



**HAL**  
open science

# Évaluation de modèles analytiques pour la détermination préalable de l'impact thermique généré par un système géothermique ouvert

William Pophillat

► **To cite this version:**

William Pophillat. Évaluation de modèles analytiques pour la détermination préalable de l'impact thermique généré par un système géothermique ouvert. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2018. dumas-02474551

**HAL Id: dumas-02474551**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02474551v1>**

Submitted on 11 Feb 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



# Travail de fin d'études

pour le diplôme d'ingénieur de l'École nationale des travaux publics de l'État

---

Année : 2018

Voie d'approfondissement :  
Gestion des cours d'eau,  
des voies navigables et du littoral

**William Pophillat**

**Évaluation de modèles analytiques pour la détermination  
préalable de l'impact thermique généré par un système  
géothermique ouvert**

**Confidentialité levée en 2019**



# Travail de fin d'étude

pour le diplôme d'ingénieur de l'École nationale des travaux publics de l'État

---

Année 2017-2018

Voie d'approfondissement :  
Environnement

Soutenu le 03 Juillet 2018

Devant le jury composé de :

- Président du Jury : Thierry Winiarski
- Tuteur : Guillaume Attard
- Expert : Yvan Rossier

Par

**William Pophillat**

**Evaluation de modèles analytiques pour la  
détermination préalable de l'impact thermique généré  
par un système géothermique ouvert**

**Cerema - Direction territoriale Centre-Est**



# Notice analytique

AUTEUR			
Nom	Pophillat		
Prénom	William		
ORGANISME D'ACCUEIL			
Nom de l'organisme et Localité	Cerema - Direction territoriale Centre-Est - Département Environnement Territoire Climat - 46 rue Saint-Théobald 38081 L'Isle d'Abeau		
Nom du Tuteur	Guillaume Attard		
ANALYSE DU TFE			
Titre (français)	Evaluation de modèles analytiques pour la détermination préalable de l'impact thermique généré par un système géothermique ouvert		
Titre (anglais)	Analytical model evaluation for the first-tier assessment of the thermal impact due to shallow open-loop geothermal systems		
Résumé (français)	<p>L'installation de systèmes géothermiques ouverts s'est fortement développée ces dernières années. La densité des installations dans certains secteurs conduit à des interactions thermiques entre installations. La planification de ce développement nécessite des outils opérationnels permettant de quantifier facilement l'extension du panache thermique généré par ces installations. L'objectif du présent travail est d'étudier la validité de trois modèles analytiques permettant d'estimer simplement ce panache thermique au sein de différents contextes hydrogéologiques. Pour ce faire, les résultats issus des modèles analytiques sont comparés à ceux obtenus par des simulations numériques plus réalistes, mais également plus complexes et coûteuses à mettre en œuvre. Cette comparaison démontre la pertinence des modèles analytiques pour une évaluation préalable de l'impact thermique des systèmes ouverts.</p>		
Résumé (anglais)	<p>Installation of open-loop geothermal systems shows a recurrent increase in many countries. Therefore, in some areas, dense installations are expected which may lead to thermal interactions between units. The legal regulation for licensing open-loop systems needs methods for the evaluation of the thermal impact due to these systems. In this work, three analytical solutions are evaluated for predictions of the thermal impacted area due to an open-loop system under various hydrogeological conditions. Analytical results are then compared with results coming from numerical models, which are more realistic but also more complex, time-consuming and costly. The results demonstrate that the analytical solutions can constitute an effective and straightforward method for impact assessment of open-loop systems.</p>		
Mots-clés	Géothermie - Impact thermique - Modélisation numérique - Solution analytique - Aquifère		
Mots-clés	Shallow geothermal energy - Thermal impact - Numerical modelling - Analytical solution - Aquifer		
Termes géographiques	France		
COLLATION			
	Nb de pages	Nb d'annexes (nb de pages)	Nb de réf. biblio.
	41	1	56

# Sommaire

---

Notice analytique.....	3
Sommaire.....	4
Liste des illustrations et tableaux.....	5
Liste des symboles utilisés .....	6
Remerciements .....	7
Introduction.....	8
1. Contexte, enjeux et objectifs .....	9
1.1. Le développement des systèmes géothermiques ouverts en milieu urbain .....	9
1.2. Le besoin de planifier ce développement pour limiter les impacts.....	11
1.3. Le besoin d'outils opérationnels pour estimer les impacts .....	13
1.4. Conclusion de la partie et objectifs du travail de fin d'étude .....	16
2. Matériels et méthodes .....	17
2.1. Démarche générale.....	17
2.2. Modèles analytiques .....	18
2.3. Scénarios de comparaison.....	23
2.4. Modèles numériques.....	24
2.5. Méthode de comparaison.....	28
3. Résultats et discussion .....	29
3.1. Scénario 1 : écoulement naturel nul.....	32
3.2. Scénario 2 : écoulement naturel modéré .....	32
3.3. Scénario 3 : écoulement naturel fort.....	34
3.4. Discussion.....	35
Conclusion .....	36
Bibliographie .....	38
Annexe.....	41

# Liste des illustrations et tableaux

---

Figure 1 : Représentation schématique des systèmes fermés et ouverts.....	10
Figure 2 : Sources de chaleur urbaine susceptibles d'affecter le champ de température des aquifères souterrains (Menberg et al. 2013) .....	11
Figure 3 : Vue en plan schématique du panache thermique (isotherme $\Delta 1K$ ) généré par une même injection. a) Absence d'écoulement : impact circulaire. b) Présence d'un écoulement : élongation du panache dans la direction de l'écoulement, de la gauche vers la droite. ....	13
Figure 4 : Résultat d'une modélisation numérique d'impacts cumulés (Umweltministerium Baden Württemberg, 2009).....	13
Figure 5 : Estimation de l'impact d'un ouvrage par utilisation d'une solution analytique. Les isothermes représentent différentes variations de température par rapport à l'état naturel .....	14
Figure 6 : Représentations schématiques des trois modèles analytiques .....	19
Figure 7 : Modélisation numérique d'une même injection dans un écoulement fort (image de gauche) et modéré (image de droite). Dans les deux cas, l'écoulement se fait de la gauche vers la droite. Les surfaces bleues représentent les zones d'influence hydraulique du puits.....	21
Figure 8 : Géométrie des modèles et conditions aux limites de l'écoulement. Le puits d'injection est représenté par un carré noir (a et b) ou un rectangle noir (c). (a) Vue du dessus schématique du modèle radial (2D et 3D). (b) Vue du dessus schématique des modèles advectifs (2D et 3D). (c) Coupe schématique des modèles tridimensionnels. ....	25
Figure 9 : Vue en plan des panaches calculés par les modèles analytiques et numériques (2D et 3 D) pour les trois scénarios et leurs variantes. Les points noirs symbolisent les puits d'injection.....	30
Figure 10 : Répartition spatiale de l'erreur relative (en %) entre résultats analytiques et numériques 3D. Les panaches calculés numériquement sont présentés en pointillés. Les zones où la valeur absolue de l'erreur relative sur la température est inférieure à 10 % sont représentées en blanc. Les points noirs symbolisent les puits d'injection.....	31
Figure 11 : Répartition de l'énergie injectée dans les modèles numériques tridimensionnels entre énergie stockée dans l'aquifère, dans les couches supérieure et inférieure et sortant du domaine .....	41
Tableau 1 : Solutions analytiques au problème d'injection d'un fluide chaud/froid (d'après Stauffer et al. 2013) .....	15
Tableau 2 : Modèles utilisés pour les modélisations analytiques de l'injection de fluide chaud/froid dans un milieu poreux saturé.....	18
Tableau 3 : Synthèse des scénarios et variantes considérés. Les modèles analytiques correspondant à chaque cas sont indiqués.....	24
Tableau 4 : Synthèse des conditions aux limites utilisées en fonction des scénarios et variantes. Lorsqu'aucune condition n'est indiquée, la condition par défaut (flux nul) de FEFLOW est appliquée. (Var.= Variante) .....	26
Tableau 5 : Paramètres hydrogéologiques et thermiques utilisés pour les modélisations analytiques et numériques. (Var. = variante) .....	27
Tableau 6 : Qualificatifs employés pour décrire la qualité des résultats analytiques.....	28
Tableau 7 : Erreur relative entre résultats analytiques et numériques sur la longueur (ER <sub>L</sub> ) et la largeur (ER <sub>I</sub> ) du panache. Les valeurs sont en pourcentage. ....	29
Tableau 8 : Synthèse de l'applicabilité en fonction du contexte d'exploitation des modèles analytiques pour une détermination préalable de l'impact thermique généré par le fonctionnement d'un système ouvert durant une saison (120 jours).....	37

# Liste des symboles utilisés

---

<b>Symbole</b>	<b>Variable</b>	<b>Unité</b>
$A_T$	Vitesse retardée pour un écoulement radial	[m s <sup>-1</sup> ]
$b$	Épaisseur de l'aquifère	[m]
$C$	Capacité thermique volumique	[J Kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$D$	Dispersion hydrodynamique	[m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]
$F_o$	Énergie thermique injectée par unité de longueur du puits	[W m <sup>-1</sup> ]
$K$	Conductivité hydraulique	[m s <sup>-1</sup> ]
$n$	Porosité	[-]
$q_h$	Énergie thermique injectée	[W]
$Q_{inj}$	Débit d'injection	[m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
$r$	Distance radiale au puits d'injection	[m]
$r^*$	Position du front thermique	[m]
$R$	Facteur de retard thermique	[-]
$t$	Temps	[s]
$T$	Température	[K]
$T_{inj}$	Température de l'eau injectée	[K]
$T_u$	Température initiale de l'aquifère	[K]
$\Delta T_{inj}$	Différence de température entre $T_{inj}$ and $T_u$	[K]
$\Delta T$	Différence de température entre $T$ and $T_u$	[K]
$\Delta T_o$	Différence de température au niveau du puits	[K]
$v_a$	Vitesse d'infiltration	[m s <sup>-1</sup> ]
$x,y,z$	Coordonnées spatiales	[m]
$Y$	Dimension de la source plane (suivant y)	[m]
$Y_o$	Largeur du panache en régime permanent au droit du puits	[m]
$Y_{max}$	Largeur du panache en régime permanent	[m]
$\alpha$	Dispersivité	[m]
$\lambda$	Conductivité thermique	[W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$\rho$	Masse volumique	[kg m <sup>-3</sup> ]

## Indices

$w$	Eau
$s$	Sol
$m$	Milieu poreux (sol + eau)
$L$	Longitudinal
$T$	Transversal

# Remerciements

---

Je tiens par ces quelques mots à adresser mes plus sincères remerciements aux personnes ayant concouru, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Je remercie en particulier mon maitre de stage, monsieur Guillaume Attard, pour son soutien quotidien, pour la motivation qu'il a su m'insuffler et pour la bonne humeur dans laquelle se sont déroulées, grâce à lui, les différentes parties de ce travail.

Je voudrais ensuite remercier messieurs Philipp Blum (Institut Technologique de Karlsruhe, Allemagne) et Peter Bayer (Université d'Ingolstadt, Allemagne) pour leurs contributions toujours justes et efficaces à ce travail ainsi que monsieur Laurent Eisenlohr pour ses conseils et sa capacité à trancher lorsque cela s'avère nécessaire.

Les autres membres de l'unité DSPES méritent également des remerciements pour m'avoir supporté au quotidien : Agathe Denot et ses paniers de légumes, Lydie Waterkeyn et sa gentillesse communicative, Laurent Vernay et son bonne humeur contagieuse, Davide Palminteri et ses détente musicales et enfin Florian Piel, dit « Pilou », et sa capacité hors du commun à faire oublier les difficultés du quotidien.

Je tiens enfin à remercier ma compagne Anastasia et ma fille Noélie pour m'avoir soutenu au quotidien et avoir accepté que parfois ce travail empiète sur leurs moments.

# Introduction

---

Les zones urbaines regroupent actuellement la moitié des habitants de la planète. En 2050, elles accueilleront 2,5 milliards d'habitants supplémentaires, réunissant ainsi deux tiers de la population mondiale (United Nations, 2014). Associée à une densification du tissu urbain, cette explosion démographique implique une forte concentration spatiale de besoins, notamment en eau et en énergie.

Le sous-sol urbain, en ce qu'il constitue un important réservoir d'eau potable et d'énergie thermique, revêt un intérêt particulier dans le développement futur de ces territoires. En particulier, le potentiel énergétique des aquifères superficiels urbains représente une importante source d'énergie renouvelable qu'il convient de considérer pour l'atteinte des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre (Bayer et al. 2012 ; Kammen et Sunter, 2016).

Les systèmes géothermiques ouverts exploitant la chaleur des nappes superficielles sont particulièrement adaptés au milieu urbain. En effet, ils nécessitent une faible emprise foncière, ont un fort rendement énergétique et sont à même de répondre aux besoins en chauffage ou en refroidissement aussi bien d'habitations individuelles que de résidentiel collectif, d'immeubles tertiaires, de commerces ou d'industries. Ces avantages, associés à un contexte politique incitatif, contribuent au fort développement de telles installations. Pourtant, en échangeant des calories avec le sous-sol et l'eau qu'il contient, ces systèmes modifient le champ de température des aquifères. Les impacts thermiques ainsi générés sont susceptibles de nuire, d'une part, à la qualité de la ressource en eau et, d'autre part, aux performances et à la durée de vie des installations géothermiques voisines (Stauffer et al. 2013).

Afin de préserver les ressources en eau et en énergie et de permettre leur exploitation sans compromettre les usages actuels et futurs, il est nécessaire de mettre en œuvre une planification adaptée du développement de ces systèmes. De telles politiques impliquent d'être en mesure de déterminer l'impact thermique généré par une installation. Pour ce faire, les solutions analytiques constituent des outils simples, rapides et peu coûteux, fournissant des résultats adaptés à l'évaluation préalable de l'impact thermique généré par un système ouvert. Toutefois, les quelques solutions existantes n'ont fait l'objet que de peu de travaux et il convient de préciser leur validité dans des contextes d'exploitations habituels.

Le présent travail s'insère dans ce cadre. Il vise à évaluer la pertinence de l'utilisation de solutions analytiques comme outils opérationnels d'évaluation préalable de l'impact thermique généré par un système ouvert.

Après une présentation détaillée du contexte, des enjeux et des objectifs de l'étude, ce rapport se poursuit par la présentation de la méthodologie employée puis par celle des résultats obtenus.

# 1. Contexte, enjeux et objectifs

L'objectif de cette partie est de situer plus précisément le sujet de ce travail de fin d'étude au sein du contexte dans lequel il s'insère et des enjeux qui y sont liés. Elle débute par une présentation des caractéristiques de l'exploitation de l'énergie géothermique en milieu urbain. Elle se poursuit par un aperçu des enjeux liés à la planification du développement de ces installations puis des méthodes permettant d'étudier leurs impacts. Enfin, les objectifs du travail sont précisés et replacés au sein de ces éléments.

## 1.1. Le développement des systèmes géothermiques ouverts en milieu urbain

D'ici à 2030, la France s'est engagée à diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre par rapport à leur niveau de 1990. A ce même horizon, la part des énergies renouvelables dans la consommation finale brute d'énergie devra être portée à 32 % (Loi de transition énergétique, 2015).

Les zones urbaines ont une importance particulière pour l'atteinte de cet objectif. En effet, les 41 plus grandes aires urbaines françaises concentrent 70 % de la population du pays (Brunel, 2011). Sur trente ans, la hausse de la population urbaine a été de 23 % dont 80 % au sein des agglomérations de plus de 400 000 habitants (INSEE, 2016). Cet accroissement démographique urbain est par ailleurs corrélé à la densification du peuplement et du tissu urbain. Il s'ensuit que ces zones concentrent des besoins importants en énergie au sein d'un espace caractérisé par une faible disponibilité foncière.

Les zones urbaines se sont par ailleurs fréquemment développées tout ou en partie au droit d'aquifères<sup>1</sup> productifs. Les nappes urbaines contribuent ainsi à 40 % de l'approvisionnement en eau potable européenne (Eiswirth et al. 2004). De plus, par la chaleur qu'ils contiennent, ces aquifères urbains constituent une importante ressource énergétique à faible empreinte carbone (Bayer et al. 2012), disponible directement au droit du besoin.

La chaleur contenue dans le globe terrestre et ses fluides internes est appelée énergie géothermique (Clauser, 2006). Bien qu'en présence de ressources géothermiques à haute énergie il soit possible de produire de l'électricité, les systèmes adaptés au milieu urbain se focalisent sur une utilisation directe de la chaleur extraite.

Les installations les plus fréquentes exploitent la chaleur contenue dans les couches supérieures du sous-sol, généralement dans les cent premiers mètres (Rybach, 2003), à l'aide de pompes à chaleur<sup>2</sup> (PAC). On parle alors de géothermie à très basse énergie ou encore de géothermie de proche surface. Par rapport au total des exploitations géothermiques à usage direct de la chaleur, ce type de systèmes représentait 70,9 % de

---

<sup>1</sup> Un aquifère est une formation hydrogéologique perméable permettant l'écoulement significatif d'une nappe d'eau souterraine et le captage de quantités d'eau appréciables, par des moyens économiques (Castany, 1982).

<sup>2</sup> Une pompe à chaleur (PAC) est une machine thermodynamique permettant de transférer de l'énergie d'un corps froid vers un corps chaud par utilisation d'une source externe d'énergie. Les PAC peuvent être utilisées pour le chauffage, le refroidissement et être réversibles.

la capacité totale installée au niveau mondial en 2015 (Lund et al. 2015). De plus, le nombre de ces systèmes a triplé entre 2005 et 2015 (Lund et al. 2015). La France se classe en cinquième position du classement des pays en fonction de la puissance totale installée (Lund et al. 2015). La puissance moyenne des installations y est de 12,33 kW (Lund et al. 2015), ce qui traduit la prépondérance d'installations de petite taille, associées à des besoins énergétiques résidentiels.

Suivant la puissance de l'installation, ces systèmes permettent de subvenir aux besoins en chauffage ou refroidissement d'habitations individuelles, de bâtiments collectifs, tertiaires, d'industries ou de commerces.

L'échange de chaleur entre la pompe à chaleur et la ressource peut se faire à l'aide d'une boucle fermée (Figure 1). Un tube dans lequel circule un fluide caloporteur est alors plongé dans la ressource géothermique. De tels systèmes n'échangent donc que de l'énergie avec le milieu.

A contrario, les systèmes utilisant une boucle ouverte (Figure 1) échangent énergie et matière avec le milieu. Ils fonctionnent en effet en pompant l'eau souterraine pour l'amener directement à la PAC, où les calories sont échangées. L'eau est ensuite réinjectée dans l'aquifère d'origine. Lorsque le système fonctionne en mode « chauffage », les calories sont prélevées dans l'eau qui par cette action se refroidit. Sa réinjection au sein de l'aquifère génère alors un front froid. Lorsque le système fonctionne en mode « refroidissement », le cycle thermodynamique est inversé. Les calories sont apportées à l'eau prélevée qui se réchauffe. La réinjection dans l'aquifère génère alors un front chaud.

Dans la suite de ce rapport, il sera fait usage pour désigner ces deux types d'installations des appellations « systèmes fermés » et « systèmes ouverts » sans que ne soient mentionnés ni le caractère superficiel de la ressource ni l'utilisation d'une pompe à chaleur.

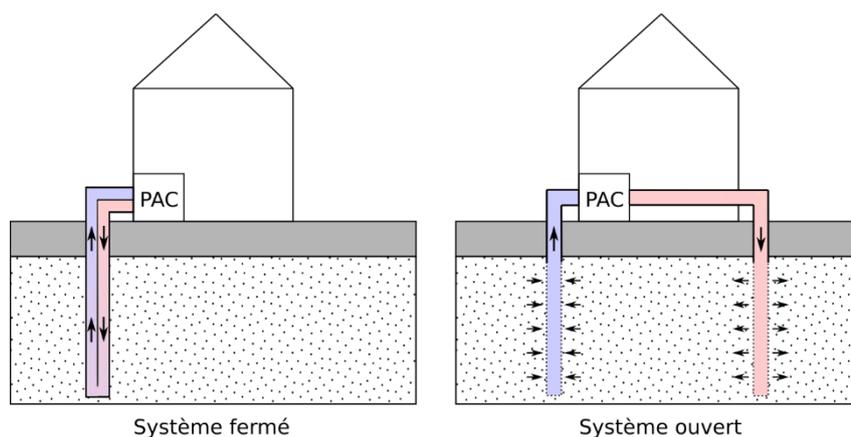


Figure 1 : Représentation schématique des systèmes fermés et ouverts

Si les systèmes fermés peuvent théoriquement être installés dans tous types de sols, l'installation de systèmes ouverts requiert un contexte hydrogéologique favorable, du point de vue de la qualité de l'eau (notamment pour éviter les phénomènes d'encrassement ou de corrosion) et de la possibilité de prélever un débit suffisant (tant d'un point de vue technique que réglementaire).

Lorsque ces conditions sont réunies, ce qui est le cas dans de nombreux secteurs urbains, les systèmes ouverts sont susceptibles de fournir des rendements supérieurs aux systèmes fermés (Adbeen, 2008 ; Rafferty, 1998) et nécessitent une emprise spatiale plus faible. De plus, bien que les besoins de maintenance soient plus importants (Abdeen, 2008), les coûts d'installation sont généralement plus faibles que ceux d'un système fermé de même puissance (Adbeen, 2008 ; Rafferty, 2009).

## 1.2. Le besoin de planifier ce développement pour limiter les impacts

De par les avantages qu'ils présentent, les systèmes ouverts sont amenés à continuer leur multiplication en milieu urbain. Pourtant, comme présenté dans la partie précédente, ces installations génèrent par leur fonctionnement des fronts froids ou chauds et modifient donc le champ de température des aquifères souterrains. Les impacts individuels des systèmes géothermiques doivent par ailleurs être considérés dans un ensemble plus large de pollutions thermiques des aquifères urbains. Ils s'ajoutent en effet aux impacts des systèmes avoisinants et à ceux des autres sources de chaleur urbaine (surface urbaine, sous-sols des bâtiments, tunnels, ...) comme le présente la Figure 2.

Différents travaux se sont intéressés aux impacts cumulés de ces sources et ont démontré l'existence d'un phénomène d'îlots de chaleur sur les aquifères urbains. Epting et al. (2013) ont par exemple mis en évidence une élévation locale de 8°C de la température du sous-sol de la ville de Basel en centre-ville par rapport à la périphérie. Menberg et al. (2013) ont quant à eux observé dans six villes allemandes (Berlin, Munich, Cologne, Francfort, Karlsruhe et Darmstadt) une température en centre-ville dépassant de 3 à 7 °C celle des zones rurales alentours.

Ces modifications du champ de température sont tout d'abord susceptibles d'altérer la qualité de la ressource en eau en modifiant le contexte chimique et microbiologique (Stauffer et al. 2013). Elles sont ensuite de nature à nuire aux performances et à la durabilité des systèmes géothermiques (Hein et al. 2016a, 2016b).

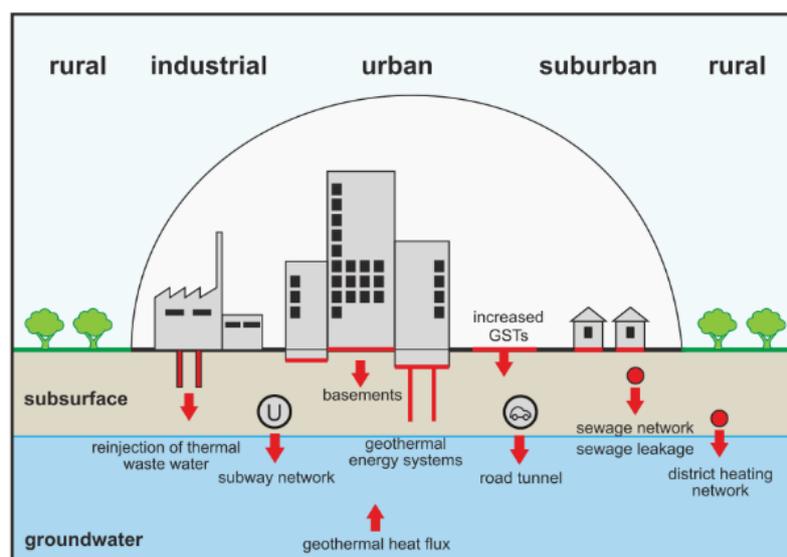


Figure 2 : Sources de chaleur urbaine susceptibles d'affecter le champ de température des aquifères souterrains (Menberg et al. 2013)

Lorsque la température de l'eau arrivant au puits de prélèvement d'un système ouvert est modifiée, les performances de l'installation sont altérées. Ainsi, si un système ouvert nouvellement installé génère un panache thermique atteignant un système existant, les performances et la durée de vie du système impacté sont altérées. La multiplication des systèmes ouverts en milieu urbain est donc susceptible de conduire à une densité critique d'installation dans certains secteurs.

Afin de permettre un développement optimal de l'exploitation de la ressource géothermique de proche surface sans compromettre le fonctionnement des installations existantes, il apparaît nécessaire de mettre en œuvre une politique de gestion du développement de ces installations.

Haehnlein et al. (2010a) ont publié une revue internationale des législations relatives à ces systèmes. Les auteurs mettent en évidence, d'une part, le faible nombre d'Etats actuellement dotés d'une réglementation spécifique et, d'autre part, les disparités entre les réglementations existantes. Les réglementations étudiées dans cette revue se basent principalement sur deux grandeurs : un changement maximal de température par rapport à l'état naturel et une distance minimale entre l'ouvrage et un autre élément urbain. Suivant le pays, le changement maximal de température admissible varie de 3 °C en Suisse (à 100 m en aval de l'ouvrage) à 11 °C en France. Les distances minimales imposées varient quant à elles, tant dans les valeurs (de 5 m à 300 m), que dans les éléments auxquels elles se réfèrent (distance entre l'ouvrage et les limites de propriété, les ouvrages géothermiques, bâtiments, réseaux ou captages d'alimentation en eaux potables adjacents).

Par ailleurs, les auteurs soulignent que ces distances sont le plus souvent définies de manière empirique sans qu'une justification scientifique ne soit apportée. De plus, elles sont généralement fixes sur le secteur couvert et règlementent de la même manière des situations potentiellement très différentes du point de vue du contexte hydrogéologique et de l'usage géothermique, et donc des impacts possibles.

En effet, un élément contribuant à la complexité de cette planification est que l'extension et la forme de l'impact dépendent fortement du contexte d'exploitation. Dans un aquifère homogène et sans écoulement, l'impact généré par un ouvrage est parfaitement circulaire. La présence d'un écoulement dans l'aquifère provoque une élongation de l'impact dans la direction de l'écoulement (Figure 3).

De manière plus générale, la forme et l'extension de l'impact sont conditionnées d'une part par la temporalité du fonctionnement de l'installation (Sciacovelli et al. 2014) et, d'autre part, par les caractéristiques hydrogéologiques et thermiques du milieu (Lo Russo et al. 2012).

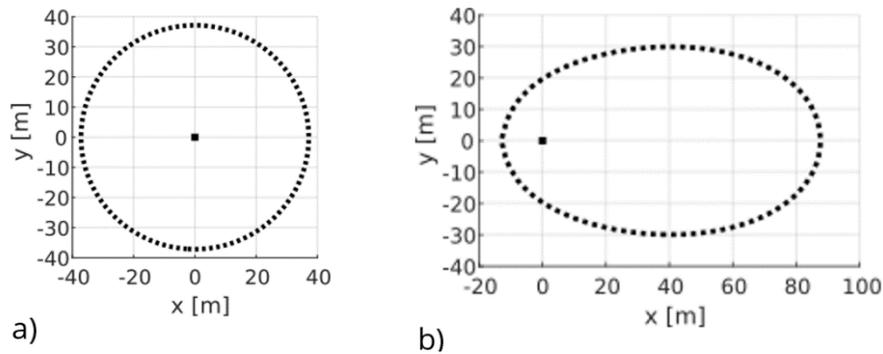


Figure 3 : Vue en plan schématique du panache thermique (isotherme  $\Delta 1K$ ) généré par une même injection. a) Absence d'écoulement : impact circulaire. b) Présence d'un écoulement : élongation du panache dans la direction de l'écoulement, de la gauche vers la droite.

### 1.3. Le besoin d'outils opérationnels pour estimer les impacts

La mise en place d'une stratégie de gestion adaptée des systèmes ouverts en milieu urbain nécessite ainsi de disposer d'outils permettant de déterminer l'impact thermique en fonction du contexte d'exploitation.

Cette évaluation peut tout d'abord être réalisée par modélisation numérique. Cette méthode est la plus adaptée pour déterminer précisément les impacts, en particulier en cas de contextes complexes (milieu fortement hétérogène, conditions d'exploitation fortement variables, ...). Par contre, d'un point de vue opérationnel, les modèles numériques sont coûteux, tant en temps qu'en argent, et complexes d'utilisation.

La Figure 4 présente un résultat de modélisation numérique d'impacts thermiques cumulés.

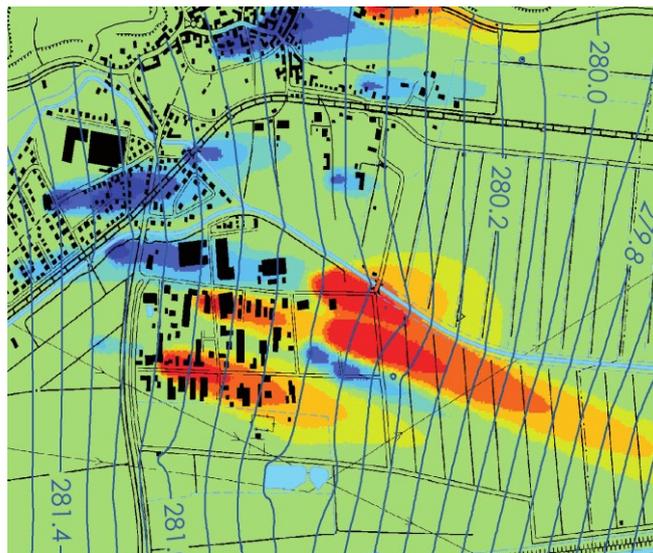


Figure 4 : Résultat d'une modélisation numérique d'impacts cumulés (Umweltministerium Baden Württemberg, 2009)

Des méthodes simplifiées, destinées à une évaluation préalable de l'impact généré par un ouvrage, constitueraient alors des outils opérationnels complémentaires pour une gestion plus efficace des installations. La Figure 5 présente l'estimation du panache thermique généré par un système ouvert réalisée à l'aide d'une telle méthode, ici une solution analytique<sup>3</sup>. Toutefois, il n'existe que peu de méthodes simplifiées de ce type et leur domaine de validité ne permet a priori pas une utilisation adaptée à tous les contextes classiques d'exploitation.

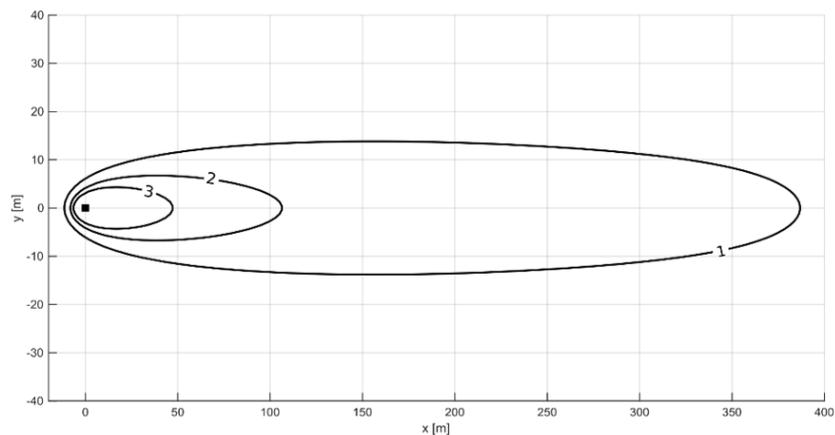


Figure 5 : Estimation de l'impact d'un ouvrage par utilisation d'une solution analytique. Les isothermes représentent différentes variations de température par rapport à l'état naturel

Rauch (1992) a proposé une méthode d'estimation de l'impact thermique en régime permanent basée sur les angles de fluctuation des lignes de courants. Cette méthode fournit une estimation bidimensionnelle de l'impact basée non pas sur une solution analytique mais sur des caractéristiques géométriques de l'écoulement. Elle n'est valable qu'en cas de panache thermique fin et ne permet pas de déterminer sa longueur. Cette méthode a été utilisée pour déterminer le potentiel de conflit entre les systèmes ouverts prévus dans la ville de Linz en Autriche (Krakow et al. 2016).

Des solutions analytiques reposant sur les lignes de courant ont ensuite été utilisées par Banks (2011) et Galgaro et Cueltra (2013) pour estimer les interactions entre les puits de pompage et d'injection d'un système ouvert en régime permanent. Ces solutions ne tiennent pas compte des phénomènes de dispersion et diffusion thermique. La comparaison avec des simulations numériques a révélé que de telles solutions surestiment considérablement la longueur du panache thermique et, dans la plupart des cas, sa largeur (Piga et al. 2017).

Les méthodes présentées ci-dessus ne permettent d'estimer l'impact qu'en régime permanent. Il n'existe actuellement qu'un nombre limité de solution analytique à ce problème en régime transitoire. Ces dernières ont été recensées par Stauffer et al. (2013) et sont listées dans le tableau 2. Elles considèrent toutes un aquifère captif homogène

---

<sup>3</sup> Une solution analytique est une formulation mathématique explicite dérivant des équations physiques décrivant le problème

d'épaisseur constante. Le tableau présente également les principales hypothèses simplificatrices de ces solutions concernant l'écoulement naturel, celui émis par l'injection de liquide, la conduction dans l'aquifère et dans les couches sus/sous-jacentes imperméables et les conditions aux limites supérieures.

Source	Type d'écoulement			Conduction de chaleur dans l'aquifère		Conduction de chaleur dans les couches adjacentes		Prise en compte d'un écoulement naturel
	Linéaire	Radial	Arbitraire	Linéaire	Radiale	Sous	Sus	
Lauwerier (1955)	X					inf	inf	Non
Malofeev (1960)		X				inf	inf	Non
Avdonin (1964)	X			X		inf	inf	Non
Avdonin (1964)		X			X	inf	inf	Non
Guimerà et al. (2007)		X			X	-	-	Non
Chen et Reddell (1983)		X			X	inf	inf	Non
Voigt and Haefner (1987)		X			X	fin	inf	Non
Güven et al. (1983)		X			X	fin	inf	Non
Yang et Yeh (2008)		X				fin	fin	Non
Gringarten et Sauty (1975)			X			inf	inf	Oui

Tableau 1 : Solutions analytiques au problème d'injection d'un fluide chaud/froid (d'après Stauffer et al. 2013)

Au-delà des différences dans la prise en compte des phénomènes de conduction thermique à travers les couches inférieure et supérieure, le tableau 2 met en évidence le fait que seul le cas d'une injection dans un aquifère à débit naturel nul est globalement bien décrit par des solutions analytiques. Seule la solution proposée par Gringarten et Sauty (1975) tient compte d'un écoulement naturel dans l'aquifère. Cependant, elle considère un régime hydraulique permanent et impose, pour déterminer le champ de température bidimensionnel, de connaître le champ de vitesse puis de traiter indépendamment chaque tube de courant.

En l'absence d'une solution analytique permettant de calculer directement le champ de température généré par le puits d'injection en régime transitoire, une approximation peut être réalisée en considérant les solutions analytiques propres aux systèmes fermés les plus proches du problème étudié (Stauffer et al. 2013). Ces solutions sont adaptées au problème étudié en remplaçant le flux linéique de chaleur injecté par le système fermé  $q_l$  ( $W m^{-1}$ ) dans la solution initiale par un flux calculé sur la base du débit injecté  $Q_{inj}$  ( $m^3 s^{-1}$ ) et de la différence de température injectée  $\Delta T_{inj}$  (K). Un tel raisonnement a par exemple été utilisé pour déterminer l'équation utilisée comme outil règlementaire pour l'installation, le dimensionnement et la gestion des systèmes ouverts par le Land allemand du Bade-Wurtemberg (Umweltministerium Baden-Württemberg, 2009). Cette équation, détaillée dans la seconde partie du rapport, résulte en effet d'une adaptation de la

solution analytique relative au problème d'une source linéaire infinie de chaleur dans un milieu poreux anisotrope avec écoulement (Stauffer et al. 2013).

La principale limite d'une telle approximation est de ne pas considérer l'écoulement généré par le puits d'injection. Il convient dès lors d'accorder une importance particulière au domaine d'application de ces formules. Par exemple, l'équation utilisée par le Land allemand du Bade-Wurtemberg est assortie dans le guide dédié de recommandations précisant ce domaine d'application : faible débit d'injection, usage inférieur à 45 000 kWh par an et vitesse d'infiltration inférieure à  $1 \text{ m j}^{-1}$  (Umweltministerium Baden-Württemberg, 2009).

De manière générale, l'ensemble des solutions analytiques ont été obtenues moyennant des hypothèses simplificatrices fortes au problème d'écoulement et de transport de chaleur en milieu poreux. Les milieux naturels réels s'écartent toujours de manière plus ou moins importante de ces conditions idéales. Pour un usage opérationnel, il convient donc de préciser clairement, à l'instar du guide allemand, la validité et les limites de ces solutions analytiques dans des contextes d'exploitation réels.

#### **1.4. Conclusion de la partie et objectifs du travail de fin d'étude**

Le contexte politique et les avantages des systèmes géothermiques ouverts de proche surface leur confèrent un fort potentiel de développement en milieux urbains. Ces systèmes génèrent toutefois des impacts thermiques susceptibles de perturber le fonctionnement des ouvrages géothermiques avoisinants. Il convient dès lors de mettre en œuvre des stratégies de gestion du développement de ces installations. La mise en œuvre de telles stratégies nécessite de disposer d'outils opérationnels permettant de quantifier les impacts.

La détermination des impacts thermiques générés par les ouvrages géothermiques à très faible enthalpie sur eau de nappe s'appuie prioritairement sur des modélisations déterministes. Si les méthodes numériques restent indispensables dans de nombreux cas, la mise en place de politiques de gestion adaptées serait facilitée par l'existence de formulations mathématiques permettant de quantifier simplement l'impact d'un ouvrage donné dans un contexte hydrogéologique donné.

Les solutions analytiques au problème d'injection d'un fluide chaud/froid dans un milieu poreux où s'écoule naturellement un fluide ne couvrent actuellement que des cas très spécifiques et peu représentatifs de la variabilité des situations réelles. En l'absence de solutions pour des cas plus généraux, des solutions provenant d'autres champs peuvent être utilisées moyennant des adaptations. Il convient dès lors de déterminer précisément le domaine d'application de ces solutions.

L'objectif du présent travail de fin d'étude est de préciser dans quelle mesure des solutions analytiques peuvent être utilisées comme outils opérationnels pour estimer l'impact thermique généré par un système ouvert. Plus précisément, il s'agit d'évaluer la qualité des résultats fournis par ces solutions analytiques pour différents contextes hydrogéologiques habituels et différentes puissances de systèmes ouverts caractéristiques d'usages résidentiels.

## 2. Matériels et méthodes

Cette partie présente la méthode employée pour répondre à cet objectif. Pour ce faire, les sections suivantes détaillent la démarche générale, les modèles analytiques considérés, les scénarios d'exploitation définis, les modèles numériques utilisés pour cette comparaison ainsi que la méthode de comparaison des résultats.

### 2.1. Démarche générale

Trois modèles analytiques permettant d'estimer l'impact thermique généré par un système ouvert sont sélectionnés.

Trois scénarios représentant des contextes hydrogéologiques communs sont définis. Pour chacun de ces scénarios, trois variantes sont définies afin de représenter différentes puissances de systèmes ouverts représentatives d'usages domestiques.

Des modèles numériques sont construits afin de constituer les résultats de référence pour estimer la qualité des résultats analytiques. Deux types de modèles numériques sont utilisés :

- *Des modèles numériques bidimensionnels* : ces modèles simples sont proches du domaine de validité des solutions analytiques. En particulier, ils ne tiennent pas compte des transferts thermiques dans d'éventuelles couches supérieures ou inférieures. Leur vocation est avant tout d'étudier la validité des hypothèses conceptuelles sur lesquelles se basent les solutions analytiques. Au-delà de cette évaluation, les modèles 2D représentent des contextes hydrogéologiques dans lesquels les transferts thermiques vers les couches sous et sus-jacentes peuvent être négligés (aquifère de forte épaisseur par exemple).
- *Des modèles numériques tridimensionnels* : ces modèles visent à représenter plus fidèlement le fonctionnement hydrogéologique et thermique des aquifères modélisés. En particulier, ils permettent d'évaluer l'influence des transferts thermiques verticaux.

Chacune des combinaison scénario/variante est ensuite simulée analytiquement et numériquement. Les résultats sont comparés sur la base d'un calcul d'erreur relative sur l'extension du panache thermique et les températures locales.

## 2.2. Modèles analytiques

Trois modèles analytiques sont évalués (Tableau 1 et Figure 6) : (1) un modèle radial, (2) un modèle advectif plan et (3) un modèle linéaire. Ils fournissent une estimation bidimensionnelle du champ de température généré par un système ouvert.

Ces modèles analytiques considèrent tous une injection constante d'un flux de chaleur sur toute l'épaisseur d'un aquifère homogène, isotrope et captif. Il s'agit donc de simplifications du problème de transport de chaleur en milieu poreux. En particulier, aucun de ces modèles ne tient compte des phénomènes de transports verticaux de chaleur dans les couches sous et sus-jacentes.

Le domaine d'application de ces modèles varie en fonction de la vitesse de l'écoulement au sein de l'aquifère. Ils sont succinctement présentés par le Tableau 2 et détaillés dans les sections suivantes.

Type de problème	Dénomination du modèle analytique	Observations
Écoulement naturel nul : Vitesse d'infiltration de 0 m/j	Modèle Radial (MR)	2D, régime transitoire, modèle de la source ponctuelle, injection continue, écoulement radial dû à l'injection de fluide, pas d'écoulement naturel
Écoulement naturel fort : Vitesse d'infiltration de 10 m/j	Modèle Advectif Linéaire (MAL)	2D, régime transitoire, modèle de la source plane, injection continue, écoulement naturel
Écoulement naturel modéré : Vitesse d'infiltration de 1 m/j	Modèle Advectif Plan (MAP)	2D, régime transitoire, modèle de la source linéaire, injection continue, écoulement naturel

Tableau 2 : Modèles utilisés pour les modélisations analytiques de l'injection de fluide chaud/froid dans un milieu poreux saturé

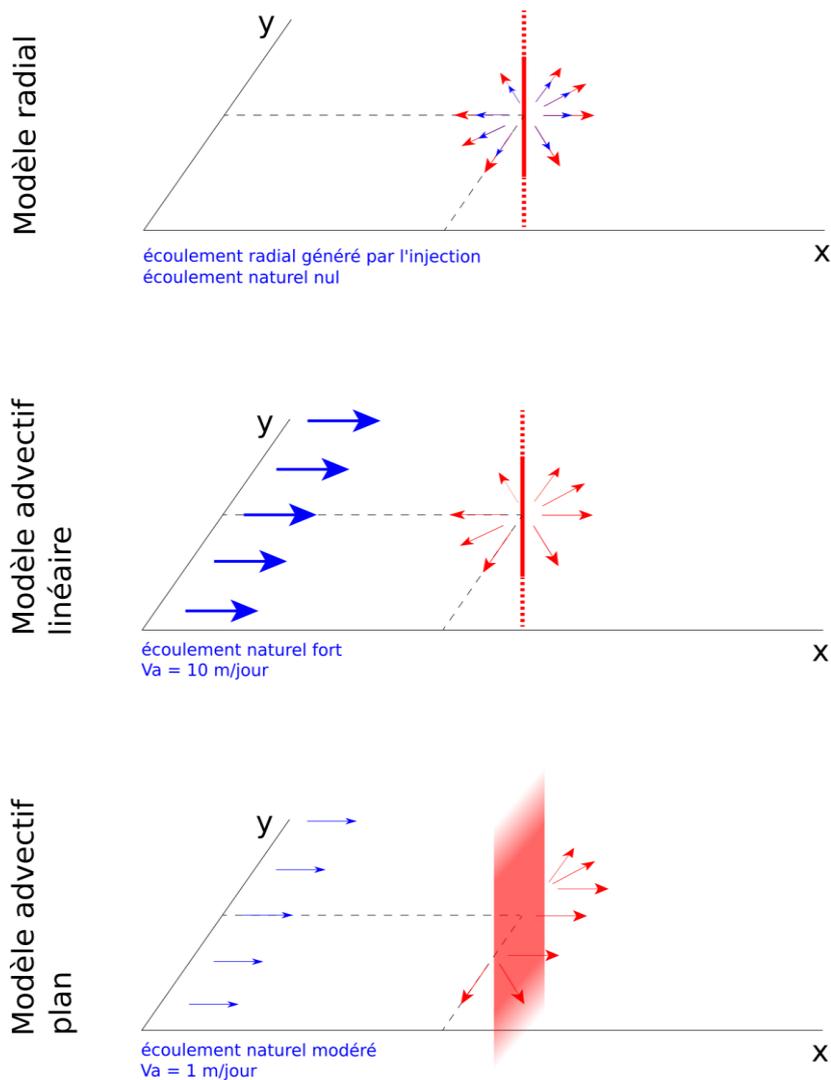


Figure 6 : Représentations schématiques des trois modèles analytiques

### 2.2.1. Modèle radial

Le modèle radial (MR) décrit l'impact thermique d'une injection de fluide chaud/froid dans un aquifère sans écoulement naturel. Cette injection génère un écoulement radial dans le milieu poreux (Figure 6).

Ce modèle a initialement été développé par Gelhar et Collins (1971) pour le domaine du transport de contaminants. La solution analytique alors proposée permettait de déterminer la distribution bi-dimensionnelle de contaminants générée par une injection à débit constant via un puits linéaire couvrant toute l'épaisseur d'un aquifère captif homogène.

Guimerà et al. (2007) ont ensuite modifié cette solution pour l'adapter au cas d'un transfert thermique. La solution proposée (Equation 1) permet de déterminer en régime

transitoire l'impact thermique généré par une source continue ponctuelle (i.e. une ligne en 2D) de chaleur dans un aquifère homogène captif.

$$\frac{\Delta T(x,y,t)}{\Delta T_{inj}} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{r^2 - r^{*2}}{2 \left[ \left( \frac{4}{3} \alpha_L \right) (r^*)^3 + \left( \frac{\lambda m}{A_T C_m} \right) (r^*)^4 \right]^{1/2}} \right\} \quad (1)$$

Avec :

$$r^* = (2A_T t)^{1/2} \quad (2)$$

$$A_T = \left( \frac{n C_w}{C_m} \right) \left( \frac{Q_{inj}}{2\pi n b} \right) = \frac{1}{R} \left( \frac{Q_{inj}}{2\pi n b} \right) \quad (3)$$

Le terme  $R$  est le facteur de retard thermique, c'est-à-dire le facteur de retard du front thermique par rapport au front idéal d'un traceur. Le terme  $A_T$  représente la vitesse retardée d'écoulement, générée par l'injection de fluide au débit  $Q_{inj}$ . Le terme  $r^*$  représente donc la position hypothétique du flux thermique en l'absence de phénomènes de dispersion et de diffusion (Gelhar et Collins, 1971).

Les principales limites de ce modèle résident dans son absence de prise en compte, d'une part, des phénomènes de transport de chaleur dans les couches sous et sus-jacentes et, d'autre part, des conséquences de l'introduction d'un écoulement naturel.

## 2.2.2. Modèle advectif linéaire

Ce second modèle permet la détermination de l'impact thermique généré par une injection de fluide chaud/froid dans un aquifère avec un écoulement naturel important (Figure 6).

Ce modèle tire ses origines d'une solution analytique permettant de déterminer l'impact d'un système fermé, c'est-à-dire sans injection de fluide dans le milieu (Carslaw an Jaeger, 1959). Elle a ensuite été adaptée par Kinzelbach (1987) aux systèmes ouverts (i.e. avec injection de fluide dans le milieu). En particulier, le flux linéique de chaleur  $q_l$  ( $\text{W m}^{-1}$ ) de la solution initiale a été remplacé par le flux linéique de chaleur  $q_l$  généré par l'injection avec un débit  $Q_{inj}$  ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) d'un fluide à la température  $T_{inj}$  (K) conformément à l'équation 4.

$$q_l = \frac{Q_{inj} C_w (T_{inj} - T_0)}{b} \quad (4)$$

Le modèle obtenu (équation 5) est aujourd'hui utilisé par le Land allemand du Bade-Wurtemberg (Umweltministerium Baden-Württemberg, 2009) comme outil pour la détermination du panache thermique généré par un système ouvert.

$$\Delta T(x, y, t) = \frac{Q_{inj} \Delta T_{inj}}{4nbv_a \sqrt{\pi \alpha_T}} \exp\left(\frac{x-r'}{2\alpha_L}\right) \frac{1}{\sqrt{r'}} \operatorname{erfc}\left(\frac{r' - v_a t/R}{2\sqrt{v_a \alpha_L t/R}}\right) \quad (5)$$

Avec :

$$r' = \sqrt{x^2 + y^2 \frac{\alpha_L}{\alpha_T}} \quad (6)$$

Si les valeurs des dispersivités  $\alpha_L$  et  $\alpha_T$  ne sont pas connues a priori, elles peuvent être estimées par une méthode présentée dans le guide allemand et basée sur la longueur du panache thermique (Keim and Lang, 2008).

Au-delà de la non prise en compte des transferts thermiques dans les couches supérieure et inférieure, ce modèle ne considère ni les phénomènes de conduction dans l'aquifère ( $\lambda_m = 0 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ), ni l'influence de l'injection ou de l'extraction de fluide. D'après le guide allemand, son utilisation doit être réservée au cas d'une vitesse d'infiltration supérieure à  $1 \text{ m j}^{-1}$  et d'un usage énergétique inférieur à 45 000 kWh par an (Umweltministerium Baden-Württemberg, 2009).

### 2.2.3. Modèle advectif plan

Au vu des limitations du modèle advectif linéaire pour les écoulements naturels faibles, un troisième modèle est étudié pour les cas intermédiaires (entre des écoulements naturels fort et nul).

En effet, lorsque le débit injecté est fort devant l'écoulement naturel, il génère un fort gradient hydraulique autour du puits d'injection. Par rapport à une même injection dans un écoulement plus important, cela se traduit par une zone d'influence hydraulique plus étendue (Figure 7). L'impact thermique est donc plus large (dans la direction transverse - y) et moins allongé (dans la direction longitudinale - x).

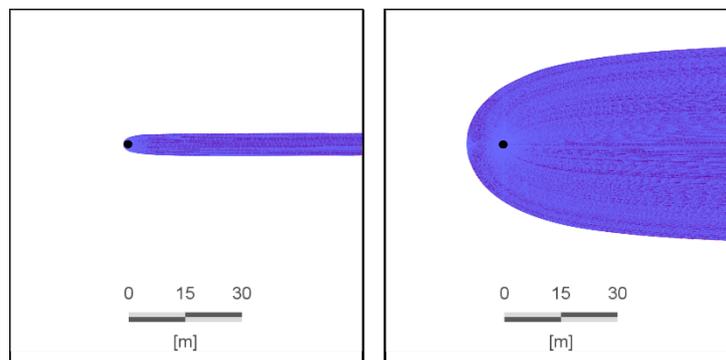


Figure 7 : Modélisation numérique d'une même injection dans un écoulement fort (image de gauche) et modéré (image de droite). Dans les deux cas, l'écoulement se fait de la gauche vers la droite. Les surfaces bleues représentent les zones d'influence hydraulique du puits.

L'effet de l'injection de fluide ne peut donc plus être négligé. Ainsi, l'utilisation d'une source linéaire de chaleur (sans débit fluide) ne semble pas adaptée à la modélisation de ce problème. En l'absence de solution analytique tenant compte de l'injection de fluide dans ce contexte, il est choisi de modéliser l'effet de l'injection par une source de chaleur plane

(en 2D, une ligne orthogonale à la direction de l'écoulement) sur laquelle est répartie l'énergie injectée (Figure 6).

Un tel modèle a été développé pour le transport de contaminants par Domenico et Robbins (1985). Le modèle proposé permet de déterminer le panache de polluants émis par une source plane semi-infinie dans un milieu poreux saturé.

L'adaptation du modèle proposé par Domenico et Robbins (1985) au cas du transport de chaleur a été décrite par Hähnlein et al. (2010b). Elle est complétée par la même transformation que pour le modèle linéaire consistant en un remplacement du flux linéique de chaleur. Le modèle analytique ainsi obtenu est présenté par l'équation 3.

$$\Delta T(x, y, t) = \left(\frac{\Delta T_0}{4}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{Rx - v_a t}{2\sqrt{D_x R t}}\right) \left\{ \operatorname{erf}\left[\frac{y + \frac{Y}{2}}{2\sqrt{D_y \frac{x}{v_a}}}\right] - \operatorname{erf}\left[\frac{y - \frac{Y}{2}}{2\sqrt{D_y \frac{x}{v_a}}}\right] \right\} \quad (7)$$

Les termes de diffusivité longitudinale et transversale ( $D_x$  et  $D_y$ ) sont définis par l'équation 8.

$$D_{x,y} = \frac{\lambda_m}{nC_w} + \alpha_{L,T} v_a \quad (8)$$

Le paramètre  $\Delta T_0$  représente la différence de température à la source.  $\Delta T_0$  n'est pas égale à  $\Delta T_{inj}$  mais définit la répartition de l'énergie injectée sur l'ensemble du plan. Ce paramètre est défini par l'équation 9.

$$\Delta T_0 = \frac{F_0}{v_a n C_w Y} \quad (9)$$

$F_0$  ( $\text{Wm}^{-1}$ ) représente l'énergie injectée par unité de longueur du puits (équation 10).

$$F_0 = \frac{qh}{b} = \frac{\Delta T_{inj} C_w Q_{inj}}{b} \quad (10)$$

Le terme  $Y$  est la largeur de la source (dans la direction transverse  $y$ ). Deux largeurs sont comparées par la suite ( $Y_0$  et  $Y_{max}$ ). Elles représentent les largeurs caractéristiques des panaches thermiques à l'état stationnaire données par Kobus et Mehlhorn (1980). L'équation 11 donne la largeur du panache au droit du puits d'injection ( $Y_0$ ). L'équation 12 donne la largeur maximale du panache ( $Y_{max}$ ).

$$Y_0 = \frac{Q_{inj}}{2b v_a n} \quad (11)$$

$$Y_{max} = \frac{Q_{inj}}{b v_a n} \quad (12)$$

Dans la suite de ce document, le modèle advectif plan associé à  $Y_o$  ou  $Y_{max}$  sera respectivement dénommé MAP1 et MAP2.

Les limites de ce modèle sont tout d'abord liées à l'hypothèse de modélisation du problème par une source plane (chaleur uniformément répartie, définition de la largeur du plan). Par ailleurs, le domaine de définition de l'équation 3 rend impossible le calcul du champ de température en amont du plan d'injection.

### 2.3. Scénarios de comparaison

Dans l'objectif d'évaluer la capacité des modèles à prédire l'impact thermique au sein de différents contextes hydrogéologiques, trois scénarios sont utilisés. Pour tenir compte d'une gamme de puissances injectées représentative d'usages résidentiels, trois variantes sont ajoutées à chaque scénario. Par ailleurs, considérant que l'impact le plus important est généré par un usage en climatisation pendant la période estivale (Lo Russo et Civita, 2009), l'étude se centre sur une injection d'eau chaude durant une période de 120 jours.

Le premier scénario considère un aquifère constitué de sable fin de conductivité hydraulique  $10^{-4} \text{ ms}^{-1}$ . Le gradient hydraulique, et donc l'écoulement naturel, y sont nuls ( $v_a = 0 \text{ m j}^{-1}$ ). Ce scénario vise à modéliser un aquifère au sein duquel l'écoulement est très faible. Il sera utilisé pour évaluer la validité du modèle MR.

Le deuxième scénario considère un aquifère constitué de sable grossier de conductivité hydraulique  $6.94 \times 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$ . Le gradient hydraulique y est fixé à  $5 \times 10^{-3}$ . Ce scénario représente un aquifère avec un écoulement naturel modéré ( $v_a = 1 \text{ m j}^{-1}$ ). Cette vitesse d'infiltration étant la vitesse minimale préconisée pour l'utilisation du modèle MAL, ce scénario sera utilisé pour évaluer la validité des deux modèles MAL et MAP.

Le troisième scénario considère un aquifère constitué de gravier fin de conductivité hydraulique  $6.94 \times 10^{-3} \text{ ms}^{-1}$ . Le gradient hydraulique y est également fixé à  $5 \times 10^{-3}$ . Ce scénario représente un aquifère avec un écoulement naturel élevé ( $v_a = 10 \text{ m j}^{-1}$ ). Il sera utilisé pour évaluer la validité du modèle MAL.

Trois variantes ont été définies afin de tester l'influence de différentes puissances d'installation représentatives d'usages résidentiels. Pour les trois variantes, la différence de température entre le fluide injecté et la température initiale de l'aquifère est fixée à  $\Delta T_{inj} = 10 \text{ K}$ . Ces variables se distinguent alors par les débits d'injection  $Q_{inj}$  considérés ( $2 \text{ ls}^{-1}$ ,  $0.6 \text{ ls}^{-1}$  et  $0.3 \text{ ls}^{-1}$ ). Les flux de chaleur  $q_h$  résultants (équation 13) correspondent aux besoins énergétiques classiques de bâtiments résidentiels allant d'habitations individuelles à de petits ensembles de logements collectifs (Warner et al. 1984).

$$q_h = Q_{inj} C_w \Delta T_{inj} \quad (13)$$

Les scénarios, variantes et modèles analytiques testés sont synthétisés dans le Tableau 3. Par ailleurs, les paramètres hydrogéologiques et thermiques utilisés pour les comparaisons sont listés dans le Tableau 5.

Variantes : Usages énergétiques	Scénarios : Contextes hydrogéologiques		
	Écoulement nul ( $v_a = 0 \text{ m j}^{-1}$ )	Écoulement modéré ( $v_a = 1 \text{ m j}^{-1}$ )	Écoulement fort ( $v_a = 10 \text{ m j}^{-1}$ )
Petite habitation individuelle ( $q_h = 13 \text{ kW}$ )	MR	MAP et MAL	MAL
Habitation individuelle ( $q_h = 25 \text{ kW}$ )	MR	MAP et MAL	MAL
Petit immeuble résidentiel ( $q_h = 84 \text{ kW}$ )	MR	MAP et MAL	MAL

Tableau 3 : Synthèse des scénarios et variantes considérés. Les modèles analytiques correspondant à chaque cas sont indiqués.

## 2.4. Modèles numériques

Les scénarios ainsi définis ont ensuite été traduits en modèles numériques bidimensionnels (2D) et tridimensionnels (3D).

Le processus de modélisation consiste en la résolution en régime transitoire de l'équation du transport de chaleur en milieu poreux saturé sur l'ensemble du domaine étudié. L'écoulement ainsi que le transport de chaleur sont simulés en utilisant le code FEFLOW (Diersch, 2013) basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel a été utilisé récemment dans différents travaux s'intéressant aux systèmes ouverts (Lo Russo et al. 2012 ; Lo Russo et al. 2014 ; Herbert et al., 2013 ; Attard et al., 2016 ; Epting et al., 2017). A travers ces travaux, il a prouvé sa capacité à simuler les impacts thermiques liés à ces systèmes.

Durant la période de simulation (120 jours), l'eau est injectée à débit constant sur toute l'épaisseur de l'aquifère. La densité, la viscosité du fluide ainsi que la capacité thermique et la conductivité thermique du milieu sont considérées comme indépendantes de la température (Hecht-Mendez et al. 2010). La température initiale de l'ensemble du domaine est fixée à 285.15 K et la seule source de chaleur est le puits. Aucune variation temporelle des paramètres ni recharge de l'aquifère par les précipitations n'est prise en compte.

### 2.4.1. Géométrie des modèles

La géométrie des différents modèles numériques est présentée par la Figure 8 et détaillée ci-dessous. Pour chaque modèle, les couches géologiques sont homogènes et d'épaisseur constante.

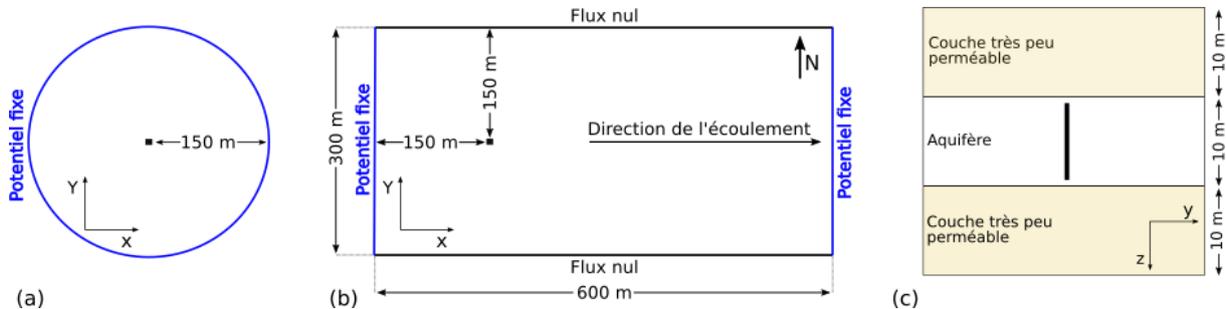


Figure 8 : Géométrie des modèles et conditions aux limites de l'écoulement. Le puits d'injection est représenté par un carré noir (a et b) ou un rectangle noir (c). (a) Vue du dessus schématisée du modèle radial (2D et 3D). (b) Vue du dessus schématisée des modèles advectifs (2D et 3D). (c) Coupe schématisée des modèles tridimensionnels.

#### Modèles 2D

La configuration des modèles bidimensionnels est illustrée sur la Figure 8 (a et b). L'aquifère est représenté par une couche horizontale de 10 m d'épaisseur.

Pour le scénario 1 (écoulement radial), afin de respecter la symétrie cylindrique du problème, le domaine est un disque de 150 m de rayon (Figure 8a).

Pour les scénarios 2 et 3 (scénarios advectifs), le domaine est un rectangle de 600 m de longueur et 300 m de largeur (Figure 8b).

Seul le puits d'injection est représenté en considérant que le puits de production est situé suffisamment loin pour qu'il n'y ait pas d'interférences entre eux. Il est représenté par un point (un nœud dans le modèle) situé tel que présenté sur la Figure 8 (a et b).

Un algorithme de discrétisation en triangle a ensuite été appliqué. La dimension des éléments varie de quelques centimètres à proximité du puits à environ 1 m à proximité des limites du domaine.

#### Modèles 3D

La configuration utilisée pour les modèles tridimensionnels est présentée par la Figure 8. L'aquifère (10 m d'épaisseur, horizontal) est situé entre deux couches très faiblement perméables (10 m d'épaisseur, horizontal).

La géométrie horizontale est identique à celle présentée ci-dessus et par la Figure 8 (a et b). Le domaine est donc un cylindre de 150 m de rayon et 30 m d'épaisseur pour le scénario 1 et un parallélépipède de 600 x 300 x 30 m pour les scénarios 2 et 3.

La discrétisation verticale est composée de vingt-deux couches horizontales plus rapprochées dans l'aquifère et à proximité des interfaces entre aquifères et couches faiblement perméables. La taille des éléments triangulaires horizontaux varie de quelques centimètres à proximité du puits à environ 3 m aux limites du domaine. Le puits est représenté verticalement par une série de 7 nœuds situés entre 10.5 m et 19.5 m de profondeur (Figure 8c).

## 2.4.2. Conditions aux limites

### Écoulement

Pour les modèles 2D et 3D relatifs au scénario 1, le potentiel hydraulique est fixé à 0 m sur l'ensemble du périmètre du cercle (ou de la surface latérale du cylindre).

Pour les modèles relatifs aux scénarios 2 et 3, le potentiel hydraulique est fixé à 3 m sur la limite ouest du domaine (Figure 8b) et à 0 m sur la limite est (Figure 8b). Il en résulte un écoulement de l'est vers l'ouest (Figure 8b).

Pour l'ensemble des modèles, les autres limites sont des limites à flux nul.

L'injection de fluide est représentée par une condition de flux fixe assignée aux nœuds du puits. La valeur du flux réparti sur les nœuds dépend de la variante considérée ( $2 \text{ ls}^{-1}$ ,  $0.6 \text{ ls}^{-1}$  et  $0.3 \text{ ls}^{-1}$ ).

### Chaleur

L'injection de chaleur a été représentée de deux manières en fonction du scénario et de la variante considérée. Par défaut, l'équation de la chaleur est résolue sous sa forme convective (Diersch, 2009) et l'injection de chaleur est représentée en imposant une température fixée à 295.15 K aux nœuds du puits. La température de l'eau injectée est ainsi fixée à 295.15 K. Toutefois, la température constante assignée aux nœuds ajoute une source supplémentaire de chaleur par conduction. Cela entraîne une augmentation artificielle du flux injecté dans une proportion dépendant du gradient thermique à proximité du puits d'injection (Dupasquier, 2000).

Dès que la chaleur stockée dans le domaine dépasse de plus de 5 % la quantité de chaleur normalement injectée, la simulation est réinitialisée en remplaçant la condition de température imposée par une condition de flux imposée et en utilisant la forme divergente de l'équation de la chaleur (Diersch, 2009). Cette seconde solution permet de fixer le flux de chaleur injecté mais pas de contrôler la température injectée, ce qui peut notamment conduire à dépasser la valeur de 295.15 K.

La configuration finale utilisée pour chaque scénario est présentée dans le Tableau 4.

Conditions aux limites	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Limites du domaine (écoulement)	Potentiel fixé	Potentiel fixé sur les limites est et ouest	
Puits (écoulement)	Flux fixé	Flux fixé	Flux fixé
Puits (chaleur)	Température fixée	Var. 1 et 2 : Température fixée Var. 3 : Flux fixé	Flux fixé

Tableau 4 : Synthèse des conditions aux limites utilisées en fonction des scénarios et variantes. Lorsqu'aucune condition n'est indiquée, la condition par défaut (flux nul) de FEFLOW est appliquée. (Var.= Variante)

### 2.4.3. Synthèse des caractéristiques hydrogéologiques et thermiques

Le Tableau 5 synthétise l'ensemble des paramètres hydrogéologiques et thermiques employés pour les modèles analytiques et numériques.

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
<b>Flux</b>			
$v_a$ (m j <sup>-1</sup> )	0	1	10
$Q_{inj}$ (l s <sup>-1</sup> )		Var. 1 : 2 Var. 2 : 0.6 Var. 3 : 0.3	
$q_h$ (J s <sup>-1</sup> )		Var. 1 : 8.37 x 10 <sup>4</sup> Var. 2 : 2.51 x 10 <sup>4</sup> Var. 3 : 1.26 x 10 <sup>4</sup>	
<b>Caractéristiques physiques</b>			
<i>Aquifère (modèles 2D and 3D)</i>			
$b$ (m)		10	
$n$ (-)		0.3	
$K$ (m s <sup>-1</sup> )	10 <sup>-5</sup>	6.94 x 10 <sup>-4</sup>	6.94 x 10 <sup>-3</sup>
$\alpha_L$ (m) <sup>a</sup>	1	1.8	Var. 1 : 6.2 Var. 2 : 1.8 Var. 3 : 1
$\alpha_T$ (m) <sup>a</sup>	0.1	0.18	Var. 1 : 0.62 Var. 2 : 0.18 Var. 3 : 0.1
<i>Couches faiblement perméables 1 et 2 (modèles 3D)</i>			
$b$ (m)		10	
$n$ (-)		0.3	
$K$ (m s <sup>-1</sup> )		10 <sup>-9</sup>	
$\alpha_L$ (m) <sup>a</sup>		1	
$\alpha_T$ (m) <sup>a</sup>		0.1	
<b>Propriétés thermiques</b>			
$T_u$ (K)		285.15	
$T_{inj}$ (K)		295.15	
$\lambda_w$ (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )		0.578	
$\lambda_s$ (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )		4	
$\lambda_m$ (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ) <sup>b</sup>		2.24	
$C_w$ (J m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup> )		4.185 x 10 <sup>6</sup>	
$C_s$ (J m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup> )		2,332 x 10 <sup>6</sup>	
$C_m$ (J m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup> )		2,888 x 10 <sup>6</sup>	

<sup>a</sup> Calculé d'après Umweltministerium Baden-Württemberg (2009) et Keim & Lang (2008);

<sup>b</sup> Calculé d'après Johansen (1975) et Woodside & Messmer (1961).

Tableau 5 : Paramètres hydrogéologiques et thermiques utilisés pour les modélisations analytiques et numériques. (Var. = variante)

## 2.5. Méthode de comparaison

La capacité des modèles analytiques à prédire l'impact thermique pour les trois scénarios et leurs variantes est évaluée en comparant les résultats analytiques à ceux fournis par les modèles numériques 2D et 3D.

En raison de l'objectif assigné à ces modèles analytiques, cette évaluation se centre sur leur capacité à estimer l'impact local et l'extension du panache. Le panache considéré par la suite est défini comme la zone où l'impact thermique excède 1 K.

Pour ce faire, trois paramètres sont étudiés :

- Les températures locale ( $T_{xy}$ ) ;
- La longueur ( $L$ ) du panache dans la direction de l'écoulement ;
- La largeur maximale ( $l$ ) du panache dans la direction transverse.

Considérant que le modèle analytique plan (MAP) ne permet pas la détermination du champ de température en amont du puits, pour l'ensemble des modèles utilisés dans le scénario 2, ces différents paramètres ne sont calculés qu'en aval du puits d'injection.

Les estimations de ces paramètres fournies par les modèles analytiques sont évaluées en calculant l'erreur relative entre les résultats analytiques et numériques conformément à l'équation 14. Les résultats numériques sont systématiquement considérés comme valeurs de référence.

$$ER_X = 100 \cdot \frac{X_{\text{analytic}} - X_{\text{numeric}}}{X_{\text{numeric}}} \% \quad (14)$$

Où X correspond au paramètre étudié ( $L$ ,  $l$  ou  $T_{xy}$ ). L'erreur relative ainsi calculée peut être positive ou négative, traduisant alors respectivement une surestimation ou une sous-estimation du paramètre considéré. La classification présentée par le Tableau 6 est par la suite utilisée pour caractériser les résultats.

Erreur relative	Qualité du résultat
$ ER_X  < 10 \%$	Bon
$10 \% <  ER_X  < 30 \%$	Satisfaisant
$30 \% <  ER_X  < 50 \%$	Faible
$ ER_X  > 50 \%$	Non satisfaisant

Tableau 6 : Qualificatifs employés pour décrire la qualité des résultats analytiques.

### 3. Résultats et discussion

Les résultats des différentes comparaisons sont présentés par le Tableau 7, la Figure 9, la Figure 10 et détaillés par scénario dans les sections suivantes.

Le Tableau 7 liste les erreurs relatives sur l'extension du panache. La Figure 9 présente la vue en plan des panaches calculés par modélisations analytiques et modélisations numériques 2D et 3D. La Figure 10 présente l'erreur relative entre résultats analytiques et numériques 3D sur les température locales, calculée en tous points du domaine.

Pour apporter un complément d'information, la Figure 11 (en annexe) présente la répartition de l'énergie injectée dans les modèles numériques tridimensionnels entre énergie stockée dans l'aquifère, dans les couches supérieure et inférieure et sortant du domaine.

Scénario	Variante	Modèle	2D		3D	
			$ER_L$	$ER_I$	$ER_L$	$ER_I$
$v_a = 0 \text{ m j}^{-1}$	$Q_{inj} = 2.0 \text{ l s}^{-1}$	MR	-1	-1	3	3
	$Q_{inj} = 0.6 \text{ l s}^{-1}$	MR	-3	-3	2	2
	$Q_{inj} = 0.3 \text{ l s}^{-1}$	MR	-3	-3	1	1
$v_a = 1 \text{ m j}^{-1}$	$Q_{inj} = 2.0 \text{ l s}^{-1}$	MAL	-9	-65	-2	-63
		MAP1	-14	-25	-7	-21
		MAP2	-20	16	-13	23
	$Q_{inj} = 0.6 \text{ l s}^{-1}$	MAL	-4	-44	5	-39
		MAP1	-7	-19	2	-13
		MAP2	-9	-4	0	4
	$Q_{inj} = 0.3 \text{ l s}^{-1}$	MAL	-1	-32	11	-25
		MAP1	-4	-10	7	-2
		MAP2	-5	-6	7	3
$v_a = 10 \text{ m j}^{-1}$	$Q_{inj} = 2.0 \text{ l s}^{-1}$	MAL	4	1	65	12
	$Q_{inj} = 0.6 \text{ l s}^{-1}$	MAL	16	0	36	1
	$Q_{inj} = 0.3 \text{ l s}^{-1}$	MAL	26	0	26	-8

Tableau 7 : Erreur relative entre résultats analytiques et numériques sur la longueur ( $ER_L$ ) et la largeur ( $ER_I$ ) du panache. Les valeurs sont en pourcentage.

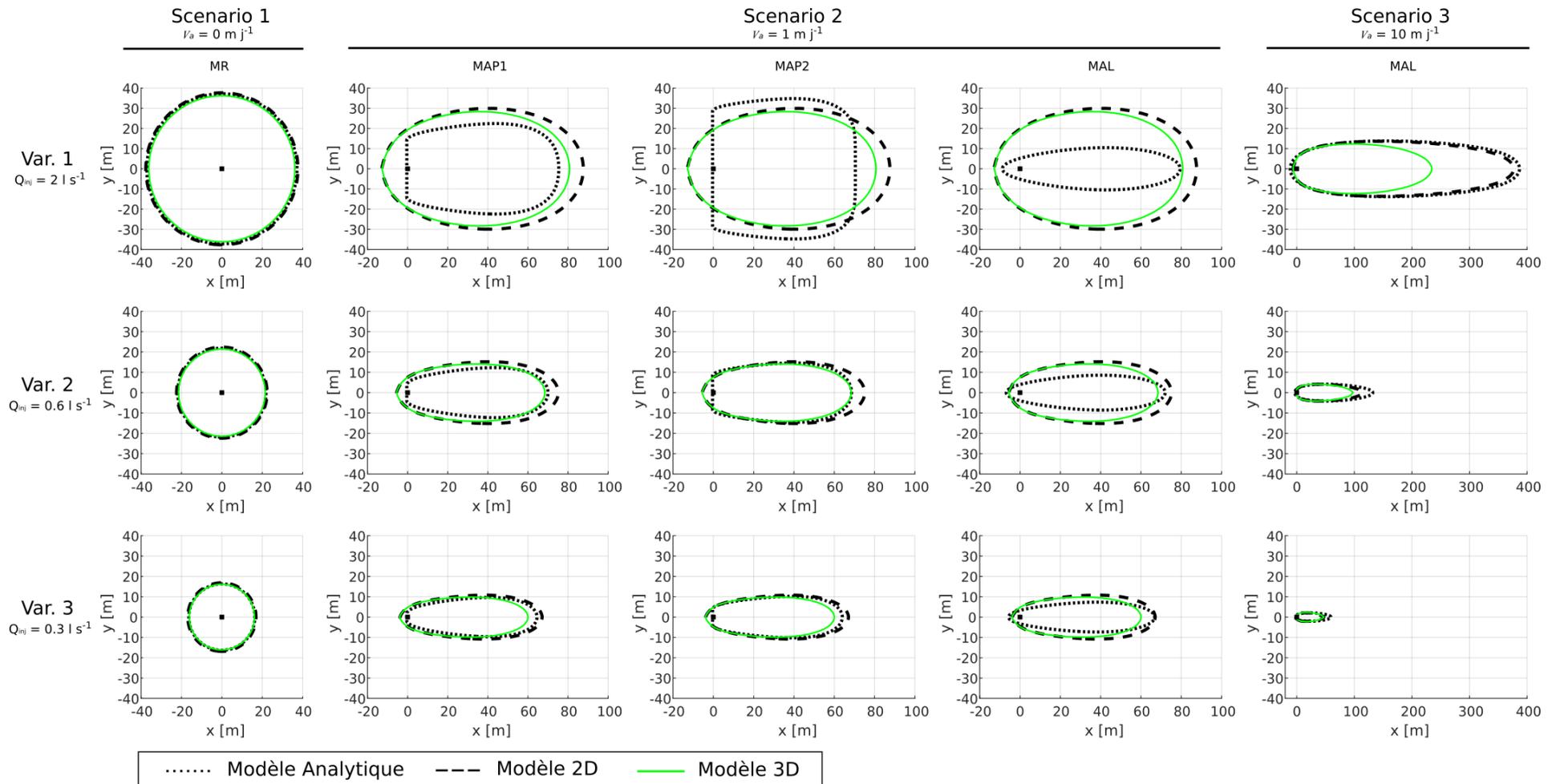


Figure 9 : Vue en plan des panaches calculés par les modèles analytiques et numériques (2D et 3 D) pour les trois scénarios et leurs variantes. Les points noirs symbolisent les puits d'injection.

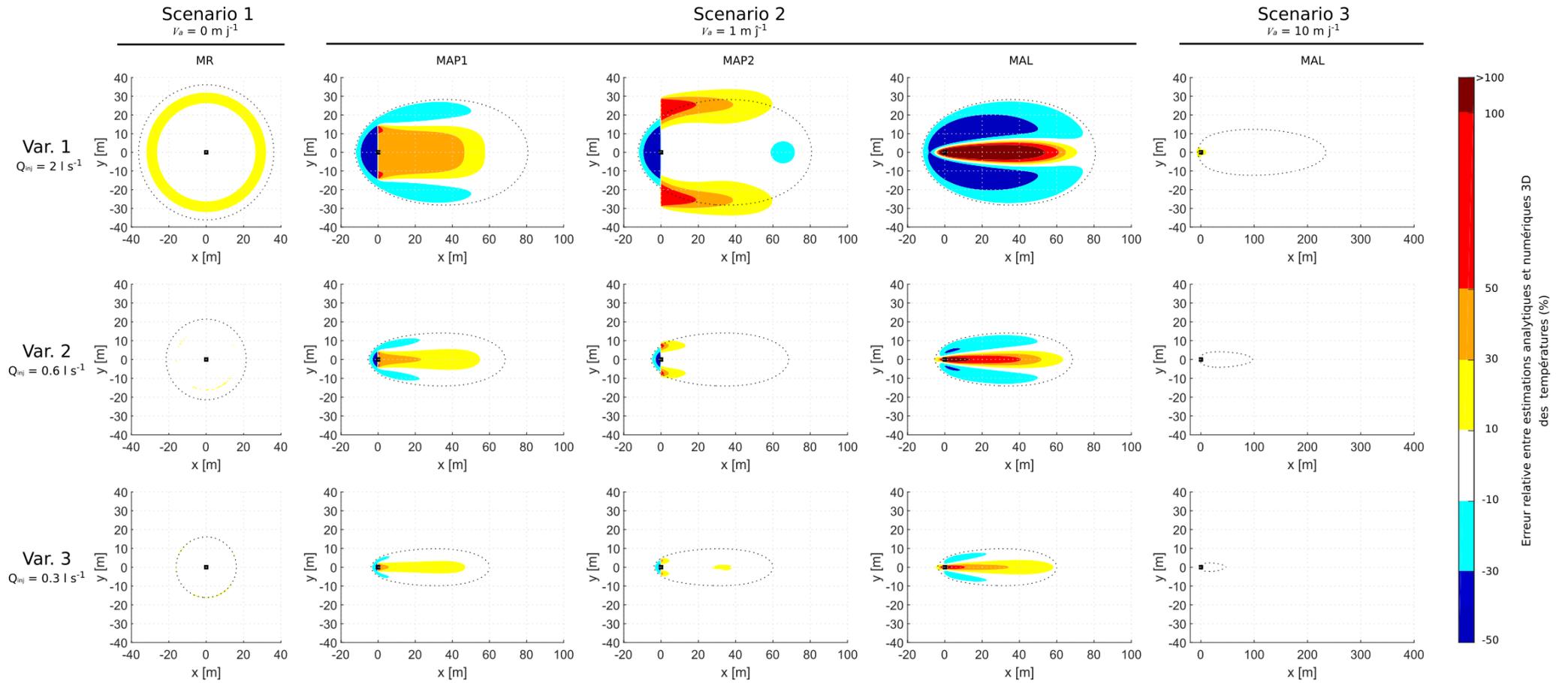


Figure 10 : Répartition spatiale de l'erreur relative (en %) entre résultats analytiques et numériques 3D. Les panaches calculés numériquement sont présentés en pointillés. Les zones où la valeur absolue de l'erreur relative sur la température est inférieure à 10 % sont représentées en blanc. Les points noirs symbolisent les puits d'injection.

### **3.1. Scénario 1 : écoulement naturel nul**

Le scénario 1 considère un milieu sans écoulement naturel ( $v_a = 0 \text{ m j}^{-1}$ ), c'est-à-dire dans lequel l'injection de fluide chaud entraîne un écoulement radial. Ce cas est modélisé analytiquement par le modèle MR. Les panaches thermiques étant circulaires, leur longueur et leur largeur sont identiques et seules les erreurs relatives sur la longueur des panaches ( $ER_L$ ) sont mentionnées.

#### **3.1.1. Comparaison avec les modèles numériques 2D**

La comparaison entre les résultats donnés par le modèle RM et ceux fournis par modélisation numérique bidimensionnelle montre la bonne qualité des estimations de l'extension du panache obtenues à l'aide du modèle analytique.

L'erreur relative sur la longueur du panache augmente légèrement avec le débit d'injection.

Ceci confirme la validité physique du modèle et sa capacité à prédire l'extension de l'impact dans des contextes où l'écoulement naturel est nul et les transferts thermiques verticaux négligeables.

#### **3.1.2. Comparaison avec les modèles numériques 3D**

La comparaison avec les résultats issus de modélisations numériques tridimensionnelles montre que les transferts de chaleur dans les couches inférieure et supérieure sont les plus faibles des trois scénarios (Figure 11). La Figure 9 montre par ailleurs que l'influence de ces transferts thermiques sur l'extension des panaches est négligeable. En conséquence, l'erreur relative sur l'extension des panaches reste très faible.

Comme le montre la Figure 10, l'estimation de l'impact local est également bonne, hormis au sein d'une zone faiblement étendue où l'erreur relative sur les températures locales dépasse légèrement 10 %.

Ceci confirme la capacité du modèle RM à prédire l'extension du panache et l'impact local, même en présence de transferts thermiques verticaux (dans la gamme de paramètres testés).

### **3.2. Scénario 2 : écoulement naturel modéré**

Pour le deuxième scénario, un écoulement naturel modéré ( $v_a = 1 \text{ m j}^{-1}$ ) est considéré. Trois modèles sont comparés : les modèles RM1 et RM2 et le modèle LAM. Il convient de tenir compte du fait que cette valeur de vitesse d'écoulement est la plus faible de la gamme de validité du modèle LAM d'après le guide mentionné en section 2.2.2 (Umweltministerium Baden-Württemberg, 2009).

#### **3.2.1. Comparaison avec les modèles numériques 2D**

La comparaison avec les modèles numériques 2D montre tout d'abord que, pour les trois variantes, le modèle LAM fournit une bonne estimation de la longueur du panache en aval du puits d'injection. De plus, il s'agit du seul modèle analytique permettant d'estimer l'impact en amont du puits. Par contre, l'absence de prise en compte de l'injection se

traduit ici par un panache prédit particulièrement allongé (dans la direction de l'écoulement) et ainsi une forte sous-estimation de la largeur du panache. Cette sous-estimation est de plus en plus importante à mesure que le débit d'injection augmente, c'est-à-dire que l'importance relative de ce débit par rapport à l'écoulement naturel augmente.

Pour pallier l'absence de prise en compte de l'influence du débit injecté, le modèle MAP considère une source plane, donc élargie dans la direction orthogonale à l'écoulement. En conséquence, les estimations des largeurs de panache sont meilleures que pour le modèle MAL. Toutefois, pour une injection forte ( $Q_{inj} = 2 \text{ l s}^{-1}$ ), le modèle MAP1 sous-estime de 25 % la largeur du panache. A l'inverse, le modèle MAP2, qui considère une largeur de source plus importante, surestime cette même largeur de 16 %.

Même si la largeur de la source semble surévaluée (Figure 9) et que les estimations de longueurs de panache qu'ils procurent semblent moins appropriées que celles données par le modèle MAL, le modèle MAP2 procure une estimation bonne (débit d'injection modérés) à satisfaisante (débit d'injection fort) de l'extension du panache.

Cette comparaison avec des résultats numériques 2D permet d'évaluer les hypothèses conceptuelles des modèles utilisés. Tout d'abord, en ce qu'il ne considère pas l'influence de l'injection de fluide, le modèle MAL ne permet pas d'estimer l'impact lorsque l'importance relative du débit injecté par rapport à l'écoulement devient forte. Ensuite, cette comparaison permet de valider l'hypothèse de modélisation du débit injecté par une source plane, dans le cas de débits injectés modérés. Lorsque le débit est plus important, le modèle plan, s'il reste plus adapté que le modèle linéaire, ne permet plus une représentation satisfaisante du phénomène étudié. Quel que soit le débit considéré, les meilleurs résultats pour le modèle MAP sont obtenus en utilisant l'équation 12 (largeur maximale du panache en régime permanent) pour dimensionner la largeur de la source.

### **3.2.2. Comparaison avec les modèles numériques 3D**

La comparaison avec les résultats numériques tridimensionnels montre que, bien que les transferts de chaleur dans les couches inférieure et supérieure soient globalement plus importants que pour le scénario 1 (Figure 11), l'extension du panache n'est pas modifiée de manière substantielle (Figure 9). En conséquence, les erreurs relatives entre résultats analytiques et numériques tridimensionnels sont similaires à celles calculées lors de la comparaison avec les modèles bidimensionnels.

La Figure 10 confirme les conclusions tirées de la comparaison avec les résultats numériques 2D et montre de plus que le modèle MP2 fournit l'estimation la plus satisfaisante de l'impact local.

L'omission dans la solution analytique des transferts thermiques verticaux ne conduit pas à une surestimation analytique significative de l'impact. Pour des débits d'injection modérés ( $Q_{inj} \leq 0.6 \text{ l s}^{-1}$ ), le modèle MP2 fournit une bonne estimation de l'extension du panache et de l'impact local. Toutefois, la qualité de l'estimation décroît à proximité de la source et il n'est pas possible de décrire l'impact en amont du puits d'injection. Pour des débits d'injection élevés ( $Q_{inj} = 2 \text{ l s}^{-1}$ ), le modèle MP2 estime de manière satisfaisante l'extension du panache (sans que sa forme ne soit correctement modélisée).

### 3.3. Scénario 3 : écoulement naturel fort

Le scénario 3 considère un écoulement important ( $v_a = 10 \text{ m j}^{-1}$ ). L'importance relative du débit injecté sur l'écoulement sera ici plus faible et le recours au modèle MAP n'est a priori plus justifié. En conséquence, seul le modèle LAM est évalué.

#### 3.3.1. Comparaison avec les modèles numériques 2D

La comparaison entre résultats analytiques et numériques bidimensionnels montre tout d'abord que le modèle linéaire surestime la longueur des panaches. Si l'estimation de cette longueur est bonne pour un débit d'injection élevé ( $Q_{inj} = 2 \text{ l s}^{-1}$ ), elle perd en qualité quand le débit d'injection diminue et est satisfaisante pour des débits modérés à forts. Pour les trois variantes, l'estimation de la largeur du panache est bonne.

Cette comparaison valide ainsi l'hypothèse d'une faible influence de l'injection de fluide sur l'impact thermique dans les conditions étudiées.

Par ailleurs, les résultats montrent que, dans la gamme de valeurs testées, l'absence de prise en compte de conduction thermique dans l'aquifère ne conduit pas à une erreur importante sur le résultat. Toutefois, considérant que Lo Russo et al. (2012) et Piga et al. (2017) ont montré que la valeur de la conductivité thermique de la phase solide a une influence non négligeable sur la longueur de l'impact thermique, il convient de considérer les résultats fournis par ce modèle à l'aune de la valeur réelle de ce paramètre. En particulier, plus la conductivité thermique de la phase solide est élevée, moins la longueur du panache est importante.

#### 3.3.2. Comparaison avec les modèles numériques 3D

La Figure 9 montre la forte influence des transferts thermiques dans les couches supérieure et inférieure sur la longueur des panaches, particulièrement pour la variante 1. La Figure 11 confirme que ces transferts sont plus forts pour ce scénario que pour les précédents, et que la valeur maximale est obtenue pour la variante 1. L'importance de l'écoulement accroît l'extension du panache, et donc la surface de contact entre aquifère et couche sous et sus-jacentes, ainsi que le ratio entre la surface et le volume impacté, et favorise ainsi les échanges verticaux de chaleur.

Pour un débit d'injection élevé ( $Q_{inj} = 2 \text{ l s}^{-1}$ ), cela conduit à une surestimation de 65 % de la longueur du panache. Cette surestimation décroît avec le débit d'injection et, pour un débit d'injection faible ( $Q_{inj} = 0,3 \text{ l s}^{-1}$ ), l'erreur relative sur la longueur du panache est similaire à celle obtenue lors de la comparaison avec le modèle 2D (i.e. sans tenir compte des transferts thermiques).

Les transferts thermiques semblent avoir moins d'effets sur la largeur des panaches et les estimations de ces dernières sont satisfaisantes.

Malgré ces remarques, la Figure 10 montre que l'erreur relative entre les estimations analytiques et numériques tridimensionnelles des températures locales est globalement inférieure à 10 % (sauf à proximité du puits d'injection), quel que soit le débit d'injection. Si le modèle linéaire est susceptible de surestimer la longueur des panaches, sa capacité

à estimer les températures locales est bonne, sauf à proximité du puits d'injection. Cela traduit l'étalement important de l'impact thermique dans la direction de l'écoulement, particulièrement dans le cas d'une injection forte.

### **3.4. Discussion**

Trois modèles analytiques ont été évalués dans différentes conditions habituelles d'exploitation. Pour la majorité des conditions testées, il existe un modèle analytique permettant de déterminer l'extension du panache. Ce résultat offre des perspectives intéressantes pour une planification du développement des systèmes ouverts en milieu urbain.

La comparaison avec les modèles numériques 3D montre que si l'extension du panache peut être estimée de manière satisfaisante, les modèles analytiques testés ne permettent pas toujours d'estimer l'impact local, en particulier à proximité du puits d'injection. Dans ce cas, leur utilisation doit se limiter à la détermination de l'extension du panache et ne doit pas viser à des évaluations d'impacts environnementaux ou techniques.

Dans le cas d'un écoulement important, si le champ de température est bien estimé, le fort étalement de l'impact questionne sur l'utilisation d'un seuil pour définir le panache. En effet, dans ce cas, il existe une zone étendue sur laquelle l'impact thermique est proche de la valeur fixée.

Si les comparaisons se sont centrées sur des aquifères captifs, les résultats restent valables pour des aquifères à nappes libres tant que l'élévation de la hauteur de nappe générée par l'injection est faible devant sa hauteur à l'état naturel (ce qui est le cas pour les débits considérés dans des aquifères habituels).

Enfin, certaines hypothèses fortes ont été formulées dans le cadre de ce travail pour évaluer les modèles analytiques.

En particulier, le rôle de la dynamique transitoire de l'exploitation thermique n'a pas été étudié. Par conséquent, il convient d'être vigilant lors de l'utilisation de ces solutions analytiques pour des systèmes ouverts dont l'injection varie au cours du temps. Lo Russo et al. (2014) ont utilisé un modèle déterministe pour évaluer l'influence du choix de discrétisation temporelle de la dynamique d'injection d'un système ouvert à Turin (Italie). Ils ont montré que les simulations basées sur des valeurs moyennes saisonnières ne sont pas satisfaisantes pour décrire l'impact thermique.

En outre, l'influence sur l'impact thermique de l'hétérogénéité des caractéristiques hydrogéologiques ainsi que de la dépendance à la température des paramètres thermodynamiques (dispersivité, conductivité thermique et capacité thermique) est susceptible de varier suivant les contextes (Lo Russo et al. 2012 ; Piga et al. 2017). Il apparaît ainsi nécessaire d'évaluer l'influence de ces paramètres dans de futurs travaux.

# Conclusion

---

Les systèmes ouverts génèrent par leur fonctionnement des impacts thermiques susceptibles d'altérer les performances d'installations voisines. Dans l'objectif de faciliter la gestion intégrée du développement de ces systèmes, il est nécessaire de disposer d'outils permettant une évaluation préalable rapide et efficace de l'impact. Dans ce travail de fin d'étude, trois modèles analytiques permettant d'estimer l'impact thermique généré par un système ouvert ont été évalués pour différents contextes d'exploitation.

Les résultats montrent que l'impact thermique dans un aquifère homogène avec un écoulement très faible est bien estimé par le modèle radial (MR) donné par Gelhar et Collins (1971) et Guimerà et al. (2007). Dans la gamme de paramètres étudiée, l'absence de prise en compte des transferts de chaleur verticaux par la solution analytique n'entraîne pas une surestimation significative de l'impact.

L'impact thermique d'une injection d'eau chaude avec un débit modéré ( $Q_{inj} \leq 0.6 \text{ l s}^{-1}$ ) dans un aquifère avec un écoulement modéré ( $v_a = 1 \text{ m j}^{-1}$ ) peut être estimé en aval du puits d'injection par l'utilisation d'un modèle plan tel que celui proposé par Domenico et Robbins (1985) et Hähnlein et al. (2010). Les meilleurs résultats sont alors obtenus en utilisant la largeur du panache en régime permanent donné par Kobus et Malhorn (1980) pour définir la largeur du plan. Le modèle linéaire utilisé par le Land allemand du Bade-Wurtemberg (Umweltministerium Baden-Württemberg, 2009) permet d'estimer correctement la longueur du panache thermique mais n'est pas adapté dans ce contexte pour estimer la largeur du panache. Lorsque l'injection devient plus importante, l'erreur commise par les modèles analytiques s'accroît, ce qui démontre que l'influence hydraulique de l'injection de fluide n'est pas représentée de manière satisfaisante par les modèles analytiques étudiés.

Pour des contextes hydrogéologiques caractérisés par un écoulement important ( $v_a = 10 \text{ m j}^{-1}$ ), le modèle linéaire permet une approximation satisfaisante de l'extension du panache, particulièrement dans le cas d'une forte injection et de transferts thermiques négligeables dans les couches supérieure et inférieure. Toutefois, le modèle analytique surestime l'impact thermique généré dans une proportion liée à l'importance des pertes thermiques dans les couches inférieure et supérieure.

Dans les limites précisées, ces modèles constituent un outil simple d'utilisation permettant d'obtenir une évaluation rapide de l'impact thermique généré par un système ouvert. La pertinence de leur utilisation, en fonction du contexte d'exploitation, pour la détermination préalable de l'impact thermique généré par le fonctionnement d'un système ouvert durant une saison (120 jours) est synthétisé dans le Tableau 8. Ces modèles peuvent ainsi être utilisés pour contribuer à une gestion intégrée efficace de ces installations en milieu urbain. Ce point dépend clairement de la définition des écarts de prédiction acceptables. Ceux-ci sont considérés comme marginaux lorsque l'erreur relative est inférieure à 10%. Ceux-ci peuvent être tolérés lorsque l'erreur relative est inférieure à 30% pour une évaluation de premier niveau, étant donné la présence d'autres incertitudes liées par exemple à l'hétérogénéité des caractéristiques hydrogéologiques.

		Contexte hydrogéologique		
		Écoulement très faible ( $v_a \ll 1 \text{ m j}^{-1}$ )	Écoulement modéré ( $v_a \sim 1 \text{ m j}^{-1}$ )	Écoulement fort ( $v_a \sim 10 \text{ m j}^{-1}$ )
Puissance du système	Petite habitation individuelle ( $q_h \sim 15 \text{ kW}$ )	<p><b>MR</b> Erreur marginale</p>	<p><b>MAP2</b> Erreur tolérable (aval du puits)</p> <p><i>Sous-estimation tolérable de la longueur</i> <i>Surestimation tolérable de la largeur</i></p>	<p><b>MAL</b> Utilisation conditionnée</p> <p><i>Aquifères de forte épaisseur : erreur marginale</i> <i>Autre : forte surestimation de la longueur, erreur tolérable sur la largeur</i></p>
	Habitation individuelle moyenne ( $q_h \sim 25 \text{ kW}$ )	<p><b>MR</b> Erreur marginale</p>	<p><b>MAP2</b> Erreur marginale (aval du puits)</p>	<p><b>MAL</b> Erreur tolérable</p> <p><i>Surestimation tolérable de la longueur</i> <i>Erreur marginale sur la largeur</i></p>
	Petit immeuble résidentiel ( $q_h \sim 80 \text{ kW}$ )	<p><b>MR</b> Erreur marginale</p>	<p><b>MAP2</b> Erreur marginale (aval du puits)</p>	<p><b>MAL</b> Erreur tolérable</p> <p><i>Surestimation tolérable de la longueur</i> <i>Erreur marginale sur la largeur</i></p>

Tableau 8 : Synthèse de l'applicabilité en fonction du contexte d'exploitation des modèles analytiques pour une détermination préalable de l'impact thermique généré par le fonctionnement d'un système ouvert durant une saison (120 jours).

# Bibliographie

---

- Adbeen, M.O. (2006). Ground-source heat pumps systems and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12(2008), 344-371.
- Attard, G., Rossier, Y., Winiarski, T., & Eisenlohr, L. (2016). Deterministic modeling of the impact of underground structures on urban groundwater temperature. *Science of The Total Environment*, 572, 986-994.
- Avdonin, N.A. (1964). Some formulas for calculating the temperature field of a stratum subject to thermal injection. *Neft' igaz* 7(3), 37-41.
- Banks, D. (2011). The application of analytical solutions to the thermal plume from a well doublet ground source heating or cooling scheme, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 44(2), 191-197.
- Bayer, P., Saner, D., Bolay, S., Rybach, L., Blum, P. (2012). Greenhouse gas emission savings of ground source heat pump systems in Europe: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(2), 1256-1267.
- Brunel C. (2011). Un maillage du territoire francais. *Insee Première*. 1333.
- Carslaw, H. S., & Jaeger, J. C. (1959). *Conduction of Heat in Solids*. 2<sup>nd</sup> ed., Oxford University Press, Oxford, UK.
- Castany, G. (1982) *Principes et méthodes de l'hydrogéologie*, Dunod université, Paris, 238 p.
- Clauser, C. (2006). Geothermal Energy In: K. Heinloth (ed), *Landolt-Börnstein, Group VIII: Advanced Materials and Technologies*, Vol. 3: Energy Technologies, Subvol. C: Renewable Energies. Springer Verlag, Heidelberg-Berlin, pp. 493-604.
- Chen, C.-S., Reddell, D.L. (1983). Temperature distribution around a well during thermal injection and a graphical technique for evaluating aquifer thermal properties. *Water Resources Research* 19(2), 351-363.
- Diersch, H. J. (2009). About the difference between the convective form and the divergence form of the transport equation. *Feflow white paper vol 1*. WASY GmbH, Berlin.
- Diersch, H. J. (2013). *FEFLOW*. Springer, Berlin.
- Domenico, P., Robbins, G. (1985). *A new method of contaminant plume analysis*. *Ground Water* 23 (4).
- Dupasquier, S. (2000). Contribution à l'étude du comportement thermo-hydraulique du stockage saisonnier de chaleur en aquifère, Thèse, Ecole polytechnique de Lausanne.
- Eiswirth, M., Wolf, L., & Hötzl, H. (2004). Balancing the contaminant input into urban water resources. *Environmental Geology*, 46(2), 246-256.
- Epting, J., & Huggenberger, P. (2013). Unraveling the heat island effect observed in urban groundwater bodies—Definition of a potential natural state. *Journal of hydrology*, 501, 193-204.
- Epting, J., Scheidler, S., Affolter, A., Borer, P., Mueller, M. H., Egli, L., ... & Huggenberger, P. (2017). The thermal impact of subsurface building structures on urban groundwater resources—A paradigmatic example. *Science of The Total Environment*, 596, 87-96.
- Galgaro, A., Cultrera, M. (2013). Thermal short circuit on groundwater heat pump, *Applied Thermal Engineering*, 57(1-2), 107-115.
- Gelhar, L. W., Collins. M. A. (1971). *General analysis of longitudinal dispersion in non-uniform flow*. *Water Resources Research* 7 (6).
- Guimerà, J., Ortuño, F., Ruiz, E., Pérez-Paricio, A. (2007). Influence of ground-source heat pumps on groundwater. *Conference Proceedings, European Geothermal Congress, Unterhaching, Germany, 30 May-1 June 2007*.
- Gringarten, A.C., Sauty, J.P. (1975). A theoretical study of heat extraction from aquifers with uniform regional flow. *Journal of Geophysical Research* 80(35), 4956-4962.

- Güven, O., Melville, J.G., Molz, F.J. (1983). An analysis of the effect of surface heat exchange on the thermal behavior of an idealized aquifer thermal energy storage system. *Water Resources Research* 19(3), 860–864.
- Hähnlein, S., Bayer, P. and Blum, P. (2010a). Review on the International Legal Status for the Thermal Use of Groundwater, World Geothermal Congress, Bali, Indonesia.
- Hähnlein, S., N. Molina-Giraldo, P. Blum, P. Bayer and P. Grathwohl. (2010b). *Ausbreitung von Kältefahnen im Grundwasser bei Erdwärmesonden*. *Grundwasser* 15 (2):123-133.
- Hecht-Méndez, J., Molina-Giraldo, N., Blum, P. and Bayer, P. (2010). Evaluating MT3DMS for Heat Transport Simulation of Closed Geothermal Systems. *Ground Water*, 48(5), 741-56
- Hein, P., Kolditz, O., Görke, U. J., Bucher, A., & Shao, H. (2016a). A numerical study on the sustainability and efficiency of borehole heat exchanger coupled ground source heat pump systems. *Applied Thermal Engineering*, 100, 421-433.
- Hein, P., Zhu, K., Bucher, A., Kolditz, O., Pang, Z., & Shao, H. (2016b). Quantification of exploitable shallow geothermal energy by using Borehole Heat Exchanger coupled Ground Source Heat Pump systems. *Energy Conversion and Management*, 127, 80-89.
- Herbert, A., Arthur, S., & Chillingworth, G. (2013). Thermal modelling of large scale exploitation of ground source energy in urban aquifers as a resource management tool. *Applied energy*, 109, 94-103.
- INSEE (2016), Territoire, INSEE références, édition 2016.
- Johansen, O. (1975). Thermal conductivity of soils. PhD thesis Univ. of Trondheim (Translation US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, NH, USA, 1977).
- Kammen, D.M., Sunter, D.A. (2016). City-integrated renewable energy for urban sustainability. *Science* 352, 922–928.
- Keim, B., Lang, U. (2008). Nutzung der Erdwärme mit Grundwasserwärmepumpen. Stuttgart: Umweltministerium Baden-Württemberg.
- Kinzelbach, W. (1987). *Numerische Methoden zur Modellierung des Transports von Schadstoffen im Grundwasser*. Edited by O. Verlag. 2 ed. München: Oldenbourg.
- Krakov, S., Fuchs-Hanusch, D. (2016). Fernkälteversorgung zur Vermeidung von Grundwassererwärmungen und Nutzungskonflikten am Beispiel der Stadt Linz–Bewertung auf Basis ÖWAV-Regelblatt 207 und qualitativer Nutzwertanalyse District cooling to avoid groundwater warming and user conflicts using the example of the city Linz–Evaluation with ÖWAV-norm 207 and qualitative efficiency analysis, *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 68(7-8), 354-367.
- Kobus, H., Mehlhorn, H. (1980). *Temperaturefelder im Grundwasser*, edited by I. f. U. baden-Württemberg.
- Lauwerier, H.A. (1955). The transport of heat in an oil layer caused by the injection of hot fluid. *Applied Scientific Research, Section A*, 5 (2–3) 145–150. Lippmann, M.J., Tsang, C.F. (1980). Ground-water use for cooling: Associated aquifer temperature changes. *Ground Water* 18(5), 452–458.
- Lo Russo, S., Civita, M.V. (2009) Open-loop groundwater heat pumps development for large buildings: A case study, *Geothermics*, 38(3), 335-345.
- Lo Russo, S., Taddia, G., & Verda, V. (2012). Development of the thermally affected zone (TAZ) around a groundwater heat pump (GWHP) system: A sensitivity analysis. *Geothermics*, 43, 66-74.
- Lo Russo, S., Gnani, L., Rocca, E., Taddia, G., & Verda, V. (2014). Groundwater Heat Pump (GWHP) system modeling and Thermal Affected Zone (TAZ) prediction reliability: Influence of temporal variations in flow discharge and injection temperature. *Geothermics*, 51, 103-112.
- Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte [en ligne]. Journal officiel de la République française, 18 août 2015, n° 0189, p. 14263. Disponible sur le site Legifrance : <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=LEGITEXT000031047847&dateTexte=20180620> (consulté le 20 juin 2018)
- Lund, J.W., Boyd, T.L. (2016). Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review, *Geothermics*, 60, 66-93.

- Malofeev, G.E. (1960). Calculation of the temperature distribution in a formation when pumping hot fluid into a well. *Neft'i Gaz* 3(7), 59–64.
- Menberg, K., Bayer, P., Zosseder, K., Rumohr, S., & Blum, P. (2013). Subsurface urban heat islands in German cities. *Science of the total environment*, 442, 123-133.
- Piga, B., Casasso, A., Godio, A., Sethi, R. (2017). Thermal Impact Assessment of Groundwater Heat Pumps (GWHPs): Rigorous vs. Simplified Models, *Energies*, 10, 1385.
- Rafferty, K. (1998). Well-pumping issues in commercial groundwater heat pump systems. *Ashrae Transactions*, 104.
- Rafferty, K.D. (2009). commercial open loop heat pump systems. *ASHRAE Journal*, March: 52-62.
- Rauch, W. (1992). *Ausbreitung von Temperaturanomalien im Grundwasser*. Innsbruck: Universität Innsbruck.
- Rybach, L. (2003). Geothermal energy: sustainability and the environment, *Geothermics*, 32(4-6), 463-470.
- Sciacovelli, A., Guelpa, E., & Verda, V. (2014). Multi-scale modeling of the environmental impact and energy performance of open-loop groundwater heat pumps in urban areas. *Applied Thermal Engineering*, 71(2), 780-789.
- Stauffer, F., Bayer, P., Blum, P., Giraldo, N. M., & Kinzelbach, W. (2013). *Thermal use of shallow groundwater*. CRC Press.
- Umweltministerium Baden-Württemberg. (2009). Arbeitshilfe zum Leitfaden zur Nutzung von Erdwärme mit Grundwasserwärmepumpen. In: U. Baden-Württemberg (Editor), Stuttgart.
- United Nations (2014), Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2014). *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights (ST/ESA/SER.A/352)*.
- Voigt, H.D., Haefner, F. (1987). Heat transfer in aquifers with finite caprock thickness during a thermal injection process. *Water Resources Research* 23(12), 2286–2292.
- Warner, D., Algan, U. (1984). Thermal Impact of Residential Ground-Water Heat Pumps, *Ground Water*, 22(1), 6-12.
- Woodside, W., Messmer, J.H. (1961). Thermal conductivity of porous media. 1. Unconsolidated sands. *Journal of Applied Physics* 32(9), 1688–1698.
- Yang, S.Y., Yeh, H.D. (2008). An analytical solution for modeling thermal energy transfer in a confined aquifer system. *Hydrogeology Journal* 16, 1507–1515.

# Annexe

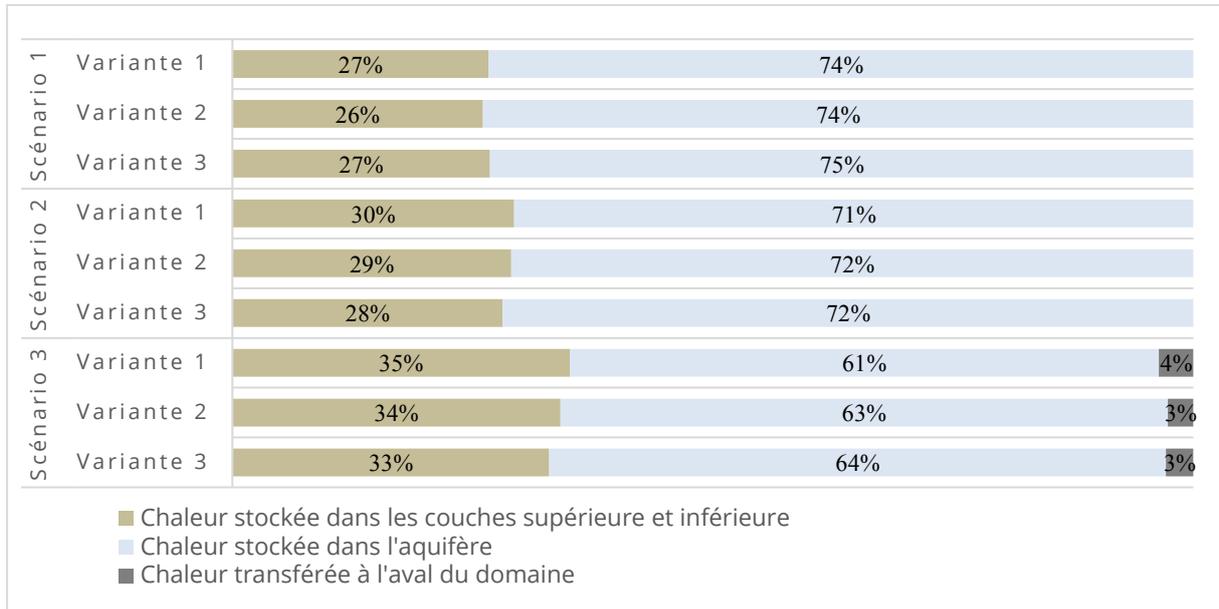


Figure 11 : Répartition de l'énergie injectée dans les modèles numériques tridimensionnels entre énergie stockée dans l'aquifère, dans les couches supérieure et inférieure et sortant du domaine