Zeitschrift: Archives des sciences [2004-ff.]

Herausgeber: Société de Physique et d'histoire Naturelle de Genève

Band: 65 (2012)

Heft: 1-2

Artikel: Valorisation thermique des eaux profondes lacustres : le réseau genevois GLN et quelques considérations générales sur ces systèmes

Autor: Faessler, Jérôme / Hollmuller, Pierre / Lachal, Bernard

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-738363

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: 15.07.2025

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

Valorisation thermique des eaux profondes lacustres: le réseau genevois GLN et quelques considérations générales sur ces systèmes

Jérôme FAESSLER[1], Pierre HOLLMULLER[1], Bernard LACHAL[1] and Pierre-Alain VIQUERAT[1,2]

Ms. reçu le 25 octobre 2012, accepté le 7 décembre 2012

Abstract

Thermal use of deep lake water: the case of the Geneva GLN system and general considerations – *There is an increased use of thermal energy of lakes, mainly due to the growing demand of air conditioning of buildings. Basing on the study of the GLN system in Geneva, the effects of such facilities on the lake environment are studied and the impacts assessed as very low. The generalization of such systems is mainly limited by the cooling demand, which should remain limited in the Swiss climate, rather than by the physical limits of the resource. In addition, the comparison of environmental impacts with traditional cooling (thermal electricity and chillers) is in favor of this type of system. Appropriate use of this resource to ensure the lowest possible impacts requires a better scientific understanding of the lake system itself.*

Keywords: *Lake, thermal use, network, air conditionning, environmental impact*

Résumé

L'énergie thermique des lacs est de plus en plus valorisée, principalement pour répondre aux demandes croissantes de climatisation des bâtiments. A partir du retour d'expérience réalisé sur le système GLN à Genève, les effets de telles infrastructures sur le milieu lacustre ont été étudiés et les impacts ont été évalués comme très faibles. La généralisation de tels systèmes est principalement limitée par la demande de climatisation qui restera restreinte sous nos climats, plutôt que par les limites physiques de la ressource. De plus, la comparaison des impacts sur l'environnement avec la filière énergétique traditionnellement utilisée (électricité thermique et groupe de froid) se montre favorable à ce type de système. Une utilisation correcte de cette ressource garantissant des impacts aussi faibles que possible nécessite une meilleure connaissance scientifique du système lacustre lui-même.

Mots-clés: *Lac, valorisation thermique, réseau, climatisation, impact environnemental*

Introduction

L'utilisation de l'énergie thermique contenue dans les lacs, qui provient essentiellement de son interaction avec le soleil et l'atmosphère, est récente. On citera l'emploi d'eau de lac comme sources froides pour des pompes à chaleur ou comme puits pour les déchets-chaleur des systèmes de climatisation (Faessler et al. 2009a). Nouvellement, des grosses infrastructures de réseaux thermiques valorisant la ressource «froid» des couches profondes de lac se développent à différents points de la planète. Ainsi, l'EPFL et l'Université Cornell (Etat de New York) utilisent respectivement le «froid» des couches profondes du Léman et du Lac Cayuga pour refroidir leurs propres bâtiments et évacuer la chaleur issue

[1] *Institut Forel et Institut des sciences de l'environnement, Section des Sciences de la Terre et de l'Environnement, Université de Genève, Route de Drize 7, Batelle D, CH-1227 Carouge, Suisse.*

[2] *Adresse actuelle: Services Industriels de Genève. Ch. Château-Bloch 2, CH-1219 Le Lignon, Suisse*

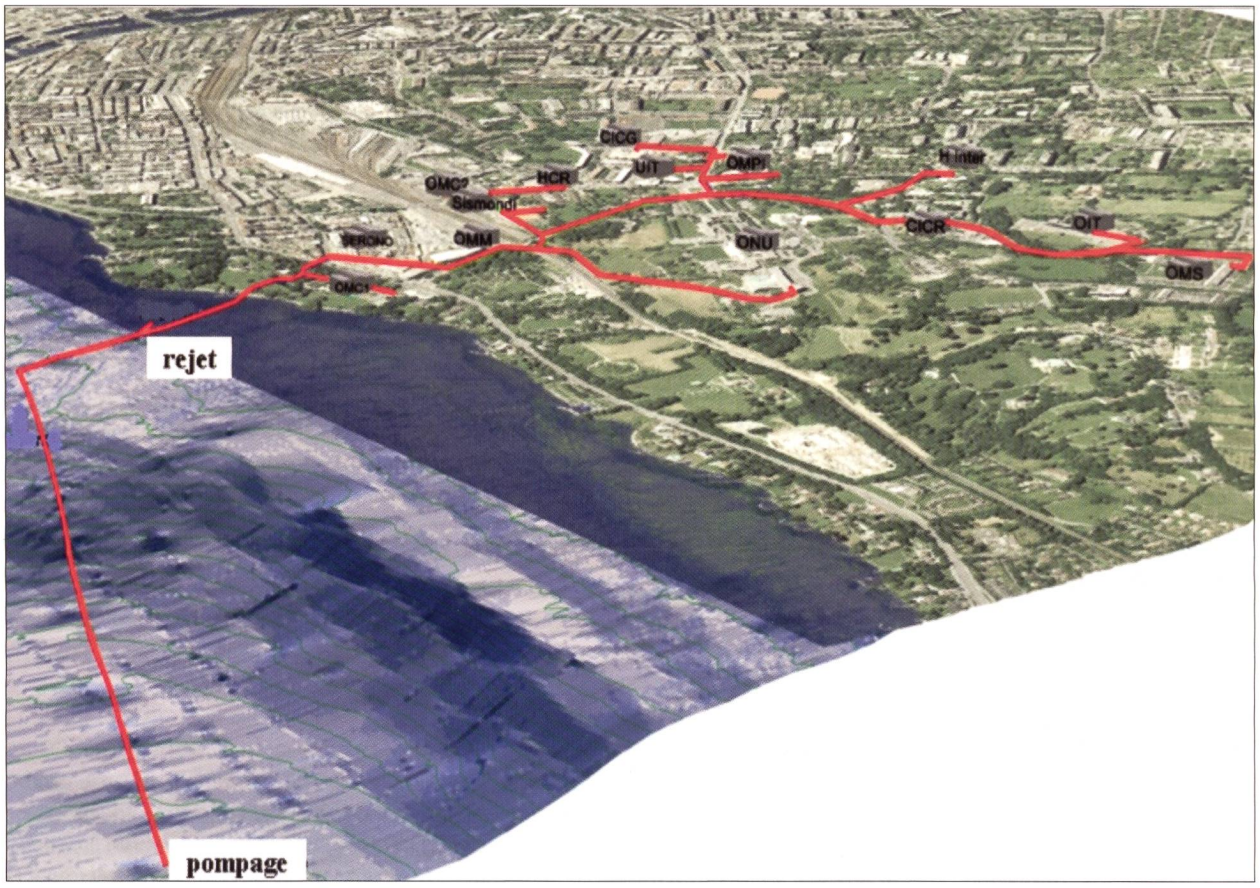

Fig. 1. Réseau Genève-Lac-Nation (GLN).

de leurs activités (datacenter (centres de calcul informatique), labo,...). Le système le plus avancé est celui de Toronto (Viquerat 2012), qui alimente en froid tout le centre de la ville (puissance totale du réseau de froid de 250 MW, dont 60 MW proviennent du Lac Ontario). En plus de sa taille, une originalité de ce système est la synergie d'usages «matière» et «énergie» puisque les calories puisées chez les utilisateurs du réseau thermique servent à déglacer l'eau potable, pompée à basse température (4°C en été, du fait d'une profondeur de pompage de 83 m). Le système de Toronto est «multi ressources», puisque complémentairement à la contribution du «lac» de type ruban, une centrale de froid «classique» couvre les pointes de demande.

Le réseau de froid GLN (Genève Lac Nation) a été initié au début des années 2000 par la société Merck-Serono lors de la construction de leur nouveau bâtiment dans le quartier de Sécheron, sur la rive droite du Léman; puis s'y est adjoint un projet plus large, géré par les Services Industriels de Genève (SIG), pour répondre aux besoins de climatisation des nombreuses organisations internationales présentent à proximité (voir Fig. 1). Basé sur les couches profondes du Léman, il est maintenant opérationnel depuis 2009 et vise en premier lieu la couverture des besoins de climatisation. Le pompage de 4000 m³/h d'eau (2700 pour GLN et 1300 pour Merck Serono) est effectué à une profondeur de 37 m. Une canalisation existante, en bon état mais désaffectée, de 2.5 km de long amène l'eau à la centrale de pompage située sur la rive. De là, un réseau de 6 km de long distribue l'eau fraîche aux utilisateurs et récupère l'eau réchauffée, qui est rejetée finalement dans les couches superficielles du lac à une profondeur de 4,5 m. Le lac est ainsi source de froid dans sa partie profonde et puits de chaleur en superficie, naturellement chaude en période estivale. Le système est aussi actif en hiver, époque pendant laquelle il fonctionne très différemment et de préférence en boucle fermée. Les gains de chaleur issus principalement des datacenters ont tendance à contrebalancer le soutirage de chaleur pour le chauffage des bâtiments via des pompes à chaleur. Le rôle du lac est alors de maintenir la température de la boucle dans la zone de fonctionnement des systèmes connectés, une injection d'eau du lac étant uniquement effectuée lorsque nécessaire. En plus de la suppression des impacts éventuels sur le milieu lacustre, le fonctionnement en circuit fermé permet une moindre consommation électrique car il n'est plus nécessaire de vaincre les 75 m de dénivellation entre le niveau du lac et le point le plus haut du circuit.

Les caractéristiques du système GLN sont:

- Le réseau de froid est mono-ressource, il n'y a donc pas de correction possible de la température de la ressource lac, sauf au niveau de chaque client après l'échangeur de chaleur;
- Il n'est pas dédié à un seul gros preneur, ainsi tout le froid doit être valorisé auprès d'un nombre important de clients (réseau commercial);
- La quasi-totalité de ces preneurs sont déjà pourvus d'un système de climatisation classique fonctionnant depuis de nombreuses années, systèmes conservés de façon décentralisée en complémentarité du réseau GLN. Les déchets chaleur des groupes de froid sont aussi évacués dans le réseau GLN;
- En hiver, il y a récupération de la chaleur fatale des datacenters pour l'alimentation de pompes à chaleur et le système sollicite le lac au minimum.

Les principales données du projet GLN sont présentées dans la table 1 (Viquerat 2012).

Table.1. Caractéristiques GLN.

Profondeur de pompage	37	m
Profondeur de rejet	4,5	m
Débit nominal GLN	2700	m³/h
Débit nominal Merk Serono	1300	m³/h
Puissance de pompage, boucle ouverte, débit nominal	300	kW
Puissance de pompage, boucle fermée, débit nominal	20	kW
Longueur du réseau	6000	m
Puissance thermique évacuée, maximale 2009-2011	12	MW
Puissance thermique évacuée nominale	16	MW
Puissance thermique absorbée max en hiver	0.8	MW
Energie thermique nominale	16	GWh
Energie thermique valorisée 2011	5.6	GWh

Ces aspects innovants ont permis au projet GLN d'être choisi comme système pilote du programme européen Concerto (projet TETRAENER, 2005-2010) et de bénéficier de fonds non seulement pour la mise en place des infrastructures mais aussi pour de la recherche et une évaluation touchant les points suivants:

- Ressource
- Effets et impacts des rejets
- Efficacité énergétique du système
- Connectabilité de bâtiments existants
- Rentabilité du système.

Dans cet article, et à partir de ce retour d'expérience, nous nous focaliserons principalement sur le potentiel «durable» de la ressource thermique de la couche profonde d'un lac comme le Léman et son aptitude à contribuer à la résolution du problème énergétique. Pour ceci, nous décrirons dans un premier temps les résultats principaux de l'évaluation environnementale de GLN et nous explorerons le potentiel maximal durable du lac. Dans un deuxième temps, nous établirons la demande totale de froid au niveau du canton et nous estimerons ce qui est possible de réellement utiliser si on tient compte des contraintes diverses liées à la physique, à l'économie et à des aspects territoriaux comme la densité de la demande de froid et la possibilité d'implantation d'un tel réseau. Enfin, des considérations plus générales sur les filières énergétiques concurrentes nous permettront de faire ressortir les principaux enjeux et défis d'une utilisation significative du lac en tant que ressource thermique.

Retour d'expérience sur le système GLN

Une évaluation des effets et des impacts sur le lac a été réalisée dans le cadre du projet européen TETRAENER et a fait l'objet d'une thèse de doctorat (Viquerat 2012), dont seules les conclusions principales seront reprises ici.

Régimes thermiques du Petit-Lac

En période estivale, la couche supérieure du lac s'échauffe (épilimnion) alors que la couche inférieure reste froide (hypolimnion), le gradient thermique se trouve entre ces deux couches, dans le métalimnion. Ce fort gradient disparait en hiver. La Fig. 2 illustre cette dynamique lors de l'année 2008 pour la colonne d'eau située au-dessus du point de pompage GLN. Lors de chutes brutales de la température extérieure essentiellement (épisodes dépressionnaires), la stratification estivale peut toutefois être ponctuellement chamboulée, ce qui se traduit par une remontée soudaine et de courte durée de la température au niveau de l'hypolimnion (baisse locale du niveau de la thermocline).

Ressource

Pour le réseau GLN, la ressource est constituée des eaux hypolimniques du Petit-Lac pompées en un point précis. Les mesures effectuées au point de pompage du réseau (37 m prof.) montrent que la température est la plupart du temps comprise entre 5 et 10°C (Fig. 2). Basse et stable en hiver (5-7°C), elle augmente dès le printemps et atteint une température moyenne comprise entre 7 et 10.5°C en automne, saison durant laquelle l'enveloppe des températures est la plus large (nombreux pics). Ces remontées de températures ont surtout lieu lorsque les températures extérieures sont inférieures à 15 °C

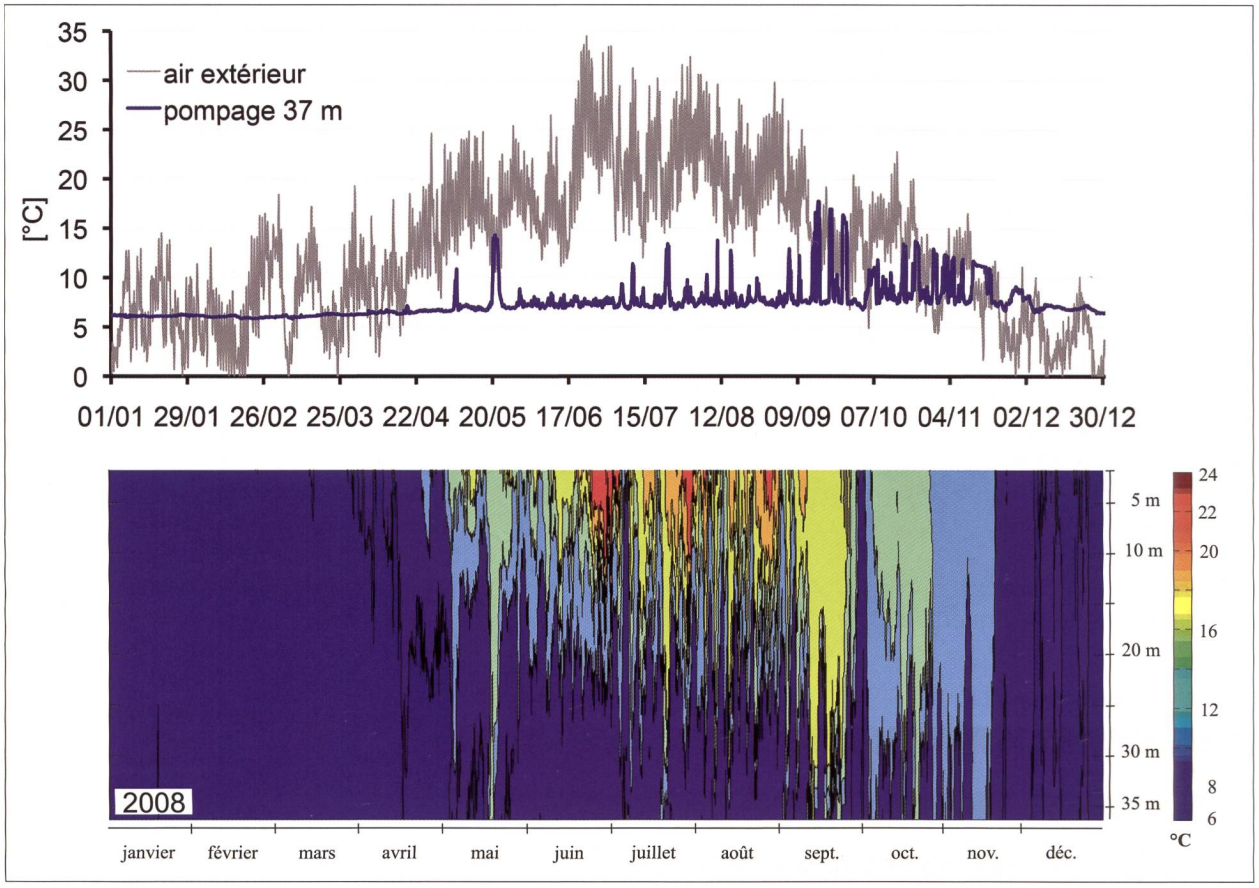

Fig. 2. Température du Petit-Lac au pompage du réseau GLN; données horaires 2008 (Viquerat 2012).

et la demande de froid peu importante (voir Fig. 3). En été, lors des fortes demandes de climatisation, la ressource est plus stable et ne dépasse 10°C qu'en de rares occasions. La Fig. 4 montre la dépendance de la demande de puissance avec la température extérieure, mesurée entre avril 2010 et mars 2011, un moment où environ la moitié de la puissance nominale était connectée.

Il faut souligner que ces fluctuations sont dépendantes du site et liées à des phénomènes d'ensemble au niveau du lac entier comme les seiches et le forçage

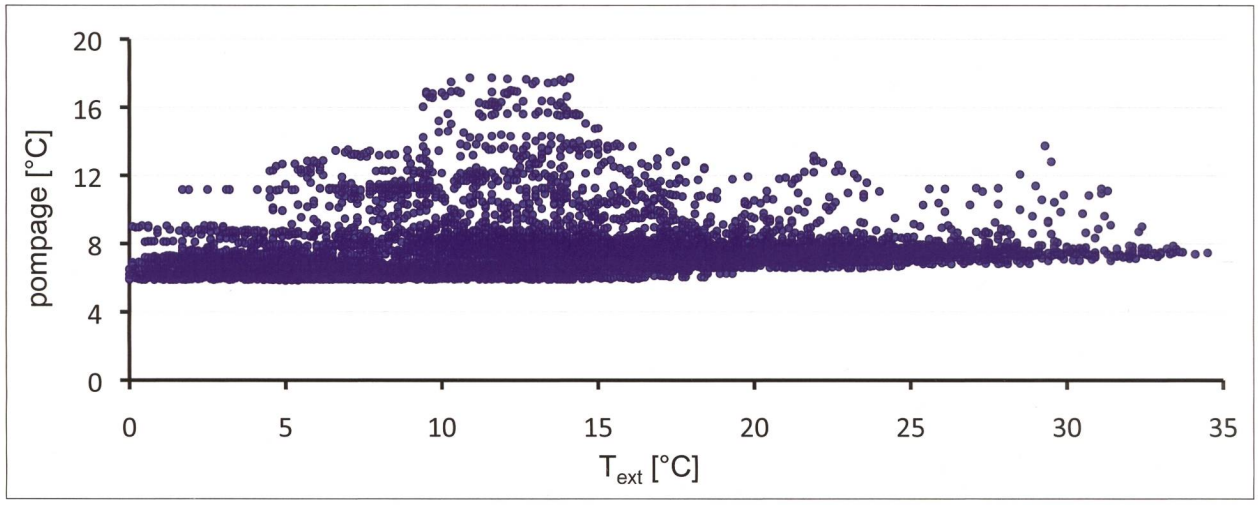

Fig. 3. Température de la ressource du réseau GLN en fonction de la température extérieure; données horaires 2008 (Viquerat 2012).

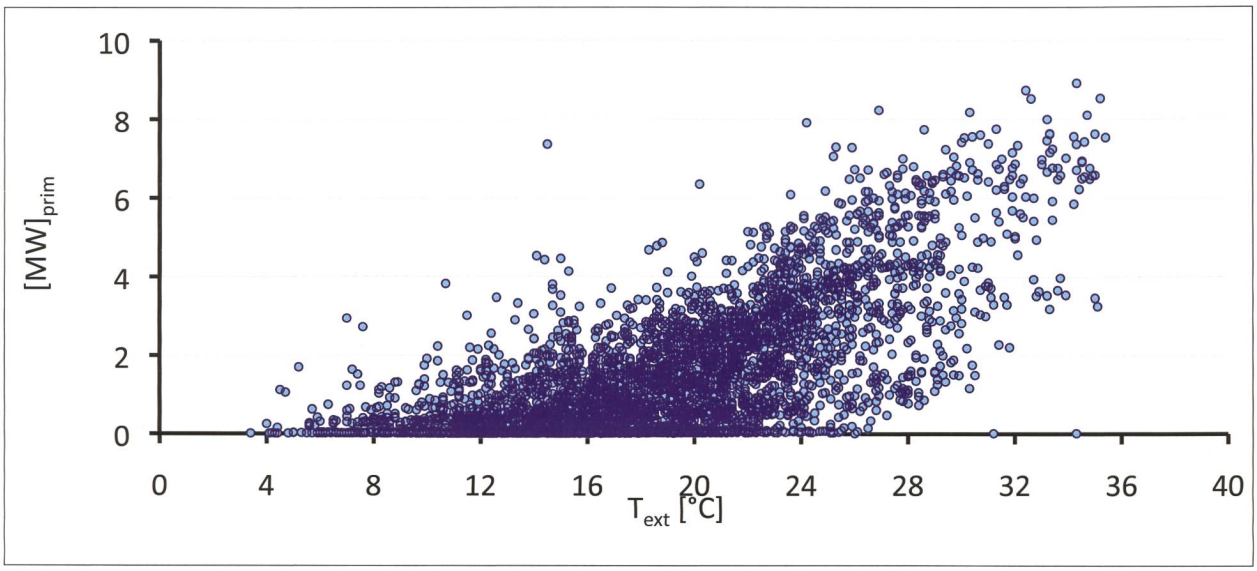

Fig. 4. Signature de la puissance de froid du réseau; données horaires du 1er avril 2010 au 31 mars 2011 (Viquerat 2012).

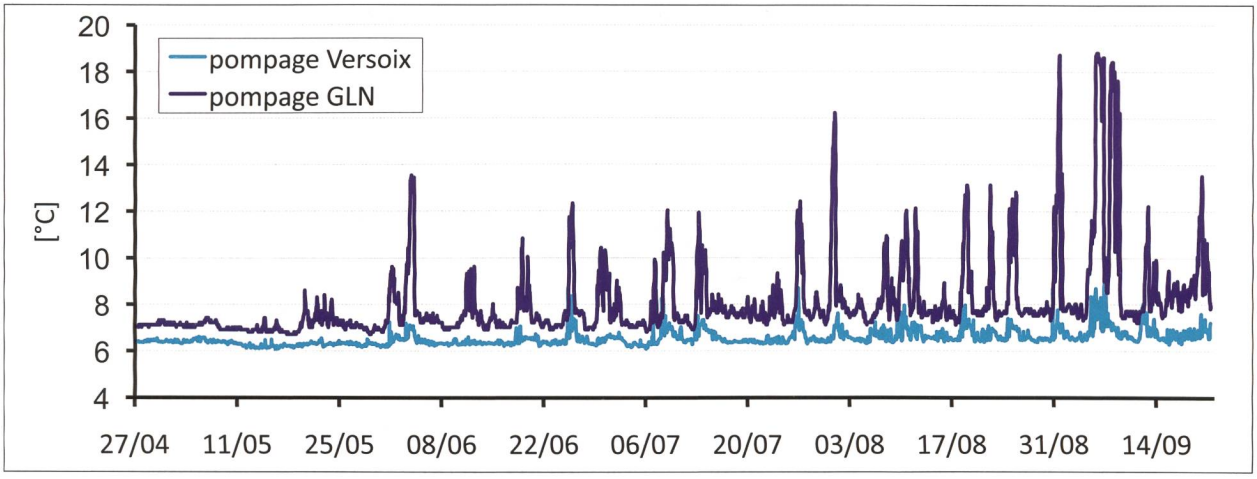

Fig. 5. Température des pompages GLN (37 m prof.) et Versoix (45 m prof.); données horaires 2007 (Viquerat 2012).

externe (Viquerat 2012; Le Thi et al. 2012). Une prise d'eau à peine plus profonde (-45 m) comme celle du système analogue à GLN mais plus petit développé à Versoix montre une grande stabilité (Fig. 5). On saisit mieux l'importance d'une bonne connaissance de la ressource et spécialement ici la courantologie et les mouvements internes présents dans le lac, études pour lesquelles Forel fut un grand précurseur.

Effets et impacts environnementaux

Effets liés au pompage

La crépine d'aspiration a été conçue pour éviter l'aspiration d'organismes vivants se trouvant à proximité. La vitesse d'aspiration maximum a été limitée à 21 cm/s, de manière à ce que les petits poissons (< 8 mm) aient la possibilité de s'échapper. Pour éviter l'encrassement «biologique» des conduites, les eaux pompées sont chlorées avec une dose injectée comprise entre 0.3 et 0.4 mg Cl_2/l, un système de contrôle stabilise la concentration de chlore résiduel au rejet à une valeur plus basse que 0.05 mg Cl_2/l.

Effets thermiques du rejet et impacts potentiels

Il faut distinguer ici:

- les conditions estivales, avec un lac très stratifié thermiquement et des rejets thermiques toujours positifs, et les conditions hivernales, où le lac est déstratifié et les rejets sont en positifs ou négatifs selon les demandes de refroidissement et de chauffage des bâtiments connectés;
- les effets plutôt locaux, comme la plume de rejet, et les effets globaux, par exemple l'épuisement de la ressource par un soutirage trop important;

- la notion **d'effets thermiques**, exprimés en différentiel de température ou de flux, directement et instantanément mesurables ou calculables; avec les **impacts** sur l'écosystème naturel concerné (faune, flore) résultant de ces effets, multifactoriels, beaucoup plus difficiles à définir et plus longs à évaluer.

Globalement, en période estivale stratifiée, un système hydrothermique va transférer de l'eau des couches profondes vers les couches superficielles; l'eau rejetée réchauffée sera tout de même plus froide que le milieu récepteur. On aura donc un refroidissement localisé («plume») dans la couche superficielle qui va s'étaler dans le sens du courant tout en descendant vers les zones plus froides et plus denses. Il en résulte une augmentation du volume de la couche intermédiaire (métalimnion) et une diminution de la couche inférieure qui constitue la ressource. Ainsi, dans un tel système à trois couches, l'énergie thermique du lac va s'accroitre principalement par augmentation du volume intermédiaire «tiède» au détriment du volume inférieur froid.

Localement, les refroidissements observés à proximité du rejet (2 m en aval) sont fréquents tout au long de la période chaude, de longue durée, d'amplitude de 2 à 5°C, comme le montre la Fig. 6 pour une semaine estivale typique. La différence de température des colonnes d'eau situées au rejet et au point de référence, établi quelques centaines de mètres en amont a été mesurée à différentes profondeurs. L'influence thermique du rejet n'est effective que sur les couches situées plus bas que 4m de profondeur, elle est d'autant plus forte que la stratification en température dans la couche supérieure est faible. Dès que la puissance évacuée dépasse 2 MW environ (10% de la puissance nominale du système), la baisse de température du milieu récepteur

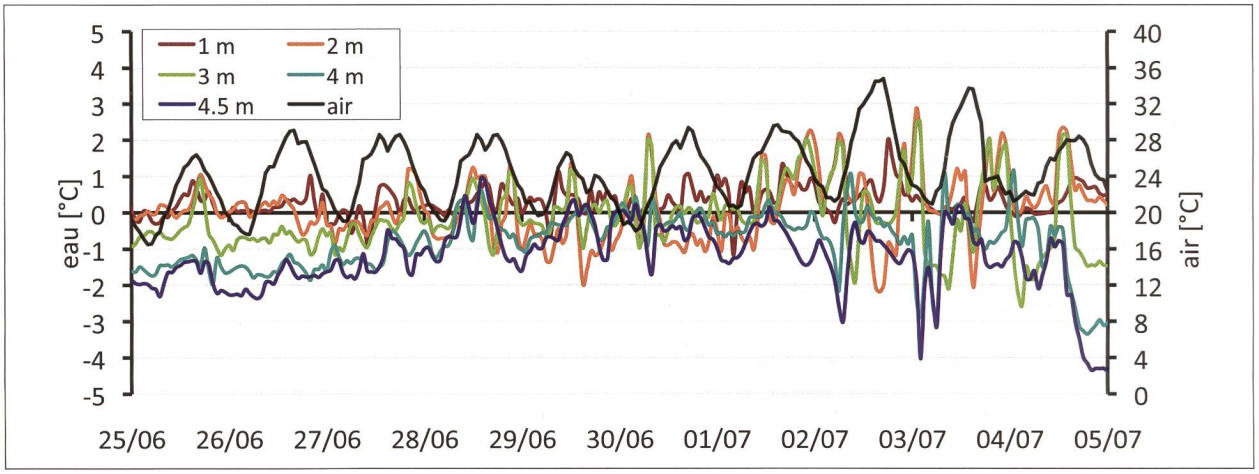

Fig. 6. Effets thermiques du rejet à différentes profondeurs par rapport à une colonne de référence située quelques centaines de mètres en amont; semaine typique en 2010, données horaires (Viquerat 2012).

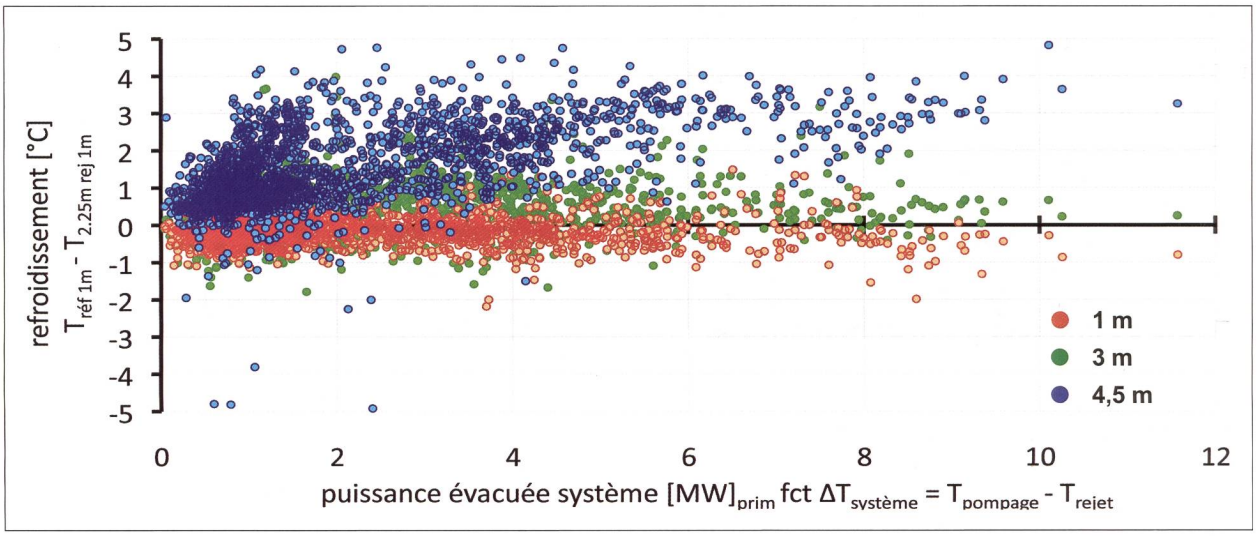

Fig. 7. Refroidissement à 2.25 m en aval du rejet pour 3 couches situées à 1,3 et 4.5 m de profondeur par rapport à une colonne de référence située quelques centaines de mètres en amont; données horaires avril-juillet 2010 (Viquerat 2012).

reste stable comme on peut le voir sur la Fig. 7. L'effet de refroidissement des couches est totalement absent à 1m de profondeur, très peu présent à 3 m et très marqué à 4.5 m. Plus loin du rejet, dans un rayon de 50 m, les effets thermiques induits sont le plus souvent du temps confondus avec la fluctuation thermique spontanée du milieu, même si des refroidissements pouvant aller jusqu'à 3-4°C sont ponctuellement mesurables mais rares.

En hiver, le rôle du lac est de maintenir la température de la boucle dans la zone de fonctionnement des systèmes connectés, typiquement supérieure à 6°C pour les pompes à chaleur afin d'éviter les risques de gel et inférieure à 12°C pour alimenter les datacenters dont le système d'évacuation est dimensionné pour une telle température. Si il y a trop de soutirage de chaleur et que l'échange thermique avec le terrain le long du parcours est insuffisant, une alimentation de la boucle avec l'eau du lac va permettre de remonter celle-ci à 6°C environ, le rejet sera alors un peu plus froid, environ 2°C. Dans le cas inverse, où les apports de chaleur excédentaires dans la boucle fermée provoquent une température trop élevée, une alimentation en eau de Lac va permettre de rabaisser celle-ci dans la gamme souhaitée par les besoins de refroidissement, la température de rejet correspondant sera alors plus élevée que celle du Lac et de l'ordre de 10°C. La situation est donc plus complexe qu'en été et va dépendre principalement du rapport entre les valorisations de «froid» et de «chaud», le volume d'eau échangé sporadiquement avec le lac étant réduit. Le retour d'expérience de GLN indique pour le moment une bien moindre sollicitation du système et donc du lac en hiver, mais cette conclusion ne peut pas se généraliser à des systèmes où l'utilisation hivernale serait plus marquée.

Effets chimiques

La qualité chimique des eaux a également été suivie intensivement, car les effets potentiels du système sur la dynamique naturelle de paramètres fondamentaux pour l'équilibre de l'écosystème lacustre restaient inconnus: modification locale du pH, remobilisation du phosphore transféré des couches profondes dans les couches superficielles, chlore actif résiduel et variation de turbidité. Ces mesures ont été effectuées mensuellement (avril à octobre) de 2006 à 2010, sur les eaux transitant dans le système (pompage, station de pompage et rejet), ainsi que dans le lac (zone du rejet et référence).

Même si la qualité chimique des eaux est quelquefois affectée, elle reste la plupart du temps dans les limites légales ou recommandées.

Impacts sur l'écosystème actuel

En se basant sur le suivi des macrophytes et de la macrofaune benthique (GREN 2010) ainsi que sur la législation relative à l'ichtyofaune (LEaux 1991; OEaux 1998), les impacts potentiels sur ces organismes ont été jugés globalement faibles. Seule la macrofaune benthique est susceptible d'être affectée mais son suivi n'a pas révélé d'impact perceptible. L'impact potentiel d'un refroidissement estival est *a priori* très faible sur l'ichtyofaune et les macrophytes: la zone du rejet est une zone de frai du brochet, mais la période de reproduction (février à mai) est passée et les juvéniles ne sont plus aussi sensibles à un changement rapide de la température comme ils l'étaient juste après la ponte (Bruslé et al. 2001).

Potentiel hydrothermique régional

Au-delà des effets locaux liés à des rejets thermiques particuliers, l'intensification de la filière hydrothermique nécessite une discussion à l'échelle du système hydrologique régional.

La ressource «froide» à disposition est très importante: le seul volume d'eau du Petit Lac situé à une profondeur inférieure à 40 m vaut déjà 0.95 km^3 (Viquerat 2012); à raison de 1000 heures de fonctionnement à plein régime en été, cela représente un débit nominal possible de 1 millions de m^3/heure ou une puissance de 5 GW pour 5 K d'augmentation de température entre le puisage et le rejet. On se situe là à des niveaux de puissances d'un à deux ordre de grandeur supérieurs aux besoins régionaux, et, rappelons-le, en ne considérant qu'une petite partie du Léman. En hiver, le lac est déstratifié et l'énergie à disposition est encore plus importante.

Au niveau des impacts environnementaux, la quantité maximale utilisable possible sans porter atteinte au lac de façon préjudiciable (terme qu'il faudrait préciser) est très difficile à estimer mais est certainement importante (Viquerat 2012). Avant de se lancer dans une telle estimation qui nécessiterait l'étude de la chaine «usages-effets-impacts» et la définition d'une réponse du milieu maximale admissible, nous proposons de prendre en considération deux autres aspects qui relativisent ce type de démarche:

i. Une limite réaliste des besoins régionaux auxquels pourraient répondre ce type de systèmes, leur évolution future et la pertinence de l'utilisation de systèmes hydrothermiques pour y répondre, point qui sera repris au chapitre suivant pour la demande en climatisation. En effet, ce type de système est d'une part principalement valorisé en été et, d'autre part, les effets ther-

miques en hiver sont plus mal cernés, mais sans doute moins marqués.

ii. Les impacts évités sur d'autres systèmes aquatiques grâce à la substitution d'une grande quantité d'électricité (pollution thermique ou radioactive des centrales nucléaires, impacts thermiques sur le Rhône et le Léman du turbinage des lacs de retenues en amont du lac, changement du régime des rivières en aval de ces retenues,...), point qui sera ébauché ensuite.

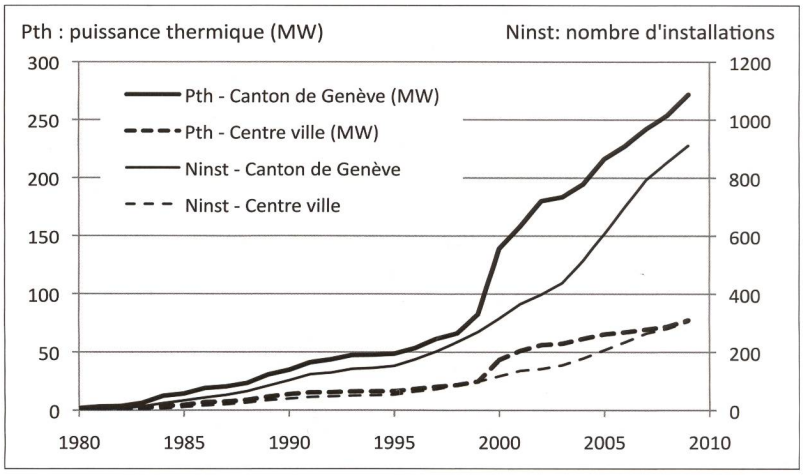

Fig. 8. Evolution des requêtes de climatisation du Canton de Genève, valeurs cumulées.

Potentiel de valorisation en froid des eaux du Lac

A titre d'exemple d'estimation du potentiel régional de valorisation de la fraîcheur des eaux du Lac, nous allons développer le cas du canton de Genève, qui devrait représenter une petite moitié du potentiel total de valorisation autour du Léman.

Demande de climatisation au niveau du Canton de Genève

L'évaluation de la demande de climatisation au niveau du Canton de Genève a été menée sur la base des fiches de synthèse des requêtes d'autorisation de climatisation déposées au Service cantonal de l'énergie, pour la période 1980-2009 (soit depuis l'introduction de la procédure). Ces requêtes couvrent les demandes de froid pour le confort ainsi que pour les datacenters, à l'exclusion des appareils mobiles. Elles ne concernent pas les installations de froid commercial et industriel.

Les données disponibles concernent l'année de la requête, la surface climatisée, la puissance thermique, la puissance électrique, l'estimation de la consommation électrique annuelle et l'adresse de l'installation. Dans le cas de données manquantes, les valeurs globales (au niveau de l'ensemble du parc) ont été reconstituées par analyse statistique (Hollmuller et al. 2011). Par ailleurs, des données concernant la raison sociale du propriétaire et/ou le type de locaux à climatiser ont permis d'affecter (de façon aussi systématique que possible) une typologie d'usage à chaque installation.

Il est à préciser que les données issues des autorisations ne correspondent pas forcément à la réalité de terrain, étant donné que: i) il est notoire qu'un nombre important d'installations (en principe de petites tailles) sont installées sans autorisation; ii) les données transmises au moment de la requête d'autorisation ne correspondent pas forcément à la réalisation qui en découle; iii) la base de donnée ne comprend pas les installations antérieures à 1980, ni les déclassements d'installations devenues obsolètes.

Pour le centre-ville, analysé de façon plus détaillé, certaines de ces incohérences ont pu être mise à jour par confrontation à des données de terrain en notre possession (Faessler et al. 2011). Par ailleurs, un contrôle de qualité concernant la saisie des données a été effectué sur toutes les installations de plus de 1000 kWth et sur un tirage aléatoire de 50 installations de moins de 1000 kWth, pour lesquelles le taux d'erreur était d'environ 5%, lié essentiellement aux adresses des installations (Tschopp 2011).

Au niveau global, l'analyse de cette base de données permet les constats suivants (Fig. 8 et table 2):

- En 2009, les 911 installations répertoriées représentent une puissance thermique nominale de 272 MWth. Au niveau électrique, il lui correspond une puissance nominale de 91 MWel (soit 18% de la puissance de pointe au niveau du canton) et une consommation annuelle estimée à 225 GWhel.
- Cette situation résulte d'une croissance régulière du nombre de requêtes depuis 1980, avec une accélération dès le début des années 2000 (à noter que le pic particulier de l'année 2000 provient de deux autorisations de gros datacenters de plus de 15 MWth chacun). Ainsi, sur la totalité de la période, la croissance moyenne est de 9.4 MWth/an (3.9 MWth/an sur la période 1980-1999, 14.1 MWth sur la période 2000-2009).
- La surface climatisée représente aux alentours de 1.8 million de m², soit un peu plus de 10% de la surface totale des locaux non résidentiels du canton.

- Seules 5% des requêtes concernent des installations de plus de 1000 kWth, mais leur puissance cumulée représente plus de la moitié de la puissance concédée totale. A l'autre extrême, plus de la moitié des requêtes concernent des installations de moins de 100 kWth, dont la puissance cumulée représente cependant moins de 10% de la puissance totale.

Ces résultats ont été confirmées par l'analyse de la corrélation entre la courbe de charge électrique du Canton de Genève et la température météo, en période estivale, afin d'en extraire la composante liée à la climatisation de confort (Hollmuller et al. 2011). Il en ressort que la puissance électrique liée à la climatisation de confort est actuellement de l'ordre de 50 à 60 MWel (selon que l'analyse se fasse sur les puissances journalières moyennes ou de pointe), avec une tendance d'accroissement de l'ordre de 2 MWel par an. Cet ordre de grandeur est cohérent avec la valeur de 63 MWel obtenue via les autorisations de climatisation (soustraction faite de la contribution des datacenters, dont l'appel de puissance ne dépend que faiblement de la température extérieure). Si des erreurs subsistent certainement au cas par cas des installations, les résultats statistiques que l'on peut retirer de la base de données des autorisations de climatisation semble donc robuste, du moins au niveau de la climatisation de confort.

Potentiel de raccordement sur les futurs réseaux hydrothermiques

Grâce à son insertion dans le système d'information géo-référée du territoire genevois, la base de données ci-dessus est utilisée pour évaluer la demande de climatisation pouvant être substituée par les deux réseaux hydrothermiques en projet (Hollmuller et al. 2011). Nous nous concentrerons ici sur le réseau urbain, qui devrait irriguer l'ensemble du centre-ville, de part et d'autre du lac (Fig. 9). L'analyse statistique des autorisations climatisation sur la zone en question donne les résultats suivants:

- Le territoire en question représente moins de 2% du territoire du Canton (4.6 million de m²), mais abrite 29% de la surface de locaux non résidentiels (4.9 millions de m²).
- De même, 29% de la puissance de climatisation du Canton y est concentré (78 MWth), sur 26% de la surface climatisée (1.8 millions de m²). Cela représente un taux de climatisation des locaux non résidentiels de 9.4%, très proche de la valeur du Canton.
- Ainsi, toute typologie d'usage confondue, la puissance nominale de climatisation de cette zone s'élève en moyenne à environ 18 Wth par m² de territoire.
- Finalement, l'évolution des requêtes d'autorisation sur la période 1980 – 2009 suit la même dynamique que pour l'ensemble du Canton (Fig. 8), avec une croissance en deux phases: 1.3 MWth/an jusqu'à 2000, 3.4 MWth/an après 2000 (pour une croissance moyenne de 2.8 MWth/an sur l'ensemble des 30 ans).

En partant de la puissance installée et des taux de croissance ci-dessus (et sans évolution de la surface bâtie), on obtient les tendances globales suivantes pour la demande de climatisation du centre-ville à un horizon de 20 ou 40 ans:

- Avec un taux de croissance bas de 1.3 MWth/an, la demande atteindrait de l'ordre de 104 MWth en 2030 (13% des locaux non résidentiels), respectivement de 130 MWth en 2050 (16%).
- Avec le taux de croissance actuel de 3.4 MWth/an, il s'agirait de l'ordre de 146 MWth en 2030 (18% des locaux non résidentiels), respectivement 214 MWth en 2050 (26%).
- Même avec une hypothétique croissance accélérée, on resterait donc certainement à l'horizon 2050 bien en dessous de la saturation en climatisation des espaces non résidentiels (cela d'autant plus qu'il s'agirait alors de considérer une évolution de type fonction logistique).

Table 2. Requêtes de climatisation par typologie d'usage, cumul période 1980-2009, Canton de Genève et zoom sur la zone d'influence du futur réseau hydrothermique du centre-ville.

	Genève					Centre-ville				
Typologie	Ninst	Pth MW	Pel MW	Eel GWh	Sclim mil.m²	Ninst	Pth MW	Pel MW	Eel GWh	Sclim mil.m²
Bureaux	285	68.3	21.6	27.8	681	99	19.0	5.8	6.3	156
Banques	90	19.2	6.5	13.8	134	50	11.2	3.8	8.2	77
Commerces	112	18.1	6.2	10.5	141	34	4.1	1.4	1.3	24
Industrie/Artisanat	67	22.7	7.1	11.1	139	7	1.1	0.4	1.0	4
Mixte	25	16.7	5.3	5.5	158	12	6.0	2.0	2.4	69
Datacenter	94	69.4	25.1	129.7	88	32	26.5	9.5	38.9	24
Salle de congrès	6	18.6	7.4	7.5	118	0	0.0	0.0	0.0	0
Hôtels/Resturants	79	13.1	4.1	6.1	133	42	6.6	2.0	2.6	70
Médical	50	15.7	5.1	9.9	101	8	0.5	0.1	0.3	2
Divers	103	10.0	2.9	3.0	83	22	2.8	0.8	0.7	29
Total	**911**	**271.6**	**91.3**	**224.8**	**1776**	**306**	**77.8**	**25.9**	**61.6**	**455**

où: Ninst: nombre d'installations; Pth: puissance thermique; Pel: puissance électrique; Eel: énergie électrique; Sclim: surface climatisée

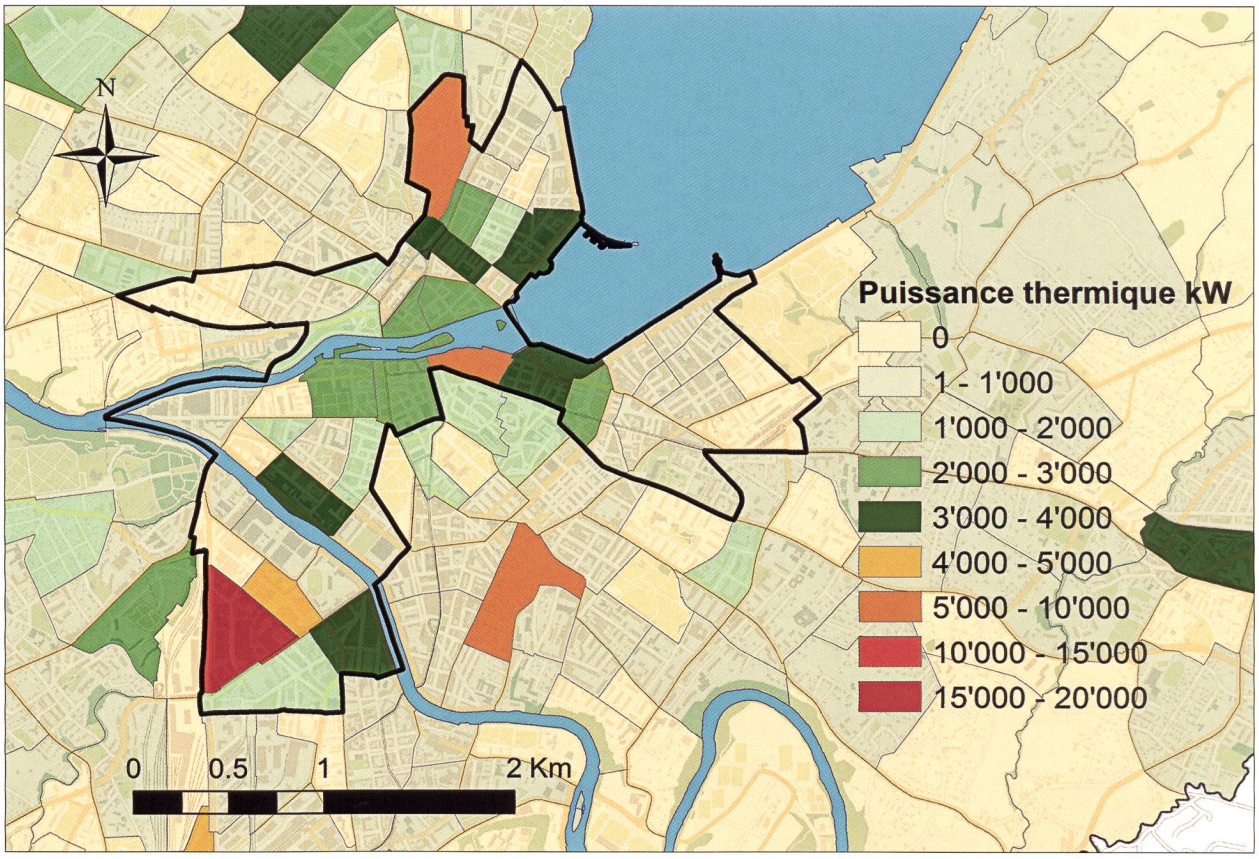

Fig. 9. Puissance thermique de climatisation autorisée au centre-ville, par sous-secteurs, ainsi que zone d'influence du projet de réseau hydrothermique urbain (trait noir).

Au niveau du potentiel de raccordement sur le futur réseau hydrothermique, il s'agit cependant de filtrer cette demande brute par un certain nombre de contraintes technico-économiques et organisationnelles.

Il s'agit d'un réseau commercial et multi-usagers, sur lequel les connexions se feront en fonction du démarchage auprès des clients potentiels, avec à la clé les questions de tarification et d'image verte. Cette question est d'autant plus cruciale qu'il s'agit dans la plupart des cas de substituer l'utilisation d'installations de production de froid déjà existantes. A ce titre, et comme pour l'ensemble du canton, les très nombreuses installations de moins de 100 kWth, économiquement peu intéressantes, représentent moins de 10% de la puissance totale de climatisation, alors que les installations de plus de 1000 kWth représentent environ la moitié de cette puissance. S'il est donc essentiel de s'assurer la connexion des gros clients avant le démarrage du projet, il est illusoire de vouloir connecter l'ensemble de la demande de climatisation de la zone.

Par ailleurs, dans une perspective de développement des énergies renouvelables à coût raisonnable, la couverture complète de la puissance de climatisation de pointe n'est pas forcément recommandée. En effet, et comme pour la plupart des énergies renouvelables qui sont intensives en capital, une infrastructure réduite permet de couvrir l'essentiel de la demande de base, les pointes pouvant être couvertes par un système classique d'appoint (ceci d'autant plus que des machines de froid sont déjà présentes chez les clients). Pour illustration de ce propos, nous citons l'exemple d'un des gros clients du réseau GLN (3.72 MWth de pointe / 2.15 GWhth annuel), pour lequel l'analyse de la courbe de charge montre que la puissance ruban du datacenter (130 kWth) ne représente que 3% de la puissance de pointe, mais couvre déjà 40% de la demande annuelle en énergie! Même en incluant une part de la climatisation de confort, plus de 80% de l'énergie froid peut être couverte avec 50% de la puissance de pointe.

En conclusion, nous pouvons estimer le potentiel valorisable par des systèmes hydrothermiques lacustres à moyen terme pour le canton de Genève dans une gamme de 50 à 100 MWth soit un débit nominal d'environ 10 000 à 20 000 m³/h ou 3 à 6 m³/s, bien loin du débit d'épuisement de la couche profonde (50 à 100 fois moins que l'estimation réalisée plus haut pour le seul Petit Lac). En comparaison le Rhône émissaire possède un débit moyen annuel de 250 m³/s.

Comparaison avec la filière classique de production de froid

Afin de repositionner les dispositifs de type GLN dans le système énergétique, deux analyses simplifiées de flux ont été effectuées en périodes estivale sur:

- Une filière «classique» de production électrique thermique et utilisation de groupe de froid, avec des données de performance issues de mesures réelles (Santamouris 2004; Adnot 1999; Faessler 2009b),
- Une filière utilisant directement les eaux profondes du lac, à partir des observations faites sur le système GLN (Viquerat 2012)

Représentés sous forme graphique (diagramme de Sankey de la Fig. 10), ces flux permettent de comparer l'efficacité énergétique des groupes de froid traditionnels aux systèmes en réseau en fixant la chaleur évacuée du bâtiment identique dans les deux cas (prestation égale).

Grâce à l'utilisation directe d'une ressource naturelle, d'excellents taux d'efficacité énergétique sont atteints et permettent une consommation globale d'électricité d'un facteur dix fois plus faible pour les réseaux de froid (en comparaison avec des groupes de froid classiques et à prestation égale). Globalement, les rejets de chaleur dans l'environnement (air ou eau) sont plus du double dans le cas des groupes de froid, avec des répartitions différentes entre les rejets locaux et non locaux. Ceci est du essentiellement aux centrales thermiques de production d'électricité qui rejettent d'importantes quantités de chaleur non valorisable dans l'environnement.

La production d'électricité via les barrages n'est pas traitée ici mais impliquerait d'évaluer correctement les impacts sur les cours d'eau de la consommation d'électricité de pointe en journée, au vu des besoins spécifiques de la climatisation. De même, et au vu de la saisonnalité des besoins de climatisation de confort, le développement de couplage chaleur-force dans le mix énergétique suisse n'apporterait aucun avantage pour ces prestations de froid (incompatibilité temporelle).

Au niveau des rejets locaux, les effets sur l'air sont quantitativement plus importants avec les systèmes classiques mais pourraient paraître qualitativement moins grave pour l'environnement que des rejets dans le lac. En réalité, deux avantages des systèmes de type GLN contredisent cette seconde affirmation:

- D'une part, la suppression des tours aéro-réfrigérées des groupes de froid permet d'éviter le risque de développement des légionelles, bactéries responsables de la maladie de la légionellose (Viquerat 2012), ainsi que l'impact négatif en matière de bruit et de climat urbain.
- D'autre part, la pollution thermique occasionnée au lac par un système type GLN est de nature très différente. Elle devrait impliquer des impacts mineurs si on se cantonne à une utilisation faible de la ressource disponible.

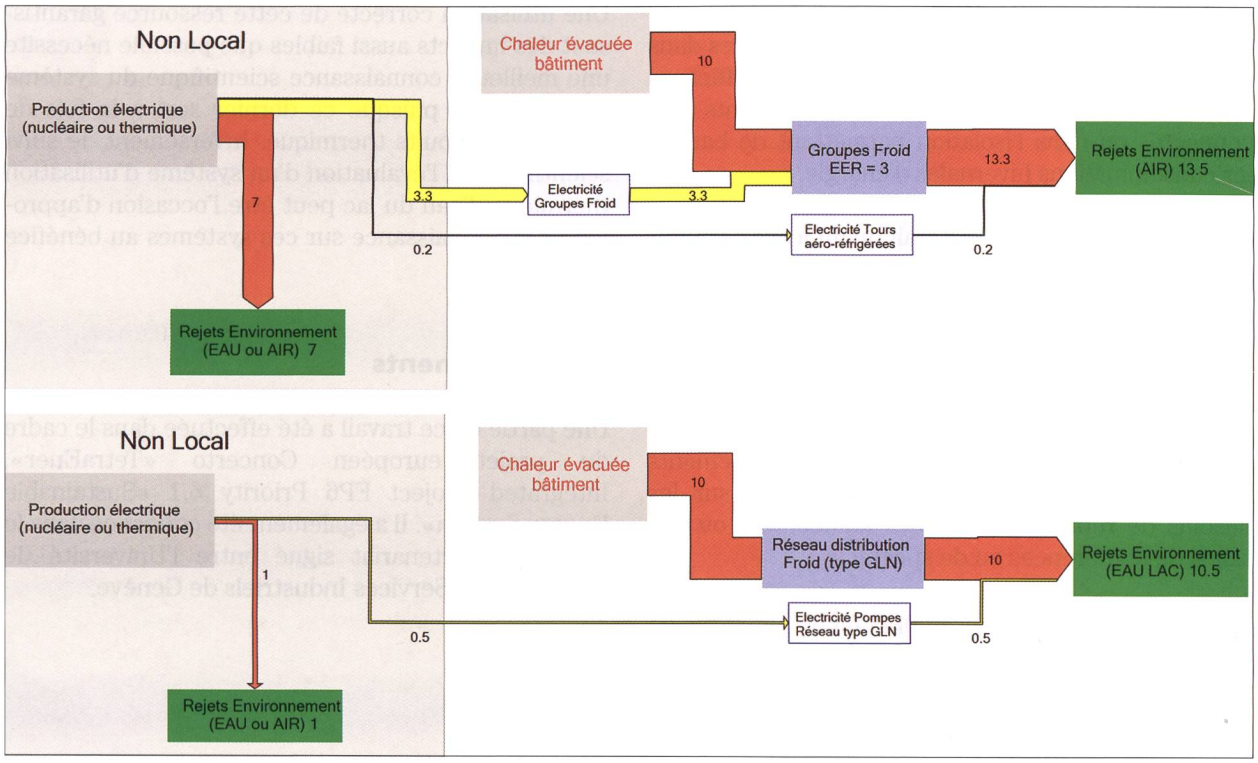

Fig. 10. Bilan simplifié des rejets thermiques pour un groupe de froid standard (haut) et un système à eaux du Lac (bas) à prestation égale (chaleur évacuée bâtiment fixée à 10 unités).

Conflits avec une utilisation rationnelle de l'énergie

Le développement à large échelle de ce type de réseaux pose la question d'une éventuelle concurrence avec les objectifs d'économie d'énergie et notamment celle de savoir si ces réseaux favorisent le déploiement d'une climatisation non désirée initialement. De plus, les lourds investissements consentis pour ce type d'infrastructure peuvent péjorer d'autres programmes d'économies d'énergie ou d'améliorations de l'enveloppe des bâtiments. Pour évaluer ces questionnements sur le niveau des prestations de climatisation, deux approches sont possibles: pragmatique ou idéaliste.

A Genève, malgré une limitation légale de la climatisation centralisée - nécessité de fournir la preuve du besoin – depuis 1986 une croissance de 10 MWth/an a été observée sur ces 30 dernières années, voir 14 MWth/an les 10 dernières années, comme cela a été montré plus haut et en particulier pour les gros consommateurs.

L'approche pragmatique consisterait donc à accompagner ce développement continu en mettant en œuvre des réseaux de froid d'une certaine taille, permettant la connexion des gros consommateurs, une utilisation d'une ressource renouvelable locale et une diminution concrète de la consommation d'électricité. De plus, lors de la connexion des bâtiments à un réseau de froid, des améliorations internes liées aux actions sur la régulation du bâtiment sont nécessaires (Mermoud et al. 2008). En cas de développement de réseaux de type GLN, les investissements complémentaires dans les économies d'énergie seront alors plus efficaces dans la diminution des besoins des bâtiments non connectés ou dans l'isolation permettant de baisser les consommations hivernales d'énergie.

L'approche idéaliste consisterait quant à elle à vouloir investir l'ensemble des moyens financiers à disposition dans les rénovations des bâtiments, afin de diminuer les besoins de climatisation. Les acteurs impliqués ne sont alors plus les mêmes et incluent les propriétaires de bâtiments. Bien que préférable dans le principe, cette option se heurte à la difficulté de convaincre chaque propriétaire aux investissements nécessaires, et reste sans action possible sur les besoins de refroidissement des datacenters ou des salles de conférences ou de spectacle.

Quoiqu'il en soit, le développement de réseaux hydrothermiques lacustres n'exclut pas, bien au contraire, la mise en place de mesures d'efficacité énergétique au niveau des bâtiments

Conclusions

Un système énergétique moins carboné et plus local a comme conséquence première une utilisation des énergies naturellement présentes dans l'environnement local et donc, potentiellement, des impacts sur celui-ci. Il ne s'agit plus de protéger l'environnement local contre des agressions extérieures mais de l'intégrer dans le système industriel. La notion de «protection de l'environnement» doit être dépassée pour d'autres, comme celle de «développement durable» ou «d'écologie industrielle». C'est un profond bouleversement par rapport à la vision dominante des sciences naturelles qui impliquera une approche interdisciplinaire de ces questions et un décloisonnement des services de l'Etat qui les prennent en charge.

A cet égard, la demande et donc le potentiel à moyen terme de rafraîchissement de bâtiments par systèmes hydrothermiques lacustres se situe, pour le canton de Genève, bien en deçà de la ressource du lac. Pour une utilisation généralisée de chauffage via pompe à chaleur, la situation est un peu plus complexe et va dépendre principalement du rapport entre les valorisations de «froid» et de «chaud». Le retour d'expérience de GLN indique pour le moment une bien moindre sollicitation hivernale du système et donc du lac, mais cette conclusion ne peut pas se généraliser à des systèmes où l'utilisation hivernale serait plus marquée.

Une utilisation correcte de cette ressource garantissant des impacts aussi faibles que possible nécessite une meilleure connaissance scientifique du système lac lui-même, puisque ce dernier sert à la fois de source et de puits thermique. Inversement, le suivi scientifique et l'évaluation d'un système d'utilisation thermique d'eau du lac peut être l'occasion d'approfondir la connaissance sur ces systèmes au bénéfice de tous.

Remerciements

Une partie de ce travail a été effectuée dans le cadre du projet européen Concerto «TetraEner», Integrated Project FP6 Priority 6.1 «Sustainable Energy System». Il a également été cofinancé dans le cadre du Partenariat signé entre l'Université de Genève et les Services Industriels de Genève.

Bibliographie

- **Adnot J.** (coordinator) et al. 1999. Energy Efficiency of Room-Air Conditioners (EERAC). Study for the Directorate-General for Energy (DGXVII) of the Commission of the European Communities, contract DGXVII4.1031/D/97.026, Bruxelles.
- **Bruslé J, Quignard J–P.** 2001. Biologie des poissons d'eau douce européens, Coll. Aquaculture-Pisciculture, E. Technique & Documentation, Paris.
- **Faessler J, Haroutunian A, Lachal B.** 2009a. R6 : utilisation thermique du Rhône genevois, projet VIRAGE, Groupe Energie, Institut Forel / Institut des Sciences de l'Environnement, Université de Genève.
- **Faessler J, Lachal B.** 2009b, R2 : Utilisation thermique réelle du Rhône urbain, projet VIRAGE, Groupe Energie, Institut Forel / Institut des Sciences de l'Environnement, Université de Genève.
- **Faessler J, Haroutunian A, Hollmuller P, Lachal B.** 2011. Etude d'opportunité pour le projet GLU/GLA. Pertes thermiques du réseau Lac, connexion aux bâtiments et potentiel de froid: évaluations et recommandations. Groupe Energie, Institut Forel / Institut des Sciences de l'Environnement, Université de Genève.
- **GREN.** 2010. Pompage hydrothermique Serono SIG-GLN Parc Barton; suivi de l'impact sur la biologie, rapport 2010, Mandat pour SIG-Merck-Serono, Genève.
- **Hollmuller P, Hunziker S, Lachal B.** 2011. Enjeux de la climatisation au niveau genevois et tour d'horizon de possibles alternatives. Groupe Energie, Institut Forel / Institut des Sciences de l'Environnement, Université de Genève.
- **LEaux.** 1991. Loi sur la protection des eaux, Loi du 24 Janvier 1991, Administration Fédérale, Berne.
- **Le Thi AD, De Pascalis F, Umgiesser G, Wildi W.** 2012. Structure thermique et courantologie du Léman: Thermal structure and circulation patterns of Lake Geneva. Archs. Sci. 65 : 65-80.
- **Mermoud A, Lachal B, Weber W, Viquerat P-A.** 2008. Principes d'une méthode d'audit pour étudier la connectabilité d'immeubles existants à un réseau de distribution d'eau du lac pour le rafraîchissement, Integrated Project FP6 Priority 6.1 «Sustainable Energy System», Université de Genève.
- **OEaux.** 1998. Ordonnance sur la protection des eaux, Ordonnance du 28 octobre 1998, Administration Fédérale, Berne.
- **Santamouris M, Adnot J, Alvarez S, Klitsikas N.** 2004, "Cooling the cities/rafraîchir les villes", Paris.
- **Tschopp J.** 2011. Géoréférencement des autorisations d'installations de climatisation de confort du canton de Genève et analyse géographique: éléments pour le développement d'un réseau de froid à partir d'eau du lac Léman. Mémoire de certificat de spécialisation en géomatique, Université de Genève.
- **Viquerat P-A.** 2012. Utilisation de réseaux d'eau lacustre profonde pour la climatisation et le chauffage des bâtiments: bilan énergétiques et impacts environnementaux. Etude de cas: le projet GLN (Genève-Lac-Nations) à Genève, Thèse de doctorat n° 4448, Université de Genève.