Zeitschrift: Swiss bulletin für angewandte Geologie = Swiss bulletin pour la géologie appliquée = Swiss bulletin per la geologia applicata = Swiss bulletin for applied geology

Herausgeber: Schweizerische Vereinigung von Energie-Geowissenschaftern; Schweizerische Fachgruppe für Ingenieurgeologie

Band: 14 (2009)

Heft: 1-2

Artikel: Modèles couplés hydraulique/thermique de la nappe alluviale de la plaine du Rhône et modélisation de l'implantation d'un système de refroidissement eau-eau à l'hôpital cantonal de Sion (VS, Suisse)

Autor: Matti, Boris / Tacher, Laurent

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-227068

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 26.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Swiss Bull. angew. Geol. Vol. 14/1+2, 2009 S. 47-64

Modèles couplés hydraulique/thermique de la nappe alluviale de la plaine du Rhône et modélisation de l'implantation d'un système de refroidissement eau-eau à l'hôpital cantonal de Sion (VS, Suisse)

Boris Matti[1], Laurent Tacher[2]

Mots-clés: Géothermie, hydrogéologie, pompe à chaleur (PAC), modélisation numérique, nappe alluviale du Rhône

Résumé

Cet article décrit les modèles tridimensionnels hydrogéologiques et hydro-thermiques en vue de l'étude et de l'exécution d'un système de refroidissement (PAC) eau-eau supplémentaire de grande puissance pour l'hôpital de Sion (VS). Cette étude permet de répondre aux questions suivantes: Est-ce que l'introduction de nouvelles installations perturbera le fonctionnement du système? L'aquifère peut-il fournir de tels débits? Et, est-ce que la performance des puits et pompes à chaleur déjà existants sera affectée? Hydrauliquement, les modèles numériques ont montré toute l'importance que tiennent les conditions aux limites dans la dynamique du système (i. e. Rhône et relations atmosphère/aquifère). Du point de vue thermique, se sont les transferts de chaleur par la surface, via la zone non-saturée, qui contrôlent thermiquement le système, marquant ainsi bien les fluctuations saisonnières atmosphériques (> ½ des flux thermiques entrant et sortant). Les simulations numériques montrent que les puits actuels, fonctionnant principalement en été pour le refroidissement, n'influencent thermiquement pas d'une manière importante l'aquifère (1 % de la recharge en chaleur annuelle). L'extension maximale du panache de chaleur de ICHV et SUVA en aval est d'une centaine de mètres (maximum 200 m). La distance minimale préconisée pour de nouvelles installations géothermiques serait ainsi de 200 mètres. D'un point de vue hydraulique et thermique il ne semble pas avoir de restriction au rajout de nouveaux ouvrages.

Riassunto

Quest'articolo descrive modelli tridimensionali idrogeologici ed idrotermali in previsione dello studio e dell'esecuzione di un sistema supplementare di raffreddamento acqua-acqua (PAC) di grande potenza per l'ospedale di Sion (VS). Questo studio permette di rispondere alle domande seguenti: L'introduzione di nuovi impianti perturberà il funzionamento del sistema? L'acquifero può fornire tali flussi? Ed il rendimento dei pozzi e delle pompe a calore già esistenti sarà influenzata? Idraulicamente, i modelli hanno dimostrato tutta l'importanza influenzata dalle condizioni ai limiti nella dinamica del sistema (fiume Rodano e relazioni atmosfera/acquifero). Dal punto di vista termico, i trasferimenti di calore con la superficie, via la zona non saturata, controllano termicamente il sistema e segnalano così bene le fluttuazioni stagionali atmosferiche (> ½ dei flussi termici in entrata ed in uscita). Le simulazioni mostrano che i pozzi attuali, funzionanti soprattutto in estate per il raffreddamento, non influenzano termicamente in modo importante l'acquifero (1% della ricarica in calore annuale). L'estensione massima del pennacchio di calore, a valle degli stabili ICHV e SUVA è di un centinaio di metri (massimo 200 m). La distanza minima raccomandata per nuovi impianti geotermici sarebbe così di 200 metri. Da un punto di vista idraulico e termico non sembra avere restrizioni all'aggiunta di nuovi sistemi di pompaggio.

[1] Muttoni & Beffa SA, Via Cantonale 15, CH-6760 Faido [boris.matti@mebsa.ch]

[2] GEOLEP, Station 18, CH-1015 Lausanne [laurent.tacher@epfl.ch]

1. Introduction

Cette étude a été réalisée par le GEOLEP (Laboratoire de géologie de l'ingénieur et de l'environnement de l'Ecole Polytechnique de Lausanne) à la demande du Bureau d'Etudes Géologiques de Aproz (BEG SA), en vue de l'étude et de l'exécution d'un système de refroidissement eau-eau de grande puissance pour les hôpitaux de Sion. Cet article présente les points importants de cette étude, le rapport complet peut être consulté auprès du BEG SA ou du GEOLEP (Matti 2007, étude n°0707). En outre, dans cet article il est largement fait référence aux rapports hydrogéologiques ci-dessous dont cette étude représente la suite. Le lecteur y trouvera les informations géologiques et hydrogéologiques qui pourraient ne pas figurer ici:

- Installation de refroidissement et pompe à chaleur (PAC) (Etude n°3546, BEG, avril 2004);
- Installation de refroidissement (Etude n°3546, BEG, mai 2005);
- Norme d'exploitation de l'aquifère phréatique du Rhône par doublets géothermiques eau-eau (Tacher 1999, GEOLEP).

Tous les calculs ont été effectués avec le logiciel Feflow®.

La puissance prévue de l'installation (1150 kW) implique à priori de forts débits d'eau prélevés puis re-injectés dans l'aquifère. Il convient par conséquent de s'assurer par modélisation que l'aquifère peut fournir de tels débits, que le système n'en perturbera pas de manière importante le fonctionnement et que la performance des puits et pompes à chaleur déjà existant ne sera pas affectée. A savoir la SUVA et les hôpitaux de Sion (ICHV), chacun possédant un doublet prélèvement/réinjection dont les débits sont respectivement 3500 m^3/jour et 1800 m^3/jour.

D'un point de vue géologique, la stratigraphie des terrains aquifères du secteur de Champsec présente des intercalations limoneuses, reconnues par forage, dont l'effet doit être considéré dans les modèles proposés. Par ailleurs, la profondeur à laquelle est installée la partie filtrante (environ 30 m) des ouvrages existants ou prévus doit aussi être représentée par les modèles. Pour ces raisons, les modèles sont tridimensionnels, et les paramètres physiques sont issus de réalisations aléatoires stochastiques, représentant la variabilité observée (Gelhar 1986).

D'un point de vue hydrodynamique, les graviers sableux constituant la majeure partie des terrains, la transition entre la zone saturée et non-saturée de l'aquifère est assez marquée. La modélisation en régime saturé est donc proposée, justifiée notamment par les faibles rabattements observés lors d'essais de pompage. L'alimentation par les eaux de surface via la zone non-saturée sera représentée par un retard de l'infiltration à travers un coefficient de transfert. Ce type de modèle est un bon compromis entre les modèles non-saturé et saturé. Les bilans hydrauliques seront ainsi légèrement surestimés, mais au regard de l'incertitude liée à la cote du fond de l'aquifère (fixée arbitrairement à 40 m) elle reste minime. Des tests ont également été effectués en écoulement non-saturé, mais devant la méconnaissance des paramètres physiques à considérer en hydraulique et également en thermique ils ont été abandonnés. L'approche par milieux saturés dans ces contextes géologiques se justifie pleinement.

Les phases de modélisation sont les suivantes :

1. Fabrication de la géométrie du modèle (basée sur les données géologiques et topographiques fournies par le BEG);
2. Recherche et introduction de conditions aux limites;
3. Calage sur les conditions de 2005 par comparaison avec les données;
4. Introduction des nouveaux puits et calcul de leur impact sur l'aquifère et les ouvra-

ges existants, du point de vue hydraulique et thermique. Réalisation de variantes destinées à trouver la configuration optimale.

2. Modèle couplé hydraulique/thermique

Localisation et géométrie

La zone modélisée est située dans la plaine alluviale du Rhône à hauteur de Sion. Elle s'étend d'Est en Ouest sur une longueur de 4.6 km et une largeur de 2 km en amont et 1.3 km en aval du site prévu (Fig. 1). Son extension amont a été limitée à la hauteur du piézomètre BacBr8 (coordonnées 596'900/121'200), et en aval à la hauteur du piézomètre LM6 (coordonnées 592'600/118'500). La superficie du domaine d'étude est approximativement de 8 km^2. L'extension du modèle largement supérieure à la zone étudiée (Hôpitaux cantonaux de Sion), permet de s'affranchir en partie des effets des conditions aux limites. Latéralement, la géométrie est limitée par le pourtour de la pleine du Rhône. Sa base correspond à une profondeur de 40 m fixée arbitrairement, tandis que sa limite supérieure est constituée par la topographie. Le modèle 3D est constitué de 73'542 éléments finis prismatiques triangulaires et 135'960 nœuds, distribués selon 20 couches (21 interfaces). Les couches possèdent des épaisseurs relativement constantes. Le maillage est affiné localement à proximité des ouvrages pour améliorer la précision des calculs dans les zones à fort gradient hydraulique.

Période de simulation

La période modélisée s'étend du 1er janvier 2005 au 31 décembre 2005. Cette année n'est pas une année particulière d'un point de vue hydrogéologique, mais elle a été choisie pour les chroniques débits/températures complètes des puits de ICHV et SUVA, ainsi que pour les mesures en continu (journalières) existant pour quatre piézomètres (BacBr8, LM6, RN14 et 04I52). Ces mesures permettent de caler d'une façon optimale le modèle.

Champs de paramètres

S'agissant de modélisation en régime transitoire saturé, les paramètres à fixer sont, pour la partie hydrogéologique, la conductivité hydraulique k et le coefficient d'emmagasinement spécifique Ss, et pour la partie géothermique, la porosité, la conductivité, la capacité et la diversité thermique du fluide et du solide. Ces valeurs sont établis par l'exploitation des essais de pompage (voir rapports BEG 2004, 2005), des logs de forages, et par les besoins du calibrage (ajustement des potentiels calculés aux potentiels mesurés). Dû à la nature des matériaux (gravier, sable et limon) d'une part, et d'autre part à la structure de type alluvial, le milieu est extrêmement hétérogène, verticalement et horizontalement, comme en attestent les relevés de sondage. Le détail de cette hétérogénéité n'est connu qu'aux sondages, de sorte que sa représentation exacte est difficile. Ainsi les valeurs de conductivités hydrauliques et thermiques, ainsi que de la porosité, sont issues de réalisations aléatoires stochastiques (Gelhar 1986), représentant la variabilité observée.
En régime transitoire et saturé, le coefficient d'emmagasinement Ss gouverne l'amplitude et la rapidité de la réponse du modèle aux variations d'infiltration. Le modèle est du type «saturé captif». Sa nature libre est cependant simulée par un fort emmagasinement (Ss = 0.01).
La porosité a été ajustée selon la formule de Bretjinski (de Marsily 1986), qui décrit la relation perméabilité/porosité dans les milieux sablo-graveleux isotropes. Dans notre cas la porosité des formations limoneuses pourrait donc être sous-évaluée. On obtient pour $1E^{-5} < K < 2E^{-3}$ [m/s] des porosités $0.2 < \phi < 0.24$ [-]. Toutes ces valeurs sont résumée dans le tableau 1.

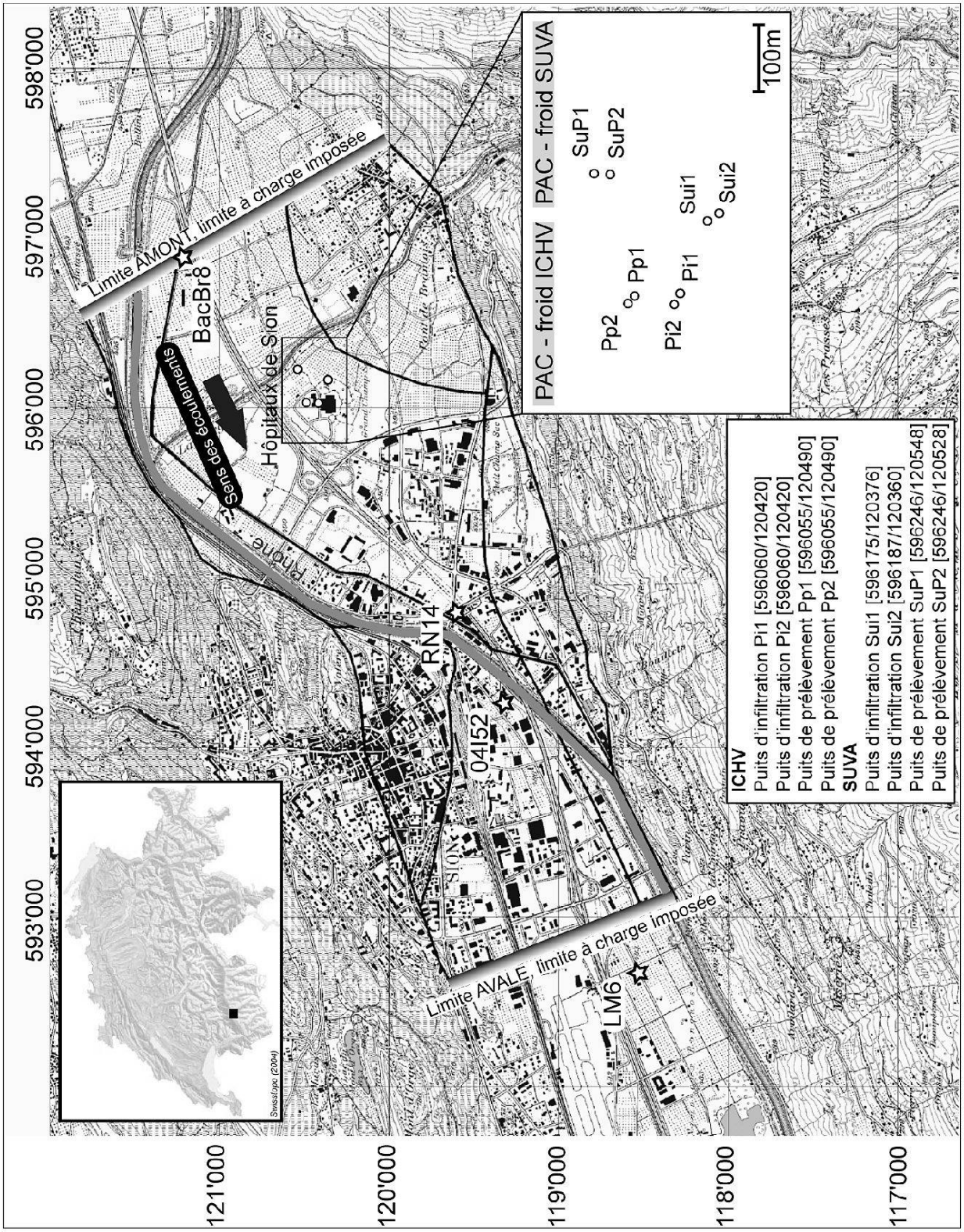

Fig. 1: Localisation et géométrie du modèle. En noir extension du modèle numérique. Indication des piézomètres utilisés pour la calibration du modèle (04I52 et RN14) et pour l'attribution conditions aux limites (LM6 et BacBr8).

Conditions aux limites

Les conditions aux limites (Fig. 2) considérées dans ces modèles sont les suivantes:

- l'infiltration efficace, sous forme de flux hydraulique imposé à la surface du modèle;
- l'alimentation par la limite amont sous forme de conditions de potentiel (limite à charge imposée);
- l'exutoire par la limite aval, sous forme de conditions de potentiel (limite à charge imposée). Les valeurs imposées aux différentes conditions aux limites sont tirées de chroniques journalières de l'année 2005;
- transfert nappe-rivière, sous forme de conditions de flux entrants et sortants.

Concernant la partie géothermique:

- température imposée variable au sommet et dépendant de celle de l'aquifère (conditions de Cauchy);
- température imposée sur la face amont;
- flux géothermique à la base;
- températures mensuelles du Rhône imposées aux interfaces 1 et 2 afin que la profondeur de ce dernier soit d'environ 3 mètres.

3. Discussion sur le choix des conditions aux limites

La caractéristique principale apparaissant dans les simulations proposées est la grande importance du Rhône sur les aquifères de la vallée du Rhône, tant du point de vue hydraulique que thermique. Dès lors il est important dans les simulations que la relation nappe-aquifère soit aussi précise que possible. La question du choix des conditions aux limites pour représenter le Rhône s'est posée. Normalement les objets à modéliser de type «rivière» sont représentés par des conditions aux limites à charge imposée de type Cauchy. Les conditions de type Cauchy sont des conditions de charges imposées, variable dans le temps, mais dont l'intensité est calculée en tout point de la surface et à tout moment comme une fonction de la différence de potentiel entre la nappe et la rivière. Cela permet de représenter d'une façon optimale les relations nappe-rivière. Si la nappe est plus haute que la rivière, elle va l'infiltrer, et au contraire si elle est plus basse elle la drainera. Dans le cas étudié, les nombreux tests réalisés n'ont pas donné entière satisfaction pour des raisons liées aux différentes sources d'incertitudes sur les variables intervenant dans le calcul des paramètres de transfert; soit les données topographiques, la hauteur d'eau du Rhône, l'épaisseur et perméabilités de colmatage du lit du Rhône. Les potentiels hydrauliques

Paramètres	Valeurs	*Remarques*
Conductivité hydraulique *K* [m/s]	1E-3 à 1E-7	*distribution aléatoire*
Coefficient d'emmagasinement *Ss* [-]	0.01	*distribution aléatoire*
Compressibilité du squelette rocheux So [m^{-1}]	1E-4	
Conductivité thermique de la roche λ_S [$Jm^{-1}s^{-1}K^{-1}$]	0.60 à 1.18	*distribution aléatoire*
Porosité ϕ [–]	0.20 à 0.24	*distribution aléatoire*
Conductivité thermique du fluide λ_λ [$Jm^{-1}s^{-1}K^{-1}$]	0.65	
Capacité thermique volumique de la roche (ρc) [$Jm^{-3}K^{-1}$]	2.20E6	
Capacité thermique volumique du fluide $(\rho c)_l$ [$Jm^{-3}K^{-1}$]	4.20E6	
Dispersivité thermique longitudinale α_L [m]	5	
Dispersivité thermique transversale α_T [m]	0.5	
Température de référence T_O [^oC]	11	

Tab 1: Champs de paramètres physiques.

simulés ne reproduisaient pas d'une manière satisfaisante les potentiels mesurés aux deux piézomètres de référence (04I52 et RN14) utilisés dans la calibration du modèle. Les courbes calculées n'étaient pas synchrones avec celles mesurées et présentaient des écarts de l'ordre du mètre. Afin de pouvoir reproduire l'hydrodynamique observée du système, des flux plutôt que des potentiels ont donc été imposés aux nœuds de l'interface supérieure du modèle. Cette manière de procéder s'est avérée satisfaisante. Ces flux varient dans le temps (Fig. 2) afin de simuler une exfiltration de la nappe vers le fleuve en hiver et une infiltration en été. L'intensité de ces échanges est dans un premier temps tirée des études de Schürch (1999) et de Tacher (1999) et dans un deuxième temps modifiée pour les besoins du calage. Le principe retenu est une infiltration du Rhône des mois de mai à octobre, le reste de l'année le Rhône est drainant. Les valeurs de flux calculés dans Schürch (1999) pour la région du Bois de Finges varient de 900 à 1000 l/s en périodes de hautes eaux. Cela revient à considérer un flux approximatif variant de -1 m/j (drainant) de 1 m/j (infiltrant). Valeur également adoptée et discutée par Tacher (1999) dans l'étude numérique sur les normes d'exploitation de l'aquifère du Rhône. Ces études ont démontrés l'importance du Rhône dans la dynamique des aquifère de la plaine du Rhône, avec un débit d'infiltration de l'ordre de 1 m^3/s ce flux présenterait jusqu'à 75% de la recharge totale de l'aquifère. Ce débit d'infiltration restant tout de même faible par rapport au débit moyen du Rhône (environ 140 m^3/s).

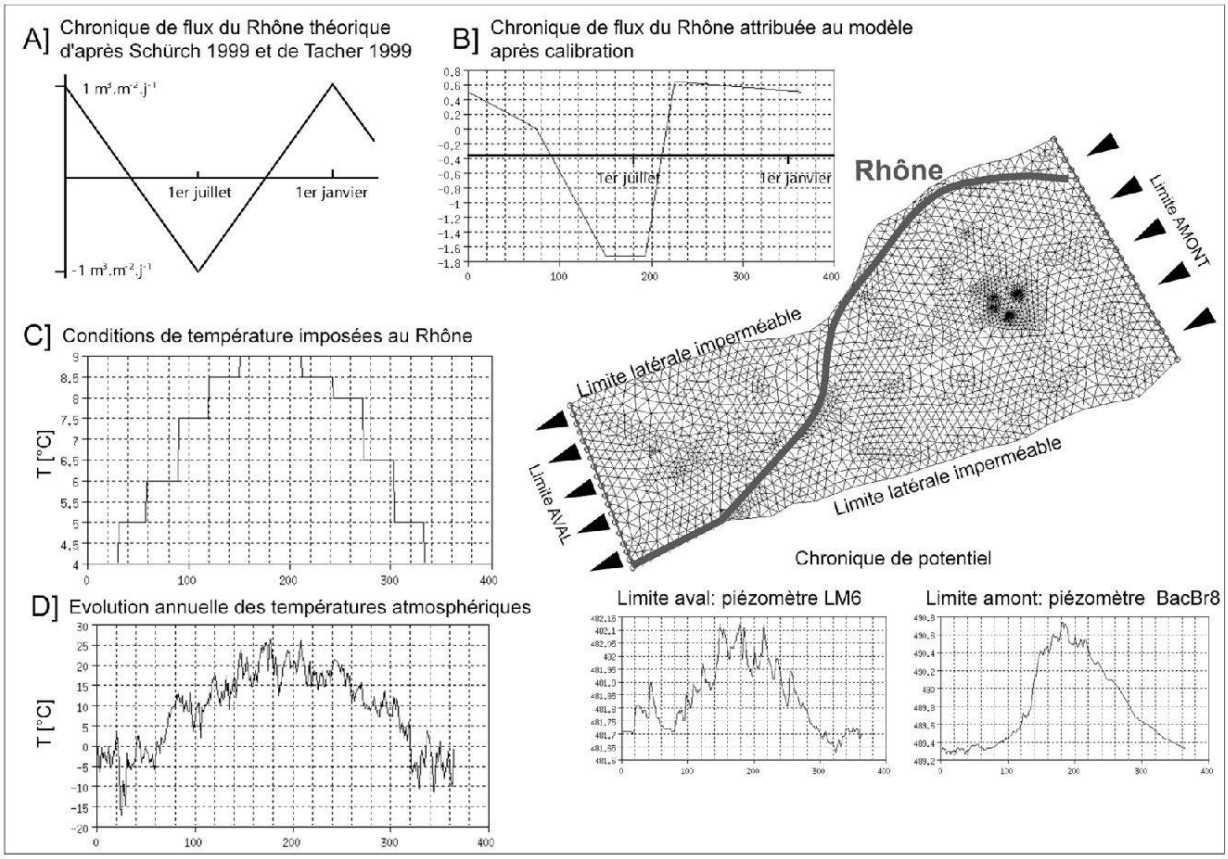

Fig. 2: Conditions aux limites imposées et conditions de flux hydraulique imposées aux noeuds de l'interface supérieure pour représenter les relations d'infiltration/drainage entre le Rhône et l'aquifère. A] Conditions de flux discutées dans Schürch 1999 et Tacher 1999 (infiltration = valeur positive). B] Chronique annuelle de conditions de flux imposée dans le modèle après calibration (infiltration = valeur positive). C] Conditions de température imposées au Rhône sur un cycle annuel. D] Evolution annuelle des températures atmosphériques (T_{atm}) pour les conditions de Cauchy.

Le fonctionnement saisonnier des installations prévues ou existantes nécessite une modélisation en régime transitoire. En fonction des données hydrologiques disponibles l'année retenue est celle de 2005. Pour représenter l'impact thermique de l'ensemble des installations, les modèles sont du type couplé hydraulique/thermique. Dans la gamme des températures prévues, il est considéré que les variations de température n'affectent pas les propriétés de l'eau ni du milieu perméable. Pour simuler les échanges thermiques de l'aquifère avec l'atmosphère, des conditions de Cauchy sont imposées à tous les nœuds de l'interface 1 (sommet du modèle). Les conditions de Cauchy sont des conditions de flux thermique imposé, variable dans le temps, mais dont l'intensité est calculée en tout point de la surface et à tout moment comme une fonction de la différence de température entre l'atmosphère et l'intérieur du modèle. Cela permet de représenter le fait qu'à température atmosphérique égale, le flux thermique entrant (été) est plus important au droit des régions froides du modèle, et notamment des PAC. Ainsi, on tient compte du fait qu'en refroidissant l'aquifère, on en favorise la recharge thermique. Le flux thermique q_T est en pratique imposé sous forme de température atmosphérique T_{atm} (pouvant varier dans le temps) et d'un coefficient de transfert Φ dont la valeur dépend de la conductivité thermique de la zone non-saturée λ_{NS} ainsi que de son épaisseur e. Ce coefficient amortit la température atmosphérique d'autant plus que la zone non saturée est isolante et épaisse. Le coefficient de transfert est distribué selon $\Phi = \lambda_{NS} / e$ [$Jm^{-2}s^{-1}K^{-1}$]. L'épaisseur de la zone non saturée est variable dans le modèle et a été déterminée en soustrayant les potentiels calculés par le modèle hydrologique en hautes eaux (t = 200 jours) aux cotes topographiques. La conductivité thermique retenue pour la zone non saturée vaut 0.9 [Jm^{-2}/s]. De Marsily (1986) indique 0.4-0.8 pour des sables secs. Angehrn (1992) donne une fourchette entre 0.8 et 1.4 pour des graviers, et 0.3 pour un sol sec.

Une condition aux limites à température imposée a été considérée sur la face amont. Elle permet de représenter l'apport en chaleur venant de l'amont des limites du modèle. Elle n'est cependant pas appliquée à la zone d'hétérothermie s'étendant sur les premiers quinze mètres du modèle (Fig. 3). Cette zone étant caractérisée par de très fortes variations saisonnières de température, Il est très difficile d'y appliquer des conditions aux limites représentatives.
Le flux géothermique est simulé en imposant un flux thermique constant q_T = 4700 $Jm^{-2}j^{-1}$ = 0.055 Wm^{-2} (Burger et al. 1985) à tous les nœuds de la base du modèle.

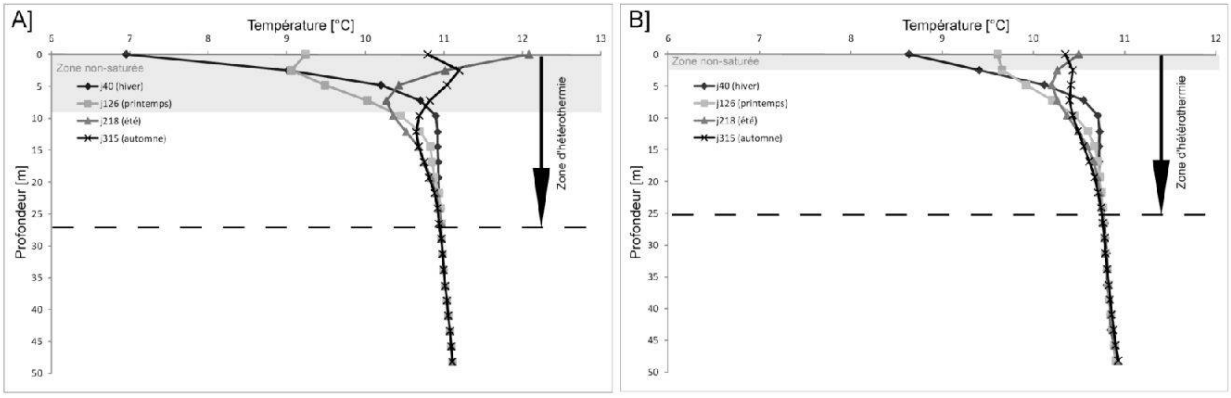

Fig. 3: Températures dans le modèle selon la profondeur et la saison. Les températures indiquées sont relevées aux 21 interfaces du modèle, soit tous les deux mètres environ. Le graphique A] représente le profil de température pour le modèle ICHV2007 avec une zone non-saturée épaisse de 9 m. Le graphique B] montre le même profil pour une zone non saturée épaisse de 2 m.

Finalement, les eaux du Rhône, s'infiltrant en été, ont une température variable selon la saison. Aux nœuds représentant les échanges hydrauliques Rhône/aquifère, les températures varient entre 4°C en hiver et 9°C en été.

4. Calibration et validité du modèle

La phase délicate de calibration du modèle a été effectuée sur la base de deux points de mesures. Des données piézométriques journalières sont fournies par des sondes à pression aux piézomètres 04I52 et RN14. La calibration s'est faite principalement en variant les flux entrants et sortants du Rhône. Son importance dans la dynamique du système le justifie. Les paramètres physiques tels que la conductivité hydraulique *k* et le coefficient d'emmagasinement *Ss* n'ont pas fait l'objet de sérieux réajustements. Les conditions aux limites de bords (amont et aval) n'ont pas été modifiées.

5. Méthode de simulation des pompes à chaleur (PAC)

Les doublets sont constitués d'un puits de prélèvement et d'un puits de réinjection, entre lesquels est installée une pompe à chaleur (PAC). La puissance des PAC varie selon le débit circulant dans le doublet ainsi que selon la différence de température entre le prélèvement et la réinjection. En aval du doublet, se développe une plume d'eau refroidie. Sous l'effet de la dispersion, cette eau se mélange à de l'eau n'ayant pas circulé dans la PAC, de sorte qu'au delà d'une certaine distance, la plume de froid s'estompe. En outre, vu la proximité du toit de l'aquifère à la surface topographique, un réchauffement estival et des déperditions hivernales sont à prendre en compte. S'y ajoute le flux géothermique.
La configuration adoptée est celle discutée dans Tacher (1999), soit une pompe à chaleur représentée par un nœud à température imposée et deux nœuds à flux hydraulique imposé. Cette configuration s'approche de la réalité du doublet. A un nœud, représentant le puits de réinjection, on impose une température et un flux hydraulique entrant (Fig. 4). A un autre nœud, situé en amont, on impose un flux hydraulique sortant, d'égale intensité, et pas de condition sur la température. Bien qu'il n'y ait pas de connexion entre les deux nœuds, le dispositif représente le prélèvement d'eau (avec sa chaleur) à un endroit, et sa réinjection à une température inférieure. Les chroniques de débits de prélèvement et de réinjection ont été fournies par le bureau BEG (Fig. 4). Le système actuel comprend deux ouvrages thermiques, celui des hôpitaux de Sion (ICHV) et celui de la SUVA. Chaque ouvrage est constitué de deux doublets eau-eau. Les hôpitaux de Sion utilisent leur système de mai à septembre comme système de refroidissement, tandis que la SUVA l'utilise également en hiver comme pompe à chaleur (de octobre à avril). L'ICHV tourne avec un débit de 1800 m^3/jour et la SUVA à 1000 m^3/jour en hiver et 4000 m^3/jour en été. Les températures réinjectées sont variables dans le temps pour les deux ouvrages.

6. Résultats – comportement hydrodynamique de la nappe du Rhône

Modèle hydrodynamique

Le calcul a été effectué avec les conditions aux limites décrites précédemment. Les conditions initiales proviennent du calcul en régime permanent avec les conditions aux limites du 1er janvier 2005 (temps = 0).
Les valeurs calculées et mesurées aux piézomètres RN14 et 04I52 montrent une excellente corrélation linéaire de respectivement de 93% et 89% (Fig. 5).
Les différences maximales observées sont de l'ordre de 30 cm aux périodes de hautes eaux. La montée et la redescente des courbes sont synchrones avec les observations.

Bilan hydraulique

En régime transitoire, le total des débits entrant à tout instant n'est pas forcément égal aux débits sortant (Tab. 2). La différence (bilan) provient de la capacité de stockage de l'aquifère. On constate que la différence entre les débits entrant et sortant est de 3%. Le système présente un équilibre hydraulique remarquable. Globalement sur l'année 2005, nous remarquons que les débits entrants sont relativement bien distribués entre la limite amont (40%), le Rhône (30%) et l'infiltration de surface (30%). Ces proportions montrent que ces limites jouent chacune un rôle important et non négligeable dans la dynamique de l'aquifère. Par contre, les débits sortants, distribués entre la limite aval (33%), le Rhône (20%) et l'évapotranspiration (47%), présentent des différences notables. L'évapotranspiration semble jouer un rôle majeur dans la dynamique générale. Le transfert hydrique par cette dernière est par ailleurs plus important en intensité que l'apport par les précipitations. De ce point de vue l'aquifère présente annuellement un fort déficit hydrique, compensé d'une part par les apports en amont

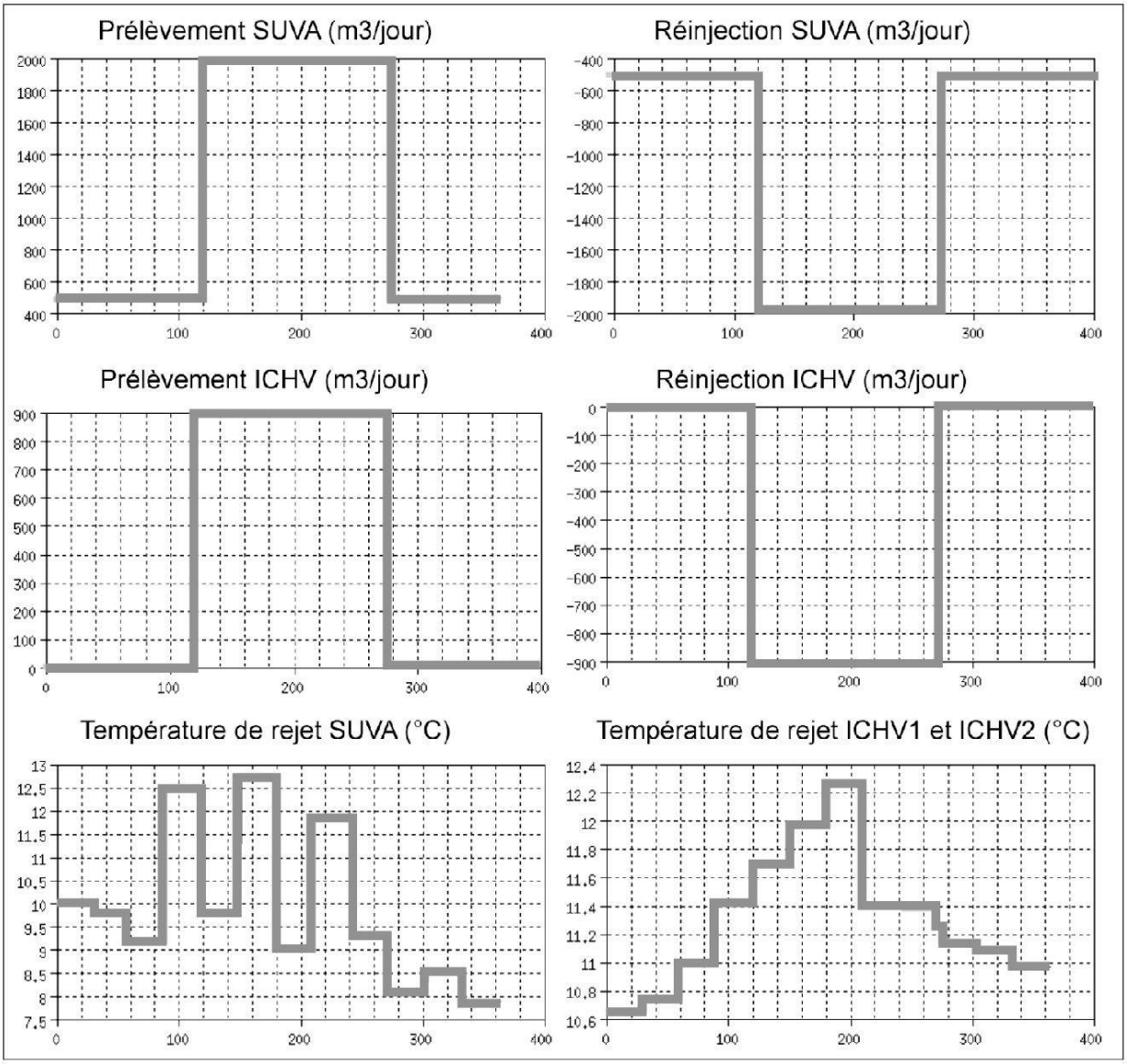

Fig. 4: Chroniques des prélèvement/réinjection et des températures.

et vraisemblablement par les infiltrations du Rhône.

Notons tout de même que l'apport hydrique du Rhône calculé est une conséquence directe des conditions aux limites à flux imposé choisies. Cependant, ces flux ont été nécessaires pour simuler les potentiels hydrauliques observés, et l'on peut considérer que sa contribution hydraulique calculée est réaliste. Les bilans mensuels sont principalement positifs (quantité d'eau entrante supérieure à celle sortante). Cependant la tendance s'inverse lors de périodes à faibles infiltrations, démontrant la relative grande importance de l'évapotranspiration dans la dynamique du modèle.

Champ de potentiel

Les potentiels hydrauliques calculés décroissent assez régulièrement vers le bas

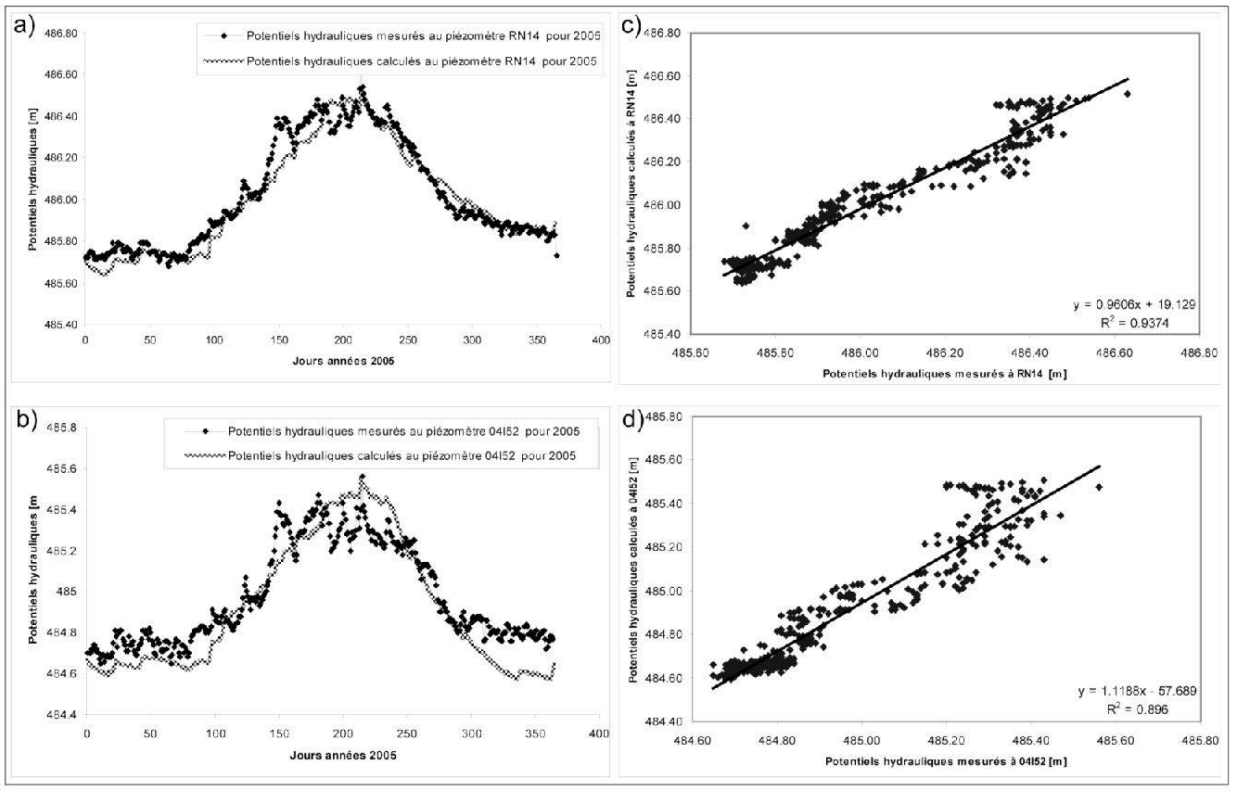

Fig. 5: Potentiels hydrauliques mesurés et calculés aux points (avec corrélations linéaires) de référence RN14 et 04I52.

Bilan hydraulique

Débits en m3/jour	2005
Entrant	30290.5
Sortant	29438.3
Différence entrant/sortant	**852.2 (3%)**
Entrant par la limite amont	11769.9 (40%)
Entrant par l'infiltration de surface	9369.9 (30%)
Entrant par flux Rhône	9150.7 (30%)
Sortant par Rhône	5791.8 (20%)
Sortant par la limite aval	9739.7 (33%)
Sortant par évapotranspiration	13906.8 (47%)

Bilan thermique

Débits en J/jour	2005
Entrant	1.71 E+12
Sortant	1.90 E+12
Différence entrant/sortant	**-0.19 E+12 (10%)**
Entrant par la surface	8.89 E+11 (52%)
Entrant limite amont	4.83 E+11 (28%)
Entrant par Rhône	2.91 E+11 (17%)
Entrant par flux géothermique	5.07 E+10 (3%)
Sortant par la surface	1.18 E+12 (62%)
Sortant limite aval	4.16 E+11 (22%)
Sortant par Rhône	3.03 E+11 (16%)

Tab. 2: Bilans hydrauliques calculés pour année 2005.

de l'aquifère de 490 m à 482 m pour août et de 489 m à 481 m pour février. Le gradient qui est constant et relativement faible vaut 0.002. Le niveau piézométrique se trouve à des profondeurs variables selon la saison et la localisation géographique. D'une manière générale la profondeur de l'aquifère se situe entre 1 et 11 mètres pour les zones présentant un fort relief. En août le niveau piézométrique est plus haut d'environ 20 cm. Le battement annuel mesuré journalièrement aux stations RN14 et 04I52 est de l'ordre du mètre. Au printemps le Rhône infiltre fortement l'aquifère. Cette période correspond à la fonte des neiges. Des quantités d'eau très importantes affluent depuis les vallées jusqu'à dans la plaine du Rhône, alors qu'une partie s'infiltre directement dans les divers aquifères alluviaux, une autre partie s'écoule directement dans le Rhône, augmentant considérablement son niveau d'eau et son débit. A la station LH 2011 des variations de l'ordre de 2 m sont observées entre janvier et juillet. En hiver la tendance s'inverse, le Rhône a un niveau d'eau très bas, les potentiels s'inversent, et localement il va drainer l'aquifère.

Vitesses d'écoulement

Les vitesses d'écoulement ne varient pas avec la profondeur. Une vitesse annuelle moyenne de l'ordre de 0.2 m/jour a été calculée. Elle varie sensiblement en hautes eaux (0.3 m/jour) et basses eaux (0.12 m/jour).

Relation nappe-rivière

L'aquifère est fortement alimenté par l'eau du fleuve par un flux de l'ordre de 2 m^3/s ce qui représente une moyenne annuelle d'environ 30% de la recharge totale de l'aquifère. Dans les modèles, le rôle du Rhône est probablement surévalué en raison du choix des conditions aux limites à flux imposés. Malgré cela, la dynamique du système a été correctement reproduite. La chronique des flux obtenue après calibration, montre une plus importante contribution du Rhône en période de fonte glaciaire (printemps) que durant les hautes eaux des mois d'août et septembre. L'hydrodynamique de l'aquifère est contrôlée au printemps par le débit important du Rhône et par les apports de bords. Les apports de bords sont constitués par les eaux infiltrées en amont du modèle. On voit que la baisse du niveau du Rhône mesurée au point LH 2011 débute dès la mi-août. Dans notre modèle cette descente est un peu plus avancée (fin juillet). Cette différence est liée au fait que pour les besoins de calibration nous avons du décaler de quelques jours (environ vingt) la période de drainage afin de pouvoir reproduire les chroniques de potentiels hydrauliques observées aux piézomètres RN14 et 04I52. Les raisons de ce décalage proviennent vraisemblablement du fait que notre modèle réagit globalement plus lentement. La réactivité du modèle est en partie contrôlé par le coefficient d'emmagasinement *Ss*, qui dans notre modèle est vraisemblablement trop grand. Dans la réalité le système ne doit pas être libre dans sa globalité. Des zones aux propriétés fortement captives doivent exister de part et d'autres de l'aquifère pouvant influencer localement les pressions hydrauliques. Ces zones difficilement identifiables dans la réalité ont été volontairement ignorées.

Bilan thermique

Globalement sur l'année 2005, nous remarquons que le bilan thermique est négatif (le système perd plus de chaleur qu'il n'en gagne). Le système perd de l'énergie en hiver et en automne, tandis que les saisons estivales (été et printemps) compensent dans une moindre mesure ce déficit. La différence de l'ordre de 10% reste néanmoins minime, considérant que ces valeurs correspondent à l'année 2005, et qu'elles devraient être discutées sur des périodes de

minimum cent ans. Les années exceptionnellement chaudes telles que 2003 permettent un rééquilibrage par une réalimentation en chaleur supérieure aux moyennes. En détail, les flux entrants sont distribués entre les apports de surface (52%), la limite amont (28%), le Rhône (17%) et le flux géothermique (3%). Ce dernier représentant que quelques pourcents des apports globaux. La majorité des apports proviennent ainsi des transferts entre l'atmosphère et l'aquifère, et secondairement de la limite amont et du Rhône. Concernant les flux sortants, ils sont distribués entre les transferts de surface (62%), la limite avale (22%), le Rhône (16%). Nous constatons que les pertes de chaleur par la surface sont importantes et pas entièrement compensées par la recharge estivale. Les pertes par le Rhône sont inférieures à 20%, tandis que la limite avale (flux sortant) et approximativement égale au flux entrant par la limite amont (~25%). Ces bilans thermiques indiquent que les relations avec l'atmosphère gouvernent la température dans l'aquifère. Les fluctuations saisonnières de température dans la zone d'hétérothermie en témoignent. Les ordres de grandeur des flux thermiques sont approximativement de $1E^{12}$ [$J \cdot j^{-1}$] pour les échanges aquifère/atmosphère, de $5E^{11}$ [$J \cdot j^{-1}$] pour le flux thermique associé à l'eau entrant par la face verticale amont et de $5E^{10}$ [$J \cdot j^{-1}$] pour le flux géothermique. La recharge thermique estivale via la zone non-saturée, peu épaisse, compense dans une moindre mesure les pertes hivernales. Comme constatés pour l'hydraulique, les transferts de surface sont très importants dans la dynamique globale.

Champ de température

Les températures calculées dans le modèle s'étendent en hiver de 4°C (température imposée aux Rhône) à 9°C, et en été de 9°C (température imposée aux Rhône) à 12°C en surface. Les variations de température de l'aquifère semblent davantage dues aux fluctuations de la température atmosphérique qu'à l'infiltration depuis le Rhône. Les fluctuations annuelles de température atmosphérique et des eaux d'infiltration du Rhône induisent une stratification des températures de l'aquifère. En subsurface, les températures oscillent entre 8.6°C en hiver et 10.8°C en été. Ces valeurs sont comparables aux mesures de GEOVAL (1986). En profondeur, l'effet saisonnier est atténué. Dès 15 m de profondeur, la température est à peu près constante, voisine de 10.8°C (Fig. 3). Cette épaisseur d'hétérothermie marquée est compatible avec les valeurs bibliographiques (Tacher 1999, Recordon 1985). Les profils de températures calculés montrent également un déphasage de l'effet saisonnier. Par exemple, le profil vertical en hiver montre un maximum vers 10 m de profondeur qui correspondrait à la propagation atténuée de l'été précédent. Les mesures effectuées dans la région de St-Léonard (GEOTEST 1989) montrent des profils de température semblables.
La distribution de température en profondeur varie fortement avec l'épaisseur de la couche non-saturée. L'alimentation en chaleur diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de la zone non-saturée. La limite entre les zones d'hétérothermie et d'homothermie ne semble cependant pas varier.

Relations thermiques Nappe-Rivière

En été, l'infiltration d'eau du fleuve est perceptible sur quelques dizaines de mètres. Son panache thermique s'étend sur une distance maximale de 500 m latéralement dans la direction d'écoulement et de quelques dizaines de mètres verticalement. Cependant, les variations de température de l'aquifère semblent davantage dues aux fluctuations de température atmosphérique qu'à l'infiltration depuis le Rhône. Notons toutefois que des mesures effectuées au puits de pompage de la SUVA montrent cependant que des eaux pouvant provenir

du Rhône seraient pompées. Ces eaux seraient infiltrées en amont à l'extérieur des limites du modèle.

7. Modèle avec PAC

Comme illustré dans la figure 4, les deux systèmes de doublets ICHV et SUVA ont des cadences de pompage et d'injection différentes selon les saisons. Leur effet sur le système a été étudié à partir de bilans saisonniers. L'exploitation de chaleur dans l'aquifère est compensée par la recharge thermique estivale via la zone non-saturée variablement épaisse. Ce phénomène est probablement conforté par le fait que l'été est aussi la période des hautes eaux dans l'aquifère, ce qui favorise encore l'échange de chaleur avec l'atmosphère. D'un point de vue thermique, l'influence des pompes à chaleur est minime. La chaleur qui transite par ces pompes s'élève à 1% (voir bilans thermiques dans tableaux 3 et 4). Les pompes à chaleur, avec leur fonctionnement principalement estival, contribuent à la recharge thermique du système.

D'un point de vue hydraulique, les pompes de la SUVA fonctionnent en hiver avec de faibles débits de l'ordre de 1000 m³/jour. En été, lorsque ICHV fonctionne également, les débits extraits sont de l'ordre de 5800 m³/jour. Ces débits ne représentent pas un déséquilibre pour le système étant donné qu'ils sont immédiatement restitués.

Les systèmes de refroidissement ICHV et SUVA représentent annuellement 1% de la recharge en chaleur de l'aquifère à l'échelle du modèle. De ce point de vue il n'y a aucune restriction à l'installation de nouveaux systèmes.

7.1 Zones d'influence des PAC

L'analyse des données disponibles (BEG 2004, 2005) montre que les doublets ther-

Bilan hydraulique en hiver

Flux entrant par la face amont	7.97E+3 [$m^3.j^{-1}$]
Flux entrant par le Rhône	2.53E+2 [$m^3.j^{-1}$]
Flux entrant par précipitations	8.27E+3 [$m^3.j^{-1}$]
Flux sortant par la face aval	- 9.92E+3 [$m^3.j^{-1}$]
Flux sortant par évapotranspiration	- 4.29E+3 [$m^3.j^{-1}$]
Flux exfiltré vers le Rhône	- 5.51E+3 [$m^3.j^{-1}$]
Puits de prélèvement ICHV PAC	
Puits de réinjection ICHV PAC	
Puits de prélèvement SUVA PAC	- 1.00E+3 [$m^3.j^{-1}$]
Puits de réinjection SUVA PAC	1.00E+3 [$m^3.j^{-1}$]
Total	**- 3.23E+3 [$m^3.j^{-1}$]**

Bilan thermique en hiver

Flux entrant par la face amont	3.42E+11 [$J.j^{-1}$]
Flux entrant avec les précipitations	3.89E+11 [$J.j^{-1}$]
Flux entrant par le Rhône	4.68E+10 [$J.j^{-1}$]
Flux géothermique à la base	4.64E+10 [$J.j^{-1}$]
Flux sortant par la face aval	- 4.59E+11 [$J.j^{-1}$]
Flux sortant par le sommet	- 2.04E+11 [$J.j^{-1}$]
Flux sortant par exfiltration vers le Rhône	- 1.64E+12 [$J.j^{-1}$]
Puits de prélèvement ICHV PAC	
Puits de réinjection ICHV PAC	
Puits de prélèvement SUVA PAC	- 4.47E+10 [$J.j^{-1}$]
Puits de réinjection SUVA PAC	4.00E+10 [$J.j^{-1}$]
Total	**- 1.48E+12 [$J.j^{-1}$]**

Bilan hydraulique au printemps

Flux entrant par la face amont	1.80E+4 [$m^3.j^{-1}$]
Flux entrant par le Rhône	2.34E+4 [$m^3.j^{-1}$]
Flux entrant par précipitations	1.06E+4 [$m^3.j^{-1}$]
Flux sortant par la face aval	- 8.88E+3 [$m^3.j^{-1}$]
Flux sortant par évapotranspiration	- 2.17E+4 [$m^3.j^{-1}$]
Flux exfiltré vers le Rhône	
Puits de prélèvement ICHV PAC	- 1.01E+3 [$m^3.j^{-1}$]
Puits de réinjection ICHV PAC	1.01E+3 [$m^3.j^{-1}$]
Puits de prélèvement SUVA PAC	- 2.68E+3 [$m^3.j^{-1}$]
Puits de réinjection SUVA PAC	2.68E+3 [$m^3.j^{-1}$]
Total	**2.14E+4[$m^3.j^{-1}$]**

Bilan thermique au printemps

Flux entrant par la face amont	7.58E+11[$J.j^{-1}$]
Flux entrant avec les précipitations	4.93E+11 [$J.j^{-1}$]
Flux entrant par le Rhône	1.37E+12 [$J.j^{-1}$]
Flux géothermique à la base	5.83E+10 [$J.j^{-1}$]
Flux sortant par la face aval	- 3.63E+11[$J.j^{-1}$]
Flux sortant par le sommet	-1.01E+12 [$J.j^{-1}$]
Flux sortant par exfiltration vers le Rhône	-4.45E+10 [$J.j^{-1}$]
Puits de prélèvement ICHV PAC	-4.60E+10 [$J.j^{-1}$]
Puits de réinjection ICHV PAC	5.96E+10 [$J.j^{-1}$]
Puits de prélèvement SUVA PAC	- 1.18E+11 [$J.j^{-1}$]
Puits de réinjection SUVA PAC	1.25E+11 [$J.j^{-1}$]
Total	**1.26E+12 [$J.j^{-1}$]**

Tab 3: Bilans hydraulique et thermique hiver et printemps.

miques actuels (ICHV et SUVA) mis en place fonctionnent correctement. Les puits de prélèvement de l'ICHV sont distants de 200 m des puits de prélèvement et d'infiltration de la SUVA. Le puits de rejet est distant respectivement de 200 et 110 m. Cependant, des essais de pompage ont montré (BEG 2005) que le rayon d'influence du rabattement du puits de prélèvement de ICHV dépasse les 80 m, pour atteindre environ 120 m. Il en va très probablement de même pour les puits de la SUVA. Cela signifie que les cônes de rabattement et de hausse des puits implantés dans ce secteur s'interpénètrent et qu'il y a influence réciproque.

Les modélisations numériques ont également démontré que les puits ICHV et SUVA sont trop rapprochés. L'analyse des modèles numériques met en évidence des interférences possibles entre les puits (Fig. 6). Les eaux pompées par les puits ICHV proviennent en partie des eaux réinjectées en aval par la SUVA. Ces résultats expliquent en partie le fait que les eaux pompées à ICHV présentent des températures supérieures à la normale. Les eaux réinjectées par ICHV sont distribuées en aval créant un panache d'une centaine de mètres de largeur et de longueur. Les eaux réinjectées par la SUVA forment également un panache de direction SW d'une centaine de mètres. Précisons toutefois que ces panaches ne présentent pas des températures élevées. Après 400 m, les températures réinjectées s'équilibrent avec l'aquifère et la différence de température est inférieure à 0.1°C. Il convient également de rappeler que SUVA pompe l'eau à environ 14 m de profond pour la réinjecter à 26 m de profondeur. ICHV pompe et rejette l'eau entre 20 et 35 m de profond.

Concernant les pompes de ICHV, les simulations montrent que durant les 80 premiers jours de fonctionnement les perturbations thermiques sont minimes. A t = 275 (octobre), représentant la fin de la période d'utilisation, la majeure partie du panache d'eau

Bilan hydraulique en été

Flux entrant par la face amont	1.33E+4 [$m^3.j^{-1}$]
Flux entrant par le Rhône	1.30E+4 [$m^3.j^{-1}$]
Flux entrant par précipitations	6.93E+3 [$m^3.j^{-1}$]
Flux sortant par la face aval	- 1.07E+4 [$m^3.j^{-1}$]
Flux sortant parévapotranspiration	- 3.26E+3 [$m^3.j^{-1}$]
Flux exfiltré vers le Rhône	- 6.05E+3 [$m^3.j^{-1}$]
Puits de prélèvement ICHV PAC	- 1.80E+3 [$m^3.j^{-1}$]
Puits de réinjectionICHV PAC	1.80E+3 [$m^3.j^{-1}$]
Puits de prélèvement SUVA PAC	- 4.00E+3 [$m^3.j^{-1}$]
Puits de réinjection SUVA PAC	4.00E+3 [$m^3.j^{-1}$]
Total	1.32E+4[$m^3.j^{-1}$]

Bilan thermique en été

Flux entrant parla face amont	5.77E+11 [$J.j^{-1}$]
Flux entrant avec les précipitations	6.19E+11 [$J.j^{-1}$]
Flux entrantpar le Rhône	1.37E+12 [$J.j^{-1}$]
Flux géothermique à la base	6.58E+10 [$J.j^{-1}$]
Flux sortant par la face aval	- 4.85E+11 [$J.j^{-1}$]
Flux sortant par le sommet	-1.02E+12 [$J.j^{-1}$]
Flux sortant par exfiltration vers le Rhône	- 2.08E+11 [$J.j^{-1}$]
Puits de prélèvement ICHV PAC	- 8.37E+10 [$J.j^{-1}$]
Puits de réinjectionICHV PAC	9.66E+10 [$J.j^{-1}$]
Puits de prélèvement SUVA PAC	- 1.77E+11 [$J.j^{-1}$]
Puits de réinjection SUVA PAC	1.75E+11 [$J.j^{-1}$]
Total	9.30E+11 [$J.j^{-1}$]

Bilan hydraulique en automne

Flux entrant par la face amont	6.57E+3 [$m^3.j^{-1}$]
Flux entrant par le Rhône	1.22E+2 [$m^3.j^{-1}$]
Flux entrant par précipitations	5.59E+3 [$m^3.j^{-1}$]
Flux sortant par laface aval	- 1.03E+4 [$m^3.j^{-1}$]
Flux sortant parévapotranspiration	- 5.15E+3 [$m^3.j^{-1}$]
Flux exfiltré vers le Rhône	- 1.17E+4 [$m^3.j^{-1}$]
Puits de prélèvement ICHV PAC	- 1.72E+2 [$m^3.j^{-1}$]
Puits de réinjectionICHV PAC	1.72E+2 [$m^3.j^{-1}$]
Puits de prélèvement SUVA PAC	- 1.29E+3 [$m^3.j^{-1}$]
Puits de réinjection SUVA PAC	1.29E+3 [$m^3.j^{-1}$]
Total	- 1.49E+4[$m^3.j^{-1}$]

Bilan thermique en automne

Flux entrant par la face amont	2.53E+11 [$J.j^{-1}$]
Flux entrant avec les précipitations	2.61E+11 [$J.j^{-1}$]
Flux entrantpar le Rhône	4.76E+10 [$J.j^{-1}$]
Flux géothermique à la base	4.61E+10 [$J.j^{-1}$]
Flux sortant par la face aval	- 3.93E+11 [$J.j^{-1}$]
Flux sortant par le sommet	- 2.40E+11 [$J.j^{-1}$]
Flux sortant par exfiltration vers le Rhône	- 1.32E+12 [$J.j^{-1}$]
Puits de prélèvement ICHV PAC	- 8.09E+09 [$J.j^{-1}$]
Puits de réinjectionICHV PAC	8.39E+09 [$J.j^{-1}$]
Puits de prélèvement SUVA PAC	- 5.71E+10 [$J.j^{-1}$]
Puits de réinjection SUVA PAC	4.58E+10 [$J.j^{-1}$]
Total	- 1.35E+12 [$J.j^{-1}$]

Tab 4: Bilans hydraulique et thermique été et automne.

chaude rejeté est pompée en amont par les puits de prélèvement. Ces résultats confirment en partie les résultats de l'essai de pompage effectué en 2005 (BEG 2005). Le puits d'infiltration Pi2 enregistrait une baisse de 6 cm durant le palier à 800 l/min lors de l'essai de pompage simple dans Pp2 avec rejet dans la conduite. Le rabattement dans le puits de prélèvement Pp2 était plus faible lors de l'essai avec rejet dans le puits d'infiltration Pi2 montrant qu'une fraction (19%) de l'eau provenant du puits d'infiltration retournait à son point de départ. En conclusion, la réinjection d'eau réchauffée augmente la température initiale de l'eau pompée.

En revanche, les simulations concernant les pompes de la SUVA ne montrent aucune interférence entre puits de rejet et de pompage. La distance verticale et horizontale est suffisamment importante pour éviter les interférences. Les eaux pompées proviennent principalement de la surface.

Finalement à la fin de la période de fonctionnement des pompes ICHV, l'extension maximale du panache de chaleur en aval est d'une centaine de mètres (~200 m). Au-delà l'équilibre thermique s'opère et les eaux chaudes rejetées sont mélangées aux eaux locales, indiquant des températures de 10.8°C en moyenne.

En conclusion la distance minimale préconisée pour de nouvelles installations géothermiques serait de 200 m. A titre de sécurité leur localisation ne devrait pas se situer dans une distance de 1500 à 3000 m en aval des doublets en exploitation. Cette distance

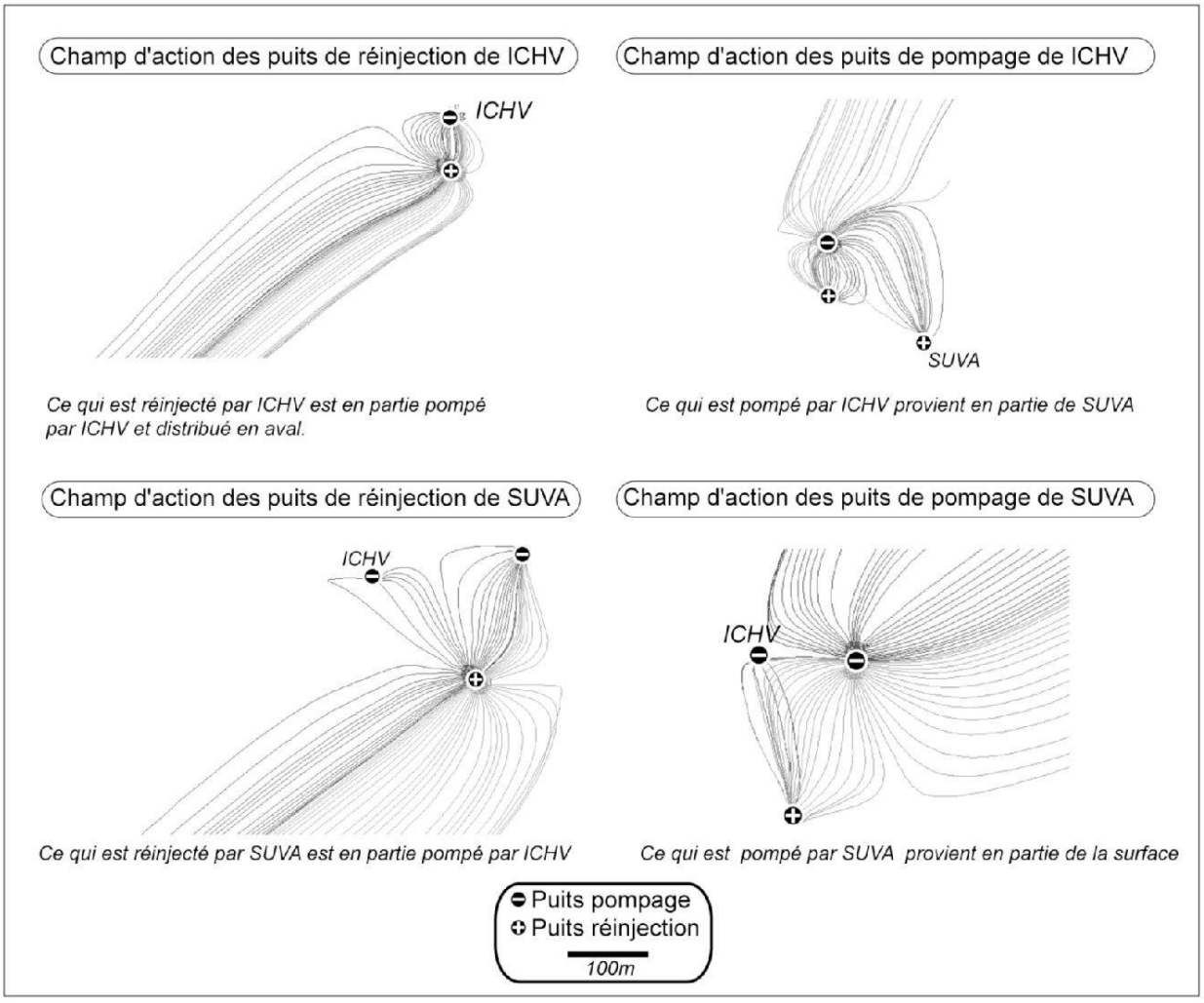

Fig. 6: Interférence entre les puits de prélèvement et de réinjection de ICHV et SUVA.

a été déterminée par les zones d'influence des puits de réinjection (Fig. 6).

Cette analyse permet de proposer des variantes. Les futures installations devraient se situer en dehors des panaches possibles d'eaux réinjectées par ICHV et SUVA, et si possible se situer à une profondeur adéquate, permettant de pomper des eaux superficielles plus froides. Ce dispositif augmenterait le rendement des systèmes de refroidissement et éviterait dans une certaine mesure de possibles interférences.

7.2 Influences de nouveaux PAC

Diverses variantes de doublet pour système de refroidissement eau-eau pompant l'eau à environ 15 m de profond et la rejetant à 25 m de profond ont été testées pour déterminer l'influence sur l'aquifère. Cette configuration permet de pomper des eaux moins profondes hors influence des puits de rejet de ICHV et SUVA. Un fonctionnant hivernal pour le réchauffement a également été traité. Les débits souhaités sont de l'ordre de 4200 l/min (soit 2100 l/min par puits, 3024 m^3/jour/puits). Globalement lorsque les puits sont utilisés pour le refroidissement la contribution annuelle à la recharge en chaleur représente 1.6%, contre 1% pour l'état actuel (à savoir seulement avec les systèmes ICHV et SUVA). Les variantes tenant compte d'un fonctionnement également hivernal, montrent que les puits représentent une perte en chaleur très minime de 0.24% pour le système. Donc de ce point de vue il n'y aurait aucune restriction à l'installation de nouveaux systèmes fonctionnant également en hiver pour le réchauffement. Le système a thermiquement de la réserve.

8. Conclusions

Hydrauliquement, les modèles numériques ont montré toute l'importance que tient le Rhône dans la dynamique du système. Mis à part le Rhône, les relations atmosphère/aquifère se sont également montrées déterminantes ($^1/_3$ des flux hydrauliques entrant et $^1/_2$ des flux sortant).
Du point de vue thermique, le Rhône ne semble jouer qu'un rôle mineur dans la distribution de la chaleur dans les modèles, étant donné que son panache thermique s'étend sur une distance maximale de 500 m latéralement dans la direction d'écoulement et de quelques dizaines de mètres verticalement. Son importance pourrait être plus importante en amont des limites du modèle, où il pourrait constituer une source d'apport non négligeable d'eau froide. Les transferts de chaleur par la surface contrôlent thermiquement le système, plus de la moitié des flux thermiques entrant et sortant transitant par cette surface via la zone non-saturée, marquant bien les fluctuations saisonnières atmosphériques. L'épaisseur de la zone non-saturée contrôle la recharge thermique, notamment la recharge estivale, qui compense en partie les pertes hivernales. La limite entre les zones d'homothermie et d'hétérothermie a été définie à environ quinze mètres. Au-delà de cette profondeur la température est constante et vaut 10.8°C.

Actuellement, deux installations de refroidissement sont installées, ICHV et SUVA. Les mesures effectuées sur les puits de ICHV ainsi que les modèles numériques montrent que le puits 1 de l'ICHV fonctionne parfaitement, captant des eaux de température invariable. Le puits 2 de prélèvement de l'ICHV est perturbé par les puits de rejet, ce qui fait qu'à sa mise en service, la température naturelle de 10.8°C monte en 2-3 semaines à 11.3°C. Cette valeur de 11.3°C vaut la moyenne entre les puits de rejet 1 (~11.1°C) et 2 (~11.5°C). Le puits de pompage n°2 prélève surtout les eaux de rejet alors que le puits 1 pompe des eaux provenant de l'amont. Les températures de pompage de la SUVA mesurées montrent de possibles connexions avec les eaux de surface. Des températures bas-

ses ont été mesurées aux puits de pompage de la SUVA en 2005 et 2006 (8°C août 2005 et 7.5°C juillet 2006). Ces températures sont très similaires à celles de la nappe superficielle en amont (BacBR4) mais avec 2 mois de retard (7-8°C en mai 2005 et 12°C en octobre pour le piézomètre BacBR4, 7-8°C en juillet et 12°C en décembre pour SUVA). Cela peut indiquer que le Rhône s'infiltre fortement en amont en période de hautes eaux et amènerait des eaux à 5-6°C en avril-mai et à 8-9°C en juin-septembre. Ces eaux arrivent en environ un mois au piézomètre BacBR4 et en deux ou trois mois à la SUVA. SUVA pompe ainsi des eaux superficielles plus froides.
Les simulations numériques montrent que les puits actuels, fonctionnant principalement en été pour le refroidissement, n'influencent thermiquement pas d'une manière importante l'aquifère à l'échelle du modèle (1% de la recharge en chaleur annuelle). L'extension maximale du panache de chaleur de ICHV et SUVA en aval est d'une centaine de mètres (maximum 200 m). D'un point de vue hydraulique et thermique, il n'y a aucune restriction quand à la perspective d'installation de nouveaux systèmes géothermiques dans l'aquifère de la nappe alluviale du Rhône. Cependant, la distance minimale préconisée pour de nouvelles installations géothermiques est de 200 m. Par sécurité, leur localisation ne devrait pas se situer dans une distance minimale de 1500 à 3000 m en aval des doublets en exploitation, distance déterminée par les zones d'influence des puits de réinjection.
Toutefois, les simulations numériques ont montré que, d'une part dû aux fortes perméabilités du milieu, et d'autre part dû aux débits imposés (jusqu'à 3000 m^3/jours/puits), de fortes interférences existent entre les puits de prélèvement et de réinjection d'un même doublet. Un espacement inférieur à 170 m entre les puits de prélèvement et de réinjection perturbe fortement les températures de pompage, pouvant augmenter la température des eaux prélevées de plus de 2°C. Une distance d'au minimum 170 m entre les puits de prélèvement et de pompage atténuant fortement ces interférences (augmentation de température des eaux pompées inférieure à 0.5°C) est recommandée.

Globalement, lorsque les puits sont utilisés pour le refroidissement, leur contribution annuelle à la recharge en chaleur représente 1.6%, contre 1% pour le système actuel (à savoir ICHV et SUVA). Les variantes tenant compte d'un fonctionnement également hivernal, montrent que les puits représentent une perte en chaleur. Cette perte en chaleur reste toutefois très minime (0.24% de la perte en chaleur du système).

References

Angehrn, P., Büro für Hydrogeologie Dr. Peter P. Angehrn AG 1992: Wärmepumpenkonzept Kanton Uri; Phase 2. Amt für Umweltschutz Uri. Bericht 30.10.92.

BEG 2004: ICHV SION, Installations de refroidissement et pompe à chaleur. Etude n°3546.

BEG 2005: ICHV SION, Installations de refroidissement. Etude n°3546.

Burger, A., Recordon, E., Bovet, D., Cotton, L. & Saugy, B. 1985: Thermique des nappes souterraines. Presses polytechniques romandes.

De Marsily, G. 1986: Quantitative Hydrogeology, Academic Press, Inc.

Feflow, Finite Element groundwater modeling software, Wasy AG, Berlin.

Gelhar, L. 1986: Stochastic subsurface hydrology from theory to applications. Water Resources Research 22. p. 135-145.

GEOTEST 1989: Essais de flowmeter, Saint-Léonard et Granges. Service des Routes Nationales. Non publié. Rap. Geotest SA 89511- 06.12.89.

GEOVAL 1986: Palier n°4. Etude hydrogéologique; rapport après 3 ans d'observation. Hydrorhône SA. Non publié. Rap. Géoval n°GEO 3-04.

Matti, B. 2007: Modélisation hydrogéologique de l'implantation d'un système de refroidissement eau-eau à l'hôpital cantonal de Sion (VS). Etude n°0707 non publiée, GEOLEP 2007.

Recordon, E. 1985: Mécanique des sols ; Ecublens : Polycopié EPFL, 1985.

Schürch, M. 1999: Détermination des paramètres hydrauliques et hydrochimiques d'un aquifère alluvial dans une vallée alpine (Valais, Suisse). Thèse de doctorat n°1502, Université de Neuchâtel.

Tacher, L. 1999: Norme d'exploitation de l'aquifère phréatique du Rhône par doublets géothermiques eau-eau. Etude n°9903, GEOLEP 1999.