

Z A B R

Zone Atelier Bassin du Rhône

Élaboration d'un outil opérationnel pour la maîtrise des impacts des ouvrages d'infiltration d'eau de ruissellement pluvial sur le régime thermique des nappes phréatiques

Rapport final

Action n° 15 du Programme 2009 au titre de l'accord cadre Agence de l'Eau ZABR

Auteur : Arnaud Foulquier (chargé de mission)

Sur la base des travaux et avec la contribution de :

LEHF (Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes Fluviaux, UCBL1) : Florian Malard, Pierre Marmonier

LTHE, Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement, Université de Grenoble :
André Baudoin, Jean-Paul Gaudet

LSE, Laboratoire des Sciences de l'Environnement, ENTPE Vaulx-en-Velin : Rafael Angulo-Jaramillo, Thierry Winiarski

LGCIÉ, Laboratoire de génie civil et Ingénierie environnementale, INSA - Université de Lyon : Sylvie Barraud

Juin 2010



SOMMAIRE

1. Introduction.....	4
2. Méthodologie	9
2.1. <i>Présentation du modèle</i> :	9
2.2. <i>Choix du site modélisé</i> :	9
2.3. <i>Construction du modèle</i> :	9
2.4. <i>Calage du modèle</i>	10
2.5. <i>Simulations réalisées</i>	12
2.5.1. <i>Influence de la taille du bassin versant</i>	12
2.5.2. <i>Influence de l'épaisseur de zone non saturée</i>	12
2.5.3. <i>Processus d'échanges de chaleur au sein de la zone non saturée : exemple théorique</i>	13
2.6. <i>Analyses réalisées</i>	13
2.6.1. <i>Modification de la température des eaux infiltrées lors de leur passage à travers la zone non saturée</i>	13
2.6.2. <i>Amplitude thermique annuelle des eaux souterraines</i>	13
2.6.3. <i>Comparaison des profils de température au sein de la zone non saturée pour un transport de chaleur par advection ou par conduction</i>	13
3. Résultats.....	15
3.1. <i>Calage du modèle d'écoulement d'eau et transport de chaleur en zone non saturée-saturée</i>	15
3.2. <i>Influence de la taille du bassin versant</i>	17
3.3. <i>Influence de l'épaisseur de zone non saturée</i>	18
4. Discussion et conclusions	22
4.1. <i>Modélisation numérique du transport d'eau et de chaleur sous un ouvrage d'infiltration</i>	22
4.2. <i>Influence de la taille du bassin versant</i>	23
4.3. <i>Epaisseur de la zone non saturée</i>	23
5. Perspectives.....	25
6. Références bibliographiques :	26

Liste des tableaux

Tableau 1 - Valeurs des paramètres retenues à l'issue de la procédure de calage du modèle	12
--	----

Liste des figures

Figure 1 - Evolution de la température (A) moyenne annuelle de l'air à la station météo de Bron, (B) des eaux souterraines à l'amont du bassin d'infiltration Django Reinhardt (enregistrement au pas de temps horaire).....	5
Figure 2 - Température de la nappe de l'agglomération lyonnaise. Les points rouges (n=179) correspondent aux mesures de température utilisées pour l'extrapolation spatiale à l'échelle de l'agglomération.....	6
Figure 3 - Comparaison des chroniques de température des eaux souterraines à 1 m sous la surface libre de la nappe (A) à l'amont (non influencé par l'infiltration artificielle d'eau pluviale) et (B) à l'aval du bassin d'infiltration Django Reinhardt (Chassieu, Rhône, France)	7
Figure 4 - Présentation du milieu modélisé en 2D.....	10
Figure 5 - Comparaison des courbes mesurées et simulées à une distance de 30 m de l'ouvrage d'infiltration dans le sens d'écoulement de la nappe à (A) 1 m sous la surface libre de la nappe et (B) 5 m sous la surface libre de la nappe.....	15
Figure 6 - Variation de l'amplitude thermique annuelle des eaux souterraines avec la profondeur sous la surface libre de la nappe.....	16
Figure 7 - Comparaison des profils de température verticaux pour un milieu seulement soumis à un transfert de chaleur par conduction (A) et sous un bassin d'infiltration d'eau pluviale seulement soumis à un transfert de chaleur par advection pour un bassin versant de 185 (B), 123 (C) et 62 (D) ha.....	17
Figure 8 - Influence de la taille du bassin versant sur la perturbation thermique des eaux souterraines : cas d'une épaisseur de zone non saturée de 13 m.....	18
Figure 9 - Simulation numérique de l'évolution de la température des eaux souterraines à l'aval d'un ouvrage d'infiltration : exemple théorique. Les courbes correspondent à la température des eaux souterraines à 1 m sous la surface libre de la nappe à différentes distances à l'aval du bassin d'infiltration. La ligne horizontale correspond à la température du flux de nappe durant la simulation. Les lignes verticales délimitent les périodes de temps correspondant à chacun des cycles d'infiltration-drainage simulés.....	19
Figure 10 - Modification de la température des eaux d'infiltration au sein de la zone non saturée. Les barres verticales correspondent aux variations de température des eaux d'infiltration lors de l'écoulement à travers la zone non saturée entre 0 et 13 m de profondeur, 0 et 5 m, 5 et 10 m, 10 et 13 m.....	19
Figure 11 - Influence de l'épaisseur de zone non saturée sur la perturbation thermique engendrée par un ouvrage d'infiltration connecté à un bassin versant de (A) 185 ha et (B) 123 ha.....	20
Figure 12 - Influence de la taille du bassin versant et de l'épaisseur de zone non saturée sur l'amplitude thermique annuelle des eaux souterraines.....	21

1. Introduction

La moitié de la population mondiale vit désormais en ville et cette proportion devrait atteindre 60% d'ici à 2030 (United Nations 2007). Ce pourcentage est d'ailleurs plus élevé dans les pays européens pour lesquels 80% de la population habite actuellement en zone urbaine (EEA 2006). De nombreuses villes à travers le monde dépendent des eaux souterraines et l'on estime que les besoins en eau potable de 2 milliards de personnes dans le monde sont assurés par les eaux souterraines (Morris et al. 2003). Dans ce contexte particulier, toute modification du régime thermique des eaux souterraines constitue un problème crucial puisque la température est une variable clef affectant la majorité des processus physico-chimiques et biologiques tels que l'écoulement des eaux ou les activités microbiennes au sein des aquifères (Chapelle 1993, Jones et Mulholland 2000, Anderson 2005).

L'augmentation de la température des eaux souterraines sous les grandes agglomérations urbaines est désormais un phénomène avéré dont l'ampleur est de nature à modifier la diversité biologique, le fonctionnement biogéochimique et la qualité des eaux contenues dans les aquifères urbains dont dépendent les populations pour leurs besoins en eau potable (Karl et al. 1988, Allen et al. 2003, SDUD 2005, Taniguchi 2006). De nombreuses études ont ainsi rapporté que la température des eaux souterraines sous de grandes agglomérations urbaines est généralement plus élevée de 2 à 3°C mais aussi plus hétérogène dans le temps et l'espace que dans les zones périphériques moins densément urbanisées (Allen et al. 2003, Ferguson et Woodbury 2004, SDUD 2005, Taniguchi 2006).

Les causes du réchauffement observé sont multiples, non indépendantes et interviennent à différentes échelles spatiales : globale (réchauffement du climat), locale (îlot de chaleur urbain) et ponctuelles (pertes de chaleur par les habitations, pompes à chaleur, ouvrages d'infiltration).

En l'absence de perturbation, les transferts de chaleur de la surface vers les eaux souterraines ont lieu principalement par conduction à travers le sol et la zone non saturée. Ce mécanisme de transfert implique que les fortes variations de température observées en surface sont rapidement amorties dans les premiers mètres du sol et de la zone non saturée, l'amplitude thermique annuelle de surface diminuant de manière exponentielle avec la profondeur sous la surface. Les aquifères présentent ainsi une grande stabilité thermique avec une température moyenne proche de la température moyenne annuelle de l'air. **Dans un contexte de réchauffement global**, l'augmentation des températures moyennes annuelles de surface est donc transmise vers les eaux souterraines par conduction à travers le sol et la zone non saturée. A titre d'exemple, l'analyse des températures moyennes annuelles de l'air enregistrées par la station météo de Bron de 1970 à 2007 indique une augmentation de la température de l'air à un taux d'environ 0.06 °C par an (Figure 1A). En comparaison, les chroniques de température enregistrées au niveau d'un piézomètre situé à l'amont du bassin d'infiltration Django Reinhardt sur une période s'étalant de janvier 2003 à janvier 2010 indiquent un réchauffement des eaux souterraines de 0.04°C par an pour la période considérée (Figure 1B). Il est à noter que le taux de réchauffement observé pour la station météo de Bron (0.06 °C/an) est 10 fois supérieur au taux de 0.006°C/an enregistré sur les 100 dernières années et attribué au phénomène de réchauffement global. Cependant, ce taux plus élevé entre dans la gamme de valeurs observées pour un certain nombre de grandes agglomérations à travers le monde.

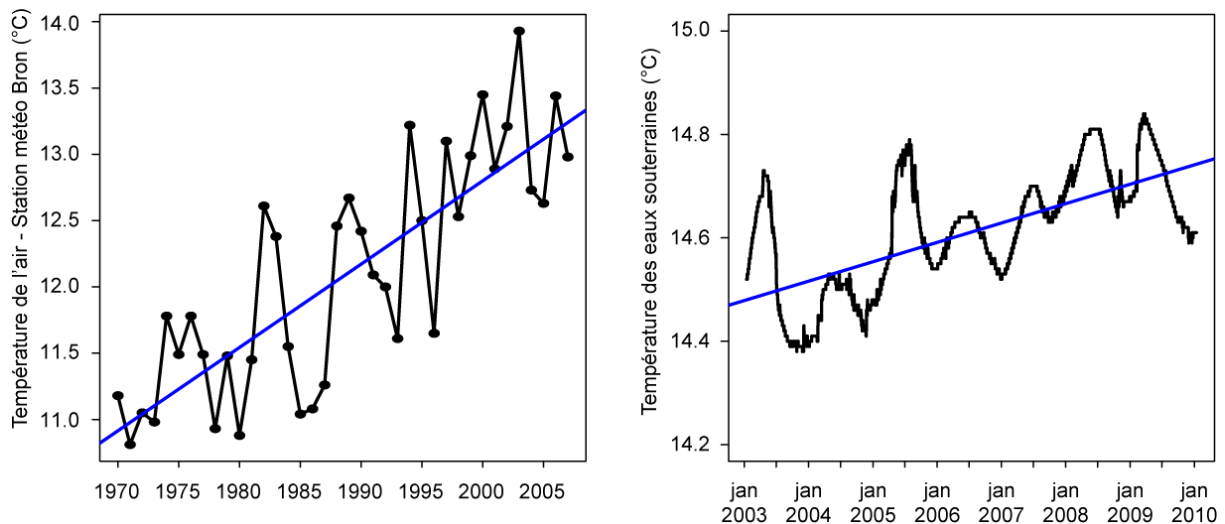


Figure 1 : Evolution de la température (A) moyenne annuelle de l'air à la station météo de Bron, (B) des eaux souterraines à l'amont du bassin d'infiltration Django Reinhardt (enregistrement au pas de temps horaire).

Le réchauffement global est en effet **localement amplifié au niveau des zones urbaines** du fait que les surfaces imperméabilisées présentent des caractéristiques thermiques impliquant des capacités d'emmagasinement et de restitution de l'énergie sous forme de chaleur plus importantes que les surfaces naturelles. D'un point de vue climatique les zones urbaines sont ainsi caractérisées par un phénomène désigné sous le terme d'« îlot de chaleur urbain » (Bornstein 1968) se traduisant par une température de l'air au sein des villes jusqu'à 10°C plus élevée que les valeurs enregistrées dans les zones alentours non urbanisées. Ces augmentations de température se propageant en profondeur par conduction expliquent en partie le réchauffement des eaux souterraines rapporté pour de nombreux centres urbains. Ce phénomène est également valable pour l'agglomération lyonnaise et est illustré par la carte de température des eaux souterraines présentée en figure 2 pour un certain nombre de sites. On peut ainsi observer un gradient de température de la périphérie vers le centre-ville tendant vers un réchauffement de 13 à 18°C. Il est cependant à noter que les températures enregistrées présentent également une **grande hétérogénéité liée aux perturbations associées à l'impact thermique de sources ponctuelles de chaleur** telles que les immeubles, les pompes à chaleur ou les ouvrages d'infiltration. La multiplication des sources ponctuelles de chaleur est telle que leurs effets cumulés ne peuvent plus être négligés. Les répercussions sont principalement écologiques avec une modification du fonctionnement biogéochimique des écosystèmes souterrains mais également économiques dans le cadre de l'utilisation des aquifères pour les prélèvements destinés aux pompes à chaleur dont le fonctionnement repose sur la stabilité thermique des eaux souterraines. Pourtant, très peu de données permettent aujourd'hui de documenter et comprendre l'impact thermique de sources ponctuelles telles que des immeubles, des pompes à chaleur ou des ouvrages d'infiltration.

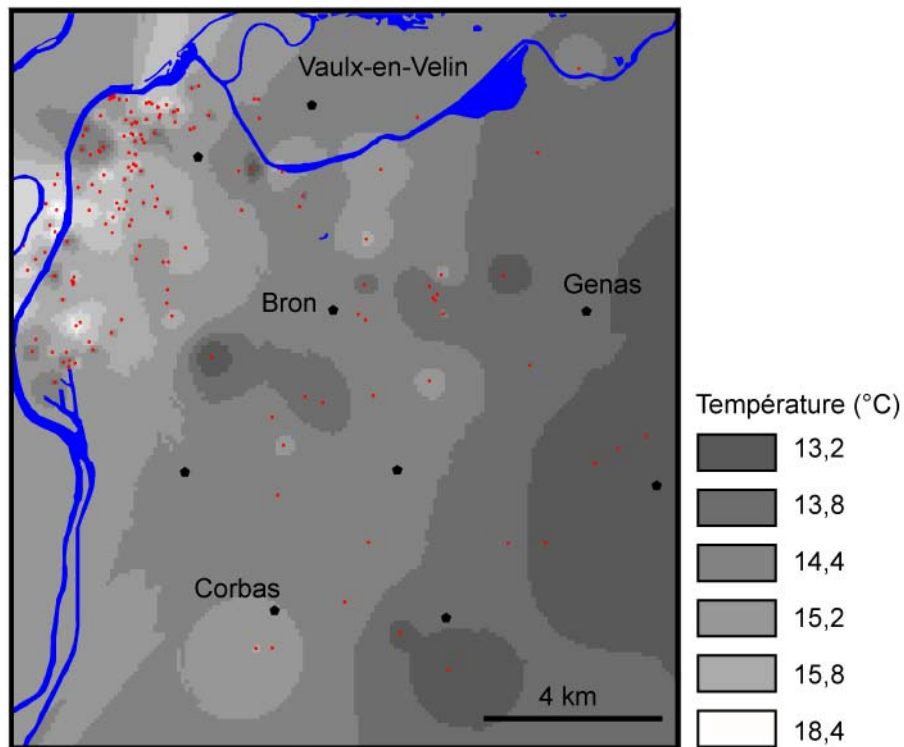


Figure 2 : Température de la nappe de l'agglomération lyonnaise. Les points rouges (n=179) correspondent aux mesures de température utilisées pour l'extrapolation spatiale à l'échelle de l'agglomération.

Les pratiques d'infiltration artificielle d'eau de ruissellement pluvial se développent dans un certain nombre de villes à travers le monde puisqu'elles constituent un moyen efficace de limiter les volumes d'eau de ruissellement lors des épisodes pluvieux (minimisant ainsi les risques d'inondation) tout en rechargeant les aquifères urbains fortement sollicités par les prélèvements dédiés à la consommation en eau potable, l'irrigation ou l'industrie. Ces pratiques d'infiltration d'eau de ruissellement pluvial qui consistent à infiltrer rapidement de grandes quantités d'eau sur des surfaces réduites augmentent considérablement le transport de chaleur par advection vers les eaux souterraines et modifient drastiquement le régime thermique des aquifères urbains (Datry et al. 2005, Foulquier et al. 2007). A travers l'analyse des chroniques de température des eaux souterraines enregistrées sur 15 sites de l'agglomération lyonnaise équipés dans le cadre de l'Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine (OTHU, <http://www.graie.org/othu>), Foulquier et al. (2007) ont ainsi montré que l'infiltration artificielle d'eau pluviale augmentait considérablement les variations de température des eaux souterraines aussi bien à l'échelle des évènements pluvieux qu'à une échelle annuelle. Sous les ouvrages d'infiltration principalement soumis à un transfert de chaleur par advection, l'amplitude thermique annuelle des eaux souterraines est en moyenne 9 fois supérieure à celle observée sous des sites de référence non soumis à l'infiltration artificielle et pour lesquels le transfert de chaleur a lieu principalement par conduction. Le refroidissement hivernal et le réchauffement estival des eaux souterraines sous les ouvrages d'infiltration est tel que la température des eaux souterraines peut respectivement atteindre des valeurs de 10°C et 20°C durant ces périodes (Figure 3). Ces variations importantes sont susceptibles de fortement modifier les activités microbiennes, favoriser la persistance de

micro-organismes pathogènes tout en étant incompatibles à la survie de la faune d'invertébrés souterrains adaptée à une grande stabilité thermique des eaux souterraines avec des variations de température à l'échelle annuelle généralement inférieures à 2°C. Sous les ouvrages d'infiltration où le transport de chaleur par advection est prédominant, une relation empirique a été établie et indique que l'amplitude thermique annuelle des eaux souterraines augmente de façon logarithmique avec la taille du bassin versant associé à l'ouvrage. Ce résultat implique que d'un point de vue opérationnel, la taille du bassin versant constitue un levier potentiel dans le cadre d'un objectif de diminution de la perturbation thermique engendrée par les pratiques d'infiltration artificielle d'eau pluviale. Foulquier et al. (2007) ont également montré que l'influence thermique des événements pluvieux dépendait également des processus d'échange de chaleur au sein de la zone non saturée entre les eaux d'infiltration et les sédiments. La zone non saturée apparaît ainsi potentiellement comme une zone tampon permettant d'atténuer la perturbation thermique des eaux souterraines sous les ouvrages d'infiltration.

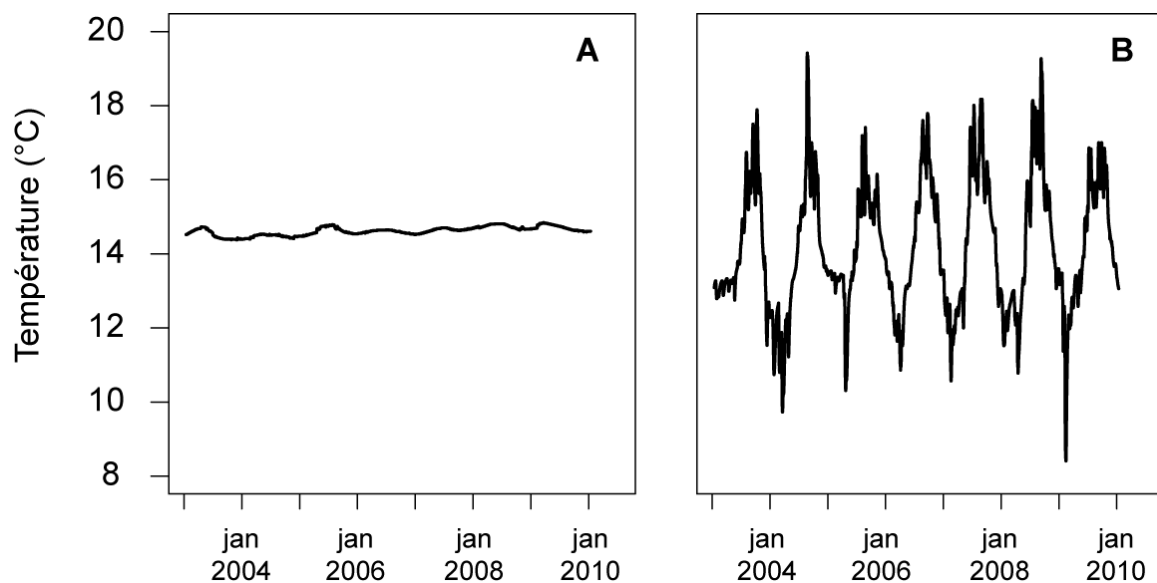


Figure 3 : Comparaison des chroniques de température des eaux souterraines à 1 m sous la surface libre de la nappe (A) à l'amont (non influencé par l'infiltration artificielle d'eau pluviale) et (B) à l'aval du bassin d'infiltration Django Reinhardt (Chassieu, Rhône, France).

Ces travaux ont donc permis d'identifier la taille du bassin versant et l'épaisseur de zone non saturée comme de potentiels leviers opérationnels en termes de gestion des eaux de ruissellement pluvial. Cependant, la possibilité d'établissement de règles de gestion basées sur ces seules relations empiriques est limitée par un certain nombre de verrous scientifiques liés à la compréhension des mécanismes mis en cause lors de l'infiltration artificielle d'eau pluviale et du transfert de chaleur associé vers les eaux souterraines. La levée de ces verrous nécessite une étape de modélisation des écoulements d'eau et du transport de chaleur sous un ouvrage d'infiltration. Les premiers essais de modélisation ont été réalisés dans le cadre du programme ECOPLUIES (<http://www.graie.org/ecopluiies>) à une échelle événementielle (Chastanet et al. 2008): ils ne permettent pas d'aborder la perturbation thermique engendrée à une échelle saisonnière par un ouvrage d'infiltration.

L'objectif du présent rapport est d'évaluer l'influence de la taille du bassin versant et de l'épaisseur de zone non saturée sur la perturbation thermique engendrée par les pratiques d'infiltration artificielle d'eau pluviale à travers une simulation numérique du transport d'eau et de chaleur sous un bassin d'infiltration d'eau pluviale à l'échelle saisonnière. Cette modélisation doit permettre de préconiser des règles de gestion pour ces deux paramètres (taille du bassin versant et épaisseur de zone non saturée) afin de limiter l'augmentation de l'amplitude thermique saisonnière des nappes à l'aplomb des bassins d'infiltration. Il s'agit plus précisément de définir les tailles de bassin versant et les épaisseurs de zone non saturée souhaitables afin de ne pas dépasser des amplitudes thermiques annuelles dans la nappe de 2 et 4°C.

L'étape de construction et de calage du modèle ainsi que les analyses et simulations réalisées sont présentées dans la première partie de ce rapport. La deuxième partie présente les résultats obtenus concernant le calage du modèle et les simulations numériques visant à déterminer l'influence de la taille du bassin versant et de l'épaisseur de zone non saturée sur l'amplitude thermique annuelle des eaux souterraines. La troisième partie présente les conclusions de ce rapport ainsi que les règles de gestion découlant de ces travaux. Enfin, les perspectives de recherches émergeant à l'issue de ces travaux sont présentées concernant les améliorations potentielles à apporter au modèle mais également les possibilités d'utilisation de ce modèle dans son état actuel.

2. Méthodologie

Dans cette partie, le terme *mesuré(e)* désigne des données enregistrées à partir d'appareils de mesures installés sur le terrain. Les termes *calculé(e)* et *simulé(e)* désignent des données issues des simulations numériques détaillées ci-après.

2.1. Présentation du modèle :

Une modélisation numérique a été réalisée afin de simuler les transferts de chaleur de la surface vers les eaux souterraines qui sont associés au fonctionnement d'un bassin d'infiltration d'eau pluviale. Le code de calcul par éléments finis SUTRA (Version 2D3D.1 ; Voss et Provost, 2002) développé par l'USGS a été utilisé afin de simuler le transport d'eau et de chaleur en zone non-saturée et saturée à l'aplomb d'un bassin d'infiltration d'eau pluviale.

2.2. Choix du site modélisé :

Le modèle a été construit de manière à reproduire les caractéristiques du bassin d'infiltration d'eau pluviale Django Reinhardt situé sur la commune de Chassieu (69). Ce bassin d'infiltration présente une surface de 1 ha et reçoit à chaque épisode pluvieux les eaux de ruissellement pluvial collectées sur un bassin versant de 185 ha (coefficient d'imperméabilisation = 0.7). La nappe phréatique est située à 13 m sous la surface du bassin d'infiltration. Ce site atelier est lourdement instrumenté dans le cadre de l'Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine (Bertrand-Krajewski et al. 2008) et des enregistrements en continu à long terme et à une échelle temporelle fine sont disponibles concernant un ensemble de paramètres nécessaires au calage du modèle. Le débit, la conductivité électrique et la température des eaux de ruissellement pluvial sont mesurés en continu (pas de temps : 2 minutes) à l'entrée du bassin d'infiltration. Le dispositif de mesure sur les eaux de ruissellement pluvial est détaillé par Barraud et al. (2002) et Bertrand-Krajewski et al. (2008). Le niveau de la nappe, la conductivité électrique et la température des eaux souterraines sont mesurés en continu (pas de temps : 1h) grâce à des sondes multi-paramètres de type YSI 600 XLM. Le dispositif de mesure sur les eaux souterraines est détaillé par Foulquier (2009).

2.3. Construction du modèle :

Le maillage réalisé est construit en deux dimensions dans le plan de symétrie du bassin d'infiltration parallèle au sens d'écoulement de la nappe (Figure 4). Le maillage s'étend sur une distance de 1000 m dans la direction horizontale et 30 m dans la direction verticale. Le modèle comprend des mailles horizontales dont la taille varie entre 2 et 10 m et des mailles verticales dont la taille varie entre 0.1 et 0.5 m. La zone dédiée à l'infiltration s'étend sur 100 m, ses limites amont et aval étant respectivement situées à 400 et 500 m des limites amont et aval du modèle.

Les conditions aux limites sont de type pression hydrostatique imposée aux faces verticales amont et aval du modèle. La condition limite au niveau de la zone d'infiltration est de type flux imposé. Toutes les autres surfaces limites sont considérées imperméables. La surface libre de la nappe est située à 13 m de profondeur. Un gradient hydraulique de 3.4 ‰ est imposé sur la base des différences de niveaux piézométriques enregistrées dans deux

piézomètres situés respectivement à 300 m à l'amont et 150 m à l'aval du bassin d'infiltration Django Reinhardt dans le sens d'écoulement de la nappe.

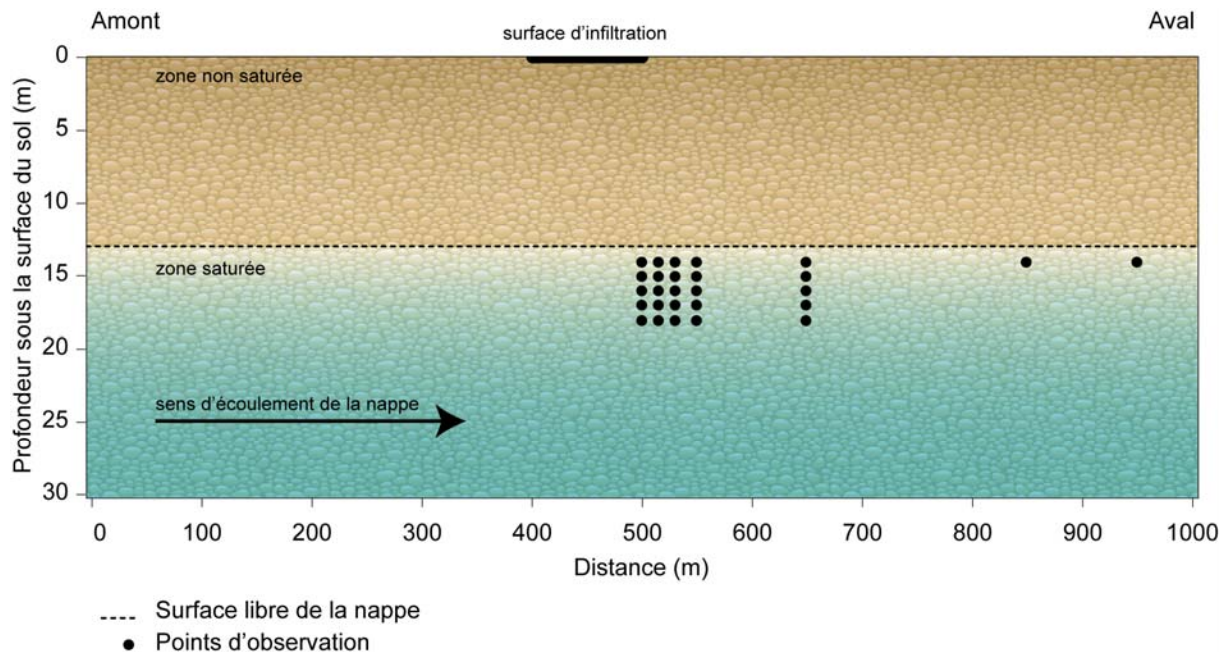


Figure 4 : Présentation du milieu modélisé en 2D.

2.4. Calage du modèle

Les enregistrements en continu retenus pour simuler le régime thermique des eaux souterraines sous le bassin d'infiltration Django Reinhardt couvrent une période s'étalant du 26 novembre 2003 au 28 février 2005. La durée importante de cette période (> 1 an) devait permettre de suivre l'évolution des températures à une échelle annuelle avec pour objectif d'obtenir un calage convenable aussi bien à une échelle événementielle que saisonnière.

Les chroniques de débit et de température des eaux pluviales enregistrées en entrée de bassin d'infiltration ont été analysées et, au total, 64 épisodes pluvieux ont été retenus sur la période considérée. La simulation numérique consiste donc en 64 cycles d'infiltration-drainage. Pour chaque phase d'infiltration, la température des eaux infiltrées correspond pour un épisode pluvieux donné à la moyenne de la température des eaux pluviales (mesurée en entrée de bassin d'infiltration) sur la durée nécessaire à l'infiltration du volume d'eau pluviale arrivant en entrée de bassin lors de l'épisode pluvieux considéré. La durée de chaque phase d'infiltration a été estimée sur la base des volumes d'eaux pluviales mesurés en entrée de bassin d'infiltration rapportés au débit d'infiltration de $0.14 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ mesuré sur le bassin d'infiltration Django Reinhardt par Le Coustumer et Barraud (2007). Sur la base de ce débit d'infiltration mesuré ($0.14 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ sur une surface de 1 ha), le débit imposé dans la zone dédiée à l'infiltration (surface de 100 m) au sein du modèle est fixé à $1.4 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ pour chacune des 64 phases d'infiltration.

Au cours des simulations, la température du flux de nappe arrivant par la face amont du modèle est fixée à 14°C . Cette valeur correspond à la température moyenne des eaux souterraines définie par l'analyse de chroniques de température mesurée à 1m sous la surface

libre de la nappe pour 6 sites de l'agglomération lyonnaise non impactés par l'infiltration artificielle d'eau de ruissellement pluvial.

En condition non-saturée, la pression capillaire (p_c) et la perméabilité relative de l'eau (k_r) sont conformes aux relations de Van-Genuchten :

$$S^* = (S - S_{res}) / (1 - S_{res}) = [1 + (a \cdot p_c)^n]^{n/(n-1)} \quad (1)$$

et

$$k_r = (S^*)^{1/2} \cdot [1 - (1 - (S^*)^{n/(n-1)})^{(n-1)/n}]^2 \quad (2)$$

avec S : degré de saturation du milieu

S_{res} : degré de saturation résiduel

P_c : pression capillaire

k_r : perméabilité relative de l'eau

Une étape de calage préliminaire a été réalisée sur la base d'un transport de soluté à partir de chroniques de conductivité électrique des eaux souterraines enregistrées à l'aval du bassin d'infiltration Django Reinhardt. Ces simulations numériques ont permis d'évaluer la gamme de valeurs potentielles des paramètres hydrauliques tels que la porosité ou les perméabilités horizontales et verticales. Cette étape a notamment mis en évidence la nécessité de prendre en compte une forte anisotropie entre les perméabilités horizontales et verticales avec une perméabilité verticale 100 fois plus faible que la perméabilité horizontale.

Le calage du modèle a ensuite été réalisé dans le cadre d'un transport de chaleur afin d'ajuster les valeurs des paramètres hydrauliques et thermiques. Il est à noter que la procédure de calage du modèle a nécessité un important travail de recherche notamment dans le cadre des simulations de transport de chaleur en vue d'une restitution de l'amplitude thermique annuelle des eaux souterraines. La capacité du modèle à reproduire les variations de température à une échelle annuelle nécessite, par définition, de réaliser une simulation sur la totalité du cycle comptant 64 phases d'infiltration-drainage. Cette étape est particulièrement coûteuse en temps puisque la durée nécessaire au calcul pour ces 64 phases est d'environ 38 heures et nécessite d'être répétée de nombreuses fois afin d'obtenir un calage convenable du modèle.

Les valeurs retenues à l'issue de ces simulations sont présentés dans le tableau 1.

Paramètres d'écoulement	Valeur retenue	Unité
Porosité	13	%
Perméabilité horizontale	1.70E-09	m ²
Perméabilité verticale	2.00E-11	m ²
Dispersion longitudinale	2	m
Dispersion transversale	0.02	m
Paramètres de Van-Genuchten	Saturation résiduelle	5
a	1.00E-04	(m·s ²)/kg
n	2	-
Propriétés de la matrice solide		
Masse volumique	2000	kg/m ³
Conductivité thermique	2	J/(m·°C·s)
Chaleur spécifique	800	J/(kg·°C)
Propriétés de l'eau		
Masse volumique	1000	kg/m ³
Conductivité thermique	0.6	J/(m·°C·s)
Chaleur spécifique	4182	J/(kg·°C)

Tableau 1 : Valeurs des paramètres retenues à l'issue de la procédure de calage du modèle.

2.5. Simulations réalisées

2.5.1. Influence de la taille du bassin versant

Pour un épisode pluvieux donné, le volume d'eaux pluviales arrivant en entrée de bassin d'infiltration dépend de la taille du bassin versant connecté à l'ouvrage. L'influence d'une réduction de la taille du bassin versant sur le régime thermique des eaux souterraines a donc été simulée en diminuant les volumes d'eaux pluviales à infiltrer lors de chacune des 64 phases d'infiltration utilisées lors de la procédure de calage du modèle (correspondant à un bassin versant de 185 ha). Deux simulations ont donc été réalisées, la première correspondant à un bassin versant de 123 ha (185*2/3), la seconde à un bassin versant de 62 ha (185*1/3).

2.5.2. Influence de l'épaisseur de zone non saturée

Afin d'évaluer l'influence de l'épaisseur de zone non saturée sur la perturbation thermique engendrée par l'infiltration artificielle d'eau pluviale, les résultats issus des simulations numériques présentées précédemment (influence de la taille du bassin versant) ont été comparés aux résultats obtenus dans le cadre de simulations présentant une épaisseur de zone non saturée abaissée à 5m. Cette étape a nécessité la réalisation d'un nouveau maillage présentant une discrétisation verticale fine entre 4 et 6 m sous la surface du sol, la surface libre de la nappe étant située à 5 m sous la surface du sol. L'ensemble des valeurs des paramètres obtenues à l'issue du calage du modèle et présentées au tableau 1 a cependant été conservé. Cette série de 3 simulations numériques permet donc d'évaluer les effets de la taille

du bassin versant (62, 123 et 185 ha) sur le régime thermique des eaux souterraines pour deux conditions d'épaisseur de zone non saturée (13 et 5 m).

2.5.3. Processus d'échanges de chaleur au sein de la zone non saturée : exemple théorique

L'impact des processus d'échanges de chaleur au sein de la zone non saturée entre les eaux d'infiltration et la matrice solide sur les variations de température des eaux souterraines peut être difficile à appréhender dans le cadre des simulations précédentes pour lesquelles les durées et les températures d'infiltration varient fortement pour les 64 phases d'infiltration. Une simulation numérique basée sur 11 cycles d'infiltration-drainage théoriques a donc été réalisée afin d'illustrer ces processus d'échanges de chaleur. Pour chaque cycle d'infiltration-drainage, la phase d'infiltration s'étend sur 24h suivie de 14 jours de drainage (30 jours de drainage pour le cycle 11). Seule la température des eaux infiltrées varie de la manière suivante :

- cycle 1 : 14°C (température des eaux infiltrées à l'équilibre avec la zone non saturée-saturée)
- cycles 2 à 5 : 20°C
- cycles 6 à 7 : 14°C
- cycles 8 à 11 : 8°C

2.6. Analyses réalisées

2.6.1. Modification de la température des eaux infiltrées lors de leur passage à travers la zone non saturée

La modification de température des eaux d'infiltration lors de leur passage à travers la zone non saturée a été évaluée sur la base des profils verticaux de température calculés au cours de la simulation correspondant à un bassin versant de 185 ha et une épaisseur de zone non saturée de 13 m. Seuls les épisodes pluvieux pour lesquels les eaux d'infiltration atteignent le toit de la nappe à la fin de la phase d'infiltration ont été retenus. Ces profils verticaux de température en fin de phase d'infiltration ont été utilisés afin de calculer la variation de température des eaux d'infiltration entre 0-13 m de profondeur, 0-5, 5-10 et 10-13 m de profondeur.

2.6.2. Amplitude thermique annuelle des eaux souterraines

L'amplitude thermique annuelle des eaux souterraines ($T_{\max} - T_{\min}$) est calculée sur les chroniques de température mesurées ou simulées à partir des moyennes mensuelles.

2.6.3. Comparaison des profils de température au sein de la zone non saturée pour un transport de chaleur par advection ou par conduction

Les profils de température verticaux calculés sous la zone d'infiltration de 0 à 30 m sous la surface du sol lors des simulations numériques permettent d'observer les effets d'un transfert de chaleur par advection par les eaux d'infiltration. Ces profils de température ont été comparés à ceux obtenus pour un système non soumis à l'infiltration artificielle d'eau pluviale pour lesquels les transferts de chaleur ont lieu seulement par conduction. Afin de reproduire les variations annuelles de la température journalière moyenne à différentes profondeurs sous la surface du sol, la fonction sinusoïdale suivante (Hillel 1982) a été utilisée :

$$T(z,t) = T_a + A_0 e^{-z/d} \sin [2\pi(t-t_0)/365 - z/d - \pi/2] \quad (3)$$

$T(z,t)$: température du sol au temps t (jours) et à la profondeur z (m)

T_a : température moyenne du sol ($^{\circ}\text{C}$)

A_0 : amplitude thermique annuelle à la surface du sol ($^{\circ}\text{C}$)

d : profondeur d'amortissement (m) des fluctuations annuelles

t_0 : temps de décalage (jours) entre le 01 janvier et le minimum de température observé sur une année

$d = (2D_h/\omega)^{1/2}$ où D_h est la diffusivité thermique de la matrice solide et $\omega = 2\pi/365 \text{ jour}^{-1}$

$D_h = K/(\rho \cdot C_s)$ où K est la conductivité thermique ($\text{J}/(\text{m}^{\circ}\text{C} \cdot \text{jour})$), ρ est la masse volumique (kg/m^3) et C_s est la chaleur spécifique ($\text{J}/(\text{kg}^{\circ}\text{C})$)

Les valeurs des paramètres choisies pour le calcul sont les suivantes :

$T_a = 14 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $A_0 = 12^{\circ}\text{C}$; $t_0 = 30$; $K = 2 \text{ J}/(\text{m}^{\circ}\text{C} \cdot \text{s})$; $\rho = 2000 \text{ kg}/\text{m}^3$; $C_s = 800 \text{ J}/(\text{kg}^{\circ}\text{C})$

3. Résultats

3.1. Calage du modèle d'écoulement d'eau et transport de chaleur en zone non saturée-saturée

Au regard des conditions imposées (homogénéité des perméabilités au sein du complexe zone non saturée-saturée et débit d'infiltration constant au cours de la période considérée), on constate une restitution acceptable des variations de température des eaux souterraines enregistrées à 1 m sous la surface libre de la nappe à l'aval du bassin d'infiltration Django Reinhardt tant à une échelle événementielle que saisonnière (Figure 5).

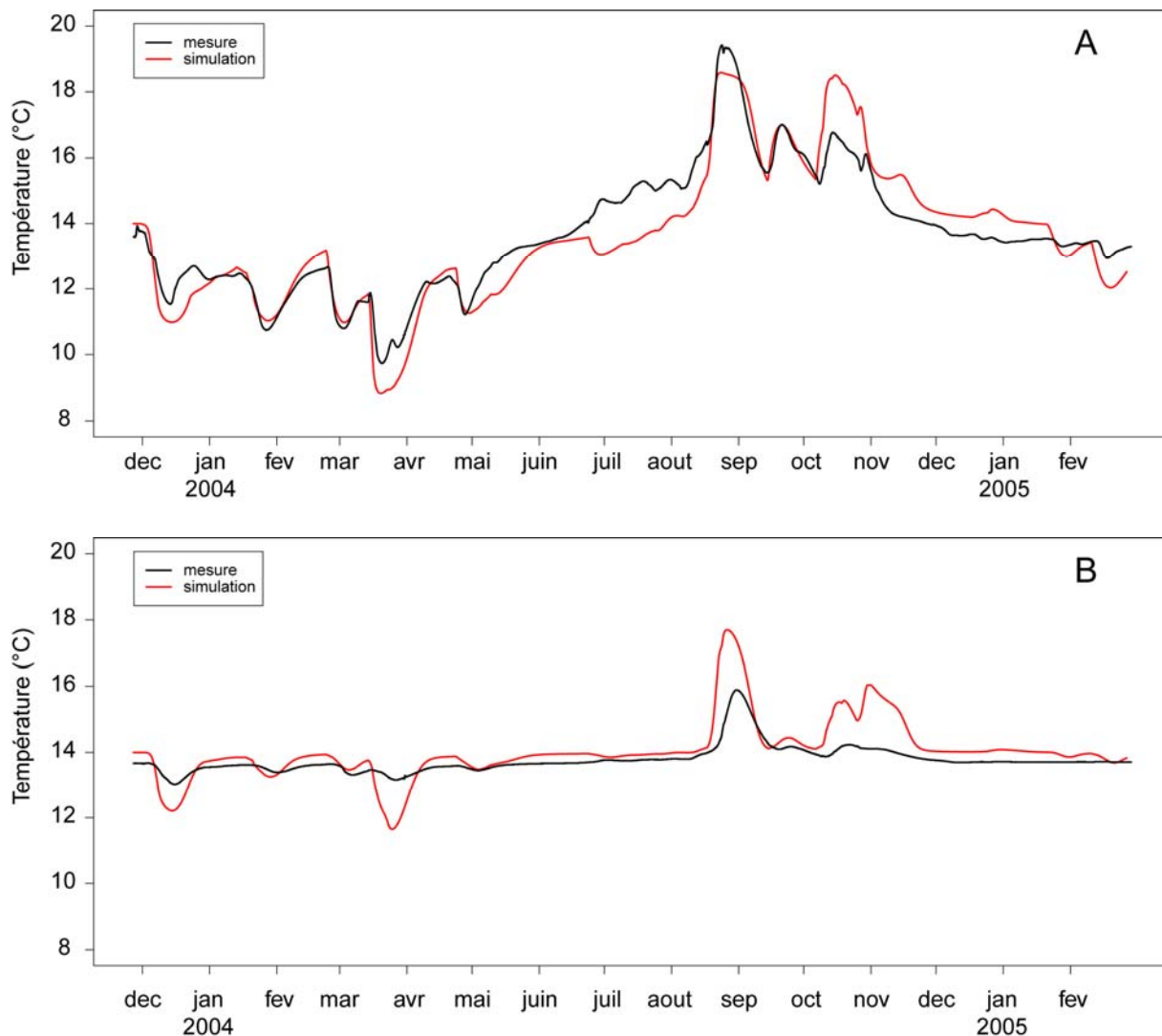


Figure 5 : Comparaison des courbes de température des eaux souterraines mesurées et simulées à une distance de 30 m de l'ouvrage d'infiltration dans le sens d'écoulement de la nappe à (A) 1 m sous la surface libre de la nappe et (B) 5 m sous la surface libre de la nappe.

L'amplitude thermique annuelle calculée par le modèle qui s'élève à 6.4 °C est proche de la valeur mesurée sous le bassin d'infiltration Django Reinhardt qui s'élève à 6.2 °C. L'atténuation avec la profondeur sous la surface libre de la nappe de la perturbation thermique engendrée par l'infiltration artificielle d'eau pluviale est également reproduite avec une diminution de l'amplitude thermique annuelle calculée par le modèle de 1 à 5 m sous la surface libre de la nappe (Figure 6) indiquant une circulation préférentielle des eaux de ruissellement pluvial dans les horizons supérieurs de la nappe.

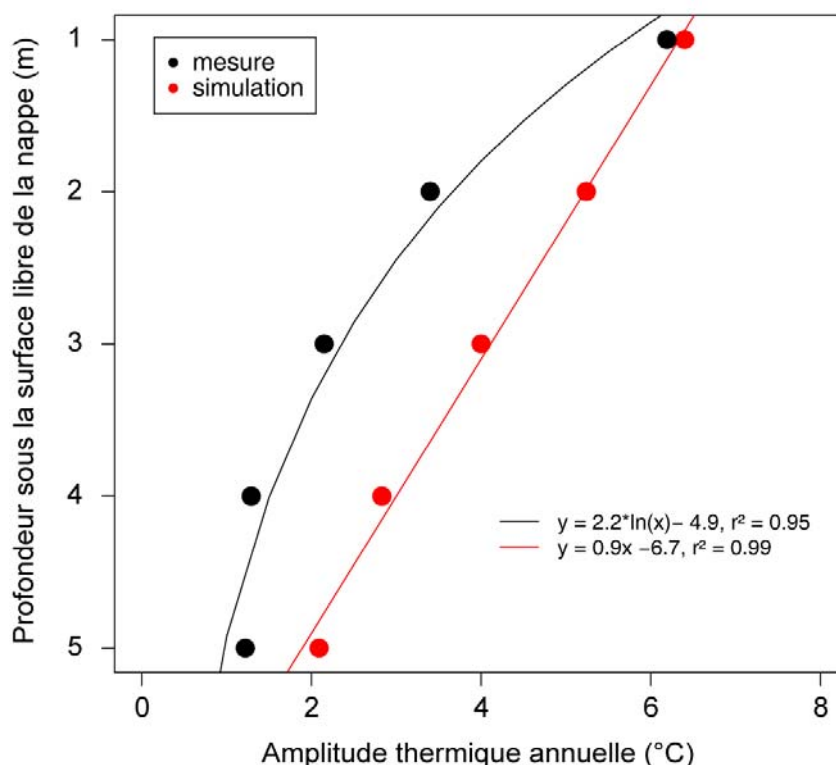


Figure 6 : Variation de l'amplitude thermique annuelle des eaux souterraines avec la profondeur sous la surface libre de la nappe.

La perturbation thermique calculée par le modèle à des distances supérieures à 150 m à l'aval du bassin d'infiltration est surestimée en comparaison aux enregistrements obtenus à des distances de 150 m à l'aval du bassin d'infiltration Django Reinhardt. Elle est également liée au fait que les piézomètres de suivis ne sont pas exactement alignés dans le sens d'écoulement de la nappe mais également au fait que le modèle 2D utilisé dans le cadre de ce rapport ne prend pas en compte les phénomènes de dispersion du nuage d'eau pluviale dans la troisième dimension de l'espace. Or, cette dispersion participe potentiellement à l'atténuation de la perturbation thermique à des distances importantes de l'ouvrage d'infiltration. Les résultats obtenus avec le modèle restent cependant valables jusqu'à une distance de 50 m à l'aval du bassin d'infiltration.

Les résultats issus de la modélisation permettent non seulement d'évaluer la perturbation thermique dans la zone saturée sous le bassin d'infiltration mais ils offrent également la possibilité d'évaluer la perturbation thermique engendrée au sein de la zone non saturée en comparaison avec un système soumis seulement à des transferts de chaleur par conduction

(Figure 7A-7B). Dans le cas d'un système simplement soumis à un transfert de chaleur par conduction, les variations de température de surface sont fortement amorties à une profondeur de 10 m avec une amplitude thermique annuelle inférieure à 1.5°C (Figure 7A). Le transfert de chaleur par advection sous l'ouvrage d'infiltration implique en revanche une propagation en profondeur des variations de température de surface avec une amplitude annuelle proche de 12°C à une profondeur de 10 m dans le cas d'un bassin versant de 185 ha (Figure 7B).

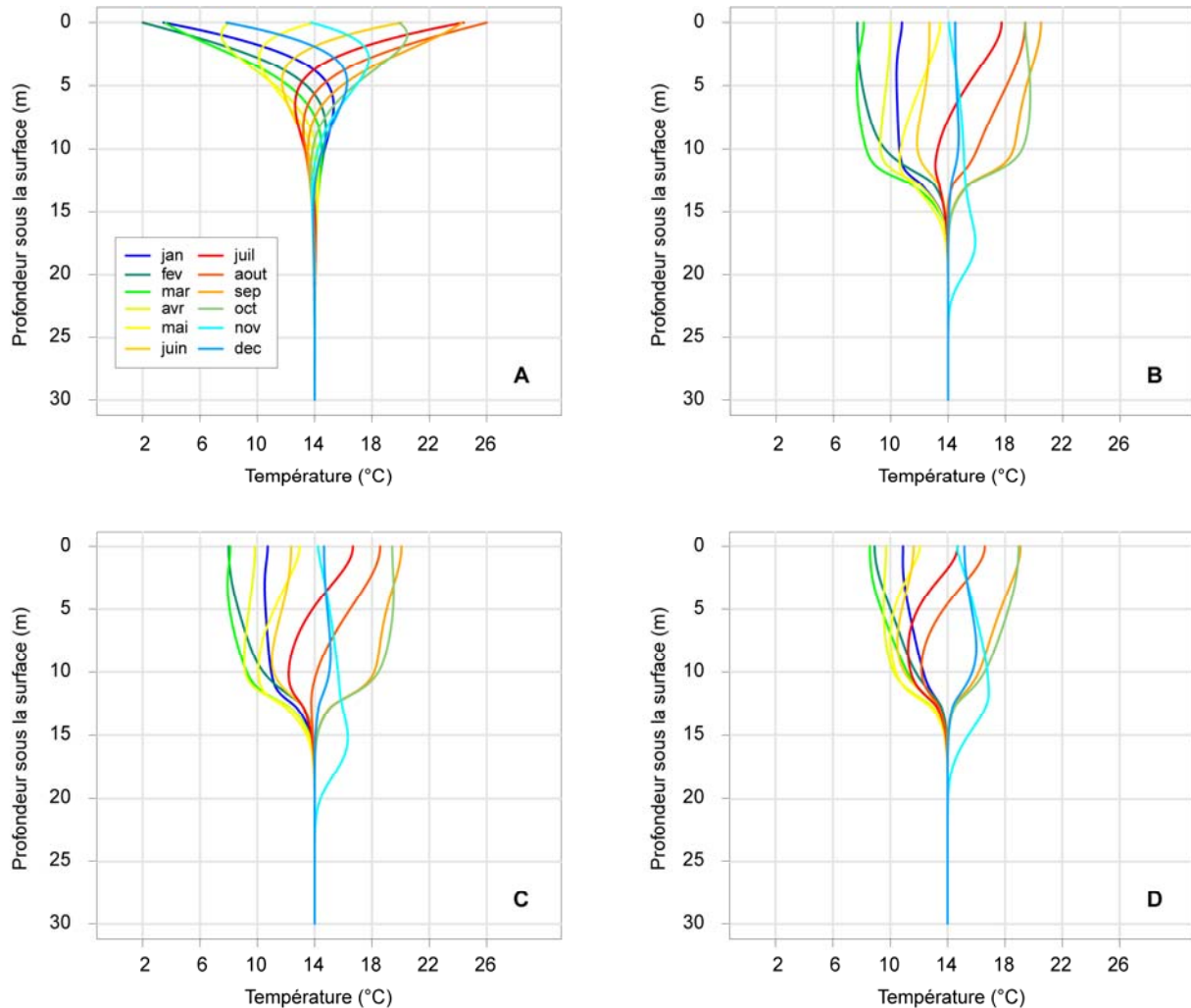


Figure 7 : Comparaison des profils de température verticaux pour un milieu seulement soumis à un transfert de chaleur par conduction (A) et sous un bassin d'infiltration d'eau pluviale seulement soumis à un transfert de chaleur par advection pour un bassin versant de 185 (B), 123 (C) et 62 (D) ha.

3.2. Influence de la taille du bassin versant

Les simulations réalisées pour une zone non saturée de 13 m et des tailles de bassin versant de 62, 123 et 185 ha indiquent qu'une réduction de la taille du bassin versant et donc des quantités d'eaux infiltrées lors des événements pluvieux se traduit par une atténuation de la perturbation thermique des eaux souterraines aussi bien à une échelle événementielle que saisonnière (Figure 8). Les températures minimale et maximale à l'échelle événementielle atteignent respectivement 8.8 et 18.6 °C pour un bassin versant de 185 ha. Elles sont seulement de 12.5 et 16.5 °C pour un bassin versant de 62 ha. D'un point de vue saisonnier, l'amplitude thermique des eaux souterraines à 1 m sous la surface libre de la nappe diminue

avec la taille du bassin versant: cette amplitude n'est plus que de 2.7 °C pour un bassin versant de 62 ha (Figures 8 et 12).

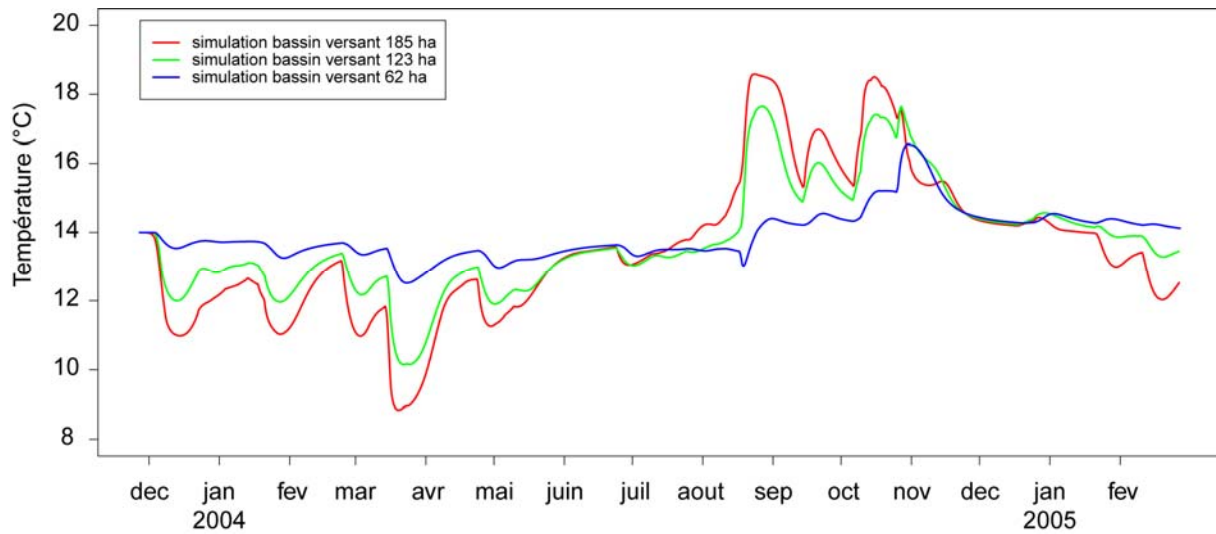


Figure 8 : Influence de la taille du bassin versant sur la perturbation thermique des eaux souterraines : cas d'une épaisseur de zone non saturée de 13 m.

Les profils de température verticaux calculés en zone non saturée et saturée indiquent également que la réduction de la taille du bassin versant limite la perturbation thermique dans la zone non saturée avec une atténuation plus importante des variations de température de surface lorsque la taille de bassin versant diminue (Figure 7C et 7D). Cette perturbation plus faible illustre les capacités d'atténuation de la zone non saturée concernant les variations de température de surface, cet aspect étant détaillé dans la partie suivante.

3.3. Influence de l'épaisseur de zone non saturée

L'impact de ces processus d'échanges de chaleur sur les variations de température des eaux souterraines pouvant être difficile à appréhender dans le cadre complexe d'épisodes d'infiltration réels présentant des durées d'infiltration et des températures d'infiltration variables, l'exemple théorique présenté en figure 9 permet de mesurer l'influence de la zone non saturée sur la température des eaux d'infiltration et les conséquences en termes de variations de température des eaux souterraines. La température des eaux d'infiltration du premier épisode est de 14°C. Elle est en équilibre avec la température de la zone non saturée et celle de la nappe. Par conséquent, cet épisode n'entraîne pas de variation de température des eaux souterraines. Les quatre événements suivants présentent une température d'infiltration de 20°C et se traduisent par une augmentation de la température des eaux souterraines qui est plus élevée à chaque épisode. Les événements pluvieux suivants présentent une température d'infiltration de 14°C mais les eaux d'infiltration se réchauffent dans la zone non saturée, ces épisodes d'infiltration se traduisent par une augmentation de température des eaux souterraines. C'est également le cas pour les deux événements suivants présentant pourtant une température de 8°C mais qui se traduisent par une augmentation de température des eaux souterraines. Seuls les deux derniers événements entraînent une diminution de la température des eaux souterraines.

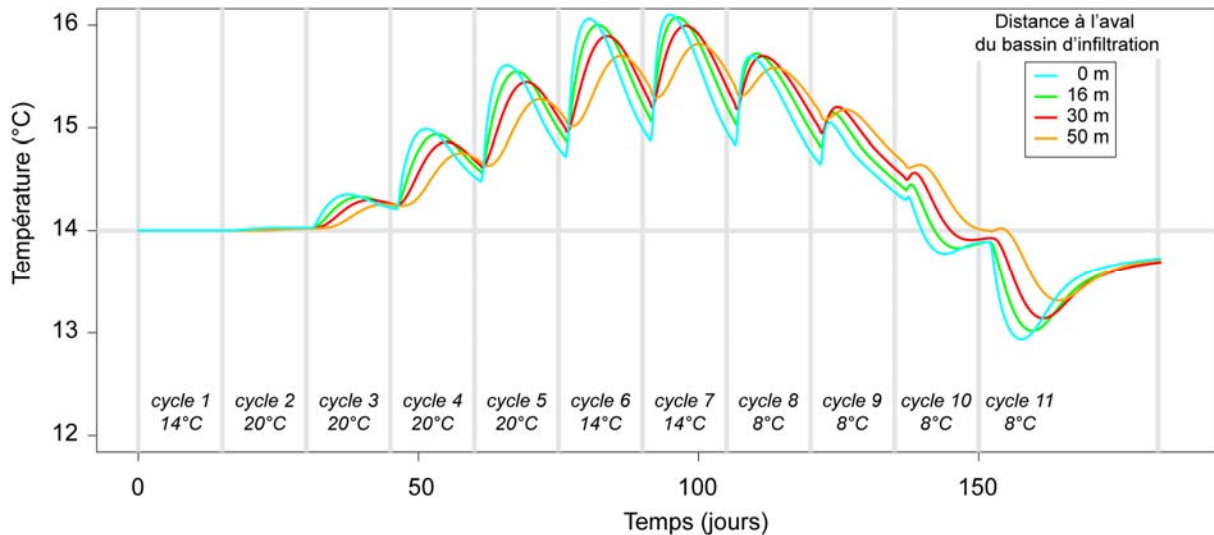


Figure 9 : Simulation numérique de l'évolution de la température des eaux souterraines à l'aval d'un ouvrage d'infiltration : exemple théorique. Les courbes correspondent à la température des eaux souterraines à 1 m sous la surface libre de la nappe à différentes distances à l'aval du bassin d'infiltration. La ligne horizontale correspond à la température du flux de nappe durant la simulation. Les lignes verticales délimitent les périodes de temps correspondant à chacun des cycles d'infiltration-drainage simulés.

Dans le cadre de travaux précédents, l'analyse des chroniques de température des eaux souterraines sous le bassin d'infiltration Django Reinhardt à travers un modèle de mélange avait permis de mettre en évidence l'influence des processus d'échanges de chaleur au sein de la zone non saturée sur la température des eaux d'infiltration avant leur arrivée au toit des nappes. Les résultats obtenus indiquaient un réchauffement des eaux d'infiltration lors de leur passage à travers la zone non saturée de septembre à février et un refroidissement de mars à aout.

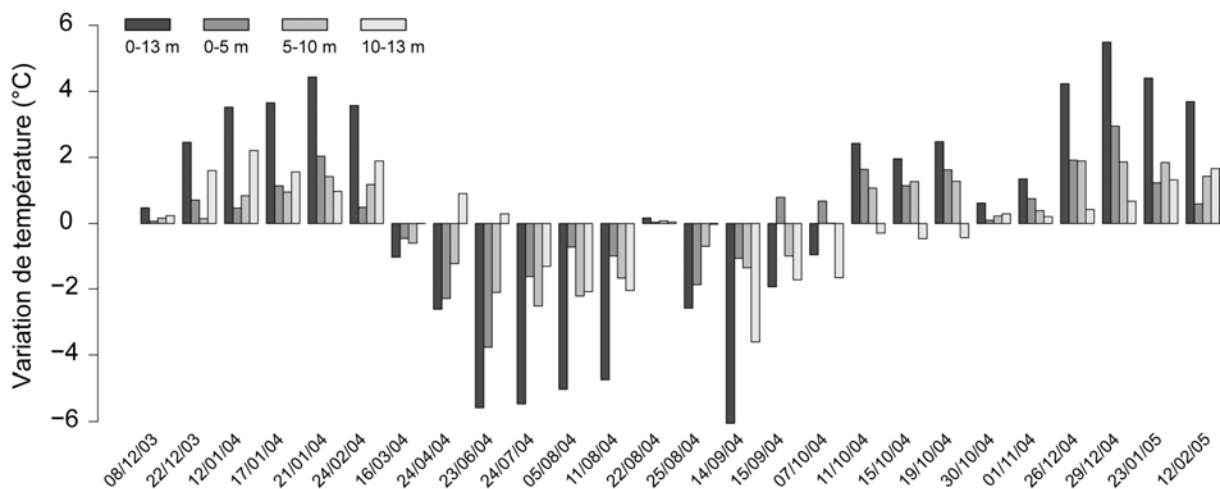


Figure 10 : Modification de la température des eaux d'infiltration au sein de la zone non saturée. Les barres verticales correspondent aux variations de température des eaux d'infiltration lors de l'écoulement à travers la zone non saturée entre 0 et 13 m de profondeur, 0 et 5 m, 5 et 10 m, 10 et 13 m.

Ces résultats sont cohérents avec les profils de températures calculés dans le cadre de ce rapport (Figure 10) sous la zone d'infiltration pour une épaisseur de zone non saturée de 13m et un bassin versant de 185 ha. On observe un réchauffement des eaux d'infiltration d'octobre à février et un refroidissement de mars à septembre. L'analyse de ces profils de température indique que la variation de température des eaux d'infiltration entre 0 et 13 m de profondeur dans la zone non saturée peut atteindre jusqu'à 6°C et qu'en moyenne 31.6 %, 36.8% et 31.6% de cette modification a lieu respectivement entre 0-5, 5-10 et 10-13 m.

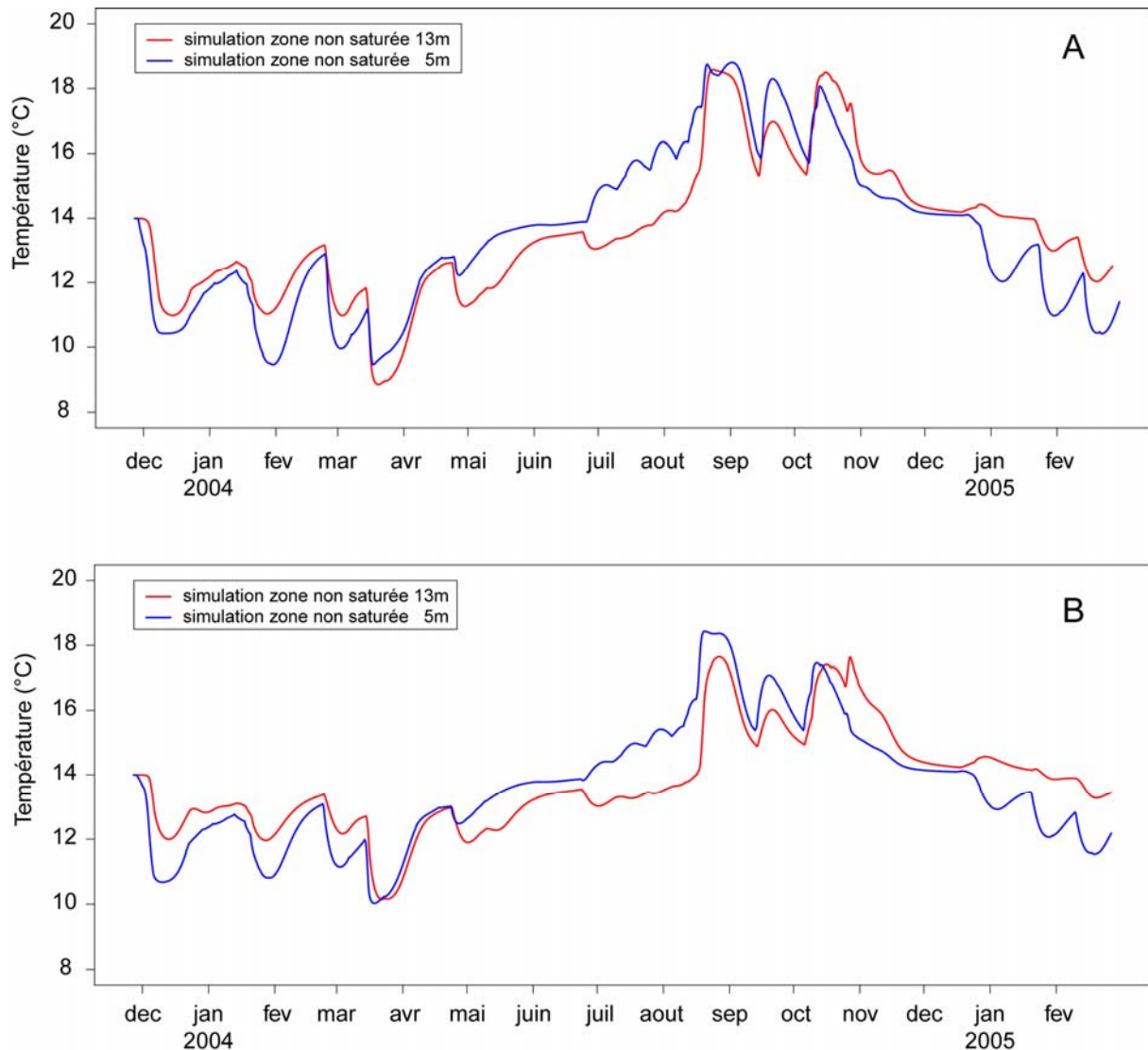


Figure 11 : Influence de l'épaisseur de zone non saturée sur la perturbation thermique engendrée par un ouvrage d'infiltration connecté à un bassin versant de (A) 185 ha et (B) 123 ha.

Les effets d'une réduction de l'épaisseur de zone non saturée sur la perturbation thermique engendrée par l'infiltration artificielle sont observables en figure 11. Les simulations réalisées indiquent que pour une taille de bassin versant donnée, la perturbation thermique des eaux souterraines à une échelle événementielle et saisonnière est plus importante pour une épaisseur de zone non saturée de 5 m que pour une épaisseur de zone non saturée de 13 m. Les résultats indiquent également que dans le cadre d'une augmentation de la taille du bassin

versant, l'augmentation de l'amplitude thermique annuelle des eaux souterraines sous les ouvrages est plus rapide pour une épaisseur de zone non saturée de 5 m (Figure 12).

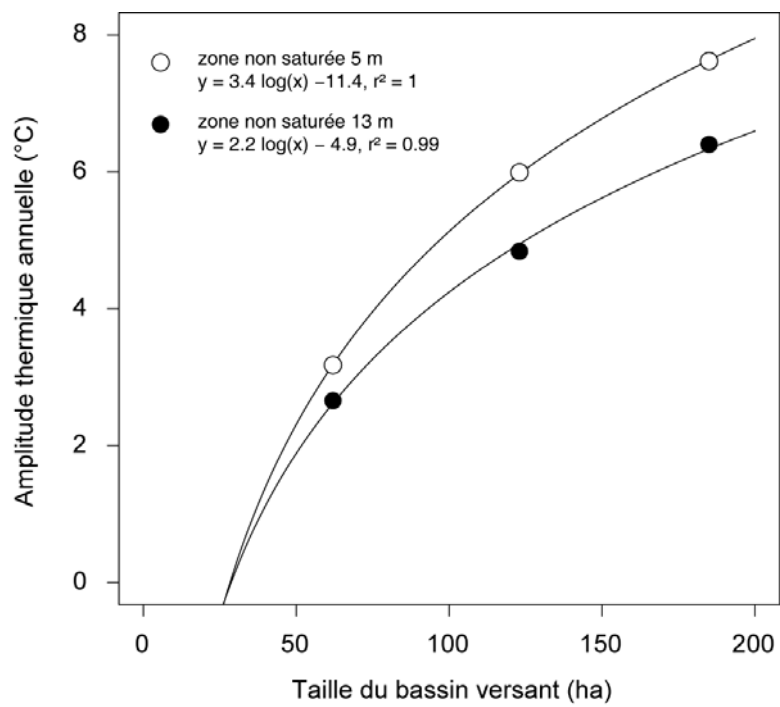


Figure 12 : Influence de la taille du bassin versant et de l'épaisseur de zone non saturée sur l'amplitude thermique annuelle des eaux souterraines.

4. Discussion et conclusions

4.1. Modélisation numérique du transport d'eau et de chaleur sous un ouvrage d'infiltration

Les simulations numériques présentées dans le cadre de ce rapport sont à notre connaissance la seule tentative de modélisation de la perturbation thermique engendrée par un ouvrage d'infiltration artificielle d'eau pluviale sur l'amplitude thermique annuelle des eaux souterraines. Les travaux de modélisation réalisés dans un précédent rapport concernaient une modélisation des variations de température uniquement à l'échelle événementielle (Chastanet et al. 2008). Si les variations de température des eaux souterraines sous les ouvrages d'infiltration à l'échelle événementielle constituent un réel problème, la perturbation la plus préoccupante est sans nul doute la forte augmentation de l'amplitude thermique des eaux de nappe à une échelle annuelle. En effet, pour certains ouvrages d'infiltration de l'agglomération lyonnaise associés à de grands bassins versants et de faibles épaisseurs de zone non saturée, cette augmentation d'amplitude se traduit par un maintien de la température des eaux souterraines à des valeurs supérieures à 20°C pendant 3 mois consécutifs (Foulquier, 2009).

Au-delà de la perturbation thermique engendrée au niveau des eaux souterraines, l'approche de modélisation envisagée au cours de ces travaux a également permis de mettre en évidence la perturbation considérable des profils de température au sein de la zone non saturée. La prédominance du transport de chaleur par advection sous les ouvrages d'infiltration implique une transmission en profondeur des variations de température de surface beaucoup plus importante que dans le cadre d'un transport de chaleur par conduction. Sous les ouvrages d'infiltration, les températures élevées observées dans la zone non saturée lors de la saison chaude sont ainsi susceptibles d'entraîner une forte stimulation des respirations microbiennes lors de l'infiltration artificielle des eaux pluviales chargées en matière organique lors de leur ruissellement sur les surfaces urbaines. Cette stimulation du compartiment microbien lors de la saison chaude implique une consommation importante de l'oxygène contenu dans les eaux d'infiltration lors de leur passage à travers la zone non saturée et entraîne ainsi une recharge des eaux souterraines par des eaux fortement appauvries en oxygène. Ce phénomène est ainsi responsable des concentrations plus faibles en oxygène des eaux souterraines sous les ouvrages d'infiltration en comparaison à des zones de référence non soumises à l'infiltration artificielle d'eau pluviale (Foulquier et al. 2007).

Les travaux réalisés au cours de ce rapport ont également mis en évidence les difficultés liées à la modélisation des variations de température des eaux souterraines à une échelle événementielle sans prise en compte des profils de température au sein de la zone non saturée. L'exemple théorique présenté a ainsi permis de montrer que des événements pluvieux présentant des caractéristiques (volume et température des eaux infiltrées) identiques n'entraînent pas une réponse identique en termes de variation de la température des eaux souterraines. Cette réponse dépend en fait de l'historique des précipitations, précédant un épisode pluvieux donné, qui déterminent les profils de température au sein de la zone non saturée et donc la modification de température subie par les eaux d'infiltration lors d'échanges de chaleur avec la matrice solide. Dans le cadre de ce rapport, le choix d'une période de simulation débutant à la fin du mois de novembre 2003 et une condition de température

constante de 14°C imposée en zone non saturée et saturée au début des simulation avaient pour objectif de limiter les erreurs de calcul liées aux incertitudes concernant le profil de température au sein de la zone non saturée avant le début de la simulation. Les profils de température verticaux calculés pour l'année 2004 (Figure 7B) montrent en effet une faible variation de température le long de la zone non saturée avec une température proche de 14°C pour les mois de novembre et décembre.

4.2. Influence de la taille du bassin versant

Lors de précédents travaux (Foulquier et al. 2007, Foulquier 2009), il a été montré que l'infiltration artificielle d'eau de ruissellement pluvial perturbait fortement le régime thermique des eaux souterraines en exacerbant les transferts de chaleur par advection de la surface vers les eaux souterraines. Cette prédominance des transferts de chaleur par advection laissait supposer que la perturbation thermique engendrée était liée aux quantités d'eaux infiltrées au niveau de l'ouvrage. Une relation avait ainsi été établie pour 8 ouvrages d'infiltration de l'agglomération lyonnaise entre l'amplitude thermique annuelle des eaux souterraines et la taille du bassin versant connecté à l'ouvrage. Cette relation laissait donc supposer que la taille du bassin versant constituait un levier potentiel en termes de gestion des ouvrages d'infiltration dans le cadre d'un objectif de diminution de la perturbation thermique engendrée dans les eaux souterraines. Cette relation empirique provenait cependant de données collectées pour des ouvrages d'infiltration présentant des épaisseurs de zone non saturée et des surfaces d'infiltration différentes, ces différences limitant la compréhension des mécanismes mis en place lors de l'infiltration et la possibilité d'établissement de règles de gestion.

Dans le cadre de ce rapport, les résultats issus de la modélisation ont permis de montrer qu'à surface d'infiltration et épaisseur de zone non saturée égales, la taille du bassin versant jouait un rôle prépondérant sur la perturbation du régime thermique des eaux souterraines. En effet, la réduction des quantités d'eaux infiltrées au cours du fonctionnement de l'ouvrage se traduit par une diminution de l'amplitude thermique annuelle des eaux souterraines.

En réduisant les volumes d'eaux infiltrés, une diminution de la taille du bassin versant connecté à l'ouvrage limite le transport de chaleur par advection vers les eaux souterraines et réduit ainsi la perturbation thermique engendrée par l'infiltration artificielle d'eau pluviale. Dans des formations fluviales et/ou fluvioglaciales perméables de l'agglomération lyonnaise, les tailles de bassin versant souhaitables afin de ne pas dépasser une amplitude thermique annuelle dans la nappe de 2 et 4°C sont respectivement de 50 et 100 hectares.

4.3. Epaisseur de la zone non saturée

Dans le cadre de travaux précédents menés sur le bassin d'infiltration Django Reinhardt, la zone non saturée avait été identifiée comme un lieu d'échanges de chaleur entre la matrice solide et les eaux d'infiltration. Ces processus d'échanges de chaleur étant susceptibles de tamponner les variations de température des eaux d'infiltration avant leur arrivée au toit des nappes, l'épaisseur de zone non saturée constituait un levier potentiel pour atténuer la perturbation thermique engendrée par les ouvrages d'infiltration. Cependant, l'impossibilité d'établir une comparaison de l'impact thermique engendré par deux ouvrages d'infiltration, identiques en tout point mais présentant des épaisseurs de zone non saturée différentes limitait la possibilité d'établir une règle de gestion pour ce paramètre.

Le passage par une modélisation numérique était donc nécessaire et a permis dans le cadre de ce rapport de mettre en évidence que la température des eaux d'infiltration était modifiée au cours de leur passage à travers la zone non saturée et que cette modification avait lieu tout au long de leur transit de la surface vers les eaux souterraines. Les simulations réalisées ont également montré qu'à taille de bassin versant égale, une épaisseur de zone non saturée importante permettait de limiter l'impact des ouvrages sur l'amplitude thermique annuelle des eaux souterraines, notamment pour les tailles de bassin versant les plus élevées.

Il est à noter que dans le cadre de travaux concernant le transfert de matière organique lié à l'infiltration artificielle d'eau pluviale vers les eaux souterraines, il était nécessaire de conserver une épaisseur de zone non saturée d'au moins 5 m afin d'assurer une rétention suffisante de la matière organique biodégradable contenue dans les eaux de ruissellement (Foulquier et al. 2009). Préserver une épaisseur de zone non saturée importante sous les ouvrages d'infiltration apparaît donc comme une nécessité au regard des pollutions organiques et thermiques potentielles.

<p>Une épaisseur de zone non saturée importante permet de limiter le transport de chaleur de la surface vers les eaux souterraines sous les ouvrages d'infiltration artificielle d'eau pluviale et limite ainsi la perturbation thermique de la nappe. Dès lors que la taille du bassin versant dépasse 100 hectares, il est préférable de maintenir une épaisseur de zone non saturée d'une dizaine de mètres.</p>

5. Perspectives

Au cours des travaux réalisés dans ce rapport, un certain nombre de perspectives de recherches sont apparues concernant les améliorations à apporter au modèle mais également les utilisations d'ores et déjà possible en l'état du modèle actuel.

Afin d'évaluer de manière plus précise l'impact thermique des ouvrages d'infiltration d'eau pluviale à des distances importantes à l'aval de l'ouvrage d'infiltration (> 50 m), le passage à une modélisation 3D des écoulements d'eau et du transport de chaleur associée est nécessaire. Cette étape permettrait ainsi de prendre en compte la dispersion des eaux d'infiltration dans la troisième direction de l'espace, actuellement non prise en compte dans le modèle 2D, qui participe probablement à l'atténuation de la perturbation thermique au-delà d'une centaine de mètres à l'aval hydraulique de l'ouvrage.

Les travaux réalisés sur la perturbation thermique des eaux souterraines par les ouvrages d'infiltration d'eau pluviale ont montré une prépondérance des transferts de chaleur par advection sous les ouvrages. Il serait cependant intéressant d'intégrer au modèle la transmission des variations de température de surface par conduction qui sont susceptibles d'influencer la température des eaux souterraines pour les nappes les plus proches de la surface.

Malgré des améliorations potentielles à apporter liées au fait qu'un modèle demeure une représentation simplifiée de la réalité, les travaux réalisés dans le cadre de ce rapport ont abouti à la construction d'un modèle permettant de tester l'influence de la taille du bassin versant et de l'épaisseur de la zone non saturée. Ce modèle offre également la possibilité de tester un certain nombre de scénarios visant à évaluer l'influence de la répartition saisonnière des précipitations sur la température moyenne des eaux souterraines. La prédominance des transferts de chaleur par advection sous les ouvrages implique que la distribution des précipitations entre la saison chaude et la saison froide influence la température moyenne des eaux souterraines. Des précipitations plus importantes lors de la saison chaude devraient aboutir à une augmentation de la température moyenne annuelle des eaux souterraines. Dans un contexte de changement climatique et de perturbation du régime des précipitations, des simulations numériques de différents scénarios climatiques devraient permettre d'évaluer les potentiels effets de réchauffement à long terme des eaux souterraines. Enfin, il serait également intéressant de comparer avec ce modèle la perturbation thermique engendrée par un ouvrage d'infiltration à celle engendrée à proximité d'une zone définie dans le modèle comme un point de rejet de pompe à chaleur. Il existe en effet pas moins de 1 pompe à chaleur par 80 ha dans les zones les plus densément peuplées de l'agglomération lyonnaise (Horizons 2000).

6. Références bibliographiques :

- Allen A., Milenic D., Sikora P. (2003) Shallow gravel aquifers and the urban 'heat island effect': a source of low enthalpy geothermal energy. *Geothermics* 32: 569-578.
- Anderson M.P. (2005) Heat as a ground water tracer. *Ground Water* 43: 951-968.
- Barraud S., Gibert J., Winiarski T., Bertrand-Krajewski J.L. (2002) Implementation of a monitoring system to measure impact of stormwater runoff infiltration. *Water Science and Technology* 45: 203-210.
- Barraud S. et collaborateurs (2009) Guide technique pour la faisabilité, la conception et la gestion des ouvrages d'infiltration des eaux pluviales en milieu urbain. *Ouvrage collectif du programme ANR Ecopluies*. Disponible à <http://www.graie.org/ecopluies>.
- Bertrand-Krajewski J.L., Barraud S., Gibert J., Malard F., Winiarski T., Delolme C. (2008) The OTHU case study: integrated monitoring of stormwater in Lyon, France. In *Data Requirements for Integrated Urban Water Management*, Fletcher TD, Deletic A. (eds). UNESCO, Paris; 303-314.
- Bornstein R.D. (1968) Observations of the urban heat island effect in New York City. *Journal of Applied Meteorology* 7: 575-582.
- Chapelle F.H. (1993) Ground-water microbiology and geochemistry. John Wiley and Sons, New York, 424 pp.
- Chastanet J., Kaskassian S., Côme J.M., Malard F., Foulquier A. (2008) Transport de chaleur et température des nappes phréatiques à l'aplomb des bassins d'infiltration d'eau de ruissellement pluvial. *Projet ANR-05-ECOT-006*.
- Datry T. (2003) Urbanisation et qualité des nappes phréatiques : réponse des écosystèmes aquatiques souterrains aux pratiques d'infiltration d'eau de ruissellement pluvial. Thèse de doctorat, Université Lyon 1, Lyon, France.

- European Environmental Agency (2006) *Urban sprawl in Europe – The ignored challenge*. Copenhagen (Denmark):EEA – European Environmental Agency, 56p.
- Ferguson G., Woodbury A.D. (2004) Subsurface heat flow in an urban environment. *Journal of Geophysical Research* 109(B02402), 1-9. DOI: 10.1029/2003JB002715.
- Foulquier A., Malard F., Gibert J. (2007) Régime thermique des nappes phréatiques à l’aplomb de bassins d’infiltration. Dans *Les nappes d’eau souterraines en contexte urbain*, Chastagner P., Gouisset Y. (eds). Comité Français d’Hydrogéologie : Lyon, France, pp. 179-183.
- Foulquier A., Malard F., Barraud S., Gibert J. (2009) Thermal influence of urban groundwater recharge from stormwater infiltration basins. *Hydrological Processes* 23(12) : 1701-1713.
- Foulquier A. (2009) Ecologie fonctionnelle dans les nappes phréatiques : liens entre flux de matière organique, activité et diversité biologiques. Thèse de doctorat, Université Lyon 1, Lyon, France.
- Hillel D. (1982) *Introduction to soil physics*. Academic Press, San Diego, CA.
- Horizons. 2000. *Synthèse hydrogéologique et thermique des forages pompes à chaleur*. Lyon - Villeurbanne (69). Hydrogeological Report DH160, Horizons, Villefontaine, France; 32.
- Jones J.B., Mulholland P.J. (eds) (2000) *Streams and Ground Waters*. Academic Press: San Diego; 425.
- Karl T.R., Diaz H.F., Kukla G. (1988) Urbanization: its detection and effect in the United States Climate Record. *Journal of Climate* 1: 1099-1123.
- Le Coustumer S., Barraud S. (2007) Long-term hydraulic and pollution retention performance of infiltration systems. *Water Science and Technology* 55: 235-243.

- Morris B.L., Lawrence A.R.L., Chilton P.J.C., Adams B., Calow R.C., Klinck B.A. (2003) *Groundwater and its Susceptibility to Degradation: A Global Assessment of the Problem and Options for Management*. Early Warning and Assessment Report Series, RS.03-3. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya; 126.
- SDUD (2005) Berlin Digital Environmental Atlas: groundwater temperature. *Senate Department for Urban Development: Berlin*; 7
(http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/ed214_02.htm)
- Taniguchi M. (2006) Anthropogenic effects on subsurface temperature in Bangkok. *Climate of the Past* 2: 831-846.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2007) *World Population Prospects: The 2006 Revision, Highlights*. Working Paper No. ESA/P/WP.202. United Nations: New York; 96.
- Voss C.I., Provost A.M. (2002) SUTRA, a model for saturated-unsaturated variable-density ground-water flow with solute or energy transport. *Water-Resources Investigations Report 02-4231*. Reston, Virginia: USGS.