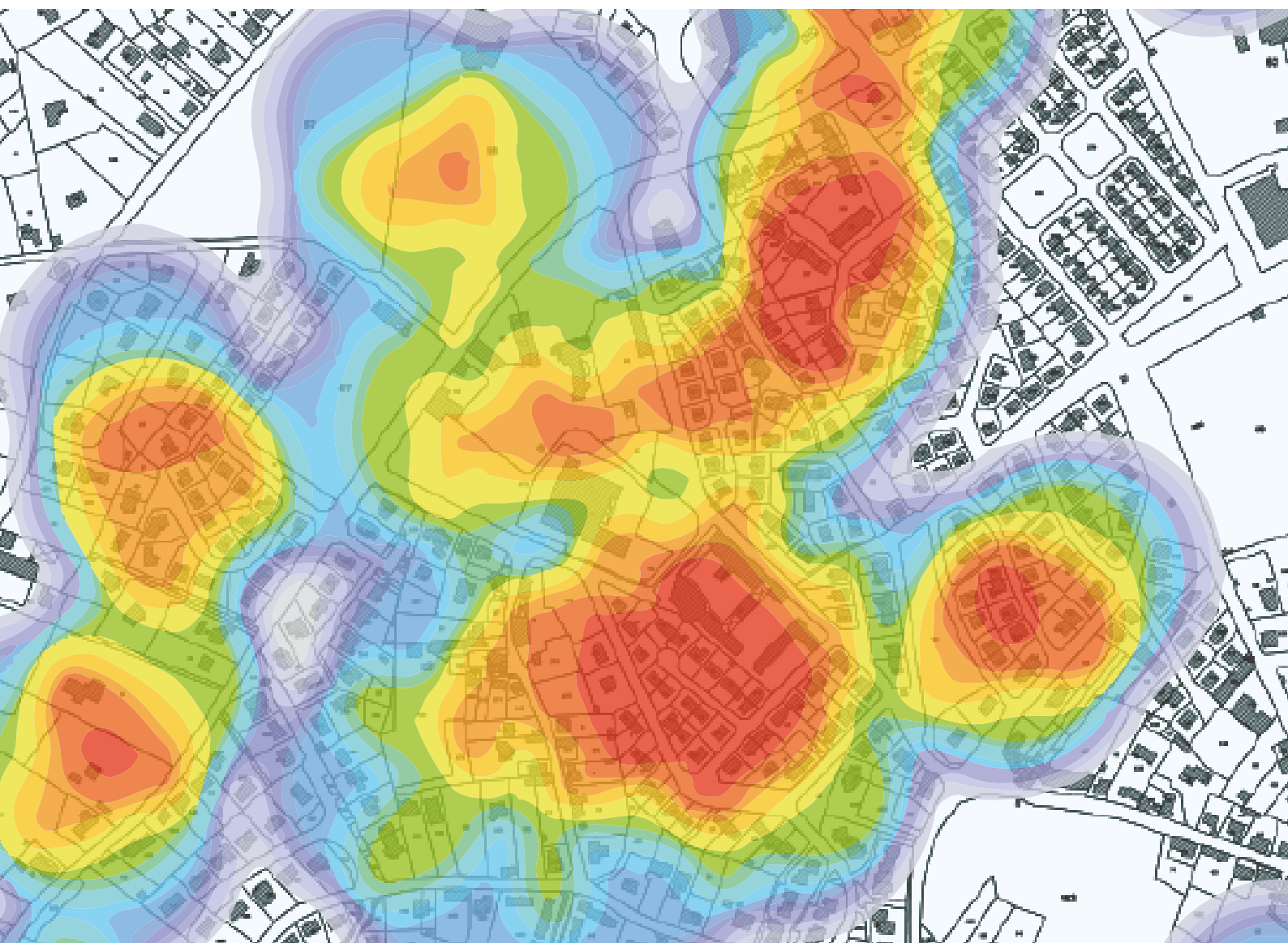


Éviter les interférences des échangeurs géothermiques

Méthodologie pour déterminer le volume
d'exploitation d'un gîte géothermique



Éviter les interférences des échangeurs géothermiques

Méthodologie pour déterminer le volume
d'exploitation d'un gîte géothermique

Collection | **Références**

Édition Cerema

Cerema Eau, mer et fleuves – 134, rue de Beauvais – CS 60039 – 60280 Margny-lès-Compiègne Tél : +33(0)3 44 92 60 00
Siège social : Cité des Mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex - Tél : +33 (0)4 72 14 30 30

L'ouvrage est une œuvre collective réalisée sous la direction du Cerema.

Le document a été élaboré en coopération avec la Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement Auvergne Rhône-Alpes.

La rédaction a été assurée par :

- Guillaume Attard, Cerema
- Laurent Eisenlohr, Cerema

Le contenu technique a été élaboré avec l'appui de :

- Peter Bayer (Prof. Dr., Martin Luther University of Halle-Wittenberg, Allemagne)
- Philipp Blum (Prof. Dr., Karlsruhe Institute of Technology, Allemagne)
- Yvan Rossier (Prof. Dr., Université Grenoble Alpes)

Cette collaboration scientifique et technique a donné lieu à la publication suivante :

Attard, G., Bayer, P., Rossier, Y., Blum, P., & Eisenlohr, L. (2020). A novel concept for managing thermal interference between geothermal systems in cities. *Renewable Energy*, 145, 914-924. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.095>

Le document a été mis en consultation auprès des personnes suivantes :

Pour le Cerema

- Myriam Lorcet
- Elsa Delcombel
- Laurent Vernay
- William Pophillat
- Emmanuel Dumont

Pour la DREAL Auvergne Rhône-Alpes

- Marguerite Muhlhaus
- Isabelle Charlemagne

Pour la DRIEE Île-de-France

- Baptiste Lorenzi

Pour le Centre d'Hydrogéologie et de Géothermie de l'Université de Neuchâtel

- Pierre Perrochet

Le document a également été soumis à la consultation de l'association française des professionnels de la géothermie (AFPG) et de Syntec Ingénierie.

Comment citer cet ouvrage :

Cerema. Éviter les interférences des échangeurs géothermiques-Méthodologie pour déterminer le volume d'exploitation d'un gîte géothermique Cerema, 2020. Collection : Références. ISBN : 978-2-37180-440-1 (web)

Toute reproduction intégrale ou partielle, faite sans le consentement du Cerema est illicite (loi du 11 mars 1957). Cette reproduction par quelque procédé que ce soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

RÉSUMÉ DU DOCUMENT

L'article L. 134-1-1 du code minier prévoit que les gîtes géothermiques d'une puissance thermique primaire inférieure à 20 MW ne puissent être exploités qu'en vertu d'un permis d'exploitation accordé par l'autorité administrative. Ce permis d'exploitation confère un droit exclusif d'exploitation dans un volume déterminé, dit « volume d'exploitation », défini par un périmètre et deux profondeurs, conformément à l'article L. 134-5 de ce même code.

Le document apporte une définition technique à la notion de volume d'exploitation applicable aux installations géothermiques sur échangeurs ouverts et fermés verticaux exploitant une formation géologique aquifère ou non. Cette définition permet d'une part, d'éviter que de nouvelles installations altèrent le bon fonctionnement du projet sur la durée du permis sollicité, et d'autre part, d'optimiser l'extension du volume d'exploitation afin de maintenir l'accessibilité à la ressource géothermique, et de favoriser le développement de cette énergie renouvelable.

Également, le document présente un cadre méthodologique pour déterminer le volume d'exploitation d'une installation géothermique sur échangeur ouvert ou fermé. Il est constitué de quatre étapes :

- la première étape consiste à déterminer la perturbation thermique ΔT_{max} acceptable pour maintenir les performances de l'installation sur la durée du permis sollicité. Bien que certaines installations puissent présenter une plus grande sensibilité aux variations de températures, le choix d'une plage de température ΔT_{max} comprise entre 2°C et 3°C est raisonnable dans le cas général ;
- la deuxième étape consiste à cartographier les probabilités que des transferts thermiques atteignent l'installation. Ces probabilités permettent de connaître la puissance qu'il est possible d'exploiter autour du projet, sans perturber son fonctionnement. Des modèles analytiques et numériques peuvent être utilisés pour cartographier ces probabilités. Leur utilisation requiert la connaissance des écoulements de nappe (carte piézométrique) et des caractéristiques hydrauliques et thermiques des formations aquifères (conductivité hydraulique, porosité efficace, coefficient de dispersion, conductivité thermique, capacité thermique) ;
- la troisième étape consiste à déterminer l'emprise horizontale du volume d'exploitation. Pour cela, la puissance thermique totale vis-à-vis de laquelle le pétitionnaire souhaite se protéger doit être déterminée et confrontée aux cartographies obtenues à la deuxième étape ;
- la quatrième étape consiste à déterminer l'extension verticale du volume d'exploitation en s'appuyant sur la topographie, la profondeur de l'installation et sur le profil géologique.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	4
Contexte et objectif	4
Domaine d'application et structure du document	5
1. DÉFINITIONS ET ÉTAPES POUR DÉTERMINER LE VOLUME D'EXPLOITATION D'UN GÎTE GÉOTHERMIQUE	6
2. MÉTHODE POUR DÉTERMINER LE VOLUME D'EXPLOITATION	8
2.1 Définir la perturbation thermique ΔT_{max} acceptable (étape 1)	8
2.2 Cartographier les probabilités que des transferts thermiques atteignent une installation géothermique (étape 2)	9
2.2.1 Cas des échangeurs ouverts	9
2.2.2 Cas des échangeurs fermés dans une formation aquifère	11
2.2.3 Cas des échangeurs fermés dans une formation non-aquifère	12
2.2.4 Cartographie des probabilités par modélisation numérique	13
2.3 Délimiter l'extension horizontale du volume d'exploitation (étape 3)	15
2.3.1 Définir la puissance thermique vis-à-vis de laquelle l'installation doit être protégée	15
2.3.2 Prendre en compte le profil géologique	15
2.4 Délimiter la limite supérieure et inférieure du volume d'exploitation (étape 4)	16
2.4.1 Cas des échangeurs ouverts	16
2.4.2 Cas des échangeurs fermés	16
3. BIBLIOGRAPHIE	17
ANNEXE 1	18
Propriétés hydrauliques et thermiques de formations géologiques communes	18
NOMENCLATURE	19

Contexte et objectif

L'exploitation du sous-sol et des eaux souterraines comme source d'énergie géothermique suscite un intérêt croissant pour subvenir aux besoins de chauffage et de refroidissement exprimés par les territoires. Des échangeurs, ouverts ou fermés (*figure 1*), permettent un transfert d'énergie thermique avec le sous-sol.

- Les échangeurs géothermiques ouverts sont constitués d'un ou plusieurs groupes de puits captant l'eau souterraine pour couvrir les besoins énergétiques d'un bâtiment. Ces dispositifs regroupent couramment un puits de pompage de l'eau souterraine, et un puits de rejet où l'eau souterraine est restituée au milieu à un débit similaire, mais à une température altérée : plus froide lorsque le dispositif est utilisé pour du chauffage, ou plus chaude lorsque le dispositif est utilisé pour du refroidissement.
- Les échangeurs géothermiques fermés sont généralement constitués de plusieurs sondes à l'intérieur desquelles circule un fluide caloporteur permettant d'échanger de la chaleur avec le sous-sol.

inférieure à 20 MW ne puissent être exploités qu'en vertu d'un permis d'exploitation accordé par l'autorité administrative. Ce permis d'exploitation confère un droit exclusif d'exploitation dans un volume déterminé, dit « volume d'exploitation », défini par un périmètre et deux profondeurs, conformément à l'article L. 134-5 de ce même code (*figure 2*).

Le décret n°78-498 du 28 mars 1978, relatif aux titres de recherches et d'exploitation de géothermie, fixe le contenu de la demande de permis d'exploitation qui, selon l'article 8 du décret susvisé, doit préciser le volume d'exploitation sollicité par le pétitionnaire. De plus, depuis le 1^{er} juillet 2016, conformément à l'article 18 de ce même décret, tout nouvel échangeur géothermique relevant du régime de minime importance (GMI)² est interdit dans le volume d'exploitation d'un gîte géothermique bénéficiant d'un permis d'exploitation tel qu'il est défini à l'article L. 134-5 du code minier. Le décret susmentionné demande ainsi aux pétitionnaires de déterminer le volume d'exploitation qui sera alloué à l'installation en exploitation.

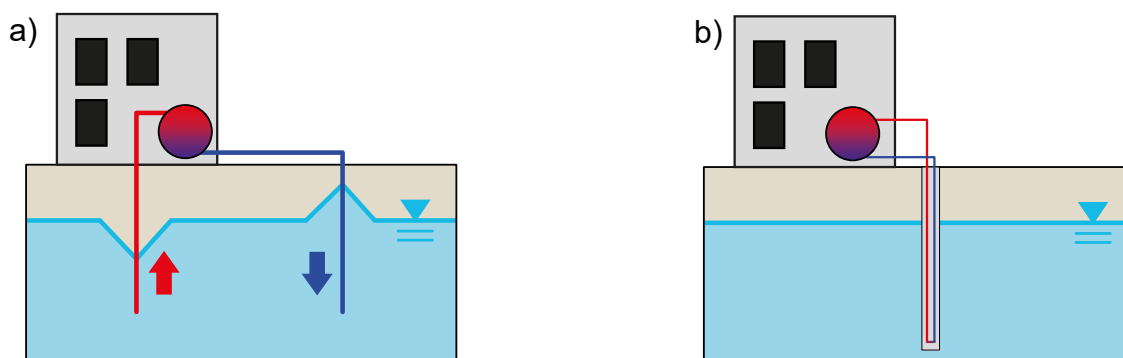


Figure 1 : échangeurs géothermiques (a) ouvert et (b) fermé (Modifié d'après Bayer et al., 2019)

Le développement non contrôlé de la filière géothermique conduit à l'apparition de secteurs fortement sollicités, notamment en zone urbaine, où des interférences hydrauliques et thermiques peuvent survenir entre des échangeurs trop proches les uns des autres, et ainsi dégrader leurs performances. Afin d'éviter ces interférences, l'article L. 134-1-1 du code minier prévoit que les gîtes géothermiques¹ d'une puissance thermique primaire

La mention du volume d'exploitation de l'installation géothermique sera reprise par le préfet dans son arrêté d'octroi du permis d'exploitation au pétitionnaire.

Actuellement, les seules prescriptions méthodologiques associées à la détermination du volume d'exploitation d'un gîte géothermique reposent sur le décret n°78-498 du 28 mars 1978 relatif aux titres de recherches et

¹ Relèvent du régime légal des mines les gîtes renfermés dans le sein de la terre dont on peut extraire de l'énergie sous forme thermique, notamment par l'intermédiaire des eaux chaudes et des vapeurs souterraines qu'ils contiennent, dits « gîtes géothermiques » (Code minier - Article L112-1).

² Parmi les gîtes géothermiques d'une puissance thermique primaire inférieure à 20 MW, sont considérées comme des activités géothermiques de minime importance les activités de géothermie exercées dans le cadre du présent code qui utilisent les échanges d'énergie thermique avec le sous-sol, qui ne présentent pas de dangers ou d'inconvénients graves pour les intérêts mentionnés à l'article L. 161-1 et qui satisfont aux conditions fixées par décret en Conseil d'État sur la base des caractéristiques mentionnées au second alinéa de l'article L. 112-1 (Code minier - Article L112-3).

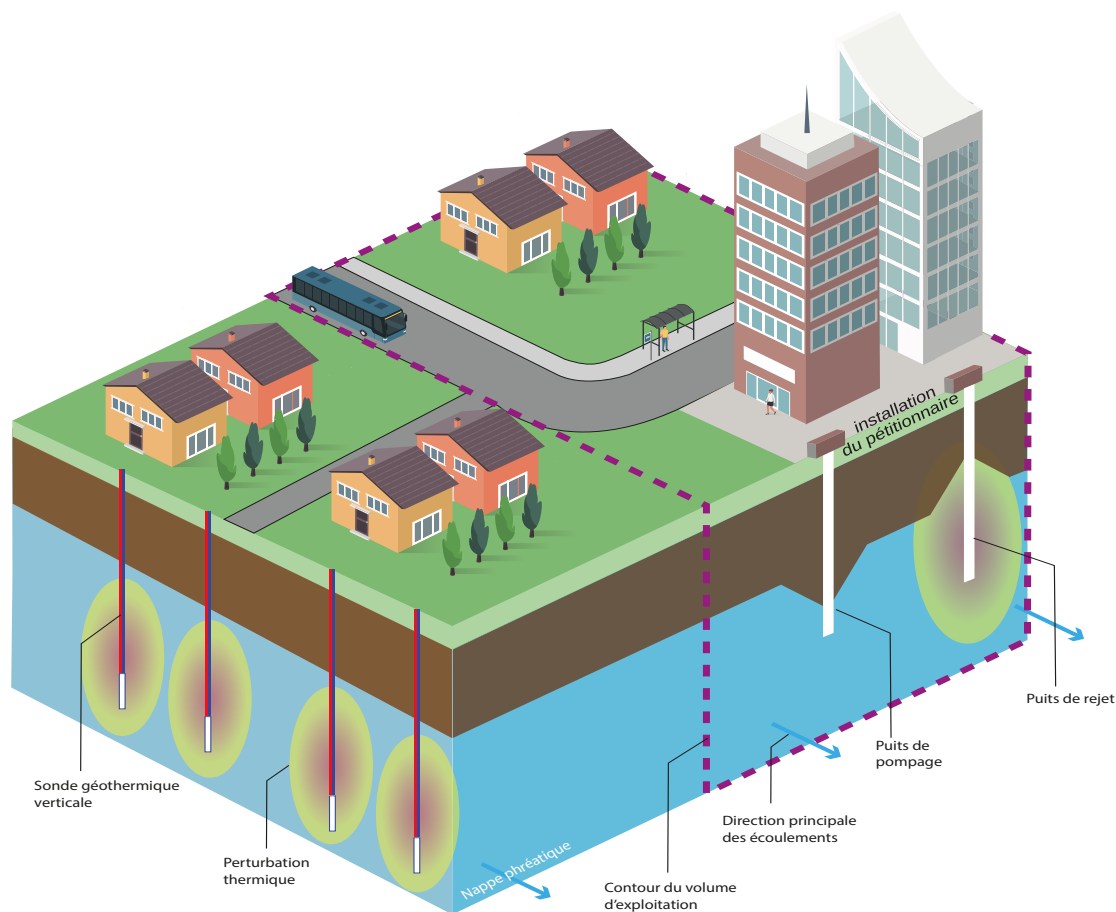


Figure 2 : Délimitation d'un volume d'exploitation afin d'éviter les interférences entre plusieurs échangeurs géothermiques (Cerema, 2020)

d'exploitation de géothermie. Une annexe technique à ce décret présente un mode de calcul simplifié permettant de déterminer le volume d'exploitation et le périmètre de protection d'une exploitation géothermique. Les cas des échangeurs géothermiques ouverts (doublets sur eau de nappe) et fermés (sur sondes verticales) sont distingués. Les recommandations formulées s'appuient sur des considérations géométriques et sur le choix de distances arbitraires, indépendantes du contexte hydrogéologique. En conséquence, ces prescriptions ne permettent pas de garantir la pérennité des installations géothermiques dans les secteurs soumis aux impacts cumulés et aux interférences de multiples installations.

Ainsi, l'objectif de ce document est de (1) donner une définition technique à la notion de volume d'exploitation qui soit applicable aux dispositifs géothermiques ouverts et fermés, et (2) définir le cadre méthodologique permettant de déterminer un volume d'exploitation qui protège les installations des interférences thermiques sur la durée des permis octroyés.

Domaine d'application et structure du document

Dans la première partie du document, les définitions et le cadre méthodologique général permettant de déterminer le volume d'exploitation d'un gîte géothermique sont exposés. Les définitions et éléments méthodologiques présentés concernent l'ensemble des dispositifs géothermiques basse

ou très basse énergie verticaux, ouverts ou fermés et prennent en compte les caractéristiques hydrogéologiques principales du site.

Notamment, la mise en œuvre de la méthodologie proposée nécessite l'acquisition de données hydrogéologiques utiles à la compréhension du comportement hydraulique et thermique de l'aquifère dans l'environnement du projet. En particulier, il s'agit :

- des cartes piézométriques décrivant les écoulements des masses d'eau dans l'environnement du projet ;
- d'un profil hydrogéologique décrivant les formations géologiques et les masses d'eau superposées ;
- des paramètres hydrodynamiques des aquifères tels que la conductivité hydraulique et la porosité ;
- des propriétés thermiques des formations géologiques telles que la conductivité thermique et la capacité thermique volumique ;
- des chroniques piézométriques et thermiques décrivant les variations saisonnières des niveaux et température des nappes.

Dans la deuxième partie, les quatre étapes permettant de déterminer le volume d'exploitation d'un gîte géothermique sont développées et illustrées sur des exemples. L'applicabilité des outils analytiques et numériques illustrés dans cette partie est conditionnée par la nature de l'échangeur considéré, le contexte hydrogéologique et l'environnement construit du projet.

1. DÉFINITIONS ET ÉTAPES POUR DÉTERMINER LE VOLUME D'EXPLOITATION D'UN GÎTE GÉOTHERMIQUE

L'objectif de ce chapitre consiste à préciser les étapes permettant de définir une zone de protection autour d'une installation géothermique afin d'éviter qu'une nouvelle installation d'une puissance thermique moyenne P ne génère d'altération thermique ΔT_{max} susceptible de dégrader les performances de l'installation (figure 3). Sauf mention contraire, l'installation géothermique considérée (système ouvert ou fermé) exploite toujours la chaleur (ou le froid) d'une formation aquifère³. Pour ce faire, les définitions suivantes sont données :

- La **Zone de Protection Cible (ZPC)** : elle correspond à la localisation des forages de l'installation qui permettent l'implantation des sondes (échangeurs fermés) ou des pompages (échangeurs ouverts) permettant les échanges thermiques avec le sous-sol ;
- La **Puissance thermique P** : correspond à la puissance thermique moyenne à laquelle une installation géothermique échange de la chaleur avec le sous-sol. La puissance d'une installation géothermique tierce est dite acceptable si l'impact thermique qu'elle génère sur la ZPC de l'installation du pétitionnaire reste inférieure à ΔT_{max} ;
- Le **Volume d'Exploitation (VE)** : il correspond à l'espace où l'injection d'une puissance thermique P génère une altération thermique de la ZPC supérieure ou égale à ΔT_{max} .

La réponse thermique ΔT de la ZPC à l'injection d'une puissance thermique P en un point donné du milieu aquifère peut être étudiée à l'aide d'une fonction de transfert hydrogéologique⁴ permettant (1) de décrire les temps de transfert thermique⁵ dans le système, et (2) quantifier la probabilité p que le transfert thermique se fasse jusqu'à la ZPC en un temps donné. En raison de l'analogie qui existe entre les équations du transfert de chaleur et les équations du transport de contaminants dans un système aquifère, la définition du volume d'exploitation est un problème analogue à la définition du périmètre de protection d'un captage d'eau potable, problème pour lequel la théorie associée aux fonctions de transferts hydrogéologiques peut être mise en œuvre⁶.

Le volume d'exploitation d'un gîte géothermique correspond ainsi à l'espace où la probabilité qu'un transfert thermique atteigne la ZPC est trop élevée pour que l'altération thermique qui en découle soit acceptable (elle est supérieure à ΔT_{max}). Ainsi, pour déterminer le volume d'exploitation d'un gîte géothermique, les étapes suivantes sont nécessaires :

Étape 1 : déterminer la perturbation thermique ΔT_{max} admissible pour maintenir les performances de l'installation sur la durée du permis sollicité. Elle dépend des préconisations techniques associées à l'échangeur et des variations saisonnières des températures du sous-sol ou de la nappe.

Étape 2 : cartographier les probabilités que des transferts thermiques atteignent la ZPC. Cette cartographie permet de déduire les puissances thermiques acceptables autour de l'installation par de nouveaux ouvrages ayant une faible influence hydraulique (c'est le cas des échangeurs géothermiques fermés et des échangeurs ouverts de minime importance).

Étape 3 : déterminer la puissance thermique totale P_{totale} envers laquelle l'installation doit être protégée. Un report de cette puissance sur la cartographie obtenue à l'étape 2 permet ainsi de déduire le contour du volume d'exploitation.

Étape 4 : déterminer la surface supérieure et inférieure, dans la dimension verticale, du volume d'exploitation.

Ces quatre étapes sont développées dans la suite du document.

³ Une formation aquifère est un corps constitué de roches perméables comportant une zone saturée suffisamment conductrice d'eau souterraine pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe souterraine (Castany et Margat, 1977)

⁴ Le transfert hydrogéologique correspond à la description du déplacement des molécules d'eau dans un système aquifère sous l'action de l'advection-dispersion et de la diffusion moléculaire.

⁵ Le transfert thermique correspond à la description du déplacement des calories/frigoriques dans un système aquifère sous l'action de l'advection-dispersion et de la conduction thermique.

⁶ Pour plus de détails sur les techniques mathématiques permettant d'obtenir des fonctions de transfert en hydrogéologie, les lecteurs peuvent consulter les travaux de Cornaton et Perrochet (2006a, b) et les travaux de Milnes et Perrochet (2013) qui concernent directement une application à la géothermie. Pour consulter des applications de cette théorie à la protection des captages AEP, les lecteurs peuvent consulter les travaux de Chow *et al.*, (2016), Kazemi *et al.*, (2006), Molson et Frind, (2012), et Turnadge et Smerdon, (2014).

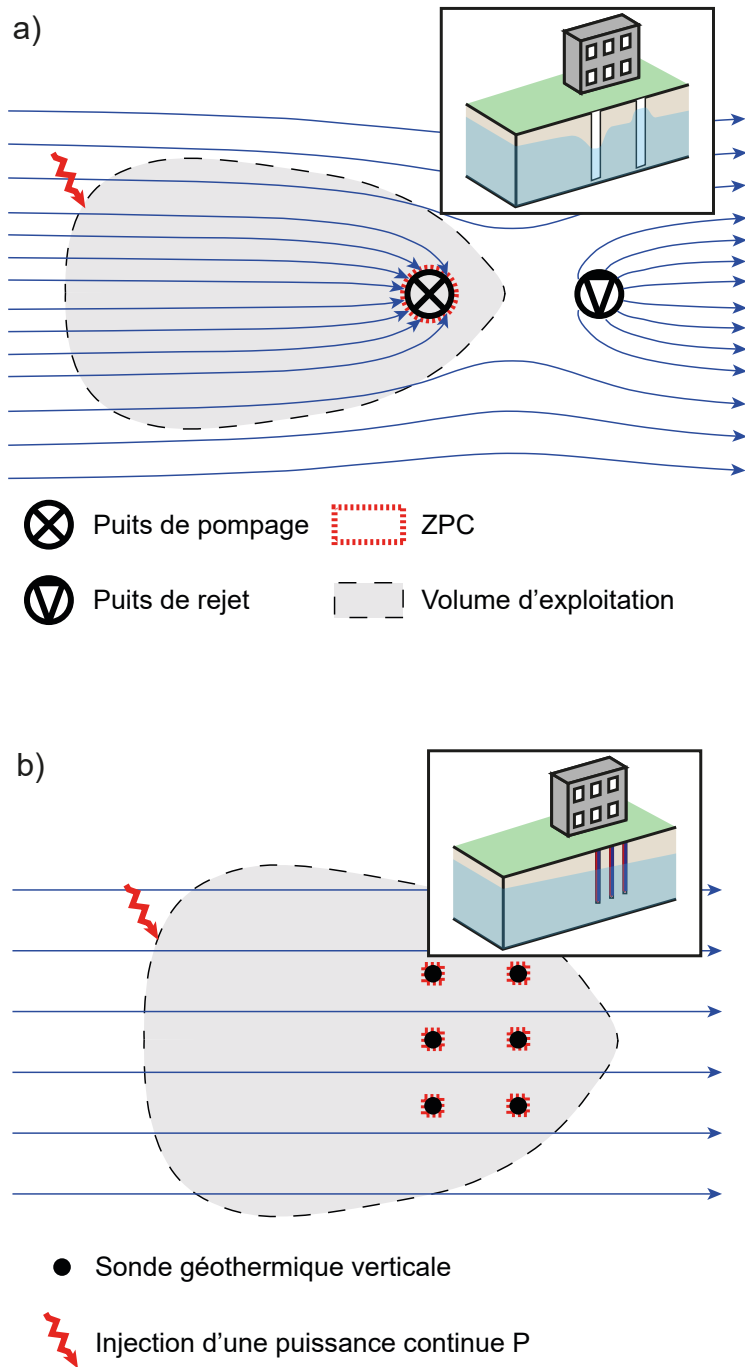


Figure 3 : Zone de protection cible et volume d'exploitation vus en plan dans le cas d'un échangeur ouvert (a) et dans le cas d'un échangeur fermé (b)

2. MÉTHODE POUR DÉTERMINER LE VOLUME D'EXPLOITATION

2.1 Définir la perturbation thermique ΔT_{max} acceptable (étape 1)

Cette amplitude ΔT_{max} correspond à l'écart maximal de température du sous-sol ou de l'eau souterraine admissible pour le maintien des performances de l'installation. En effet, une altération de la température du sous-sol ou de l'eau souterraine trop importante peut dégrader le coefficient de performance de la pompe à chaleur raccordée au dispositif géothermique ouvert ou fermé.

La *figure 4* illustre cette variation du coefficient de performance dans le cas d'échangeurs ouverts⁷. Dans le cas d'un fonctionnement en chauffage, le COP diminue de 11% lorsque la température de l'eau souterraine passe de 18 °C à 12 °C. Dans le cas d'un fonctionnement en refroidissement, le COP diminue de 13% lorsque la température de l'eau souterraine passe de 12 à 18°C.

Ce terme conditionne l'extension du volume d'exploitation : plus ΔT_{max} est faible, plus le volume d'exploitation sera étendu et inversement, plus ΔT_{max} est grand, plus le volume d'exploitation sera restreint.

En conséquence, l'amplitude ΔT_{max} doit être suffisamment faible pour garantir les performances de l'installation. Elle doit être déterminée en s'appuyant sur :

- les préconisations techniques relatives au bon fonctionnement de l'échangeur ;
- la variation naturelle de la température du sous-sol ou de la nappe dans l'environnement du projet.

Bien que certaines installations puissent présenter une plus grande sensibilité aux variations de températures, le choix d'une plage de température ΔT_{max} (de réchauffement, ou de refroidissement) comprise entre 2 °C et 3 °C est raisonnable dans le cas général⁸.

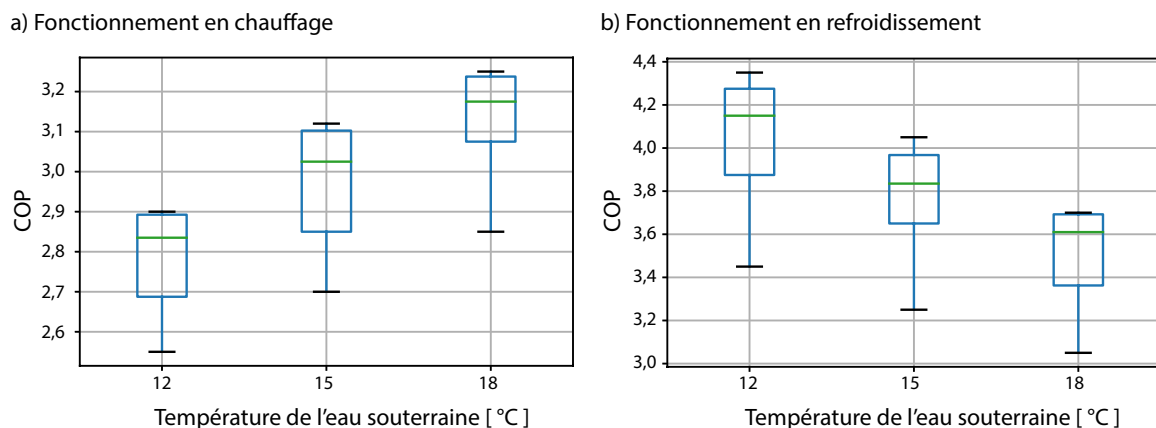


Figure 4 : Évolution du coefficient de performance d'une pompe à chaleur sur échangeur ouvert en fonction de la température de l'eau souterraine (a) dans le cas d'un fonctionnement en chauffage et (b) d'un fonctionnement en refroidissement (b). Les barres noires représentent les COP min et max pour chaque température d'eau souterraine, les rectangles bleus correspondent aux COP compris entre le premier et le quatrième quartile, et la barre verte indique le COP médian (D'après Kim et Nam (2015)).

⁷ Les variations des COP observées pour une même température d'eau souterraine sont dues à la variabilité des débits des installations géothermiques considérées par les auteurs

⁸ Dans certains cas, par exemple pour les projets de géo-cooling, les variations de température doivent être le plus faible possible pour garantir l'efficacité de l'installation. En fonction de la température naturelle de la nappe et pour une exploitation de ce type, la variation de température acceptable peut être inférieure à 2°C.

2.2 Cartographier les probabilités que des transferts thermiques atteignent une installation géothermique (étape 2)

Des modèles analytiques et numériques permettent de calculer la réponse thermique du sous-sol et de l'eau souterraine à la sollicitation d'une installation géothermique en échangeur ouvert ou fermé. Ces modèles peuvent être utilisés afin de cartographier les probabilités que des transferts thermiques atteignent une installation géothermique⁹.

Ainsi, dans la suite du document, des modèles analytiques et numériques sont utilisés pour illustrer la démarche. Le choix d'une solution analytique ou numérique est présenté à la figure 5. Ce choix repose sur :

1. **le contexte hydrogéologique** : les modèles analytiques disponibles sont adaptés aux aquifères dont les propriétés hydrodynamiques et thermiques sont homogènes, et lorsque l'écoulement de la nappe est uniforme. La modélisation numérique permet une meilleure prise en compte des hétérogénéités du sous-sol, et des échanges thermiques avec la surface du sol.
2. **l'environnement construit du projet** : la modélisation numérique permet de prendre en compte des perturbations d'écoulements causées, par exemple, par des aménagements souterrains, ou éventuellement par d'autres installations géothermiques.

2.2.1 Cas des échangeurs ouverts

Dans le cas d'un échangeur ouvert, la ZPC est réduite à la localisation du/des puits de pompage (figure 3a) fonctionnant avec un débit Q_p . Le critère de protection permettant de maintenir une variation de température induite par une puissance thermique externe P_{ex} en deçà du seuil ΔT_{max} s'exprime à l'aide de l'équation suivante :

$$p \leq \frac{\Delta T_{max} \cdot Q_p \cdot C_w}{P_{ex}} \quad (\text{équation 1})$$

avec C_w la capacité thermique volumique de l'eau.

Ce critère de protection signifie que toute puissance thermique externe P_{ex} introduite dans une zone où la probabilité d'atteindre l'installation du pétitionnaire est supérieure à $\frac{\Delta T_{max} \cdot Q_p \cdot C_w}{P_{ex}}$ n'est pas acceptable pour maintenir la température de l'eau prélevée dans la gamme souhaitée.

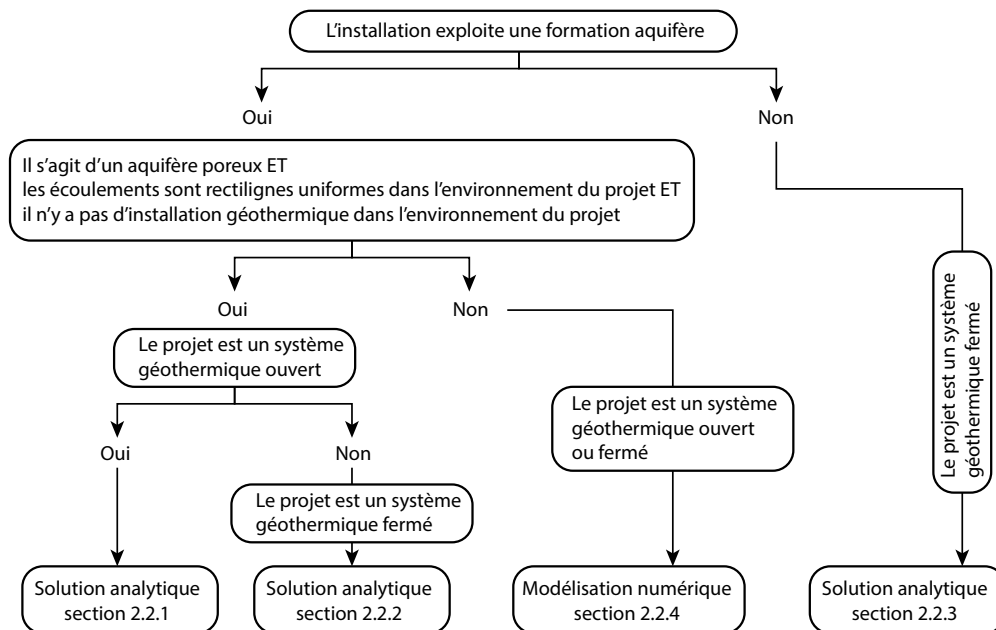


Figure 5 : Modalités de calcul utilisées dans le cadre de ce document pour cartographier les probabilités que des transferts thermiques atteignent une installation géothermique en fonction du contexte hydrogéologique et de l'environnement construit du projet.

⁹ Pour plus de détails sur l'utilisation de modèles analytiques et numériques pour calculer le champ de probabilité d'atteinte d'une installation géothermique, les auteurs peuvent consulter les travaux de Attard et al., (2020) (<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.095>).

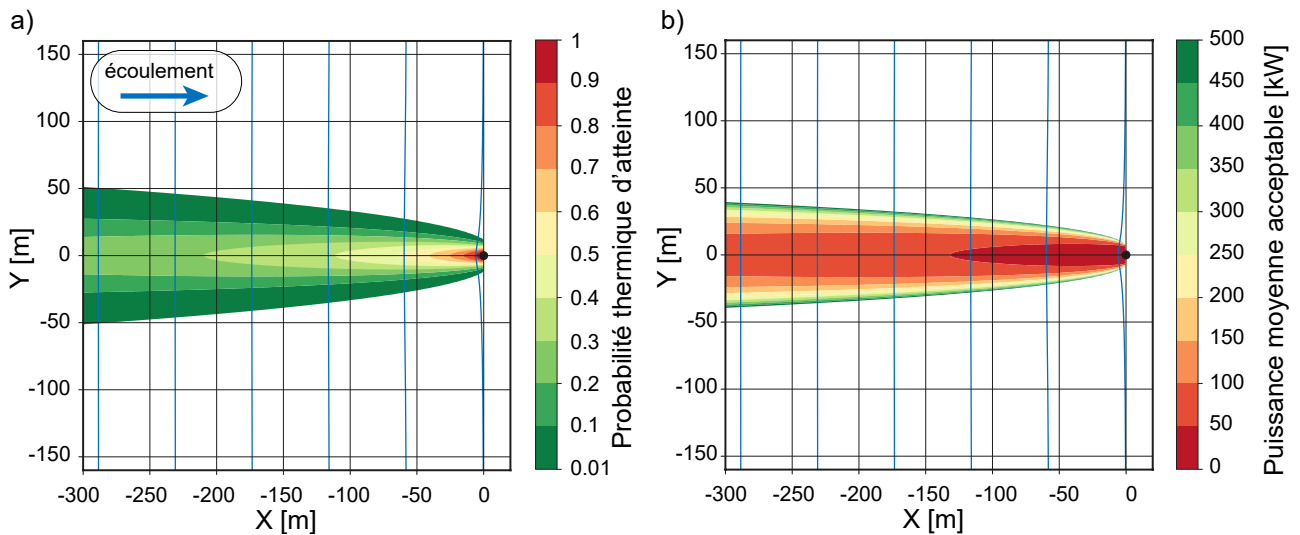


Figure 6 : (a) Probabilité que des transferts thermiques atteignent l'installation après 30 ans et (b) puissance moyenne acceptable à l'amont de l'installation (en considérant $\Delta T_{max} = 2 \text{ }^\circ\text{C}$). Les lignes piézométriques sont représentées par des lignes bleues. Le puits de pompage de l'échangeur ouvert est représenté par un point noir.

Dans un système aquifère captif où les écoulements sont uniformes, d'une vitesse effective¹⁰ v_a et orientés dans le sens des x positifs, l'adaptation du modèle analytique de Domenico et Robbins (1985)¹¹ modifié par Hähnlein *et al.* (2010) peut être utilisé¹² :

$$p(x, y, t) = \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left(\frac{-Rx - v_a t}{2\sqrt{D_x R t}} \right) \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{y + \frac{Y}{2}}{2\sqrt{D_y \frac{-x}{v_a}}} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{y - \frac{Y}{2}}{2\sqrt{D_y \frac{-x}{v_a}}} \right] \right\} \quad (\text{équation 2})$$

avec :

$$Y = \frac{Q_p}{b v_a n} \quad (\text{équation 3})$$

et :

$$D_{x/y} = \frac{\lambda_m}{n C_w} + \alpha_{L/T} v_a \quad (\text{équation 4})$$

Le paramètre R est défini comme le retard thermique et s'exprime par $R = \frac{c_m}{n C_w} = 1 + \frac{(1-n)c_s}{n C_w}$.

Exemple d'application : Ce modèle analytique est appliqué à un dispositif géothermique ouvert fonctionnant avec un débit annuel moyen de $8 \text{ m}^3/\text{h}$, implanté dans un aquifère captif de 50 m d'épaisseur, d'une porosité efficace de 30% , où l'eau circule à une vitesse effective de 1 m par jour (Les valeurs de conductivité hydraulique et de porosité efficace de formations géologiques communes sont reportées en *annexe 1*).

L'application de ce modèle permet de cartographier la probabilité que des transferts thermiques atteignent l'installation durant ses 30 premières années d'exploitation. La *figure 6a* présente cette cartographie à proximité du puits de pompage : la probabilité que le transfert thermique atteigne le captage est élevée (il s'agit des secteurs représentés en orange - rouge). Plus en amont, la probabilité que le transfert thermique atteigne le captage est plus faible, notamment en raison des phénomènes de dispersion et de conduction thermique (il s'agit des secteurs représentés en vert - jaune).

Dans cet exemple, il est considéré que la variation de température de l'eau prélevée ne doit pas excéder $\Delta T_{max} = 2^\circ\text{C}$. Puisque la probabilité d'atteindre l'installation est connue, il est alors possible de déterminer la puissance thermique moyenne acceptable autour de l'installation à l'aide de l'équation (1) (*figure 6b*). Dans l'axe de l'écoulement, et jusqu'à 125 m à l'amont de l'ouvrage, la puissance moyenne acceptable est comprise entre 0 et 50 kW . Transversalement à l'écoulement (dans l'axe des Y positifs), la puissance moyenne acceptable croit rapidement jusqu'à dépasser 500 kW (zone blanche sur la figure).

¹⁰ La vitesse effective de l'eau est définie par $v_a = \frac{K \times i}{n}$, où K correspond à la conductivité hydraulique de la nappe, i correspond au gradient hydraulique et n à la porosité efficace de la nappe.

¹¹ Ce modèle analytique considère que la source de chaleur représentée par l'eau réinjectée est une source plane d'extension verticale infinie et orthogonale à la direction d'écoulement.

¹² Ce modèle analytique ne tient pas compte d'éventuels transferts thermiques verticaux avec (1) la surface du sol et (2) la formation géologique sous-jacente.

2.2.2 Cas des échangeurs fermés dans une formation aquifère

Dans le cas d'un échangeur fermé, la ZPC regroupe l'ensemble des sondes géothermiques verticales de l'installation (figure 3b). Le critère de protection permettant de maintenir au niveau des sondes une variation de température inférieure au seuil ΔT_{max} s'exprime à l'aide de l'équation suivante :

$$p \leq \frac{\Delta T_{max} \cdot Q_D \cdot C_w}{P_{ex}} \quad (\text{équation 5})$$

avec Q_D le débit de Darcy calculé autour de chaque sonde de diamètre d :

$$Q_D = d \cdot q \cdot b \quad (\text{équation 6})$$

avec q le flux de Darcy $q = K \cdot i$ où K correspond à la conductivité hydraulique de la nappe et i correspond au gradient hydraulique.

De même que pour les échangeurs ouverts, ce critère de protection signifie que toute puissance thermique moyenne P introduite dans une zone où la probabilité d'atteindre l'installation du pétitionnaire est supérieure à $\frac{\Delta T_{max} \cdot Q_D \cdot C_w}{P_{ex}}$

n'est pas acceptable pour maintenir la température au niveau des sondes dans la gamme souhaitée.

Dans un système aquifère captif où les écoulements sont uniformes et d'une vitesse effective¹³ v_a et orientés dans le sens des x positifs, l'adaptation du modèle analytique de Carslaw et Jaeger (1959)¹⁴ (cité par Stauffer *et al.*, (2013), équation 3.36, page 119) qui donne l'équation suivante pour une sonde géothermique verticale (k) localisée en $x=X_k$ et $y=Y_k$ peut être utilisée :

$$p_k(x, y, t) = \frac{K i d C_w}{4 \pi C_m \sqrt{D_{t,L} D_{t,T}}} \exp \left[\frac{-u_t (x - X_k)}{2 D_{t,L}} \right] \times \int_0^{\infty} \exp \left[-\Psi - \left(\frac{(x - X_k)^2}{D_{t,L}} + \frac{(y - Y_k)^2}{D_{t,T}} \right) \frac{u_t^2}{16 D_{t,L} \Psi} \right] \frac{d\Psi}{\Psi} \quad (\text{équation 7})$$

avec $u_t = \frac{C_w n}{C_m} v_a$ et $D_{t,L/T} = \frac{\lambda_m}{C_w} + \alpha_{L/T} u_t$.

Puisque la probabilité qu'un transfert thermique atteigne une installation géothermique composée de n sondes verticales est égale à la somme des probabilités d'atteindre chaque sonde, l'équation suivante donne le champ de probabilité d'atteindre l'installation :

$$p(x, y, t) = \sum_{k=1}^n p_k(x, y, t) \quad (\text{équation 8})$$

Exemple d'application : Ce modèle analytique est appliqué à un dispositif géothermique fermé composé de 6 sondes verticales, implantées dans un aquifère captif de 50 m d'épaisseur, d'une porosité efficace de 30%, où l'eau circule à une vitesse effective de 0,05 m par jour. L'application de ce modèle permet de cartographier la probabilité que des transferts thermiques atteignent l'installation durant ses 30 premières années d'exploitation (figure 7a). Dans cet exemple, il est considéré que la variation de température ne doit pas excéder $\Delta T_{max} = 2$ °C au niveau des sondes. Puisque la probabilité d'atteindre l'installation est connue, il est alors possible de déterminer la puissance thermique moyenne acceptable autour de l'installation à l'aide de l'équation (5) (figure 7b).

¹³ La vitesse effective de l'eau est définie par $v_a = \frac{K \cdot i}{n}$, où K correspond à la conductivité hydraulique de la nappe, i correspond au gradient hydraulique et n à la porosité efficace de la nappe.

¹⁴ Ce modèle analytique considère une source de chaleur d'extension infinie, dans un aquifère infini. Ce modèle analytique tient compte du phénomène de dispersion. Ce modèle analytique ne tient pas compte d'éventuels transferts thermiques verticaux avec (1) la surface du sol et (2) la formation géologique sous-jacente.

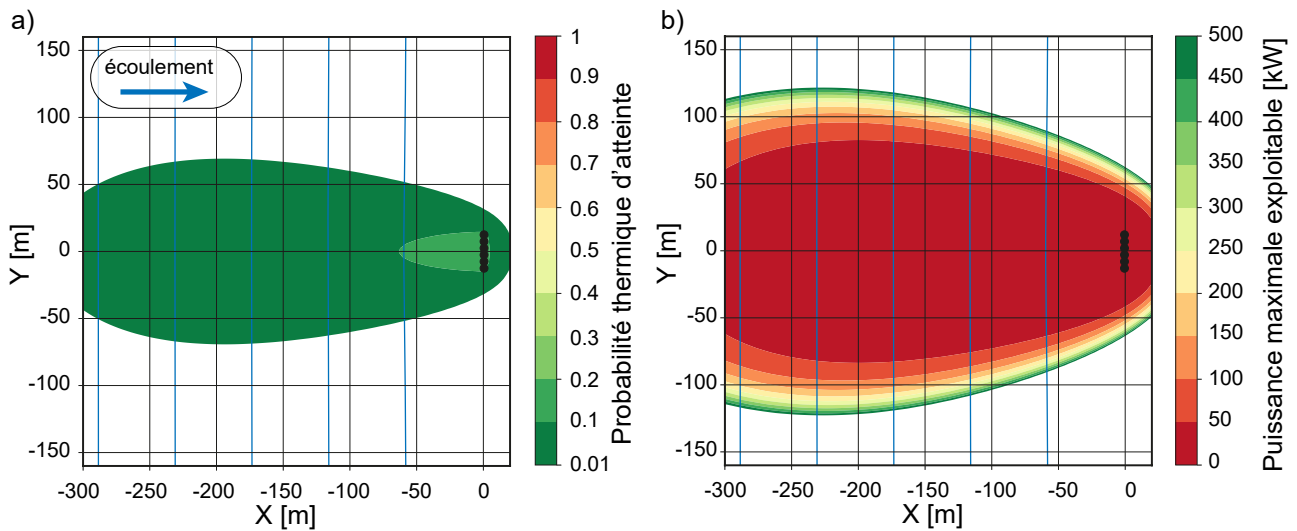


Figure 7 : (a) Probabilité que des transferts thermiques atteignent l'installation en 30 ans et (b) puissance moyenne acceptable à l'amont de l'installation (en considérant $\Delta T_{max}=2^{\circ}\text{C}$). Les lignes piézométriques sont représentées par des lignes bleues. Les sondes de l'installation sont représentées par des points noirs.

2.2.3 Cas des échangeurs fermés dans une formation non-aquifère

Lorsqu'une installation géothermique sur sondes verticales (échangeur fermé) exploite une formation géologique non-aquifère, les transferts thermiques se font principalement par conduction, et la détermination du volume d'exploitation peut se faire en évaluant l'impact thermique d'une installation tierce. Cet impact peut être calculé à l'aide du modèle analytique de Carslaw et Jaeger (1959)¹⁵ (cité par Stauffer *et al.*, (2013), équation 3.10 page 107) donne l'équation suivante pour une sonde géothermique verticale d'une puissance P localisée à l'origine (en $x=0$ et $y=0$) dans une formation géologique d'épaisseur b :

$$\Delta T(r, t) = -\frac{P/b}{4\pi\lambda_m} \times \int_{\frac{r^2}{4D_t t}}^{\infty} \exp(-u) \frac{du}{u} = -\frac{P/b}{4\pi\lambda_m} \text{Ei}\left(-\frac{r^2}{4D_t t}\right) \quad (\text{équation 9})$$

avec $D_t = \frac{\lambda_m}{C_m}$, r la distance à la sonde et Ei la fonction exponentielle intégrale.

Ainsi, la puissance thermique moyenne P qui peut être exploitée pendant un temps t , et à une distance r de l'installation, tout en maintenant une variation de température inférieure au seuil ΔT_{max} au niveau des sondes s'exprime à l'aide de l'équation suivante :

$$P(r, t) = -\frac{b4\pi\lambda_m\Delta T_{max}}{\text{Ei}\left(-\frac{r^2}{4D_t t}\right)} \quad (\text{équation 10})$$

Cette équation permet ainsi de déterminer le volume d'exploitation souhaité, en fonction de la puissance thermique moyenne acceptable autour de l'installation.

Exemple d'application : Considérons une installation géothermique composée d'une sonde verticale (échangeur fermé) implantée dans une formation géologique non-aquifère de 100 m d'épaisseur, d'une conductivité thermique $\lambda_m=2.2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ et d'une capacité thermique volumique $C_m=2.5 \text{ MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$ (Les valeurs des conductivités thermiques et de capacités thermiques volumiques de formations géologiques communes sont reportées en *annexe 1*). Considérons également que l'impact thermique causé par une installation tierce ne doit pas dépasser $\Delta T_{max}=2^{\circ}\text{C}$ autour de l'installation. L'équation (10) permet ainsi de calculer la puissance moyenne acceptable autour de l'installation après 30 années de fonctionnement (*figure 8*). Elle est comprise entre 0 et 50 kW à 70 m de l'installation, et elle est supérieure à 500 kW au-delà de 100 m.

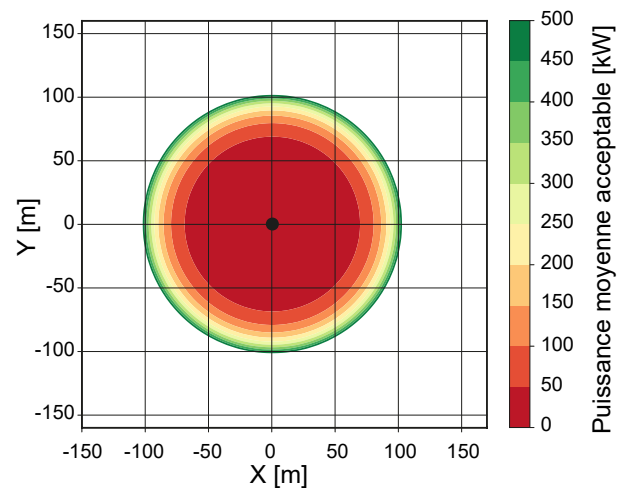


Figure 8 : Puissance thermique moyenne acceptable autour d'un échangeur géothermique fermé exploitant une formation géologique non-aquifère d'une conductivité thermique $\lambda_m = 2.2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ et d'une capacité thermique volumique $C_m = 2.5 \text{ MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$.

¹⁵ Ce modèle analytique considère une source de chaleur d'extension infinie, dans une formation géologique. Ce modèle analytique ne tient pas compte d'éventuels transferts thermiques verticaux avec (1) la surface du sol et (2) la formation géologique sous-jacente.

2.2.4 Cartographie des probabilités par modélisation numérique

Dans les contextes hydrogéologiques complexes (voir figure 5), par exemple lorsque l'aquifère présente des caractéristiques hétérogènes, où lorsque les écoulements de nappes sont perturbés, une approche par modélisation numérique déterministe peut être mise en œuvre. Les restitutions graphiques présentées dans la suite peuvent être obtenues avec n'importe quel logiciel de modélisation hydrogéologique des écoulements et des transferts thermiques (par exemple : MODFLOW (Therrien *et al.*, 2010), Hydrogeosphere (McDonald and Harbaugh, 1988), Watflow (Molson *et al.*, 2002) ou Feflow (Diersch, 2013) et éventuellement avec un outil de post-traitement de données (par exemple, Matlab, R, Python, etc.).

Exemple d'application : cet exemple consiste à simuler numériquement les probabilités que des transferts thermiques atteignent une installation géothermique en

échangeur ouvert et d'en déduire la puissance thermique qui peut être exploitée autour de cette installation. L'installation est localisée dans un secteur urbanisé où les écoulements de nappes sont perturbés par plusieurs constructions souterraines imperméables.

Tout d'abord, les écoulements de nappe sont simulés en régime permanent sur le secteur d'intérêt. La configuration modélisée est illustrée par la figure 9a. L'installation géothermique est implantée dans une formation aquifère alluviale d'une épaisseur d'environ 25 m, d'une conductivité hydraulique de 10^{-3} m/s et d'une porosité efficace de 20%. Les localisations du puits de pompage (point rouge sur la figure 9a) et du puits de rejet (point noir sur la figure 9a) sont introduites dans le modèle numérique. Le doublet géothermique a un débit de fonctionnement moyen de $Q_p = 4.5$ l s⁻¹ qui est défini comme condition limite au niveau de chacun des puits. Les constructions souterraines imperméables sont introduites dans le modèle numérique

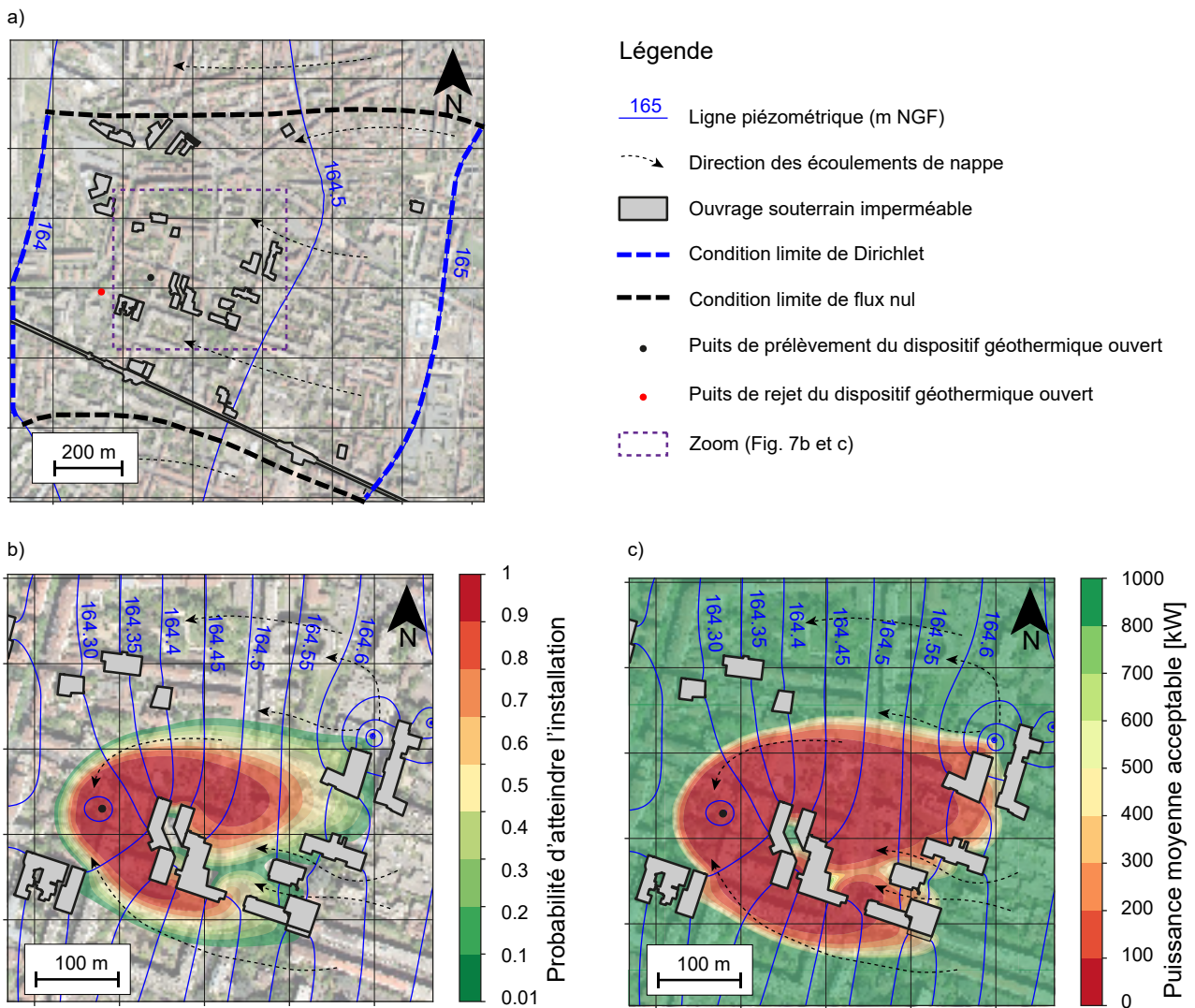


Figure 9 : (a) Configuration et conditions aux limites du site d'étude modélisé numériquement dans le secteur urbanisé ; (b) Probabilité d'atteindre le puits de pompage de l'installation géothermique étudiée (échangeur ouvert) ; (c) Puissance thermique moyenne acceptable autour de l'installation.

par des limites à flux nul. La taille des mailles du modèle numérique varie de l'ordre de quelques centimètres à proximité des constructions et des puits, à quelques mètres au niveau des limites du domaine d'étude¹⁶.

Ensuite, le sens des écoulements est inversé sur l'ensemble du domaine d'étude. De cette façon, les particules d'eau se déplacent virtuellement de l'aval vers l'amont, les zones de recharge deviennent des exutoires et vice-versa (figure 10). Lorsque le logiciel de modélisation le permet, cette inversion du sens des écoulements peut être effectuée automatiquement. Si ce n'est pas le cas, l'inversion du sens des écoulements peut être effectuée en inversant le signe (+/-) des conditions aux limites qui portent sur le régime hydraulique de la nappe (condition limite de potentiel imposé, condition limite supérieure liée à la recharge de la nappe, condition limite liée à la présence d'un puits, etc.)

Enfin, la probabilité d'atteindre l'installation est quantifiée. La technique mathématique permettant de calculer et cartographier cette probabilité consiste à simuler l'effet d'une injection localisée et instantanée d'énergie thermique au niveau de l'installation, et d'étudier sa migration dans le champ d'écoulement inversé (donc vers l'amont)¹⁷. Le champ de probabilité peut ainsi être calculé en intégrant le signal thermique migrant dans la direction inverse des écoulements. Puisque la réponse thermique d'une injection localisée et instantanée est aussi la fonction dérivée d'une injection constante d'énergie thermique, ce problème peut être résolu de façon équivalente en étudiant la réponse thermique de l'aquifère (en écoulement inversé) à une

anomalie de température $\Delta T=1\text{ K}$ imposée au niveau du puits de pompage du doublet géothermique¹⁸. La durée de la simulation dépend de la durée du permis d'exploitation sollicité.

La figure 9b montre que les franges d'iso-probabilité sont fortement influencées par les constructions souterraines qui perturbent les écoulements. Cette figure montre également que le dispositif d'intérêt est sous influence d'un puits de rejet situé environ 330 m en amont. Cette installation voisine rejette un débit de $6,8\text{ l s}^{-1}$. L'approche numérique mise en œuvre a permis de quantifier l'influence de cette installation sur le projet du pétitionnaire : les résultats montrent que l'installation voisine se situe dans une zone où la probabilité d'atteinte est inférieure à 1%. La formule de passage (équation (1)) permet finalement de calculer la puissance thermique moyenne acceptable autour de l'installation (figure 9c).

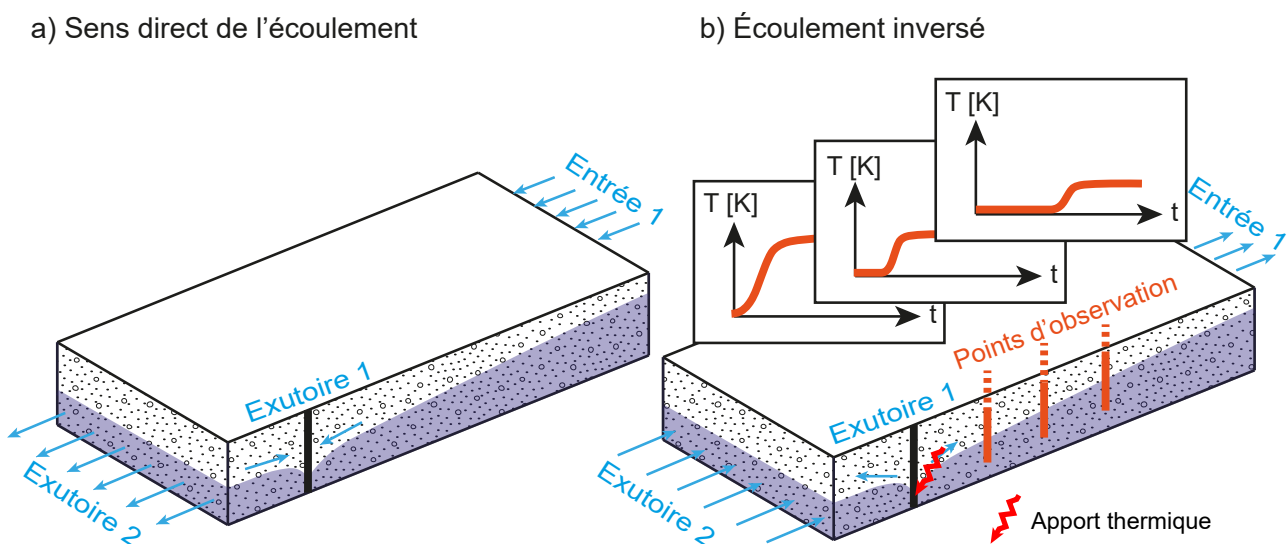


Figure 10 : Formalisation du problème en écoulement direct (a) et en écoulement inversé (b).

¹⁶ Pour plus de détails sur la sensibilité du modèle numérique utilisé dans le cadre de cet exemple, et sur sa calibration, les lecteurs peuvent consulter la littérature appropriée (Attard et al., 2016a, 2016b)

¹⁷ Pour plus d'information théorique, les lecteurs sont invités à consulter la littérature adaptée (Cornaton et Perrochet, 2006a, 2006b).

¹⁸ Cette valeur $\Delta T=1\text{ K}$ correspond à une probabilité de 1 d'atteindre l'installation.

2.3 Délimiter l'extension horizontale du volume d'exploitation (étape 3)

2.3.1 Définir la puissance thermique vis-à-vis de laquelle l'installation doit être protégée

La deuxième étape développée précédemment permet d'obtenir une cartographie continue de la puissance maximale exploitable autour d'un projet. Ainsi, délimiter l'extension horizontale du volume d'exploitation revient à déterminer une puissance thermique P_{totale} vis-à-vis de laquelle le projet doit être protégé. Plus la valeur de P_{totale} proposée par le pétitionnaire est faible, plus le volume d'exploitation sera réduit et inversement, plus la valeur de P_{totale} est grande, plus le volume d'exploitation sera étendu. En conséquence, la valeur de P_{totale} doit être suffisante pour garantir le maintien des performances de l'installation malgré l'arrivée de futures installations dans son environnement.

Pour déterminer cette puissance P_{totale} , le pétitionnaire peut estimer le nombre (n) d'installations géothermiques dont la puissance maximale extraite du sous-sol est inférieure à 500 kW¹⁹ susceptibles d'être implantées dans l'environnement du projet. Ce nombre peut varier en fonction du niveau d'urbanisation et des projets d'urbanisation autour de l'installation. Le produit de ce nombre n avec une estimation de la puissance thermique moyenne P_{moy} de fonctionnement de ces dispositifs permet de définir P_{totale} (équation 11).

$$P_{totale} = n \times P_{moy} \quad (\text{équation 11})$$

Notons que les projets dont la puissance maximale extraite du sous-sol est supérieure à 500 kW ne relèvent pas du régime de minime importance et sont donc soumis à une étude d'impact (Selon la nomenclature en annexe de l'article R. 122-2 du code de l'environnement). En conséquence, il n'apparaît pas utile de surdimensionner P_{totale} pour protéger une installation.

2.3.2 Prendre en compte le profil géologique

L'extension horizontale du volume d'exploitation doit tenir compte des différentes formations géologiques intersectées par l'installation lorsqu'elles varient significativement par leur propriétés hydrauliques (conductivité hydraulique, porosité efficace) ou thermiques (conductivité thermique, capacité thermique volumique). Ce cas de figure peut se présenter dans le cas des échangeurs fermés dont les profondeurs sont généralement supérieures aux échangeurs ouverts. Ainsi, ils intersectent généralement plusieurs formations géologiques.

Ces formations géologiques peuvent être prises en compte soit (1) en utilisant des solutions analytiques 2D pour chaque formation géologique intersectée, soit (2) en utilisant une modélisation numérique 3D permettant de tenir compte de l'ensemble du profil vertical.

Exemple d'application : considérons un échangeur fermé de 100 m de profondeur intersectant successivement depuis la surface du sol :

- une formation aquifère de 50 m d'épaisseur au sein de laquelle circule une nappe libre superficielle à une vitesse de 0,02 m/jour (son niveau piézométrique est représenté en bleu sur la *figure 11a*) ;
- une formation imperméable (non-aquifère) de 10 m d'épaisseur ;
- une seconde formation aquifère au sein de laquelle circule une nappe captive circulant à une vitesse de 0,04 m/jour (son niveau piézométrique est représenté en vert sur la *figure 11a*).

Pour chacune de ces formations, l'étape 2 peut être appliquée en utilisant les solutions analytiques adaptées aux formations aquifères (*voir section 2.2.2*) et non-aquifères (*voir section 2.2.3*). Cette étape permet de cartographier la puissance maximale acceptable autour du dispositif pour chacune des formations considérées. Il est admis pour cet exemple que la puissance thermique vis-à-vis de laquelle l'installation doit être protégée est de 500kW.

Les périmètres intermédiaires s'appuyant sur cette puissance de 500kW peuvent ainsi être déterminés pour chacune des formations (*figure 11b*). Ces périmètres intermédiaires sont représentés en coupe et en plan par des contours violets, roses et bleus pour les formations géologiques successives. Enfin, la délimitation horizontale du volume d'exploitation est déterminée en réunissant les emprises intermédiaires (*figure 11c*).

¹⁹ Ce seuil de 500 kW correspond au seuil des installations géothermiques qui relèvent du régime de la minime importance.

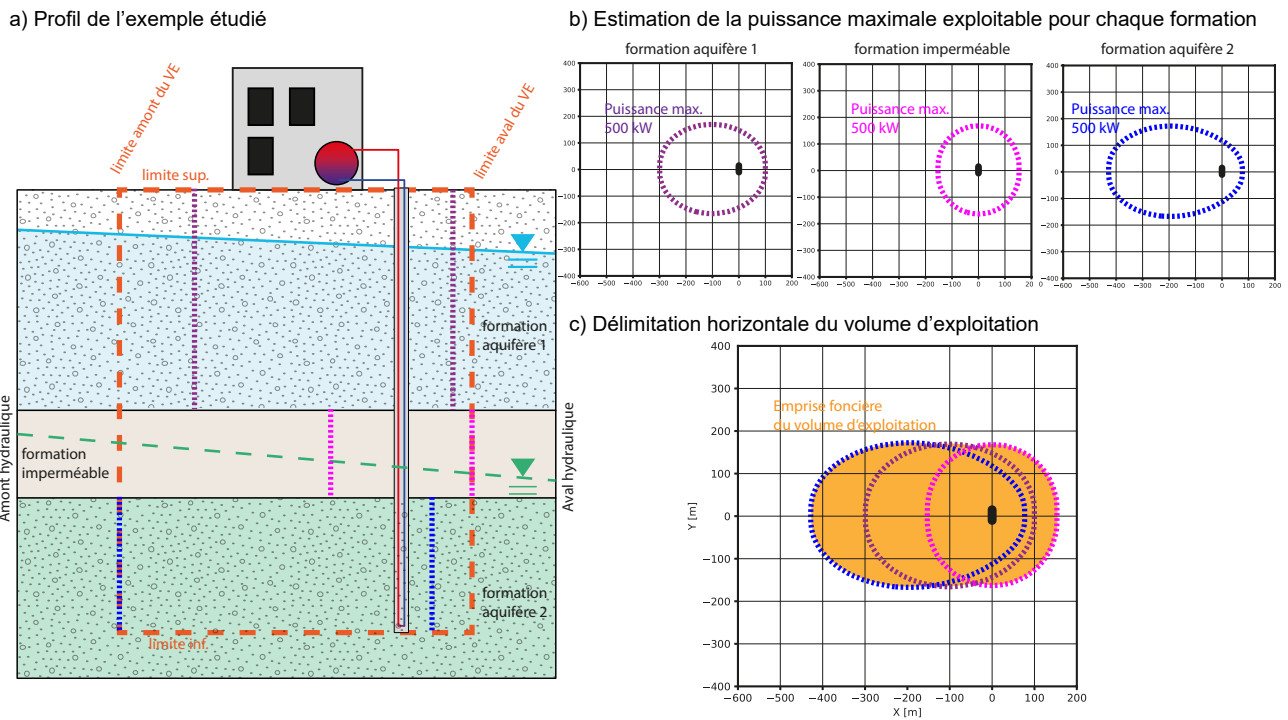


Figure 11 : Délimitation de l'emprise foncière du volume d'exploitation d'une installation géothermique sur échangeur fermé.

2.4 Délimiter la limite supérieure et inférieure du volume d'exploitation (étape 4)

2.4.1 Cas des échangeurs ouverts

Lorsque l'installation géothermique est un échangeur ouvert, les limites supérieures et inférieures du volume d'exploitation correspondent respectivement au toit et au mur de la formation aquifère sollicitée. Ce principe est illustré à la figure 12 pour le cas (a) d'une nappe libre et (b) d'une nappe captive. Lorsque la nappe exploitée est superficielle (figure 12a), la limite supérieure correspond au niveau topographique.

2.4.2 Cas des échangeurs fermés

Lorsque l'installation géothermique est un échangeur fermé, les limites supérieures et inférieures du volume d'exploitation correspondent respectivement à la surface topographique et à la côte la plus basse des échangeurs (voir figure 11a).

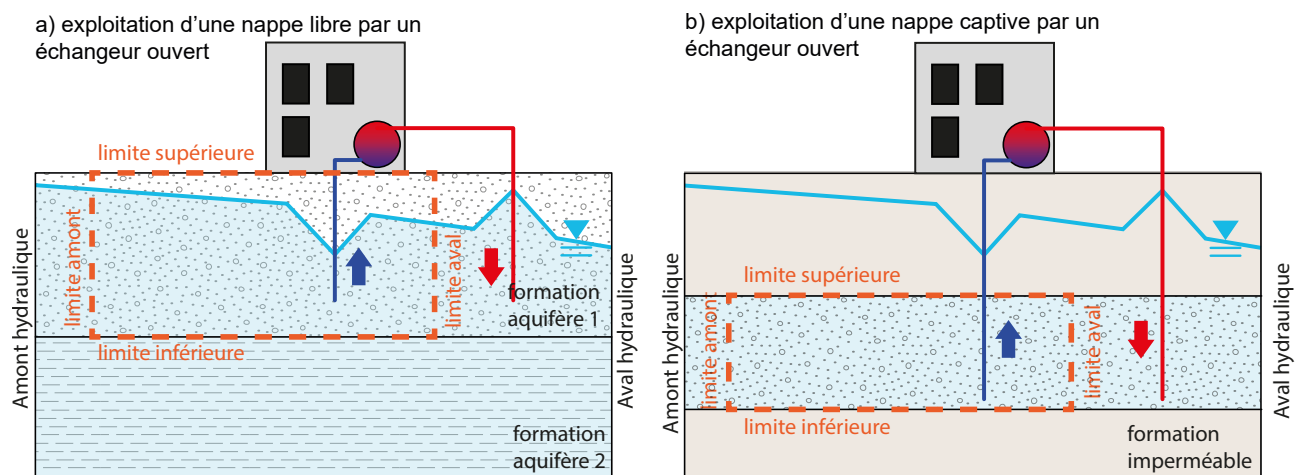


Figure 12 : Délimitation verticale du volume d'exploitation dans le cas d'un échangeur ouvert (a) sur nappe libre et (b) sur nappe captive.

3. BIBLIOGRAPHIE

- **Attard, G., Bayer, P., Rossier, Y., Blum, P., & Eisenlohr, L. (2020).** A novel concept for managing thermal interference between geothermal systems in cities. *Renewable Energy*, 145, 914-924.
- **Attard, G., Rossier, Y., Winiarski, T., Cuvillier, L., and Eisenlohr, L. (2016a).** Deterministic modelling of the cumulative impacts of underground structures on urban groundwater flow and the definition of a potential state of urban groundwater flow : example of Lyon, France. *Hydrogeology Journal* 24, 1213-1229.
- **Attard, G., Rossier, Y., Winiarski, T., and Eisenlohr, L. (2016b).** Deterministic modeling of the impact of underground structures on urban groundwater temperature. *Science of The Total Environment* 572, 986-994.
- **Bayer, P., Attard, G., Blum, P., and Menberg, K. (2019).** The geothermal potential of cities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 106, 17-30.
- **Carlsaw, H.S., and Jaeger, J.C. (1959).** Conduction of heat in solids : Oxford Science Publications (Oxford, England).
- **Castany, G., and Margat, J. (1977).** Dictionnaire français d'hydrogéologie (BRGM).
- **Cornaton, F., and Perrochet, P. (2006a).** Groundwater age, life expectancy and transit time distributions in advective-dispersive systems : 1. Generalized reservoir theory. *Advances in Water Resources* 29, 1267-1291.
- **Cornaton, F., and Perrochet, P. (2006b).** Groundwater age, life expectancy and transit time distributions in advective-dispersive systems ; 2. Reservoir theory for sub-drainage basins. *Advances in Water Resources* 29, 1292-1305.
- **Diersch, H.-J. (2013).** FEFLOW : finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media (Springer Science & Business Media).
- **Domenico, P.A., and Robbins, G.A. (1985).** A new method of contaminant plume analysis. *Groundwater* 23, 476-485.
- **Domenico, P.A., and Schwartz, F.W. (1998).** Physical and chemical hydrogeology (Wiley New York).
- **Hähnlein, S., Molina-Giraldo, N., Blum, P., Bayer, P., and Grathwohl, P. (2010).** Ausbreitung von Kältefahnen im Grundwasser bei Erdwärmesonden. *Grundwasser* 15, 123-133.
- **Kazemi, G.A., Lehr, J.H., and Perrochet, P. (2006).** Groundwater age (John Wiley & Sons).
- **Kim, J., and Nam, Y. (2015).** A Numerical Study on System Performance of Groundwater Heat Pumps. *Energies* 9, 4.
- **McDonald, M.G., and Harbaugh, A.W. (1988).** A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model (US Geological Survey Reston, VA).
- **McWhorter, D.B., and Sunada, D.K. (1977).** Groundwater hydrology and hydraulics (Water Resources Publication).
- **Milnes, E., and Perrochet, P. (2013).** Assessing the impact of thermal feedback and recycling in open-loop groundwater heat pump (GWHP) systems : a complementary design tool. *Hydrogeology Journal* 21, 505-514.
- **Molson, J.W., Beckers, J., Frind, E.O., and Martin, P.J. (2002).** WATFLOW 3D version 4.0, a three-dimensional groundwater/surface water flow model, users guide. Ontario, Canada : Department of Earth Sciences, University of Waterloo.
- **Stauffer, F., Bayer, P., Blum, P., Giraldo, N., and Kinzelbach, W. (2013).** Thermal Use of Shallow Groundwater (CRC Press).
- **Therrien, R., McLaren, R.G., Sudicky, E.A., and Panday, S.M. (2010).** HydroGeoSphere : A three-dimensional numerical model describing fully-integrated subsurface and surface flow and solute transport. Groundwater Simulations Group, University of Waterloo, Waterloo, ON.
- **VDI (2010).** VDI 4640-Thermal use of underground. Blatt 1 : fundamentals, approvals, environmental aspects.

Propriétés hydrauliques et thermiques de formations géologiques communes

Tableau I : Porosité totale, porosité efficace et conductivité hydraulique de formations aquifère communes (d'après Domenico et Schwartz (1998) et McWhorter et Sunada (1977))

Matériau	Porosité totale	Porosité efficace	Conductivité hydraulique [m s ⁻¹]
Grave	0,25 - 0,44	0,13 - 0,44	$3 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-2}$
Sable grossier	0,31 - 0,46	0,18 - 0,43	$9 \times 10^{-7} - 6 \times 10^{-3}$
Sable moyen		0,16 - 0,46	$9 \times 10^{-7} - 5 \times 10^{-4}$
Sable fin	0,25 - 0,53	0,01 - 0,46	$2 \times 10^{-7} - 2 \times 10^{-4}$
Limon, loess	0,35 - 0,50	0,01 - 0,39	$1 \times 10^{-9} - 2 \times 10^{-5}$
Argile	0,40 - 0,70	0,01 - 0,18	$1 \times 10^{-11} - 5 \times 10^{-9}$
Sédimentaire consolidé ou cristallin			
Formation Karstique	0,05 - 0,50		$1 \times 10^{-6} - 2 \times 10^{-2}$
Calcaire, Dolomite	0,00 - 0,20	0,01 - 0,24	$1 \times 10^{-9} - 6 \times 10^{-6}$
Grès	0,05 - 0,30	0,10 - 0,30	$3 \times 10^{-10} - 6 \times 10^{-6}$
Siltite		0,21 - 0,41	$1 \times 10^{-11} - 1,4 \times 10^{-8}$
Basalte	0,05 - 0,50		$2 \times 10^{-11} - 2 \times 10^{-2}$
Roche cristalline fracturée	0,00 - 0,10		$8 \times 10^{-9} - 3 \times 10^{-4}$
Roche cristalline non-fracturée	0,00 - 0,05		$3 \times 10^{-14} - 2 \times 10^{-10}$
Granite altéré	0,34 - 0,57		$3,3 \times 10^{-6} - 5,2 \times 10^{-5}$

Tableau II : Conductivité thermique et capacité thermique volumique de formations géologiques communes (Stauffer *et al.*, 2013 ; VDI, 2010).

Matériau	Conductivité thermique [W m ⁻¹ K ⁻¹]	Capacité thermique volumique [MJ m ⁻³ °K ⁻¹]
Argile, limon, sec	0,4 - 1,0	1,5 - 1,6
Argile, limon saturé	0,9 - 2,3	2,0 - 2,8
Sable, sec	0,3 - 0,8	1,3 - 1,6
Sable, saturé	1,5 - 4,0	2,2 - 2,8
Grave, sec	0,4 - 0,5	1,3 - 1,6
Grave, saturé	1,6 - 2,0	2,2 - 2,6
Argile, siltite	1,1 - 3,5	2,1 - 2,4
Grès	1,3 - 5,1	1,8 - 2,6
Marbre	1,5 - 3,5	2,2 - 2,3
Calcaire	2,5 - 4,0	2,1 - 2,4
Dolomite	2,8 - 4,3	2,1 - 2,4
Granite	2,1 - 4,1	2,1 - 3,0
Bentonite	0,5 - 0,8	environ 3,9

NOMENCLATURE

Symbole	Variable	Unité
b	Épaisseur de l'aquifère	[m]
C	Capacité thermique volumique	[J m ⁻³ °C ⁻¹]
D	Coefficient de dispersion hydrodynamique	[m ² s ⁻¹]
i	Gradient hydraulique	[·]
K	Conductivité hydraulique	[m s ⁻¹]
n	Porosité	[·]
p	Probabilité	[·]
P	Puissance thermique moyenne d'une installation	[W]
Q_p	Débit de l'installation (échangeur ouvert)	[m ³ s ⁻¹]
R	Facteur de retard thermique	[·]
t	Temps	[s]
T_{inj}	Température de l'eau réinjectée	[°C]
T_a	Température du sous-sol à l'état naturel	[°C]
T_p	Température de l'eau prélevée (échangeur ouvert)	[°C]
ΔT_{inj}	Différence de température entre T_{inj} et T_a	[°C]
ΔT	Différence de température entre T et T_a	[°C]
ΔT_{max}	Variation de température maximale	[°C]
va	Vitesse d'écoulement efficace	[m s ⁻¹]
α	Dispersivité	[m]
λ	Conductivité thermique	[W m ⁻¹ °C ⁻¹]
Indices		
w	Eau	
s	Sol	
m	Milieu poreux	
L	Longitudinal	
T	Transversal	

© 2020 - Cerema

Le Cerema, l'expertise publique pour le développement et la cohésion des territoires

Le Cerema est un établissement public qui apporte un appui scientifique et technique renforcé dans l'élaboration, la mise en œuvre et l'évaluation des politiques publiques de l'aménagement et du développement durables. Centre d'études et d'expertise, il a pour vocation de diffuser des connaissances et savoirs scientifiques et techniques ainsi que des solutions innovantes au cœur des projets territoriaux pour améliorer le cadre de vie des citoyens. Alliant à la fois expertise et transversalité, il met à disposition des méthodologies, outils et retours d'expérience auprès de tous les acteurs des territoires : collectivités territoriales, organismes de l'État et partenaires scientifiques, associations et particuliers, bureaux d'études et entreprises.

Coordination-Maquettage : Service éditions Cerema Eau, mer et fleuves

Dépôt légal : Février 2020

ISBN : 978-2-37180-440-1

ISSN : 2276-0164

Prix : Téléchargement gratuit

Illustration couverture ou crédits photos : © Cerema

Editions du Cerema

Cité des mobilités,

25 avenue François Mitterrand

CS 92803

69674 Bron Cedex

Cerema Eau, mer et fleuves

Service Qualité Édition

134 rue de Beauvais

CS 60039

60280 Margny-lès-Compiègne

www.cerema.fr

La collection « Références » du Cerema

Cette collection regroupe l'ensemble des documents de référence portant sur l'état de l'art dans les domaines d'expertise du Cerema (recommandations méthodologiques, règles techniques, savoir-faire...), dans une version stabilisée et validée. Destinée à un public de généralistes et de spécialistes, sa rédaction pédagogique et concrète facilite l'appropriation et l'application des recommandations par le professionnel en situation opérationnelle.

Éviter les interférences des échangeurs géothermiques

Méthodologie pour déterminer le volume d'exploitation d'un gîte géothermique

L'exploitation d'un gîte géothermique d'une puissance inférieure à 20 MW est conditionnée par l'obtention d'un permis d'exploitation. Ce permis accordé par l'autorité administrative confère un droit exclusif d'exploitation dans un volume déterminé dit « volume d'exploitation ».

La présente publication apporte une définition technique à la notion de volume d'exploitation applicable aux échangeurs géothermiques basse ou très basse énergie verticaux, ouverts ou fermés. La définition proposée permet d'éviter que de nouvelles installations altèrent le bon fonctionnement du projet sur la durée du permis sollicité. Cette définition permet également d'optimiser l'extension du volume d'exploitation afin de maintenir l'accessibilité à la ressource géothermique, et donc de favoriser le développement de cette énergie renouvelable.

Finalement, le document présente un cadre méthodologique, en quatre étapes, pour déterminer le volume d'exploitation d'une installation géothermique.

Sur le même thème

Fiches «Impacts des aménagements sur l'eau souterraine urbaine» :

- Fiche n°1-*Revue introductive des impacts des aménagements sur les écoulements la qualité et la température de l'eau souterraine urbaine-Cerema 2018*
- Fiche n°2-*Impact thermique de la géothermie sur eau de nappe-Cerema 2018*
- Fiche n°3-*Impacts des ouvrages souterrains sur les mélanges entre masses d'eau superposées-Cerema 2018*
- Fiche n°4-*Méthodes analytiques et numériques pour quantifier l'impact des installations géothermiques basse énergie sur la température de l'eau souterraine-Cerema 2019*

Aménagement et cohésion des territoires - Ville et stratégies urbaines - Transition énergétique et climat - Environnement et ressources naturelles - Prévention des risques - Bien-être et réduction des nuisances - Mobilité et transport - Infrastructures de transport - Habitat et bâtiment

Prix TTC : téléchargement gratuit

ISSN : 2276-0164

ISBN : 978-2-37180-440-1



9 782371 804401