponibles sur la liste « *Wärmeträger Positivliste* ». Ils doivent être classés soit comme « *nvg* » de la catégorie WGK ou bien être renseignés dans la classe 1 de la catégorie WGK tout en étant classé 0 dans la catégorie « *Additive % WGK 1* ».

## 6.5 Contrôles, essais et documentation

Afin de garantir la protection des niveaux aquifères traversés, de prévenir toute contamination par fluide caloporteur ou interconnexion indésirable entre nappes, et d'assurer la performance des installations, plusieurs niveaux de contrôle, décrits dans les normes en vigueur, doivent être systématiquement mis en œuvre lors et après la réalisation des forages géothermiques verticaux (SGV). Une documentation de ces étapes est essentielle.

- **Contrôles de la cimentation**

Des contrôles systématiques doivent être réalisés sur le coulis de remplissage, dont la qualité conditionne à la fois la performance thermique de l'échangeur et la protection des aquifères

- **Essais et contrôles des sondes géothermiques**

Avant raccordement au collecteur principal, chaque sonde doit faire l'objet de vérifications fonctionnelles :

- Essai de pression ou d'étanchéité du circuit fermé à l'eau ou à l'air sous pression, pour vérifier l'étanchéité des boucles (selon NF X10-970, SIA 384/6 ou VDI4640).
- Essai de perte de charge et essai de circulation (ou essai de débit), ces essais visent à vérifier la résistance hydraulique de la sonde, en mesurant la différence de pression entre l'entrée et la sortie pour un débit donné, ainsi que le débit effectif de circulation (selon NF X10-970, SIA 384/6 ou VDI4640). Les résultats doivent être comparés aux valeurs théoriques.

- **Vérifications du circuit de raccordement**

Le système de raccordement entre les sondes et les collecteurs géothermiques doit également être contrôlé avant mise en service :

- Essai de pression du réseau de liaison (collecteurs enterrés, gaines, conduites) selon les prescriptions du fabricant ou les règles de l'art ;
- Vérification du bon équilibrage hydraulique des différentes boucles pour les champs de sondes (selon normes en vigueur).

- **Suivi hydrogéologique si des ouvrages sont disponibles**

## **7 Conclusion**

L'analyse des risques liés aux sondes géothermiques verticales sur l'aquifère du Trias faciès de bordure et sur le Dévonien au niveau du site de la Croix-Rouge à Colpach, a permis de mettre en évidence les principaux aléas et impacts qui pourraient représenter un risque pour le milieu souterrain et entraver la bonne marche du champ de sondes géothermiques sur le long terme.

La méthodologie de cotation et les moyens de maîtrise qui pourraient y être associés ont été appliqués au projet. L'analyse sur le Trias en faciès de bordure et sur le Dévonien sur base notamment des données du forage de reconnaissance FRE-805-17 à Colpach, a permis de caractériser les risques spécifiques à ces formations. Le projet prévoit à ce stade un nombre de sondes le plus réduit possible en descendant jusqu'à 200 m de profondeur et une recharge estivale du sous-sol afin d'assurer un rééquilibrage thermique. La cotation par forage révèle que le degré de maîtrise par forage est 1,5 fois plus élevé que le risque global.

L'analyse souligne toutefois l'importance cruciale du contrôle, du respect des normes et du suivi rigoureux à chaque étape du projet, depuis la conception jusqu'à l'exploitation. Elle insiste également sur le besoin d'une expertise accrue et d'une rigueur renforcée dans le dimensionnement, la mise en œuvre et l'exploitation des installations.

Ces mesures visent à garantir une exploitation géothermique durable, compatible avec la protection des aquifères.

## 8 Remarques finales

Cette analyse des risques pour le projet de la Croix-Rouge à Colpach repose sur les données fournies par les bureaux en charges du dimensionnement du projet.

Le présent document, y compris l'ensemble des données, analyses, illustrations et recommandations qu'il contient, a été élaboré par Géoconseils S.A. pour le compte exclusif de la Croix-rouge luxembourgeoise. Il constitue une œuvre protégée par le droit d'auteur et ne peut être reproduit, diffusé, exploité ou utilisé, même partiellement, sans l'accord écrit préalable de Géoconseils S.A. Toute utilisation non autorisée, notamment à des fins commerciales, est strictement interdite et pourra donner lieu à des poursuites conformément aux dispositions légales en vigueur.

Contern, le 12/11/2025



**Laurence PLÈNECASSAGNE**  
Directrice technique



**Yvan SILVERIO**  
Responsable d'affaires | Hydrogéologie et  
géothermie

## 9 Références

1. **Administration de la gestion de l'eau.** *Guide sur la géothermie de faible énergie au Luxembourg.* 2025.
2. **Björnsen.** *Grundwassermanagementplan Luxemburger Sandstein.* 2010.
3. **Géoconseils S.A.** *Etude préparatoire relative à la reconnaissance des ressources aquifères potentielle dans le Trias Nord.* 2023. 20201586-GC-HYDROGEOL-G001.
4. **Björnsen.** *Hydlogeologisches modell "Nördliche Trias Luxemburg.* 2012.
5. **Géoconseils S.A.** *Projet de géothermie de la Croix-Rouge à Colpach - Forage de reconnaissance hydrogéologique.* 2025. 20233403-GC-HYDROGEOL-G001.
6. **Service géologique de l'Etat, Administration des Ponts et Chaussées.** *Carte géologique détaillée harmonisée aux échelles 1:25 000 et 1:50 000.* Luxembourg : Service géologique du Luxembourg, 3 septembre 2018.
7. **Service Géologique de Luxembourg.** *Carte géologique du Luxembourg - Feuille No 7, Redange 1 : 25 000.* 2003.
8. **SPW Agriculture, Ressources naturelles et Env.** *Etat des nappes et des masses d'eau souterraine de la Wallonie.* 2025. ISSN 2795-6091.
9. **ADEME et BRGM.** *Guide technique - Les pompes à chaleur géothermiques sur champ de sondes - Manuel pour la conception et la mise en oeuvre.* 2012. 978-2-7159-2531-1.
10. **BRGM, ONEMA et ADEME.** *Impacts potentiels de la géothermie très basse énergie sur le sol, le sous-sol et les eaux souterraines - Synthèse bibliographique.* 2012. BRGM/RP-59837-FR.
11. **Stober, Ingrid et Bucher, Kurt.** *Geothermie.* 2020. ISBN 978-3-662-60940-8.
12. **Office fédéral de l'environnement OFEV.** *Exploitation de la chaleur tirée du sol et du sous-sol - Aide à l'exécution destinée aux autorités d'exécution et aux spécialistes de géothermie.* Berne : s.n., 2009.
13. **Agence Qualité Construction.** *Installations géothermiques basse température : points de vigilance.* 2016.
14. **Géoconseils S.A.** *Analyse des risques géothermiques en lien avec la multiplication des sondes géothermiques verticales dans les aquifères (20250385-GC-HYDROGEOL-G001inda ).* 2025.
15. **AFNOR.** *NF X 10-970 - Sonde géothermique verticale - Réalisation, mise en oeuvre, entretien, abandon.* 2011.
16. **SIA 384/6 - Société suisse des ingénieurs et des architectes.** *Sondes géothermiques.* Zurich : s.n., 2021. SN 546384/6:2021 fr.
17. **REIFFSTECK, Philippe.** *Utilisation des paramètres de forage en reconnaissance géotechnique.* 2010.
18. **Ingenieure Verein Deutscher.** *VDI4640 - Thermische Nutzung des Untergrundes - Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen.* 2001.
19. **AFNOR.** *XP X 10-950 - Forage de géothermie - Coulis des échangeurs géothermiques fermés verticaux.* 2018.

20. **BRGM.** *Guide de "bonnes pratiques" sur les retours d'expérience des forages géothermiques profonds.* 2021. BRGM/RP-65443-FR.
21. **Ministère d'Etat, Service central de législation.** *Loi du 23 décembre 2022 relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine et modifiant la loi modifiée du 19 décembre 2008 relative à l'eau.* Luxembourg : Journal officiel du Grand-Duché de Luxembourg, 2022. Mémorial A N°704 du 28 décembre 2022.
22. **BRGM.** *Etat de l'art relatif à la conception et à la mise en oeuvre des forages géothermiques au Dogger.* 2009. BRGM/RP-57245-FR.
23. **Environment agency UK.** *Environmental good practice guide for ground source heating and cooling.* 2011. GEHO0311BTPA-E-E.
24. **INERIS.** *Etudes des connaissances sur les risques, impacts et nuisances potentiels liés à la géothermie profonde.* 2017. DRS-16-157477-00515A.
25. **PRIVAT, Pierre-Etienne, GUILLON, Théophile et MARAGNA, Charles.** *Plateforme de dimensionnement d'échangeurs géothermiques : Manuel Utilisateur.* 2022.
26. **ADEME et BRGM.** *Guide technique - La géothermie et les réseaux de chaleur - Guide du Maître d'Ouvrage.* 2010. 9 782715 924901.