



Thèse

2012

Open Access

This version of the publication is provided by the author(s) and made available in accordance with the copyright holder(s).

Utilisation des réseaux d'eau lacustre profonde pour la climatisation et le chauffage des bâtiments; bilan énergétique et impacts environnementaux: Etude de cas: le projet GLN (Genève-Lac-Nations) à Genève

Viquerat, Pierre-Alain

How to cite

VIQUERAT, Pierre-Alain. Utilisation des réseaux d'eau lacustre profonde pour la climatisation et le chauffage des bâtiments; bilan énergétique et impacts environnementaux: Etude de cas: le projet GLN (Genève-Lac-Nations) à Genève. Doctoral Thesis, 2012. doi: 10.13097/archive-ouverte/unige:23016

This publication URL: <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:23016>

Publication DOI: [10.13097/archive-ouverte/unige:23016](https://doi.org/10.13097/archive-ouverte/unige:23016)

**Utilisation de réseaux d'eau lacustre profonde pour la
climatisation et le chauffage des bâtiments: bilan
énergétique et impacts environnementaux. Etude de cas: le
projet GLN (Genève-Lac-Nations) à Genève**

THÈSE

Présentée à la Faculté des sciences de l'Université de Genève

Pour obtenir le grade de Docteur ès sciences, mention Sciences de l'Environnement

par

Pierre-Alain Viquerat

de

Valbroye (Suisse)

Thèse N° 4'448

GENÈVE

Repromail

2012



**UNIVERSITÉ
DE GENÈVE**

FACULTÉ DES SCIENCES

**Doctorat ès sciences
Mention sciences de l'Environnement**

Thèse de *Monsieur Pierre-Alain VIQUERAT*

intitulée :

**"Utilisation des réseaux d'eau lacustre profonde pour la
climatisation et le chauffage des bâtiments : bilan énergétique
et impacts environnementaux. Etude de cas : le projet GLN
(Genève-Lac-Nations) à Genève"**

La Faculté des sciences, sur le préavis de Messieurs B. LACHAL, professeur titulaire et directeur de thèse (Institut F.-A. Forel), W. WILDI, professeur ordinaire (Institut F.-A. Forel), F. MARECHAL, docteur (Institut de génie mécanique, Faculté des sciences et techniques de l'ingénieur, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse), O. OUZILOU, docteur (Bonnard & Gardel Holding S.A., Lausanne, Suisse) et P. RIVIERE, docteur (Centre énergétique et procédés, Ecole des Mines/ParisTech, Paris, France), autorise l'impression de la présente thèse, sans exprimer d'opinion sur les propositions qui y sont énoncées.

Genève, le 13 juin 2012

Thèse - 4448 -



Le Décanat

N.B.- La thèse doit porter la déclaration précédente et remplir les conditions énumérées dans les "Informations relatives aux thèses de doctorat à l'Université de Genève".

à Annick et Alix

Remerciements

Je remercie vivement toutes les personnes qui m'ont aidé tout au long de ces cinq années qui m'ont permis d'accéder aux nombreuses réflexions nécessaires à la réalisation de ce travail.

Tout d'abord, je pense à mes collègues, chercheurs, collaborateurs et étudiants, qui ont participé de près ou de loin aux activités développées au sein du Groupe Energie (feu le CUEPE en 2007). La densité et la pertinence des savoirs sur les systèmes énergétiques qui résultent de trois décennies d'activités académiques pragmatiques et centrées autour des réalités énergétiques auxquelles nous faisons face, m'ont permis d'acquérir des connaissances et des clés essentielles pour aborder les problématiques soulevées dans ce travail. De manière à répondre davantage aux attentes de la société dans un monde de plus en plus complexe, l'énergie mérite vraiment de se déployer plus amplement au sein d'institutions académiques en tant que thématique fondamentalement interdisciplinaire.

Bénéficiaire d'apports éclairés, mes remerciements vont tout d'abord aux collaborateurs du Groupe Energie: Jean-Luc Bertholet, Daniel Cabrera, Pauline Calame, Jérôme Faessler, Anthony Haroutunian, Pierre Hollmuller, Stefan Hunziker, Pierre Ineichen, Jad Khoury, Bernard Lachal, Catherine Lavallez, André Mermoud, Floriane Mermoud, Eric Pampaloni et Théodora Seal.

Je remercie tout particulièrement Bernard Lachal, mon directeur de thèse qui, grâce à son enthousiasme et à ses innombrables compétences, m'a conduit à me poser les questions essentielles et nécessaires à la réalisation de ce travail.

Je remercie également les membres du jury de ma thèse pour le temps de lecture critique consacré à ce manuscrit:

- Dr François Maréchal, Maître d'enseignement et de recherche au Laboratoire d'énergétique industrielle (LENI), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne,
- Dr Olivier Ouzilou, responsable de l'unité bâtiment - énergie- territoire (BET) du bureau BG Ingénieurs Conseils,
- Dr Philippe Rivière, Centre Énergétique et Procédés, Ecole des Mines de Paris,
- Prof. Walter Wildi, Directeur de l'Institut Forel, Faculté des Sciences, Université de Genève.

Le travail réalisé ici n'aurait pas pu se faire sans la collaboration active de nombreuses personnes des Services Industriels de Genève, en particulier Jean Pierre Buri, Didier Mary, Marc Spitzli, Philippe Mudry et ses collègues du service de l'eau potable; du Service de l'Ecologie de l'Eau, en particulier Pascale Nirel, François Pasquini et Denis Pattay; l'ensemble du personnel du Service Cantonal de l'Energie et en particulier son ancien directeur Olivier Ouzilou pour les nombreux renseignements historiques du projet GLN.

Je remercie chaleureusement toutes les personnes qui ont donné de leur temps et partagé leur expérience pour que je puisse mener à bien les campagnes de mesure lacustre: l'Institut Forel pour la mise à disposition du matériel de mesure et les bateaux de travail, le capitaine de La Licorne Philippe Arpagaus, Yannick Bisson et Vincent Sastre pour les nombreuses heures passées à m'épauler contre vents et marées, Patrick Haas (CMEFE) et le LEBA pour le prêt de matériel, ainsi qu'Yves Cauderay et Sarah Cima pour leur sympathie et leur aide dans tous les aspects logistiques et techniques. Je suis également reconnaissant à Alain Demierre du bureau GREN Sàrl pour son apport substantiel au suivi biologique.

Je remercie aussi les collaborateurs du Service des bâtiments de l'entreprise Merck-Serono, Laurent Mathieu pour l'ensemble des bâtiments gérés par la FIPOI, ainsi qu'Yves Martinelli, responsable technique d'un large bâtiment connecté au réseau GLN, pour sa grande disponibilité et son agréable collaboration.

Je remercie également l'ensemble des partenaires genevois du consortium TetraEner et en particulier les coordinateurs successifs, Eric Lumis, Alexis Mayer puis Gilles Desthieux. Le financement européen dont le Groupe Energie a été doté a permis de produire plusieurs rapports de recherche qui ont été valorisés dans ce travail de synthèse.

Je suis aussi reconnaissant envers Lanny Joyce (Cornell University) et Kevin Loughborough (Enwave Company, Toronto) pour leur accueil et les visites d'installations qu'ils m'ont accordées. Enfin, je n'oublie pas Alexandre Babak Hedjazi pour la confiance qu'il m'a témoignée à travers les opportunités de présenter mes travaux, notamment à l'Exposition Universelle de Shanghai et à Abu Dhabi dans le cadre du lancement d'un partenariat entre la Suisse et les Emirats Arabes Unis.

J'aimerais encore saluer la contribution essentielle des personnes suivantes:

- Anthony Haroutunian pour ses précieux apports au traitement et à la mise en forme de données,
- Pierre Ineichen pour la mise à disposition de données météorologiques de grande qualité,
- Pierre Hollmuller pour sa contribution à l'analyse complexe d'un important bâtiment connecté,
- André Mermoud pour les connaissances techniques et d'analyse qu'il m'a apportées,
- Eric Pampaloni pour sa maîtrise des aspects techniques de mesure, sa disponibilité et son talent de navigateur « tous temps » !

Un immense merci aux relecteurs des longs chapitres de ce travail, qui par leurs apports et leurs contributions, l'ont rendu plus lisible et précis: Annick Frasseren Viquerat, Floriane Mermoud, Jérôme Faessler et Pierre Hollmuller.

Enfin, un grand merci aux familles Montavon, Viquerat, Frasseren et Schneider pour leur précieux et indéfectible soutien.

Et au glacier du Trient, en recul mais source inépuisable d'inspirations !

Résumé

L'eau, ressource indispensable à la vie de chaque être vivant, est également depuis longtemps utilisée dans un grand nombre d'activités humaines. Son usage est fondamental dans de nombreuses filières de production d'énergie. En particulier, la puissance hydraulique est depuis longtemps exploitée comme source d'énergie mécanique mais aussi pour la production d'électricité depuis le XX^{ème} siècle. Pour la production d'énergie thermique, les lacs et rivières ne sont toutefois exploités que depuis quelques années. Ce regain d'intérêt pour ces ressources renouvelables est intimement lié à la complexification du contexte énergétique et à l'augmentation soutenue de la consommation énergétique depuis les années 1950. La multiplication de systèmes classiques de climatisation, très gourmands en électricité et peu rationnels, ne représentent pas des moyens de production durable. En revanche, les systèmes hydrothermiques constituent des alternatives intéressantes, car ils présentent des potentiels importants et des propriétés de rationalité énergétique avancées.

Le travail interdisciplinaire proposé ici s'articule autour d'un retour d'expérience d'un système hydrothermique implanté à Genève depuis environ deux ans. Composé des réseaux Merck-Serono (MS) et Genève-Lac-Nations (GLN) qui desservent le quartier de la Genève internationale, ce système innovant à pompage lacustre profond permet de climatiser des bâtiments neufs et existants (15.7 MW), le chauffage de bâtiments performants (3 MW), mais aussi la fourniture d'eau d'arrosage. Le travail mené s'appuie principalement autour de l'étude du fonctionnement du réseau GLN pour les prestations de climatisation. Les bâtiments qui y sont connectés sont majoritairement climatisés en direct. Les niveaux de température de la ressource, non contrôlables et non garantis, ont des conséquences importantes sur son utilisabilité (nécessité d'adapter les niveaux de température de travail). Sa boucle de distribution primaire fonctionne en mode ouvert: la seule contrainte sur la température de retour est environnementale (minimisation de la modification des conditions naturelles du plan d'eau récepteur).

Les systèmes hydrothermiques, lacustres ou océaniques, sont actuellement très peu nombreux, peu étudiés et peu documentés. L'étude de cas du système genevois, en la comparant avec des systèmes similaires, a permis de mettre en évidence les points-clé fondamentaux et déterminants (aspects énergétiques, environnementaux et économiques) qui contribuent ou on à leur succès. De la phase de projet à leur gestion, de nombreux obstacles et contraintes doivent en effet être pris en compte puis intégrés. L'un des objectifs de cette étude est de fournir des pistes sur l'utilisation synergique des prestations thermiques froid et chaud et sur la valorisation matière des eaux pompées, mais aussi d'apporter des éléments pour un développement de cette filière hydrothermique en général.

Le premier sous-système étudié est le lac: caractérisation de sa ressource, évaluation des impacts induits par le système et détermination de ses potentiels énergétiques régionaux. Sa caractérisation est en effet un préalable déterminant pour l'implantation d'un tel système, car sa qualité conditionne fortement son utilisabilité. L'indicateur de qualité choisi exprime la correspondance entre la température de la ressource et la température extérieure, de manière à prendre en compte à la fois la ressource et les besoins de froid. Il s'avère que l'emplacement du pompage est déterminant sur sa qualité: sa stabilité thermique et ses niveaux de températures sont fortement dépendants de la dynamique hydrologique du plan d'eau, mais augmente généralement avec la profondeur. Au niveau des impacts induits, les effets thermiques sont localement faibles ou se confondent avec la fluctuation spontanée du milieu, et la qualité chimique des eaux presque jamais affectée. Aucun impact notable n'a été perçu sur la faune et la flore aquatique vivant à proximité. Pour l'énergie froid, les potentiels

énergétiques modélisés sont supérieurs à 2 GWh/an au niveau du Petit-Lac Léman et s'accompagnent d'impacts environnementaux très faibles. Au niveau régional, ils permettent donc d'envisager sereinement le développement de cette filière thermique.

Le deuxième sous-système étudié est l'ensemble des bâtiments connectés. La connexion de bâtiments existants impose notamment d'importantes contraintes sur les températures de travail. Pour cela, une méthode spécifique d'audit qui permet d'effectuer un diagnostic de la connectabilité a été développée. La deuxième année d'approvisionnement en énergie froid via le réseau GLN a été analysée en détail pour l'un des quatre bâtiments connectés: compréhension globale de l'utilisation du réseau et de la fourniture d'énergie, comparaison de l'approvisionnement avec une production classique, analyse de l'échangeur de chaleur et de sa régulation, étude de la prestation froid pour une salle de conférence, et finalement évaluation du coût de revient de l'énergie froid pour l'utilisateur. Il en ressort que du point de vue de l'approvisionnement, le système est globalement satisfaisant: le surdimensionnement des installations de distribution permet de compenser l'augmentation de température du fluide distribué, mais la valorisation de l'eau pompée n'est pas optimale. L'analyse détaillée du fonctionnement et de la régulation de l'échangeur de chaleur a mis en évidence le rôle central de ce transformateur dans l'efficacité globale du système: une gestion adéquate des débits est nécessaire pour permettre un échange d'énergie efficace garant d'une prestation de qualité pour l'utilisateur, tout en maximisant la valorisation de la ressource. Les marges d'optimisation restent actuellement importantes, tant dans la phase d'étude (importance des dimensionnements) que durant son exploitation (régulation, collaborations accrue entre exploitant et utilisateurs). Pour les trois autres bâtiments connectés, l'analyse sommaire a montré que les problématiques, hormis quelques points spécifiques, sont dans l'ensemble similaires voire identiques.

Le troisième sous-système étudié est le réseau. Au cours de son parcours à travers le réseau, l'eau est constamment réchauffée, mais de manière suffisamment faible pour que la ressource lacustre reste d'un niveau de température satisfaisant à son arrivée dans les sous-stations, pour délivrer des prestations de climatisation en direct. Le niveau de température des eaux rejetées reste encore bas: la marge d'optimisation reste donc importante. L'efficacité frigorifique moyenne annuelle du réseau GLN n'est que de 6.8 et varie fortement selon les mois. Tout comme l'efficacité frigorifique, le coefficient de simultanéité de fonctionnement à pleine charge n'est pas représentatif d'un fonctionnement du réseau à sa pleine capacité et optimisé: toutefois, certaines conditions de fonctionnement montrent déjà que des connexions supplémentaires pourront être envisagées (simultanéité bien est inférieure à 1). Finalement, l'étude du fonctionnement hivernal du réseau, en boucle fermée, montre que les potentiels énergétiques sont importants pour le chauffage, mais que la gestion des niveaux de température est complexe.

Les aspects économiques ont également été abordés sous l'angle du coût de revient et du prix de vente de l'énergie froid. Le coût de revient, majoritairement déterminé par l'investissement, est compris entre 13.5 et 17.2 cts/kWh selon le scénario envisagé. Le prix de vente moyen (15.4 cts/kWh), compris dans cette fourchette, indique que le modèle financier développé par l'exploitant est cohérent, mais les quantités d'énergie délivrées en 2010 restent inférieures aux valeurs planifiées. Plusieurs pistes qui permettraient de rendre cet équilibre financier moins « tendu » sont présentées et discutées (en sus des dimensionnements et de l'optimisation déjà mentionnés): adoption d'un modèle de tarification mieux adapté et plus attractif, intérêt plus marqué sur la vente d'énergie chaud mais aussi sur la vente d'eau d'arrosage, dont les potentiels semblent très importants.

Le quatrième sous-système étudié est le quartier. Il a été constaté que la mise en service du système a une incidence positive sur les consommations d'électricité et d'eau potable. Bien que la consommation d'électricité ait augmenté depuis 2006, elle s'est stabilisée aux environs de 110 GWh grâce aux diminutions de consommation conséquentes des bâtiments connectés: la substitution de la production d'énergie froid est sensible et la connexion d'autres grands bâtiments offre un potentiel d'économie très intéressant, car ils représentent plus des trois quarts de la consommation électrique du quartier. La consommation d'eau potable a diminué d'environ 14 % depuis 2006: la première moitié est liée à la connexion des bâtiments au réseau GLN, la seconde à la valorisation des eaux de retour du réseau pour l'arrosage.

A partir de ce retour d'expérience et par comparaison avec d'autres systèmes similaires, ce travail propose finalement une analyse plus globale des conditions pour lesquelles ces systèmes sont pertinents et des facteurs fondamentaux de viabilité et de reproduction à plus large échelle. Une contextualisation historique met en évidence non seulement les raisons de leur émergence tardive mais également les avantages/contraintes des systèmes de climatisation successivement apparus. Ensuite, les conditions de réussite pour l'implantation de systèmes hydrothermiques sont discutées, de même que les nombreux co-bénéfices sociétaux qui, en dépit l'accroissement durable de l'activité économique locale qu'ils génèrent, ne sont pas intégrés dans les plans financiers. Finalement et sur la base des spécificités de la région genevoise, quelques pistes relatives à l'intensification de la filière hydrothermique sur ce territoire sont esquissées.

Il ressort de cette synthèse la recommandation d'un certain nombre de critères de faisabilité. Pour la ressource, les contraintes principales sont liées à sa disponibilité et au choix de son emplacement. Pour la distribution, le choix d'un tracé optimal et du modèle de fonctionnement sont fondamentaux. Au niveau de la transformation énergétique et de la prestation, il est primordial de définir de manière réaliste les besoins énergétiques et les limites de compétences des différents acteurs. De plus, la stratégie de production devrait être considérée globalement (approche thermo-électrique, synergie des flux thermiques): la nécessité de garantir l'approvisionnement et l'importance de l'investissement nécessitent une réflexion profonde, très en amont dans la phase de projet, notamment sur le choix d'une production mono- ou bivalente. Quelle que soit la solution retenue, il apparaît fondamental de maximiser une valorisation énergétique de la production renouvelable, à des hauts niveaux de température, et de la considérer comme une ressource multiple (valorisation(s) énergie et matière(s)).

Les aspects institutionnels sont également déterminants. Les multiples acteurs sont tenus d'agir en « communauté d'intérêt » pour aborder de manière interdisciplinaire les problématiques qui interviennent depuis la phase de projet jusqu'à l'exploitation. En créant un environnement favorable, le rôle des autorités publiques est de ce point de vue primordial. Pour les communautés locales et les utilisateurs potentiels, l'aspect innovant et le peu/absence d'expérience lié à ce type de système peut renforcer certaines réticences. Pour développer cette filière et utiliser efficacement ces systèmes renouvelables, la relation exploitant-utilisateur doit donc être considérée de manière globale: bien qu'une évolution soit nécessaire tant au niveau des attentes que des habitudes de consommation, les changements à engager peuvent être initiés par le biais de stratégies de communication (plus-value lié à l'image « verte ») et commerciales adaptées (tarification, lien avec les autres énergies vendues, outsourcing, etc.), mais aussi par un support aux services techniques des bâtiments connectés durant la phase d'apprentissage. De plus, une vision à long terme semble en la faveur du développement de cette filière: les politiques publiques devraient pour cela être proactives, car l'existence de ces systèmes, qui s'intègrent dans des agglomérations où la pression sur le foncier est élevée, nécessite d'être vigoureusement soutenue. La mise en place de partenariats

public/privé permettrait un meilleur partage des risques (lourdeur des investissements, installation à longue durée de vie).

Mots-clés: énergie renouvelable, système énergétique de réseau, ressource renouvelable hydrothermique, filière énergétique hydrothermique.

Abstract

Water resources are essential to the life of every living being and thus have been used in many human activities for a very long time. The use of water is fundamental in many fields of energy production. In particular, hydraulic power has been exploited for a long time as a source of mechanical energy and, since the twentieth century for electricity generation. However lakes and rivers have only been used in recent years for thermal power generation. This renewed interest in these renewable resources is intimately linked to the complexity of the energy situation and the sustained increase in energy consumption since the 1950s. The proliferation of conventional air conditioning systems, which are large electricity consumers and inefficient installations, do not represent sustainable means of production. In contrast, hydrothermal systems are interesting alternatives because they have significant potential and advanced properties of energy rationality.

The interdisciplinary work proposed here is based on the feedback of a hydrothermal system implanted in Geneva in 2009. It is composed of two networks, Merck-Serono (MS) and Geneva-Lac-Nations (GLN) that serve the international district of Geneva. This innovative deep lake source cooling offers several services, such as cooling new and existing buildings (15.7 MW) and heating efficient buildings (3 MW), and also supplies irrigation water. The work done here is primarily based on the study of the GLN network operations for cooling services. The buildings, which are connected to this network, are mostly refreshed directly, without using any classical production with cooling machines. The temperature levels of the resource are uncontrollable and unsecured: these have a significant impact on its usability (need to adjust the levels of temperature). Its primary distribution loop operates in an open mode: the only constraint on the return temperature is an environmental one (modification minimization of the receiving water natural conditions).

There are currently very few lake-source cooling systems (LSC) and ocean-source cooling systems (OSC), further these systems have not been studied much and are poorly documented. The comparison of the Swiss case study with similar systems helped to highlight the key points and fundamental determinants (energy, environmental and economic aspects) that contributed –or not- to their success. Indeed, from the early design phase to the operation phase, many obstacles and constraints have to be considered and integrated. One of the objectives of this study is to provide insights on the synergetic use of thermal cooling and heating services and on the material recovery of pumped water, but also to provide elements for a development of this hydrothermal sector in general.

The first subsystem, which is studied, is the lake: characterization of the thermal resource, assessment of the impacts caused by the system and determination of its regional energy potential. The characterization of the resource is indeed a fundamental prerequisite for determining the location of such a system, because its quality strongly influences its usability. The quality indicator selected expresses the correspondence between the temperature of the resource and the outside temperature, so as to take into account both the resource properties and the cooling requirements. It turns out that the location of the pumping site is critical regarding its quality: its thermal stability and temperature levels are strongly dependent on the hydrological dynamics of the water, but generally increase with depth. Concerning the induced impacts, the thermal effects, which are induced by the discharged waters of the system, are locally weak or merge with the spontaneous fluctuation of the environment, and the chemical quality of the water is almost never affected. No significant impact was seen on the aquatic fauna and flora living in the vicinity. Concerning cold energy, the modelled potential energy is above 2 GWh / year for the Little Lake Geneva alongside a very low

environmental impact. At the regional level, this potential offers large possibilities for the development of a hydrothermal sector.

The second subsystem, which is studied, is the set of connected buildings. The connection of existing buildings imposes in particular significant constraints on the working temperatures. For this, a specific method of auditing, which allows a diagnosis of the connectivity, was developed. The second year of cold energy supply via the GLN network is analyzed in detail with respect to one - of the four - connected buildings: it includes a comprehensive understanding of network utilization and energy supply (compared to a conventional production system), the analysis of the heat exchanger and its regulation, the study of cold provision for a conference room, and finally the evaluation of the cost of this thermal energy. It shows that the system is generally satisfactory with respect to the supply: the oversized distribution facilities can accommodate the increase in temperature in the distribution loop, but the use of the pumped water is not optimal. Detailed analysis of the functioning and regulation of the heat exchanger highlighted the central role of the transformer in the overall efficiency of the system: a proper management of flows is required to allow an efficient exchange of energy and to guarantee a suitable quality of service to users, while maximizing the use of the resource. Optimization margins are currently high both in the study phase (importance of sizing) and during its operation (regulation). All these points imply an increased collaboration between operators and users. For the other three connected buildings, the short analysis shows that the problems are broadly similar - except for some specific points - if not identical.

The third subsystem which is studied is the network itself. During its circulation through the network, the water is constantly heated, but little enough for the resource to be at a satisfying temperature level when it arrives in the sub-stations, so that the cold energy can be delivered directly. The temperature level of the discharged water still remains low, indicating that the optimization margin is still important. The annual average cooling efficiency of the GLN network is only 6.8 and varies widely from month to month. Similarly to the cooling efficiency, the simultaneity factor of full load operation is not representative of an optimized network operating at full capacity: however, some operating conditions already show that additional connections could be considered (the simultaneity factor is well below 1). Finally, the study of winter operation of the network, in a closed loop mode, shows that heating potentials are significant, but that the management of temperature levels is complex.

The economic aspects are also discussed in terms of cost and selling prices of cold energy. The cost, determined mainly by investment, lies between 13.5 and 17.2 cts/kWh depending on the scenario. The average selling price (15.4 cts/kWh) is situated in this same range, and indicates that the financial model developed by the operator is consistent, however the amount of energy delivered in 2010 remained below the planned values. Several avenues to make this financial balance less "tense" are presented and discussed (in addition to the sizing and optimization already mentioned): the adoption of a better and more attractive pricing model, an interest focused more on the sale of heating energy and also on the sale of irrigation water, whose potential is very large.

The fourth and last subsystem, which is studied, is the district. It was found that the commissioning of the system had a positive impact on the consumption of electricity and drinking water. Although electricity consumption has increased since 2006, it stabilized itself around 110 GWh due to the substantial decreases in the consumption of connected buildings: the substitution of cold energy production is discernible and the future connection of other large buildings offers an important savings potential because these buildings represent more

than three quarters of the electricity consumption of the neighbourhood. The drinking water consumption decreased by about 14% since 2006: the first half is related to the connection of buildings to the GLN network, the second to the valorization of returned water for watering.

On the basis of this feedback and after comparing GLN with other similar systems, this work ultimately offers a more comprehensive analysis of the conditions for which these systems are relevant, and enables to identify the fundamentals of viability for their reproduction on a larger scale. A historical contextualization highlights not only the reasons for their late emergence but also the benefits/constraints of the different air conditioning systems that have successively appeared. Then the conditions for successful implementation of hydrothermal systems are discussed alongside the many societal co-benefits - which despite the increase of sustainable local economic activity they generate - are not integrated into financial plans. Finally, on the basis of the specificities of the Geneva area, some possible further developments are outlined relating to the intensification of the hydrothermal sector on this territory.

This synthesis leads to the recommendation of a number of feasibility criteria. For the resource, the main constraints are related to its availability and the choice of an ideal location. For the distribution, the choice of an optimal route and appropriate operating model are fundamental. In terms of energy conversion and supply, it is important to define realistic energy needs and the responsibility limits of the various actors. In addition, the production strategy should be considered as a whole (thermo-electric approach, synergy of heat flows): the need to guarantee the supply and the importance of the investment require deep thought, very early in the phase project, in particular for the choice of a production (mono-or bivalent, necessity of storage, open/closed loop, etc.). Whatever the chosen solution, it is crucial to maximize the energy production of the installed renewable power generation, at high temperature levels, and to consider it as a multiple resource i.e both for thermal energy production and multiple secondary uses.

The institutional aspects are also important. Multiple actors are required to act in "community of interest" in an interdisciplinary way to address the issues involved during the entire process (from the design stage to operation). By creating a positive and favourable environment, the role of public authorities is essential in that perspective. For local communities and potential users, the innovative aspect and lack - or absence - of experience related to this type of system may strengthen some reluctance. To develop this sector and to operate these renewable systems with the high degree of efficiency that is required, the operator-user relationship must be seen holistically: although an evolution is needed both in terms of expectations and consumer habits, changes can be initiated by means of communication strategies (capital gain related to a "green" image) and adapted commercial models (pricing, links with other energies sold, outsourcing, etc..), but also by supporting the technical services of connected buildings during the learning phase. In addition, a long-term outlook seems to be favourable to the development of this sector: the public policy should be proactive, because the existence of these systems needs to be vigorously supported, especially for their integration into urban areas where pressure on land is very high. The establishment of public/private partnerships could allow a better risk sharing as well (weight of investments, length of life of these facilities).

Keywords: renewable energy, energy system network, hydrothermal resource, hydrothermal energy sector, LSC (Lake Source cooling).

Table des matières

1	INTRODUCTION	39
2	LES TROIS PERIODES DE LA PRODUCTION DE FROID	43
3	SYSTEMES HYDROTHERMIQUES	49
3.1	TYPLOGIE	49
3.2	NOMENCLATURE	50
3.3	PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	50
3.4	DIVERSITE DES PROJETS ET RESEAUX EXISTANTS	51
3.4.1	Réseaux en opération	53
3.4.1.1	En Suisse	53
3.4.1.2	A travers le monde	53
3.4.2	Projets de réseaux suisses	57
4	OBJECTIFS DE L'ETUDE ET DE LA THESE	61
5	CADRE DE L'ETUDE	63
6	LE SYSTEME GLN – MERCK-SERONO	65
6.1	LOCALISATION	65
6.2	INSTALLATIONS ET EQUIPEMENTS	65
6.3	SPECIFICITES DES RESEAUX GLN ET MERCK-SERONO	71
6.4	MODELE TARIFAIRE POUR L'ENERGIE FROID	72
6.5	CONTEXTE POLITIQUE ET GENESE DU SYSTEME ENERGETIQUE	73
6.5.1	Contexte international et national	73
6.5.2	Contexte cantonal	73
6.5.3	Planification énergétique territoriale: l'opportunité GLN – Merck-Serono	74
6.5.4	Genèse du système et du réseau GLN	75
6.6	OBJECTIFS ENERGETIQUES INITIAUX	76
6.7	ETAT D'AVANCEMENT DES CONNEXIONS AU DEBUT 2011	77
7	METHODOLOGIE ET MESURES	79
7.1	CADRE METHODOLOGIQUE	79
7.2	TYPES DE MESURES ET DE DONNEES	81
7.3	SUIVI DU LAC	81
7.3.1	Emplacements	81
7.3.2	Mesures et méthodes	83
7.4	SUIVI DU RESEAU ET DES BATIMENTS	86
7.5	SUIVI DETAILLE D'UN BATIMENT CONNECTE (B1)	88
7.6	SUIVI AU NIVEAU DU QUARTIER	88
7.7	QUALITE DES MESURES ET DES DONNEES	89
7.7.1	Mesures sur le lac	89
7.7.2	Données du réseau et des bâtiments connectés	90
8	LAC: RESSOURCE ENERGETIQUE ET IMPACT ENVIRONNEMENTAUX	95
8.1	DESCRIPTION DES REGIMES THERMIQUES DU PETIT-LAC	96
8.1.1	Profils saisonniers de la fosse lacustre	96
8.1.2	Variabilité spatiale et temporelle	99
8.1.3	Profils saisonniers de la zone littorale / épilimnion	105
8.2	RESSOURCE	107
8.2.1	Température et stabilité de la ressource	107
8.2.1.1	Définition de la qualité de la ressource	107
8.2.1.2	Etude de la ressource au point de pompage du système	108
8.2.1.3	Dépendance à la température extérieure	111
8.2.2	Importance du site de pompage	114
8.3	UTILISATION DES EAUX: CADRE LEGAL	116
8.3.1	Législations	116
8.3.2	Concession de pompage	117

8.4	REJET DU SYSTEME.....	117
8.4.1	Niveaux de température et énergie rejetée.....	118
8.4.1.1	Définitions.....	118
8.4.1.2	Etude des niveaux de température.....	119
8.4.2	Effets et impacts du rejet.....	121
8.4.2.1	Effets thermiques locaux.....	121
8.4.2.2	Effets physico-chimiques.....	135
8.4.2.3	Impacts sur la faune et la flore.....	138
8.4.3	Résumé.....	142
8.5	POTENTIELS HYDROTHERMIQUES REGIONAUX « FROID » ET « CHAUD »	143
8.5.1	Modèle hydrothermique dynamique.....	144
8.5.1.1	Principes.....	144
8.5.1.2	Hypothèses.....	145
8.5.2	Temps d'épuisement de la couche-ressource.....	145
8.5.3	Détermination des potentiels.....	147
8.5.3.1	Impacts thermiques des potentiels théoriques.....	147
8.5.3.2	Impacts thermiques des potentiels acceptables.....	149
8.5.3.3	Saisonnalité.....	152
8.6	SYNTHESE.....	152
8.6.1	Ressource.....	152
8.6.2	Impacts du système sur le lac.....	153
8.6.3	Potentils énergétiques pour la filière hydrothermique régionale.....	153
8.6.4	Nécessité d'une approche globale: région et bassin versant.....	154
9	RESEAU GLN ET BATIMENTS CONNECTES.....	157
9.1	CONNEXION DE BATIMENTS EXISTANTS: PRINCIPE ET METHODE D'AUDIT « FROID »	157
9.1.1	Description des installations.....	158
9.1.2	Analyse des besoins.....	158
9.1.3	Contraintes de températures et stratégies de régulation.....	159
9.2	SUIVI DETAILLE DU BATIMENT B1.....	162
9.2.1	Cadre de l'étude.....	162
9.2.2	Introduction.....	162
9.2.3	Description.....	163
9.2.3.1	Bâtiments.....	163
9.2.3.2	Installations de production et de distribution.....	164
9.2.3.3	Salle de conférence 17.....	167
9.2.4	Méthodologie de mesure.....	169
9.2.4.1	Bâtiments et installations techniques.....	169
9.2.4.2	Salle de conférence 17.....	170
9.2.5	Analyses et objectifs.....	171
9.2.6	Fonctionnement global.....	171
9.2.6.1	Evolution des paramètres.....	171
9.2.6.2	Bilans et indices énergétiques.....	176
9.2.6.3	Ressource: du lac au bâtiment, puis retour au lac.....	177
9.2.6.4	Valorisation de la ressource.....	181
9.2.6.5	Coût de l'énergie froid via le réseau GLN.....	189
9.2.6.6	Analyse du transformateur principal: l'échangeur de chaleur.....	191
9.2.6.7	Prestation de ruban nocturne: via GLN ou machine frigorifique ?	200
9.2.7	Discussion et synthèse.....	200
9.2.7.1	Principe d'une régulation alternative.....	202
9.3	BATIMENTS CONNECTES.....	203
9.3.1	Fourniture d'énergie froid via le réseau GLN.....	203
9.3.2	Evolution des consommations d'électricité et d'eau potable.....	211
9.3.3	Bilans et comparaison avec les objectifs initiaux.....	213
9.4	RESEAU.....	215
9.4.1	Aspects énergétiques et environnementaux.....	215
9.4.1.1	Evolution des puissances de froid et températures de travail.....	215
9.4.1.2	Diagrammes de Sankey pour une période estivale typique.....	216
9.4.1.3	Performance énergétique du réseau.....	220
9.4.1.4	Simultanéité de fonctionnement à pleine charge.....	223
9.4.2	Aspects économiques.....	226
9.4.2.1	Coût de revient « exploitant » de l'énergie froid via le réseau GLN.....	226
9.4.2.2	Coût « utilisateur » de l'énergie froid via le réseau GLN.....	229

9.4.2.3	Revenus pour l'exploitant: énergie froid et eau d'arrosage	229
9.4.2.4	Viabilité à moyen terme: repères et pistes	231
9.4.2.5	Pistes de tarifications alternatives.....	232
10	DEVELOPPEMENT ET REPRODUCTIBILITE	235
10.1	VERS QUELS SYSTEMES DE CLIMATISATION ?	235
10.1.1	<i>Sytèmes classiques centralisés vs décentralisés.....</i>	236
10.1.2	<i>Sytèmes centralisés hydrothermiques et classiques</i>	239
10.1.2.1	Aspects économiques	239
10.1.2.2	Aspects énergétiques et co-bénéfices environnementaux	240
10.2	CONDITIONS DE REUSSITE POUR L'IMPLANTATION DE SYSTEMES HYDROTHERMIQUES	241
10.2.1	<i>Caractéristiques déterminantes</i>	241
10.2.2	<i>Discussion: comparaison entre les différents systèmes</i>	243
10.2.3	<i>Synthèse: critères de faisabilité recommandés</i>	249
10.3	AFVG ET HYDROTHERMIE: PISTES POUR LE DEVELOPPEMENT INTENSIF DE LA FILIERE.....	252
10.3.1	<i>Concordance entre potentiels et demande de froid.....</i>	252
10.3.2	<i>Intégration territoriale de la filière hydrothermique</i>	254
11	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	257
12	BIBLIOGRAPHIE.....	261

Liste des figures

fig. 1-1 Bilan des flux d'eau au niveau mondial (Cooper, 1990)	39
fig. 2-1 Entrepôt frigorifique de la gare Paris-Ivry (à gauche) et ses compresseurs à ammoniaque (à droite) (photos: C. Sulzer).....	44
fig. 3-1 Principe de fonctionnement d'un système hydrothermique lacustre pour la production de froid et de chaud (source: SIG).....	50
fig. 3-2 Principe de fonctionnement d'un système hydrothermique de type ouvert pour la production de froid	51
fig. 3-3 Schéma de principe du système hydrothermique de froid de la ville de Toronto	54
fig. 3-4 Schéma de principe du système hydrothermique de froid de l'Université de Cornell (Peer et al., 2002)	55
fig. 3-5 Station de pompage et de transfert du réseau de Cornell (à gauche) et détails intérieurs (à droite)	56
fig. 5-1 Organigramme des acteurs impliqués dans les travaux de recherche connexes liés au projet GLN	63
fig. 6-1 Emplacement de la ville de Genève (à gauche) et localisation du système hydrothermique GLN – Merck-Serono (cercle bleu, à droite) (sources: Swisstopo et SIG)	65
fig. 6-2 Vue globale du système hydrothermique GLN – Merck-Serono	66
fig. 6-3 Crépine d'aspiration (à gauche) et diffuseur de rejet (à droite) (source: SIG).....	67
fig. 6-4 Conduites sous-lacustres GLN (en rouge) et de l'adduction d'eau potable du « Prieuré » (en noir) (source: GEOS Ingénieurs).....	67
fig. 6-5 Etat des réseaux terrestres GLN et Merck-Serono en novembre 2010: construit (en bleu), en construction (en rouge) et planifié (en jaune) (source: SIG)	68
fig. 6-6 Station de pompage: filtres et chaudron GLN au 1 ^{er} étage (en haut), pompes GLN au rez (au milieu à gauche), conduites de distribution/retour avec débitmètre au 1 ^{er} étage (au milieu à droite), pompes et filtres Merck-Serono au rez (en bas).....	69
fig. 6-7 Sous-station d'un bâtiment connecté au réseau GLN: échangeurs de chaleur (à gauche), pompes de circulation (au milieu) et vue global avec machines frigorifiques (à droite).....	70
fig. 6-8 Limites du quartier (ligne noire) et bâtiments concernés (en rouge)	71
fig. 6-9 Etapes-clé et zones d'influence durant la genèse du système (source: SIG)	76
fig. 7-1 Emplacements du pompage (en vert, à gauche), du rejet (en rouge, à gauche) et des conduites lacustres du réseau GLN (en rouge, à droite).....	82
fig. 7-2 Emplacements des bouées de mesures numérotation des principaux emplacements de mesure (en bleu); conduites du réseau GLN (en rouge) et emplacement de son rejet (en bleu clair).....	83
fig. 7-3 Quadrat de macrophyte (à gauche); substrat artificiel pour prélever la macrofaune benthique (à droite).....	86
fig. 7-4 Points de mesures principaux et numérotation des emplacements de mesure (en bleu)	87
fig. 7-5 Températures du lac au point de pompage à 10, 20, 30 et 37 m prof. (4) et à 2.25 m en aval du rejet à 1, 3, 4 et 4.5 m prof. (1); températures du réseau GLN à la station de pompage (distribution (5) et retour (12)) et du rejet du système (14); données par 15 min du 4 au 11 septembre 2008.....	89
fig. 7-6 Différence de sensibilité entre thermocouple et minilog au point de référence à 3 m prof. (2); données par 15 min du 22 au 31 janvier 2009	89

fig. 7-7 Températures et débits au niveau de la sous-station d'un bâtiment connecté: distribution et retour des côtés primaire (6, 9) et secondaire (7, 8) de l'échangeur; données horaires du 21 juin au 11 juillet 2010.....	91
fig. 7-8 Différence d'énergie entre la mesure par compteur de chaleur et le calcul de l'énergie (7, 8); données horaires du 1 ^{er} avril 2010 au 1 ^{er} avril 2011	92
fig. 7-9 Energie calculée côtés primaire (6, 9) et secondaire (7, 8) de l'échangeur principal pour les quatre bâtiments connectés; données horaires du 1 ^{er} avril 2010 au 1 ^{er} avril 2011	93
fig. 8-1 Cartographie du Lac Léman et de ses principaux affluents (Rhône émissaire à gauche, à Genève).....	95
fig. 8-2 Températures extérieure et du lac à 1 m prof. au point de référence (2); données horaires 2008.....	96
fig. 8-3 Profil thermique et zones thermiques d'un lac monomictique à trois couches (p. ex. Lac Léman).....	97
fig. 8-4 Température du lac au point de pompage à 1, 2, 3, 4, 4.5, 10, 15, 20, 25, 30 et 37 m prof. (4); données horaires pour les années 2008 et 2009 (en-haut); focus sur les mois de juin, juillet et août (en-bas).....	98
fig. 8-5 Variabilité des températures du Petit-Lac Léman avec leurs écart-types, en fonction de la profondeur; données mensuelles de 2005 à 2008 au point de référence GE3 (source: SECOE).....	100
fig. 8-6 Mécanismes de forçage (à gauche) et des ondes internes (à droite) (Lemmin, 2005b).....	101
fig. 8-7 Direction des courant de surface (en rouge), à 10-25 m prof. (en vert) et convectifs plongeants (en rouge-vert); état non-perturbé (en haut) et forçage par la Bise (en bas); situation initiale (flèches pleines) et finale (flèches en traitillé); bouée de courant en jaune	102
fig. 8-8 Distribution des courants à 8-9 m prof. (3), exprimée en nombre d'occurrences; état non-perturbé (à gauche) et forçage par la Bise (à droite); données par 30 min du 1 ^{er} mai au 30 septembre 2006.....	103
fig. 8-9 Mécanisme de l'onde interne au point de pompage (en vert: mouvements de la thermocline)	103
fig. 8-10 Température du Rhône en aval de Sion; données horaires du 1 ^{er} au 3 avril 2002 (Wüest et al., 2004).....	105
fig. 8-11 Température du lac à 4.5 m prof. au point de référence (2) et à 2.25 m en aval du rejet (1); données par 15 min du 9 au 20 mars 2007 (mesure avec des minilogs).....	105
fig. 8-12 Températures au point de référence à 0.1, 0.5, 1, 2, 3, 3.5, 4 et 4.5 m prof. (2), de l'air extérieur et vitesse du vent; données horaires du 7 avril au 10 mai 2007	106
fig. 8-13 Températures au point de référence à 0.1, 0.5, 1, 2, 3, 3.5, 4 et 4.5 m prof. (2), de l'air extérieur et vitesse du vent; données horaires du 27 mai au 11 juillet 2008	107
fig. 8-14 Température du lac au point de pompage à 1, 2, 3, 4, 4.5, 10, 15, 20, 25, 30 et 37 m prof. (4); données horaires du 1 ^{er} avril au 30 septembre 2008	108
fig. 8-15 Températures de la ressource au pompage à 37 m prof. (4) et de l'air extérieur (données horaires 2008); limite inférieure des pics de température (en rouge)	109
fig. 8-16 Température de la ressource au pompage à 37 m prof. (4) et température extérieure (valeurs moyennes et écart-types); données horaires 2006-2010	109
fig. 8-17 Distribution des températures de la ressource au pompage à 37 m prof. (4) exprimée en nombre d'heures; données horaires du 1 ^{er} avril au 30 septembre 2008.....	110

fig. 8-18 Température du pompage à 37 m prof. (4) en fonction de la température extérieure; données horaires du 1 ^{er} avril au 30 septembre (2006-2010); limite inférieure des pics de température (en rouge)	112
fig. 8-19 Evolution de l'indicateur de qualité de la ressource à 37 m prof. et de la température extérieure moyenne (mesurés lorsque la ressource est satisfaisante); données horaires du Prieuré du 1 ^{er} avril au 30 septembre 1999-2010.....	114
fig. 8-20 Température du pompage des réseaux hydrothermiques GLN à 37 m prof. (4) et de Versoix à 45 m prof.; données horaires du 27 avril au 21 septembre 2007.....	115
fig. 8-21 Nomenclature et définition des écarts de températures impliqués: pompage à 37 m prof. (4), rejet (4.5 m prof., 14) et référence à 4.5 m prof. (2)	119
fig. 8-22 Température du pompage à 37 m prof. (4), du rejet (4.5 m prof., 14), au point de référence à 4.5 m prof. (2) et écart de température entre le rejet et le pompage ($\Delta T_{\text{système}}$); données horaires 2009	120
fig. 8-23 Températures de retour (en haut) et écart de température entre le retour (12, 13) et la distribution (5, 13) ($\Delta T_{\text{réseau}}$, en bas) des réseaux GLN (à gauche) et Merck-Serono (à droite), exprimées en fonction de la température extérieure; données horaires du 1 ^{er} avril au 1 ^{er} octobre 2010	121
fig. 8-24 Evolution de la température extérieure et du refroidissement de l'épilimnion à 2.25 m en aval du rejet à 1, 2, 3, 4 et 4.5 m prof. (1); données horaires du 27 janvier au 6 février 2010	122
fig. 8-25 Evolution des températures du pompage à 37 m prof. (4), du rejet (4.5 m prof., 14), au point de référence (en haut, 2) et à 2.25 m en aval du rejet (au milieu, 1), de la température extérieure, de la vitesse du vent, du débit du rejet (GLN + Merck-Serono, 13) et refroidissement de l'épilimnion à 2.25 m en aval du rejet (en bas); données horaires du 22 mai au 1 ^{er} juin 2010	124
fig. 8-26 Evolution des températures du pompage à 37 m prof. (4), du rejet (4.5 m prof., 14), au point de référence (en haut, 2) et à 2.25 m en aval du rejet (au milieu, 1), de la température extérieure, de la vitesse du vent, du débit du rejet (GLN+Merck-Serono, 13) et refroidissement de l'épilimnion à 2.25 m en aval du rejet (en bas); données horaires du 25 juin au 5 juillet 2010	126
fig. 8-27 Refroidissement de l'épilimnion à 1, 2, 3, 4 et 4.5 m prof. (1, 2) exprimé en fonction de l'écart de température ΔT_{net} entre l'épilimnion (sans rejet, 2) et le rejet du système (14); données horaires du 1 ^{er} avril au 5 juillet 2010	128
fig. 8-28 Détails de la structure du diffuseur de rejet (source: GEOS ingénieurs).....	129
fig. 8-29 Températures à 25 et 50 m autour du rejet, au point de référence (2) et à 2.25 m en aval du rejet (1) à 0.1, 0.5, 1, 2, 3, 3.5, 4, 4.5, 5 et 5.5 m prof., le 9 juin 2010 (14h10-15h25), coordonnées suisses (rapport vertical/horizontal 20/1), isobathe de 0.5 m.....	130
fig. 8-30 Simulation 2D des profils de températures sur le transect perpendiculaire au rejet (14) le 3 août 2007, dans le sens du courant maximum (Malama 2009).....	131
fig. 8-31 Refroidissement de l'épilimnion à 2.25 m en aval du rejet à 1, 2, 3, 4 et 4.5 m prof. (1) exprimé en fonction de la puissance thermique rejetée par le système (4, 14); données horaires du 1 ^{er} avril au 5 juillet 2010	134
fig. 8-32 Turbidité des eaux du lac à 2.25 m en aval du rejet (1)	138
fig. 8-33 Zones occupées par les quatre espèces principales de poissons dans le Léman genevois (ECOTEC, 1993).....	141
fig. 8-34 Salaria fluviatis Asso 1801 (GREN, 2010)	142
fig. 8-35 Profils bathymétriques du Petit-Lac, du Petit-Lac genevois et de la Rade de Genève.....	143
fig. 8-36 Schéma du modèle hydrothermique	144
fig. 8-37 Potentiels d'énergie à évacuer du scénario « cas retenus ».....	148

fig. 8-38 Modification de la température de l'épilimnion (moy. 0-5 m prof.); puissance évacuée exprimée en fonction de la surface de lac considérée; scénario « cas retenus »	151
fig. 9-1 Signature froid d'un bâtiment-type (ruban en orange; confort en rouge; 7, 8)	159
fig. 9-2 Température de la ressource à 37 m prof. (4) en fonction de la température extérieure; écarts de températures primaires mobilisables (distribution 6; retour 9) en direct (flèches noires) et via une machine frigorifique (flèches violettes); données horaires du 1 ^{er} avril au 1 ^{er} octobre 2009	160
fig. 9-3 Simulation avec l'outil pour les trois stratégies de régulation choisies (7, 8)	161
fig 9-4. Installations de production de froid et de distribution/convertisseurs des bâtiments; état 2007 et 2010 (machines frigorifiques = MF, en rouge; GLN, en vert).....	165
fig. 9-5 Installations de production de froid et de distribution/convertisseurs des bâtiments; état 2007 et 2010 (machines frigorifiques = MF, en rouge; GLN, en vert).....	166
fig. 9-6 Usages du froid en fonction des puissances des convertisseurs installées; situation 2007 (Mermoud et al., 2008a).....	167
fig. 9-7 Points de consignes et profil de régulation thermique de la salle de conférence 17; température ambiante mesurée derrière la loge des journalistes	168
fig. 9-8 Points de mesures du réseau et des bâtiments connectés et numérotation des principaux emplacements de mesure (en bleu).....	169
fig. 9-9 Salle de conférence 17: emplacements des sondes de température du système de contrôle centralisé (en bleu) et du système de mesures complémentaires (en rouge et vert).....	171
fig. 9-10 Puissance de froid et fonctionnement des machines frigorifiques connectées au réseau (en haut), débits et écarts de températures entre retour et distribution des côtés primaires (ΔT_{prim} , 9, 6) et secondaires (ΔT_{sec} , 8, 7) de l'échangeur de chaleur (en bas); données horaires du 1 ^{er} avril 2010 au 31 mars 2011	173
fig. 9-11 Fonctionnement du réseau GLN (5, 6, 9) et du réseau de distribution secondaire (7, 8) du bâtiment B1 lors d'un jour typique d'été; données horaire du 8 juillet 2010	174
fig. 9-12 Fonctionnement du réseau GLN (5, 6, 9) et du réseau de distribution secondaire (7, 8) du bâtiment B1 lors d'un jour typique d'hiver; données horaire du 20 février 2011	175
fig. 9-13 Fonctionnement du réseau GLN (4, 5, 13) en boucle ouverte/fermée lors d'un jour typique d'hiver; données horaire du 20 février 2011	176
fig. 9-14 Température d'eau et débits dans le réseau GLN pour une semaine hivernale typique: pompage à 37 m prof., station pompage et sous-station du bâtiment B1; données horaire du 14 au 21 février 2011	178
fig. 9-15 Températures et débits d'eau du lac dans le réseau GLN pour une semaine estivale typique: pompage à 37 m prof., station pompage et sous-station du bâtiment B1; données horaire du 4 au 11 juillet 2011.....	178
fig. 9-16 Simulation des températures d'eau aux différentes sous-stations (hypothèses: débit total de 3'400 m ³ /h, température de distribution du réseau GLN de 8°C à la station de pompage).....	179
fig. 9-17 Débits du réseau principal ($D_{distrib\ GLN}$, 5) et de l'embranchement du bâtiment B1 ($D_{distrib\ prim}$, 9); comparaison entre les valeurs mesurées et les hypothèses de calcul	180
fig. 9-18 Part du débit utilisé par le bâtiment B1 ($D_{distrib\ prim}$, 9) par rapport au débit total du réseau GLN ($D_{distrib\ GLN}$, 5); données horaire du 1 ^{er} avril 2010 au 31 mars 2011.....	180
fig. 9-19 Potentiel de modification de la température de l'épilimnion (11, 2) en fonction du volume d'eau rejetée par le réseau GLN; données horaires du 1 ^{er} avril 2010 au 31 mars 2011.....	181
fig. 9-20 Signature de la puissance de froid du bâtiment B1 (secondaire, 7, 8); données horaires du 1 ^{er} avril 2010 au 31 mars 2011	181

fig. 9-21 Dépendance du débit de distribution (7) avec la puissance de froid (secondaire, 7, 8) du bâtiment B1; données horaires du 1 ^{er} avril 2010 au 31 mars 2011	182
fig. 9-22 Températures de travail du côté secondaire de l'échangeur de chaleur (entrée de l'échangeur = retour, 8; sortie de l'échangeur = distribution, 7); données horaires du 1 ^{er} avril 2010 au 31 mars 2011	182
fig. 9-23 Courbe de charge froid du bâtiment B1 (secondaire, 7, 8); données horaires du 1 ^{er} avril 2010 au 31 mars	183
fig. 9-24 Relation puissance relative – énergie relative (sec); données horaires du 1 ^{er} avril 2010 au 31 mars 2011	184
fig. 9-25 Signatures froid des bâtiments A et E en 2007 et 2010 (secondaire, 7, 8) du bâtiment B1; données horaires pour les périodes estivales considérées	184
fig. 9-26 Débits secondaires (7, 8) des bâtiments A et E en 2007 et 2010; données horaires pour les périodes estivales considérées.....	185
fig. 9-27 Températures de travail secondaires et écart de température entre retour (8) et distribution (7) des bâtiments A et E en 2007 et 2010 (bâtiment B1); données horaires pour les périodes estivales considérées	186
fig. 9-28 Conditions hygrothermiques de la salle de conférence 17 du bâtiment B1; données horaires pour les périodes 2007 et 2010 considérées (mise en évidence des périodes d'occupation par des points en surbrillance).....	187
fig. 9-29 Coûts mensuel de l'énergie froid (part variable) via le réseau GLN (en haut) et répartition du coût annuel par niveaux de température de retour (9, en bas); données horaires du 1 ^{er} avril 2010 au 31 mars 2011	189
fig. 9-30 Comparaison entre la puissance d'entrée (côté primaire, 6, 9) et de sortie (côté secondaire, 7, 8) de l'échangeur du bâtiment B1; données horaires du 1 ^{er} avril 2010 au 31 mars 2011.....	191
fig. 9-31 Efficacité de l'échangeur de la sous station du bâtiment B1 exprimée en fonction du rapport de débit secondaire/primaire (7/9); données horaires du 1 ^{er} avril 2010 au 31 mars 2011	192
fig. 9-32 Facteur d'échange de l'échangeur de la sous-station du bâtiment B1 exprimé en fonction du débit minimum y transitant (7, 9); données horaires du 1 ^{er} avril 2010 au 31 mars 2011.....	193
fig. 9-33 Schéma simplifié de l'échangeur	194
fig. 9-34 Relation entre écarts de température réduits et rapport de débits pour l'échangeur du bâtiment B1; données horaires du 1 ^{er} avril 2010 au 31 mars 2011	195
fig. 9-35 Simulation de l'échangeur de chaleur: expression des débits primaire (9) et secondaire (7) pour obtenir 2'500 kW _{froid} selon la température de consigne secondaire désirée (axe horizontal), avec une température de distribution primaire fixe de 8°C ($T_{\text{distrib prim}}$, 6) et une température de retour du bâtiment fixe de 15°C ($T_{\text{retour sec}}$, 8).....	196
fig. 9-36 Débits primaire (9) et secondaire (7) en fonction de la puissance exprimée du côté secondaire de l'échangeur; données horaires du 1 ^{er} avril 2010 au 31 mars 2011	197
fig. 9-37 Bilan d'énergie exprimés en fonction de l'écart de température entre retour (9 et 8) et distribution (6 et 7) et par niveau de température de retour (respectivement primaires et secondaires); données horaires du 1 ^{er} avril 2010 au 31 mars 2011.....	199
fig. 9-38 Principe de régulation envisageable	203
fig. 9-39 Puissance de froid des bâtiments connectés (secondaire, 7, 8); données horaires du 1 ^{er} avril 2010 au 31 mars 2011	204
fig. 9-40 Courbes de charge froid des bâtiments B1, B2, B3 et B4 et rapports des courbes de charge de ces quatre bâtiments (en bas); données horaires du 1 ^{er} avril 2010 au 31 mars 2011.....	206

fig. 9-41 Relation puissance relative – énergie relative (secondaire); données horaires du 1 ^{er} avril 2010 au 31 mars 2011	207
fig. 9-42 Puissance de froid et fonctionnement des machines frigorifiques connectées au réseau (en haut), débits et écarts de température entre retour et distribution des côtés primaires (ΔT_{prim} , 9, 6) et secondaires (ΔT_{sec} , 8, 7) de l'échangeur de chaleur (en bas); données horaires du bâtiment B2 du 1 ^{er} avril 2010 au 31 mars 2011	208
fig. 9-43 Puissance de froid et fonctionnement des machines frigorifiques connectées au réseau (en haut), débits et écarts de température entre retour et distribution des côtés primaires (ΔT_{prim} , 9, 6) et secondaires (ΔT_{sec} , 8, 7) de l'échangeur de chaleur (en bas); données horaires du bâtiment B3 du 1 ^{er} avril 2010 au 31 mars 2011	209
fig. 9-44 Puissance de froid et fonctionnement des machines frigorifiques connectées au réseau (en haut), débits et écarts des températures entre retour et distribution des côtés primaires (ΔT_{prim} , 9, 6) et secondaires (ΔT_{sec} , 8, 7) de l'échangeur de chaleur (en bas); données horaires du bâtiment B4 du 1 ^{er} avril 2010 au 31 mars 2011	210
fig. 9-45 Consommation d'eau potable de 2006 à 2010 exprimée en fonction de la pluviométrie pour les quatre bâtiments connectés au réseau GLN; moyenne annuelle	212
fig. 9-46 Puissance de froid totale demandée sur le réseau GLN et énergie électrique consommée (en haut); températures de distribution (5) et de retour (12) du réseau GLN (au milieu et en bas); données horaires, du 1 ^{er} avril 2010 au 31 mars 2011	216
fig. 9-47 Diagramme de Sankey des niveaux de température (pondérés par les débits; en haut) et des flux d'énergie (chaleur et électricité exprimés en MWh; en bas) du réseau GLN; données horaires du 5 au 11 juillet 2010.....	217
fig. 9-48 Débit de distribution primaire (9) exprimé en fonction du débit de distribution secondaire (7) du bâtiment E (bâtiments B1); données horaires du 5 au 11 juillet 2010.....	219
fig. 9-49 Efficacité frigorifique du réseau GLN, énergie froid délivrée aux bâtiments B1, B2, B3 et B4 (7, 8) et électricité de pompage relative (13); données horaires du 1 ^{er} avril 2010 au 31 mars 2011.	221
fig. 9-50 Efficacité frigorifique du réseau GLN en fonction de l'écart de température entre le retour (12) et la distribution (5) du réseau (ΔT_{GLN} ; en haut) et de la puissance thermique délivrée aux bâtiments B1, B2, B3 et B4 (au milieu; en bas, zoom sur les basses valeurs d'efficacité, 7, 8); données horaires du 1 ^{er} avril 2010 au 31 mars 2011	222
fig. 9-51 Coefficient de simultanéité du réseau GLN exprimé par rapport au débit primaire (9), en fonction de celui exprimé par rapport à l'énergie froid délivrée aux bâtiments B1, B2, B3 et B4 (7); données horaires du 1 ^{er} avril 2010 au 31 mars 2011.....	223
fig. 9-52 Evolution des coefficients de simultanéité du réseau GLN exprimés en fonction du débit primaire (9); données horaires du 1 ^{er} avril 2010 au 31 mars 2011	224
fig. 9-53 Coefficient de simultanéité des bâtiments connectés en fonction de la température extérieure (en haut), de l'écart de température entre le retour (12) et la distribution (5) du réseau GLN (ΔT_{GLN} ; au milieu) et de l'efficacité frigorifique (en bas); données horaires du 1 ^{er} avril 2010 au 31 mars 2011	225
fig. 9-54 Coûts de revient annuels de l'énergie froid via le réseau GLN pour les quatre scénarios considérés; parts relatives de l'énergie, de l'exploitation et de l'amortissement.....	228
fig. 9-55 Débits d'eau d'arrosage prélevés sur les eaux de retour du réseau GLN; données horaires du 24 mai au 15 juin 2010	230
fig. 10-1 Coûts relatifs du kW_{froid} pour les différents systèmes de climatisations présents en Europe, exprimés en fonction de la densité de la demande	236
fig. 10-2 Répartition des coûts de revient annuels sur 20 ans du réseau de Waikiki (State of Hawaii, 2002).....	240

fig. 10-3 Coût de revient exprimé en CHF de la puissance frigorifique pour trois réseaux hydrothermiques (en bleu); comparaison avec une production classique décentralisée pour l'un d'entre eux (en vert) 244

Liste des tableaux

tableau 3-1 Classification de réseaux de froid en fonction du type d'utilisation de la ressource (MF-eau = condenseur refroidi à l'eau; MF-air = condenseur refroidi à l'air).....	52
tableau 3-2 Caractéristiques énergétiques des réseaux hydrothermiques et de la ressource énergétique; réseaux opérationnels en blanc, réseaux projetés en bleu.....	53
tableau 6-1 Bâtiment connectés au réseau GLN (ou dont la connexion est planifiée).....	70
tableau 7-1 Etude des sous-systèmes en fonction de l'implémentation du réseau GLN	79
tableau 7-2 Mesures en continu; sous-systèmes impliqués et source des mesures	81
tableau 7-3 Mesures mensuelles sur le sous-système « lac » et source des mesures	81
tableau 7-4 Points de mesure sur réseau (coordonnées suisses)	82
tableau 7-5 Coordonnées suisses et profondeur du lac à l'emplacement des bouées de mesure	82
tableau 7-6 Synoptique des mesures de température	84
tableau 7-7 Synoptique des mesures de chlore, de phosphore, de turbidité et de pH.....	84
tableau 7-8 Synoptique des mesures de la turbidité.....	84
tableau 7-9 Synoptique des mesures de courant	85
tableau 7-10 Synoptique des analyses des macrophytes et de la macrofaune benthique	85
tableau 7-11 Points de mesure à la station de pompage.....	87
tableau 7-12 Points de mesure dans les sous-stations	88
tableau 8-1 Caractéristiques limnologiques du Petit-Lac, du Petit-Lac genevois et de la Rade de Genève.....	96
tableau 8-2 Récapitulatif des pics de température de la ressource à 37 m prof. (4); données de 2006 à 2010 au point de pompage	110
tableau 8-3 Définition des trois domaines de l'indicateur de qualité de la ressource, exprimé en fonction d'intervalles de température de la ressource et d'air extérieur.....	113
tableau 8-4 Adéquation de la ressource à 37 m prof. (4) et des températures extérieures (en nombre d'heures); données horaires du 1 ^{er} avril au 30 septembre 2008.....	113
tableau 8-5 $\Delta T_{\text{systèmes}}$, ΔT_{net} et ΔT_{max} ; énergie évacuée via le système pour le trimestre juin- juillet- août (j, j, a) et la saison chaude (avril-septembre); données horaires du 21 avril 2006 au 6 octobre 2010	120
tableau 8-6 Conditions typiques des scénarios des modèles de la dispersion thermique du rejet (14); scénarios ayant potentiellement un important effet thermique, à étudier en priorité (en jaune).....	132
tableau 8-7 pH des eaux du lac et des réseaux Merck-Serono et GLN; GE3 est la référence pour le Petit-Lac pour les mêmes périodes mais à des dates différentes des mesures effectuées (nd, non-disponible).....	136
tableau 8-8 Phosphore dissous ($\mu\text{g/l}$) des eaux du lac et des réseaux Merck-Serono et GLN (nd, non-disponible).....	136
tableau 8-9 Chlore résiduel et total ($\mu\text{g/l}$) dans les eaux des réseaux Merck-Serono et GLN (nd, non-disponible).....	137
tableau 8-10 Temps d'épuisement (exprimé en jours) de la couche-ressource en fonction des débits mobilisables et des lacs-types considérés.....	146
tableau 8-11 Débits mobilisables pour les différents scénarios considérés.....	147

tableau 8-12 Synoptique des potentiels énergétiques et des impacts thermiques pour les scénarios retenus	149
tableau 9-1 Résultats partiels de la simulation pour les trois stratégies de régulation choisies	161
tableau 9-2 Liste des variables et des points de mesure (2007 et 2010)	170
tableau 9-3 Consommation électrique et production de froid des installations de climatisation; consommation électrique globale du bâtiment B1 (compteurs SIG); période du 1 ^{er} avril au 31 mars (années 2005 à 2010)	177
tableau 9-4 Temps de transit entre la station de pompage et la sous station du bâtiment B1	179
tableau 9-5 Estimation de l'énergie délivrée pour les prestations ruban et confort (secondaire) au bâtiment B1; données horaires du 1 ^{er} avril 2010 au 31 mars 2011	183
tableau 9-6 Débits et ΔT moyens (primaire et secondaire) pondérés et non-pondérés par l'énergie lorsque le débit $\neq 0$; données horaires du 1 ^{er} avril au 31 mars 2011	197
tableau 9-7 Scénarios d'approvisionnement pour le datacenter du bâtiments A et l'entrée principale du bâtiment B1; estimation des coûts induits	200
tableau 9-8 Evolution des consommations annuelles d'électricité du quartier et des bâtiments connectés au réseau; données annuelles de 2006 à 2011	211
tableau 9-9 Evolution des consommations annuelles d'eau potable du quartier et des bâtiments connectés au réseau GLN; pluviométrie; données annuelles de 2006 à 2011 (octobre-septembre) ..	212
tableau 9-10 Bilan énergétique des bâtiments connectés du 1 ^{er} avril 2010 au 31 mars 2011	214
tableau 9-11 Economies réalisées grâce à la substitution des machines frigorifiques par le réseau GLN pour la production de froid pour les bâtiments B1, B2 et B3 (1 ^{er} avril 2010 au 31 mars 2011) ..	214
tableau 9-12 Hypothèses retenues pour les scénarios de coût de revient annuel de l'énergie froid via le réseau GLN	227
tableau 9-13 Répartition de l'investissement financier en fonction des postes du réseau GLN.....	227
tableau 9-14 Production d'énergie froid et coût de revient moyen de la puissance de froid concessionnée (kW_{froid}) sur le réseau GLN pour trois des quatre scénarios étudiés.....	229
tableau 9-15 Coût moyen de l'énergie froid via le réseau GLN pour les bâtiments connectés du 1 ^{er} avril 2010 au 31 mars 2011	229
tableau 9-16 Revenus générés par la vente d'énergie froid via le réseau GLN du 1 ^{er} avril 2010 au 31 mars 2011 (exprimés en Kchf).....	230
tableau 10-1 Coûts de revient annuels de la puissance froid installée (RAC, CAC) et concessionnée (réseaux) de différents systèmes de climatisation (Europe: Santamouris M. et al., 2004; Hawaii: State of Hawaii, 2002).....	236
tableau 10-2 EER_{moyens} de quatre installations parisiennes de production classique de froid (Merchat et al., 2009); mesures effectuées en continu durant deux ans	237
tableau 10-3 Comparaison des performances mesurées entre une production centralisée et décentralisée (Poeuf et al., 2010); mesures effectuées durant deux ans	238
tableau 10-4 Coûts annuels de la puissance de froid pour trois réseaux à Hawaii (State of Hawaii, 2002).....	240
tableau 10-5 Efficacité énergétique et diminution des émissions de CO_2 de trois réseaux de froid ...	241
tableau 10-6 Principales propriétés de trois réseaux hydrothermiques commerciaux (non-dédiés) ..	242
tableau 10-7 Coût de revient de l'énergie froid pour trois réseaux hydrothermiques (deux scénarios sont pris en compte pour le réseau GLN).....	243

<i>tableau 10-8 Récapitulatif des potentiels hydrothermiques du Petit-Lac Léman (exprimés en énergie thermique annuelle).....</i>	<i>253</i>
<i>tableau 10-9 Inventaire de l'utilisation de la filière hydrothermique régionale en 2010; état des potentiels déjà mobilisés et encore mobilisables (exprimés en puissance de production moyenne annuelle).....</i>	<i>254</i>

Glossaire

Abréviations

AFVG	agglomération franco-valdo-genevoise
AHU	air handling unit (unité de traitement d'air)
CAC	« centralized air conditioning »: climatisation centralisée
ΔT	différence de température entre deux points
ΔT_{net}	différence de température entre T_{rejet} et $T_{\text{réf 4.5 m prof}}$
ΔT_{utile}	différence de température entre T_{retour} et $T_{\text{distribution}}$ secondaires
$\Delta T_{\text{système}}$	différence de température entre T_{rejet} et T_{pompage} primaires
$\Delta T_{\text{travail}}$	différence de température entre T_{retour} et $T_{\text{distribution}}$ secondaires
$\Delta T_{\text{réseau}}$	ΔT_{GLN} ou ΔT_{MS} : différence de température entre T_{retour} et $T_{\text{distribution}}$ primaire de l'un de ces réseaux
DC	district cooling (réseau de climatisation au niveau d'un quartier)
DLW	deep lake water (eau lacustre profonde)
DLWC	deep lake water cooling (climatisation par pompage d'eau lacustre profonde)
DLWDC	deep lake water direct cooling (climatisation en direct par pompage d'eau lacustre profonde)
DSWC	deep sea water cooling (climatisation par pompage d'eau de mer/océan profonde)
ECS	eau chaude sanitaire
GLN	réseau hydrothermique Genève-Lac-Nations
GLA	réseau hydrothermique Genève-Lac-Aéroport (projet SIG)
GLU	réseau hydrothermique Genève-Lac-Urbain (projet SIG)
Groupe Energie	anc. CUEPE. ISE (Université de Genève)
IEA	International Energy Agency (agence internationale de l'énergie)
IFAF	Institut F. –A. Forel (Université de Genève)
ISE	Institut des Sciences de l'Environnement (Université de Genève)
kWh_{th}	kiloWattheure thermique (énergie chaud ou froid)
kWh_{froid}	kiloWattheure thermique (froid)
kWh_{chaud}	kiloWattheure thermique (chaud)
kWh_{el}	kiloWattheure électrique
MF	machine frigorifique
MS	Merck-Serono
PET	planification énergétique territoriale
RAC	« room air conditioning »: air conditionné décentralisé (p.ex. production dans chaque pièce par un climatiseur individuel)
ScanE	Service cantonal de l'Energie de l'Etat de Genève
SECOE	Service de l'écologie de l'eau de l'Etat de Genève

SIG	Services Industriels de Genève: opérateur énergétique au niveau du canton de Genève (électricité, gaz, eau) et exploitant du réseau GLN
SRE	surface de référence énergétique

Définitions

Boucle fermée / ouverte: ces sont les deux modes possibles de fonctionnement du réseau GLN. En mode ouvert, l'eau pompée dans le lac n'alimente les bâtiments connectés qu'une seule fois avant d'être rejetée dans le lac, tandis qu'en mode fermé, l'eau circule en boucle de manière à pouvoir alimenter plusieurs fois les bâtiments connectés

Coefficient de performance (COP): coefficient de performance pour la production de froid. Il est défini par le rapport entre l'énergie thermique délivrée et l'énergie électrique consommée par la machine frigorifique. Généralement fourni par les fabricants, il est mesuré dans des conditions de fonctionnement à puissance nominale

Courbe de charge: puissances horaires d'une période définie, généralement une année, qui sont classées par ordre croissant/décroissant

Efficacité énergétique (EER): « energy efficiency ratio », ou coefficient d'efficacité frigorifique, C'est un coefficient de performance (COP) mesuré dans les conditions de fonctionnement réelles durant une saison (sEER) ou durant une année (EER). Il peut s'appliquer à une seule machine frigorifique (production décentralisée) ou à l'ensemble du réseau (pompage et transformation)

Épilimnion: couche supérieure d'une masse d'eau stable (p. ex. lac) en contact avec l'atmosphère et qui emprunte les caractéristiques thermiques: sa température varie au gré des saisons

Fosse lacustre: zone d'un lac dans laquelle la colonne d'eau est la plus profonde, par opposition à la zone riveraine (ou beine lacustre), peu profonde, située en bordure du plan d'eau

Hypolimnion: couche inférieure d'une masse d'eau stable (p. ex. lac) plus ou moins épaisse et isolée de l'atmosphère. C'est donc une couche d'eau de température relativement froide et constante, située sous la thermocline, qui n'est pas directement influencée par ce qui se passe en surface du plan d'eau

Macrofaune benthique: il s'agit de l'ensemble des animaux benthiques vivant sur ou près du substrat du fond d'un milieu aquatique, dont la taille est supérieure à un millimètre, c'est-à-dire une taille suffisante pour être facilement distingués à l'oeil nu

Macrophytes: ce sont des plantes aquatiques de grande taille (par opposition au phytoplancton et aux algues de petite taille). Ils rassemblent les macroalgues additionnées des herbiers de phanérogames. Ils constituent donc l'ensemble des végétaux visibles à l'oeil nu

Métalimnion (voir thermocline): zone intermédiaire d'une masse d'eau stable (p. ex. lac) où la température décroît rapidement avec la profondeur

Pic de température: pour la ressource lacustre considérée (réseau GLN), ce sont des événements durant lesquels la température devient supérieure à 9°C

Plume thermique: c'est la zone de mélange entre l'eau rejetée par une installation et celle du cours d'eau ou plan d'eau récepteur. La plume s'étend en aval du point de rejet aussi loin que l'influence du rejet est perceptible

Potentiels théoriques: ce sont les potentiels énergétiques (thermiques) maximums que le Petit-Lac Léman offre. Ils sont basés sur les quantités maximums d'énergie que l'on pourrait tirer des volumes de lacs considérés, sans tenir compte de contraintes environnementales

Potentiels acceptables: ce sont les potentiels énergétiques (thermiques) réalistes que le Petit-Lac Léman offre. Ils sont bien inférieurs aux potentiels théoriques et sont basés sur la minimisation des impacts environnementaux et de l'hydrologie locale (stratification thermique)

Puissance nominale: c'est la puissance continue maximum qu'un système de production/distribution d'énergie peut délivrer, de par sa conception et dans des conditions d'opérations normales et définies

Puissance installée: c'est la puissance maximum qu'un système de production / distribution installé pourrait délivrer dans des conditions standards (indication des fabricants)

Puissances de pointe: dans une courbe de charge (*cf. ci-dessus*), il s'agit de l'ensemble des puissances horaires qui sont les plus élevées. Elles concernent souvent un très faible nombre d'heures durant la période considérée

Puissance concessionnée: pour le réseau GLN, il s'agit de la puissance maximum qu'un utilisateur a contractée auprès de l'exploitant. Elle s'exprime par un débit primaire maximum que l'utilisateur peut demander avec un écart de température entre les eaux de retour et distribuées de 5°C

Prestation de confort: dans le cas d'une prestation énergétique de climatisation, il s'agit d'une prestation destinée à assurer un confort thermique aux utilisateurs de locaux fermés (p.ex. bureaux, salles de conférences), dont la demande est généralement fonction des conditions climatiques et de la variation des charges internes (lumières, nombre d'occupants, etc.); l'intensité de cette prestation varie au gré des saisons

Prestation de ruban: dans le cas d'une prestation énergétique de climatisation, il s'agit d'une prestation destinée à rafraîchir de locaux fermés (p.ex. bureaux, salles de conférences), dont la demande n'est dépendante que des charges internes et généralement indépendante des conditions climatiques: elle est plus ou moins constante au cours de l'année et concerne surtout des locaux techniques (datacenter, chambre froides, production industrielle, etc...)

Production centralisée/décentralisée: une production d'énergie (thermique, électrique) peut s'effectuer de manière locale chez chacun des consommateurs (décentralisée) ou de manière centralisée avant d'être distribuée à chaque consommateur par le biais d'un réseau (p. ex. GLN)

Relation puissance/énergie relative: c'est une relation entre le pourcentage d'énergie et le pourcentage de puissance qui sont classée par ordre croissant/décroissant. Elle s'exprime pour une période définie, généralement une année

Seiche lacustre (onde interne): onde de déplacement se produisant au sein d'une masse d'eau dont la densité varie en fonction de la profondeur (p. ex. en fonction de la température). La variation de densité peut être soit brusque le long d'une surface de discontinuité (interface), soit relativement graduelle

Signature froid: c'est une relation qui caractérise la demande en énergie froid d'un bâtiment au cours d'une période représentative. Elle exprime la distribution de la puissance de froid en fonction de la température extérieure (en kW/°C)

Simultanéité: c'est un indicateur utilisé pour la gestion d'un réseau (p. ex. GLN). Il est défini comme le rapport instantané entre le débit primaire mesuré sur le réseau et le débit maximum théorique de ce dernier (s'applique aussi à la charge thermique)

Thermocline (voir métalimnion): couche d'eau d'un lac (p. ex.) dont la température diminue rapidement avec la profondeur. Elle constitue une ligne de partage de masses d'eau en fonction de la température et se traduit par une inflexion brutale de la température à la frontière entre une masse d'eau profonde et froide (hypolimnion), et une masse d'eau superficielle plus chaude (épilimnion)

1 Introduction

L'eau, ressource indispensable pour chaque être vivant, est également depuis longtemps exploitée pour un grand nombre d'activités humaines (fig. 1-1). Ses écosystèmes contribuent à la santé et au bien-être (régulation du microclimat, espaces de détente et de loisirs, patrimoine naturel et culturel), offrent une valeur d'existence et de legs de la diversité naturelle indépendamment de leur utilisation, mais sécurisent également le territoire (protection des crues grâce aux zones de retenue ou inondables). Ces écosystèmes sont à la base de nombreuses prestations économiques, dont les principales sont l'approvisionnement naturel en eau potable, l'agriculture, la production d'énergie, le tourisme, la pêche, la réduction et le stockage de résidus et de déchets, en constituant aussi de précieuses ressources génétiques. Les cours d'eau et lacs jouent donc un rôle structurant dans l'établissement des communautés humaines et le déploiement des activités nécessaires à la vie de nos sociétés.

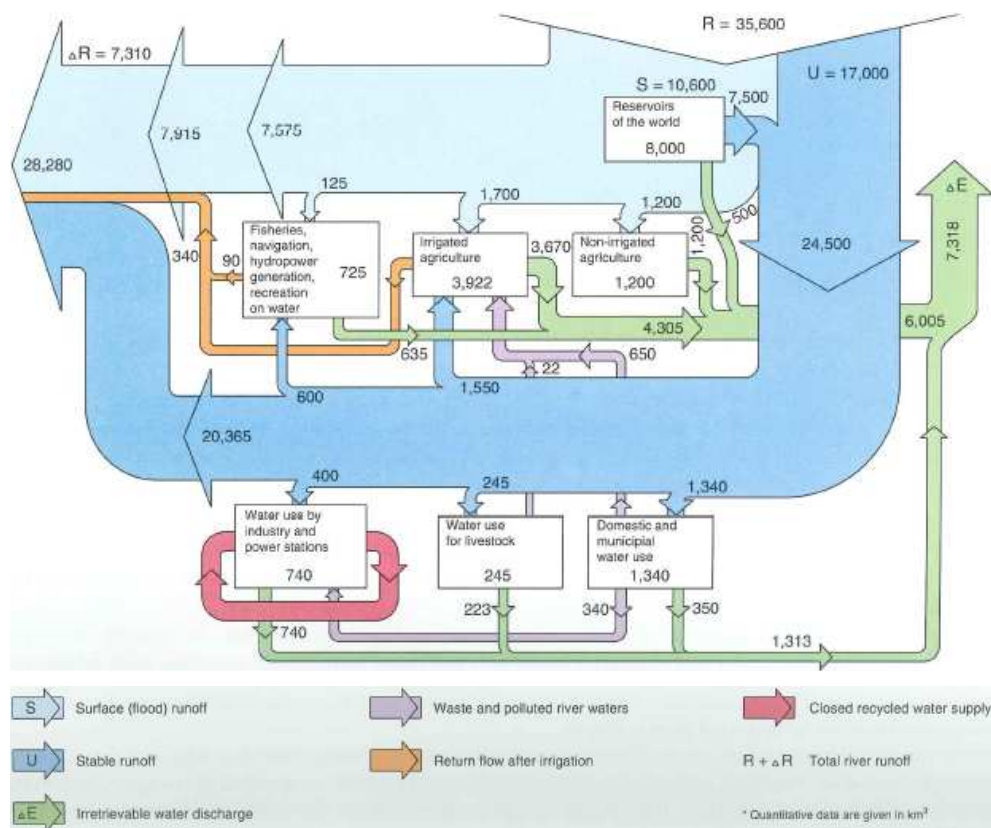


fig. 1-1 Bilan des flux d'eau au niveau mondial (Cooper, 1990)

L'usage de l'eau est donc fondamental dans de nombreuses filières de production d'énergie. Dans la région de l'arc alpin, la puissance hydraulique est depuis longtemps exploitée comme source d'énergie mécanique. Depuis le XX^{ème} siècle, elle est également intensivement exploitée pour la production d'électricité. En revanche, l'exploitation de l'eau pour la production d'énergie « froid » est quantitativement bien moins significative: utilisés pour la production de glace jusqu'au début du XX^{ème} siècle, les quelques glaciers suisses alors exploités ont rapidement été abandonnés avec l'apparition de l'électricité, car elle permet de produire, stocker et distribuer bien plus simplement l'énergie froid. Ainsi, les nouvelles technologies recourant à l'électricité pour la production d'énergie thermique (p.ex. compresseur pour le froid) ont rapidement évincé toute valorisation thermique de sources froides naturellement disponibles dans notre environnement proche (rivières, lacs, glaciers). Ce n'est que depuis quelques années que les lacs et rivières sont à nouveau exploités pour la

production d'énergie thermique. Ce regain d'intérêt pour ces ressources renouvelables est intimement lié à la complexification du contexte énergétique, qui se durcit en parallèle à l'augmentation continue de la consommation énergétique depuis les années 1950.

Face à la situation énergétique actuelle au niveau international et national, de nombreuses agglomérations réorientent leur politique énergétique vers une diminution de la dépendance d'énergies non-locales et une utilisation plus rationnelle et économe des énergies (fossiles et renouvelables). Dans ce sens, la multiplication de systèmes classiques de climatisation, très gourmands en électricité et souvent peu rationnels, ne représentent donc pas une alternative durable; en revanche, une planification coordonnée des réseaux thermiques (froid et chaud) au niveau des agglomérations permet de mieux maîtriser la demande et de planifier le développement des filières thermiques de manière synergique, tout en apportant des avantages certains sur la gestion de l'approvisionnement électrique.

Les systèmes hydrothermiques, qui appartiennent à la grande famille des réseaux thermiques, en sont donc des représentants très intéressants, car ils présentent à la fois des potentiels importants, des propriétés avancées de rationalité énergétique et de sobriété environnementale. L'étude du système hydrothermique genevois (réseaux Merck-Serono « MS » et Genève-Lac-Nations « GLN ») proposée dans ce travail a pour but de poser les premiers jalons permettant d'appréhender ce type de système dans sa globalité. Le développement d'aspects méthodologiques et d'outils nécessaires à l'étude de ce système complexe et innovant en a constitué l'étape primordiale, à partir de laquelle les différents sous-systèmes impliqués ont pu être abordés plus en détail.

De nature interdisciplinaire et faisant appel à des disciplines complémentaires et variées allant des sciences de l'environnement, de la biologie, de la chimie, de la physique, de l'économie jusqu'aux sciences de l'ingénieur, le retour d'expérience holistique proposé ici se veut être la synthèse des études menées et des connaissances acquises par le Groupe Energie (Institut Forel- ISE), ainsi que des pratiques les plus récentes en la matière. De cette manière, l'étude fouillée des quatre sous-systèmes impliqués (lac, réseau, bâtiments et quartier) et surtout de leurs interconnexions, contribuent à la fois à la compréhension générale de ces « nouveaux » systèmes énergétiques et à leur développement/intensification dans la région genevoise et en général.

Bien que tenant compte des principaux paramètres impliqués, ce travail ne constitue toutefois que la première pierre à l'étude interdisciplinaire des systèmes hydrothermiques. La relative jeunesse et le fort développement qui leur est promis exigent l'implication de nombreux acteurs et la volonté et la patience d'acquérir les connaissances nécessaires à la compréhension de leurs nombreuses contraintes et implications. La mise sur pied par le Groupe Energie d'une formation continue spécifiquement destinée aux ingénieurs actifs dans ce projet a d'ores et déjà permis de répondre partiellement à ce défi.

Sans apporter de réponse définitive en la matière, ce travail fait donc le tour des aspects majeurs qui déterminent le succès, ou non, de tels systèmes, en termes énergétiques, environnementaux et économiques. Notons tout de suite que l'étude proposée se focalise principalement sur le réseau GLN depuis sa phase de projet jusqu'à l'analyse de ses deux premières années de fonctionnement; le réseau Merck-Serono n'est pris en compte que pour les points nécessaires à la compréhension globale du système énergétique.

2 Les trois périodes de la production de froid

L'énergie froid est exploitée depuis longtemps, mais ce n'est finalement que depuis quelques années que des ressources renouvelables sont à nouveau valorisées pour des prestations variées de climatisation. Le court aperçu historique présenté ci-dessous permet de mieux cerner l'évolution parallèle des besoins et des moyens de production relatifs mis en œuvre.

A/ Le froid naturel: usages préindustriels

L'homme s'est rapidement rendu compte que les denrées périssables pouvaient se conserver dans de bien meilleures conditions l'hiver que l'été, c'est-à-dire à plus basse température (IIF, 2006; Thévenot, 1978). L'utilisation de mélanges réfrigérants (sels et eau, salpêtre) et du froid naturel est apparue très tôt et s'est poursuivie jusqu'au XX^{ème} siècle, durant lequel le marché de la glace était encore plus important que celui de la glace artificielle. La glace était obtenue de trois manières:

1. production naturelle, pratiquée par les civilisations grecques et égyptiennes, le rayonnement thermique de bassins largement ouverts vers le ciel permettait de produire durant la nuit une fine pellicule de glace,
2. extraction discontinue de plans d'eau gelés en hiver,
3. extraction permanente dans des régions froides et transport sur de longues distances.

Avant l'invention de la machine frigorifique, la glace naturelle et l'utilisation de sites frais (grottes, glaciers) étaient donc utilisées pour la conservation des aliments. La glace des glaciers a donc été longtemps exploitée comme matière première. Au XIX^{ème} siècle, l'arrivée des chemins de fer dans les Alpes a permis le développement de l'industrie de la glace et l'approvisionnement de grandes villes européennes.

Pendant cette période de la fin du Petit Age Glaciaire, cette exploitation s'est particulièrement développée au glacier du Trient (1865-1896), alors en pleine crue: bien que les ouvriers fissent reculer le glacier d'un mètre par jour, il regagnait le terrain perdu pendant la nuit, garantissant ainsi un renouvellement constant des ressources en glace¹. En 1865, M. Robatel obtient l'autorisation exclusive d'exploiter la glace du Trient. Une trentaine d'ouvriers établissent les forages, séparent les blocs à l'aide de poudre noire, les façonnent uniformément et les lancent à l'aide de « grespils » (longs bâtons armés d'un crochet de fer) sur une « rize » (canal en mélèze) dans laquelle ils glissent pour atterrir dans un réservoir couvert de branches de sapin. En 1883, une voie Decauville (chemin de fer à voie très étroite) est établie et permet le transport de la glace jusqu'au col de la Forclaz (env. 3 km). Depuis là, 10 à 15 gros chariots transportent quotidiennement par la route jusqu'à la gare de Martigny 20 à 30 tonnes de glace. Un train par semaine relie Lyon, Paris et Marseille².

L'invention de machines de production artificielle de glace en 1893 provoquera en 1896 la faillite de cette activité industrielle sur le glacier du Trient. Cette activité a toutefois résisté plus longtemps au Tessin: Milan et Turin ont été approvisionnées en glace jusqu'à la fin des années 1910 par la société « La Cristallina », créée en 1897, qui exploitait la glace du glacier le plus méridional du Tessin, le Ghiacciaio di Basso. La fin de la première guerre mondiale

¹ www.unifr.ch/geoscience/geographie (mai 2011)

² www.trient.ch (mai 2011)

sonna le glas de l'exploitation de la glace naturelle, car la reprise industrielle a permis un développement massif de la production de machines frigorifiques¹.

En hiver, cette glace était disposée dans des glaciers afin d'en disposer pendant la saison chaude. Simple excavation naturelle utilisée vraisemblablement dès la préhistoire, la glacière devient pendant l'Antiquité un bâtiment architectural de forme variable, au gré des particularités régionales. Quel que soit son type, trois éléments la composent obligatoirement: une cuve (maçonnée ou en bois) équipée d'un puisard ou d'une conduite destinée à évacuer les eaux de fusion, un couvrement et une porte orientée vers le nord, équipée d'un ou plusieurs sas.

B/ L'âge d'or de l'industrie du froid artificiel

Il existe deux grandes classes de systèmes frigorifiques: les systèmes thermo-frigorifiques (dont les machines à absorption) et mécano-frigorifiques (machines à compresseur), qui sont les plus déterminants dans l'apparition de la production artificielle de froid. C'est au XIX^{ème} siècle, grâce à l'approfondissement des connaissances en thermodynamique, que les premières machines frigorifiques verront le jour.

Les systèmes à compression de vapeurs liquéfiables seront de loin les plus répandus: le frigorigène se vaporise dans un évaporateur en produisant le froid utile; cette vapeur utile est aspirée et comprimée par un compresseur mécanique, puis refoulée dans un condenseur où elle se liquéfie; finalement, le liquide formé retourne vers l'évaporateur en traversant un détendeur (description de ce principe en 1805 par l'Américain O. Evans). En 1835, son compatriote J. Perkins fabrique le premier prototype qui fonctionne à l'éther éthylique. Les premiers succès industriels apparaissent vers 1855 avec les machines développées par l'Ecossais James Harrison (toujours à l'éther éthylique).

En 1858, le Français C. Tellier bouleverse le monde moderne avec la création de sa première machine frigorifique à ammoniac liquéfié, pour la production du froid à usage domestique et industriel. Constamment améliorée, cette technologie finit par équiper la flotte marchande internationale: en 1876, le navire *Le Frigorifique* parti de Rouen rapporte de la viande à Buenos Aires en bon état de conservation après 105 jours passés en mer².

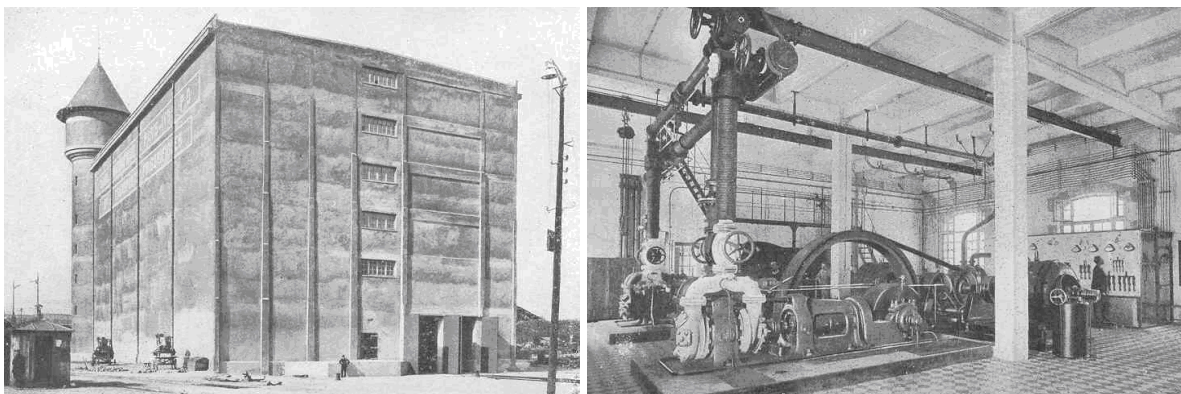


fig. 2-1 Entrepôt frigorifique de la gare Paris-Ivry (à gauche) et ses compresseurs à ammoniac (à droite)
(photos: C. Sulzer)

¹ www.wikipedia.org

² <http://froid.bosserville.free.fr/histoire.htm> (mai 2011)

A partir de là, tant l'évolution des fluides frigorigènes que celle des composants des systèmes de compression évoluent rapidement (*Thévenot, 1978*):

- fluides: outre le chlorure de méthyle utilisé jusque dans les années 1960, l'entreprise *Frigidaire Corporation* dirigée par T. Midgley met au point en 1930 de nouveaux fluides frigorigènes non toxiques et non inflammables à base d'hydrocarbures fluorés. Le premier CFC, le R12 (CF_2Cl_2), apparaît en 1931, puis le premier HCFC, le R22 (CHF_2Cl) en 1934, et en 1961 le premier mélange azéotropique, le R502 (R22/R115). En 1974, F.S. Rowland et M.J. Molina, prix Nobel Américains, montrent l'action néfaste du chlore sur la couche d'ozone stratosphérique. Le protocole de Montréal (1987) puis celui de Kyoto (1997) réglementent et interdisent progressivement l'utilisation des CFC et HCFC. Bien que les HFC purs ou mélangés soient actuellement les fluides les plus utilisés, des fluides « naturels » (ammoniac, CO_2 , eau, hydrocarbures) font leur retour malgré une utilisation plus contraignante,
- mécanique: les compresseurs à pistons lourds de la fin du XIX^{ème} siècle, lents et encombrants (*fig. 2-1*), ont fait place en moins de cent ans à des machines rapides et légères. De nouveaux types de machines sont successivement apparus: compresseur à vis bi-rotor (1934) puis mono-rotor (1967), compresseur scroll (années 1970) puis centrifuges (turbo) quelques années après. En parallèle, les autres composants des machines frigorifiques (condenseur et évaporateur) s'améliorent et s'allègent.

La production de froid artificiel a joué un rôle fondamental dans l'amélioration des conditions de vie de nos sociétés humaines: initialement réservée à la conservation des aliments périssables à de basses températures (réfrigération, congélation), cette production énergétique a permis des progrès sanitaires significatifs à l'aube du XX^{ème} siècle. Confidentielles jusqu'à la deuxième guerre mondiale, les quantités d'énergie de froid produites artificiellement explosent à partir des années 1950: ses applications se diversifient et se multiplient, tant dans les domaines industriels, commerciaux que pour des usages privés, notamment du fait de la modification radicale un peu partout dans le monde des modèles de comportements humains et de mode de vie liés au confort (*Lachal, 2003*). L'acclimatation à la chaleur a en effet lieu sur le plan physiologique, mais également sur son acceptation physiologique et l'ajustement des comportements. Les concepts contemporains de confort deviennent très astreignants et transforment la manière dont on rafraîchit les maisons et influencent où et avec qui on passe du temps (*la Revue Durable n° 9, 2004*). Facilitée par les bas coûts de l'énergie, ces technologies sont peu à peu devenues incontournables et intrinsèquement génératrices de nouveaux usages: durant les trente glorieuses, la prospérité des pays occidentaux, un accès aux ressources considérées comme illimitées et la création de puissantes filières énergétiques ont constitué des conditions cadres idéales pour articuler la production de froid autour de ces seules technologies classiques.

C/ L'intégration des connaissances: retour au froid naturel

Dénommé « froid frivole » au début du XX^{ème} siècle, ce froid de confort alors réservé à une certaine élite s'est démocratisé au cours de ces dernières décennies et a conduit à une véritable explosion de la production (*Santamouris et al., 2004*). Ce développement unilatéral et l'exploitation jusqu'au-boutiste de la technologie appartenant à la filière industrielle du froid artificiel, s'accompagne d'un cortège de problématiques de moins en moins négligeables: au regard du réchauffement climatique pressenti, de la diminution des ressources fossiles et des menaces pesant sur l'environnement, cette approche pèse lourdement sur la consommation d'électricité (systèmes peu efficaces, gaspillages) et menace de mettre les systèmes productifs à très rude épreuve.

Pourtant, sous les latitudes tempérées, les sources froides de l'environnement naturel aquatique (lacs, rivières, nappes phréatiques, etc.) sont abondantes et accessibles. Elles pourraient facilement être valorisées pour des usages thermiques, en substituant la production de froid jusque-là artificielle par l'exploitation de cette ressource calorifique, « gratuite » et renouvelable, par l'intermédiaire de systèmes hydrothermiques. Malgré ces dispositions favorables de notre environnement, seules quelques institutions pionnières, privées ou publiques, exploitent ce type de systèmes depuis plusieurs années voire décennies (*cf. chap. 3.4*); leur implantation à large échelle est encore balbutiante, mais ils représentent à la fois des potentiels très importants et des caractéristiques plus qu'intéressantes (*cf. chap. 10*).

Ce type de système ne constitue pas une modification radicale de la technologie nécessaire pour l'approvisionnement en froid, mais plutôt une valorisation des connaissances en ingénierie thermique et civile, repositionnées dans une perspective de mise en valeur des ressources renouvelables locales. Apparue ces dernières années, l'intensification de leur « renaissance » est étroitement soumise à des impulsions initiées par différents types de collectivités. Dépendantes d'un contexte politique favorable en matière de politique énergétique dynamique et ouverte à l'innovation, ces impulsions sont nécessaires et doivent être fortes et volontaires.

3 Systèmes hydrothermiques

Selon la définition donnée par *Littre (1874)*, l'adjectif hydrothermique signifie « *qui a un rapport à l'eau et à la chaleur* ». Dans le contexte de cette étude, un système hydrothermique constitue l'ensemble des installations nécessaires à l'exploitation thermique¹ des eaux terrestres ou côtières ainsi que les bâtiments au bénéfice de la prestation.

3.1 Typologie

Il existe de nombreux types de systèmes hydrothermiques. Ils peuvent varier en fonction des paramètres suivants:

- compartiment d'eau utilisé: eaux profondes ou hypolimniques (lac, mer, océan) dont les températures sont basses et stables. Eaux de surface (lac, mer, océan, rivière) dont les températures suivent l'évolution de la température extérieure,
- prestation envisagée: l'eau pompée peut être utilisée exclusivement pour un usage énergétique: climatisation et/ou chauffage, mais aussi évacuation de chaleur fatale (activités industrielles, production d'énergie, installation de traitement de déchets, etc.). Ces usages peuvent aussi être couplés à une valorisation matière (eau potable, eau brute pour l'arrosage, remplissage de plans d'eau, etc.),
- conception de l'infrastructure: selon les besoins, le système peut être composé d'une ou plusieurs boucles de circulation; les échangeurs de chaleur peuvent être centralisés ou non. Le système peut donc être de type ouvert ou fermé: s'il est ouvert, l'eau lacustre pompée n'est valorisée thermiquement qu'une fois avant d'être rejetée (échangeurs de chaleurs décentralisés et placés dans chacun des bâtiments connectés); s'il est fermé, les échangeurs de chaleurs sont centralisés (p. ex. à la station de pompage) et l'eau de la boucle de distribution aux bâtiments est toujours la même,
- bâtiments connectés: ils peuvent être existants, déjà équipés d'installations de production d'énergie thermique qui doivent être adaptées, ou neufs, équipés de systèmes techniques conçus spécifiquement pour être alimentés par le système hydrothermique,
- gestion: le réseau peut être géré par un exploitant privé ou public, dédié ou non à un ou plusieurs preneurs d'énergie.

En fonction de la manière dont elle est utilisée dans le système de production, l'eau peut constituer:

1. un puits énergétique: pour ces systèmes, l'énergie froid est produite par une machine frigorifique. La source froide, généralement l'air extérieur, dans laquelle est déversée la chaleur excédentaire liée au système productif est substituée par le compartiment eau. C'est l'emplacement du système ainsi que diverses contraintes² qui dictent la possibilité de recourir à l'un ou l'autre de ces compartiments « eau »,

¹ A travers le monde, il existe quelques installations de production électrique hydrothermique (chaleur extraite utilisée pour la production d'électricité): ces systèmes ne sont pas abordés dans cette étude. Certains d'entre eux captent directement la chaleur d'eaux chaudes souterraines (caldeira de Long Valley, Californie) tandis que d'autres exploitent la différence de température entre des eaux tièdes de surface et des eaux froides profondes (systèmes de type « OTEC, Ocean Thermal Energy Conversion »: projets pilotes en Polynésie Française et à la Réunion)

² Installations techniques, occupation du sous-sol, aspects financiers, efficacité énergétique, contraintes légales

2. une ressource énergétique: pour ces systèmes, une production d'énergie froid par des machines frigorifiques est en partie¹ ou totalement substituée par la ressource renouvelable « eau »; une production d'énergie chaud par une installation standard (chaudière) peut également l'être (extraction d'énergie via une pompe à chaleur). Selon la prestation énergétique envisagée et la typologie du bâtiment, l'un ou l'autre des compartiments « eau » est plus ou moins bien adapté. Le système hydrothermique GLN - Merck-Serono appartient à cette deuxième catégorie: elle sera la seule étudiée ci-dessous.

3.2 Nomenclature

Les systèmes hydrothermiques sont nommés comme suit:

- LWC (lake water cooling): cette catégorie regroupe les systèmes utilisant l'eau de surface ou profonde comme puits et/ou ressource énergétique: le niveau de température de l'eau distribuée est maintenue et/ou abaissé via une machine frigorifique,
- DLWC (direct lake water cooling): cette catégorie regroupe les systèmes utilisant l'eau profonde lacustre comme ressource énergétique « en direct », sans machine frigorifique ou seulement lorsque cela est nécessaire,
- DSWC (direct sea water cooling): cette catégorie regroupe les systèmes utilisant l'eau profonde de la mer/océan comme ressource énergétique « en direct ».

3.3 Principe de fonctionnement

Dans le cas d'une utilisation de l'eau en tant que ressource énergétique, un système hydrothermique est constitué de l'ensemble des installations nécessaires à l'exploitation énergétique thermique des eaux terrestres et côtières (fig. 3-1). Le but est d'approvisionner en énergie thermique tout bâtiment connecté à son réseau.

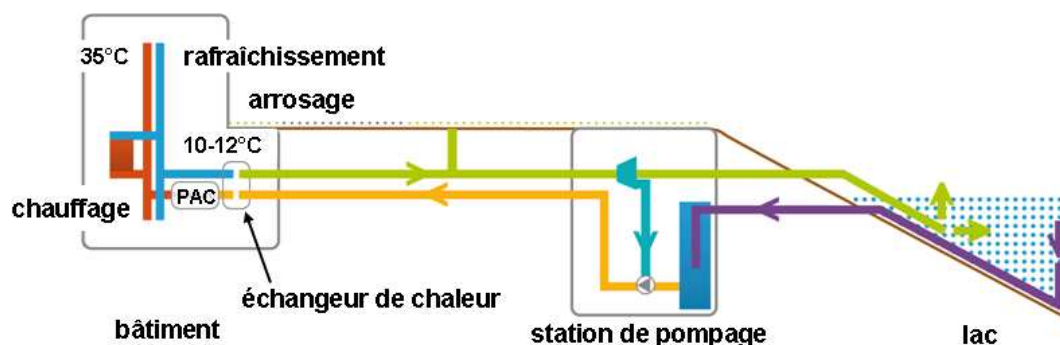


fig. 3-1 Principe de fonctionnement d'un système hydrothermique lacustre pour la production de froid et de chaud (source: SIG)

L'eau lacustre est pompée dans l'hypolimnion (couches profondes) où la température de l'eau est généralement basse et stable. Elle est amenée via une conduite jusqu'à une station de pompage d'où elle est distribuée à travers un réseau terrestre jusqu'aux sous-stations des bâtiments connectés, où un échangeur de chaleur transfère l'énergie thermique entre le réseau de distribution du bâtiment et le réseau d'eau lacustre (primaire).

¹ Dans le cas d'un recours partiel à une machine frigorifique, le compartiment « eau » devient à la fois ressource et puits énergétique

Pour la prestation froid, l'eau peut être distribuée soit en direct (pas de garantie sur le niveau de température de distribution) ou indirectement après être passée au-travers d'une machine frigorifique (fig. 3-2). Généralement, un échangeur secondaire, placé en aval de l'échangeur primaire, se substitue aux tours aéro-réfrigérées.

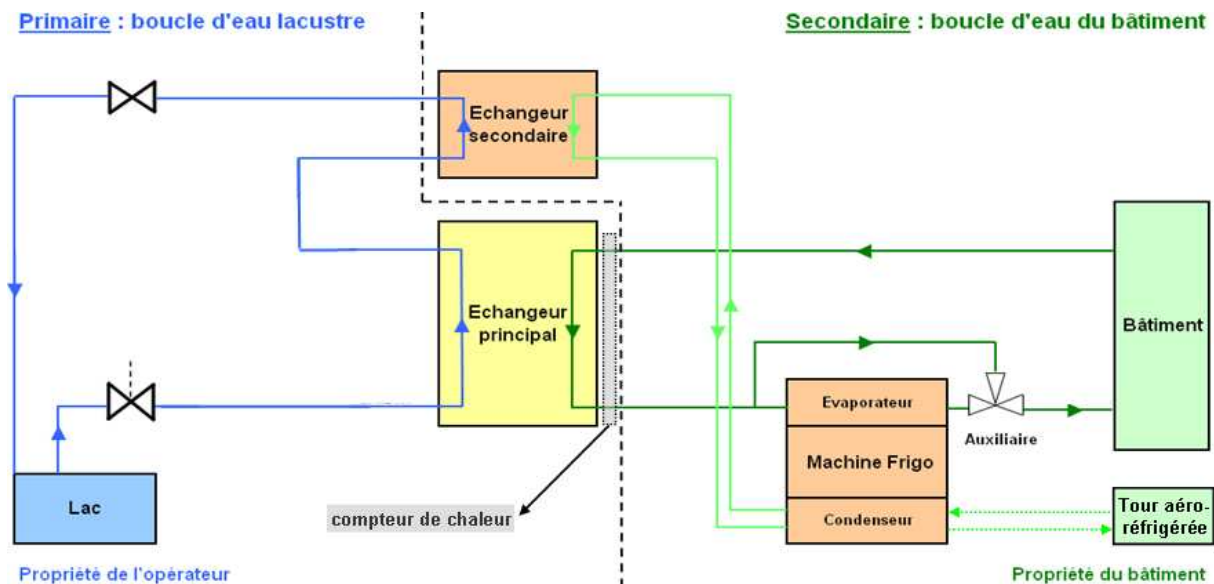


fig. 3-2 Principe de fonctionnement d'un système hydrothermique de type ouvert pour la production de froid

3.4 Diversité des projets et réseaux existants

A l'heure actuelle, il n'existe pas de système strictement similaire au système GLN – Merck-Serono. En effet, l'utilisation d'eau lacustre à des fins thermiques est une technologie naissante et les systèmes existants ont tous leurs caractéristiques propres.

Les réseaux de froid peuvent être classifiés en trois catégories principales en fonction de leur type d'implémentation (Santamouris et al., 2004):

- réseaux « traditionnels »: ce sont pour la plupart les réseaux les plus anciens. Leur construction a été planifiée et réalisée en même temps que l'édification du quartier administratif qu'ils approvisionnent. Leur réalisation dépend d'une forte volonté politique et d'une forte densité de la demande. Les réseaux de La Défense (Paris) et de Stockholm (Suède) en sont de bons exemples, de même que le réseau des bâtiments du site Nestlé (Vevey),
- opérations commerciales: ce sont des réseaux plus récents, aménagés dans des quartiers existants sur la base de décisions volontaires de planification. Ils sont initiés sur la base d'opportunités économiques et de nombreuses exigences environnementales, énergétiques, esthétiques, sanitaires et de communications. Réseaux typiques: Climespace (Paris), Toronto (Canada), Université de Cornell (Etats-Unis), Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, GLN, Versoix-centre et Neuchâtel (Suisse), Hawaii et Hôtel Intercontinental (Tahiti),
- une troisième catégorie, les réseaux multi-ressources, sont pour le moment peu représentés. Ils sont basés sur une gestion concertée des flux thermiques (chaud et froid) couplée à une production d'électricité (trigénération délocalisée). Cette catégorie représente une opportunité intéressante pour le développement de réseaux intégrant les rejets thermiques d'activités industrielles et des preneurs d'énergie chaud et froid. Le réseau de Göteborg (Suède) est basé sur ce principe. Durant la saison chaude, l'excédent de chaleur d'une

usine d'incinération et d'une raffinerie est valorisé en énergie froid via des machines de frigorifiques à absorption. Une production d'électricité étant également effectuée, ce système s'intègre dans une perspective globale thermoélectrique de la gestion énergétique au niveau du quartier (Faessler, 2011). De plus, cette modularité favorise sa viabilité économique.

Parmi les systèmes utilisant une ressource lacustre profonde pour des prestations de froid en direct, les réseaux de l'Université de Cornell, du centre-ville de Toronto et de Stockholm sont détaillés ci-dessous (tableau 3-1). A la différence du système genevois dont la boucle primaire est ouverte, les réseaux de Toronto et Cornell sont fermés. Par contre, le réseau de Stockholm est, de ce point de vue, très similaire au réseau genevois.

	dédié	non-dédié
ouvert	<u>installations sur le Rhône urbain</u> ¹ : MF-eau _{surface} <u>EPFL</u> : MF-eau _{profonde}	<u>GLN, Stockholm</u> : froid direct-eau _{profonde} , MF-eau _{profonde} , PAC-eau _{profonde} (chaud)
fermé	<u>Cornell</u> : froid direct-eau _{profonde} <u>bâtiments avant connexion à GLN</u> : MF-air <u>systèmes classiques</u> : MF-air	<u>Toronto</u> : froid direct + MF-eau _{profonde} <u>Climespace</u> (Paris): froid direct-eau _{surface} , MF-eau _{surface} , MF-air <u>La Défense</u> (Paris): réseau froid MF-air, réseau chaud en parallèle (chaufferie fossile)

tableau 3-1 Classification de réseaux de froid en fonction du type d'utilisation de la ressource (MF-eau = condenseur refroidi à l'eau; MF-air = condenseur refroidi à l'air)

Le réseau parisien de La Défense est également mentionné ci-dessus: bien que n'utilisant pas une ressource hydrothermique, il est représentatif d'un réseau « traditionnel » de froid classique (production via machine frigorifique). Pour les autres, soit il existe peu d'informations disponibles (p. ex. problèmes de confidentialité) ou pertinentes, soit ils sont trop différents.

Le tableau 3-2 ci-dessous résume les caractéristiques énergétiques principales des réseaux décrits dans les pages suivantes (en opération et projetés):

	type de système	P _{froid} [MW] _{nom}	E _{froid} [GWh]	nbre h/an équ. P _{froid nom}	surface rafraîchie [m ²]	T _{ressource} [°C]	prof _{ressource} [m]
GLN	DLWC	15.7	19.5	1'250	~ 840'000	6-9	37
Versoix-Centre		3.5	1.8	500	60'000	6-8	50
Cornell		71	106	1'500	1'200'000	4	76
Nestlé		8	-			6	70
EPFL		4.8					
Toronto	LWC	363, dont 60 du lac	180	500	3'200'000	4-5	83
ClimEspace		236	450	2'000	-	5 / T _{surface}	- / rivière
Stockholm	DSWC	60	-				6

¹ Bien que n'étant pas réellement des réseaux de froid (prise et rejet d'eau dans le Rhône dédiés à un seul bâtiment), ils sont présentés pour les comparaisons effectuées dans la suite de ce travail

Honolulu Hawaii	DSWC	18.4	80	4'300	-	8	521
Intercontinental Bora-Bora		1.6	-	4'000		5	930
Neuchâtel	DLWC	6.7	10.5	1'500		7	40
GLA (Genève)		160	160	1'000		6-8	50

tableau 3-2 Caractéristiques énergétiques des réseaux hydrothermiques et de la ressource énergétique; réseaux opérationnels en blanc, réseaux projetés en bleu

3.4.1 Réseaux en opération

Parmi les réseaux cités, tous présentent des similitudes avec le réseau GLN. Toutefois, tous ont des particularités propres qui méritent d'être mises en évidence. Hormis de nombreux réseaux de froid classique (production par machine frigorifique) qui utilisent les eaux de surface comme source froide pour le refroidissement des condenseurs, les systèmes hydrothermiques pompant de l'eau lacustre profonde (LWC) pour le même usage sont bien moins nombreux. Les réseaux peuvent être de petite taille (généralement dédiés à un seul preneur) ou plus conséquents (souvent à l'échelle d'un quartier ou d'un centre-ville).

La liste ci-dessous n'est pas exhaustive.

3.4.1.1 En Suisse

A/ Versoix-Centre (Genève, Lac Léman)

Il s'agit d'un réseau lacustre non-dédié. Implanté en 2009, il atteindra sa pleine capacité en 2013. L'eau est pompée à 50 m prof. (600 m³/h nominal) et rejetée dans la rivière La Versoix. Il assure des prestations de chauffage (6.6 GWh/an) et de climatisation en direct (1.8 GWh/an) pour environ 60'000 m² de bâtiments à basse consommation (Conti, 2010; Chenal, 2008).

B/ Nestlé (Vevey, Lac Léman)

Le siège mondial de la multinationale Nestlé est équipé d'un réseau frigorifique dédié de 8 MW (bureaux et datacenters), dont le pompage est situé à 50 m prof. et le rejet à environ 9 m prof. (*informations obtenues auprès du bureau d'ingénieurs JAFO en 2011*). Construites en 1957, les installations ont été puis rénovées en 1995.

C/ EPFL (Lausanne, Lac Léman)

Ce réseau lacustre est dédié au campus de l'Ecole Polytechnique Fédérale et géré à l'interne. L'eau est pompée à 70 m prof. (environ 6°C, 940 m³/h nominal), acheminée à la station de pompage puis rejetée après utilisation dans la rivière La Sorge à une température de 12-14°C. Les besoins de chauffage sont couverts via des pompes à chaleur, ceux de climatisation via des échangeurs de chaleur (4.8 MW nominal, en direct; Vuille F. V., 2004; Schmid J., 2005).

3.4.1.2 A travers le monde

A/ Toronto (Canada, Lac Ontario)

Un réseau de froid classique existe dans le quartier administratif et universitaire de la ville depuis 1997. Ce n'est qu'en 2004 que le pompage d'eau dans le Lac Ontario (83 m prof., environ 4-5°C) y a été intégré. Son concept est basé sur une valorisation couplée matière-énergie d'un pompage d'eau profonde. L'eau pompée est d'abord filtrée et potabilisée dans la station de pompage du réseau d'eau potable de la ville, puis passe par une seconde station

dans laquelle les échangeurs de chaleur transfèrent la chaleur à la boucle secondaire de distribution (fig. 3-3). Cette boucle secondaire ainsi alimentée est fermée et distribue l'eau froide aux bâtiments connectés. Lorsque cela est nécessaire, plusieurs machines frigorifiques additionnelles et branchées en série abaissent la température de cette boucle froide jusqu'à environ 3°C. Une fois ce transfert énergétique effectué, la boucle primaire d'eau potable alimente la ville via un réseau d'adduction dédié.

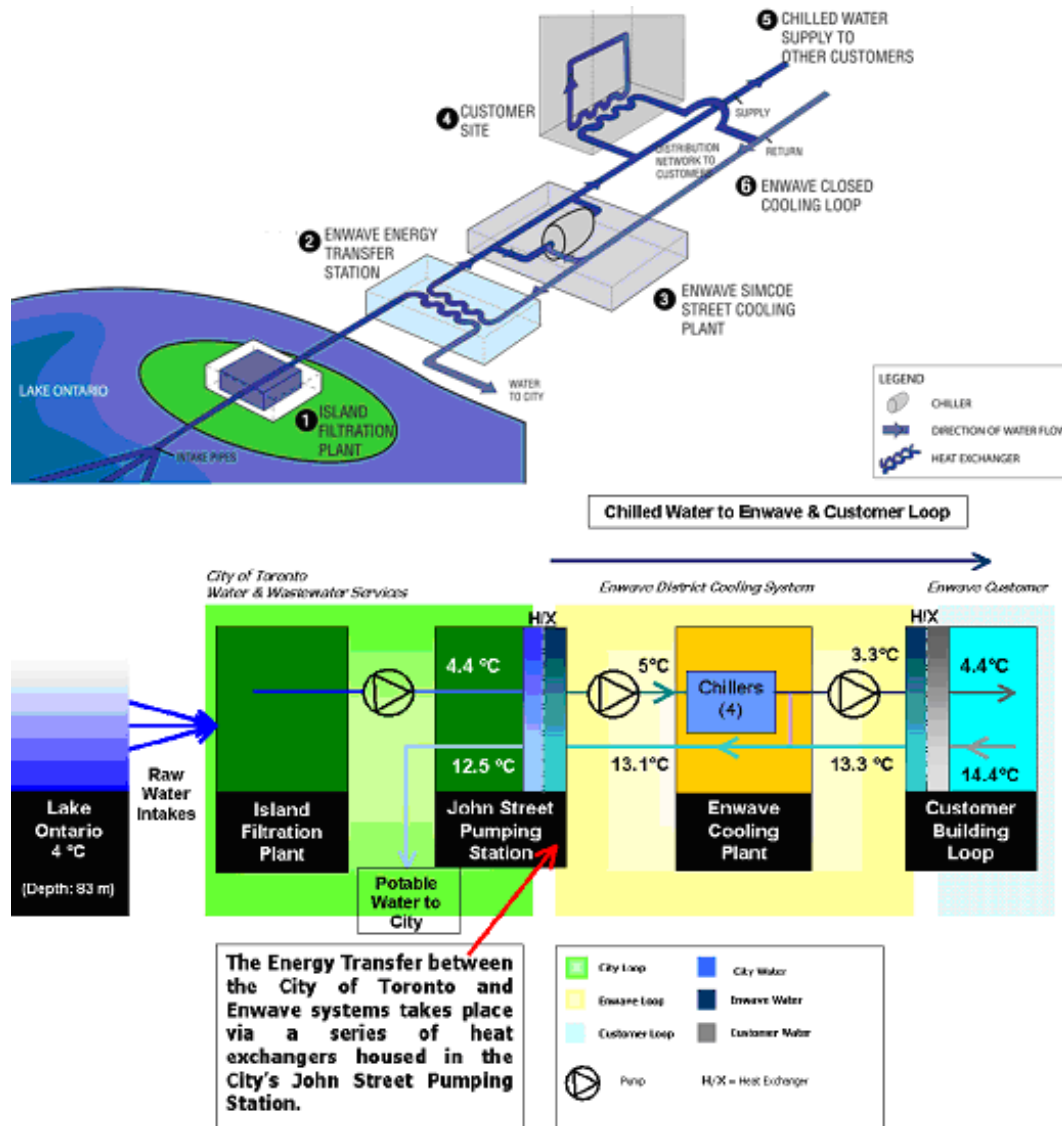


fig. 3-3 Schéma de principe du système hydrothermique de froid de la ville de Toronto¹

La puissance frigorifique de la boucle fermée est de 363 MW, dont 60 MW tirés du lac: elle permet de climatiser 100 gratte-ciels administratifs (environ 3.2 million m² de bureaux). L'économie d'électricité est estimée à 1.7 GWh/an². En 2006, 46 bâtiments avaient souscrit de la puissance et 27 étaient déjà connectés. Initialement dimensionné pour pouvoir répondre à la demande jusqu'à l'horizon 2015, la capacité de production du réseau était déjà entièrement réservée en 2008.

¹ <http://www.enwave.com/enwave/dlwc> (2006)

² <http://www.toronto.ca/legdocs/2006/agendas/council/cc060627/pof5rpt/cl033.pdf> (octobre 2006)

Enwave, l'exploitant de ce réseau, a très tôt compris les avantages que pouvaient offrir ce type de système, centralisé et renouvelable: la compagnie a donc articulé sa commercialisation autour de sa grande fiabilité (service 24h/24 adapté aux besoins de chaque utilisateur).

B/ Cornell University (Etats-Unis, lac Cayuga)

Son concept est basé sur la valorisation énergétique d'un pompage d'eau profonde dédié (fig. 3-4). Les échangeurs de chaleur sont centralisés à la station de pompage du réseau: la boucle froide de distribution secondaire est fermée et distribue l'eau aux bâtiments connectés en direct. Une fois ce transfert énergétique effectué, la boucle primaire d'eau lacustre est rejetée dans les couches de surface du lac à 4.3 m prof..

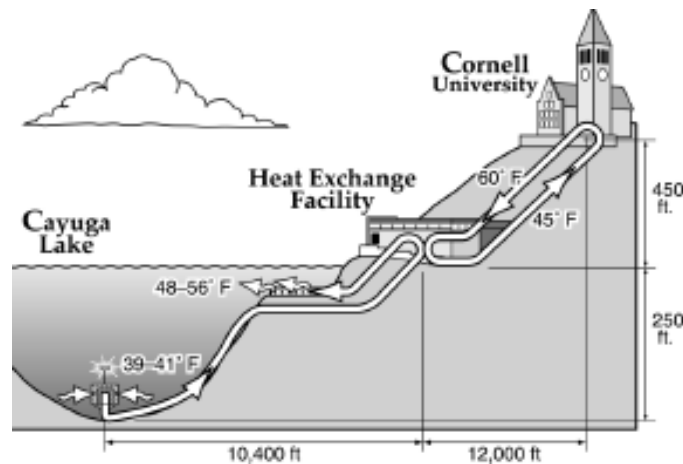


fig. 3-4 Schéma de principe du système hydrothermique de froid de l'Université de Cornell (Peer et al., 2002)

Avant de recourir aux eaux lacustres profondes, les bâtiments de l'Université de Cornell, situés entre 150 et 200 m en dessus du niveau du lac, étaient climatisés via un réseau de froid alimenté par six machines frigorifiques de grande puissance.

Au début des années 1990, les services techniques de l'Université étaient confrontés à quatre problèmes liés au réseau de froid existant: ses installations devaient être mises en conformité avec les nouvelles lois fédérales en matière de fluides réfrigérants, ses machines frigorifiques, vétustes, devaient être remplacées, la demande de froid s'accroissait (106 GWh/an entre 2000 et 2003) et le coût de l'électricité explosait (Cornell Utilities, 2001).

Couplés à la présence proche d'un lac profond exploitable, l'ampleur des coûts et des changements nécessaires ont en fait constitué une opportunité pour l'implémentation d'une production renouvelable. En 1994, le projet est accepté par les autorités publiques, qui établissent une étude très fouillée des implications environnementales de ce système en collaboration avec diverses Facultés de l'Université (NYSDEC, 1998).

C'est en juillet 2000 que le pompage d'eau dans le lac Cayuga (76 m prof., environ 4°C) est intégré au réseau existant. La puissance frigorifique de la boucle froide est de 71 MW et permet de climatiser 75 bâtiments (env. 1'200'000 m²). En substituant la production classique par la production hydrothermique, l'économie d'électricité est estimée à 22 GWh/an, car l'efficacité du système est plus que quintuplée (Peer, 2002). Le suivi environnemental mis en place dès la mise en route du système et poursuivi jusqu'à ce jour constitue un retour d'expérience unique en la matière (NYSDEC, 1998).



fig. 3-5 Station de pompage et de transfert du réseau de Cornell (à gauche) et détails intérieurs (à droite)

C/ Climespace (Paris, production par machine frigorifique + en direct)¹

Avec une puissance frigorifique de 236 MW, ce réseau est l'un des plus importants au monde (Santamouris *et al.*, 2004; Poeuf *et al.*, 2010). L'eau glacée, produite par plusieurs machines frigorifiques décentralisées, est distribuée à $5 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ à plus de 200 utilisateurs dans le centre-ville via un réseau de plus de 40 km. Bien que l'implantation des conduites dans le réseau d'égout ait été très contraignante sur la gestion de la distribution (diamètre limité des conduites), ce choix a été retenu en raison de l'investissement réduit (le coût des fouilles est très supérieur). Une station auxiliaire de production de glace permet un stockage de l'énergie froid pendant les périodes creuses de faible demande (volume de $12'000 \text{ m}^3$) et durant la nuit.

Entre 2002 et 2009, les tours-aéroréfrigérées ont été quasiment toutes substituées par un recours à l'eau de La Seine pour le refroidissement des condenseurs (pour 8 % de l'énergie produite en 2002 et 83 % en 2009). L'eau de La Seine est également utilisée pour de la production de froid en direct durant la période froide de l'année.

Fondé en 1990 à l'initiative de la Ville de Paris qui souhaitait un développement maîtrisé de la climatisation, ce réseau est géré commercialement par l'entreprise Climespace. Comme elle n'est pas en situation de monopole, la tarification a été adaptée dans un souci d'attractivité: elle comprend une partie liée à l'énergie consommée et une partie fixe liée au débit concessionné. En outre, les tarifs sont modulés au cours de l'année: étant soumis au prix de l'électricité et à l'importance du chauffage électrique en France, l'énergie froid consommée en hiver est vendue plus cher qu'en été !

D/ Honolulu (Hawaii, océan Pacifique)

Le bâtiment du laboratoire d'énergie renouvelable est climatisé en direct via un pompage profond dans l'océan depuis 1986. Satisfaites par les prestations offertes, les autorités ont commandé une étude de faisabilité pour le développement de cette technologie sur différentes îles. L'analyse économique ayant montré que ces systèmes sont économiquement viables (State of Hawaii, 2002), un réseau d'une puissance frigorifique de 18.4 MW est actuellement en construction à Honolulu.

E/ Stockholm (Suède, mer Baltique)

Depuis 1995, le centre administratif de la ville est approvisionné en énergie froid par un réseau hydrothermique. La majorité de l'énergie provient de deux pompes situées dans la

¹ Bien que n'utilisant l'eau « en direct » que de manière ponctuelle pour les prestations de climatisation, il représente un exemple intéressant pour l'analyse comparative du système GLN – Merck-Serono

mer Baltique, soit en surface soit à 20 m prof. (maximum 6°C¹). La puissance frigorifique de la boucle de distribution est de 60 MW² (Santamouris et al., 2004).

Construit sur la base d'un réseau hydrothermique de chaleur existant (25 MW via quatre pompes à chaleur) auquel il a été couplé, il peut fournir simultanément de l'énergie chaud et froid selon deux modes:

- mode « production chaud »: le point de pompage choisi est celui pour lequel la température est la plus élevée; simultanément, la « production froid » est assurée par des échangeurs de chaleur recevant l'eau à partir du côté opposé de la boucle de distribution (température abaissée une fois la prestation chaud effectuée),
- mode « production froid »: le choix du point de pompage et le processus sont simplement inversés. Après son utilisation, l'eau peut être rejetée en mer ou réinjectée dans la boucle de distribution si son niveau de température peut être exploitable pour produire de la chaleur.

En entre-saisons, l'utilisation simultanée en modes chaud et froid diminue drastiquement les coûts de production de l'énergie froid et rendent ce système économiquement viable et très intéressant. En revanche, la gestion de la demande de pointe s'est avérée plus compliquée que prévu: lorsque la demande est importante, les utilisateurs ont plutôt tendance à augmenter le débit à la place d'élever la température de retour, ce qui limite la puissance de froid délivrable par la boucle froide. Pour pallier ce problème, le modèle de tarification établi prend en compte le débit pompé par chaque utilisateur, ce qui l'incite à mieux valoriser l'eau pompée. Cela constitue une similitude avec le réseau GLN.

Les ventes d'énergie froid et les demandes de raccordement ont dépassé toutes les attentes: ce succès a encouragé la municipalité à étendre ce réseau pour 200 utilisateurs supplémentaires, soit jusqu'à 95 MW. Ce succès reflète la solide expérience suédoise en gestion de réseaux thermiques. En particulier, la production synergique de chaud et de froid, la gestion de la demande de pointe et les modèles de tarification mis en place en font un exemple de référence en la matière.

F/ Hôtel Intercontinental (Bora-Bora, océan Pacifique)

Depuis 2006, ce complexe hôtelier est entièrement climatisé via un pompage d'eau océanique à grande profondeur (930 m prof., environ 5°C, 1.6 MW_{nom}).

3.4.2 Projets de réseaux suisses

En Suisse, le Lac Léman est utilisé depuis quelques dizaines d'années pour du refroidissement en direct, mais de manière très confidentielle. Pourtant, les caractéristiques de nombreux lacs suisses (thermiques, bathymétriques) en font des candidats propices.

La liste ci-dessous n'est pas exhaustive.

¹ En raison de sa latitude élevée, la thermique de la mer Baltique garantit une température de l'eau pompée basse, même à faible profondeur (20 m). Pour les mers ou océans situés sous des latitudes plus faibles, les profondeurs de pompage nécessaires sont beaucoup plus importantes, au minimum de 500-600 m

² www.makai.com (2011)

A/ Neuchâtel centre-ville (lac de Neuchâtel)

Un projet de réseau d'eau lacustre non-dédié est actuellement très avancé et devrait être réalisé ces prochaines années (*Matthey et al., 2009*). Il pourrait assurer l'approvisionnement en direct pour une demande frigorifique identifiée de 15.7 MW liée à des surfaces industrielles, administratives et commerciales. Il a deux particularités: l'utilisation de galeries techniques et de sous-sols d'immeubles existants pour le réseau de distribution, et le rejet des eaux dans la nappe phréatique via des puits perdus.

B/ Réseaux «GLU-GLA » (Genève, Lac Léman)

Le GLU (Genève-Lac-Urbain) et le GLA (Genève-Lac-Aéroport) sont des projets actuellement en cours d'étude, relativement semblables au réseau GLN. Ces réseaux lacustres commerciaux seraient gérés par SIG et implantés d'ici 2015: leur puissance frigorifique estimée est d'environ 160 MW (+ 20 MW de chaud) à l'horizon 2030. L'eau serait pompée en profondeur dans le Petit-Lac Léman.

4 Objectifs de l'étude et de la thèse

Malgré l'abondance de ressources potentiellement utilisables à travers le monde et de larges connaissances d'ingénierie en matière de réseaux hydrauliques depuis longtemps acquises et solidement maîtrisées, les systèmes utilisant des eaux profondes pour l'approvisionnement thermique de bâtiments sont actuellement encore très peu répandus. L'espace occupé par les filières énergétiques basées sur des productions thermiques « classiques » (p. ex. production de froid artificiel via des machines frigorifiques), basées sur des technologies matures (maîtrise technique, faibles coûts, facilité d'utilisation, etc.), ne laisse que très peu de place à la diffusion de technologies alternatives, cela quelles que soient leurs avantages comparés. A l'heure où le développement de filières énergétiques locales basées sur une production renouvelable s'avère nécessaire, notamment pour utiliser l'énergie de manière plus rationnelle, ces systèmes hydrothermiques offrent pourtant de belles perspectives.

En s'appuyant sur l'étude de cas fouillée du système hydrothermique genevois nouvellement construit et en la comparant avec les quelques autres systèmes similaires qui existent à travers le monde, cette étude propose de mettre en évidence les aspects principaux qui contribuent au succès, ou non, de ce type de système. De la phase de projet à la gestion d'un tel système, de nombreux obstacles et contraintes doivent en effet être pris en compte, intégrés puis gérés.

Le retour d'expérience de cinq ans, mené de 2006 à 2011, prend en compte les aspects énergétiques, environnementaux et économiques. Son but est la mise en évidence des points-clé fondamentaux et déterminants, de la phase de projet à l'exploitation d'un tel système énergétique (étude et développement, implantation, viabilité et pérennité).

Bien que se focalisant sur les prestations de froid, cette étude fournit des éléments pour appréhender dans leur globalité l'utilisation synergique des prestations thermiques (climatisation et chauffage) et la valorisation matière (eau d'arrosage) des eaux pompées. Initialement centrée sur le réseau GLN, elle apporte également des réponses pour un développement pertinent de la filière hydrothermique au niveau régional, puis dans un contexte plus général pour la reproduction de ce type de système.

Ne constituant qu'une première phase exploratoire à l'étude des systèmes hydrothermiques, cette étude ne constitue qu'un point de départ et apporte les éléments de base nécessaires à un vaste champ d'étude: la contribution de la filière hydrothermique à la mise en valeur intégrée des ressources énergétiques renouvelables au niveau local.

5 Cadre de l'étude

Ce travail propose une synthèse des résultats issus de plusieurs programmes de recherche dans lesquels le Groupe Energie de l'Institut Forel est actif depuis plusieurs années. Ce travail s'appuie sur les différentes approches, complémentaires, développées dans chacun de ces programmes. Le premier d'entre eux est le programme *Concerto* qui s'inscrit dans le 6^{ème} programme-cadre pour la Recherche et le développement technologique en Europe (2002-2006), lancé par la Direction générale de l'énergie et des transports de l'Union Européenne (fig. 5-1). Ambitieux, il compte 58 communautés impliquées dans 22 projets orientés vers le plus haut niveau possible d'autonomie énergétique au niveau local. L'objectif principal est de démontrer les avantages énergétiques, environnementaux, économiques et sociaux que représente l'intégration entre les sources d'énergie renouvelables et les techniques d'efficacité énergétique, via des systèmes de gestion durable de l'énergie au niveau des communautés locales. C'est en grande partie le fort engagement du Service cantonal de l'énergie de Genève (ScanE) qui a permis au projet genevois d'intégrer ce programme. Du 1^{er} décembre 2005 au 30 novembre 2010, le financement obtenu a soutenu la plupart des activités indispensables à la réalisation de ce travail, notamment le déploiement de lourdes activités de monitoring, la récolte d'informations au sujet de systèmes énergétiques similaires à celui en développement à Genève, mais aussi l'engagement du chercheur principal et de plusieurs collaborateurs pour des points de recherche spécifiques (physiciens, architectes, économistes et informaticiens).

Au niveau local, plusieurs partenariats ont également grandement contribué à cette étude. En particulier, un partenariat important établi entre le Groupe Energie et l'exploitant du réseau (SIG) a permis d'étudier de manière fouillée la connexion de deux bâtiments existants au réseau GLN. Une autre tâche, qui avait pour but la mise en évidence des enjeux de la climatisation à Genève, a également fourni de précieuses informations pour évaluer les potentiels de développement de cette filière au niveau cantonal. Par ailleurs, un suivi environnemental du lac étant requis pour ce type d'installation, le Groupe Energie a été mandaté par SIG et Merck-Serono pour sa réalisation et sa coordination. Dans ce cadre, des collaborations étroites faisant appel à diverses compétences académiques, techniques et logistiques se sont avérées judicieuses: l'Institut Forel, le Service cantonal de l'écologie de l'eau (SECOE), le Groupe de Compétences en mécanique des fluides et énergétique de l'Ecole d'Ingénieurs de Genève (CMEFE-HEPIA), le bureau d'ingénieurs GREN Sàrl, mais aussi l'entreprise Yves Cauderay Sàrl.

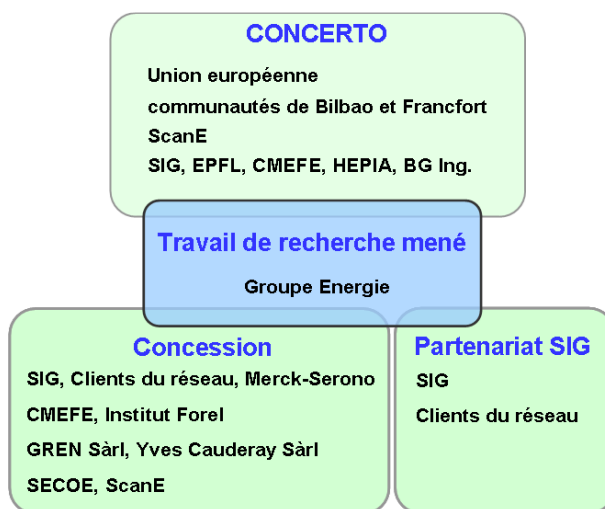


fig. 5-1 Organigramme des acteurs impliqués dans les travaux de recherche connexes liés au projet GLN

6 Le système GLN – Merck-Serono

Le système hydrothermique genevois est de type DLWC et est composé des réseaux GLN et Merck-Serono.

6.1 Localisation

Le canton-ville de Genève est située au sud-ouest de la Suisse, au bout du Lac Léman (fig. 6-1), qui se trouve à une altitude de 372 m. La zone occupée par ce système hydrothermique, sur la rive droite du lac, couvre les quartiers des Nations et de Sécheron: elle se situe à 1-2 km du centre-ville et à 2 km du Rhône émissaire. Avant que l'Arve ne se jette dans le Rhône, ce dernier parcourt environ 1.5 km à travers la ville (Rhône urbain).

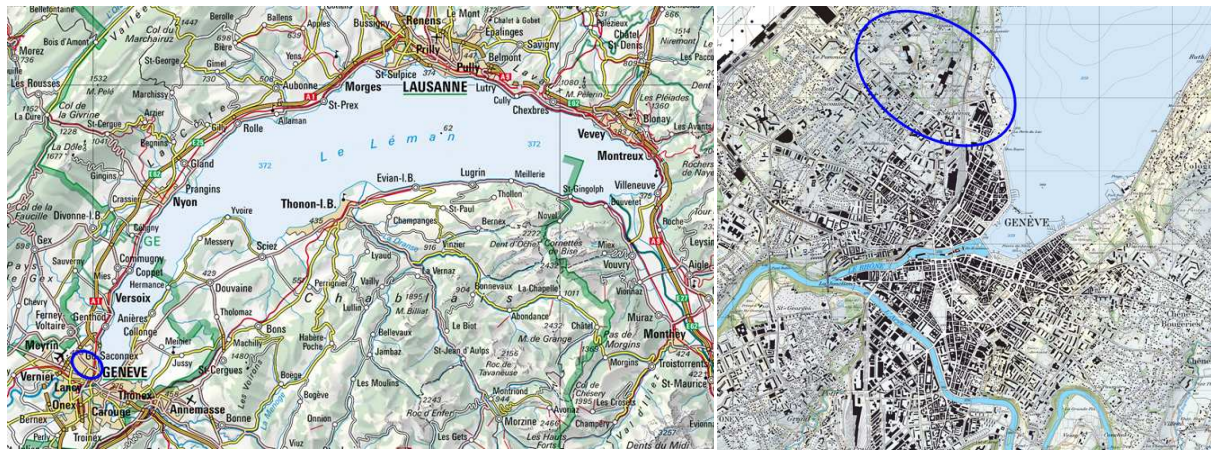


fig. 6-1 Emplacement de la ville de Genève (à gauche) et localisation du système hydrothermique GLN – Merck-Serono (cercle bleu, à droite) (sources: Swisstopo et SIG)

6.2 Installations et équipements

Ce système consiste en un réseau d'adduction d'eau lacustre profonde dont le but est de servir avant tout de ressource énergétique (rejet ou extraction de chaleur) à tout bâtiment connecté, mais également d'apporter aux larges espaces verts de la zone de l'eau d'arrosage. Le coût d'investissement du réseau GLN est d'environ 30'010 KCHF. Il est long de 6 km et d'une capacité de production frigorifique de 15.7 MW ($\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$), mais également 3 MW de production de chaud ($\Delta T = 3^{\circ}\text{C}$).

L'eau lacustre est pompée à 37 m prof. puis amenée via une conduite lacustre jusqu'à la station de pompage enterrée dans le parc Barton (fig. 6-2); elle est ensuite distribuée distinctement aux deux réseaux (GLN 2'700 m³/h nominal, Merck-Serono 1'300 m³/h nominal) jusqu'à la sous-station de chaque bâtiment connecté, où des échangeurs de chaleur et/ou des pompes à chaleur¹ transfèrent l'énergie du réseau primaire au réseau secondaire. La chaleur des bâtiments, transférée aux eaux du réseau primaire, est finalement rejetée dans le lac à 4.5 m prof. via un diffuseur situé dans la zone littorale.

¹ La production de chaleur est assurée par des pompes à chaleur à haute performance qui relèvent les niveaux de température à environ 40°C

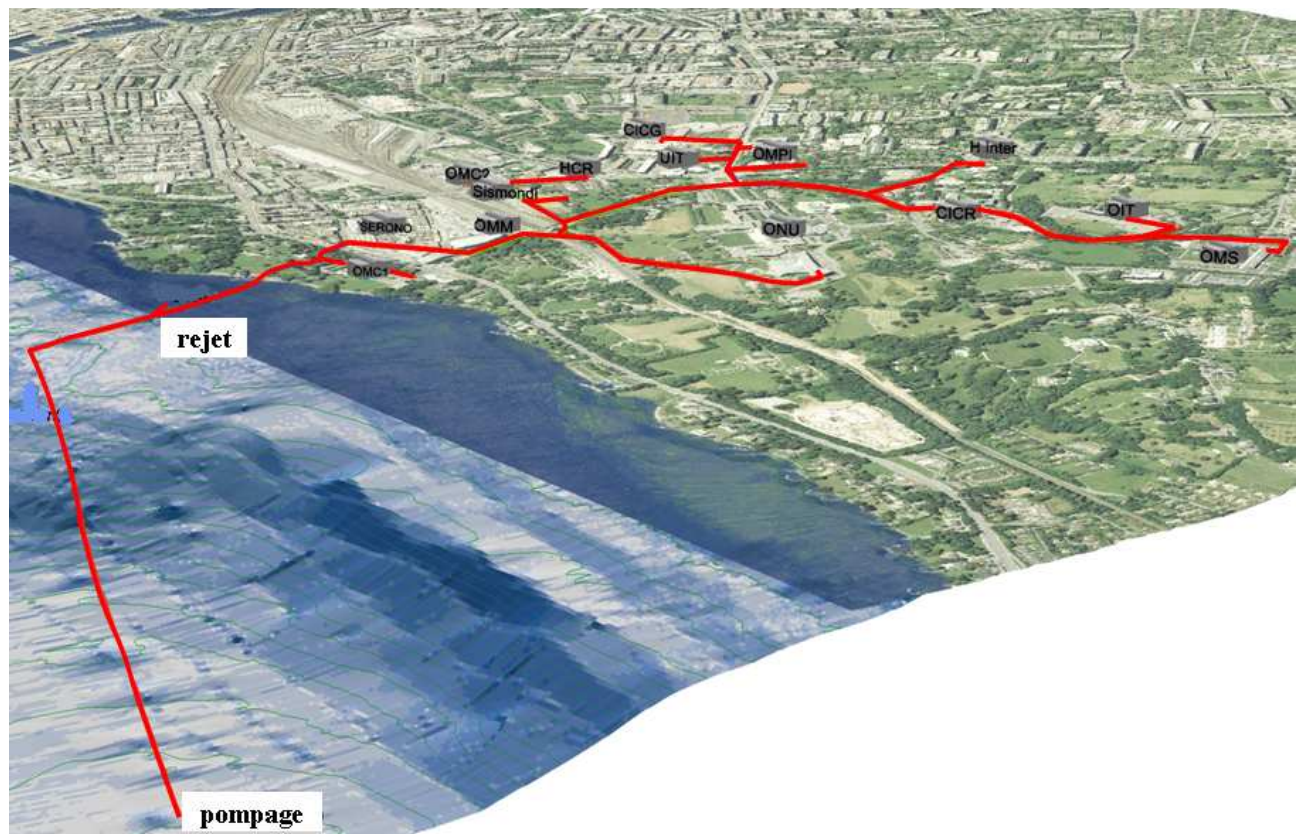


fig. 6-2 Vue globale du système hydrothermique GLN – Merck-Serono

A/ Pompage et rejet

Seule la partie lacustre du système est commune aux réseaux GLN et Merck-Serono et la station de pompage abrite leurs installations de pompage (fig. 6-3):

- **pompage**: le dispositif est scellé sur une dalle de béton posée sur le sédiment. La crépine d'aspiration est située 5 m au-dessus, à 37 m prof., de manière à éviter un encrassement et une aspiration de sédiments dans le réseau: son chapeau, amovible pour permettre un nettoyage annuel par décapage à l'eau sous pression, est recouvert d'un grillage d'une maille de 8 mm filtrant les débris: ainsi, les moules zébrées adultes ne peuvent pas être aspirées (barrière efficace à leur prolifération dans le réseau). La surface de la crépine permet une vitesse d'aspiration d'au maximum 21 cm/s, de manière à ce que les petits poissons (< 8 mm) aient la capacité de s'échapper (NYSDEC, 1998). Pour prévenir l'encrassement des conduites (algues, phytoplancton, films bactériens, etc.), les eaux pompées sont chlorées en continu: l'injection est effectuée au pompage avec une solution d'eau de Javel concentrée via une petite conduite en polyéthylène disposé le long de la conduite de pompage. La dose injectée est comprise entre 0.3 et 0.4 mg Cl_2/l , et un système de contrôle permet d'assurer une concentration en chlore actif résiduel inférieure à 50 $\mu\text{g/l}$ Cl_2 dans les eaux de rejet (L2.05, 1961),
- **rejet**: le diffuseur est scellé sur des blocs de béton posés sur le sédiment, à 4.5 m prof. et à 180 m de la rive (fig. 6-4). Il a été conçu de manière à optimiser le mélange des eaux rejetées avec celles du milieu récepteur: il mesure 24 m et est constitué de 16 orifices de 30 cm de diamètre: le débit y est maximum dans le premier (120 l/s) puis diminue jusqu'au dernier. Ces orifices, orientés à 30° vers le haut de part et d'autre de la conduite, préviennent une mobilisation du sédiment qui rendrait l'eau turbide et minimisent la sursaturation en gaz, potentiellement mortelle pour la faune piscicole (NYSDEC, 1998). La

profondeur du dispositif n'empêche pas les activités de loisirs à proximité: de plus, il est conçu en fibre synthétique de manière à céder rapidement lors d'un choc (p. ex. avec un bateau).



fig. 6-3 Crépine d'aspiration (à gauche) et diffuseur de rejet (à droite) (source: SIG)

B/ Réseaux GLN et Merck-Serono

Conduites sous-lacustres (fig. 6-4): la conduite de pompage est constituée de deux tronçons: sa partie amont (proche du pompage) est une ancienne conduite d'eau potable réaffectée (2'061 m, $\varnothing = 1'600$ mm, en acier), sa partie aval est nouvelle (517 m, $\varnothing = 900$ mm, en fibre). La conduite de rejet est en fibre et mesure environ 250 m ($\varnothing = 900$ mm).

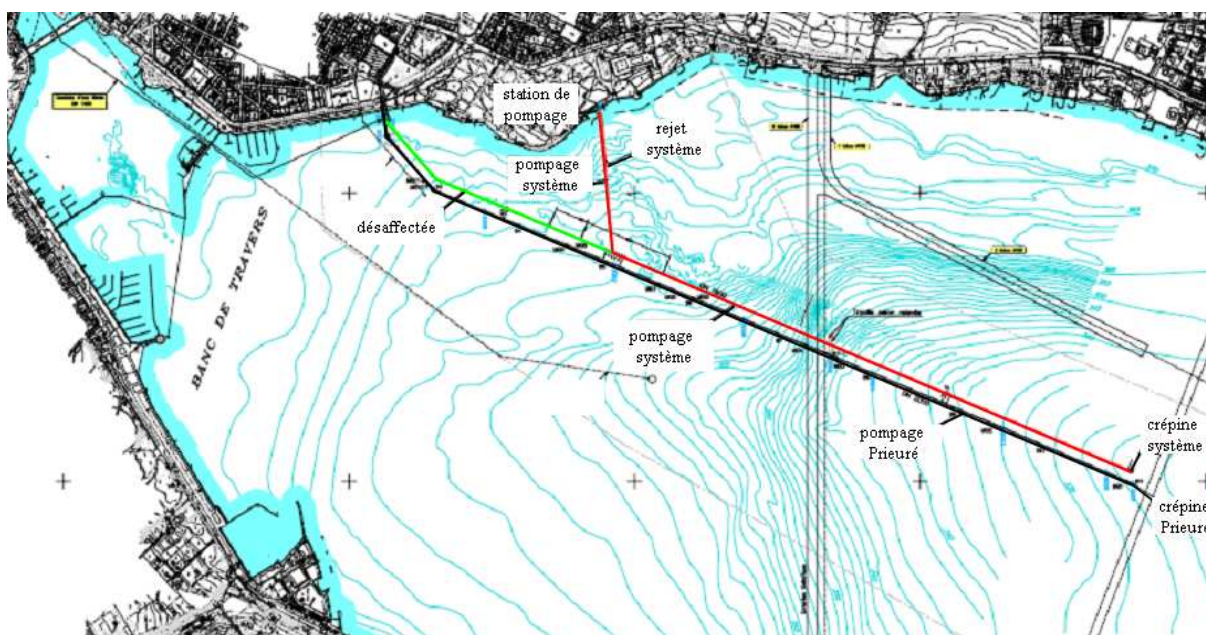


fig. 6-4 Conduites sous-lacustres GLN (en rouge) et de l'adduction d'eau potable du « Prieuré » (en noir) (source: GEOS Ingénieurs)

Conduites terrestres (fig. 6-5): elles sont constituées de tuyaux en acier recouvert de trois couches de polyéthylène. De manière à gérer sagement la connexion de bâtiments supplémentaires, les diamètres sont compris entre 80 et 700 mm. Un petit conduit équipé de fibres optiques est enterré le long de ces conduites et permet le contrôle centralisé des sous-stations des bâtiments connectés. Le choix de son tracé s'est avéré complexe et contraignant: il devait à la fois préserver l'utilisation du sol, tenir compte des divers plannings (voiries, construction du tram), assurer le fonctionnement des réseaux de transports durant la phase de

chantier (trains, routes) mais aussi prendre en compte les opportunités de travaux communs effectués sur les voies publiques (p. ex. lors du réaménagement de la Place des Nations).

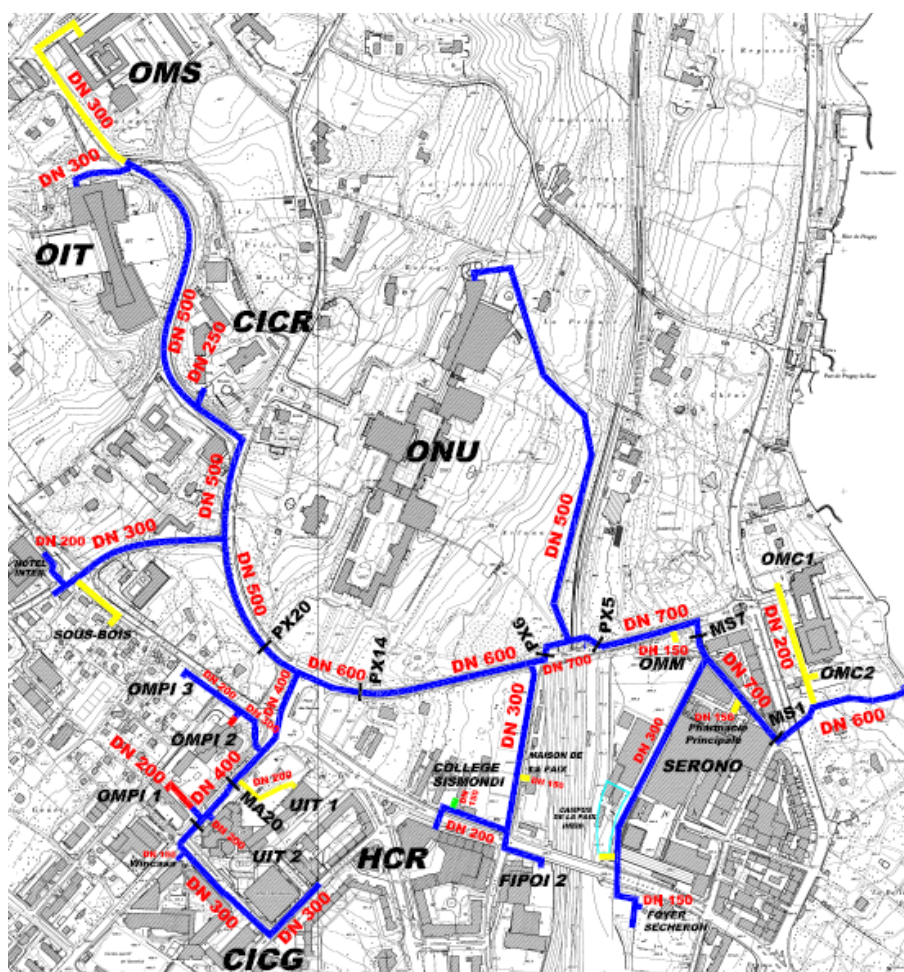


fig. 6-5 Etat des réseaux terrestres GLN et Merck-Serono en novembre 2010: construit (en bleu), en construction (en rouge) et planifié (en jaune) (source: SIG)

C/ Station de pompage

La station de pompage est enterrée dans le parc Barton (*fig. 6-6*). Elle contient dix électropompes à débit variable ($300 \text{ m}^3/\text{h}$ nominale chacune), cinq pour le réseau GLN, quatre pour le réseau Merck-Serono et une de réserve, des filtres (maille = $100 \mu\text{m}$), un terminal électrique haute/moyenne tension et des automates de contrôle (SIG, 2005). Des chaudières de grandes dimensions (environ 20 m^3) protègent les installations d'éventuelles surpressions (coup de bélier). Après leur stockage provisoire dans un bassin d'accumulation, les eaux brutes sont envoyées jusqu'aux sous-stations des bâtiments connectés (dénivelé maximum de 75 m). Les eaux de retour du réseau GLN sont turbinées, ce qui permet de récupérer 30 % de l'énergie de pompage requise.

La station de pompage est entièrement instrumentée (pression, température, débit, puissances thermiques et électriques), pilotée et régulée à distance depuis le centre de contrôle du siège administratif de SIG.

GLN



Merck-Serono



fig. 6-6 Station de pompage: filtres et chaudron GLN au 1^{er} étage (en haut), pompes GLN au rez (au milieu à gauche), conduites de distribution/retour avec débitmètre au 1^{er} étage (au milieu à droite), pompes et filtres Merck-Serono au rez (en bas)

D/ Sous-stations

Il y a une sous-station par bâtiment connecté. Le transfert d'énergie entre le réseau d'eau lacustre primaire et le réseau d'eau secondaire de distribution du bâtiment s'y opère à travers l'échangeur(s) de chaleur (*fig. 6-7*). Les machines frigorifiques existantes ont généralement été conservées pour sécuriser l'approvisionnement et couvrir des pointes de demande exceptionnelles. Le type d'échangeur adopté est à plaques, en acier (démontable, nettoyable); dans les sous-stations, les conduites primaires et secondaires sont isolées.

Les sous-stations sont entièrement instrumentées (pression, température, débit, puissances thermiques et électriques): le réseau primaire est piloté et régulé à distance depuis le centre de contrôle de SIG, tandis que le réseau secondaire l'est localement par les services techniques des bâtiments.



fig. 6-7 Sous-station d'un bâtiment connecté au réseau GLN: échangeurs de chaleur (à gauche), pompes de circulation (au milieu) et vue global avec machines frigorifiques (à droite)

E/ Bâtiments

Les bâtiments de l'entreprise Merck-Serono sont connectés à leur propre réseau: les espaces climatisés et chauffés sont dédiés à des activités industrielles et administratives (*tableau 6-1*).

A l'exception de l'Hôtel Intercontinental, la douzaine de bâtiments existants qui seront à terme connectés au réseau GLN est essentiellement constituée de bâtiments administratifs. La connexion de ces bâtiments, de périodes de construction relativement différentes et présentant diverses particularités et contraintes d'exploitation, représente un défi technique important.

La sélection des bâtiments connectables par l'exploitant s'est essentiellement articulée autour de leur localisation et de la densité de leur demande. Selon des critères qu'il s'est fixés, il a retenu les bâtiments qui d'une part sont situés dans un périmètre restreint (problèmes de construction, coût de l'infrastructure, pertes de charge en exploitation sont tous trois proportionnels à la longueur du réseau) et pour lesquels la demande de froid est suffisamment importante.

acronyme	bâtiments	connexion
HIC	Hôtel Intercontinental	janvier 2011
CICR	Comité International de la Croix-Rouge	août 2009
BIT	Bureau International du Travail	juin 2009
CICG	Centre International de Conférences de Genève	août 2009
HCR	Haut Commissariat pour les Réfugiés	janvier 2011
ONU	Organisation des Nations-Unies	juin 2009
OMM	Organisation Mondiale de Météorologie	pas sûre
OMPI	Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle	nov. 2010
OMS	Organisation Mondiale de la Santé	après 2012
OMC	Organisation Mondiale du Commerce	après 2012
UIT	Union International des Télécommunications	août 2009
MS I	Merck-Serono I	juin 2007

tableau 6-1 Bâtiment connectés au réseau GLN (ou dont la connexion est planifiée)

Les caractéristiques principales des bâtiments prospectés, qu'ils soient existants, en cours de construction ou dont la connexion est planifiée, sont détaillés en *annexe 1*. Le phasage de connexion de ces bâtiments est décrit au *chapitre 6.7*.

F/ Quartier

Le réseau GLN est implanté dans un quartier où la majorité des bâtiments sont destinés à ces activités tertiaires (organisations internationales, ambassades, etc.). Quelques immeubles d'habitations sont situés dans sa partie sud (fig. 6-8).

Les limites choisies prennent en compte les limites de propriété des bâtiments connectés et ceux dont la connexion au réseau GLN est planifiée.

Avec le réaménagement de plusieurs zones et l'implantation de nombreuses nouvelles constructions de grande taille depuis l'an 2000, ce quartier en pleine mutation constitue un lieu propice à la mise en œuvre d'une politique énergétique d'envergure. L'analyse de l'influence de ce réseau sur les consommations d'électricité et d'eau potable nous a paru à cette échelle pertinente: un suivi a été effectué pour la période 2006-2011.

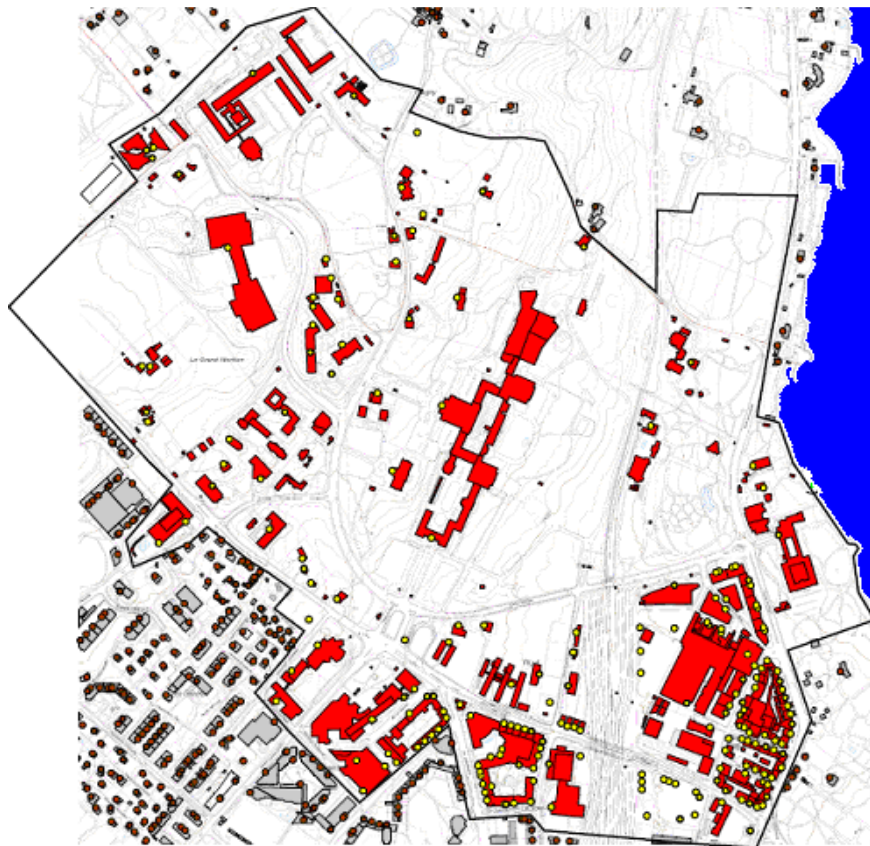


fig. 6-8 Limites du quartier (ligne noire) et bâtiments concernés (en rouge)

6.3 Spécificités des réseaux GLN et Merck-Serono

1. une caractéristique remarquable est que l'exploitant ne refroidit pas l'eau lacustre distribuée via le réseau primaire (climatisation effectuée en direct). Sa température n'est donc pas contrôlable et ne peut être garantie, car elle dépend du comportement du lac. Elle reste généralement dans la fourchette 6-9°C en été; dans certaines conditions météorologiques, elle peut toutefois monter jusqu'à 14-16°C pendant de courts événements. Cette variation spontanée de la ressource a des conséquences sur son utilisabilité dans les boucles de distribution de froid des bâtiments, car elles fonctionnent traditionnellement avec une température de distribution basse et constante (généralement 6°C lorsque la production est assurée par des machines frigorifiques). Pour que les

- bâtiments puissent être approvisionnés de manière satisfaisante, les niveaux des températures de travail doivent nécessairement être adaptés à ceux de la ressource,
2. en contrepartie, la boucle de distribution primaire fonctionne en mode ouvert, ce qui réduit les contraintes sur la température de retour dans le réseau primaire, car elle n'affecte pas les autres utilisateurs. Un autre atout pour l'utilisateur est la possibilité de placer un second échangeur à la sortie de l'échangeur principal (évacuation de la chaleur du condenseur des machines frigorifiques): cela est décisif pour le remplacement des tours aéro-réfrigérées (d'entretien coûteux et sources de problèmes sanitaires) et permet une nette amélioration de l'efficacité énergétique,
 3. la seule contrainte sur les eaux de retour est environnementale: la température des eaux du rejet ne doit pas modifier de manière trop importante les conditions naturelles présentes dans le plan d'eau récepteur,
 4. notons qu'à une puissance thermique donnée, l'augmentation des températures de retour (secondaire et primaire) induit une diminution du débit primaire appelé, offrant ainsi la possibilité d'allouer du débit primaire à d'autres preneurs. Afin d'inciter les utilisateurs à utiliser l'eau pompée de cette manière, la tarification adoptée s'appuie donc sur un prix dégressif de l'énergie froid (indexé sur la température de retour secondaire),
 5. les eaux de retour du réseau peuvent également être valorisées comme eau d'arrosage: en se substituant à la filière d'eau potable traditionnelle (pompage, purification, épuration), le bénéfice est à la fois énergétique, environnemental et économique,
 6. d'un point de vue hydraulique, un circuit ouvert nécessite une énergie de pompage importante, puisqu'il faut assurer une pression suffisante pour amener l'eau jusqu'au point le plus élevé du réseau. Le couplage d'une turbine directement sur l'axe de la pompe de distribution a permis de récupérer une partie de l'énergie potentielle sur le circuit de retour, réduisant ainsi l'énergie de pompage à une valeur proche de celle d'un circuit fermé,
 7. la plupart des bâtiments connectés ou qui seront connectés au réseau GLN existent déjà: ils possèdent des installations de production classiques (machines frigorifiques). De plus, le surdimensionnement des installations de distribution constitue un atout pour l'utilisation efficace de la ressource lacustre,
 8. contrairement au réseau Merck-Serono, le réseau GLN n'est pas dédié à un seul utilisateur, ce qui contraint l'exploitant à une gestion fine des demandes de pointe (problématique de la simultanéité).

6.4 Modèle tarifaire pour l'énergie froid

Le modèle de tarification adopté inclut deux parties:

- partie fixe (taxe de puissance): une taxe de 40 chf/kW_{concessionné} est perçue annuellement,
- partie variable (énergie): le prix de base est fixé à 10.5 cts/kWh pour une température de retour secondaire inférieure à 14°C; ensuite, le prix décroît de 0.5 cts/kWh par pas de 1°C d'augmentation de la température de retour, cela jusqu'à 20°C.

$$\text{Prix du kWh}_{\text{froidGLN}} = \text{part fixe (puissance)} + \text{part variable (énergie)}$$

6.5 Contexte politique et genèse du système énergétique

6.5.1 Contexte international et national

Marqués par l'émergence de la raréfaction des ressources et le changement climatique, les risques liés à l'utilisation de l'énergie ont augmenté au cours des dernières années: hausse générale des prix et conflits pour le contrôle des ressources. Pour y faire face, de nombreux pays ont ratifié le protocole de Kyoto¹ entré en vigueur en février 2005: ce traité vise à réduire d'ici 2012 les émissions de gaz à effet de serre d'au-moins 5 % par rapport à 1990. Au niveau européen, un plan d'action pour l'efficacité énergétique plus ambitieux a été adopté en 2006²: à l'horizon 2020, il vise 20 % d'économies d'énergie primaire et d'émission de gaz à effet de serre, ainsi qu'un accroissement de la production d'énergie renouvelable jusqu'à hauteur de 20 % de la production totale d'énergie.

Au niveau national, cette situation se traduit également par la ratification du protocole de Kyoto, par la loi sur le CO₂ qui prévoit une diminution de 10 % de ses émissions de gaz à effet de serre d'ici 2020 (*LCO₂*, 1999), mais également par des taxes et un cortège de mesures librement consenties (*OFEN*, 2007).

Le système hydrothermique genevois s'intègre donc parfaitement dans ce contexte, tant par les aspects positifs liés à la diminution drastique de la consommation d'électricité pour la production de froid et la minimisation des risques d'approvisionnement que par la mise en valeur d'une ressource renouvelable locale (maîtrise des coûts et développement d'une filière locale plus autonome).

6.5.2 Contexte cantonal

En 1986, les citoyens genevois ont adopté l'initiative « l'énergie notre affaire » qui définissait les principes d'une utilisation rationnelle de l'énergie, le développement prioritaire des énergies renouvelables ainsi qu'une clause anti-nucléaire (*Cramer*, 2010). La politique cantonale de l'énergie a donc évolué dans ce sens, en s'appuyant sur un volet stratégique (conception générale de l'énergie, *CGE*), et un volet opérationnel (plan directeur de l'énergie; *ScanE*, 2007). Cette politique s'intègre dans le cadre de la protection de l'environnement et du développement durable (*LPE*, 1983), et tient compte de l'évolution du domaine de l'énergie au niveau international et national.

Cette conception cantonale de l'énergie intègre formellement l'objectif de *société à 2'000 W* sans recours au nucléaire (*Novatlantis*, 2005), qui vise à réduire la consommation énergétique de deux tiers, en substituant la consommation basée à trois quarts sur des énergies d'origine fossile par une consommation basée à trois quarts sur des énergies d'origine renouvelable, cela sans perte de confort.

La coordination de la politique énergétique cantonale avec celle de l'aménagement du territoire inscrit cette vision au niveau du territoire genevois et renforce cette conception cantonale: elle s'articule autour de la valorisation intensive et durable des ressources locales (*Faessler*, 2011) et sur la localisation optimisée d'une demande maîtrisée qui s'appuie sur les complémentarités avec l'offre locale. La localisation optimisée d'une demande est le produit d'une démarche qui vise à intégrer un programme sur un territoire en tenant compte de son contexte et de ses caractéristiques énergétiques. La complémentarité signifie la combinaison

¹ http://fr.wikipedia.org/wiki/Protocole_de_Kyoto (mai 2011)

² http://europa.eu/legislation_summaries/energy/energy_efficiency/l27064_fr.htm (mai 2011)

pertinente des différentes offres d'énergies renouvelables locales, avec un éventuel recours, transitoire, à l'énergie d'origine fossile transformée.

En matière de politique énergétique, le projet du plan directeur cantonal 2030 (*Etat de Genève, 2011*), actuellement en consultation, se décline autour des points suivants:

- favoriser la diminution de la dépendance énergétique du canton: diversification des sources d'approvisionnement, développement de la production locale, recours plus systématique à des énergies renouvelables et utilisation rationnelle et économe des énergies,
- assurer la réalisation des objectifs de la politique énergétique cantonale à travers le plan directeur de l'énergie et en particulier les plans directeurs des énergies de réseaux, qui fixent les lignes directrices de leur développement,
- coordonner l'aménagement du territoire et la politique énergétique, notamment lors de la localisation des zones à bâtir: pour des projets d'une certaine envergure, un concept énergétique est d'ailleurs intégré dès les études préliminaires.

En ce sens, le système hydrothermique GLN - Merck-Serono s'intègre complètement dans cette conception stratégique de l'énergie (*L2.30.01, 2010*). Il constitue même une référence solide sur laquelle les diverses autorités et acteurs impliqués peuvent compter. En effet, son implémentation s'inscrit dans les deux programmes d'action opérationnels du plan directeur de l'énergie 2005-2009 (*ScanE, 2007*) récemment inscrit dans la loi sur l'énergie (*L2.30, 1986; L2.30.01, 1986; L2.30.01, 2010*). Mis en œuvre depuis déjà une dizaine d'années, ces deux programmes agissent sur la production, la transformation et la distribution:

- développement de filières énergétiques efficaces et basées sur des sources renouvelables,
- planification énergétique territoriale (*voir ci-dessous*).

6.5.3 Planification énergétique territoriale: l'opportunité GLN – Merck-Serono

La planification énergétique territoriale représente un processus en quatre étapes qui permet de planifier et déployer l'intégration des filières et l'optimisation des transformateurs au niveau des quartiers (*BG, 2009; ScanE, 2010*). Ce processus s'est révélé particulièrement utile et pertinent durant la phase de projet du système GLN- Merck-Serono, car il a permis de mettre en avant les opportunités de synergies réelles existant au niveau du quartier (*cf. chap. ci-dessous*):

1. état des lieux général

- contexte, politique, institutionnel et environnemental,
- localisation géographique, caractérisation du site, de son environnement et de son aménagement (éléments cadastraux, réseaux),
- objectifs du concept énergétique territorial et résultats attendus,

2. état des lieux énergétique (identification et caractérisation)

- ressources énergétiques renouvelables et locales,
- rejets thermiques existants,
- structure qualitative et quantitative des besoins énergétiques actuels et futurs (acteurs concernés et rôles, infrastructures énergétiques existantes et projetées),
- évaluation des opportunités et contraintes d'exploitation (techniques, économiques),

3. propositions et analyse de stratégies énergétiques locales

- stratégies de valorisation du potentiel et des infrastructures énergétiques associées,
- évaluation des synergies et/ou conflits d'usages,
- stratégies d'approvisionnement,
- évaluation des mesures conservatoires qui permettraient une valorisation ultérieure des ressources énergétiques renouvelables et des rejets thermiques,

4. synthèse: orientations et recommandations pour les acteurs concernés

6.5.4 Genèse du système et du réseau GLN

Dans le cadre de la politique énergétique cantonale et en particulier dans le but de maîtriser la demande énergétique au niveau du quartier, les projets de gros consommateurs d'énergie doivent être accompagnés d'un concept énergétique (*cf. chap. 6.5.2*): ce concept systématise la prise en compte du recours aux ressources énergétiques locales et l'activation des synergies possibles entre les différents consommateurs du quartier.

Dès l'année 2000, les études liées à la construction du siège mondial de l'entreprise Serono (*fig. 6-9*), actuellement Merck-Serono, font apparaître l'ébauche du réseau GLN (*Ouzilou, 2011; Spitzli, 2008*). Le permis de construire du bâtiment et la concession de pompage sont accordés à cette entreprise le 22 juillet 2002.

Dès 2003 et sous l'égide du ScanE, ce projet initial est développé à l'échelle du quartier: cette première phase se traduit par l'établissement d'un partenariat public-privé avec Serono (agrandissement des installations de pompage pour le réseau GLN) et l'implication du partenaire industriel SIG.

Bénéficiant de son caractère innovant, le consortium TetraEner, dont fait partie le projet genevois GLN, est primé le 30 septembre 2003 par le 6^{ème} programme-cadre de recherche européen sur les systèmes énergétiques renouvelables (programme Concerto): cette reconnaissance et le financement qui sera accordé incitent favorablement tous les acteurs locaux à investir le projet. En ce sens, l'Etat de Genève et Serono signent un accord le 18 décembre 2003 pour la couverture du préfinancement de la station de pompage des réseaux Serono et GLN¹.

Le concept technique du réseau Serono-GLN est finalisé en 2004. Les travaux commencent à l'automne (réseau lacustre, station de pompage, réseau terrestre Serono avec deux conduites supplémentaires en prévision du réseau GLN) et se termineront en novembre 2005. Le réseau Serono est mis en service début 2007. Le 4 mai, un protocole d'accord est signé entre l'Etat de Genève et SIG: il garantit à SIG le paiement des mesures conservatoires de pré-tubage sous la Place des Nations.

Le projet GLN se précise et aboutit fin 2005 avec un avant-projet détaillé (*SIG, 2005*) qui intègre une vision globale au niveau du quartier: prestations énergétiques froid et chaud, prestation matière (eau d'arrosage) et réalisation de bâtiments à faible consommation qui seront également connectés. La concession de pompage du réseau GLN est accordée à SIG le 20 décembre 2006. Après avoir réuni un nombre suffisant d'utilisateurs potentiels permettant d'atteindre la puissance nécessaire pour lancer la construction du réseau, SIG confirme en 2007 son engagement pour sa réalisation. Les travaux commencent à la fin de la même année et les premiers bâtiments sont approvisionnés dès juin 2009.

¹ Rappelons qu'à cette date, le réseau GLN n'est qu'un projet et que sa réalisation n'est pas du tout acquise

Le rôle de l'Etat de Genève et en particulier celui du ScanE se sont révélés très importants. Ce dernier a en effet initié, porté puis promu ce projet dès le début, cautionnant certains risques financiers nécessaires (fonds pour le développement des énergies renouvelables - collectivités publiques L240 de l'Etat de Genève: pré-tubage sous la Place des Nations et une partie de la station de pompage); son rôle s'est par la suite progressivement réorienté vers des actions d'incitation auprès des utilisateurs potentiels, souvent sceptiques et hésitants, afin de les encourager à se connecter au réseau GLN.

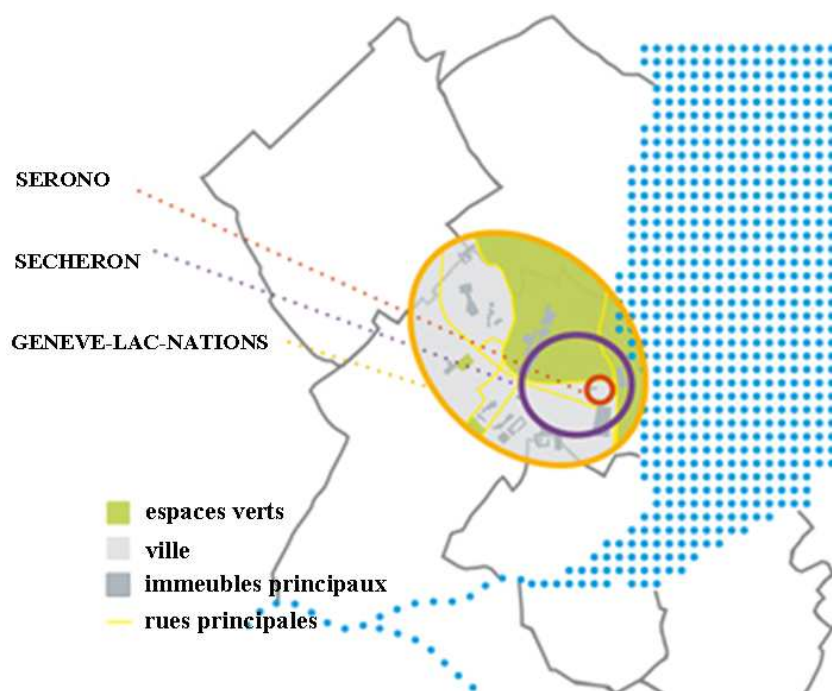


fig. 6-9 Etapes-clé et zones d'influence durant la genèse du système (source: SIG)

6.6 Objectifs énergétiques initiaux

Basés sur la conception du réseau GLN et sur la législation en vigueur, l'exploitant du réseau a formulé les objectifs suivants dans le cadre du projet TetraEner (SIG, 2008):

- bâtiments neufs: connexion d'environ 200'000 m² d'éco-bâtiments (demande énergétique 30 % en dessous des standards nationaux),
- bâtiments existants: connexion d'environ 640'000 m²,

A l'horizon 2010, connexion de 10 bâtiments (dont 6 existants):

- prestations: 12.5 GWh/an de froid et 0.5 GWh/an de chaud,
- économie de CO₂: 6'900 toCO₂équ/an, liée à la diminution de la consommation électrique pour la climatisation et à la substitution du chauffage au mazout par du gaz,
- consommation d'énergie finale: - 20 %,
- économie d'eau potable: 50'000 m³/an (arrosage via le réseau),

A l'horizon 2015, connexion totale de 31 bâtiments (dont 16 existants):

- prestations: 26.5 GWh/an de froid et 1.5 GWh/an de chaud,

- économie de CO₂: 12'900 toCO₂équ/an, liée à la diminution de la consommation électrique pour la climatisation et à la substitution du chauffage au mazout par du gaz,
- consommation d'énergie finale: - 30 %,
- économie d'eau potable: 75'000 m³/an (arrosage via le réseau),
- consommation d'électricité stable: la consommation engendrée par les pompes à chaleur pour le chauffage est compensée par les économies liées aux prestations de froid. La totalité de l'électricité utilisée est certifiée.

6.7 Etat d'avancement des connexions au début 2011

L'ONU, le BIT et le CICR sont climatisés via le réseau GLN depuis juin 2009 (août pour le CICG). Excepté de courtes interruptions de fonctionnement dues à des mises en service ou d des opérations de réparation/maintenance dans l'une des sous-stations (p.ex. court-circuit électrique), le réseau n'a pas présenté de défaillance notable (*informations obtenues auprès du service d'exploitation de SIG en 2011*).

Les bâtiments du « Foyer Sécheron » (résidentiel), dont la construction s'est achevée à l'automne 2010, est chauffé (+ production d'eau chaude sanitaire) via le réseau depuis janvier 2011.

Durant l'année 2011, des bâtiments supplémentaires ont été approvisionnés par le réseau GLN en énergies froid et chaud mais ne sont pas pris en compte dans le retour d'expérience proposé ici. D'autres bâtiments seront encore connectés ces prochaines années et la pleine capacité devrait être atteinte d'ici 2015, en fonction des capacités du système observées (simultanéité, pointes, etc.) parallèlement à l'augmentation de surface bâtie rafraîchie.

Les bâtiments de l'entreprise Merck-Serono sont alimentés en énergies froid et chaud depuis juin 2007 via son propre réseau. Pour des problématiques essentiellement liées à la construction des bâtiments et des installations techniques, la climatisation des bâtiments est loin d'être optimale: le débit de pompage est la plupart du temps très important (env. 1'100 m³/h pour un débit concessionné de 1'300 m³/h), sans modulation en fonction de la demande de froid, et la valorisation de l'eau pompée très faible (écart de température entre les eaux de retour et de distribution souvent inférieur à 1°C). Cette situation problématique est en cours de résolution: d'après les informations obtenues auprès des services techniques de l'entreprise et de la situation inchangée constatée en 2010 et 2011 (*Viquerat et al., 2011c*), la situation ne devrait pas être résolue avant le printemps 2012.

7 Méthodologie et mesures

Ce chapitre décrit l'approche méthodologique générale retenue ainsi que l'ensemble des méthodes employées pour effectuer le retour d'expérience du système hydrothermique GLN - Merck-Serono pour les quatre sous-systèmes étudiés (lac, bâtiments connectés/connectables, réseau et quartier). La qualité des données exploitées pour cette recherche a également été évaluée (cf. chap. 7.7).

Rappelons encore que l'étude proposée se focalise principalement sur le réseau GLN. Le réseau Merck-Serono n'est pris en compte que pour les points nécessaires à la compréhension globale du système énergétique.

7.1 Cadre méthodologique

L'objectif est d'étudier ce système énergétique dans l'intégralité de sa filière, depuis la ressource énergétique, sa transformation et finalement la valorisation qui en est faite. Cette manière de procéder permet d'appréhender les places qu'occupent respectivement les quatre sous-systèmes (tableau 7-1) que nous avons déterminés, ainsi que les rapports qu'ils entretiennent. De plus, l'approche choisie, de type « RTV » (ressource-transformation-valorisation), présente d'indéniables avantages: d'une part, elle permet de transférer les enseignements tirés de l'étude de cas proposée ici à d'autres systèmes similaires, et d'autre part d'esquisser des pistes relatives à leur reproductibilité ainsi que les perspectives de développement pour la filière hydrothermique au niveau de l'agglomération genevoise.

sous-système	avant	après
lac	X	X
bâtiments connectés/connectables	X	X
réseau		X
quartier	X	X

tableau 7-1 Etude des sous-systèmes en fonction de l'implémentation du réseau GLN

Pour l'étude du système et en particulier pour le réseau GLN, cela se traduit en termes méthodologiques par une approche globale, tant sous ses aspects énergétiques, environnementaux que socio-économiques. Le suivi mis en place apportera donc les éléments nécessaires, par le biais de:

- campagnes de mesures: nombreuses, elles ont en grande partie été effectuées par le Groupe Energie, mais également par d'autres instituts partenaires,
- bases de données: un accès complet à la base de données servant à l'exploitation du réseau GLN (données du réseau et des bâtiments connectés) a été accordé par l'exploitant,
- développement de modèles: des modèles physiques ont été développés, tant pour l'étude de points liés au sous-système lacustre (rejet, potentiels énergétiques), aux bâtiments (simulation de connexion, modèle d'échangeur de chaleur) qu'au réseau GLN (modèle simplifié de réseau),
- mandats et expertises: l'étude fouillée de la connexion du bâtiment existant « B1 » au réseau GLN s'inscrit dans le cadre d'un partenariat pluriannuel établi entre SIG et l'Université de Genève (contrat spécifique « expertises thermiques »); à la demande de

SIG et de Merck-Serono, le suivi lacustre lié à la concession a été pris en charge par le Groupe Energie¹,

- benchmarking: la visite de deux importants systèmes hydrothermiques de référence existants sur le continent américain (Université de Cornell, Toronto) et la récolte de précieuses informations à leur sujet a permis d'effectuer des analyses comparatives avec le système genevois,
- recherches bibliographiques: certains aspects n'ont été traités que sous une approche théorique (p. ex. l'influence du rejet du système sur l'ichtyofaune),
- formation continue: dans le cadre de son mandat européen, le Groupe Energie a mis sur pied une formation concernant les aspects théoriques et techniques de la connexion de bâtiments existants à un réseau hydrothermique. Destinés aux ingénieurs impliqués par ces aspects, les cours dispensés ont permis de se confronter aux réalités auxquelles ces derniers faisaient face durant de la phase d'étude. En termes techniques et d'ingénierie de projet, les enseignements apportés se sont donc révélés fructueux.

Effectué sur plus de cinq ans, ce suivi s'est organisé en deux périodes: la première du 30 novembre 2005 au 29 novembre 2007 (avant la construction du réseau), la seconde du 30 novembre 2007 au 1^{er} mars 2011 (pendant et après sa construction). Les résultats issus de ce suivi permettent tout d'abord d'établir un état des lieux de référence avant l'implémentation du système, puis de confronter l'ensemble des impacts induits (positifs et négatifs) par ce système au cours des ses deux premières années de fonctionnement (juin 2009 à avril 2011).

Etant donné que ce type de système hydrothermique est innovant et peu documenté, la récolte de nombreuses mesures et l'analyse de son fonctionnement, de sa gestion et de ses implications (capacité réelle de substitution d'une production classique par une production renouvelable) s'est avérée nécessaire:

- premièrement, le lac constituant à la fois la ressource énergétique et le principal milieu naturel pouvant être impacté par le système, un suivi fouillé a été mis en place,
- deuxièmement et du point de vue des bâtiments, la philosophie de connexion étant nouvelle pour les milieux de l'ingénierie, la manière dont est transformée cette ressource puis son utilisation sont fondamentales et ont nécessité une analyse rigoureuse,
- troisièmement et compte tenu de l'évidente nécessité d'une utilisation rationnelle de l'énergie, sa valorisation (types de prestations, principes de régulation) et l'évaluation de ses coûts ont mérité une attention toute particulière,
- finalement et à l'échelle du territoire, ce système énergétique de réseau s'intègre dans un quartier essentiellement administratif: l'évaluation de son impact sur les consommations globales d'eau (énergie/matière) et d'énergie (électricité) a donc également été effectuée.

Pour résumer, retenons que la démarche méthodologique s'appuie sur une approche interdisciplinaire et s'organise autour d'un retour d'expérience qui assure une compréhension holistique d'un système énergétique existant. Cette manière pragmatique d'aborder la complexité permet non seulement de mieux comprendre les réalités de ce système, mais également la création de connaissance connexes, tant du point de vue académique que de celui de l'ingénierie.

¹ Le suivi de la faune et flore lacustre a été sous-traité au bureau d'ingénieurs genevois GREN Sàrl

7.2 Types de mesures et de données

Les mesures sont effectuées selon trois fréquences: en continu, mensuellement ou ponctuellement. Les mesures suivantes sont effectuées en continu (*tableau 9-1*):

paramètre	sous-système	source
courant	lac	Groupe Energie
température	lac, réseau	
météorologie (température, humidité, vent)	air	aéroport de Genève, Groupe Energie
niveau du lac, débit et température du Rhône	lac, Rhône	OFEV ¹
chlore	réseau	Merck-Serono, Groupe Energie
débit, température	réseaux, bâtiments	SIG, utilisateurs GLN, Merck-Serono

tableau 7-2 Mesures en continu; sous-systèmes impliqués et source des mesures

Les mesures suivantes sont effectuées mensuellement ou bimensuellement sur le lac:

paramètre	source
température pH, phosphore, chlore, transparence, turbidité	Groupe Energie
courant	
macrophytes, macrofaune benthique	GREN Sàrl

tableau 7-3 Mesures mensuelles sur le sous-système « lac » et source des mesures

7.3 Suivi du lac

Pour le sous-système lacustre, le système hydrothermique est susceptible d'induire trois types d'impacts environnementaux qui doivent être identifiés et évalués:

- physiques: modification des régimes thermiques naturels et de la transparence de l'eau,
- chimiques: modification de la qualité des eaux naturelles,
- biologiques: modification de l'habitat et des peuplements végétaux et animaux.

Ce suivi est donc basé sur des mesures physico-chimiques effectuées dans le Petit-Lac et sur le réseau, ainsi que sur un suivi de la faune et flore littorale. Le détail des méthodes figure en *annexe 2*, la planification complète des mesures et analyses en *annexe 3*.

7.3.1 Emplacements

L'eau est pompée dans le lac à 2'800 m en amont de la station de pompage, à 37 m prof. (*pompage*); en arrivant à la station (avant les filtres: *entrée_{av}*), elle est filtrée séparément pour chaque réseau (après les filtres: *entrée_{ap-MS}* et *entrée_{ap-GLN}*); après utilisation, ces eaux retournent à la station de pompage (*sortie_{MS}* et *sortie_{GLN}*) avant d'être rejetées en commun dans le lac (*fig. 7-1, tableau 7-4*).

¹ Office fédéral de l'Environnement

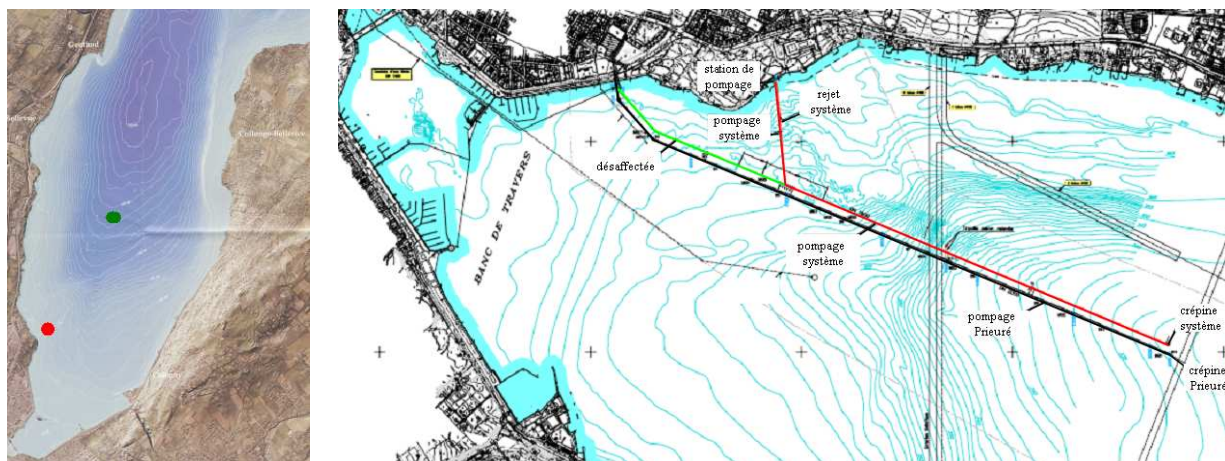


fig. 7-1 Emplacements du pompage (en vert, à gauche), du rejet (en rouge, à gauche) et des conduites lacustres du réseau GLN (en rouge, à droite)

Paramètre	X	Y	prof. [m]
pompage (4)	501'962	121'738	37
rejet (14)	500'895	119'904	4.5
entrée_{av}, entrée_{ap-MS}, entrée_{ap-GLN}, sortie_{MS}, sortie_{GLN}	station de pompage (13)		

tableau 7-4 Points de mesure sur réseau (coordonnées suisses)

Quatre bouées instrumentées sont également installées (fig. 7-2, tableau 7-5): la première au point de référence (350 m en amont du rejet), la seconde à 2.25 m en aval du rejet (par rapport au sens du courant), la troisième bouée à environ 800 m du rejet (bouée de courant), et la quatrième dans la zone du pompage (en vert, fig. 7-1, à gauche). La description détaillée de ces installations se trouve en annexe 2.

	X	Y	prof. [m]
B-rej (rejet) (1)	500'903	119'903	5.2
B-réf (référence) (2)	501'076	120'191	6.3
B-courant (3)	501'476	120'419	14.3
B-pompage (4)	501'962	121'738	39

tableau 7-5 Coordonnées suisses et profondeur du lac à l'emplacement des bouées de mesure



fig. 7-2 Emplacements des bouées de mesures numérotation des principaux emplacements de mesure (en bleu); conduites du réseau GLN (en rouge) et emplacement de son rejet (en bleu clair)

Des mesures sont également effectuées sur l'intégralité de deux cercles (rayons de 25 et 50 m) centrés sur les bouées de référence (*réf 25, réf50*) et de rejet (*rej25, rej50*) (fig. 7-2).

Pour les mesures effectuées aux bouées *B-courant* et *B-pompage* ainsi qu'aux points de mesure mensuels, une précision de positionnement de ± 10 m est retenue. Cette erreur provient à la fois de l'imprécision des positions délivrées par le GPS, des méthodologies observées pour la mise en place des bouées et pour les relevés mensuels *in situ*, ainsi que de la rotation des bouées autour de leur point d'ancrage. En revanche, la position de la bouée du rejet (*B-réf*; fig. 7-2) est plus précise, car la clarinette de rejet était visible lors de sa mise en place, ce qui a permis son positionnement exact (seule sa rotation induit une erreur de positionnement).

7.3.2 Mesures et méthodes

A/ Température

La température de l'eau est mesurée différemment selon les besoins (tableau 7-6):

- 2.25 m en aval du rejet (1), référence (2): en continu à 0.1, 0.5, 1, 2, 3, 3.5, 4 et 4.5 m prof. avec des thermocouples (type T, sensibilité de $\pm 1/100^\circ\text{C}$); la fréquence d'acquisition est de 10 secondes, celle de stockage de 15 minutes. Par sécurité, mesure parallèle en continu à 1, 2, 3, 4 et 4.5 m prof. avec des miniloggs Vemco (sensibilité de $\pm 1/100^\circ\text{C}$); la fréquence d'acquisition et de stockage est de 15 minutes,
- pompage (4), rejet (14): mesure en continu avec des miniloggs Vemco (sensibilité de $\pm 1/100^\circ\text{C}$) sur l'une des ouvertures du diffuseur de rejet et sur la crépine d'aspiration du pompage (37 m prof.); la fréquence d'acquisition et de stockage est de 30 minutes,
- pompage 10, 15, 20, 25, 30 (4): mesure en continu avec des miniloggs Vemco (sensibilité de $\pm 1/100^\circ\text{C}$) sur la colonne d'eau au point de pompage à 10, 15, 20, 25 et 30 m prof.; la fréquence d'acquisition et de stockage est de 30 minutes,
- 2.25 m en aval du rejet (1), référence (2), tam, tav: mesure ponctuelle (avril à septembre) avec une sonde multi-paramètres, sensibilité de $\pm 1/10^\circ\text{C}$) sur toute la colonne d'eau,
- rej25, rej50, réf25, réf50: mesure ponctuelle (avril à septembre) à 0.1, 0.5, 1, 2, 3, 3.5, 4, 4.5, 5 et 5.5 m prof. avec des thermocouples (type T, sensibilité de $\pm 1/100^\circ\text{C}$); la fréquence d'acquisition est de 0.1 seconde, celle de stockage de 1 seconde.

emplacement	matériel	fréquence	période	remarque
référence, 2.25 m en aval du rejet	thermocouple / minilog	1 mes./15 min 1 mes./30 min	avr. 06 – sept. 10	8 prof. / 5 prof.
pompage, rejet	minilog	1 mes./30 min		1 point de mesure
référence, 2.25 m en aval du rejet, tam, tav	thermocouple	mensuel	avr. 06 – sept. 10	colonne d'eau
réf25, réf50, rej25, rej50			avr. 09 – sept. 10	10 prof.

tableau 7-6 Synthétique des mesures de température

B/ Chlore, phosphore et pH

Le chlore résiduel actif (Cl_2disp) et total sont dosés *in situ* par colorimétrie (APHA, 1995) sur deux répliques; le phosphore soluble (PO_4^{3-}) et total sont dosés en laboratoire par colorimétrie (APHA, 1995); le pH est mesuré *in situ* par pH-métrie aux points suivants (tableau 7-7):

- 2.25 m en aval du rejet (1), référence (2): aux points de référence et à 2.25 m du rejet, à 0, 2 et 4 m prof.,
- rej25: à 25 m du rejet, à 0, 2 et 4 m prof. (uniquement pour le chlore),
- pompage (4), entrée_{av} (13): avant les filtres du système (eau du lac brute),
- entrée_{ap-MS} (13), entrée_{ap-GLN} (13), sortie_{MS} (13), sortie_{GLN} (13): après les filtres des deux réseaux (eau du lac filtrée).

emplacement	matériel	fréquence	période
réf, rej, pompage, entrée, entrée_{ap-MS}, entrée_{ap-GLN}, sortie_{MS}, sortie_{GLN}	colorimètre Lovibond (chlore); spectrophotomètre (phosphore); pH-mètre (pH)	mensuel	avr. 06 - sept. 10

tableau 7-7 Synthétique des mesures de chlore, de phosphore, de turbidité et de pH

C/ Transparence et turbidité

La turbidité est mesurée *in situ* par néphélométrie (APHA, 1995) sur deux répliques aux points suivants (tableau 7-8):

- pompage (4), entrée_{av} (13): avant les filtres du système (eau du lac brute),
- entrée_{ap-MS} (13), entrée_{ap-GLN} (13), sortie_{MS} (13), sortie_{GLN} (13): après les filtres des deux réseaux (eau du lac filtrée).

emplacement	analyse	matériel	fréquence	période
référence, 2.25 m en aval du rejet, entrée, entrée_{ap-MS}, entrée_{ap-GLN}, sortie_{MS}, sortie_{GLN}	turbidité	néphélomètre	mensuel	avr. 06 - sept. 10

tableau 7-8 Synthétique des mesures de la turbidité

D/ Courant

Le courant (vitesse et direction) est mesuré à plusieurs emplacements, de deux manières différentes selon les besoins (*tableau 7-9*):

- *B-courant* (3): en continu sur toute la colonne d'eau avec un courantomètre à effet Doppler (ADCP) déposé sur le sédiment; la fréquence d'acquisition est de 1 minute, celle de stockage de 30 minutes,
- 2.25 m en aval du rejet (1): mesure ponctuelle (avril à septembre) du courant de surface (0-2 m prof.); initialement positionné proche du rejet, le « palant de courant » dérive naturellement (*annexe 2*); la fréquence d'acquisition de la position (GPS embarqué) est de 10 secondes, celle de stockage de 1 minute.

emplacement	profondeur	matériel	fréquence	période
<i>B-courant</i>	colonne d'eau	courantomètre ADCP	1 mes./30 min	avr. 06 – mai 07
2.25 m en aval du rejet	surface (0-2 m prof.)	palant de courant	mensuel (1 mes/min)	avr. 06 - sept. 07

tableau 7-9 Synthétique des mesures de courant

E/ Macrophytes et macrofaune benthique

L'étude des macrophytes et de la macrofaune benthique a été sous-traitée à un bureau d'ingénieur spécialisé (GREN Sàrl). Les détails méthodologiques se trouvent en *annexe 2*.

Le point de référence est situé 40 m en amont du rejet, le site potentiellement impacté à 2 m en aval du rejet (1) (*tableau 7-10*):

emplacement	analyse	X	Y	fréquence	période
référence	macrophytes	500'894	119'969	juillet	2007, 2009, 2010
impacté (1)		500'900	119'905		
référence	macrofaune	500'894	119'969	février, août	
impacté (1)	benthique	500'900	119'905		

tableau 7-10 Synthétique des analyses des macrophytes et de la macrofaune benthique

- macrophytes: un quadrat permanent de 0.25 m² est fixé au fond du lac sur le sédiment à environ 5 m prof. (*fig. 7-3, à gauche*). Le recouvrement par les macrophytes et les algues filamenteuses est estimé à l'aide d'un aquascope; le recensement des espèces présentes, le comptage du nombre de tiges et la détermination de leur hauteur moyenne sont effectués par plongée autonome (GREN, 2007),
- macrofaune benthique: un substrat artificiel (cube de treillis de 8 dm³ rempli de cailloux) est immergé pendant huit semaines (*fig. 7-3, à droite*); lorsque les cubes colonisés sont récupérés, les organismes sont tamisés, dénombrés puis déterminés jusqu'à l'espèce (établissement de listes faunistiques).

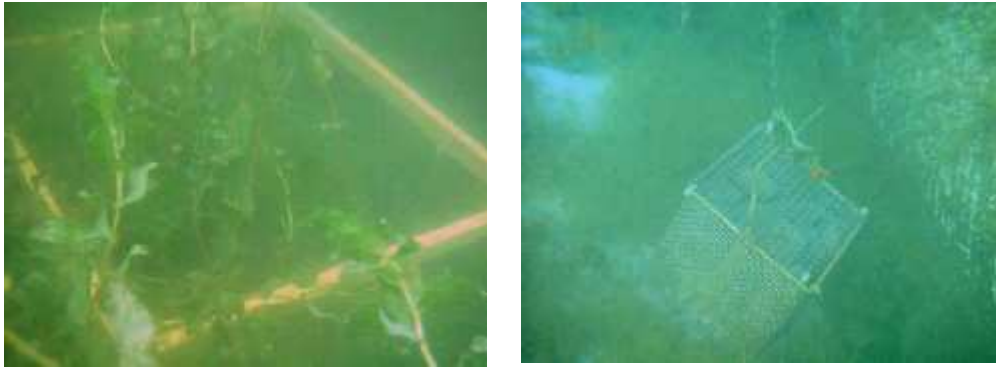


fig. 7-3 Quadrat de macrophyte (à gauche); substrat artificiel pour prélever la macrofaune benthique (à droite)

F/ Carbone organique dissout (DOC)

Ce paramètre n'a pas été mesuré pour les deux raisons suivantes:

- aucun additif organique n'a été ajouté dans les eaux pompées par le système,
- la concentration en DOC des eaux de rejet ne doit pas dépasser de plus de 5 mg/l celle des eaux pompées: étant donné que les concentrations en DOC des eaux profondes (pompage à 37 m prof.) sont bien inférieures (< 1 mg/l) à celles des eaux de surface (1-10 mg/l selon la saison), l'effet du rejet sur les concentrations naturelles en DOC des eaux de surface a été jugé très faible.

7.4 Suivi du réseau et des bâtiments

Pour le sous-système réseau, les données proviennent du système de contrôle centralisé du réseau GLN géré par l'exploitant¹. Les mesures sont acquises toutes les 10 secondes puis rapatriées automatiquement au centre de commande de l'exploitant (fréquence de stockage horaire). Les points de mesure sont situés à la station de pompage, dans les sous-stations de chacun des bâtiments connectés et sur les conduites terrestres du réseau (les sondes de mesure sont intégrées au système de contrôle centralisé). La *fig. 7-4* illustre l'ensemble des paramètres mesurés et leurs emplacements respectifs:

¹ Les paramètres issus de la base de données GLN sont confidentiellement mis à disposition depuis le 24 mars 2010 sous forme de fichiers horaires délivrés hebdomadairement, dans le cadre du projet européen TetraEner, puis de celui du partenariat pluriannuel établi entre SIG et l'Université de Genève

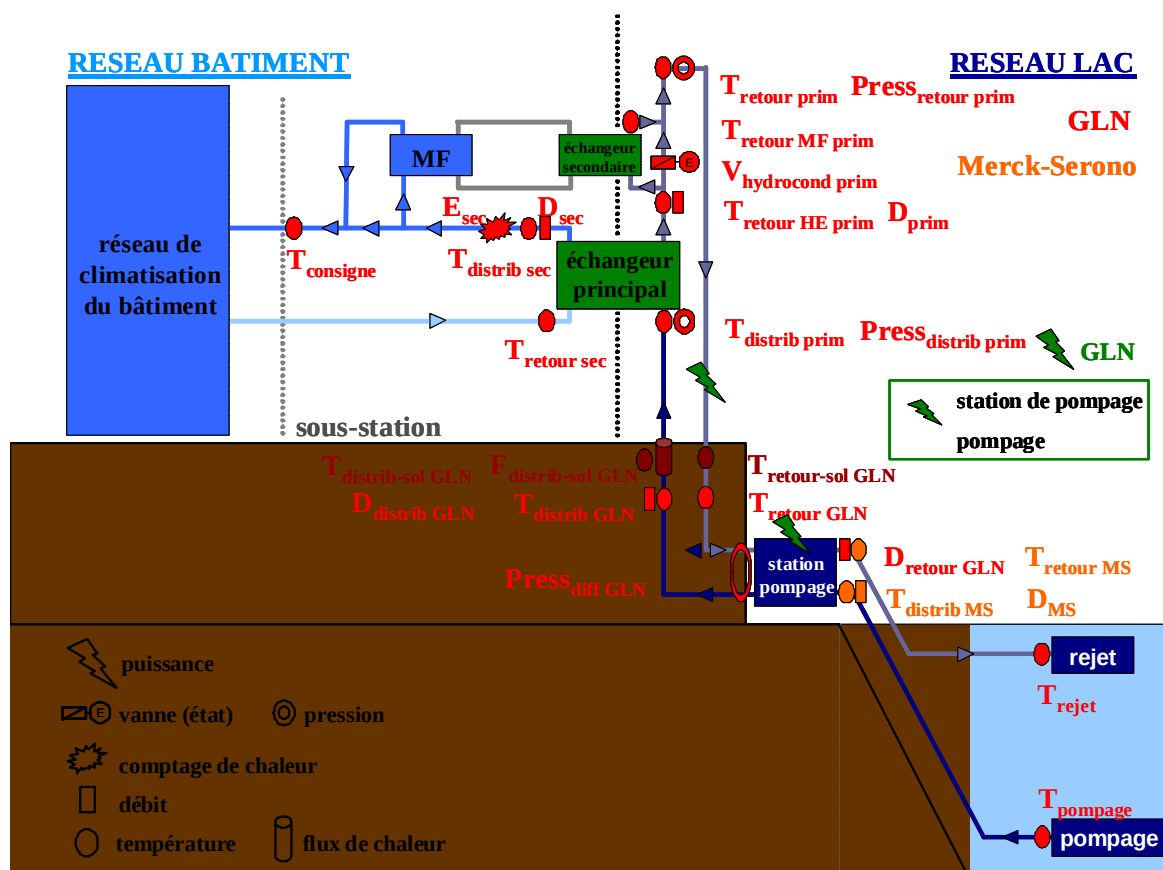


fig. 7-4 Points de mesures principaux et numérotation des emplacements de mesure (en bleu)

A/ Station de pompage (5, 12, 13)

Le réseau GLN a la possibilité d'être utilisé à la fois en boucle ouverte et fermée (boucle de circulation hivernale), alors que le réseau Merck-Serono ne fonctionne qu'en boucle ouverte. Les emplacements des paramètres mesurés sont les suivants (tableau 7-11):

emplacement	description de l'emplacement	paramètres mesurés
distrib_{GLN} (5)	départ dans le réseau GLN ¹ (dans la boucle de circulation hivernale)	$T_{distrib\ GLN}$, $D_{distrib\ GLN}$, $Press_{diff\ GLN}$
retour_{GLN} (12)	retour dans le réseau GLN ¹ (dans la boucle de circulation hivernale)	$T_{retour\ GLN}$, $Press_{diff\ GLN}$
retour_{GLN lac} (13)	pompage dans le lac ² (hors de la boucle de circulation hivernale), mesuré sur le retour	$D_{lac\ GLN}$
distrib_{MS} (13)	départ dans le réseau Merck-Serono	$T_{distrib\ MS}$, $D_{lac\ MS}$
retour_{MS} (13)	retour du réseau Merck-Serono	$T_{retour\ MS}$
pompes_{GLN} (13)	pompes du réseau GLN ($P_{el\ pompes}$)	consommation électrique
st-pompage (13)	station de pompage	

tableau 7-11 Points de mesure à la station de pompage

¹ Ces points sont situés dans la boucle de circulation hivernale (cf. pp. 171ss)

² Ce point est situé hors de la boucle de circulation hivernale (cf. pp. 171ss)

B/ Sous-stations (6-11)

Les emplacements des paramètres mesurés sont les suivants (tableau 7-12):

emplacement	description de l'emplacement	paramètres mesurés
distrib_{prim} (6)	avant l'échangeur principal (réseau primaire)	$T_{distrib\ prim}$, $Press_{distrib\ prim}$
retour_{HE prim} (9)	après l'échangeur principal (réseau primaire)	$D_{distrib\ prim}$, $T_{retour\ HE\ prim}$
retour_{MF prim} (10)	sortie de l'échangeur secondaire (réseau primaire)	$T_{retour\ MF\ prim}$, $V_{hydrocond\ prim}$
retour_{prim} (11)	après les échangeurs de chaleur, eaux de retour	$T_{retour\ prim}$, $Press_{retour\ prim}$
distrib_{sec} (7)	départ dans le bâtiment (réseau secondaire)	$T_{distrib\ sec}$, $D_{distrib\ sec}$, E_{sec}
retour_{sec} (8)	retour du bâtiment (réseau secondaire)	$T_{retour\ sec}$
consigne	départ dans le bâtiment (réseau secondaire)	$T_{consigne}$

tableau 7-12 Points de mesure dans les sous-stations

C/ Réseau terrestre

Un système de mesure permettant de déterminer les échanges thermiques entre les conduites du réseau et le sol a été mis en place en mars 2010 au moment des travaux de fouille. Quatre fluxmètres sont disposés autour de la conduite de distribution ($\varnothing=700$ mm) à la hauteur de la prise d'eau du Jardin Botanique (angle av. de la Paix – ch. des Mines), de même que 20 senseurs de température (thermocouples type T) dans le sol, de la surface jusqu'à 3 m prof.. Le dispositif de mesures est détaillé à l'annexe 4. Les mesures qui ont été effectuées ne sont pas exploitées dans la présente étude.

7.5 Suivi détaillé d'un bâtiment connecté (B1)

Le bâtiment B1 est l'un des quatre premiers bâtiments connectés au réseau GLN. Dans le cadre de leur connexion, le Groupe Energie a été mandaté par l'exploitant pour accompagner les utilisateurs dans cette démarche, afin de les conseiller sur les points essentiels dont il faut tenir compte. La méthodologie de cette étude est détaillée au chapitre 9.2.4.

7.6 Suivi au niveau du quartier

L'implantation du réseau GLN est également évaluée au niveau du quartier (fig. 6-1, fig. 6-8). Les consommations d'énergie (gaz, électricité) et d'eau de chaque preneur sont mises à disposition de manière confidentielle par SIG.

L'évolution de ces consommations annuelles (1^{er} avril au 30 mars) est analysée sur cinq ans (2006-2011) au niveau du quartier, pour cinq catégories de bâtiments: bâtiments liés au réseau GLN (connectés ou dont la connexion est planifiée; tableau 9-1), bâtiment abritant des organisations internationales, immeubles résidentiels, bâtiments dévolus à des activités commerciales et bâtiments propriété de la Ville ou de l'Etat de Genève.

Les consommations absolues ainsi que les indices de consommation (exprimés en fonction de la surface du bâtiment et de ses occupants) sont pris en compte. Les méthodes de détermination des surfaces de référence et du nombre d'occupants de chaque bâtiment sont détaillées en annexe 5.

7.7 Qualité des mesures et des données

Des mesures sont effectuées sur le lac, sur le réseau GLN et sur les boucles de distribution des bâtiments connectés. Des exemples de données issues de ces systèmes de mesures ainsi qu'une estimation de leur qualité (erreurs, incertitude) sont explicités ci-dessous.

7.7.1 Mesures sur le lac

A/ Exemples de mesures

L'évolution des mesures de température du lac permet de vérifier la cohérence de leurs niveaux et de mettre en évidence la dynamique lacustre hors et sous influence du rejet (fig. 7-5). Analysés en parallèle des mesures sur le réseau GLN (distribution, retour et rejet), les mesures sur le lac ont permis d'identifier différents phénomènes, comme les décalages temporels liés à la circulation des eaux dans le réseau, ou encore le réchauffement/refroidissement des eaux pompées durant leur parcours dans les conduites sous-lacustres.

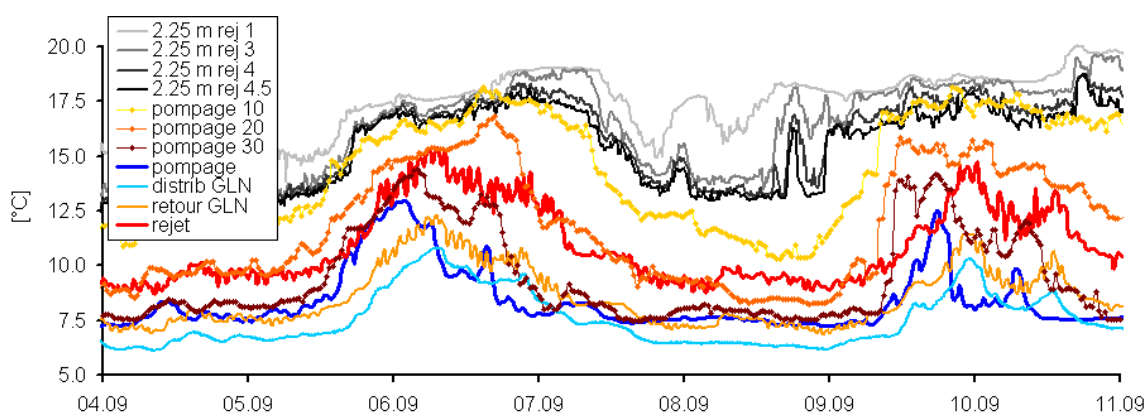


fig. 7-5 Températures du lac au point de pompage à 10, 20, 30 et 37 m prof. (4) et à 2.25 m en aval du rejet à 1, 3, 4 et 4.5 m prof. (1); températures du réseau GLN à la station de pompage (distribution (5) et retour (12)) et du rejet du système (14); données par 15 min du 4 au 11 septembre 2008

B/ Qualité des mesures

Les senseurs thermiques (thermocouples et minilog) ont été minutieusement étalonnés: chacun d'eux a été corrigé individuellement en fonction de sa valeur d'étalonnage. La précision absolue obtenue est meilleure que 0.1°C et la mesure est garantie avec une précision de $\pm 0.1^\circ\text{C}$.

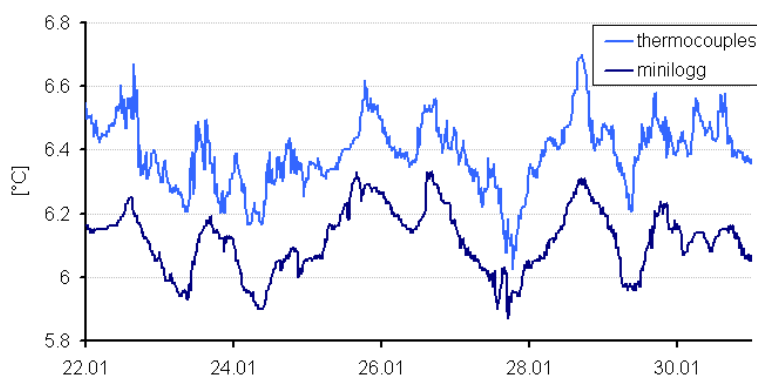


fig. 7-6 Différence de sensibilité entre thermocouple et minilog au point de référence à 3 m prof. (2); données par 15 min du 22 au 31 janvier 2009

Les thermocouples utilisés ont un temps de réponse très faible ($< 1/10$ sec) et sont très sensibles ($1/100^{\circ}\text{C}$): la méthode d'acquisition choisie (pas de temps, moyennage) permet d'obtenir une dynamique des températures très fine (*fig. 7-6*), même lorsque le lac est le moins dynamique du point de vue thermique (hiver). En valeur absolue, les deux senseurs utilisés montrent une différence de l'ordre de 0.2°C . La *fig. 7-6* montre qu'en milieu lacustre, les minilogs ont une sensibilité et un temps de réponse satisfaisants, suffisants pour la plupart des analyses menées.

C/ Utilisation des senseurs

Plus robustes et plus simples d'utilisation que les thermocouples, les minilogs ont donc été choisis pour les mesures en continu (*tableau 7-6*). En revanche, pour les mesures ponctuelles qui nécessitent un temps de réponse très court, les thermocouples ont été privilégiés:

- minilogs: leur sensibilité est considérée comme suffisante pour la description de la dynamique thermique au *pompage*, au point de *référence*, au *rejet* et à *2.25 m en aval du rejet*,
- thermocouples: les mesures effectuées au point de *référence* et à *2.25 m en aval du rejet* ont été exploitées pour valider les données acquises avec les minilogs. Le doublement des chaînes de mesure garantit l'obtention de données de haute qualité et ininterrompues: ils ont également été utilisés pour les mesures de températures sur les cercles à 25 et 50 m autour du point de référence (*réf 25, réf50*) et du rejet (*rej25, rej50*) (*cf. chap. 8.4.2*).

7.7.2 Données du réseau et des bâtiments connectés

Les données proviennent du système de contrôle centralisé du réseau GLN, géré par SIG. Leur qualité dépend à la fois de l'étalonnage des senseurs, mais également de la gestion de cette base de données (interruptions, rapatriement, moyennage, etc.).

A/ Exemples de données

L'évolution des données de températures, des débits primaires du réseau GLN et des boucles de distribution des bâtiments connectés (secondaires) permet de vérifier la cohérence de leurs niveaux et de mettre en évidence la dynamique de fonctionnement de ces bâtiments, mais aussi la manière dont le réseau est exploité (*fig. 7-7*).

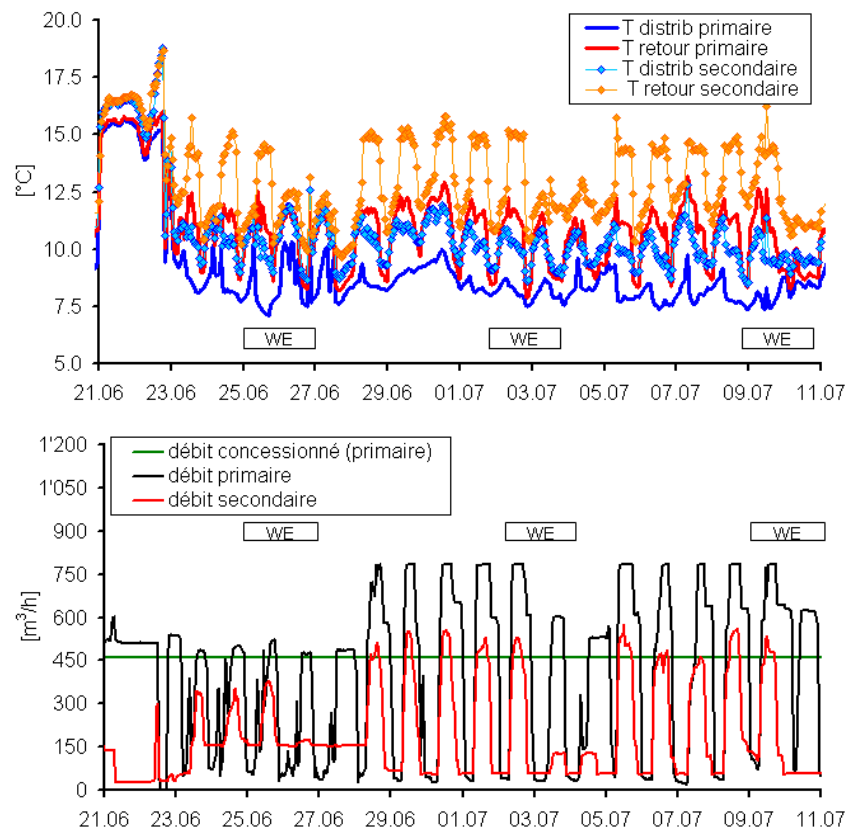


fig. 7-7 Températures et débits au niveau de la sous-station d'un bâtiment connecté: distribution et retour des côtés primaire (6, 9) et secondaire (7, 8) de l'échangeur; données horaires du 21 juin au 11 juillet 2010

B/ Qualité des données

Les senseurs de température sont étalonnés de manière à garantir une précision absolue de 0.2°C, suffisante pour l'exploitant. La précision relative des débitmètres est meilleure que 3 % (*information obtenue auprès du service d'ingénierie de SIG en 2011*). Les données sont moyennées sur une base horaire¹, rapatriées et collectées dans une base de données.

Etant donné que les écarts de température entre le retour et la distribution ($\Delta T_{\text{sec}} = T_{\text{retour}} - T_{\text{distrib}}$) observés au cours des deux premières années de fonctionnement sont souvent faibles, l'erreur sur l'énergie peut atteindre 10 %. Avant d'être analysées, la qualité et la cohérence des données ont donc été vérifiées de plusieurs manières et les artefacts de mesure éliminés manuellement:

- comparaison des données de température du système de contrôle avec des mesures de température effectuées personnellement au pompage et au rejet dans le lac (T_{pompage} , T_{rejet}),
- vérification de la cohérence des niveaux de température pour chaque sous-station par *cross-check*,
- comparaison avec des mesures spot de température à la station de pompage ($T_{\text{distrib GLN}}$, $T_{\text{retour GLN}}$, $T_{\text{distrib MS}}$, $T_{\text{retour MS}}$).

¹ Températures pondérées par les débits

C/ Vérification par bilan d'énergie

De manière à confirmer la cohérence globale des mesures, une vérification par bilans d'énergie est effectuée au niveau des sous-stations de chaque bâtiment connecté.

Référence: compteur de chaleur

Pour la facturation de l'énergie, tous les utilisateurs sont équipés d'un compteur de chaleur installé sur la boucle de distribution du bâtiment (secondaire). Sa mesure est considérée ici comme « mesure étalon », garantie avec une erreur relative inférieure à 3 % (*information obtenue auprès du service d'ingénierie de SIG en 2011*).

Températures et débits (secondaires)

Comparée à l'énergie comptabilisée par le compteur de chaleur, l'énergie calculée à partir des mesures de température et de débit issues du système de contrôle centralisé montre des différences faibles (*fig. 7-8*): elles proviennent essentiellement de problèmes liés à la gestion de cette base de données (interruptions, problèmes de rapatriement, moyennage, etc.):

- bâtiments B1, B2 et B3: les différences sont faibles, respectivement de 3.6, 1.5 et 0.6 %. Les données de débit et de température sont fiables,
- bâtiment B4: l'énergie calculée excède de 17 % l'énergie obtenue via le compteur de chaleur: cela est lié à des défauts de qualité des données de débit secondaire (il est bloqué à une valeur constante et élevée entre décembre et janvier: il y a probablement eu un problème de rapatriement).

Ainsi, l'énergie calculée est garantie avec une précision relative de 5 % pour les bâtiments B1, B2 et B3. Pour le bâtiment B4, elle n'est garantie qu'avec une précision relative de 17 %. Hormis celles du bâtiment B4, les données de débit et de température secondaires sont donc très fiables.

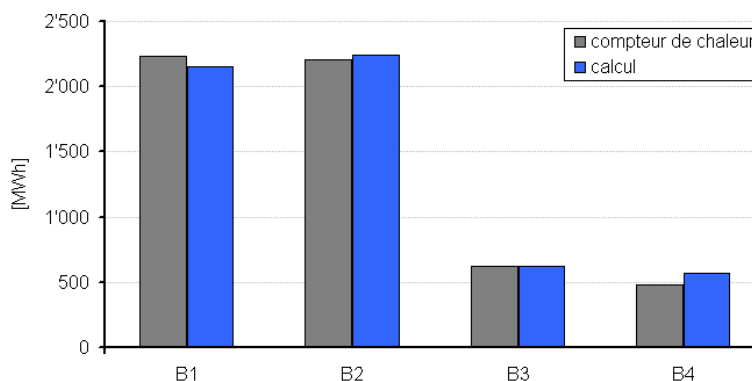


fig. 7-8 Différence d'énergie entre la mesure par compteur de chaleur et le calcul de l'énergie (7, 8); données horaires du 1^{er} avril 2010 au 1^{er} avril 2011

Primaire vs secondaire

Les énergies calculées des côtés primaire et secondaire de l'échangeur principal montrent des disparités relativement importantes, comprises entre 11 et 15 % (*fig. 7-9*). De manière générale, les écarts de température entre le retour et la distribution ($\Delta T_{\text{sec}} = T_{\text{retour}} - T_{\text{distrib}}$) constatés sont généralement bas, la plupart du temps inférieurs à 2°C: compte tenu d'une erreur de mesure de 3 % sur le débit et d'une précision de la mesure de température de l'ordre

de 0.2°C, l'incertitude sur l'énergie est de l'ordre de 10-15 %: elle est considérée comme acceptable pour les analyses menées dans le cadre de cette étude.

Pour les bâtiments B1, B2 et B3, la comparaison montre que l'énergie est surestimée côté primaire. Ces différences proviennent d'une part de l'erreur de mesure, mais aussi de la régulation non-optimale du débit primaire durant cette phase de mise en route: en particulier, le débit primaire oscille fortement jusqu'à des valeurs très élevées lorsque la demande de froid est faible; ce problème semble avoir été réglé dès janvier 2011. A cela s'ajoute quelques interruptions dans le rapatriement des données: par exemple, les mesures de températures secondaires des bâtiments B1 et B2 n'ont pas été rapatriées durant quelques semaines de forte demande de l'été 2010.

Pour le bâtiment B4, l'énergie secondaire est en revanche supérieure à l'énergie primaire. Cela s'explique principalement par le fait que la demande de froid de ce bâtiment est pour le moment très faible au regard du dimensionnement de ses installations. Cela dit, ce fonctionnement à charge très partielle induit des erreurs de mesure d'autant plus importantes.

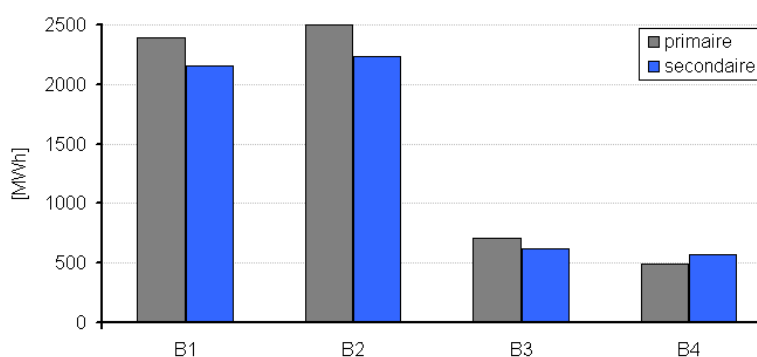


fig. 7-9 Energie calculée côtés primaire (6, 9) et secondaire (7, 8) de l'échangeur principal pour les quatre bâtiments connectés; données horaires du 1^{er} avril 2010 au 1^{er} avril 2011

8 Lac: ressource énergétique et impact environnementaux

Ce chapitre constitue la première pierre du retour d'expérience, en fournissant les informations nécessaires à l'étude du sous-système naturel impliqué, le lac (*tableau 7-1*). Après une description sommaire de ses régimes thermiques, l'analyse menée se focalise principalement sur la caractérisation de la ressource (*cf. chap. 8.2*), les conditions légales d'utilisation d'eaux naturelles à des fins énergétiques (*cf. chap. 8.3*), les impacts du système énergétique sur le lac (*cf. chap. 8.4*) ainsi que sur les potentiels énergétiques régionaux offerts par le Petit-Lac Léman (*cf. chap. 8.5*).

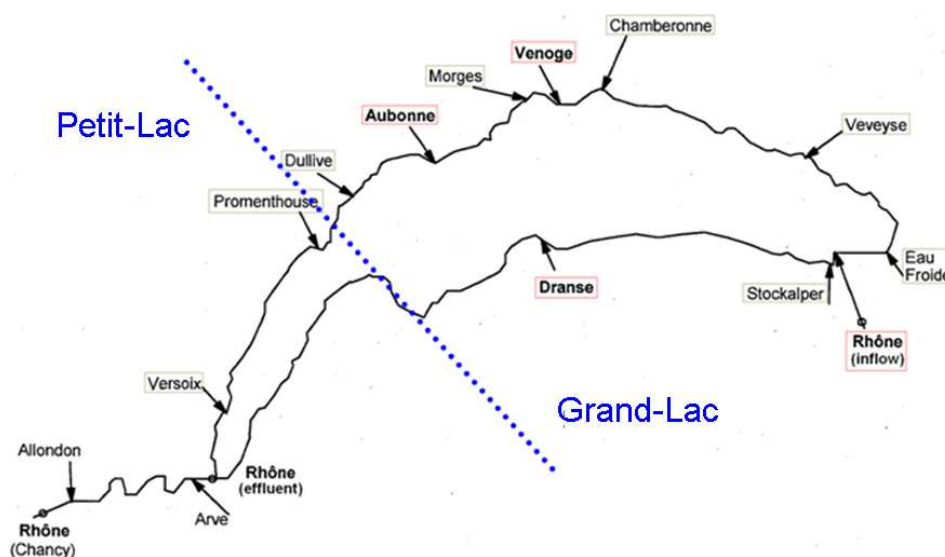


fig. 8-1 Cartographie du Lac Léman et de ses principaux affluents (Rhône émissaire à gauche, à Genève)

Le Lac Léman est le plus volumineux des lacs européens (89 km^3). Le volume du Petit-Lac est d'environ 4 km^3 , ceux du petit lac genevois et de la Rade de Genève respectivement 3.5 et 10 fois plus faibles. Les masses d'eau situées à des profondeurs supérieures à 40 m peuvent potentiellement constituer une ressource hydrothermique de bonne qualité (*cf. chap. 8.2*). Le volume de ces couches profondes est important et représente proportionnellement environ 25 % du volume total pour le Petit-Lac et le Petit-Lac genevois, seulement 5 % pour la Rade de Genève (*tableau 8-1*). Cette dernière portion de lac est en effet peu profonde et la majorité de sa surface est constituée de zones riveraines.

De par la configuration de son bassin, le Léman constitue un large volume d'eau hypolimnique: ses principaux affluents (le Rhône, la Dranse, l'Aubonne et la Venoge) y déversent annuellement un volume d'eau de 7.2 km^3 (débit moyen annuel 1963-2005). Le débit moyen de ces affluents et autres rivières (*fig. 8-1*) est de $227.5 \text{ m}^3/\text{s}$, celui du Rhône émissaire de $244.3 \text{ m}^3/\text{s}$ (moyennes 1986-2006, *Quetin, 2006*). Bien que les masses d'eau s'échangent continuellement entre Grand-Lac et Petit-Lac, on peut tout de même considérer le Petit-Lac comme une sorte de rivière, dans le sens où il est alimenté par le Grand-Lac et se vide dans le Rhône émissaire.

Le monitoring mené en continu sur quatre ans a permis une compréhension fine de la dynamique naturelle des températures du Petit-Lac. Il s'agit d'un point essentiel non seulement pour la caractérisation de cette ressource renouvelable, mais également pour la viabilité de systèmes hydrothermiques du type GLN. Mentionnons aussi que ces mesures en continu sur toute la profondeur du lac sont les premières à être réalisées au niveau du

Petit-Lac Léman, dont la dynamique thermique n'était connue qu'avec très peu de finesse et de détails.

Les couches de surface (épilimnion) dans lesquelles sont rejetées les eaux du système GLN – Merck-Serono ont également été étudiées, de manière à déterminer les éventuelles modifications thermiques induites, ainsi que les impacts potentiels que le rejet pourrait induire sur la faune et la flore riveraine.

A Genève, deux autres systèmes énergétiques similaires à celui du GLN – Merck-Serono sont actuellement en cours d'étude: leur implémentation et la pertinence de leur intégration sont en partie dépendants des potentiels offerts par cette ressource. Pour cela, une analyse du système hydrologique à l'échelle régionale s'avère nécessaire, les potentiels offerts par la ressource étant en effet liés aux impacts thermiques acceptables ainsi qu'aux autres installations hydrothermiques déjà présentes sur le Petit-Lac et le Rhône-émissaire.

	unité	Petit-Lac	Petit-Lac genevois	Rade de Genève
profondeur maximum	[m]	78	71	51
« surface-fond »	[km ³]	3.9	1.2	0.4
« épilimnion 0-5 [m] »		0.55	0.17	0.08
« couche tampon 5-40 [m] »		2.43	0.77	0.30
« couche ressource 40 [m]-fond »		0.95	0.23	0.21
surface	[km ²]	81.2	36.2	18.5

tableau 8-1 Caractéristiques limnologiques du Petit-Lac, du Petit-Lac genevois et de la Rade de Genève

8.1 Description des régimes thermiques du Petit-Lac

8.1.1 Profils saisonniers de la fosse lacustre

Au cours d'une année, la température de la couche lacustre superficielle suit globalement la température extérieure (fig. 8-2). Pendant l'hiver, la température des eaux de surface est constante (environ 6°C), en moyenne légèrement plus élevée que celle de l'air extérieur. Au printemps, la température de l'eau augmente, mais moins rapidement que celle de l'air extérieur (inertie thermique du lac; situation inverse à l'automne). Entre avril et octobre, lorsqu'il y a des chutes ou des augmentations importantes et rapides - de l'ordre de 24 h - de la température extérieure, la température des eaux de surface observe la même tendance, mais à nouveau de manière décalée dans le temps.

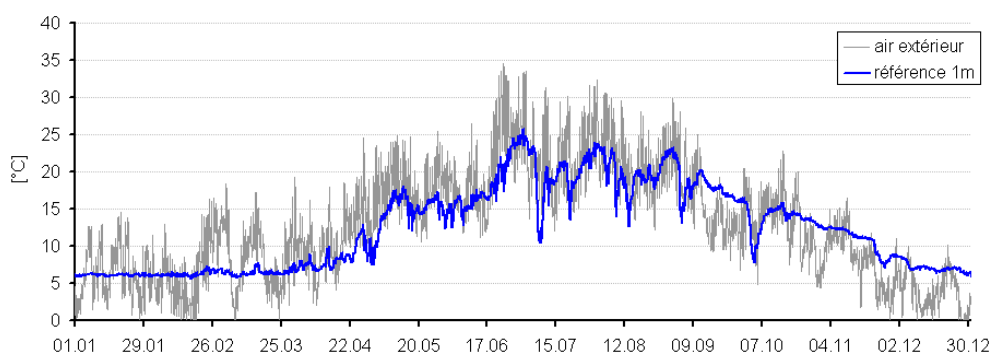


fig. 8-2 Températures extérieures et du lac à 1 m prof. au point de référence (2); données horaires 2008

Sous des latitudes tempérées, les lacs profonds comme le Léman montrent des motifs saisonniers typiques de stratification thermique (*fig. 8-4*). De manière générale, la température du lac est déterminée par la radiation, les caractères optiques (couleur), l'évaporation, le vent et les courants qui en résultent, la pluie, les seiches, donc également la topographie du bassin. En réponse à des changements de ces paramètres, la température des couches de surface suit la température extérieure au cours de l'année (*fig. 8-2*). La température de l'eau diminue avec la profondeur et est le facteur responsable de la stratification du lac par densité (maximum à 4°C).

Sa dynamique annuelle classe le Léman dans la catégorie des lacs monomictiques chauds, pour lesquels une période de mélange hivernal alterne avec une période de stratification estivale: leurs durées et intensités respectives peuvent varier selon les conditions météorologiques. En période chaude, c'est un lac à trois couches clairement superposées (*fig. 8-3*): l'épilimnion (couche supérieure chaude), le métalimnion ou thermocline (couche intermédiaire où se trouve le gradient thermique) et l'hypolimnion (couche inférieure froide).

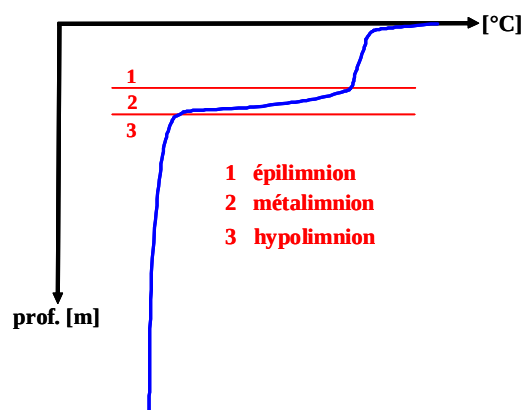
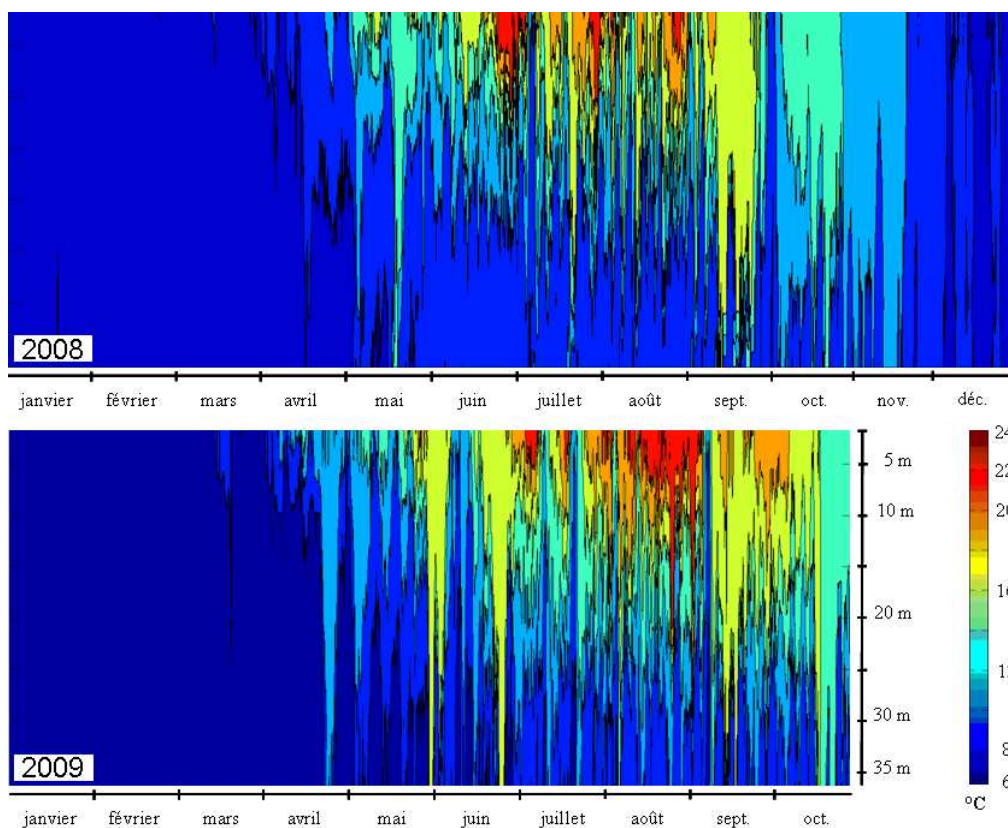


fig. 8-3 Profil thermique et zones thermiques d'un lac monomictique à trois couches (p. ex. Lac Léman)

La compréhension de la structure thermique lacustre et de sa dynamique est un point fondamental pour l'utilisation du lac en tant que ressource thermique. Cette dynamique est similaire mais non-identique selon les années (*fig. 8-4*):

1. période froide (janvier-mars): au début du cycle annuel, la température hivernale de l'eau est relativement uniforme sur toute la colonne d'eau. Sans stratification par densité, les vents sont capables de mélanger les eaux sur toute la colonne (oxygénation des couches profondes par brassage hivernal). La température est de l'ordre de 5-6°C mais peut varier d'une année à l'autre,
2. période de transition printanière: lorsque l'énergie solaire s'accroît, le lac absorbe de la chaleur: les couches de surface commencent à se réchauffer et deviennent moins denses que les eaux plus profondes situées en dessous de la zone photique (limite à env. 10 m prof.). En avril, la stratification thermique n'est pas encore très marquée et la quantité d'énergie nécessaire pour vaincre la stratification n'est pas très importante: en fonction des conditions météorologiques, le lac alterne entre des conditions isothermes ou stratifiées,

année



été

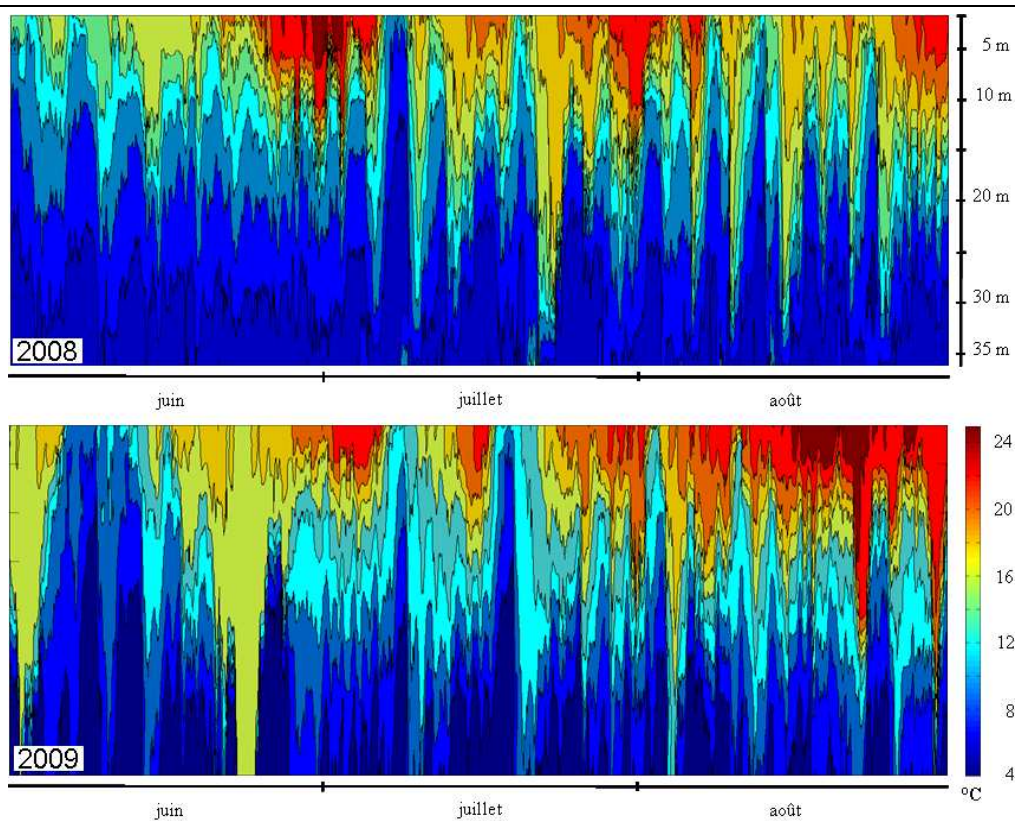


fig. 8-4 Température du lac au point de pompage à 1, 2, 3, 4, 4.5, 10, 15, 20, 25, 30 et 37 m prof. (4)¹ ; données horaires pour les années 2008 et 2009 (en-haut); focus sur les mois de juin, juillet et août (en-bas)

¹ Les températures à 1, 2, 3, 4 et 4.5 m prof. sont issues des mesures effectuées au point de référence (2)

3. période chaude: de mai à juin, la stratification s'établit plus nettement et la colonne d'eau se divise en trois parties: la partie supérieure (épilimnion) est chaude, tandis que la partie inférieure (hypolimnion) est froide; ces deux couches sont séparées par une couche de transition, le métalimnion, dans laquelle s'établit un fort gradient thermique appelé thermocline. De juin à septembre, la stratification est importante et empêche le mélange de ces différentes couches. Toutefois, des conditions météorologiques particulières permettent aux couches chaudes de surface de « plonger » plus en profondeur, réchauffant ainsi ponctuellement l'hypolimnion¹,
4. période de transition automnale: à partir de septembre-octobre, le lac absorbe de moins en moins d'énergie par sa surface: elle commence donc à se refroidir. De faible épaisseur au début de la saison chaude, la thermocline va peu à peu s'épaissir et plonger vers les couches plus profondes (dispersion de l'énergie solaire accumulée dans la colonne d'eau durant toute la période chaude). Les couches de surface se refroidissent jusqu'au mois de décembre, où la température de la colonne redevient à nouveau quasiment uniforme.

De manière générale, la stabilité thermique du Petit-Lac Léman est durable tout au long de la saison chaude: le métalimnion, avec sa thermocline, s'établit de manière saisonnière en absorbant de grandes quantités d'énergie. Cette stabilité thermique peut toutefois être ponctuelle dérangée par un forçage externe, qui doit être considérable¹ (*Lemmin et al., 2005b; cf. chap. ci-dessous*).

8.1.2 Variabilité spatiale et temporelle

A/ Variabilité horizontale et verticale

La température du lac varie plus fortement verticalement qu'horizontalement.

- variations horizontales: les différences de température sont dues majoritairement à des phénomènes naturels (présence d'affluents, variations microclimatiques, vents, courants, seiches lacustres; *Ulmann, 2000*) mais également à des apports thermiques plus localisés, naturels ou liés à l'activité humaine, notamment des rejets thermiques industriels et d'installations de climatisation. Dans la partie aval du Petit-Lac (au niveau du pont du Mont-Blanc à l'extrémité de la Rade de Genève), les températures mesurées en rive droite sont, selon l'heure de la journée, entre 0.1 et 0.7°C plus élevées (0.2°C en moyenne) que celles mesurées en rive gauche (*Beauchamp, 2006*). De même, il a été observé que la température de la couche superficielle (1 et 2 m prof.) à 2.25 m en aval du rejet du système hydrothermique GLN – Merck-Serono est généralement légèrement plus élevée que celle du point de référence à la même profondeur, bien qu'ils ne soient distants que de 350 m. La zone du rejet, plus proche de la rive que le point de référence, a une colonne d'eau moins profonde et s'échauffe plus fortement (concept de ceinture ou de distribution concentrique des isothermes dans un plan d'eau: *Rossolim, 1957*),
- variations verticales: la température de l'eau du lac diminue avec la profondeur, mais sa stabilité augmente (*fig. 8-5*).

¹ Ces phénomènes de « pics de température » de l'hypolimnion sont détaillés au chap. 8.2

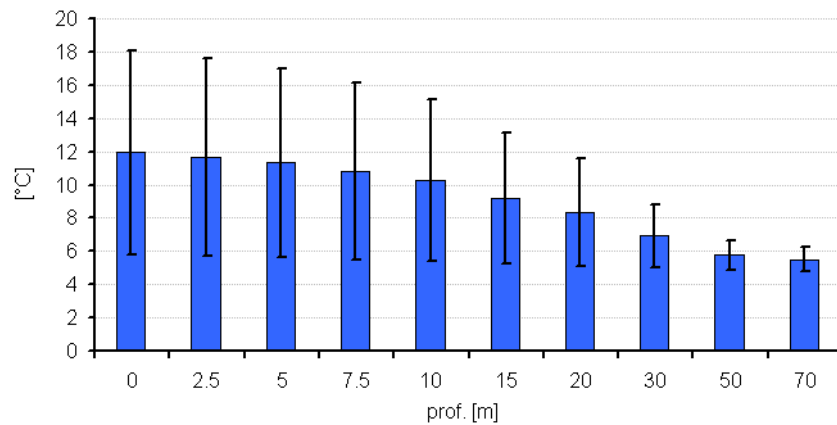


fig. 8-5 Variabilité des températures du Petit-Lac Léman avec leurs écart-types, en fonction de la profondeur; données mensuelles de 2005 à 2008 au point de référence GE3 (source: SECOE)

B/ Variabilité à court terme au niveau du Petit-Lac

Au cours d'une année, la température des masses d'eau peut rapidement fluctuer sur quasiment toute la profondeur du Petit-Lac: en effet, des modifications passagères de la stratification thermique générale peuvent s'établir en dépit de la stratification générale observée au cours de la saison chaude. Les principaux facteurs influents sont la dynamique de la température extérieure (donc celle des couches superficielles du lac) et des vents.

Pendant la période chaude et en dehors de ces événements ponctuels, la stratification du lac est stable, maintenue par le fort gradient de densité qui empêche ainsi le mélange des couches de surface et plus profondes. Lorsque la température de l'hypolimnion s'élève en s'approchant sensiblement de celle de l'épilimnion, cela signifie que des masses d'eau chaudes de surface ont pu rejoindre les couches plus profondes et s'y mélanger. Ces mouvements sont facilités lorsque la température des eaux de surface s'abaisse. Toutefois, la température des couches de surface reste dans la plupart des cas légèrement plus élevée que celle des couches profondes: cette stratification résiduelle doit donc être vaincue par une force externe. Ce sont les vents qui jouent ce rôle: ils doivent être suffisamment importants pour induire les deux types de mouvements convectifs (*Lemmin, 2005a*) à la base de ces phénomènes ponctuels de déstratification (*fig. 8-6*):

1. forçage par la Bise: dans le Petit-Lac, ce forçage amorce d'abord un transfert d'eau en direction de l'émissaire du Rhône. Le niveau de surface s'élève alors localement, mais l'abaissement de la température lié au vent conduit à un « downwelling » et un reflux d'une partie de l'eau dans la partie inférieure du Petit-Lac (plongée des couches de surface par forçage essentiellement en rive gauche (*fig. 8-7*),
2. ondes internes (ou seiches lacustres): c'est une oscillation des masses d'un plan d'eau autour d'un point d'équilibre qui se met en place après un fort événement de vent, ou encore le passage d'une dépression ou une zone de haute pression.

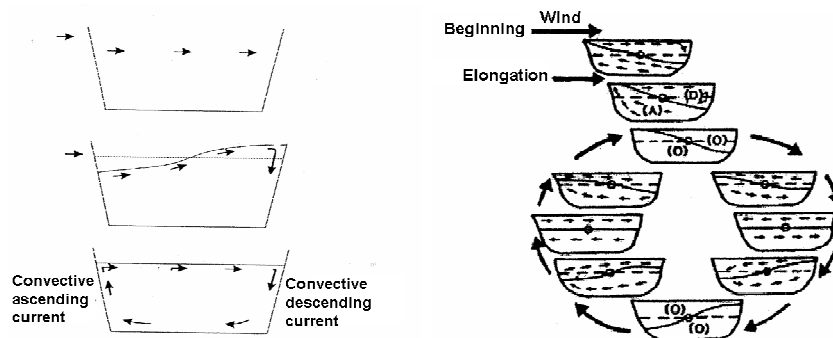
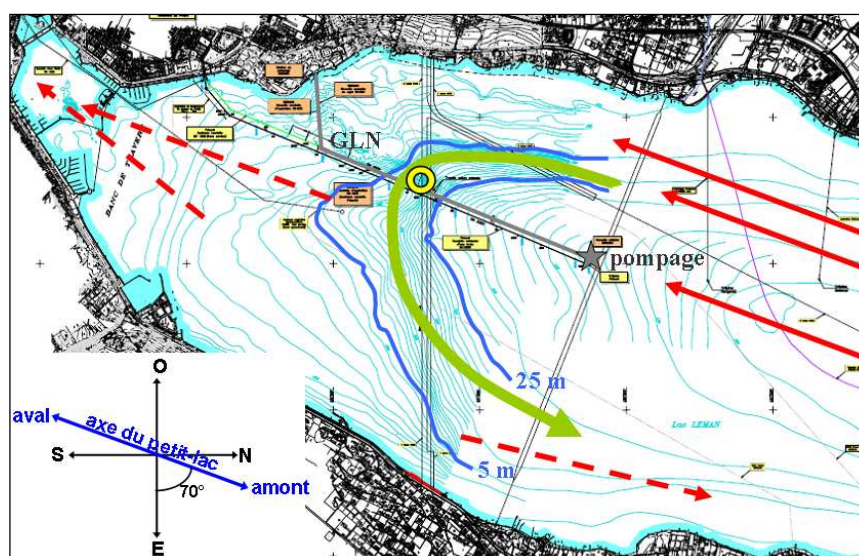


fig. 8-6 Mécanismes de forçage (à gauche) et des ondes internes (à droite) (Lemmin, 2005b)

Forçage par la Bise (vent du N-NE) ou Vent (vent du SW)

On peut distinguer un état non-perturbé (sans vent ou avec de faibles vents) d'un état perturbé durant lequel une forte Bise induit ce phénomène de forçage:

- état non-perturbé: en surface dans le Petit-lac, les courants lacustres principaux sont dirigés en direction de la Rade de Genève et les masses d'eau sont majoritairement évacuées par le Rhône émissaire (en rouge, fig. 8-7); des courants de retour sont également observés en rive gauche (Bétant et al., 1931). Ainsi, les eaux de surface ne sont pas contraintes de plonger vers les couches profondes. Plus en profondeur (20-25 m), les courants principaux descendants sont bien plus importants en rive droite-centre du lac qu'en rive gauche. Arrivée au niveau du talus, une partie des masses d'eau bifurque et est contrainte de remonter vers l'amont côté rive gauche,
- état perturbé (forte Bise): les courants de surface sont renforcés. Arrivées en Rade de Genève, les masses d'eau de surface se retrouvent en surpression (fig. 8-7), car la profondeur et la largeur du lac se réduisent de manière importante (effet d'entonnoir). Le Rhône n'ayant pas la capacité de les accueillir entièrement, un courant de retour supplémentaire s'installe au niveau du talus de la beine lacustre (en vert): les eaux de surface plongent en profondeur, en direction de l'amont du lac (flèche orange pleine). Durant la saison chaude, ces masses d'eaux plongeantes, plus chaudes que celles de l'hypolimnion, provoquent des pics de température d'amplitudes et de durées variables: ils sont fonction de l'intensité et de la durée de l'épisode de Bise.



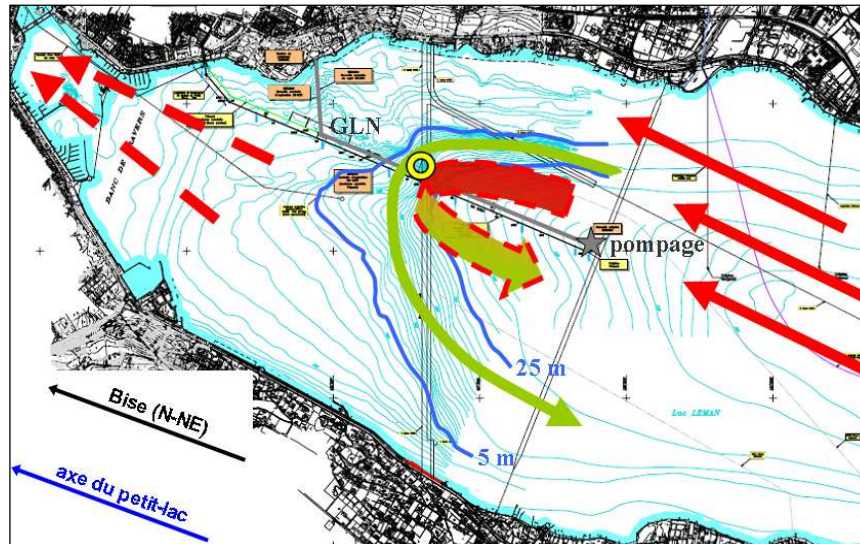


fig. 8-7 Direction des courant de surface (en rouge), à 10-25 m prof. (en vert) et convectifs plongeants (en rouge-vert); état non-perturbé (en haut) et forçage par la Bise (en bas); situation initiale (flèches pleines) et finale (flèches en traitillé); bouée de courant en jaune

Les régimes de Vent (vent du SW, opposé à La Bise) ont tendance à diminuer la vitesse des courants de surface en direction de la Rade de Genève (*annexe 7*). Il ne semble pas *a priori* avoir une influence similaire à La Bise sur ces mouvements de masse d'eau sur toute la profondeur du Petit-Lac. L'influence du Vent n'a pas été spécifiquement étudiée dans le cadre de cette étude, car il est apparu que ce sont les événements de Bise qui provoquent la grande majorité des augmentations de température de l'hypolimnion observés au point de pompage du système hydrothermique.

De manière à confirmer ces phénomènes, des mesures de courant ont été effectuées du 1^{er} mai au 30 septembre 2006 dans la zone du courant de retour (bouée de mesure en jaune, *fig. 8-7*), entre 2 et 12 m prof.. Leur analyse confirme la présence d'un courant de retour (à droite, *fig. 8-8*) entre le 15 et le 18 août 2006: il est responsable du pic de température qui est observé au pompage:

- les courants mesurés sont orientés dans l'axe du Petit-Lac (courant plongeant, en direction de l'amont du Petit-Lac),
- les courants de vitesses importantes (> 10 cm/s) sont bien plus représentés qu'en situation non-perturbée, pour laquelle la grande majorité des courants est en général de faible vitesse, < 5 cm/s).

En dehors de ces phénomènes ponctuels, les courants principaux (à gauche, *fig. 8-8*) que nous avons mesurés sont orientés en direction de l'est, car la bouée de mesure est située dans la boucle de retour permanente des couches profondes (en haut, *fig. 8-7*).

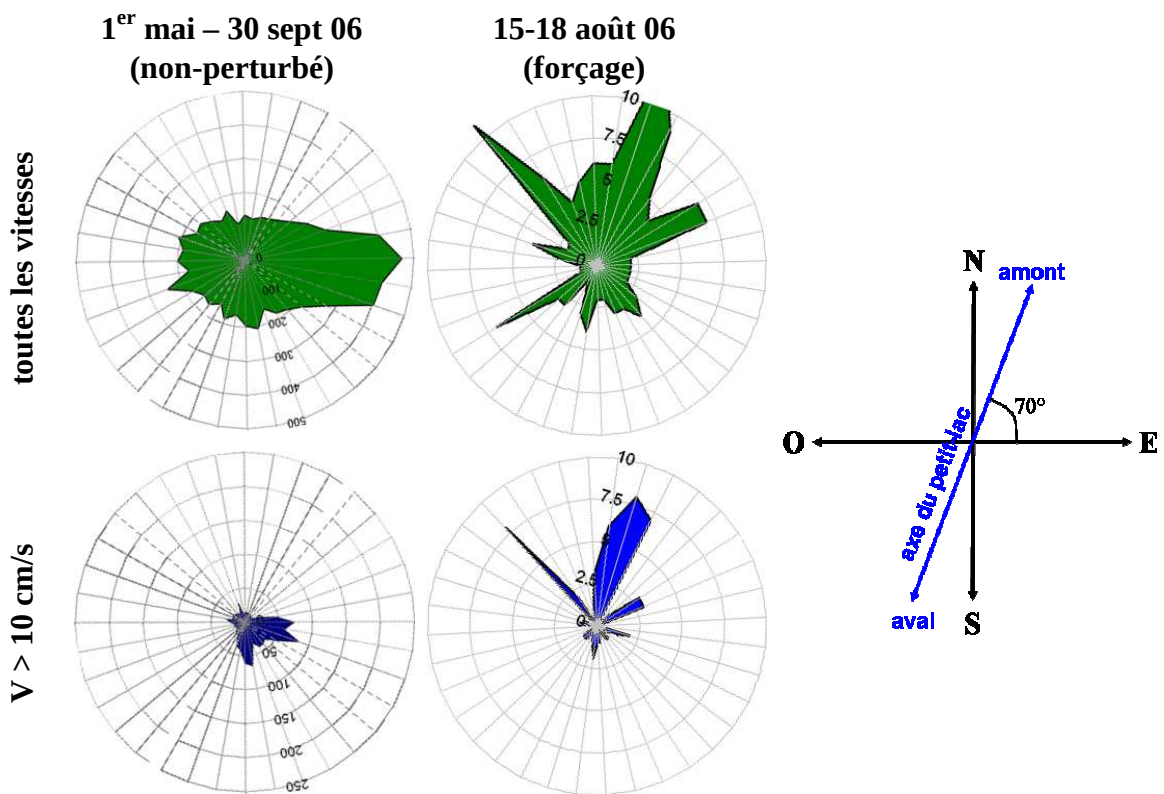


fig. 8-8 Distribution des courants à 8-9 m prof. (3), exprimée en nombre d'occurrences; état non-perturbé (à gauche) et forçage par la Bise (à droite); données par 30 min du 1^{er} mai au 30 septembre 2006

Ondes internes (seiches lacustres)

Couplé avec la fin d'un événement de Bise, ce mécanisme consiste en une oscillation de la thermocline autour de son point d'équilibre (fig. 8-6), ou autre changement de circulation ou de pression atmosphérique. Lorsque l'épisode venteux s'estompe, la surpression est libérée et la thermocline amorce son mouvement d'oscillation jusqu'à ce qu'une grande partie de l'énergie mécanique se soit dissipée (fig. 8-9). Selon l'intensité du phénomène, les couches plus chaudes situées au-dessus de la thermocline sont susceptibles d'atteindre des profondeurs plus ou moins importantes au niveau de l'hypolimnion, permettant ainsi son réchauffement ponctuel. A une profondeur donnée (p. ex. 37 m, celle du pompage du système), le réchauffement peut donc être d'une durée variable et d'un niveau de température plus ou moins élevé selon l'intensité du phénomène.

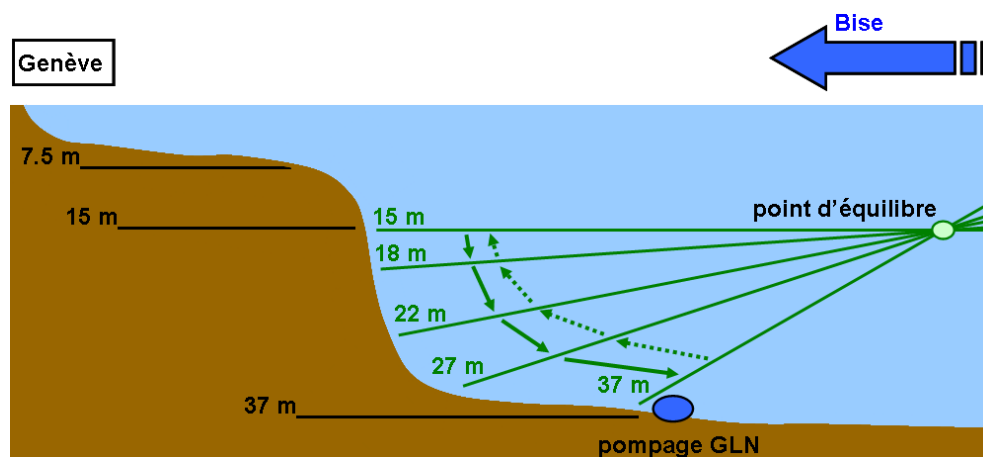


fig. 8-9 Mécanisme de l'onde interne au point de pompage (en vert: mouvements de la thermocline)

Ces événements surviennent lors de chutes brutales de la température extérieure pendant et après des épisodes de forts vents, c'est-à-dire lors de périodes dépressionnaires durant lesquelles les conditions météorologiques sont particulièrement instables (Viquerat *et al.*, 2008a). Il reste toutefois difficile d'attribuer l'apparition de ces phénomènes strictement à l'un ou à l'autre de ces deux mécanismes: généralement, les ondes internes succèdent aux forçages, mais il y a probablement quelques heures durant lesquelles ces deux mécanismes agissent conjointement.

C/ Variabilité à long terme

Depuis 1967, la température du lac augmente constamment, d'environ 0.5°C par décennie en surface et d'environ 0.25°C en dessous de la thermocline (35 et 70 m prof.; *fig. 8-5, table 8-1*). Une récente étude de Lemmin (2006) confirme cette tendance mais la nuance: ce réchauffement est effectivement plus fort pour l'épilimnion que pour l'hypolimnion, mais il est surtout plus marqué en hiver qu'en été. A l'avenir, la stratification thermique pourrait s'établir plus rapidement au printemps et allonger la période durant laquelle des seiches lacustres (ou ondes internes) peuvent s'établir (*fig. 8-6; Lemmin et al.*, 2005b).

prof. [m]	[°C/an] _{moyen}	augmentation 1967-2007 [°C]	moyenne 1968-1977 [°C]	moyenne 1998-2007 [°C]
0	+ 0.05	~2	11.8	13.1
35	+ 0.02	~0.9	7.1	7.7
70	+0.02	~0.9	5.8	6.4

table 8-1 Augmentation moyenne des températures de 1967 à 2007; données mensuelles à GE3 (point de référence du petit Lac Léman); source: SECOE

L'influence du réchauffement climatique reste à démontrer sur une plus longue période: d'une part, l'amplitude des variations interannuelles reste bien supérieure à celle de la variation à long terme observée de 1970 à 2000 (sous l'influence du réchauffement climatique); d'autre part, des gradients interannuels du même ordre de grandeur ont été observés durant la décennie 1960-1970, avant l'apparition d'effets liés au réchauffement climatique.

Il faut donc rester prudent sur l'interprétation de cette évolution. Outre le fait que la dynamique lacustre du Petit-Lac dépend fortement de celle du Grand-Lac, les effets des multiples facteurs anthropiques qui peuvent influencer l'évolution de la thermique du Léman restent actuellement difficiles à attribuer clairement:

- la température « naturelle » de l'affluent principal du lac, le Rhône, est depuis plusieurs décennies partiellement influencée par la gestion des débits liés à la production hydroélectrique: Wüest *et al.* (2004) ont montré que le turbinage des eaux induit un refroidissement moyen du Rhône de 1.6°C, mais que cette estimation ne reflète pas les variations saisonnières et journalières dues à la production hydroélectrique: les eaux du Rhône sont légèrement réchauffées en hiver, refroidies en été; de plus, un refroidissement journalier de 2-3°C est généralement observé (*fig. 8-10*),
- outre la production hydroélectrique, les autres influences anthropiques sont nombreuses et croissantes depuis les années soixante: multiplication des rejets thermiques industriels, nombreuses STEP, etc.

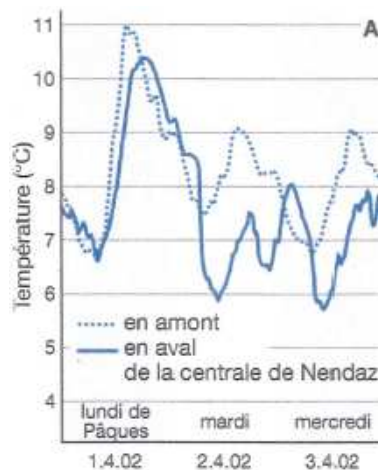


fig. 8-10 Température du Rhône en aval de Sion; données horaires du 1^{er} au 3 avril 2002 (Wüest et al., 2004)

8.1.3 Profils saisonniers de la zone littorale / épilimnion

La profondeur des eaux de la zone littorale n'excède pas 4 à 10 m (zone photique) et la pente y est généralement faible. La présence de lumière et la qualité des sédiments permettent l'implantation de la végétation aquatique.

De manière générale, la température de l'eau du lac est influencée par beaucoup de paramètres: température extérieure, ensoleillement, vent et courants (*cf. chap. 8.1.2*). Pour des eaux peu profondes comme la zone littorale, la température de l'eau évolue généralement de manière très dynamique au printemps et en été.

La variation de température naturelle dans la zone littorale concernée par le rejet du système hydrothermique n'excède jamais une valeur supérieure à 0.5°C (*référence, 2.25 m en aval du rejet*): cette valeur est considérée ici comme la variation thermique spontanée du milieu observable (*fig. 8-11; Viquerat et al., 2008c*). Bien plus rarement, des valeurs atteignant 2°C ont parfois été observées au printemps et en été durant certaines campagnes de mesures.

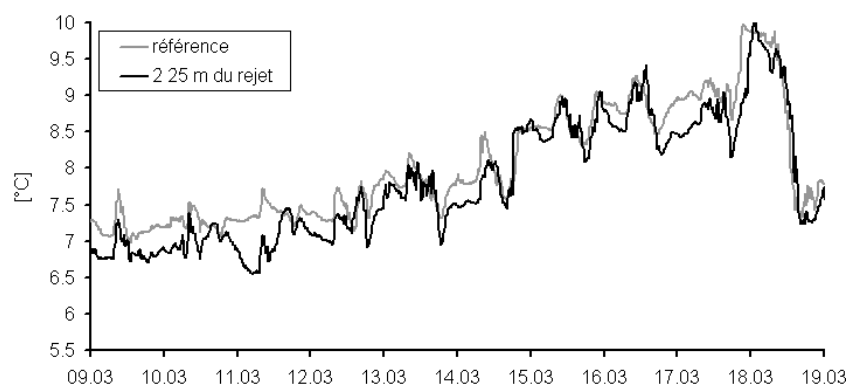


fig. 8-11 Température du lac à 4.5 m prof. au point de référence (2) et à 2.25 m en aval du rejet (1); données par 15 min du 9 au 20 mars 2007 (mesure avec des minilogs)

Contrairement à la thermocline saisonnière qui s'établit dans le métalimnion, la stratification thermique de l'épilimnion est réduite à de courtes périodes (quelques heures à quelques jours). Ces stratifications de surface sont donc fragiles et facilement dérangées par des forçages externes (p. ex. vents).

Seuls les résultats de l'année 2007 sont présentés ci-dessous: ils sont représentatifs de la dynamique thermique littorale. L'ensemble des résultats (mesures 2005 à 2010) se trouve à l'annexe 8.

A/ Printemps

Les températures d'eau couvrent un large spectre (8 à 20°C). Plusieurs signatures typiques de la dynamique thermique littorale sont clairement distinguées (fig. 8-12):

- **A**: la température de l'eau augmente avec la température d'air extérieur: en l'espace de deux semaines, la température moyenne de la colonne d'eau passe d'environ 10 à 18°C. L'établissement de la stratification thermique s'amorce lorsque les couches supérieures (jusqu'à 3 m prof.) se réchauffent (7 au 16 avril),
- **B**: la stratification thermique peut également s'établir lorsque les couches inférieures se refroidissent (26 au 30 avril), dans des conditions de diminution de la température extérieure mais de fort ensoleillement. L'écart de température vertical entre la surface et 4.5 m prof. peut devenir important, jusqu'à environ 6-7°C,
- **C**: cet écart de température vertical peut au contraire rapidement s'effacer lorsque le vent mélange la colonne d'eau (p. ex. 30 avril): dans ce cas, ce sont les couches inférieures qui s'élèvent au niveau de température des couches supérieures,
- **D**: la température de l'eau peut également chuter de plus de 8°C en quelques heures (p. ex. le 8 mai), sous l'action d'un fort vent qui ramène probablement des eaux froides depuis des couches plus profondes de la beine lacustre. Dans ce cas, ce sont des conditions de basses pressions qui prévalent (diminution de la température extérieure et faible ensoleillement).

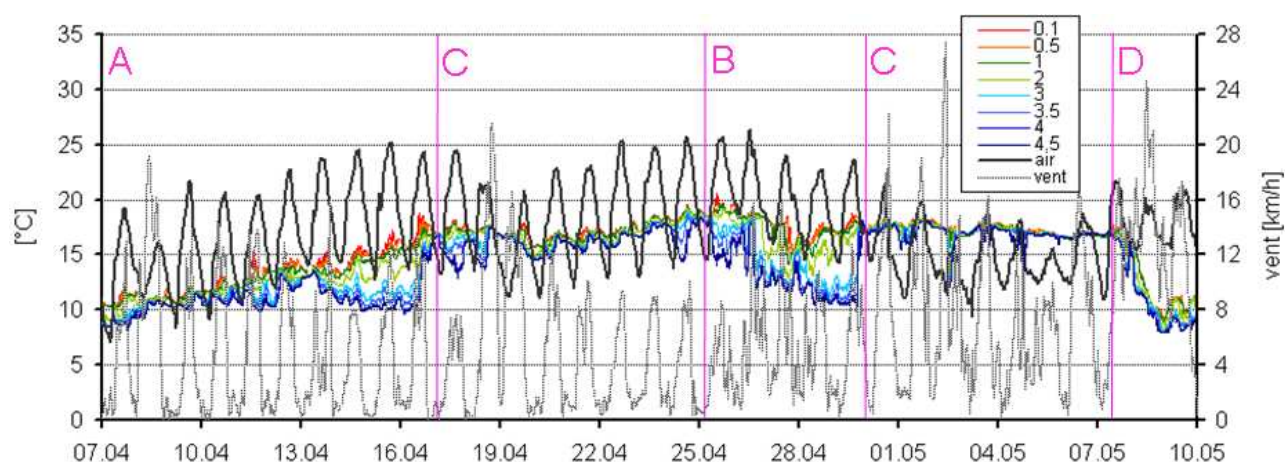


fig. 8-12 Températures au point de référence à 0.1, 0.5, 1, 2, 3, 3.5, 4 et 4.5 m prof. (2), de l'air extérieur et vitesse du vent; données horaires du 7 avril au 10 mai 2007

L'amplitude jour/nuit de la température extérieure, relativement importante, a une influence sur les températures de l'eau: les couches supérieures sont environ 1°C plus élevées le jour que la nuit (typiquement du 12 au 18 avril lors de journées bien ensoleillées).

B/ Été

Les températures d'eau sont plus élevées qu'au printemps et couvrent un domaine encore plus large (8 à plus de 26°C). Les dynamiques d'installation de la stratification thermique sont identiques à celles du printemps et la dynamique thermique de la zone littorale est tout aussi marquée qu'au printemps (fig. 8-13):

- **A:** en l'absence de vents soutenus, l'écart de température vertical entre la surface et 4.5 m prof. est généralement moins important qu'au printemps, de l'ordre de 2°C (27 mai au 2 juin: brises thermiques modérées en journée),
- **B:** cet écart de température vertical peut toutefois atteindre 6-8°C (5 juillet) lorsqu'une importante diminution de la température extérieure et un ensoleillement présent agissent conjointement: dans ce cas, ce sont les couches inférieures qui se refroidissent de manière très importante, probablement par une amenée forcée d'eaux froides depuis des couches plus profondes de la beine lacustre,
- **C:** la température globale de la colonne d'eau peut également chuter de plus de 10°C en une journée (7 juillet). Le phénomène est le même que celui décrit ci-dessus. Toutefois, s'accompagnant d'un épisode venteux plus long et soutenu ainsi que d'un faible ensoleillement (conditions de basses pressions), la colonne d'eau se déstratifie quasi totalement.

De manière générale, l'écart de température vertical entre les couches supérieures et profondes est moins marqué qu'au printemps, car les eaux estivales sont déjà bien chaudes: de ce point de vue, l'influence de l'ensoleillement est moins perceptible.

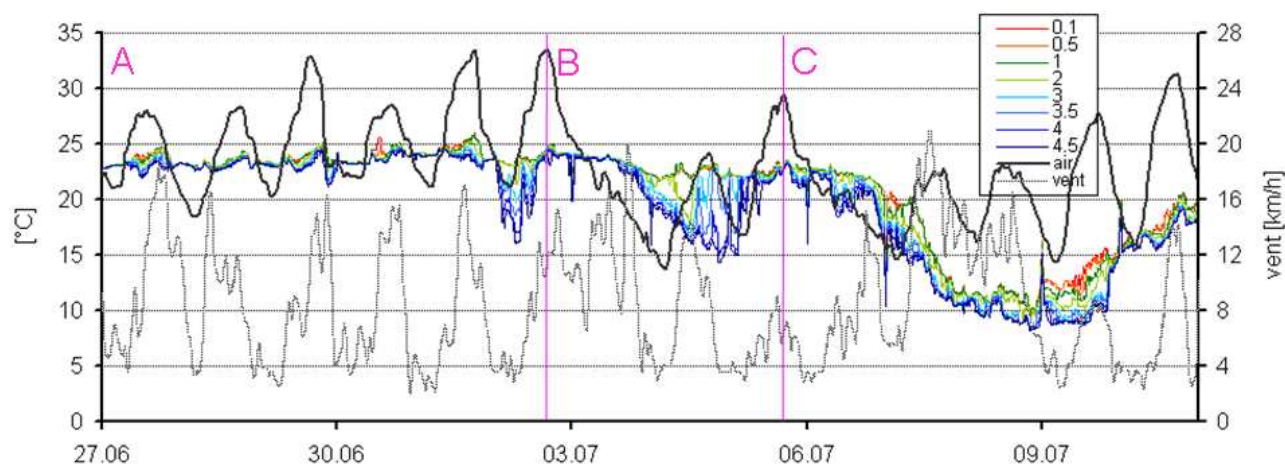


fig. 8-13 Températures au point de référence à 0.1, 0.5, 1, 2, 3, 3.5, 4 et 4.5 m prof. (2), de l'air extérieur et vitesse du vent; données horaires du 27 mai au 11 juillet 2008

8.2 Ressource

Le Grand-Lac n'a pas été étudié, car le système hydrothermique est localisé dans le Petit-Lac (cf. chap. 6.1). Ce sont ses couches profondes (hypolimnion) qui constituent la ressource hydrothermique: le monitoring pluriannuel mené a permis une compréhension fine de leur dynamique naturelle. Il s'agit d'un point essentiel non seulement pour la caractérisation de cette ressource renouvelable, mais également pour la viabilité de systèmes hydrothermiques du type GLN, car les niveaux de température d'exploitation sont relativement contraignants.

8.2.1 Température et stabilité de la ressource

8.2.1.1 Définition de la qualité de la ressource

La ressource hydrothermique est définie par son niveau de température et sa stabilité. Une ressource est considérée de bonne qualité lorsque son niveau de température est bas, inférieur à 9°C, et lorsqu'elle est stable: les pics ponctuels de température supérieure à 9°C pèjorent sa qualité.

Un indicateur de qualité de la ressource a été défini: il prend en compte à la fois le niveau et la stabilité de la température de la ressource, de même que l'intensité des besoins de froid. Cet indicateur s'exprime donc par la correspondance entre la température de la ressource et la température extérieure (cf. chap. 8.2.1.3).

8.2.1.2 Etude de la ressource au point de pompage du système

Le point de pompage de l'eau lacustre est situé dans la fosse du Petit-Lac (dispositif d'aspiration à 37 m prof.). La ressource thermique est donc composée des masses d'eau qui se trouvent à ces profondeurs. De manière à comprendre les phénomènes qui se mettent en place localement et qui peuvent influencer la qualité de la ressource, la température a été mesurée à différentes profondeurs sur toute la colonne d'eau du 21 avril 2006 au 8 octobre 2010. L'évolution de ces températures est illustrée ci-dessous pour la période chaude 2008, car elle est représentative des cinq années de mesures et constitue une situation moyenne (l'ensemble des graphiques se trouve à l'annexe 8):

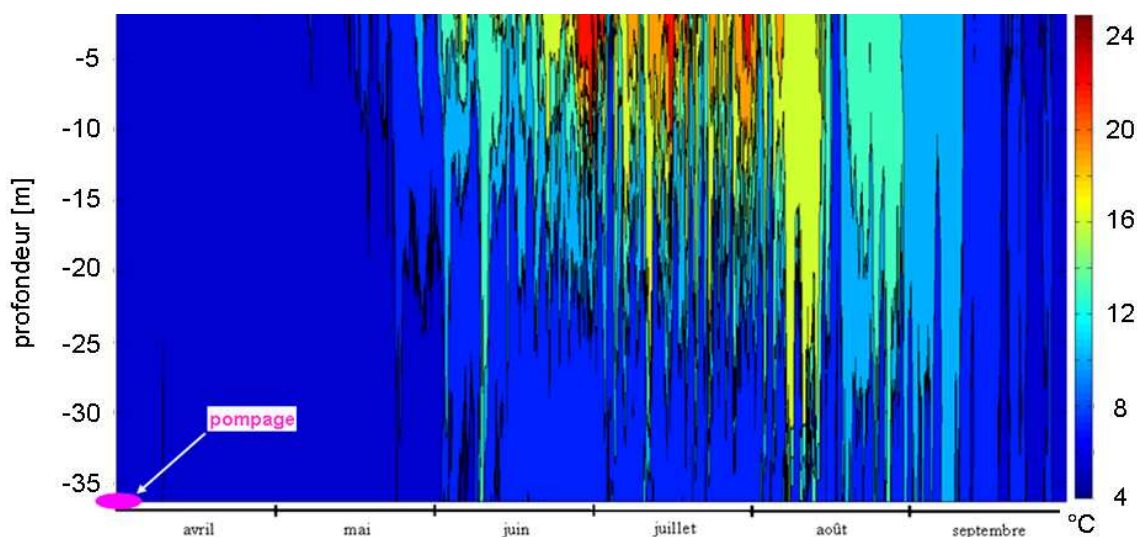


fig. 8-14 Température du lac au point de pompage à 1, 2, 3, 4, 4.5, 10, 15, 20, 25, 30 et 37 m prof. (4)¹; données horaires du 1^{er} avril au 30 septembre 2008

- tendances générales: la fig. 8-15 montre qu'à 37 m prof., la température est la plupart du temps comprise entre 5 et 10°C; c'est généralement au mois février qu'elle est la plus basse et stable (5-7°C). Dès le printemps, la température augmente très légèrement pour atteindre selon les années une température moyenne comprise entre 7 et 10.5°C en septembre. C'est en automne que l'enveloppe des températures est la plus large (présence de nombreux pics de température): sa limite supérieure diminue presque linéairement depuis début septembre jusqu'à la fin de l'année, en suivant la moyenne journalière de la température extérieure,
- comportements ponctuels: des pics de température peuvent apparaître ($T > 9^{\circ}\text{C}$)² et sont dus à des effets de courants; ils ne sont toutefois présents que durant la période de stratification thermique du lac, de mai à mi-novembre. Leur nombre, amplitude, durée et distribution varient selon les années: le plus grand nombre d'entre eux apparaissent au

¹ Les températures à 1, 2, 3, 4 et 4.5 m prof. sont issues des mesures effectuées au point de référence (2)

² Une température de 9°C a été choisie comme étant la limite inférieure à partir de laquelle on considère que les températures appartiennent à ces pics (cf. chap. ci-dessous)

début de l'automne, entre septembre et mi-novembre, puis en mai mais de manière moins importante. En été, ils sont généralement moins marqués, tant par leur nombre, leur niveau de température et leur durée: c'est durant ces mois chauds que leur présence pègre le plus la qualité de la ressource.

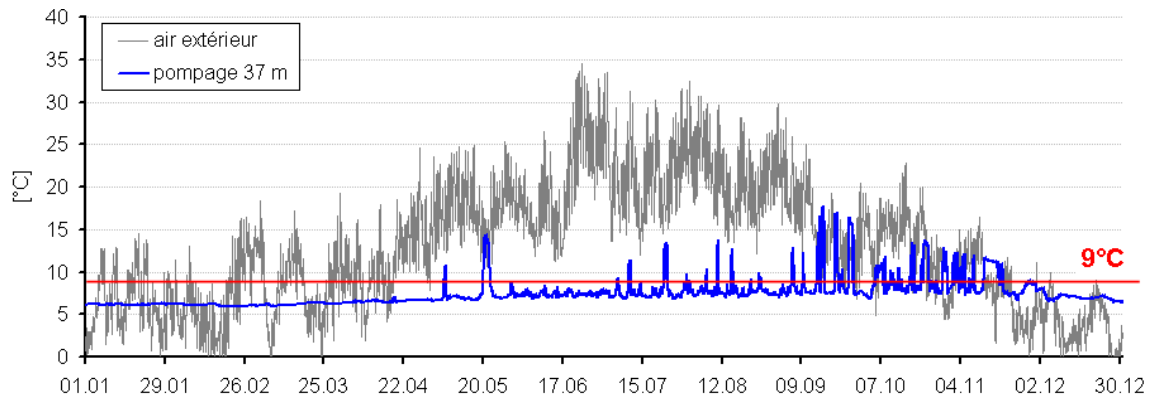


fig. 8-15 Températures de la ressource au pompage à 37 m prof. (4) et de l'air extérieur (données horaires 2008); limite inférieure des pics de température (en rouge)

En termes de qualité de la ressource, les quatre autres années mesurées montrent des dynamiques thermiques plus franches et assez marquées: ce sont surtout les pics de température qui modifient la qualité de la ressource, tant par leur nombre et leur durée. En revanche, les niveaux de température de la ressource restent relativement stables durant les mois chauds (juin, juillet et août), avec des valeurs comprises entre 7.2 et 8.3°C (valeurs moyennes; fig. 8-16) pour des températures extérieures moyennes comprises entre 20 et 22°C.

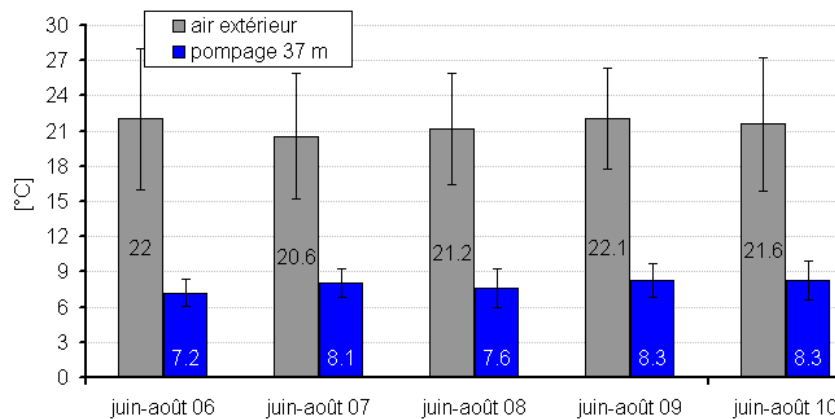


fig. 8-16 Température de la ressource au pompage à 37 m prof. (4) et température extérieure (valeurs moyennes et écart-types); données horaires 2006-2010

A/ Distribution des températures

D'avril à fin septembre 2008, plus de 90 % des températures de la ressource sont comprises entre 7 et 10°C, et ceci quelle que soit la température extérieure (fig. 8-17). Cette distribution est similaire pour les périodes chaudes des quatre autres années étudiées (Viquerat et al., 2008c, 2009a, 2010a, 2011a):

- $T_{\text{ext}} \leq 18^{\circ}\text{C}$: l'intervalle des températures extérieures pour lesquelles le niveau de température de la ressource devient moins bon ($T_{\text{pompage}} > 9^{\circ}\text{C}$) est d'abord celui compris

entre 12 et 18°C¹, puis celui en dessous de 12°C. C'est en effet en entre-saison (printemps et automne) que ces températures extérieures sont les plus fréquentes et que le lac n'est pas encore ou plus stratifié à son maximum. Ainsi, des couches de surface, plus chaudes, peuvent atteindre la couche profonde de la ressource,

- $T_{ext} > 18^{\circ}\text{C}$: le nombre d'heures pour lesquelles la température de pompage est supérieure à 9°C sont moins nombreuses: les bas niveaux de température et la stabilité de la ressource sont favorisés pour des températures extérieures élevées, lorsque la stratification thermique du lac est clairement acquise. Dans ces conditions, les couches de surface, thermiquement bien séparées de la couche profonde de la ressource, ne peuvent pas ou que très difficilement l'atteindre.

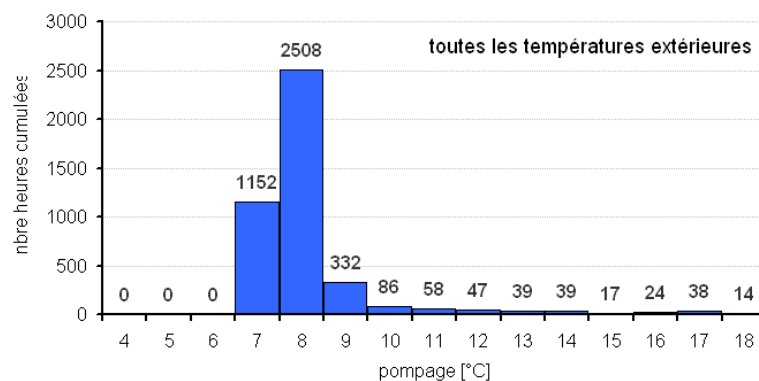


fig. 8-17 Distribution des températures de la ressource au pompage à 37 m prof. (4) exprimée en nombre d'heures; données horaires du 1^{er} avril au 30 septembre 2008

B/ Pics de température

L'apparition de ces pics dépend de l'emplacement et de la profondeur du pompage. La température de 9°C a été choisie comme étant la limite inférieure à partir de laquelle on considère que les températures de la ressource appartiennent à un pic de température: ce niveau est choisi sur la base du niveau moyen des températures de la ressource qui a été observé, ainsi que sur les niveaux requis pour l'alimentation d'un bâtiment en énergie de froid. La qualité de la ressource est donc moins bonne durant ces événements.

Le *tableau 8-2* résume le nombre total de pics apparus de 2006 à 2010 en fonction de leur durée² et de la tendance météorologique générale des saisons estivales correspondantes:

année	tendance météorologique	nbre de pics	nbre de pics > 12 h 1 ^{er} avril-30 sept	nbre de pics > 12 h juin, juillet, août
2006	stable, relativement chaud	18	5	2
2007	très instable, relativement froid	39	20	15
2008	relativement stable et chaud	26	10	4
2009	très instable, relativement chaud	48	14	12
2010	très instable, relativement froid	45	18	12

tableau 8-2 Récapitulatif des pics de température de la ressource à 37 m prof. (4); données de 2006 à 2010 au point de pompage

¹ Les graphiques détaillés pour chaque intervalle de température se trouvent en annexe 9

² Les caractéristiques des pics de température pour les cinq années étudiées (2006 à 2010) sont détaillées à l'annexe 10

8.2.1.3 Dépendance à la température extérieure

Tel que précisé au *chapitre 8.2.1.1*, l'indicateur de qualité de la ressource hydrothermique est défini en fonction de la température extérieure. Cet indicateur met en évidence l'adéquation entre les besoins de froid des bâtiments connectés au réseau et la disponibilité d'une ressource hydrothermique stable et de température suffisamment basse.

A/ Température de la ressource vs température extérieure

Pour la période chaude, la distribution des températures de pompage en fonction de la température extérieure montre une signature similaire quelles que soient les années: la grande majorité des températures de pompage sont comprises entre 5 et 9°C quelle que soit la température extérieure (*fig. 8-18*). Toutefois, les températures supérieures à 9°C (pics de température), bien que fréquemment distribuées pour des températures extérieures moyennes comprises entre 10 et 20°C, peuvent aussi apparaître lorsque les températures extérieures sont plus élevées, mais dans une bien moindre mesure.

Bien que les périodes chaudes présentent chacune leurs particularités, on peut les classer de la manière suivante:

- conditions météorologiques relativement stables (2006 et 2008): les chutes rapides et intenses de la température extérieure sont relativement peu fréquentes:
 1. la distribution de la majorité des températures de la ressource est compacte, généralement entre 6 et 9°C,
 2. les pics intenses (jusqu'à 18°C) sont relativement peu nombreux et distribués à des températures extérieures inférieures à 16°C; en 2008, on trouve toutefois des pics sur un large intervalle de températures extérieures (16-30°C), mais ils sont bien moins intenses ($\leq 13^\circ\text{C}$),
- conditions météorologiques relativement instables (2007, 2009 et 2010): les chutes rapides et intenses de la température extérieure sont relativement plus fréquentes:
 1. la distribution des températures de la ressource est moins compacte, généralement entre 5 et 11°C,
 2. les pics peuvent être légèrement plus intenses (jusqu'à 18°C). Ils sont plus fréquents et d'une durée plus longue, en particulier de septembre à mi-novembre. Ils sont distribués à des températures extérieures qui peuvent être plus élevées, jusqu'à 18-20°C.

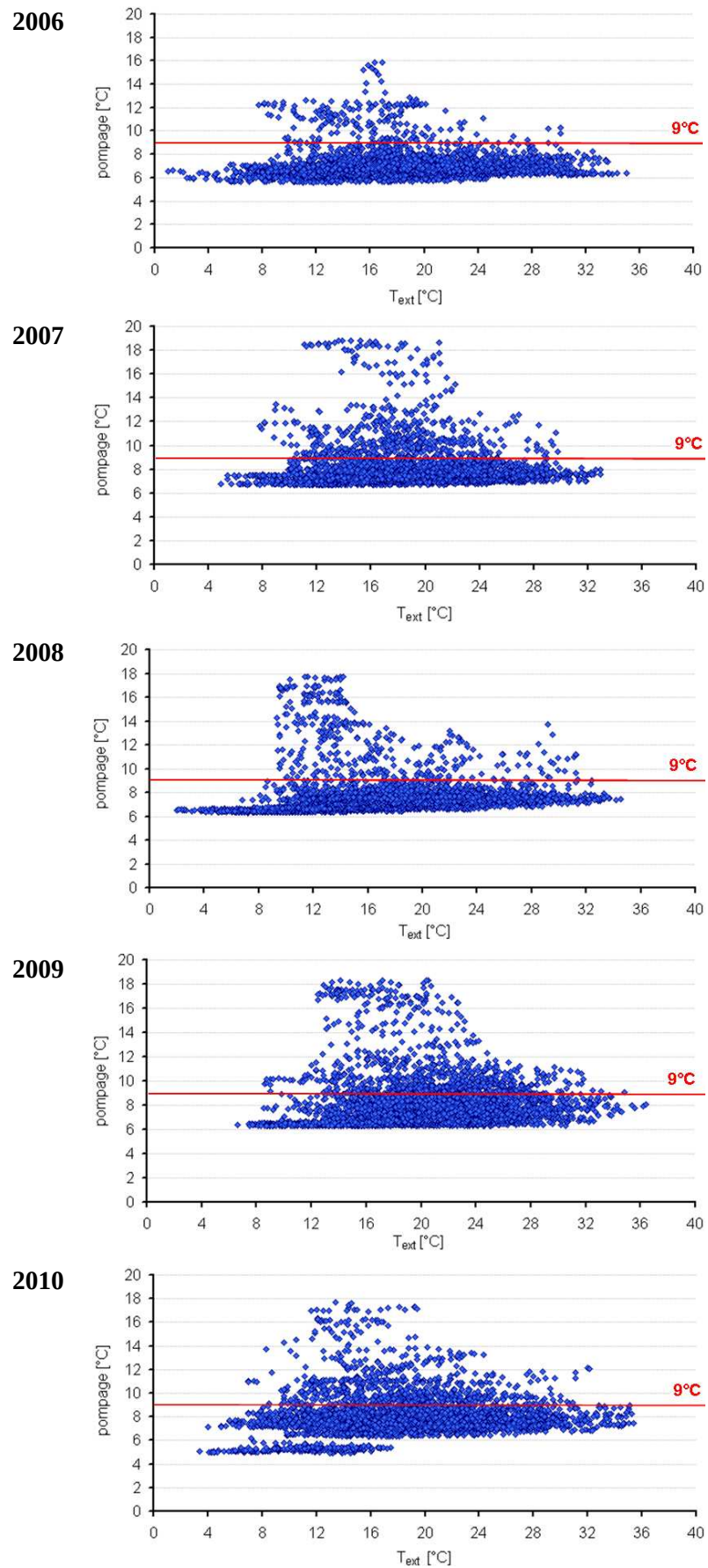


fig. 8-18 Température du pompage à 37 m prof. (4) en fonction de la température extérieure; données horaires du 1^{er} avril au 30 septembre (2006-2010); limite inférieure des pics de température (en rouge)

B/ Adéquation avec les besoins

D'un point de vue technique et en se basant sur l'hypothèse qu'un niveau de température de la ressource inférieur ou égal à 9°C est suffisamment bas pour un fonctionnement correct des installations de froid existantes dans les bâtiments connectés, trois domaines de l'indicateur de qualité de la ressource peuvent être déterminés. Sur la base du potentiel de la ressource lacustre à subvenir de manière suffisante à l'approvisionnement, sa qualité peut être satisfaisante, critique, voire insatisfaisante dans certains cas (*tableau 8-3*):

	T _{ressource}			
	< 8	8-9	9-10	> 10
T _{ext} < 12	satisfaisante			
12-18				
18-22				
22-25				
> 25	insatisfaisante			critique

tableau 8-3 Définition des trois domaines de l'indicateur de qualité de la ressource, exprimé en fonction d'intervalles de température de la ressource et d'air extérieur

Pour la période chaude 2008, la ressource est satisfaisante durant environ 4'000 heures, soit 92 % du temps; elle est critique durant 170 heures (4 % du temps) et insatisfaisante durant 174 heures. La ressource est donc globalement satisfaisante (*tableau 8-4*).

Le nombre d'heures durant lesquelles la demande en énergie froid est la plus intense (T_{ext} > 25°C) est relativement faible (151 h, soit 3.5 % du temps) et la ressource y est la moitié du temps supérieure à 10°C (76 h). L'approvisionnement en froid de confort¹ à 100 % via le réseau hydrothermique pourrait s'avérer problématique durant ce faible nombre d'heures.

%	T _{ext}	T _{ressource}				Σ
		< 8	8-9	9-10	> 10	
	< 12	24	26	2	2	54
	12-18	2	19	4	3	28
	18-22	0	8	1	1	10
	22-25	0	3	0.5	0.7	4
	> 25	0	2	0.5	1.3	4
	Σ	26	58	8	8	100

nbre heures	T _{ext}	T _{ressource}				Σ
		< 8	8-9	9-10	> 10	
	< 12	1061	1136	92	105	2394
	12-18	86	822	153	124	1185
	18-22	5	351	46	48	450
	22-25	0	124	20	30	174
	> 25	0	75	21	55	151
	Σ	1152	2508	332	362	4354

tableau 8-4 Adéquation de la ressource à 37 m prof. (4) et des températures extérieures (en nombre d'heures); données horaires du 1^{er} avril au 30 septembre 2008

La qualité de la ressource a également été évaluée pour les périodes chaudes de 2006 à 2010 (*annexe 8*). Pour cet indicateur, la répartition dans les trois catégories déterminées ci-dessus est similaire mais reflète les variabilités interannuelles évoquées plus haut.

L'évolution de cet indicateur a également été analysée sur une plus longue période (1999-2010; *fig. 8-19*). La température de la ressource prise en compte n'est pas celle du

¹ La demande de froid de confort (climatisation de bureaux, salles de conférence, etc.) est fortement liée à la température extérieure: elle est généralement nécessaire à partir de 16-18°C dans des bâtiments mal conçus et avec de fortes charges internes

pompage du réseau GLN mais celle des eaux pompées à la station de pompage d'eau potable du Prieuré (les crépines d'aspiration ne sont distantes que de 150 m; *fig. 7-1*): leurs dynamiques de températures sont semblables, les niveaux de température Prieuré étant très légèrement plus élevés que ceux du pompage du réseau GLN¹:

Il ressort de cette analyse trois points importants:

- la ressource est globalement de bonne qualité, avec une ressource satisfaisante en moyenne 70 % du temps. Toutefois, les fluctuations interannuelles sont marquées: seulement 45 % des heures sont satisfaisantes en 2004 (*annus horribilis*), alors qu'elles sont plus de 80 % en 2006 (*annus mirabilis*),
- le niveau moyen de la température extérieure ne conditionne pas la qualité de la ressource: 2004 et 2006, bien qu'ayant des températures extérieures moyennes très proches, montrent des qualités de la ressource très différentes. C'est avant tout l'instabilité météorologique (alternance de périodes anticycloniques et dépressionnaires) qui pèse sur sa qualité,
- l'année 2003 montre que la qualité de la ressource est garantie lors d'épisodes caniculaires.

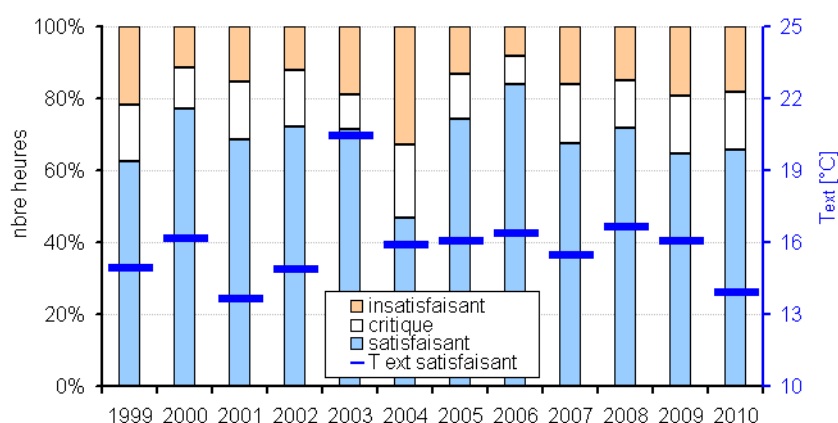


fig. 8-19 Evolution de l'indicateur de qualité de la ressource à 37 m prof. et de la température extérieure moyenne (mesurés lorsque la ressource est satisfaisante); données horaires du Prieuré du 1^{er} avril au 30 septembre 1999-2010

Il faut donc retenir que ce sont les épisodes d'instabilité météorologique qui pèsent sur la qualité de la ressource, lors de diminutions fortes et rapides de la température extérieure.

8.2.2 Importance du site de pompage

Comme le montre l'étude d'un autre pompage hydrothermique dans le Petit-Lac genevois, l'emplacement et la profondeur du point de pompage revêtent une importance fondamentale.

Ce second site de pompage est également géré par SIG: il est situé sur la rive droite du lac à 45 m prof., au large de Versoix, environ 10 km en amont de Genève (coordonnées suisses 502'700; 126'200).

Etant donné que leurs profils de température montrent la même dynamique mais de manière amortie pour le pompage de Versoix, il est probable que les deux zones de pompage soient régies par les mêmes courants dominants: la profondeur légèrement plus importante du site de Versoix et sa position plus proche du Grand-Lac sont très certainement les raisons de la

¹ Contrairement à la mesure du pompage du réseau GLN, la mesure Prieuré est effectuée à sa station de pompage: l'eau aspirée s'échauffe légèrement dans la conduite sous-lacustre (annexe 9; Viquerat et al., 2008c)

meilleure qualité de sa ressource. Les températures y sont plus basses et plus stables qu'au pompage du réseau GLN (fig. 8-20): en effet, les pics de températures y sont présents mais bien moins marqués; de même, le niveau moyen des températures y est inférieur, voisin de 6.5°C, alors qu'il est plus proche de 8°C pour le pompage du réseau GLN.

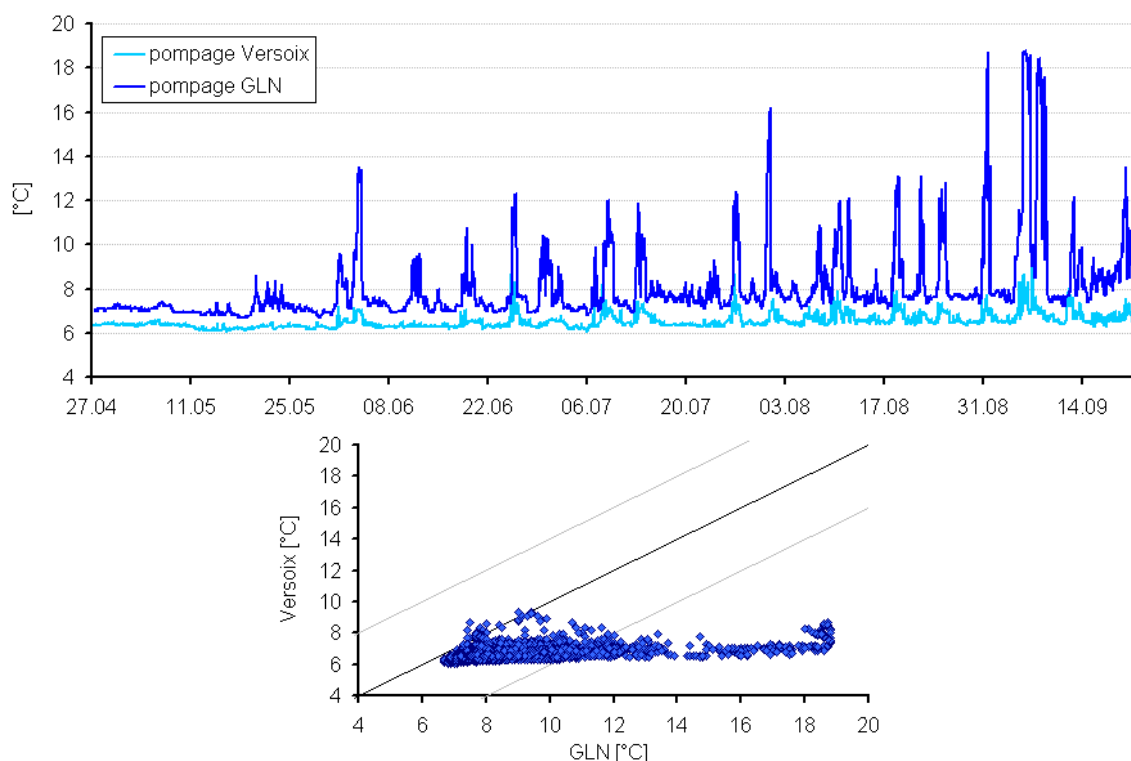


fig. 8-20 Température du pompage des réseaux hydrothermiques GLN à 37 m prof. (4) et de Versoix à 45 m prof.; données horaires du 27 avril au 21 septembre 2007

Cette garantie de qualité de la ressource est fondamentale, car elle permet à l'exploitant une gestion simplifiée et plus sûre de son réseau. De plus, elle rassure les utilisateurs: la relative nouveauté de ce genre de système génère effectivement des réticences et beaucoup de retenue chez nombre d'entre-eux.

Dans le cas du réseau GLN, le choix de l'emplacement du pompage a été guidé par l'existence de l'ancienne conduite sous-lacustre du Prieuré, idéalement dimensionnée et inutilisée. De manière à éviter des coûts importants pour l'installation d'une nouvelle adduction, un tronçon de cette dernière a été réaffecté au réseau GLN.

Etant donné la complexité des courants lacustres (sous le contrôle de nombreux paramètres, dont le vent et la bathymétrie), une mesure *in situ* préalable de la température de l'hypolimnion – dans la zone destinée à recevoir la crépine d'aspiration - est nécessaire. La dynamique thermique nous semble bien trop complexe pour pouvoir être appréhendée sur la base de mesures moyennes journalières voire mensuelles, ni sur la base de modèles hydrothermiques simples.

Notons encore que quelques centaines de mètres en amont du site de pompage retenu pour le réseau GLN, la beïne lacustre s'enfonce encore, jusqu'à une profondeur dépassant 50 m. A cet endroit, il est probable que la ressource soit meilleure, mais cela devrait être vérifié *in situ*. Au regard des problèmes de gestion et de régulation que rencontre l'exploitant à cause de températures ponctuellement trop élevées et instables, l'allongement du réseau d'adduction

d'environ 1 km aurait probablement constitué à terme une meilleure solution tant en termes financiers, d'efficacité énergétique que d'exploitation.

8.3 Utilisation des eaux: cadre légal

8.3.1 Législations

Les conditions d'utilisation d'eaux naturelles de surface à des fins hydrothermiques sont fixées dans des législations transnationales, nationales et cantonales.

1/ Niveau européen

La *directive 78/695* impose des contraintes de température après mélange des eaux du rejet avec celles du milieu récepteur: l'échauffement doit être de 1.5°C maximum pour les eaux salmonicoles et de 3°C pour les eaux cyprinicoles. En aval du rejet et après mélange, les eaux ne doivent pas dépasser 21.5°C pour les eaux salmonicoles et 28°C pour les eaux cyprinicoles. Une certaine marge de manœuvre est toutefois mentionnée, car des dérogations limitées géographiquement peuvent être accordées dans des conditions particulières, à condition que l'autorité compétente puisse prouver que ces dépassements permettent le maintien de conditions suffisantes pour le développement équilibré des peuplements de poissons.

2/ Niveau national

Les exigences européennes ci-dessus s'expriment dans des termes similaires au niveau de la législation suisse et du canton de Genève (*voir point 3 ci-dessous*). Elles se basent sur les connaissances actuelles permettant d'assurer l'intégrité de l'habitat aquatique, en particulier les besoins et exigences de la faune et de la flore aquatique (*LEaux 1991, OEaux 1998*).

Les exigences générales de l'*OEaux (1998)* mentionnent que la qualité des eaux doit être telle qu'il ne doit pas se produire de proliférations excessives ou anormales d'algues et de plantes aquatiques supérieures, que les eaux propices au frai des poissons soient conservées, que l'eau satisfasse, après un traitement adapté, aux exigences fixées dans la législation sur les denrées alimentaires et que les conditions d'hygiène requises pour la baignade soient remplies. Après un mélange homogène, les effluents ne doivent entraîner aucune formation de boues, aucune turbidité ni coloration, aucune altération de l'odeur naturelle de l'eau, aucun manque d'oxygène ni d'altération du pH.

L'*OEaux (1998)* fixe encore des exigences supplémentaires pour les étendues d'eau: pour les lacs, l'utilisation d'eau pour la climatisation et pour le prélèvement de chaleur ne doit pas altérer le régime naturel des températures, la répartition des nutriments dans le plan d'eau ainsi que les conditions de vie et de reproduction des organismes, tout particulièrement dans la zone littorale.

3/ Niveau cantonal

La loi sur la protection des eaux et son règlement d'application définissent les modalités relatives à la concession de pompage, à son émolument et à la redevance annuelle à charge de l'exploitant (*annexe 6*). Des restrictions temporaires d'utilisation peuvent être imposées à l'ayant droit en cas de conditions météorologiques exceptionnelles.

La température maximale d'un effluent hydrothermique dans des eaux superficielles est limitée à 30°C, celle du milieu récepteur à 25°C après mélange. De plus, les eaux réceptrices ne doivent pas être échauffées de plus de 3°C (1.5°C dans les zones à truites). La

concentration en biocides de l'effluent (p. ex. du chlore) doit rester inférieure à 50 µg/l. La concentration en carbone organique dissout (DOC) des eaux rejetées ne doit pas dépasser de plus de 5 mg/l celle des eaux pompées.

Ces législations ont été initialement établies dans les années 1960 pour encadrer la construction de centrales nucléaires et thermiques, car les quantités de chaleur rejetées par ces installations puissantes et centralisées sont importantes. Son objectif initial, légitime, était de protéger les poissons et leur environnement aquatique en général. Toutefois, ces contraintes légales ne s'avèrent actuellement plus très adaptées aux conditions de l'environnement en question et au fonctionnement de systèmes hydrothermiques, tout particulièrement pour la production d'énergie froid:

- au niveau de la Rade de Genève, la température naturelle des eaux superficielles dépasse souvent 25°C (Faessler, 2011; Viquerat et al., 2008a; annexe 6),
- durant la saison chaude, la température de l'effluent thermique du système est inférieure à la température naturelle de la couche superficielle du lac: le système induit un refroidissement des eaux de surface, non pas un réchauffement.

8.3.2 Concession de pompage

Les conditions d'utilisation d'eaux naturelles de surface à des fins hydrothermiques sont fixées dans une concession de pompage. A Genève, elle est délivrée à l'exploitant par le service cantonal compétent (SECOE) et s'articule autour des exigences légales énoncées ci-dessous:

1/ Exigences de suivi générales

- mesure en continu du débit (10 ans de stockage des données),
- mesure en continu des températures de pompage/rejet (10 ans de stockage),
- mesure mensuelle de chlore actif résiduel au rejet (avril à septembre),

2/ Exigences de suivi pour l'évaluation de l'impact sur le lac

- mesure en continu des températures d'eau du lac (proximité du rejet et site de référence),
- mesure mensuelle des températures d'eau du lac (25 et 50 m autour du rejet),
- mesure mensuelle du pH des eaux de pompage et de rejet,
- mesure mensuelle du phosphore biodisponible des eaux de pompage et de rejet,
- suivi annuel des macrophytes et de la macrofaune benthique (à proximité du rejet et à un site de référence).

8.4 Rejet du système

Les effets thermiques observables dans la zone du rejet sont influencés par de nombreux paramètres, que l'on peut classer en deux types (détails en annexe 7):

- naturels: la dynamique thermique naturelle est dépendante des conditions climatiques locales et régionales. La courantologie locale est dépendante de la bathymétrie, des vents et de la nature, ainsi que de la colonisation des fonds (GREN, 2010). Ces paramètres varient rapidement et de manière importante dans l'espace et le temps,

- systémiques: la dynamique thermique du système est dépendante du débit et de la température du rejet. Ces deux paramètres varient dans le temps.

La signature thermique dans la zone du rejet ne sera pas perçue de la même manière en fonction de la thermique naturellement en place: les niveaux de température, le degré de stratification ainsi que la stabilité thermique évoluent sur plusieurs échelles de temps: saisonnière, journalière, et jusqu'à environ 10-15 minutes pour les changements rapides. Un rejet d'une masse d'eau froide induira donc des effets thermiques différents en fonction de la période de l'année et des conditions météorologiques considérées. La faible profondeur de la zone riveraine, les niveaux des températures extérieures ainsi que la dynamique thermique jour/nuit en période estivale sont particulièrement influents dans la zone du rejet et la rendent thermiquement très réactive. L'influence des vents est déterminante, de manière directe (déstratification de la colonne d'eau) et indirecte (modification de la courantomie locale).

Pour cela, les couches de surface (épilimnion) dans lesquelles sont rejetées les eaux du système ont été étudiées durant plusieurs années, de manière à déterminer les éventuelles modifications thermiques induites (à 2.25 en aval du rejet et à 25 et 50 m autour du rejet), ainsi que les impacts potentiels que le rejet pourrait induire sur la faune et la flore riveraine.

8.4.1 Niveaux de température et énergie rejetée

Les niveaux de température du rejet sont dépendants du phasage des mises en service, du niveau d'activité et des prestations thermiques délivrées par les deux réseaux:

- 1^{er} janvier 2007 – 31 mai 2007: tests de mise en route du réseau Merck-Serono,
- 1^{er} juin 2007 – 31 mai 2009: climatisation/chauffage des bâtiments Merck-Serono,
- 1^{er} juin 2009 – actuellement: climatisation/chauffage des bâtiments Merck-Serono via le réseau Merck-Serono; climatisation de l'ONU, du BIT et du CICR (CICG à partir d'août 2009) via le réseau GLN.

8.4.1.1 Définitions

L'analyse de l'énergie thermique rejetée par le système permet d'évaluer les contributions respectives des deux réseaux au potentiel de modification de la dynamique thermique naturelle du lac dans la zone très proche du rejet (2.25 m en aval). Pour cela, la définition de plusieurs écarts de température (ΔT) impliqués est nécessaire (*fig. 8-21*):

- $\Delta T_{\text{système}} = T_{\text{rejet}} - T_{\text{pompage}}$: représentatif de la chaleur effective rejetée par le système (réseaux GLN + Merck-Serono),
- $\Delta T_{\text{réseau}} = T_{\text{retour}} - T_{\text{distribution}}$: représentatif de la chaleur effective rejetée par le réseau GLN (ΔT_{GLN}) ou le réseau Merck-Serono (ΔT_{MS}),
- ΔT_{max} : représentatif de la chaleur rejetée par le système lorsque le système tourne à vide,
- $\Delta T_{\text{net}} = T_{\text{réf } 4.5\text{m}} - T_{\text{rejet}}$: différence de température entre l'épilimnion et le rejet, représentative de la chaleur rejetée par le système lorsque les bâtiments connectés sont rafraîchis.

La chaleur rejetée dans le lac est proportionnelle à l'écart de température entre le rejet et le pompage ($\Delta T_{\text{système}}$). Comme la couche de surface du lac (épilimnion) est généralement plus chaude que les eaux rejetées (en particulier au printemps et en été), le potentiel de refroidissement de l'épilimnion est proportionnel à l'écart de température entre la surface du

lac (sans influence du rejet) et le rejet (ΔT_{net}). Une augmentation du $\Delta T_{\text{système}}$ diminue donc le potentiel de refroidissement de l'épilimnion (ΔT_{net}). Autrement dit, une bonne valorisation de l'eau pompée ($\Delta T_{\text{système}}$ élevé) diminue le risque d'impact sur l'épilimnion. Il y a donc un rapport étroit entre la gestion du système et l'impact thermique sur le lac: une bonne utilisation du système permet de rejeter un maximum de chaleur des bâtiments dans le lac, tout en minimisant le refroidissement de l'épilimnion.

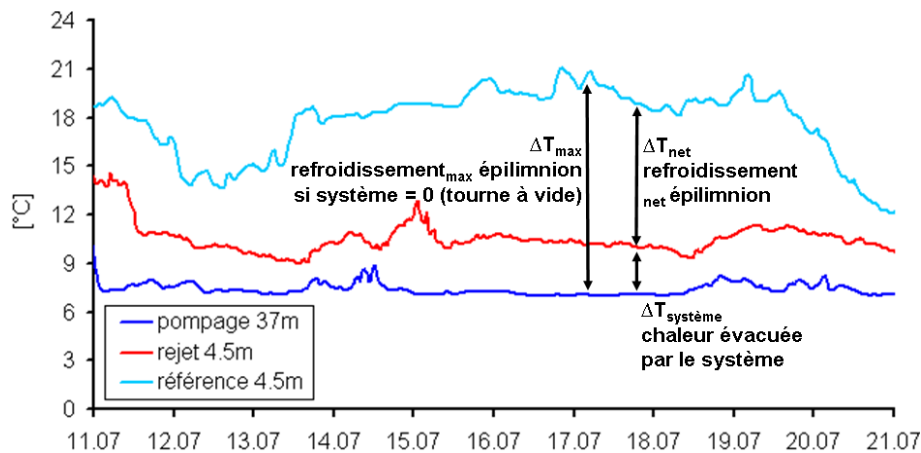
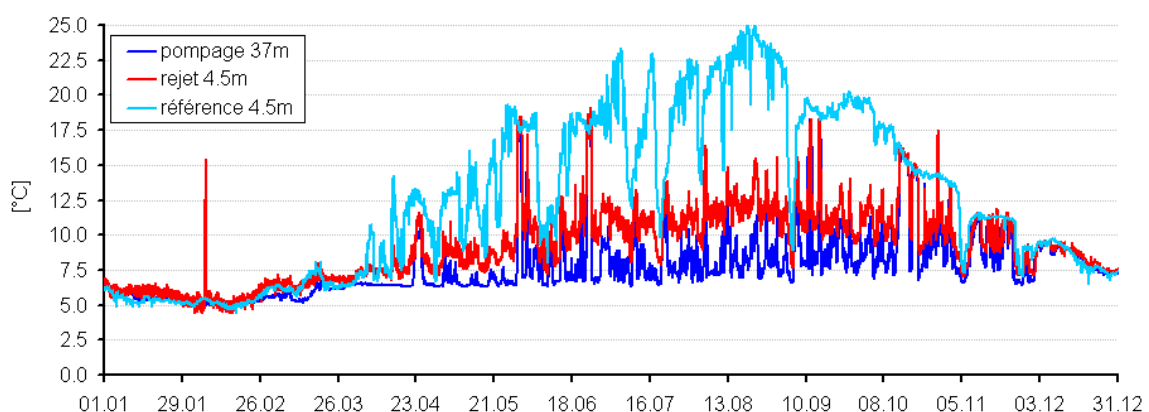


fig. 8-21 Nomenclature et définition des écarts de températures impliqués: pompage à 37 m prof. (4), rejet (4.5 m prof., 14) et référence à 4.5 m prof. (2)

8.4.1.2 Etude des niveaux de température

La fig. 8-22 illustre l'écart de température entre le rejet et le pompage du système ($\Delta T_{\text{système}}$) pour l'année 2009: il est généralement faible, de l'ordre de 2-4°C. Durant les saisons chaudes 2006 à 2010 (avril-septembre), il augmente avec la demande de froid des bâtiments connectés et ses valeurs maximums sont atteintes durant l'été (juin, juillet et août; annexe 8).

Au printemps, la stratification thermique du lac se met en place, l'écart de température entre la surface du lac (sans influence du rejet) et le rejet (ΔT_{net}) augmente au fur et à mesure que la surface du lac se réchauffe ($T_{\text{réf 4.5m}}$), soit jusqu'au mois de juin. A ce moment et durant tout l'été, la température des eaux rejetées reste bien inférieure à celle de l'épilimnion: c'est donc en été que le potentiel d'impact thermique par refroidissement est le plus marqué.



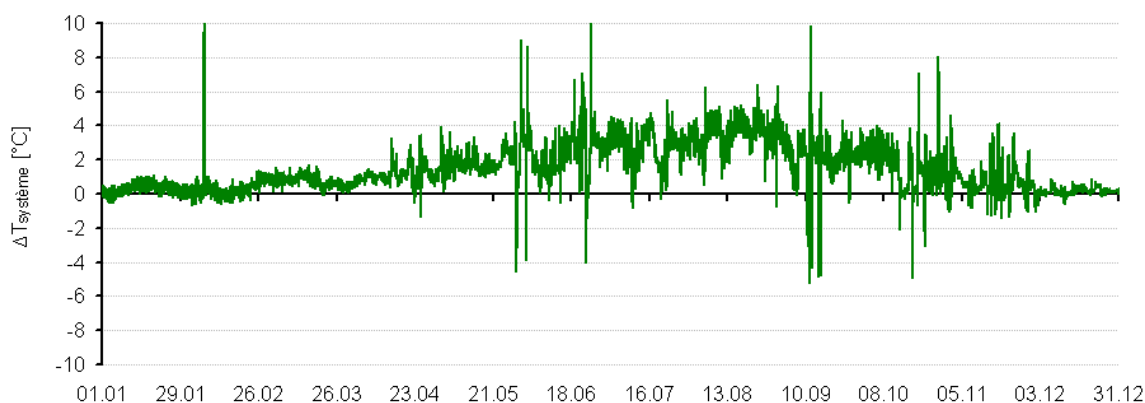


fig. 8-22 Température du pompage à 37 m prof. (4), du rejet (4.5 m prof., 14), au point de référence à 4.5 m prof. (2) et écart de température entre le rejet et le pompage ($\Delta T_{\text{système}}$); données horaires 2009

Ainsi, les potentiels de refroidissement de l'épilimnion évoluent au cours des années (tableau 8-5):

- 2007-2009 (réseau Merck-Serono): au cours de la saison chaude, le potentiel de refroidissement moyen de l'épilimnion (ΔT_{net}) est important, de l'ordre de 5-7.5°C, pour une quantité de chaleur rejetée d'environ 4 GWh. L'écart de température entre le rejet et le pompage ($\Delta T_{\text{système}}$) est faible et la température du rejet basse. La valorisation de l'eau pompée n'est donc pas optimale,
- 2010 (réseaux GLN + Merck-Serono): au cours de la saison chaude, le potentiel de refroidissement moyen de l'épilimnion (ΔT_{net}) diminue légèrement et est de l'ordre de 3-6°C, pour une quantité de chaleur rejetée par les deux réseaux d'environ 11 GWh, supérieure aux deux années précédentes.

	2006		2007		2008		2009		2010	
	j, j, a	saison	j, j, a	saison	j, j, a	saison	j, j, a	saison	j, j, a	saison
$\Delta T_{\text{système}}$	3.2	2.9	2.7	2.5	2.9	2.4	2.9	2.3	2.7	2
[GWh]évacué	-	-	3.22	3.97	3.25	4.3	3.23	4.71	8.64	11.35
ΔT_{net}	-	-	7.4	7.5	7.2	5.2	7.5	6	5.7	3.2
ΔT_{max}	-	-	10	9.9	10.1	7.6	10.3	8.3	8.6	4.9

tableau 8-5 $\Delta T_{\text{système}}$, ΔT_{net} et ΔT_{max} ; énergie évacuée via le système pour le trimestre juin- juillet- août (j, j, a) et la saison chaude (avril-septembre); données horaires du 21 avril 2006 au 6 octobre 2010

Au cours de la saison 2010, les modes d'exploitation des deux réseaux engendrent des écarts de température entre le retour et la distribution ($\Delta T_{\text{réseau}}$) faibles voire très faibles (fig. 8-23):

- réseau GLN: ils sont compris entre 0 et 6°C et montrent une enveloppe de distribution homogène et cohérente ($\Delta T_{\text{réseau moyen}} = 2^\circ\text{C}$),
- réseau Merck-Serono: ils sont inférieurs à 3°C quelles que soient les températures extérieures; la plupart sont inférieurs à 2°C.

Ceci se traduit par des températures de retour particulièrement basses, comprises entre 9.5 et 15°C pour le réseau GLN, et de seulement 7-12.5°C pour le réseau Merck-Serono.

La diminution du potentiel de refroidissement de l'épilimnion ΔT_{net} est donc avant tout liée au fait que l'épilimnion était relativement plus froid que les années précédentes (*annexe 8*). La valorisation de l'eau pompée - par augmentation des $\Delta T_{\text{réseau}}$, donc du $\Delta T_{\text{système}}$ - reste faible. De ce point de vue, l'importante marge d'amélioration de l'exploitation des deux réseaux (par augmentation des températures de retour) permettrait de diminuer et minimiser les impacts thermiques potentiels.

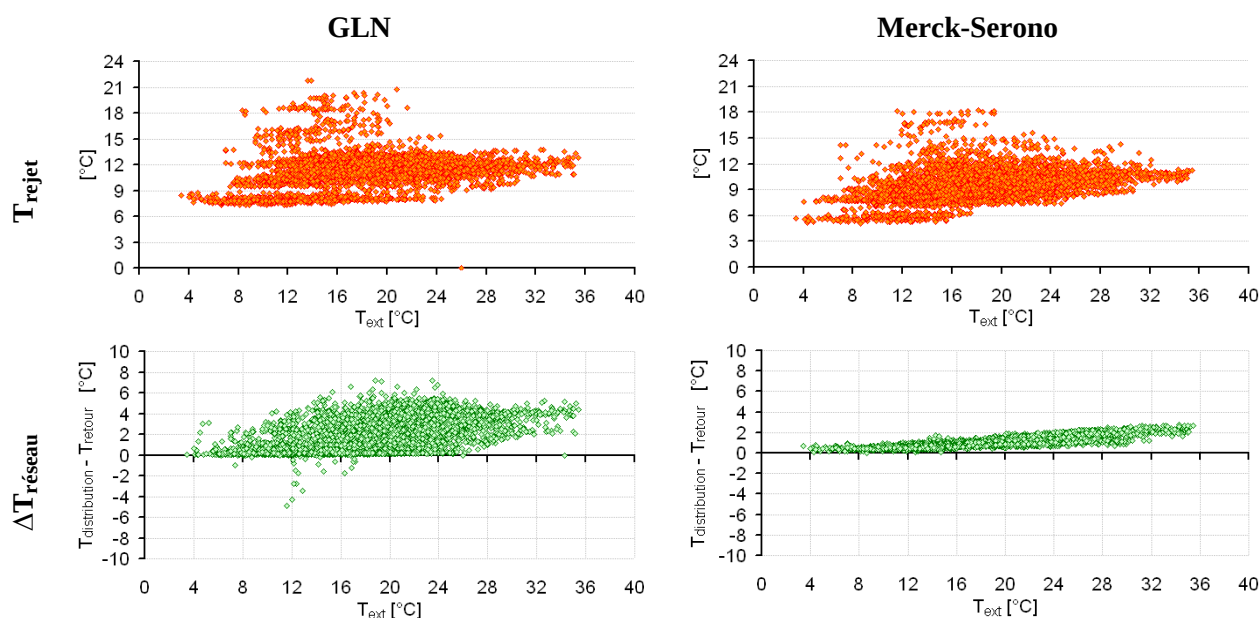


fig. 8-23 Températures de retour (en haut) et écart de température entre le retour (12, 13) et la distribution (5, 13) ($\Delta T_{\text{réseau}}$, en bas) des réseaux GLN (à gauche) et Merck-Serono (à droite), exprimées en fonction de la température extérieure; données horaires du 1^{er} avril au 1^{er} octobre 2010

8.4.2 Effets et impacts du rejet

Notons tout d'abord que les résultats obtenus ne sont pas représentatifs des effets liés à un fonctionnement du système à sa capacité nominale, mais plutôt de ceux liés à un état transitoire de mise en route. Susceptibles d'engendrer des modifications dans les populations de la faune et de flore riveraine, les effets - de nature physiques et chimiques - sont évalués sur trois échelles spatiales:

- locale: dans la zone du rejet (dans la plume thermique à 2.25 m en aval), mais aussi à 25 et 50 m autour du rejet. La plume thermique est définie par la zone de mélange entre l'eau rejetée par une installation et celle du cours d'eau ou plan d'eau récepteur. La plume s'étend en aval du point de rejet aussi loin que l'influence du rejet est perceptible,
- régionale: au niveau de la Rade de Genève et du Rhône genevois (*cf. chap. 8.6.2*),
- bassin versant: depuis le Rhône valaisan (en amont du Lac Léman) jusqu'à son embouchure dans la mer Méditerranée (*cf. chap. 8.6.4*).

8.4.2.1 Effets thermiques locaux

A cette échelle, les effets thermiques du rejet sont successivement analysés de quatre manières différentes:

A/ dynamiques saisonnières des températures à 2.25 m en aval du rejet,

- B/** caractérisation de la plume thermique proche du rejet (mesures à 2.25 m en aval du rejet),
- C/** caractérisation de la plume thermique jusqu'à 50 m autour du rejet (mesures et modélisation),
- D/** mise en relation des effets thermiques avec l'énergie rejetée par le système.

A/ Dynamiques saisonnières

Depuis 2007, quatre périodes par année ont été sélectionnées puis analysées. Leurs conditions sont représentatives des régimes thermiques naturels et des effets thermiques du système typiquement attendus à la saison considérée. Seules les périodes 2010 sont présentées en détail, car ce sont celles qui s'approchent le plus des effets attendus ces prochaines années¹:

- hivernale (27 janv. - 6 fév. 2010): le lac n'est pas stratifié et la demande de froid faible,
- printanière (22 mai - 1^{er} juin 2010): période de transition durant laquelle le lac se stratifie (augmentation de la température extérieure). La demande de froid est modérée,
- estivale « chaude » (25 juin - 5 juil. 2010): la stratification est marquée et les températures extérieures élevées. La demande de froid est importante,
- estivale « tardive » (automne): le lac commence généralement à se déstratifier et la température extérieure chute rapidement et fortement. La demande de froid diminue de manière importante par rapport à la période précédente.

1/ Hiver: 27 janvier au 6 février 2010

Le lac n'est pas stratifié et le rejet n'induit qu'un très faible refroidissement à 2.25 m en aval du rejet, la plupart du temps inférieur à 0.5°C: il est induit par un écart de température entre le rejet et le pompage ($\Delta T_{\text{système}}$) de l'ordre de 0.5°C, indiquant que la demande de froid du bâtiment est très faible (*annexe 11*). En principe, le bâtiment Merck-Serono utilise l'eau pompée pour son chauffage, via des pompes à chaleur. Toutefois, et d'après les données à disposition, la demande de chaud sur le réseau au cours de l'hiver 2010 est inexistante.

L'effet global du rejet du système sur le lac est faible: l'épilimnion est refroidi de moins de 1°C (*fig. 8-24*).

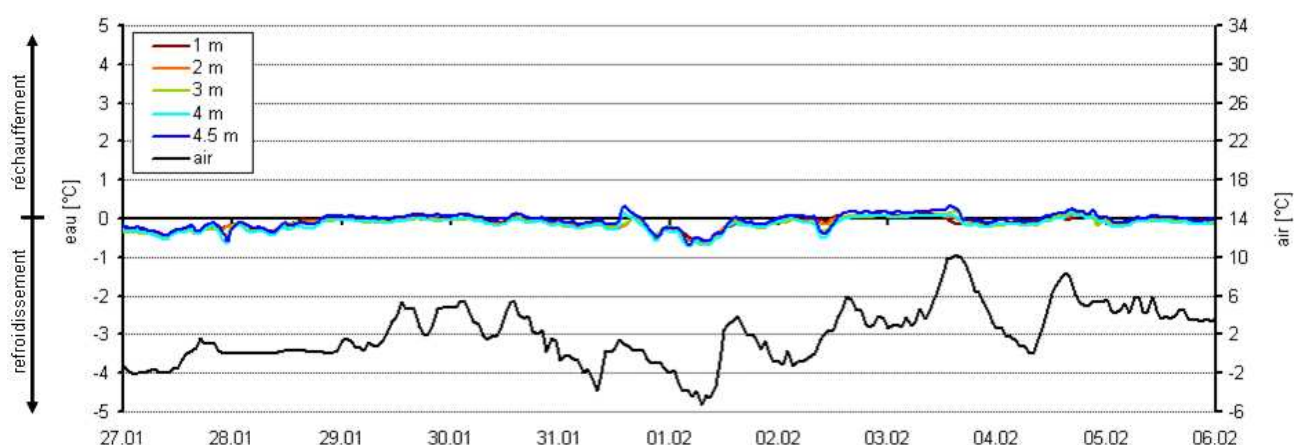


fig. 8-24 Evolution de la température extérieure et du refroidissement de l'épilimnion à 2.25 m en aval du rejet à 1, 2, 3, 4 et 4.5 m prof. (1); données horaires du 27 janvier au 6 février 2010

¹ L'ensemble des mesures se trouve aux annexes 8 et 11

2/ Printemps: 22 mai au 1^{er} juin 2010

Cette période montre un accroissement rapide de la température extérieure jusqu'à des valeurs élevées pour la saison, proches de 30°C le 24 mai (*fig. 8-25*):

- couches de surface (1, 2 et 3 m prof.): de manière générale au printemps et comme les années précédentes, la température des couches de surface reste légèrement plus élevée à 2.25 m en aval du rejet qu'au point de référence. Cela s'explique par le fait que le point à 2.25 m en aval du rejet, plus proche de la rive que le point de référence et ayant de ce fait une colonne d'eau moins profonde, s'échauffe plus fortement (*Rossolim, 1957*). L'influence du rejet sur les températures de surface est donc secondaire,
- couches profondes (4 et 4.5 m prof.): étant donné que les niveaux de température du rejet sont très proches de ceux des couches profondes, son influence sur la dynamique thermique naturelle de ces couches n'est pas très marquée. Ces couches sont en effet parfois réchauffées, parfois refroidies:
 - refroidissements: par rapport aux couches plus en surface, ces événements sont ponctuels et de courte durée (p. ex. 1-2°C le 25 mai),
 - réchauffements: ils sont faibles, de l'ordre de 0.5-1°C. Deux types sont observés:
 - a/ ponctuels (p. ex. le 26 mai): ils s'expliquent par une diminution de la température des masses d'eau dans la zone du point de référence, tandis que les masses d'eau dans la zone du rejet sont encore chaudes au même instant. En effet, le déplacement des masses d'eau vers l'aval - de la zone de référence vers la zone du rejet - s'effectue en un certain temps (env. 2 h pour un courant de 5 cm/s) durant lequel la température de l'eau peut varier. Ces réchauffements ne sont donc pas sous l'influence directe du système,
 - b/ plus long (p. ex. du 20 au 24 mai): le niveau de température du rejet est très proche du niveau des températures naturelles des couches profondes.

Les impacts potentiels du refroidissement et du réchauffement sont donc jugés très faibles, voire nuls.

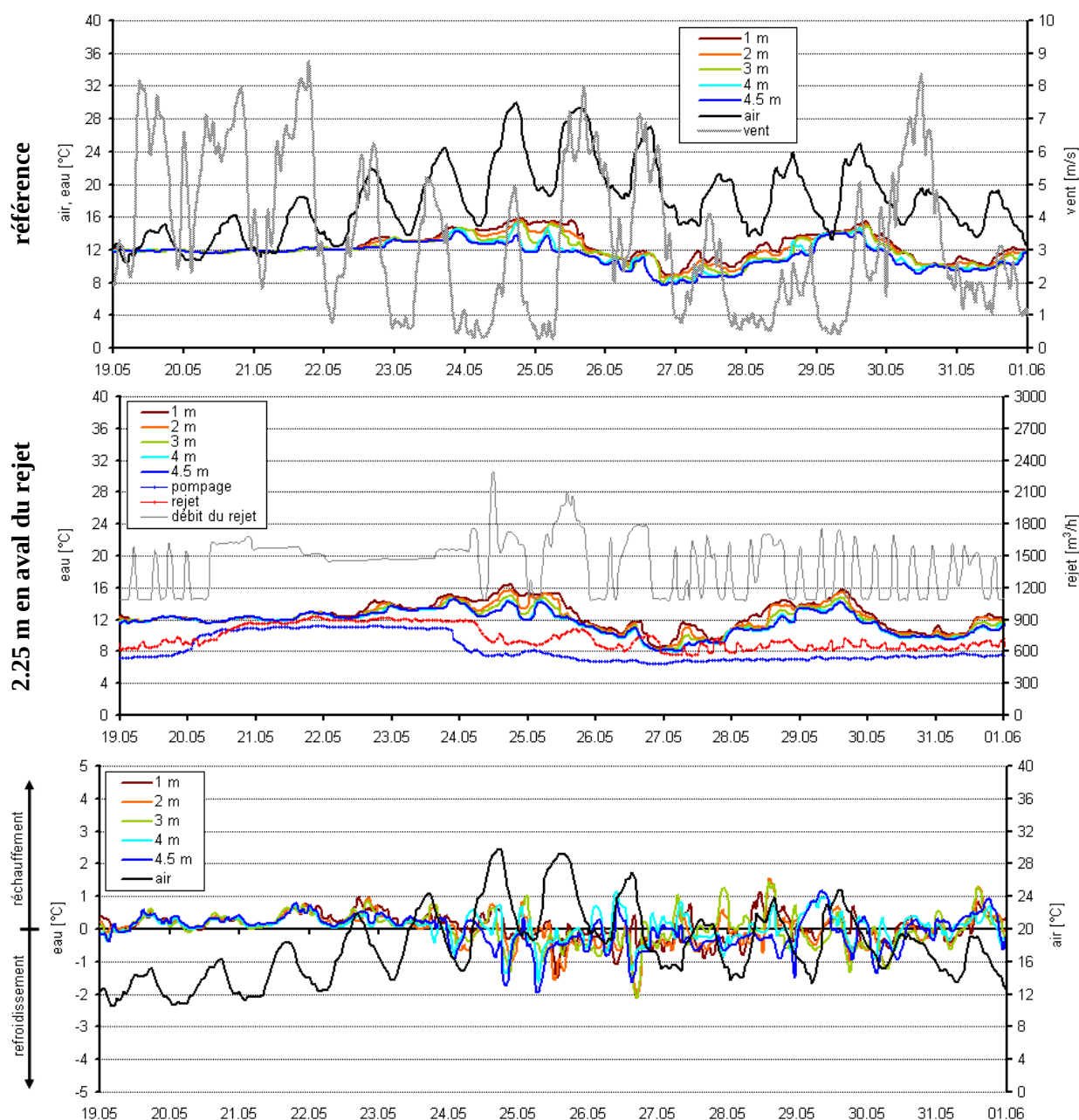


fig. 8-25 Evolution des températures du pompage à 37 m prof. (4), du rejet (4.5 m prof., 14), au point de référence (en haut, 2) et à 2.25 m en aval du rejet (au milieu, 1), de la température extérieure, de la vitesse du vent, du débit du rejet (GLN + Merck-Serono, 13) et refroidissement de l'épilimnion à 2.25 m en aval du rejet (en bas); données horaires du 22 mai au 1^{er} juin 2010

3/ Eté: 25 juin au 5 juillet 2010

Cette période est représentative d'une période chaude estivale, la température extérieure dépassant largement 28°C en cours de journée (fig. 8-26):

- couches de surface (1, 2 et 3 m prof.): de manière générale et comme les années précédentes, la température des couches de surface reste légèrement plus élevée à 2.25 m en aval du rejet qu'au point de référence (voir explication de la période printanière à la page précédente),
- couches profondes (4 et 4.5 m prof.): l'influence du rejet est effective sur la dynamique thermique naturelle des couches profondes. Elle est d'autant plus forte lorsque la

stratification est faible (25 juin et 4 juillet). L'écart de température vertical entre la surface et 4.5 m prof. est supérieur à 4°C le 4 juillet. L'effet global du rejet permet de distinguer deux dynamiques induites:

- refroidissements: fréquents, de longue durée et d'amplitude supérieure à 2°C, ils sont observés du 25 au 27 juin (ΔT_{max} annuel de 4.3°C le 4 juillet). Ils sont clairement sous l'influence du rejet et plus importants que ceux observés au printemps, car les températures naturelles du lac sont plus élevées en été. Ces tendances s'observent tout au long de la période très chaude (juin à août; *Viquerat et al., 2011c*),
- réchauffements: comparés aux couches de surface, ils sont ponctuels et de très courte durée (1°C le 28 juin; voir *explication période printanière p. 113*).

En se basant sur le suivi des macrophytes et de la macrofaune benthique (cf. chap. 8.4.2.3) ainsi que sur la législation relative aux conditions d'existences à préserver pour l'ichtyofaune (*LEaux et OEaux*), les impacts potentiels sur ces organismes sont jugés globalement faibles:

- amplitude, durée et rapidité du refroidissement: l'amplitude thermique est relativement plus importante (2 au 5 juillet) que les variations naturelles observées au cours de cette période. Seule la macrofaune benthique, qui vit en permanence dans la zone profonde, est susceptible d'être impactée par cette dynamique: le suivi effectué n'a toutefois pas révélé d'impact perceptible. A cette saison, l'impact potentiel d'un refroidissement est *a priori* très faible sur l'ichtyofaune et les macrophytes (*GREN, 2009, 2010*). La zone du rejet est une zone de frai potentielle pour le brochet (*ECOTEC, 1993*), mais la période de reproduction est passée depuis longtemps (entre février et mai) et les juvéniles ne sont plus aussi sensibles à un changement rapide de la température comme ils l'étaient au printemps, juste après la ponte (*Bruslé et al., 2001*). L'impact potentiel est donc nul.
- amplitude et rapidité du réchauffement: l'impact potentiel est *a priori* nul, pour les mêmes raisons qu'expliqué ci-dessus.

Les impacts potentiels du refroidissement sont jugés faibles. Les impacts potentiels du réchauffement sont jugés nuls.

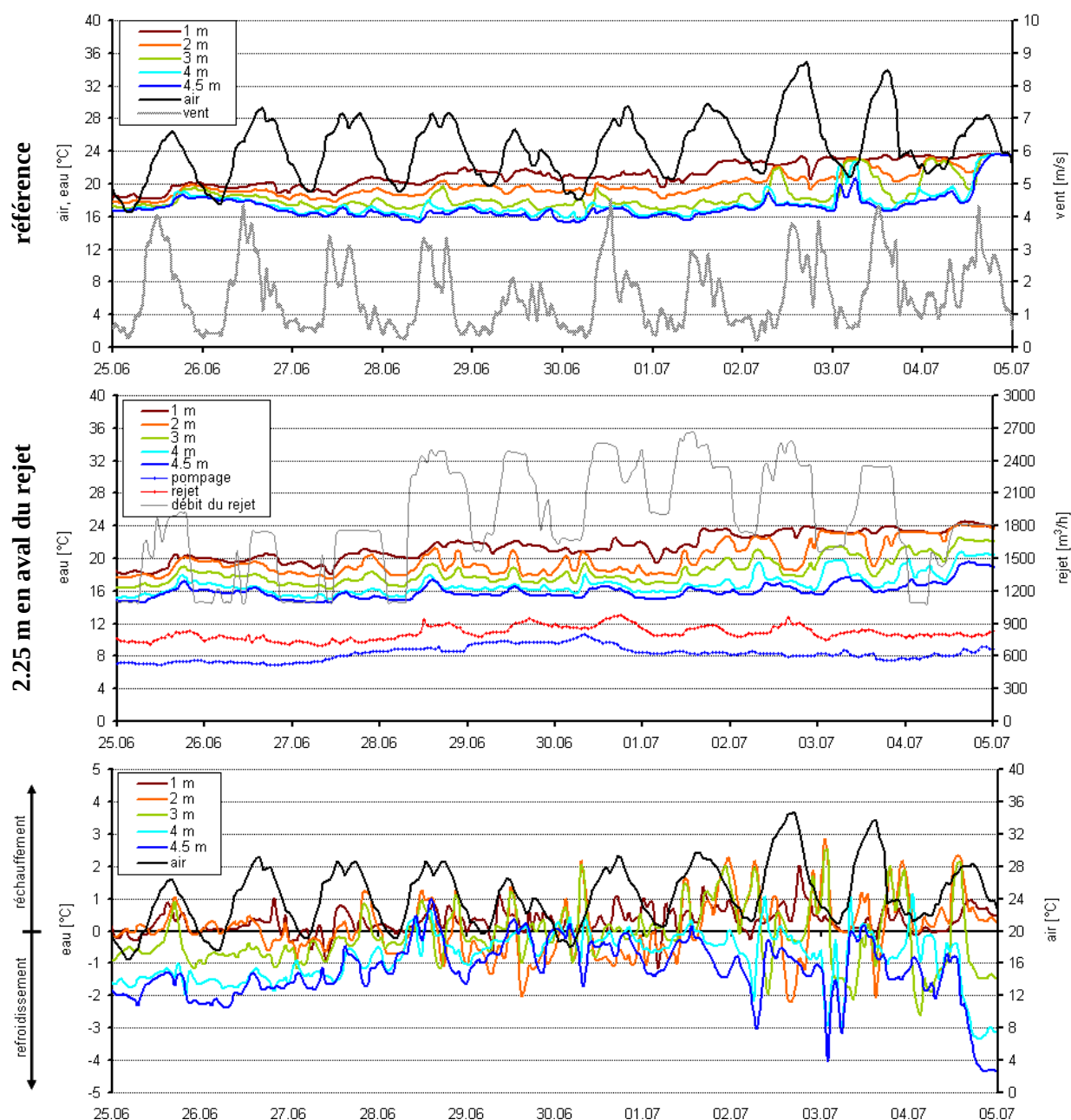


fig. 8-26 Evolution des températures du pompage à 37 m prof. (4), du rejet (4.5 m prof., 14), au point de référence (en haut, 2) et à 2.25 m en aval du rejet (au milieu, 1), de la température extérieure, de la vitesse du vent, du débit du rejet (GLN+Merck-Serono, 13) et refroidissement de l'épilimnion à 2.25 m en aval du rejet (en bas); données horaires du 25 juin au 5 juillet 2010

4/ Eté tardif – automne

Pour la période automnale, la dynamique ressemble beaucoup à celle observée durant l'été: les températures d'air et les températures naturelles de l'eau sont encore relativement élevées mais commencent à diminuer. Bien que légèrement moins marqués, les effets thermiques observés sont les mêmes que ceux observés durant la période estivale. L'impact thermique sur les couches profondes de la zone du rejet devient toutefois moins important (Viquerat *et al.*, 2011c). L'impact potentiel global du refroidissement est jugé très faible, moins important qu'en été.

B/ Plume thermique proche du rejet: mesures à 2.25 m en aval du rejet

Pour rappel, la plume thermique est définie par la zone de mélange entre l'eau rejetée par une installation et celle du cours d'eau ou plan d'eau récepteur. La plume s'étend en aval du point de rejet aussi loin que son influence reste perceptible.

Dans la zone de mélange très proche du rejet (2.25 m en aval du rejet), l'analyse en températures effectuée pour chacune des couches concernées montre que la circulation des masses d'eau y est tout à fait particulière (présence d'importants mouvements convectifs). Le refroidissement induit par le rejet, exprimé en fonction de l'écart de température entre le rejet et la couche en question, apporte des éléments pour caractériser la plume thermique (*fig. 8-27*):

- 4.5 m prof.: c'est clairement la couche la plus profonde qui est le plus souvent et le plus fortement refroidie (jusqu'à 4-5°C) par le rejet. La dispersion verticale des points, importante, signifie que la variation d'énergie rejetée est très influente sur le refroidissement de cette couche,
- 3 et 4 m prof.: ces couches sont bien plus faiblement et moins souvent refroidies que la couche inférieure. Globalement affectées de la même manière, leurs signatures de refroidissement sont quasi identiques: le refroidissement n'est effectif que lorsque l'écart de température entre le rejet et le milieu récepteur est supérieur à 3-5°C; la dispersion verticale est relativement faible signifie que la variation d'énergie rejetée et le rejet lui-même n'affectent que peu ces deux couches,
- 2 m prof.: il s'agit de la limite supérieure d'influence du rejet. La forte dispersion verticale des points est liée à sa position intermédiaire: cette turbulence résulte du fait que les températures naturelles sont à la fois influencées par le rejet du système (faiblement) et par la surface (plus fortement),
- 1 m prof.: cette couche n'est pas sous l'influence du rejet. Le très faible réchauffement observé est lié au fait que l'épilimnion est généralement plus chaud dans la zone du rejet que dans la zone de référence (*cf. chap. 8.1.3*).

Lorsque l'écart de température entre le rejet et le milieu récepteur est faible ($< 3-5^{\circ}\text{C}$), on observe que la couche profonde (4.5 m prof.) est la seule pour laquelle le refroidissement est perceptible. Cette situation est typique du printemps et de l'automne, saisons durant lesquelles la température naturelle du lac est moyenne et n'a pas encore atteint des valeurs aussi élevées qu'en été. La chaleur à évacuer des bâtiments étant moyenne, les débits rejetés ne sont pas suffisamment importants pour influencer les couches supérieures; les masses d'eau rejetées, légèrement plus froides que le milieu récepteur, se dirigent immédiatement le long du gradient de densité en direction des couches profondes.

Lorsque l'écart de température entre le rejet et le milieu récepteur s'accroît ($> 3-5^{\circ}\text{C}$), on observe que le refroidissement devient perceptible pour les couches jusqu'à 3 m prof.. Cette situation est typique de l'été, saison durant laquelle la température naturelle du lac atteint des valeurs élevées, bien supérieures aux températures du rejet. La chaleur à évacuer des bâtiments étant plus importante, les débits rejetés augmentent suffisamment pour que les masses d'eau rejetées atteignent ponctuellement les couches supérieures.

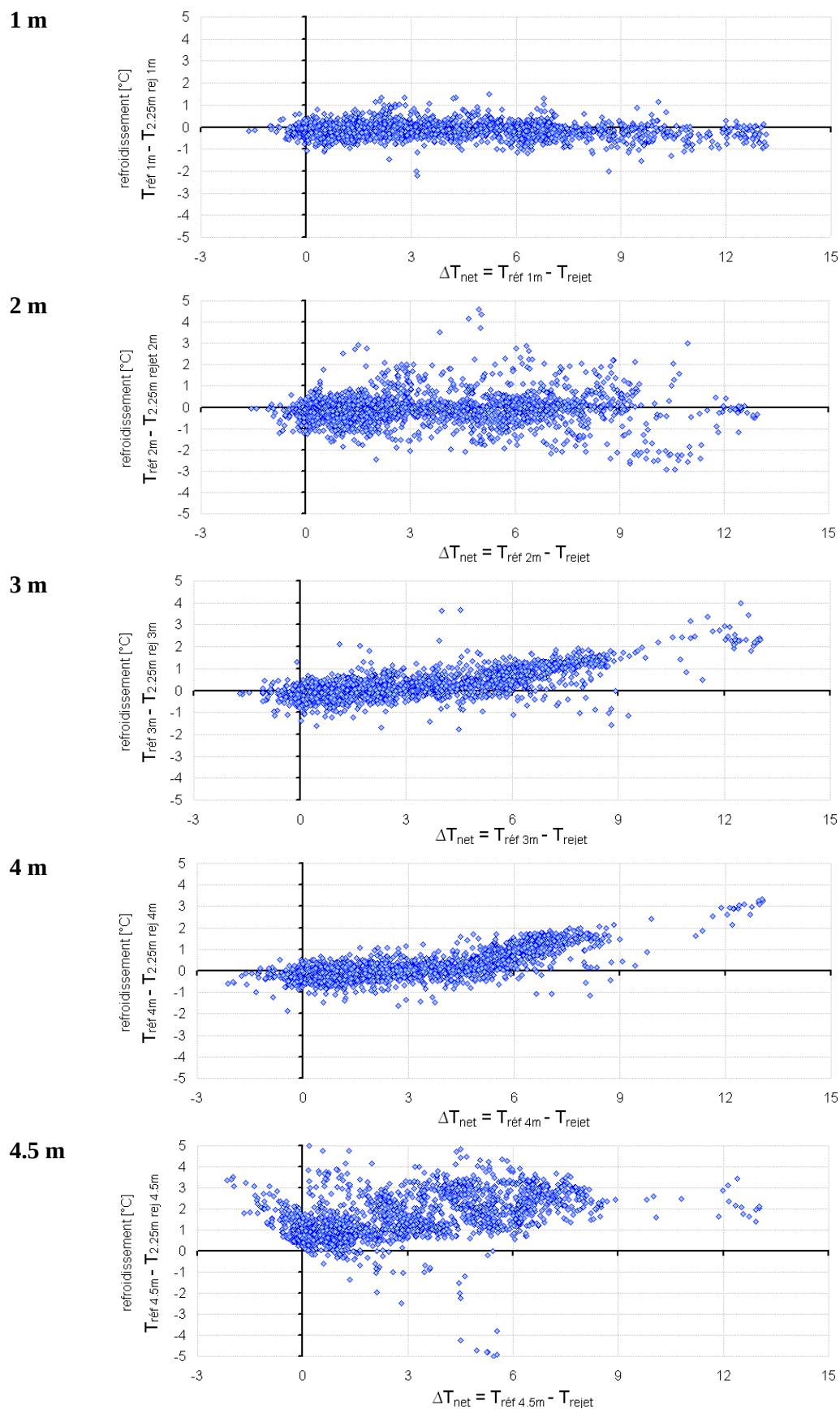


fig. 8-27 Refroidissement de l'épilimnion à 1, 2, 3, 4 et 4.5 m prof. (1, 2) exprimé en fonction de l'écart de température ΔT_{net} entre l'épilimnion (sans rejet, 2) et le rejet du système (14); données horaires du 1^{er} avril au 5 juillet 2010

C/ Plume thermique: mesures et modélisation à 25 et 50 m

A ces distances plus importantes du rejet, les effets thermiques induits par le système ont été évalués de deux manières: par une modélisation 2D de dispersion thermique du rejet, mais aussi *in situ*, par le biais de mesures mensuelles de la température des masses d'eau autour du rejet (rayons de 25 et 50 m).

Pour les mesures *in situ*, la complexité de la dynamique thermique de la zone littorale rend l'interprétation des résultats difficile. Sur les neuf campagnes effectuées entre 2009 et 2010, seules deux (28 juillet 2009 et 9 juin 2010) ont permis de mettre clairement en évidence une signature thermique liée au rejet; pour les autres, les variations thermiques naturelles semblent l'emporter sur celles induites par le rejet. Seule la campagne du 9 juin 2010 est présentée ci-dessous. Pendant les mesures, la température extérieure était de 25°C. Une puissance thermique de 5.5 MW était rejetée par le système à une température de l'ordre de 10°C, soit 6-7°C en dessous de la température naturelle du lac à 4.5 m prof., avec un débit rejeté de 2'000 m³/h (débit_{max} = 4'000 m³/h). Ces conditions ne correspondent donc pas à celles d'un fonctionnement optimal du système à sa pleine capacité.

Les conditions thermiques naturelles de la zone d'étude étaient les suivantes:

- niveaux naturels des températures en surface: normalement élevés, aux alentours de 20-21°C,
- écart de température entre la surface et 4.5 m prof.: relativement important, d'environ 5°C,
- variation thermique spontanée: au maximum de 2°C quelle que soit la profondeur, relativement rapide (environ 15 minutes).

L'influence du rejet a également été étudiée avec un modèle de dispersion thermique développé dans la cadre d'un travail de Master (*Malama, 2009*); la plume est simulée numériquement en 2D « Computational Fluid Dynamics, CFD » avec le logiciel *FLUENT*. Pour les besoins du modèle, les 16 orifices ($\varnothing = 40$ cm) du dispositif de rejet (*fig. 8-28*) sont discrétisés en deux orifices: la vitesse de sortie des eaux rejetées y est représentative du débit du réseau GLN (2'700 m³/h nominal). Les conditions limites à 50 m en amont du rejet (températures naturelles du lac) sont celles mesurées au point de référence.

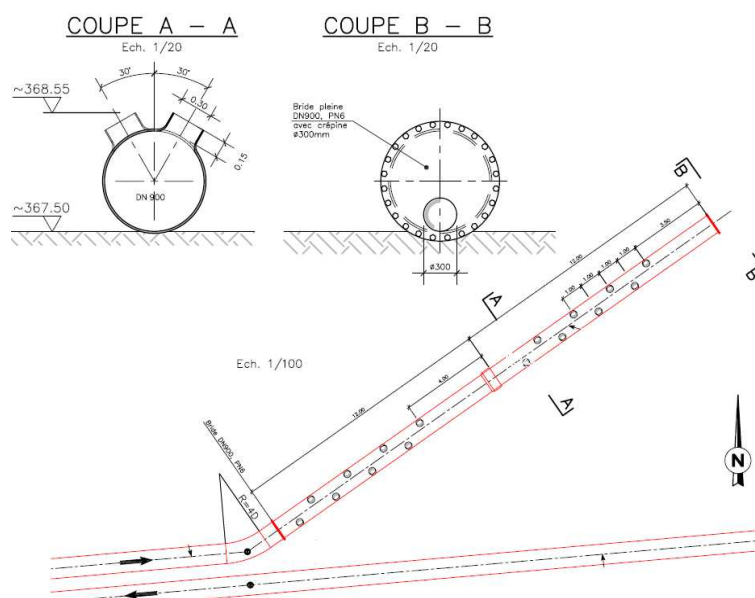


fig. 8-28 Détails de la structure du diffuseur de rejet (source: GEOS ingénieurs)

De manière à pouvoir comparer les résultats issus de la campagne de mesures du 9 juin 2010 avec ce modèle, les conditions choisies pour la simulation 2D doivent être les plus proches possible de celles rencontrées lors de la journée de mesures. La simulation 2D retenue et présentée ci-dessous s'appuie sur les conditions suivantes:

- le 3 août 2007 à 16 h, les températures du lac sont comprises entre 15 et 21°C (conditions limites amont),
- le débit du rejet est fixé à 2'700 m³/h (débit nominal du réseau GLN),
- la température du rejet est fixée à 11°C: elle est représentative des niveaux de température mesurés durant les étés 2009 et 2010 (Viquerat *et al.*, 2010a, 2011a),
- la vitesse du courant est fixée à 6 cm/s: elle est représentative des courants mesurés dans la zone du rejet durant les étés 2007 à 2010 en absence de Bise (Viquerat *et al.*, 2008c, 2009a, 2010a, 2011a).

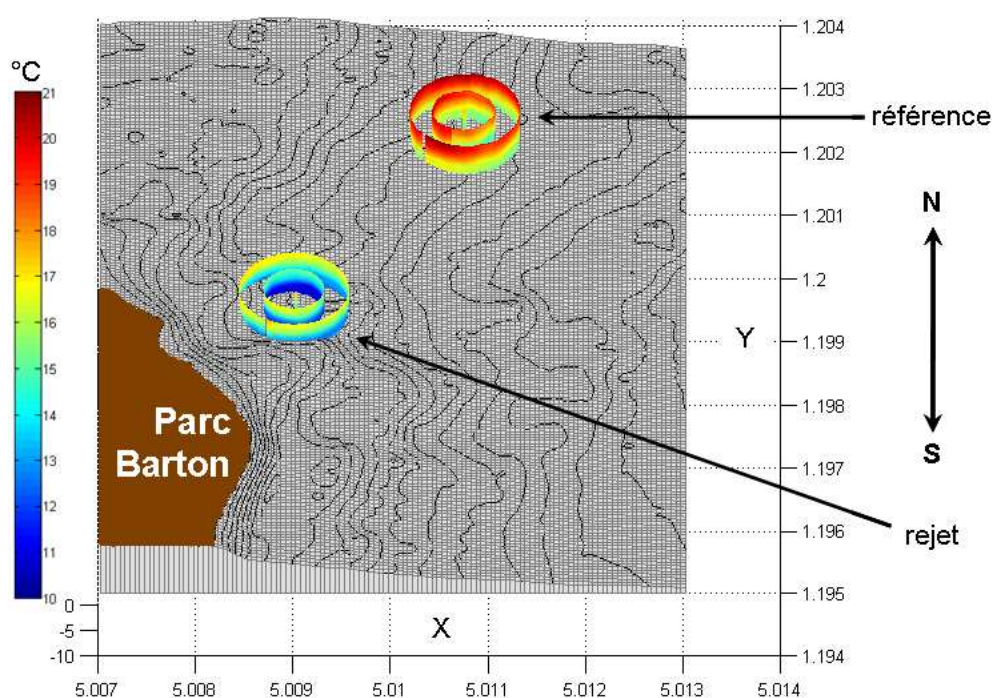


fig. 8-29 Températures à 25 et 50 m autour du rejet, au point de référence (2) et à 2.25 m en aval du rejet (1) à 0.1, 0.5, 1, 2, 3, 3.5, 4, 4.5, 5 et 5.5 m prof., le 9 juin 2010 (14h10-15h25), coordonnées suisses (rapport vertical/horizontal 20/1), isobathe de 0.5 m

La fig. 8-29 illustre les températures mesurées à 25 et 50 m dans la zone du rejet et du point de référence. On y observe un refroidissement global de l'ordre de 2-3°C, perceptible jusqu'à 50 m en aval, formant une sorte de cône partant du rejet (centré au sud et parallèle à la rive, sur l'axe d'écoulement naturel) et se dispersant progressivement vers la gauche, la droite et le haut de la colonne d'eau. C'est l'action conjointe du courant - induit par l'ouverture des vannes au barrage du Seujet - et d'une Bise modérée (9-13 km/h) qui étire cette plume d'eau froide vers l'aval (*en direction du sud sur la fig. 8-29; détails en annexe 7; Viquerat et al.*, 2008a).

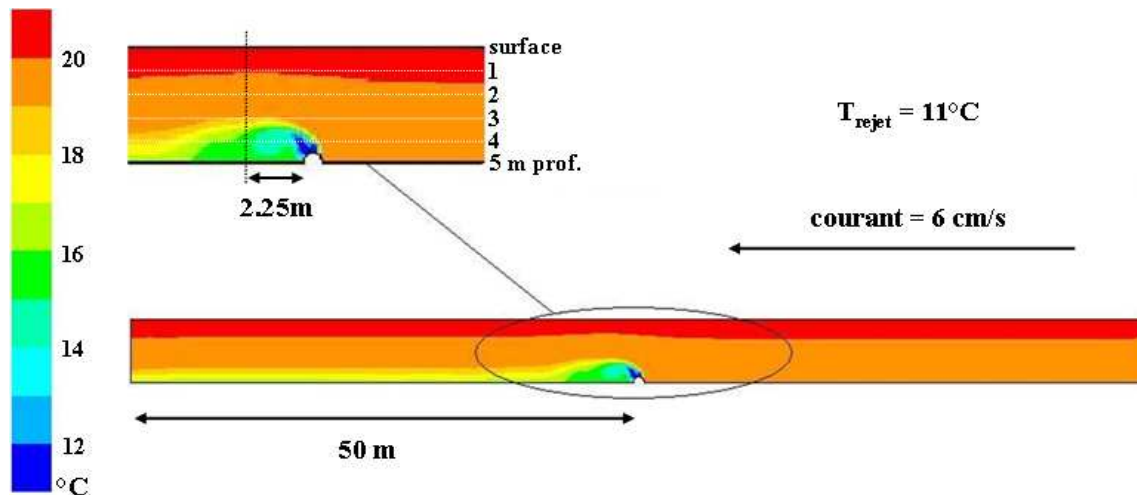


fig. 8-30 Simulation 2D des profils de températures sur le transect perpendiculaire au rejet (14) le 3 août 2007, dans le sens du courant maximum (Malama 2009)

La comparaison de la simulation 2D avec les mesures effectuées met en évidence les points suivants:

- à 2.25 m en aval du rejet, le modèle montre que l'effet thermique est marqué dans les premiers mètres autour du rejet (fig. 8-30): il corrobore les mesures effectuées dans cette zone de la plume thermique très proche du rejet (fig. 8-31). C'est la zone de la plume pour laquelle l'effet thermique est le plus marqué, majoritairement pour les couches les plus profondes,
- au-delà de 5 m en aval, ce modèle montre que l'effet thermique s'atténue rapidement et devient faible, mais en restant perceptible bien en aval: le refroidissement résiduel est de l'ordre de 2°C à 25 et 50 m en aval, mais uniquement pour les couches les plus profonde (4-5 m prof.).

A 25 et 50 m du rejet, l'effet thermique résiduel mesuré actuellement semble donc minime. A l'avenir, les températures de rejet devraient s'élever parallèlement à la quantité de chaleur rejetée (connexion de nouveaux preneurs de froid), jusqu'à des valeurs se rapprochant de celles des couches superficielles réceptrices. A une distance de 50 m en aval du rejet, on devrait donc s'attendre, à terme et la plupart du temps, à des effets thermiques du même ordre de grandeur ou inférieurs aux variations spontanées du milieu.

Notons encore que ces effets ne sont que très ponctuels et que le renouvellement des masses d'eaux est rapide et important dans cette zone. Les refroidissements maximums pourraient être de l'ordre de 2-3°C, mais seulement dans des conditions bien particulières (conjonction d'une forte demande de froid et de températures de l'épilimnion très élevées).

L'ensemble des cas étudiés et modélisés par Malama (2009) fournit des premières indications sur les ordres de grandeur en jeu (longueur, hauteur, forme et intensité des effets thermiques, boucles de circulation, etc.). Quelques cas typiques sont d'ailleurs présentés à l'annexe 7. Toutefois, sur la base du fonctionnement du système (observé depuis sa mise en service), des conditions météorologiques et de leurs incidences sur les conditions du lac que des cas plus proche de situations existantes et pour lesquels l'impact du rejet pourrait être plus significatif, mériteraient d'être simulés et étudiés: par exemple lors de fortes Bises, et en tenant compte de débits plus représentatifs (Merck-Serono + GLN = 4'000 m³/h nominal). Les conditions d'étude de ces cas théoriques sont proposées dans le tableau 8-6 ci-dessous.

CAS LIMITES THEORIQUES : effets thermiques induits par le système (prestation de froid)

Période		Débit Rhône	Vents	Demande de froid		Thermique lacustre naturelle	Effet thermique attendu	
année	semaine	[m³/s]		continu				
				+ confort (faible)	+ confort (important)			
Eté [début avril-début mai à septembre]	jour née en semaine	400-500	-		T _{lac} élevée, stratifié	plume profonde, mince-épaisse, SW-SE, moyennement longue		
						plume profonde, mince-épaisse, SW-SE, longue	X	
			Bise			plume profonde, mince, SW-SE, longue		
		Vent			T _{lac} élevée, non-stratifié	plume profonde, mince, SW-SE, très longue	X	
						plume profonde, épaisse, S-SE, courte		
						plume profonde, épaisse, S-SE, moyennement longue	X	
	nuit et we	100	-		T _{lac} élevée, stratifié	dispersion à 360°, depuis le fond, épaisse		
			Bise			plume profonde, mince, SW-SE, courte		
			Vent			plume profonde, peu épaisse, S-SE, très courte		
Hiver [octobre à fin mars - fin avril]	jour née en semaine	300-400	-		T _{lac} basse, non-stratifié	dispersion à 360° vers la surface - plume SW-SE, très courte		
							dispersion à 360° vers la surface - plume SW-SE, courte	
			Bise				plume vers la surface, SW-SE, moyennement longue	
		Vent				plume vers la surface, SW-SE, longue		
							plume vers la surface, S-SE, longue	
							plume vers la surface, S-SE, moyennement longue	
	nuit et we	50	-			dispersion à 360° vers la surface, très courte		
			Bise			dispersion à 360° - plume SW-SE, courte, vers la surface		
			Vent			dispersion à 360° vers la surface, courte		

Cas probables

Cas potentiellement les plus impactants (à modéliser)

Cas les plus impactants (à modéliser, analyser et discuter)

Hypothèses de travail :

1/ pas de chauffage en été

3/ nuit et we: pas de froid de confort

2/ froid ruban : 365 jours/an, auquel s'ajoute le froid de confort

4/ vents importants, > 20 [km/h]

tableau 8-6 Conditions typiques des scénarios des modèles de la dispersion thermique du rejet (14); scénarios ayant potentiellement un important effet thermique, à étudier en priorité (en jaune)

D/ Mise en relation des effets thermiques avec l'énergie rejetée par le système

Entre le 1^{er} avril et le 5 juillet 2010¹, l'analyse du refroidissement des différentes couches de l'épilimnion à 2.25 m en aval du rejet en fonction de la puissance thermique rejetée par le système met en évidence les points suivants (*fig. 8-31*):

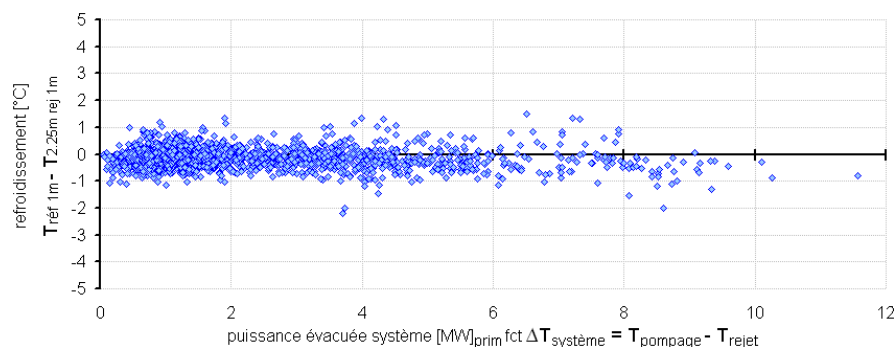
- de manière similaire à l'analyse par niveaux de températures, le refroidissement de l'épilimnion exprimé en fonction de la puissance de froid rejetée est bien plus marqué pour la couche profonde que pour les couches supérieures: il atteint 4-5°C à 4.5 m prof., seulement 2°C à 3 et 4 m prof.,
- le refroidissement de l'épilimnion n'augmente pas linéairement avec la puissance de froid rejetée:
 - jusqu'à une puissance d'environ 1-2 MW, le refroidissement s'accroît rapidement. Il atteint 4°C à 4.5 m prof. et environ 2°C à 3 et 4 m prof.,
 - à 4.5 m prof. et au-delà d'une puissance de 1-2 MW, le refroidissement n'augmente pas au-delà de 4°C, mais son enveloppe se resserre progressivement vers 4°C jusqu'à une puissance de 10 MW,
 - à 3 et 4 m prof., le refroidissement est maximal pour 1 MW. Au-delà, le refroidissement diminue. Ce phénomène, *a priori* peu logique, est lié au fonctionnement peu optimal du réseau Merck-Serono (*Viquerat et al., 2011c*): le débit qu'il rejette est en effet constant et élevé, cela quels que soient ses besoins de froid. Cela dit, en entre-saison, il contribue majoritairement au débit rejeté par le système. De plus, l'épilimnion étant peu stratifié, avec des températures relativement basses et assez proches de la température du rejet, ce dernier peut dans ces conditions facilement se mélanger aux couches à 3 et 4 m prof.. Toutefois, au fur et à mesure que l'épilimnion se stratifie et que le débit rejeté par le réseau GLN augmente, les eaux rejetées par le système ne peuvent plus atteindre ces deux couches.

La chaleur excédentaire des bâtiments à évacuer via le système est fonction de deux paramètres: l'écart de température entre l'eau pompée et rejetée, ainsi que le débit rejeté dans le lac. La manière dont est géré le système a donc une influence importante sur la modification des températures naturelles de l'épilimnion proche du rejet. Des points de vue énergétiques et environnementaux (minimisation de la perturbation du milieu lacustre), une utilisation optimale viserait à rejeter le maximum d'énergie dans le volume d'eau le plus faible, ou autrement dit, en augmentant le plus possible les températures de rejet et en diminuant de la même manière les débits.

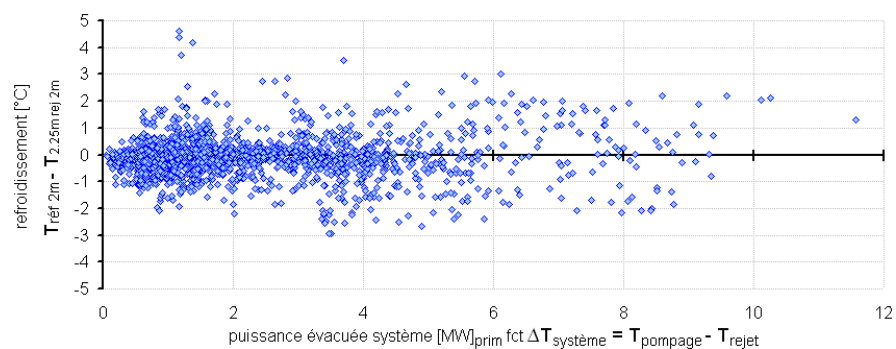
L'exemple de Merck-Serono explicité ci-dessus met clairement en évidence que la modification thermique sur l'épilimnion peut être importante pour des quantités d'énergie rejetées relativement faibles et qu'il est nécessaire de tenir compte des conditions thermiques naturellement en place dans le lac au gré des saisons.

¹ L'analyse qui suit est effectuée sur cette période, car les mesures lacustres ne sont pas disponibles après le 5 juillet

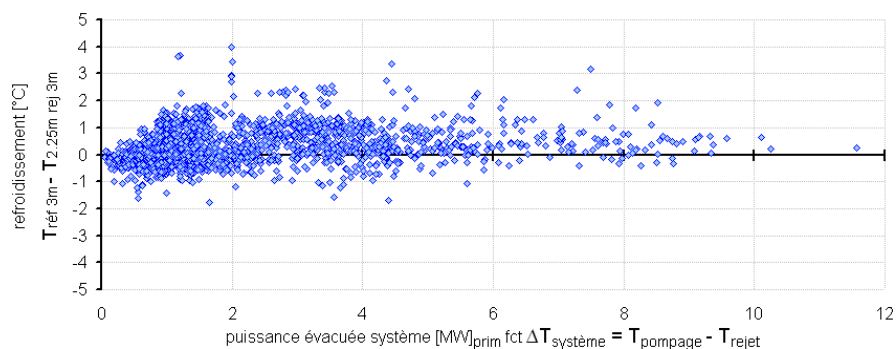
1 m



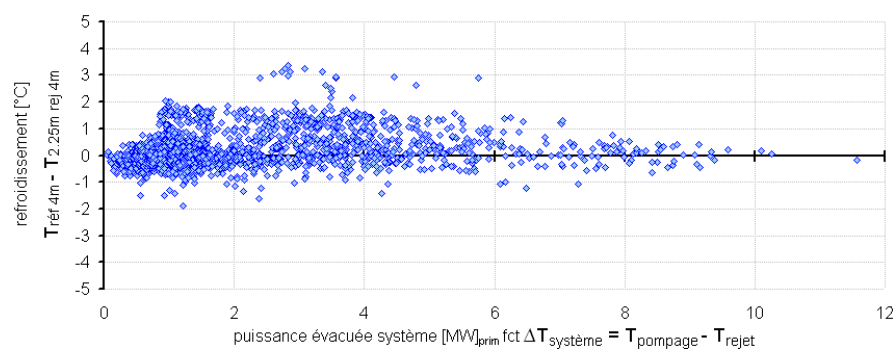
2 m



3 m



4 m



4.5 m

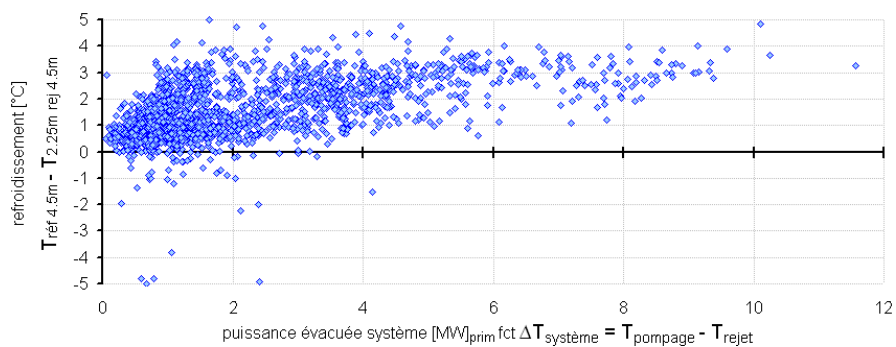


fig. 8-31 Refroidissement de l'épilimnion à 2.25 m en aval du rejet à 1, 2, 3, 4 et 4.5 m prof. (1) exprimé en fonction de la puissance thermique rejetée par le système (4, 14); données horaires du 1^{er} avril au 5 juillet 2010

De ce point de vue, il est donc fondamental et de replacer les refroidissements constatés dans leur contexte, car ils ne sont pas représentatifs du fonctionnement à terme du système, avec des débits qui seront certes plus importants, mais avec des températures de retour qui devraient nettement s'élever après les premières années de mise en service et à travers un processus d'optimisation qui se mettra en place. Sur la base de cette analyse, les refroidissements auxquels on devrait s'attendre ne devraient pas excéder ceux observés en 2010¹:

- à 3 et 4 m prof., le refroidissement devrait être confiné en dessous de 2-3 °C,
- à 4.5 m prof., le refroidissement pourrait encore s'accroître au maximum de 2-3°C, car l'augmentation de débit sur le réseau GLN devrait être compensée à la fois par une légère augmentation des températures de retour des réseaux GLN et Merck-Serono.

Rappelons que ces effets thermiques restent très localisés, circonscrits dans un diamètre de 5 m dans lequel les eaux sont renouvelées en permanence (forte influence du courant induit par le Rhône émissaire), et que les effets sont bien moins marqués au-delà de 5 m du rejet, perceptibles mais résiduels à 25 et 50 m (*fig. 8-29; annexe 7*). Notons encore qu'à plus large échelle, à celle du Rhône genevois et/ou à celle de son bassin versant, les impacts induits par ces effets sont négligeables, d'autant plus que contrairement aux rejets hydrothermiques existants (*Faessler, 2011*), ce système refroidit les couches de surface. En comparaison des nombreux impacts évités par un système de climatisation classique (production de froid électrique avec recours à des tours aéro-réfrigérées), l'impact du système à l'avantage d'être local et faible.

8.4.2.2 Effets physico-chimiques

De manière à déterminer les effets physico-chimiques induits par le système, plusieurs paramètres susceptibles d'avoir une influence sur la qualité des eaux lacustres sont mesurés *in situ* et/ou analysés en laboratoire sur les eaux entrant et sortant du système, ainsi que sur les eaux lacustres réceptrices. Analysés de 2007 à 2010, seuls les résultats de l'année 2010 sont présentés ci-dessous² (le fonctionnement du système en 2010 est le plus représentatif de ses conditions probables ces prochaines années).

A/ pH

Système de pompage et de distribution (tableau 8-7)

Les valeurs de pH mesurées à l'entrée du système (*entrée_{av}*, avant les filtres) et à la sortie de chaque réseau restent très proches. Le pH de l'eau turbinée ne semble pas être modifié (ou de manière peu significative) par son passage à travers les deux réseaux. Les variations interannuelles sont acceptables, du même ordre de grandeur que les variations intra-annuelles: elles sont principalement dues à des dynamiques météorologiques différentes au cours et entre ces quatre années.

Effet sur le lac (tableau 8-7)

En général, le pH des eaux naturelles diminue avec la profondeur, et une poussée estivale du pH s'observe dans l'épilimnion (*CIPEL, 1983*): le pH des eaux pompées (*entrée_{av}*) est donc

¹ Une analyse similaire à plus long terme permettrait de confirmer ces premières estimations

² Les résultats complets se trouvent en annexe 12

légèrement plus faible que celui mesuré dans l'épilimnion (*réf-4*, 4 m prof.), celui des eaux de rejet (*sortie*) également légèrement plus faible que celui des eaux du milieu récepteur (*rej-4*, 4 m prof.).

Les valeurs de pH des eaux lacustres au point de référence (*réf-4*) sont quasiment identiques à celles mesurées à 2.25 m en aval du rejet (*rej-4*): l'influence du rejet sur le lac semble *a priori* non-décelable. De ce point de vue, la perturbation par le système est donc très faible et le système ne semble pas avoir d'impact perceptible.

2010	28 avril	8 juin	6 juillet	5 août	31 août	8 octobre
<i>entrée_{av}</i> (13)	8.3	8	8	8	8.3	7.8
<i>sortie_{SM}</i> (13)	8.2	7.6	8	8.1	8.4	7.8
<i>sortie_{GLN}</i> (13)	8.2	8	8	7.9	8.4	7.8
<i>rej-4</i> (1)	8.7	8.3	8.5	8.4	nd	8.6
<i>réf-4</i> (2)	8.8	8.4	8.5	8.4	nd	8.4
<i>GE3</i>	8.4	8.4	8.5	8.6	8.4	8.5

tableau 8-7 pH des eaux du lac et des réseaux Merck-Serono et GLN; *GE3* est la référence pour le Petit-Lac pour les mêmes périodes mais à des dates différentes des mesures effectuées (nd, non-disponible)

B/ Phosphore

Le système ne représente pas une nouvelle source de phosphore dans le lac: par contre, il le transfère des zones profondes vers les couches de surface productives. Naturellement plus abondant en profondeur durant la période de stratification, le phosphore rapatrié pourrait être la cause d'un bloom algal anormal dans l'épilimnion. Hormis les mesures effectuées en mai 2007, en juin 2009 ainsi qu'à quelques autres dates, les concentrations de phosphore biodisponible (PO_4^{3-}) sont généralement faibles¹ (moyenne annuelle pondérée à toutes les profondeurs).

2010	28 avril	8 juin	6 juillet	5 août	31 août	8 octobre
<i>pompage</i> (4)	12.9	20.4	8.2	17.5	<5	
<i>entrée_{av}</i> (13)	nd	21.2	8.4	16.5	<5	
<i>entrée_{ap-SM}</i> (13)	nd	23.5	nd	19.4	<5	5.3
<i>sortie_{SM}</i> (13)		20		22.3	<5	
<i>entrée_{ap-GLN}</i> (13)	nd	23.5	nd	24.2	<5	
<i>sortie_{GLN}</i> (13)		19		17.5		
<i>rej-4</i> (1)	15.6	16	<5		<5	6.2
<i>réf-4</i> (2)	11	12.3			<5	

tableau 8-8 Phosphore dissous ($\mu\text{g/l}$) des eaux du lac et des réseaux Merck-Serono et GLN (nd, non-disponible)

Système de pompage et de distribution (tableau 8-8)

Les concentrations mesurées au pompage sont du même ordre de grandeur ou très légèrement supérieures à celles mesurées dans le système (*entrée* et *sortie*). La perturbation par le système est donc très faible.

¹ Les résultats complets (phosphore dissous, dissout total et total) se trouvent en annexe 12

Effet sur le lac (tableau 8-8)

Les concentrations de phosphore biodisponible des eaux de rejet (*sortie*) sont deux à huit fois plus élevées (la plupart du temps deux fois) que celles des eaux du milieu récepteur (*réf-4*, 4 m prof.). Cela n'a toutefois pas ou très peu d'influence sur la concentration des eaux lacustres à proximité du rejet (2.25 m en aval du rejet, *rej*), où l'influence du rejet n'est perceptible qu'en 2009 et 2010. De ce point de vue, le système a un effet perceptible, mais faible: la dilution est rapide et s'opère dans une zone très proche du rejet.

C/ Chlore actif

Pour rappel, le chlore injecté en continu à la crépine d'aspiration ne doit pas excéder une concentration supérieure à 50 µg/lCl₂ dans les eaux de rejet (*OEaux*, 1998).

	disp	tot	disp	tot	disp	tot	disp	tot	disp	tot	disp	tot
2010	28 avril		8 juin		6 juillet		5 août		31 août		8 octobre	
entrée _{av} (13)	60-70	>100	10-20	30-40	<10				30-40	40-50	20-30	40-50
entrée _{ap-SM} (13)	60-70	>100	<10	10-20	<10				10-20	20-30	20-30	40-50
sortie _{SM} (13)	90-100			<10								
entrée _{ap-GLN} (13)	<10	20-30	<10	10-20	<10				10-20	20-30	40-50	
sortie _{GLN} (13)	20-30	40-50							<10		10-20	
rej (1)	<10								nd		<10	

tableau 8-9 Chlore résiduel et total (µg/l) dans les eaux des réseaux Merck-Serono et GLN (nd, non-disponible)

Système de pompage et de distribution (tableau 8-9)

A l'exception des mois d'avril 2008, mai et juin 2009 et avril 2010, les concentrations de chlore actif des eaux de rejet (*sortie(s)*) sont inférieures à la limite légale. Ces dépassements ponctuels sont tous liés à des interventions spécifiques d'exploitation: remplacement de la conduite d'injection de chlore à la crépine d'aspiration en avril 2008, mise en eau et tests du réseau GLN en mai-juin 2009, mise en service de la sous-station du CICG en avril 2010.

Effet sur le lac (tableau 8-9)

L'influence du système sur les eaux du lac à proximité du rejet (*rej-4*, 4 m prof.) est faible et les concentrations imperceptibles (sauf le 8 juin: présence de traces à *rej-4*, 4 m prof.).

Par sécurité et comme convenu dans le cadre du mandat de suivi lié à la concession (*annexe 13*), des mesures ponctuelles ont été effectuées à 25 m du rejet durant la saison 2010: les concentrations mesurées étaient toutes inférieures au seuil de détection de l'appareil (10 µg/l). De ce point de vue, le système ne semble pas avoir d'impact.

D/ Turbidité

La dynamique naturelle de la transparence de l'eau est fortement corrélée avec l'activité biologique dans la zone photique lacustre. La turbidité des eaux rejetées par le système, ne doit pas excéder 5 NTU (*nephelometric turbidity unit*); elle devrait de préférence rester en dessous de 1 NTU (*WHO*, 2007).

Pour le point de référence et à 2.25 m en aval du rejet, la turbidité des eaux lacustres satisfait à la limite fixée par la norme (5 NTU) quelle que soit la profondeur (*fig. 8-32*). En 2009 et

2010, la turbidité augmente sensiblement à 2.25 m en aval du rejet, particulièrement à 2 et 4 m prof.: les eaux y sont environ 0.7 NTU plus élevées qu'au site de référence (en 2010).

Globalement, la mise en service successive des installations des deux réseaux ne semble pas avoir une influence négative importante sur la turbidité des eaux lacustres. Bien que l'accroissement de la turbidité dans la zone du rejet soit discernable en 2009 et en 2010, les valeurs absolues restent faibles et acceptables.

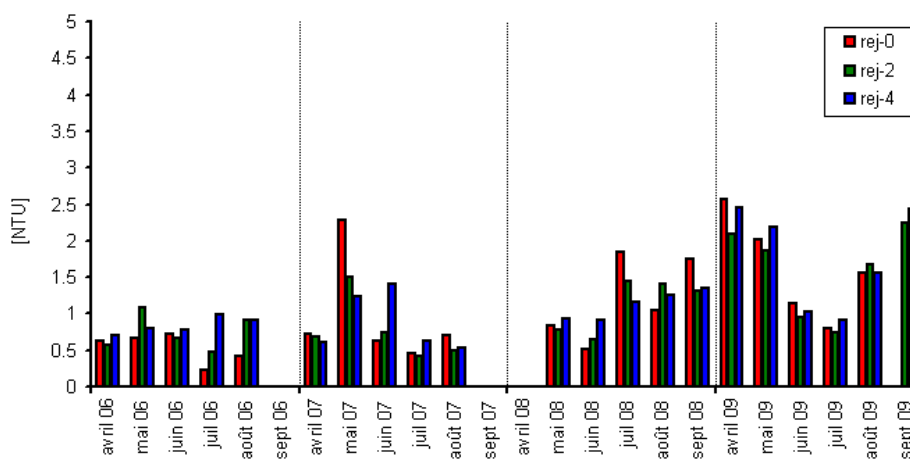


fig. 8-32 Turbidité des eaux du lac à 2.25 m en aval du rejet (1)

8.4.2.3 Impacts sur la faune et la flore

L'étude des macrophytes et de la macrofaune benthique a été sous-traitée au bureau *GREN Biologie appliquées Sàrl* (*GREN, 2007, 2009 et 2010*). Pour rappel, les analyses sont effectuées à un point de référence situé à 40 m en amont du rejet (*référence*) et à un point à 2 m en aval du rejet (*impacté*). Les analyses réalisées en 2007 représentent l'état de référence (avant la mise en service du système), 2009 et 2010 l'état après la mise en service des installations.

Comme les années 2009 et 2010 ne sont pas représentatives d'un fonctionnement du système à sa capacité nominale, une deuxième phase de suivi allégé a été proposée pour la période 2011-2014: un protocole de mesure a d'ailleurs été établi par le Groupe Energie dans le cadre de la poursuite du suivi lié à la concession (*annexe 13*).

D'une manière générale, les effets thermiques constatés ne génèrent pas d'impacts notables sur la faune et la flore aquatique vivant à proximité, d'autant plus que l'effet thermique principal causé par le système - une diminution de température - est moins problématique que celui qui pourrait être causé par une augmentation de la température du milieu. Des éléments bibliographiques utiles à cette évaluation sont détaillés en *annexe 14*.

A/ Macrophytes

Du point de vue de la colonisation des fonds par les macrophytes et les algues, les deux sites sont très similaires pour l'année 2007 (absence de rejet).

Malgré la mise en service du système en 2008, l'évolution de la colonisation des fonds par les macrophytes entre 2007 et 2010 est avant tout influencée par la variabilité naturelle du milieu, en particulier l'évolution de la qualité du sédiment: les fortes Bises de 2009 ont en effet engendrés de forts courants qui ont en partie balayé les sédiments fins initialement présents. Cela dit et jusqu'à ce jour, l'équilibre naturel de la végétation aquatique ne semble pas être

modifié directement par le système; la variabilité interannuelle naturelle de colonisation des fonds par les macrophytes reste prépondérante.

B/ Macrofaune benthique

En 2007, les deux sites sont caractérisés par une qualité structurelle des habitats assez proche. La diversité est moyenne à bonne (32 taxons recensés) et représentative de la zone riveraine. Le peuplement est toutefois largement dominé par deux espèces exogènes et envahissantes (la moule zébrée *Dreissena* et la crevette tueuse *Dikerogammarus*).

Entre 2007 et 2010, la diversité dans les communautés d'invertébrés benthiques a diminué (de 32 à 16 taxons recensés) et s'est banalisée sur les deux sites: cet appauvrissement touche tous les groupes faunistiques. Seuls les groupes taxonomiques des espèces exogènes et envahissantes sont en expansion, ce qui génère une évolution négative pour les communautés benthiques indigènes.

Jusqu'à ce jour, le rejet du système ne semble pas provoquer d'impact négatif direct sur la communauté benthique vivant à proximité. La baisse de la diversité est à associer à d'autres facteurs, dont les principaux pourraient être l'arrivée en masse de la crevette tueuse (ce gammare prédateur est fortement suspecté d'appauvrir les communautés dans le lac et le Rhône émissaire).

C/ Ichtyofaune

En ce qui concerne les communautés de poissons, aucune mesure ou observation n'a été effectuée sur le terrain. La discussion ci-dessous est issue d'une confrontation de données bibliographiques avec les mesures de température effectuées dans le lac.

De nombreux facteurs (température de l'eau, substrat, niveau de pollution, disponibilité en nourriture, présence de prédateurs) sont critiques et déterminants pour l'habitat spécifique des poissons (Allan, 1995). Leur métabolisme dépend de la température de l'eau: plus elle augmente, plus la quantité de nourriture requise s'accroît (maintien du poids sans croissance), tout particulièrement pour leur croissance et leur reproduction (Doudoroff, 1971). Étudiés depuis les années 1970, quelques effets génériques de rejets thermiques sur les communautés piscicoles ont été observés (Beauchamp, 2006):

- la sensibilité à la température dépend du stade de vie de l'organisme: les œufs et les larves émergentes requièrent des conditions thermiques plus strictes que les adultes (Armstrong et al., 2003). En particulier, un changement de température imposé à des populations adultes qui ont subi des chocs thermiques au cours de leurs premiers stades de vie est plus nuisible que pour les populations n'ayant pas subi ces stress (Elliot, 1989),
- les adultes sont capables de détecter un gradient de température et de le parcourir jusqu'à trouver un endroit où la fourchette de températures leur est favorable (Raney, 1971): les poissons adultes choisissent de passer du temps dans des eaux dont la température correspond le mieux à leurs besoins biologiques à un moment donné, ou évitent les eaux en dehors de leur fourchette de température préférée. Ces comportements d'évitement peuvent conduire un poisson adulte à abandonner une zone en faveur d'une autre plus appropriée,
- les effluents thermiques peuvent aussi avoir des effets bénéfiques, pour autant que l'augmentation de température reste dans une fourchette de tolérance, qui reste toutefois difficile à déterminer (Mathur, 1976). Si le changement de température est graduel, un processus d'acclimatation peut se mettre en place: d'ailleurs, les poissons acclimatés deviennent plus tolérants à des changements brusques (thermal shock, Raney, 1971). De

plus, une fois acclimatés à des températures supérieures, une diminution provoque plus d'effets négatifs qu'une augmentation de température (*Raney, 1971*),

- lorsque la température s'approche des limites létales (maximum ou minimum), les effets induits sont plus sévères (*Alabastar, 1971*),
- il faut distinguer une augmentation de la température localisée due à un effluent thermique d'une augmentation de température générale d'un plan d'eau à moyen terme; la modification du régime des rejets thermiques est impliquée dans la dynamique des populations piscicoles (*Muller, 1996*),
- il faut également considérer la disponibilité de sites nécessaires (croissance et reproduction): lorsque le substrat graveleux (p. ex. nécessaire à la reproduction des Salmonidés) est éliminé ou envahi (p. ex. par *Dreissena*), les populations restent faibles même si les conditions thermiques sont favorables (*Armstrong et al., 1993*).

La zone littorale joue un rôle-clé pour les 26 espèces de poissons du Léman qui, pour la majorité d'entre elles, constitue l'habitat principal (*fig. 8-33*). La zone du rejet du système est située dans cette zone littorale qui, à cet endroit, est considérée comme un site écologique d'importance (*annexe 14*). La zone du rejet est potentiellement occupée par le brochet et la truite de rivière: la présence d'adultes et d'alevins est probable (zone de frai) et la truite de rivière y est également pêchée. Cette zone peu profonde et très productive contribue aussi à leur nourriture. Son occupation varie en fonction des saisons: brochets et tanches y sont présents à l'année, brèmes et féras en été, les salmonidés plutôt en hiver:

- truite de rivière: à Genève, les conditions de reproduction de cette espèce menacée ne sont pas bonnes (pollutions chroniques et obstacles à sa migration; *Buttiker et al., 1983*), mais elle se reproduit quand même dans quelques affluents. Ses effectifs étant peu importants, des alevins sont introduits annuellement dans le lac. Ses exigences thermiques sont relativement strictes, mais les températures observées dans la zone du rejet durant sa période de reproduction (janvier à fin mars) sont généralement satisfaisantes (*Bruslé et al., 2001*): en effet, l'impact thermique du système observé est très faible (refroidissement inférieur à 1°C), ce qui ne devrait pas constituer un problème en soi pour sa reproduction. D'autres facteurs impliqués semblent donc plus déterminants, comme le manque de disponibilité de sites nécessaires à la reproduction (un envahissement du substrat graveleux par *Dreissena* a été constaté en été 2010; *GREN 2010*). De plus, l'étendue de surface littorale offerte par le petit lac genevois devrait permettre aux individus adultes de trouver un endroit où la fourchette de températures leur est favorable (comportement d'évitement: *Raney, 1971*),
- brochet: cette espèce menacée se reproduit de mi-février à mi-avril dans des herbiers denses de la zone littorale (*ECOTEC, 1993, Bruslé et al., 2001*). Les œufs sont déposés directement sur les macrophytes, puis y adhèrent jusqu'à ce que les juvéniles éclos se nourrissent d'alevins et de macrophytes. La présence d'herbiers denses à proximité du rejet fait de cette zone un site important de reproduction et de croissance pour les alevins et les juvéniles. Au printemps, les niveaux de température du rejet sont très proches des niveaux naturels des couches profondes. A proximité du rejet, l'amplitude du refroidissement thermique induite par le rejet est faible, généralement inférieure aux variations naturelles observées (ils peuvent néanmoins être rapides). Le rejet thermique ne devrait donc pas, en soi, constituer un problème pour sa reproduction. Toutefois, un changement rapide de la température, naturel ou induit, est un facteur important de mortalité précoce de ses juvéniles (*Bruslé et al., 2001*): n'étant plus aussi sensibles à un changement rapide de la température comme ils l'étaient au printemps juste après la ponte (*Bruslé et al., 2001*),

l'impact potentiel estival sur les juvéniles est donc considéré comme nul. L'impact global est donc considéré comme nul ou très faible,

- corrégone: la féra se reproduit en hiver, généralement dans la beine littorale à des profondeurs comprises entre 5 et 20 m. Les œufs sont déposés sur des bancs de gravier ou directement en pleine eau. Les juvéniles semblent coloniser le lac entier, le plus souvent dans les eaux de surface où le phytoplancton est disponible. Le rejet du système n'a donc aucun impact sur cette espèce,
- omble: Il se reproduit en hiver en profondeur (> 30 m) et n'est pas directement lié à la zone littorale. Le rejet du système n'a donc aucun impact sur cette espèce. Au niveau du canton, les zones de frai ne sont toutefois pas connues.

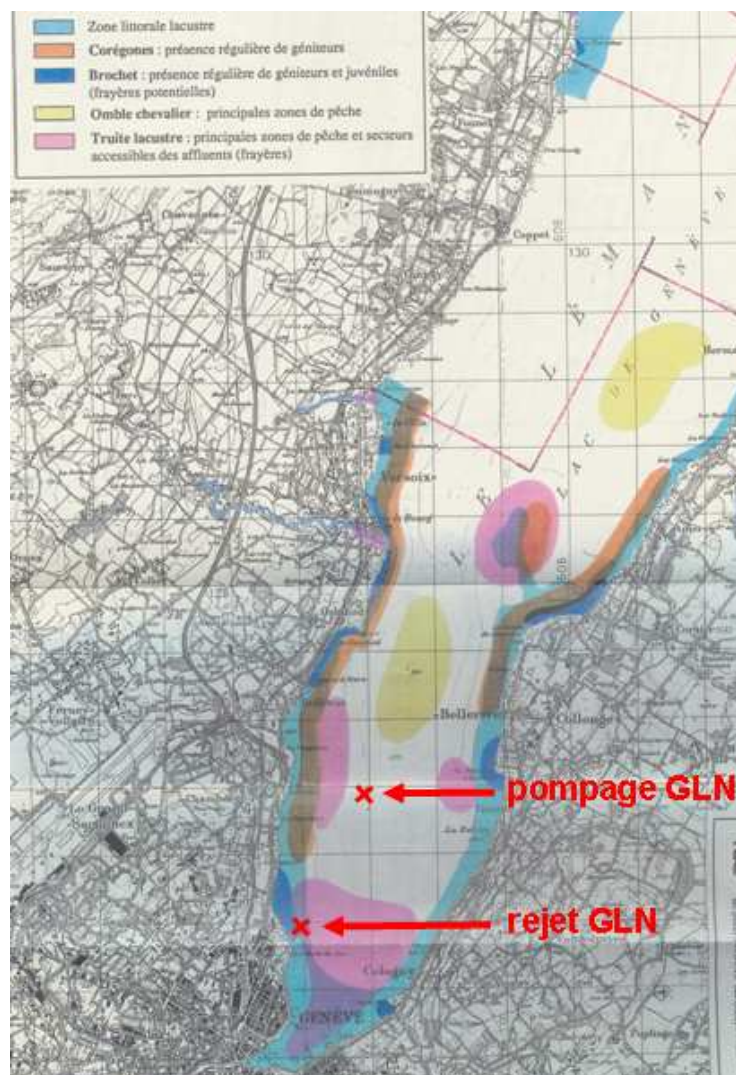


fig. 8-33 Zones occupées par les quatre espèces principales de poissons dans le Léman genevois (ECOTEC, 1993)

Notons encore qu'un poisson inédit pour le Lac Léman, la blennie fluviatile *Salaria fluviatilis* Asso 1801, a été découvert en 2010 dans le substrat artificiel du site du rejet (GREN, 2010): il s'agit d'une blennie d'eau douce, bien connue dans le pourtour Méditerranéen mais inconnue jusqu'alors en Suisse.



fig. 8-34 *Salaria fluviatilis* Asso 1801 (GREN, 2010)

8.4.3 Résumé

Il est nécessaire de faire la distinction entre les effets thermiques très localisés (à 2.25 m en aval du rejet), ceux proches du rejet (inférieurs à 100 m) et leurs effets globaux sur le système hydrologique régional.

D'après nos résultats et au sens de la législation relative, les effets thermiques locaux constatés sont *a priori* très faibles et ne devraient pas générer d'impacts significatifs sur la faune et la flore aquatique (macrophytes, macrofaune benthique et ichtyofaune) vivant à proximité.

Au printemps, les impacts locaux du refroidissement et du réchauffement sont jugés très faibles voire nuls:

- amplitude et rapidité du refroidissement: l'impact potentiel est nul. L'amplitude thermique est faible et inférieure aux variations naturelles observées; les changements de température provoqués sont rapides, mais les variations naturelles peuvent aussi l'être,
- durée du refroidissement: l'impact potentiel est moyen, surtout sur la macrofaune benthique (zone profonde), car l'événement se déroule tout au long du printemps; le suivi effectué sur la macrofaune benthique n'a toutefois révélé aucun impact direct perceptible,
- amplitude et rapidité du réchauffement: l'impact potentiel est *a priori* nul, pour les mêmes raisons que pour le refroidissement. Toutefois, la zone du rejet est une zone de frai potentielle pour le brochet (ECOTEC, 1993, Bruslé et al., 2001). Un faible impact potentiel est présent, car un changement rapide de la température est un facteur important de mortalité précoce de ses juvéniles.

En été, les impacts potentiels du refroidissement sont jugés faibles voire très faibles, ceux du réchauffement sont jugés nuls:

- amplitude, durée et rapidité du refroidissement: l'amplitude thermique est relativement plus importante (2 au 5 juillet) que celle des variations naturelles observées. Un impact potentiel est donc possible, et concerne surtout la macrofaune benthique (zone profonde), car l'événement se déroule tout au long de l'été. Comme au printemps, aucun impact sur la macrofaune benthique n'a toutefois été décelé (ECOTEC, 2010),
- amplitude et rapidité du réchauffement: l'impact potentiel est *a priori* nul, pour les mêmes raisons que pour le refroidissement. La zone du rejet est une zone de frai potentielle pour le brochet (ECOTEC, 1993), mais la période de reproduction est passée depuis longtemps (Bruslé et al., 2001); l'impact potentiel est donc considéré comme nul.

Au-delà de ces effets locaux liés à un rejet thermique particulier, l'intensification de la filière hydrothermique au niveau du Petit-Lac nécessite une discussion à l'échelle du système hydrologique régional: en plus de systèmes existants sur le Rhône genevois dont il faut tenir compte, plusieurs installations similaires et de grande taille sont projetées. Le potentiel énergétique du Petit-Lac pouvant être limité à la fois en amont par la ressource (volumes, niveaux de température et stabilité thermique des couches profondes), mais également en aval par les rejets (emplacement, quantité et qualité des eaux rejetées), ces aspects sont discutés de manière commune au *chapitre 10.3*.

8.5 Potentiels hydrothermiques régionaux « froid » et « chaud »

Comme décrit en introduction du *chapitre 8*, les masses d'eau situées à des profondeurs supérieures à 40 m peuvent potentiellement constituer une ressource hydrothermique de bonne qualité (*cf. chap. 8.2*). Le volume de ces couches profondes est important et représente proportionnellement environ 25 % du volume total pour le Petit-Lac et le Petit-Lac genevois, seulement 5 % pour la Rade de Genève (*fig. 8-35*). Cette dernière portion de lac est en effet peu profonde et la majorité de sa surface est constituée de zones riveraines.

Bien que les masses d'eau s'échangent continuellement entre Grand-Lac et Petit-Lac, on peut tout de même considérer le Petit-Lac comme une sorte de rivière, dans le sens où il est alimenté par le Grand-Lac et se vide dans le Rhône émissaire. Quel que soit l'emplacement du pompage (Rade, Petit-Lac genevois ou plus en amont), la ressource hydrothermique régionale est donc constituée par le Petit-Lac Léman dans son intégralité, car sa couche-ressource est continuellement alimentée par le Grand-Lac. Les deux autres volumes définis ci-dessous (Petit-Lac genevois et Rade de Genève) sont étudiés complémentirement pour donner un ordre de grandeur des potentiels hydrothermiques que pourraient présenter des lacs qui partageraient des caractéristiques similaires (volume, rapport surface/volume).

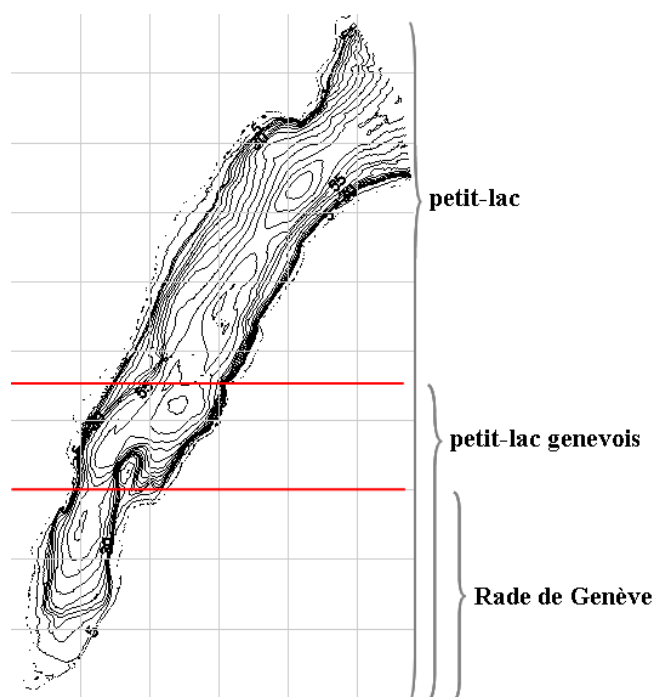


fig. 8-35 Profils bathymétriques du Petit-Lac, du Petit-Lac genevois et de la Rade de Genève

8.5.1 Modèle hydrothermique dynamique

8.5.1.1 Principes

Afin de déterminer les potentiels énergétiques offerts, un modèle hydrothermique a été développé (fig. 8-36). Basé sur une consommation à la fois de froid et de chaud, il s'articule autour des contraintes suivantes:

1. contrainte légale: minimisation du changement de température de l'épilimnion: réchauffement maximum mensuel de 1.5°C (LEaux, 1991) et refroidissement maximum mensuel inférieur à 1.5°C ¹,
2. contraintes hydrologiques: elles traduisent la minimisation des atteintes aux structures thermiques estivales et à la dynamique hydrologiques naturelle:
 - le renouvellement des eaux de l'épilimnion doit être garanti: il doit être largement supérieur à son remplissage par les eaux du rejet du système,
 - l'épuisement de la couche-ressource (hypolimnion) ne doit être trop rapide, de manière à préserver la structure thermique et la pérennité de la ressource au cours de la période chaude. Un temps minimum de nonante jours est considéré comme convenable.

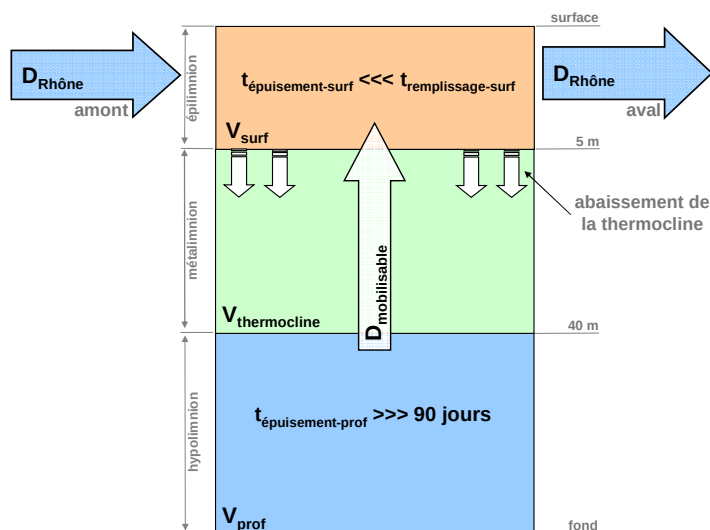


fig. 8-36 Schéma du modèle hydrothermique

Pour les besoins de cette analyse, le fonctionnement du Petit-Lac a été grandement simplifié:

- le modèle ne tient pas compte du fait que le Petit-Lac n'est qu'une sorte d'annexe du Grand-Lac et un lieu de transit entre le Grand-Lac et le Rhône émissaire,
- pour évaluer la pérennité de la couche-ressource au cours d'une saison chaude, nous considérons que son renouvellement est nul (alors qu'en réalité, il l'est),
- pour évaluer l'impact thermique du rejet sur l'épilimnion, nous considérons que l'épilimnion fonctionne comme une couche qui glisse sur les couches plus profondes (alimentée par l'amont puis vidée par le Rhône émissaire).

¹ Bien qu'aucune valeur légale ne soit mentionnée dans la législation relative en ce qui concerne le refroidissement des eaux, cette valeur a été retenue de manière à respecter les exigences qualitatives supplémentaires fixées par l'OEaux pour les étendues d'eau (voir pp. 116ss)

Ces deux simplifications rendent le modèle conservatif, car la couche-ressource est en réalité renouvelée et l'épilimnion effectue des échanges convectifs avec les couches plus profondes.

8.5.1.2 Hypothèses

Ces contraintes s'appliquent au modèle en considérant de valeurs limites de volume, des niveaux de température et de débit pour la couche-ressource, l'épilimnion et le rejet du système. Les hypothèses prises en compte sont les suivantes:

- $\Delta T_{\text{utiles}}: \Delta T_{\text{froid}} = 5^{\circ}\text{C}, \Delta T_{\text{chaud}} = 3^{\circ}\text{C}$,
- le niveau supérieur de la couche-ressource (hypolimnion) est situé à 40 m prof.,
- le niveau inférieur de la couche de surface (épilimnion) est situé à 5 m prof.,
- l'eau pompée peut être utilisée à la fois pour le froid et le chaud, mais seulement une seule fois pour chacune de ces prestations (réseau fonctionnant en mode ouvert en permanence),
- la répartition mensuelle de la demande de froid est basée sur la demande observée en 2009 et 2010 pour les quatre bâtiments connectés au réseau GLN,
- la répartition mensuelle de la demande de chaud (chauffage + eau chaude sanitaire) est basée sur la demande des bâtiments du Pommier observée en 2006 et 2007 (Zgraggen, 2010; annexe 15),
- les températures de la couche de surface et les débits du Rhône émissaire proviennent des mesures OFEV à la station Rhône-Ile¹; les températures de la couche profonde (37 m prof.) proviennent des mesures SIG à la station de pompage d'eau potable du Prieuré. Ce sont des valeurs mensuelles (moyennes 2000-2008).

8.5.2 Temps d'épuisement de la couche-ressource

De manière à cerner l'ordre de grandeur du temps d'épuisement de la couche-ressource pour les trois lacs-types considérés, trois débits mobilisables sont étudiés: $D_{\text{Rhône}}$ (cas maximum théorique), $D_{\text{Rhône}}/5$ et $D_{\text{Rhône}}/10$ (tableau 8-10):

- lac du type « Rade de Genève »: le temps d'épuisement de sa couche-ressource est inférieur à 90 jours quel que soit le débit mobilisé,
- lac du type « Petit-Lac genevois »: le débit mobilisable est de l'ordre de 10 % de celui du Rhône, sauf en été où il doit être légèrement diminué (le temps d'épuisement de sa couche-ressource y est légèrement inférieur à nonante jours),
- petit Lac Léman: un débit de l'ordre de 20 % de celui du Rhône est tout à fait exploitable, car les temps d'épuisement de la couche-ressource sont largement supérieurs à nonante jours. Bien que de ce point de vue des débits supérieurs puissent être mobilisés, on considère $D_{\text{Rhône}}/5$ comme étant un débit mobilisable maximum largement suffisant pour que la couche-ressource ne soit pas épuisée.

L'exemple du mois de juin pour un lac du type « Petit-Lac genevois » (tableau 8-10) montre que si le débit mobilisé est équivalent à celui du Rhône, la couche ressource se viderait en

¹ La mesure de la température du Rhône-Ile est considérée comme représentative de la température moyenne de la couche 0-5 m de l'épilimnion lacustre qui s'écoule dans le Rhône-émissaire (Viquerat et al., 2009a, 2010a)

seulement huit jours, ce qui ne serait pas soutenable: la couche profonde s'épuiserait trop rapidement (en moins de nonante jours) et le bilan thermique de la couche de surface serait beaucoup trop influencé par le débit rejeté par le système.

épuisement couche-ressource [jours]	D _{mobilisé}	avril	mai	juin	juillet	août	sept.
lac du type « Rade de Genève »	D _{Rhône} /10	12	10	7	7	8	10
	D _{Rhône} /5	6	5	3	4	4	5
	D _{Rhône}	1	1	1	1	1	1
lac du type « petit-lac genevois »	D _{Rhône} /10	133	113	77	80	86	118
	D _{Rhône} /5	66	57	38	40	43	59
	D _{Rhône}	13	11	8	8	9	12
petit-lac (Léman)	D _{Rhône} /10	539	461	313	323	352	482
	D _{Rhône} /5	270	231	157	162	176	241
	D _{Rhône}	54	46	31	32	35	48

tableau 8-10 Temps d'épuisement (exprimé en jours) de la couche-ressource en fonction des débits mobilisables et des lacs-types considérés

En transférant une certaine quantité d'eau et d'énergie de la couche-ressource vers l'épilimnion, le système provoque un abaissement de la thermocline au cours de la saison chaude: il est donc nécessaire que la couche intermédiaire (métalimnion) soit suffisamment volumineuse pour garantir la préservation de la couche inférieure pour une durée de nonante jours au minimum (contrainte hydrologique)¹. Le métalimnion joue donc un rôle de « tampon », dans lequel la thermocline s'abaisse peu à peu au cours de la saison chaude.

De ce point de vue, le rapport « *volume du métalimnion / volume de la couche-ressource* » est donc déterminant: la Rade de Genève est le volume de lac qui a le rapport le plus faible, avec une valeur voisine de 2.5 (*tableau 8-1*); les deux autres volumes (Petit-Lac et Petit-Lac genevois) ont un rapport bien plus élevé, de l'ordre de 10.

La marge de sécurité reste donc très grande avant que la thermocline ne puisse rejoindre la couche profonde et péjorer la qualité de la couche-ressource, cela quel que soit le volume de lac considéré.

¹ De septembre à mars, le lac n'est que peu stratifié: seule la contrainte légale est effective sur les débits mobilisables (réchauffement ou refroidissement maximum de 1.5°C)

8.5.3 Détermination des potentiels

Par définition, deux types de potentiels sont pris en considération:

1. théoriques: les potentiels énergétiques des deux premiers scénarios, « *Rhône* » et « $\Delta T = + 1.5^{\circ}\text{C}$ », sont théoriques et basés sur les quantités maximums d'énergie que l'on pourrait tirer des volumes de lacs considérés,
2. acceptables: Les potentiels énergétiques du « *cas retenu* » sont considérés comme acceptables et réalistes. Ils sont bien inférieurs aux potentiels théoriques et basés sur la minimisation des impacts pour les volumes de lac pris en considération. Les débits mensuels mobilisables retenus sont les suivants (*tableau 8-10*):
 - Petit-Lac Léman: $D_{\text{mobilisable}} = D_{\text{Rhône}}/5$,
 - lacs des types « Petit-Lac genevois » et « Rade de Genève »: les débits mobilisables sont estimés sur la base de la contrainte des nonante jours minimaux pour l'épuisement de la couche-ressource: selon les mois, ils sont donc compris entre 9 et 18 % pour un lac du type « Petit-Lac genevois », entre 1 et 1.5 % pour un lac du type de la « Rade de Genève ».

	potentiels théoriques		potentiels acceptables
<i>scénarios</i>	<i>Rhône</i>	$\Delta T = + 1.5^{\circ}\text{C}$	<i>cas retenus</i>
contrainte appliquée	aucune	$\Delta T_{\text{épilimnion}} < +1.5^{\circ}\text{C}$	épuisement_{couche-ressource} > 90 jours
Petit-Lac Léman	$D_{\text{Rhône}}$	$D_{\text{Rhône}}$: avril-oct. < $D_{\text{Rhône}}$: nov.-mars	$D_{\text{Rhône}}/5$
lac du type « Petit-Lac genevois »	pas analysé		9-18 % de $D_{\text{Rhône}}$ selon le mois
lac du type « Rade de Genève »			1-1.5 % de $D_{\text{Rhône}}$ selon le mois

tableau 8-11 Débits mobilisables pour les différents scénarios considérés

Sur la base des temps d'épuisements des couches-ressources étudiés ci-dessus, les potentiels énergétiques de ces scénarios ont été étudiés (*tableau 8-11*): en fonction de différents débits mobilisables pour chacun d'eux, on détermine l'énergie évacuée dans le lac, la puissance moyenne annuelle évacuée dans le lac ($\Delta T_{\text{utile}} = 5^{\circ}\text{C}$), l'écart de température de l'épilimnion (entre état perturbé et non-perturbé) et la puissance évacuée rapportée à la surface spécifique du lac.

8.5.3.1 Impacts thermiques des potentiels théoriques

Les scénarios « *Rhône* » et « $\Delta T = + 1.5^{\circ}\text{C}$ » n'ont été étudiés que sur le Petit-Lac Léman¹. Ils représentent des potentiels théoriques et les impacts induits sont conséquents, à peu près équivalents pour les deux scénarios:

- été: le refroidissement maximum de l'épilimnion atteindrait en moyenne 4.3°C pour une production de froid uniquement, 6°C pour une production simultanée de froid et de chaud,

¹ Les résultats détaillés se trouvent en annexe 15. Ils ne sont pas présentés, car la modification de l'hydrologie naturelle et les impacts environnementaux induits bien trop importants, donc pas acceptables

- hiver: pour une production de chaud uniquement, le refroidissement maximum atteindrait 2°C, 1.5°C pour une production simultanée de chaud et de froid; pour une production de froid uniquement, le réchauffement maximum serait de 3.5°C pour le scénario « Rhône » (1.5°C pour le scénario « $\Delta T = + 1.5^\circ\text{C}$ »).

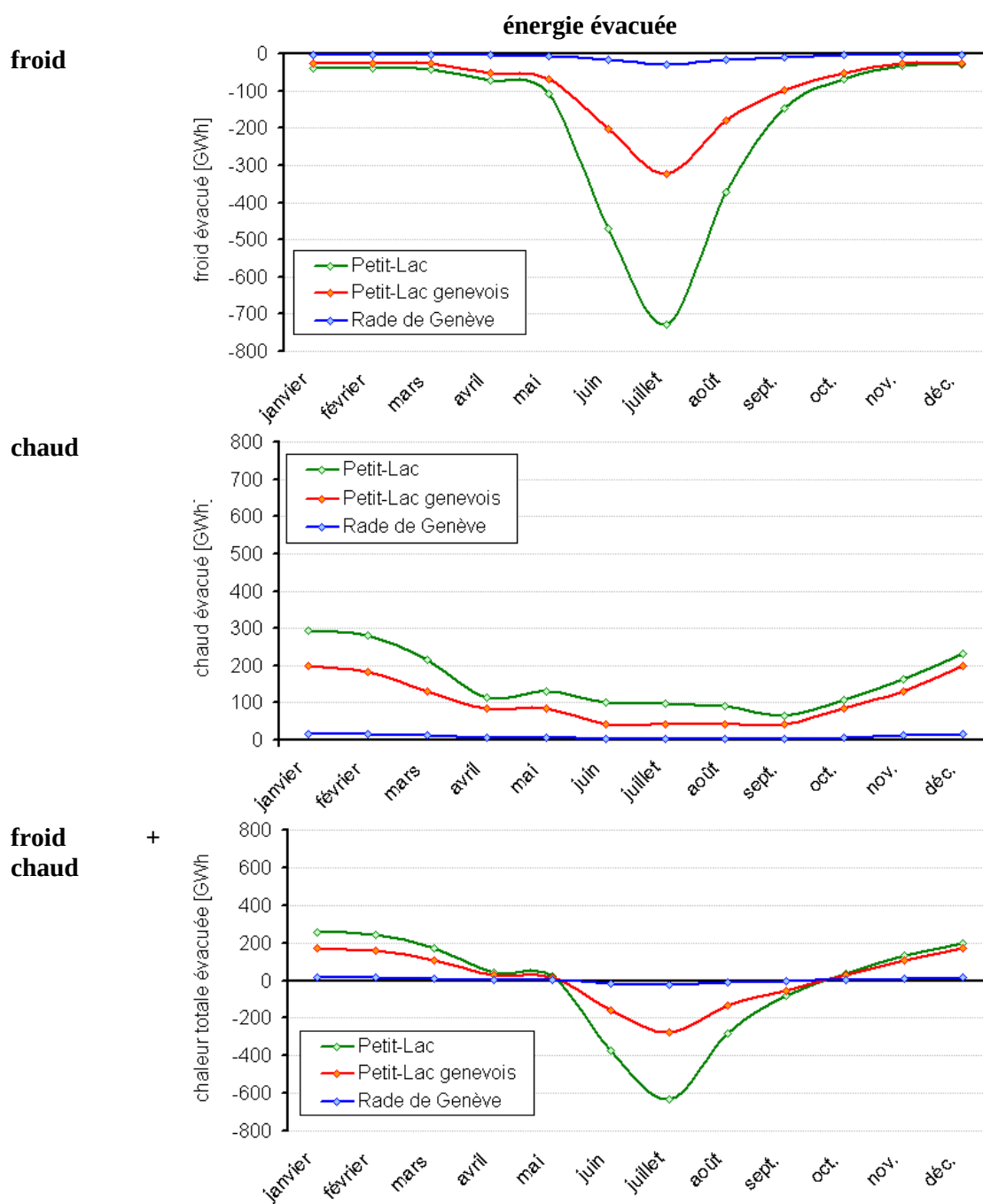


fig. 8-37 Potentiels d'énergie à évacuer du scénario « cas retenus »

8.5.3.2 Impacts thermiques des potentiels acceptables

Les potentiels énergétiques acceptables sont bien inférieurs et plus réalistes que ceux des scénarios théoriques. Ils sont également déterminés sur les trois volumes de lac définis ci-dessus (fig. 8-37). Les impacts thermiques ont été évalués pour chacun d'eux (fig. 8-38). Le tableau 8-12 ci-dessous résume ces potentiels énergétiques et les impacts thermiques induits:

	[GWh/an] _{chaud}	[GWh/an] _{froid}	$\Delta T_{\max}$ épilimnion ¹	$[W/m^2]_{\max}$ épilimnion ¹
Petit-Lac Léman	1'890	2'145	-0.8 (août)	-12 (juillet)
lac du type « Petit-Lac genevois »	1'265	1'100	-0.4 (oct.)	-14 (juillet)
lac du type « Rade de Genève »	112	97	-0.04 (août)	-2.5 (juillet)

tableau 8-12 Synthétique des potentiels énergétiques et des impacts thermiques pour les scénarios retenus

A/ Petit-Lac

Un potentiel énergétique froid et chaud correspondant à 1/5 du débit du Rhône est envisageable tout au long de l'année:

- production de froid: la puissance mensuelle maximum est d'environ 1 GW en juillet; le potentiel annuel s'élève à 2'145 GWh et équivaldrait à 140 réseaux de type GLN,
- production de chaud: le potentiel annuel s'élève à 1'890 GWh, soit un potentiel d'installation nominal de 950 MW.

Une production de froid seule induit un refroidissement estival et un réchauffement hivernal maximum de l'ordre de 0.5°C; une production de chaud seule induit des refroidissements maximums de 0.3°C en hiver et 1.3°C en été. Additionnées, ces deux prestations réduisent l'effet thermique sur l'épilimnion: le refroidissement hivernal reste inférieur à 0.2°C, le refroidissement estival inférieur à 0.8°C. Ramenées à la surface du Petit-Lac, les puissances de refroidissement hivernales sont très faibles, réduites par l'action conjointe des deux prestations.

La température du rejet étant bien inférieure à celle de l'épilimnion, la puissance de refroidissement maximum observée est de 12 W/m² (juillet). Si le modèle thermique du Rhône urbain développé par Faessler (2008) était appliqué au lac, l'impact thermique du système sur le plan d'eau serait considéré comme faible en comparaison de flux d'énergie naturels mis en jeu: au cours de la journée, la surface du plan d'eau absorbe de plus en plus d'énergie jusqu'à 13 heures (maximum compris entre 400-500 W/m²) puis diminue et perd de l'énergie la nuit par rayonnement infrarouge, convection et évaporation. Etant donné que le système hydrothermique fonctionne très majoritairement en journée, sa puissance de refroidissement de l'épilimnion reste donc bien en deçà des apports solaires.

L'impact thermique du système est donc considéré comme étant très faible.

¹ En considérant l'utilisation de chaud et de froid

B/ Lac du type « Petit-Lac genevois »

Selon les mois, un potentiel énergétique froid et chaud correspondant à une fourchette comprise entre 9 et 18 % du débit du Rhône est envisageable:

- production de froid: la puissance mensuelle maximum est de 440 MW (juillet); le potentiel annuel s'élève à 1'100 GWh et équivaldrait à 70 systèmes de type GLN,
- production de chaleur: le potentiel annuel s'élève à 1'265 GWh, soit un potentiel d'installation nominal de 633 MW.

Bien que sensiblement amortis, les effets thermiques sur l'épilimnion sont les mêmes que ceux modélisés pour le Petit-Lac Léman: cumulées, les prestations froid et chaud induisent un refroidissement maximum de l'épilimnion de 0.4°C en octobre. Ramenées à la surface d'un lac du type « Petit-Lac genevois », les puissances de refroidissement sont similaires mais légèrement supérieures à celles estimées sur le Petit-Lac Léman: la puissance maximum est de 14 W/m² en juillet.

C/ Lac du type « Rade de Genève »

Selon les mois, un potentiel énergétique chaud et froid correspondant à une fourchette comprise entre 1 et 1.5 % du débit du Rhône est envisageable:

- production de froid: la puissance mensuelle maximum est de 40 MW (juillet); le potentiel annuel s'élève à 97 GWh et équivaldrait à 6 systèmes de type GLN,
- production de chaleur: le potentiel annuel de 112 GWh, soit une puissance d'installation nominale de 56 MW.

Bien que très fortement amortis, les effets thermiques sur l'épilimnion sont les mêmes que ceux modélisés pour le Petit-Lac Léman: cumulées, les prestations froid et chaud induisent un refroidissement maximum inférieur à un dixième de degré en août. Etant donné que le rapport entre le volume de la couche-ressource et le volume de l'épilimnion est bien plus faible que pour le Petit-Lac Léman et un lac du type « Petit-Lac genevois » (*tableau 8-1*), le débit mobilisable est fortement amoindri. Ramenées à la surface du plan d'eau, les puissances de refroidissement sont similaires mais bien plus faibles à celles estimées sur les deux autres volumes de lacs étudiés: la puissance maximum est de 2.5 W/m² en juillet et s'explique cette fois-ci par le fait que le rapport volume/surface d'un lac du type « Rade de Genève » est très inférieur à celui des deux autres volumes de lac étudiés.

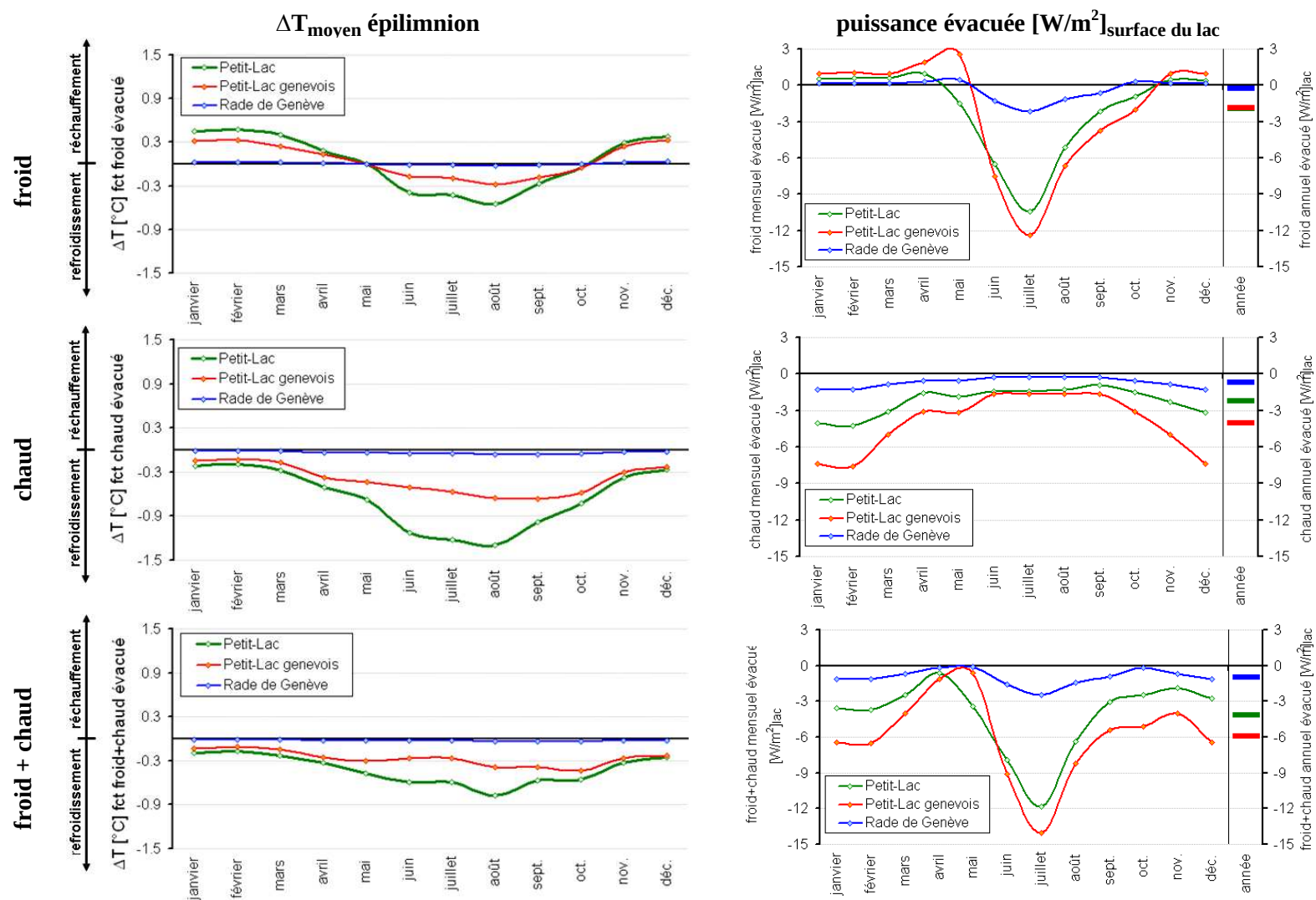


fig. 8-38 Modification de la température de l'épilimnion (moy. 0-5 m prof.); puissance évacuée exprimée en fonction de la surface de lac considérée; scénario « cas retenus »

8.5.3.3 Saisonnalité

Les variations inter-mensuelles des potentiels énergétiques pour la production de froid sont plus importantes que pour la production de chaud (*annexe 15*).

Le potentiel énergétique froid estival est environ 20 fois plus élevé qu'en hiver, alors que pour la production d'énergie chaud, il n'est que 3-4 fois plus élevé en hiver qu'en été. Exprimée en moyenne annuelle, la puissance qui pourrait être évacuée est environ le double pour la production de froid que pour celle de chaud. En revanche, les quantités annuelles d'énergies froid et chaud sont à peu près identiques. Ces différences de potentiels s'expliquent par la différence des profils de demande de froid et de chaud (intensité, période et durée) mais aussi par le fait que le débit du Rhône est en moyenne 30-40 % plus élevé en été qu'en hiver.

Les modifications thermiques de l'épilimnion résultent du cumul d'énergie thermique rejeté par le système (prestations de climatisation et de chauffage). En hiver, le lac n'est pas stratifié: les rejets liés au chauffage, quantitativement les plus importants, refroidissent les eaux de surface et ceux liés à la climatisation les réchauffent (*fig. 8-38*). Durant la période chaude (mai à octobre), les rejets liés à la climatisation sont en revanche quantitativement plus importants, mais ils refroidissent moins les eaux de surface que les rejets liés au chauffage, car la température du rejet est bien plus basse pour la prestation de chauffage que pour celles de climatisation.

La mutualisation de ces deux prestations permet donc d'atténuer les modifications thermiques sur l'épilimnion tout au long de l'année.

8.6 Synthèse

La dynamique annuelle du Lac Léman le classe dans la catégorie des lacs monomictiques chauds, pour lesquels une période de mélange hivernal alterne avec une période de stratification estivale: leurs durées ainsi que la dynamique et l'intensité des profils thermiques peuvent varier selon les conditions météorologiques. En période chaude, c'est un lac à trois couches clairement superposées: l'épilimnion ou couche de surface (chaude en été), le métalimnion (couche intermédiaire où s'établit le gradient thermique, la thermocline) et l'hypolimnion qui constitue la couche-ressource (couche inférieure la plus froide).

8.6.1 Ressource

Pour les prestations de climatisation, la qualité de la ressource est définie par un niveau de température relativement bas (inférieur à 9°C) et une relative stabilité au cours du temps. L'indicateur de qualité choisi exprime la correspondance entre la température de la ressource et la température extérieure, de manière à prendre en compte à la fois la ressource et les besoins de froid.

Analysé de 1999 à 2010, cet indicateur montre que la ressource est globalement bonne (ressource satisfaisante en moyenne 70 % du temps), mais que les fluctuations interannuelles sont marquées (45 % des heures sont satisfaisantes en 2004, 84 % en 2006). Sa qualité est garantie durant les épisodes caniculaires (p. ex. en 2003). C'est avant tout l'instabilité météorologique (alternance de périodes anticycloniques et dépressionnaires) qui pèse sur la qualité de la ressource. Les mesures effectuées au pompage montrent que de manière générale, la stabilité thermique est temporellement durable, car la thermocline s'établit sur la durée, avec une grande quantité d'énergie absorbée. Cette stabilité thermique ne peut être dérangée que par un forçage externe considérable, seulement de manière ponctuelle et pour

de courtes durées; la stratification thermique se réinstalle rapidement après que le forçage externe a cessé.

L'emplacement du pompage revêt une importance primordiale pour garantir une certaine stabilité thermique de la ressource, car la fréquence et l'amplitude des pics de température qui peuvent apparaître varient en fonction de la position horizontale dans le plan d'eau, mais également en fonction de la profondeur du point de pompage. Dans le cas du Petit-Lac Léman, il apparaît clairement que la qualité de la ressource, tant en terme de niveau que de stabilité de sa température, s'améliore avec la profondeur: une limite supérieure de 40 m semble garantir la qualité nécessaire pour des prestations de climatisation en direct.

Les phénomènes mis en évidence ci-dessus sont valables pour d'autres plans d'eau. Toutefois, la thermique lacustre étant dépendante d'un grand nombre de facteurs (limnologiques, climatiques, météorologiques, etc.), le choix de l'emplacement d'un pompage hydrothermique doit donc être effectué de manière très rigoureuse, idéalement confirmé par une campagne de mesures.

8.6.2 Impacts du système sur le lac

Le suivi de la mise en service du système hydrothermique au cours de ses deux premières années de fonctionnement a permis de mettre en évidence ses implications sur le lac:

- échelle locale: dans l'épilimnion proche du rejet (2.25 m en aval), les effets chimiques et thermiques engendrés par le rejet sont faibles. Les effets thermiques sont limités aux couches basses (3-5 m prof.) qui peuvent être ponctuellement refroidies jusqu'à 3-4 °C au maximum; dans un rayon de 50 m, ce refroidissement se confond en général dans la fluctuation thermique spontanée du milieu. La qualité chimique des eaux est quelquefois affectée, mais la plupart du temps en dessous de limites légales ou recommandées. L'ensemble de ces effets ne génère pas d'impacts notables sur la faune et la flore aquatique vivant à proximité du rejet, d'autant plus que l'impact causé par une diminution de la température du milieu est moins problématique que celui causé par une augmentation. Le système devrait atteindre son fonctionnement à pleine puissance en 2015: d'ici là, une meilleure utilisation du réseau par augmentation des températures de retour est très probable et devrait permettre de ne pas augmenter l'effet thermique local au-delà des valeurs constatées en 2010. De manière à évaluer plus finement les effets de ce système, le service compétent de l'Etat a préconisé de poursuivre un suivi allégé ces prochaines années,
- échelle régionale: replacé dans le contexte hydrologique régional du Rhône genevois et/ou à l'ensemble du bassin versant du Rhône, les impacts, localisés et faibles, peuvent être considérés comme négligeables. Le débit du système équivaut au maximum à 0.5 % du débit annuel moyen du Rhône émissaire: au niveau régional, les conséquences sur le cycle de l'eau sont donc minimales (*cf. chap. 10.3*).

8.6.3 Potentiels énergétiques pour la filière hydrothermique régionale

Après étude de plusieurs scénarios, le potentiel énergétique du Petit-Lac s'avère être très important, d'environ 2'100 GWh_{froid}/an. Cette production potentielle d'énergie thermique s'accompagne d'impacts environnementaux très faibles:

- les débits mobilisés influencent faiblement et de manière acceptable la dynamique hydrologique saisonnière: le processus de déstratification qui se met en place depuis la fin

de l'été pourrait toutefois être accentué et légèrement avancé dans la saison, mais en garantissant la structure thermique du lac tout au long de la période chaude,

- le refroidissement moyen de l'épilimnion reste très faible, inférieur à 0.8°C, bien en dessous des variations naturelles du milieu durant la période chaude.

Ce potentiel hydrothermique constitue une part importante du potentiel énergétique renouvelable de l'agglomération franco-valdo-genevoise (AFVG). De par ses caractéristiques (volume important, et en particulier celui de sa couche-ressource), le Petit-Lac Léman permet d'envisager sereinement le développement d'autres réseaux hydrothermiques de capacités importantes.

Basés sur la même analyse, les potentiels offerts par des lacs-type de plus petites tailles et présentant la même dynamique thermique ont également été étudiés. Un lac du type « Petit-Lac genevois », qui hormis un volume 3.5 fois plus faible présente des caractéristiques limnologiques similaires au Petit-Lac Léman, offre un potentiel énergétique intéressant (1'100 GWh_{froid}/an). Par contre, ce potentiel diminue drastiquement lorsque le rapport volume/surface du plan d'eau diminue (lac peu profond et large, type « Rade de Genève »), car la capacité limite du système hydrologique y est plus rapidement atteinte que pour des lacs plus étroits et profonds comme le Petit-Lac Léman et un lac de type « Petit-Lac genevois ».

8.6.4 Nécessité d'une approche globale: région et bassin versant

Au-delà des effets locaux liés à un rejet thermique particulier, l'intensification de la filière hydrothermique au niveau du Petit-Lac nécessite une discussion à l'échelle du système hydrologique régional: en plus des systèmes existants sur le Rhône genevois dont il faut tenir compte, plusieurs installations similaires et de grande taille sont projetées. Le potentiel énergétique du lac est donc limité en amont par la ressource (qualité et quantité) mais aussi en aval par les rejets (emplacement, quantité et qualité des eaux rejetées). Les implications de l'intensification de cette filière hydrothermique au niveau régional, voire au niveau du bassin versant du Rhône, sont abordées de manière synthétique au *chapitre 10.3*.

9 Réseau GLN et bâtiments connectés

Ce chapitre propose de poursuivre le retour d'expérience du réseau GLN en se focalisant sur l'étude des deux autres sous-systèmes pris en compte dans le cadre de cette étude (*tableau 7-1*), les bâtiments connectés et le réseau. L'analyse des bâtiments connectés est effectuée en détail pour l'un d'eux, le bâtiment B1 (*cf. chap. 9.2*), et de manière plus synthétique pour les trois autres (B2, B3 et B4, *cf. chap. 9.3*). Finalement, les aspects liés à la gestion du réseau et les perspectives de développement qu'il offre sont abordés au *chapitre 9.4*.

9.1 Connexion de bâtiments existants: principe et méthode d'audit « froid »

Par rapport à des installations classiques (production par machine frigorifique), les contraintes sur les températures de travail sont bien plus importantes pour les systèmes hydrothermiques. Cela dit, la possibilité ainsi que les propriétés de connexion au réseau doivent être évaluées pour chaque bâtiment lors du développement d'un réseau du type GLN. S'agissant essentiellement d'immeubles existants utilisant des machines frigorifiques, une méthode spécifique d'audit a été développée dans le cadre du projet européen TetraEner: à travers l'analyse des systèmes de production et de distribution, elle permet d'effectuer un diagnostic de la connectabilité des bâtiments à un réseau de froid « haute température » (*Mermoud et al., 2008a, b, c*). Ses apports sont significatifs non-seulement pour l'exploitant du réseau, mais aussi pour l'utilisateur qui désire s'y connecter:

- exploitant du réseau: cette méthode l'aide à acquérir les informations pertinentes nécessaires au dimensionnement du réseau et des sous-stations, mais aussi à proposer des contrats attractifs: l'évaluation du profil de puissance, de la puissance de pointe et des niveaux des températures de travail lui permettent également de mettre en évidence et de proposer aux utilisateurs les éventuelles adaptations qui pourraient s'avérer nécessaires,
- exploitant du bâtiment (utilisateur): elle promeut une réflexion sur les coûts réels de ses prestations de climatisation, tant aux niveaux financiers qu'environnementaux. Elle propose des améliorations possibles au niveau des installations techniques et de la conception même des bâtiments.

Un aspect important de cet outil d'analyse réside dans la possibilité d'augmenter les températures de travail de la boucle de distribution, spécialement à charge partielle. C'est un point crucial pour le bon fonctionnement d'un réseau hydrothermique du type GLN.

Cette méthode permet en particulier de:

- proposer différentes stratégies de régulation selon les niveaux de besoin (liés aux conditions extérieures),
- identifier les goulots d'étranglement éventuels qui pénaliseraient la prestation pour certaines utilisations dans ces nouvelles conditions de fonctionnement,
- proposer des solutions pour pallier ces limitations.

En trois étapes successives détaillées dans les chapitres ci-dessous, la méthode développée propose pour chaque bâtiment étudié:

1. des indications pour la collecte de l'information pertinente et nécessaire,

2. une méthode pour l'acquisition et l'analyse des données des installations de distribution,
3. sur la base de cet ensemble restreint de données, un outil informatique permet d'évaluer et d'optimiser le fonctionnement du système de climatisation dans son ensemble, en liaison avec la connexion au réseau hydrothermique.

Centrée autour de cet outil, l'analyse apporte des pistes pour l'amélioration de la stratégie de régulation en vue de la connexion, calcule l'énergie transférable pour chacune d'entre elles, le flux d'eau du lac nécessaire et le coût de l'énergie compte tenu du tarif en vigueur¹.

9.1.1 Description des installations

Une connaissance précise de l'état actuel du bâtiment et de ses installations de climatisation est nécessaire. Les points suivants doivent être décrits:

- bâtiment: surface de référence énergétique (SRE), description de l'enveloppe (orientations et composition des façades, paires-soleil, isolation, etc.), inventaire descriptif des locaux (bureaux, salles de conférences, locaux techniques et informatiques, etc.) avec leurs exigences propres et leurs charges internes (éclairage, ordinateurs, occupants, etc.),
- occupants: nombre approximatif, utilisations (conférences, bureaux, etc.),
- configuration du système: centralisé, par pièce, stockage nocturne, etc.,
- installations techniques: systèmes de production et de distribution (mise en évidence des points bloquants, sur- ou sous-dimensionnements, etc.),
- système de régulation: principe, type de contrôle, senseurs, équipement de mesure, etc.

Pour pouvoir mener à bien cet audit, une campagne de mesure sur une période estivale significative (15 jours minimum) qui couvre une large plage de températures extérieures est nécessaire: les principaux paramètres à mesurer sont les débits de distribution, les températures de travail (distribution, retour, pulsion), ainsi que les consignes de température.

9.1.2 Analyse des besoins

La « signature froid » caractérise la demande en énergie froid d'un bâtiment au cours d'une période représentative (*fig. 9-1*). C'est une relation qui exprime la distribution de la puissance de froid en fonction de la température extérieure (en kW/°C). Cet indicateur de la quantité d'énergie requise constitue un paramètre fondamental (*Mermoud et al., 2008a*):

- la demande d'énergie froid annuelle du bâtiment peut être recalculée à l'aide des températures extérieures rencontrées (données horaires),
- extrapolée à la température extérieure maximale, elle donne une estimation de la puissance nécessaire en conditions extrêmes,
- sur la base des caractéristiques choisies pour l'échangeur, elle permet d'étudier les effets sur le réseau primaire (énergie transférable en fonction de la puissance appelée, niveaux de températures requis),
- elle permet de déterminer les besoins en eau du réseau primaire.

¹ L'outil développé se base sur la tarification en vigueur pour le réseau GLN, mais pourrait être adaptée pour le développement d'un réseau répondant à un autre principe de tarification

A partir de la distribution horaire de cette signature, une droite peut être ajustée: elle fournit une température extérieure seuil ($T_{\text{ext seuil}}$) à partir de laquelle la demande de froid augmente, et une température extérieure maximum ($T_{\text{ext max}}$) pour laquelle la demande de froid est maximum. En dessous de cette température extérieure seuil, une puissance de froid non-nulle et constante atteste de la présence d'une demande de froid « ruban » (p. ex. datacenter), indépendante de la température extérieure (fig. 9-1); en dessus, la puissance de froid totale résulte de la somme de la demande constante (prestation de ruban) et de la demande variable (prestation de confort).

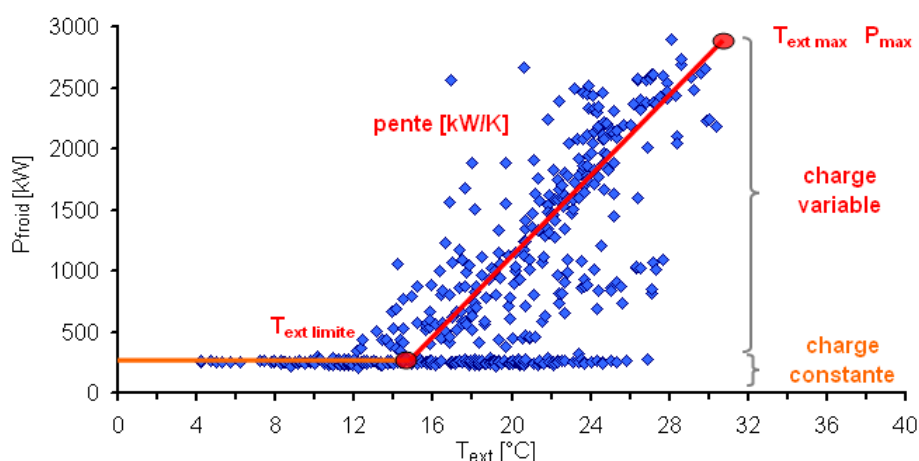


fig. 9-1 Signature froid d'un bâtiment-type (ruban en orange; confort en rouge; 7, 8)

9.1.3 Contraintes de températures et stratégies de régulation

La « signature froid » ne suffit pas pour effectuer un état des lieux complet des besoins réels. Un second indicateur représentatif de la qualité de l'énergie requise est également fondamental: il est basé sur les niveaux de température de la boucle de distribution.

En effet, l'état actuel du bâtiment et de ses installations techniques conditionnent souvent les niveaux de température de travail auxquels doit être délivrée l'énergie froid et peuvent parfois constituer un réel problème pour assurer la fourniture de la qualité et quantité d'énergie nécessaire à puissance nominale. Cela est généralement dû aux exigences et au dimensionnement des installations de distribution et de conversion présents en aval. En revanche, les niveaux des températures de travail sont beaucoup moins problématiques pour l'approvisionnement à charge partielle, soit la plus grande partie du temps de fonctionnement.

A/ Mesures sur la ressource lacustre

La fig. 9-2 ci-dessous illustre les températures de la ressource pour le réseau GLN en fonction de la température extérieure. Selon la stratégie de régulation adoptée, la valorisation de la ressource lacustre varie fortement et les niveaux des températures de travail sont plus ou moins contraignants.

De manière à mieux saisir leurs enjeux, trois exemples de stratégies sont analysés ci-dessous. Les cercles noirs représentent quatre situations très différentes, qui dépendent à la fois du niveau de température de la ressource et de la température extérieure. Lorsque les niveaux des températures de travail sont bas (régulation 1), le recours à une machine frigorifique est nécessaire quasiment en permanence (*en violet*). Par contre, lorsque ces niveaux sont plus élevés (régulations 2 et 3), la nécessité de recourir à une machine frigorifique ne devient que ponctuelle, soit lorsque la ressource montre des pics de température ou lorsque la demande devient très importante (périodes caniculaires).

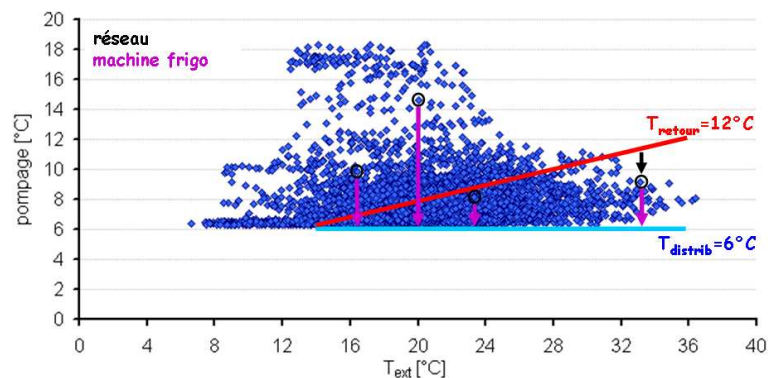
De manière à montrer l'importance d'une régulation adaptée à ce type de ressource, le premier cas a volontairement été choisi comme étant particulièrement mal adapté au fonctionnement à haute température. Il est malheureusement encore souvent représentatif d'installations en fonction (production de froid classique):

- régulation 1: il s'agit du cas de base. Les niveaux des températures de travail sont généralement très bas (distribution constante à 6°C à débit constant, avec une augmentation de la température de retour jusqu'à 12°C à puissance nominale),
- régulation 2: à faibles charges, la régulation 1 ci-dessus est optimisée par élévation des niveaux des températures de travail,
- régulation 3: toujours à faibles charges, la régulation 2 est optimisée par une élévation supplémentaire des niveaux de la température de retour et une modulation du débit.

régulation 1 (cas de base)

6/12°C

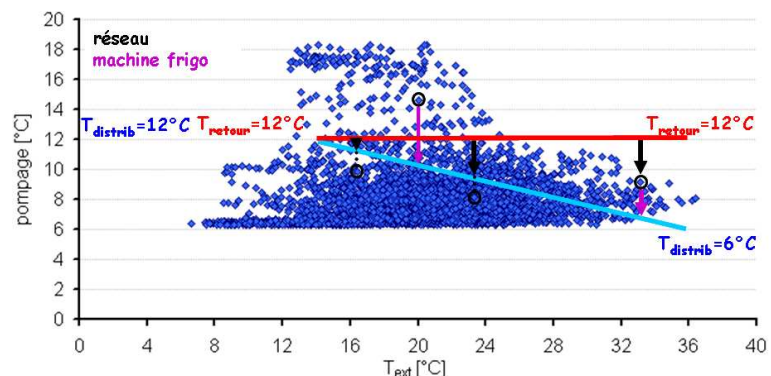
T_{distrib} constante
débit constant



régulation 2

↑ T_{distrib} et T_{retour} à 12°C
pour $P_{\text{froid}} \approx 0$

$T_{\text{distrib}} \div 1/P_{\text{froid}}$
débit constant



régulation 3

↑ T_{retour} à 18°C
pour $P_{\text{froid}} \approx 0$

$T_{\text{distrib}} \div 1/P_{\text{froid}}$
 $T_{\text{retour}} \div P_{\text{froid}}$
débit $\div P_{\text{froid}}$

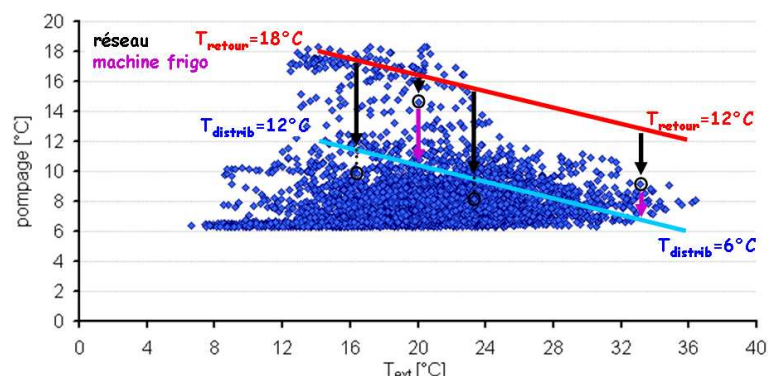


fig. 9-2 Température de la ressource à 37 m prof. (4) en fonction de la température extérieure; écarts de températures primaires mobilisables (distribution 6; retour 9) en direct (flèches noires) et via une machine frigorifique (flèches violettes); données horaires du 1^{er} avril au 1^{er} octobre 2009

B/ Outputs de l'outil de simulation

Sur la base de mesures horaires effectuées sur la ressource lacustre, ces trois stratégies, ou d'autres, peuvent être analysées avec l'outil informatique développé. Le *tableau 9-1* ci-dessous illustre l'énergie tirée du lac (à gauche) et les volumes d'eau relatifs (à droite) par niveau de puissance de froid.

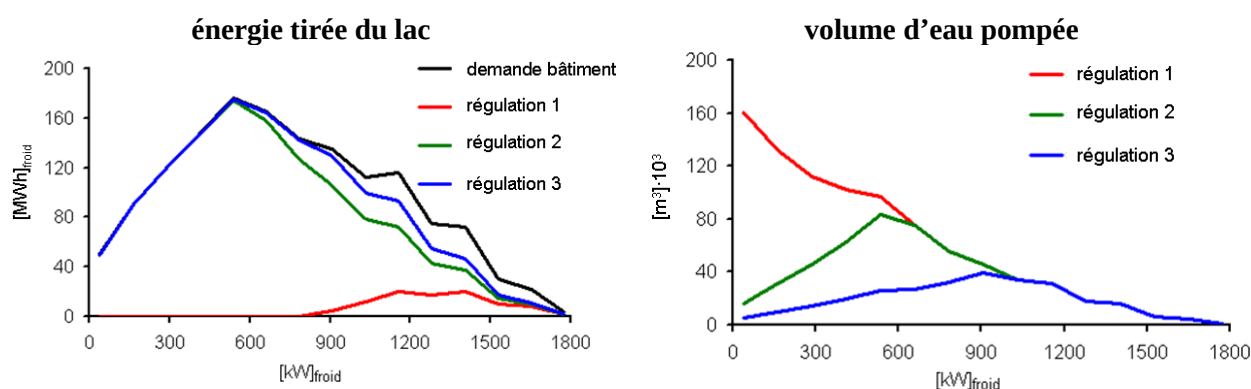


fig. 9-3 Simulation avec l'outil pour les trois stratégies de régulation choisies (7, 8)

régulations	énergie tirée du lac [%]	débit _{mov} /débit _{souscrit} [%]	coût du kWh _{froid} [cts]
1	6	100	92
2	86	35	15.7
3	93	27	14.2

tableau 9-1 Résultats partiels de la simulation pour les trois stratégies de régulation choisies

Notons que cet outil s'appuie sur deux hypothèses qui limitent sa précision, mais qui ne péjorent pas sa pertinence pour l'évaluation et l'analyse des possibilités de connexion d'un bâtiment existant au réseau:

- la température du lac y est constante: fixée ici à 9°C, elle est relativement conservatrice (cf. chap. 8.2),
- l'efficacité de l'échangeur y est constante: fixée à une valeur de 80 %, elle est réaliste, légèrement plus élevée à l'efficacité moyenne calculée¹ sur l'échangeur de chaleur du bâtiment B1 (74 %, variant de 60 à 90 %; cf. chap. 9.2.6.6).

L'outil montre que si de bas niveaux des températures de travail sont conservés, la quantité d'énergie tirée du lac est très faible et le prix de l'énergie froid (lié au modèle tarifaire en vigueur pour le réseau GLN) bien trop élevé. En revanche, la situation s'améliore de manière très nette si les niveaux de ces températures sont élevés (régulations 2 et 3).

C/ Recommandations sur la stratégie de régulation

L'analyse de ces trois stratégies met en évidence plusieurs points importants:

- si la température de distribution reste fixée à une température trop basse (p. ex. 6°C), la ressource lacustre ne peut être que très faiblement valorisée. L'élévation des niveaux des

¹ pondération par l'énergie délivrée du côté secondaire de l'échangeur

températures de travail dans la boucle secondaire du bâtiment est nécessaire pour pouvoir utiliser la ressource lacustre un maximum d'heures, en particulier à faibles charges,

- la possibilité de réguler le débit de distribution secondaire permet d'augmenter la valorisation du fluide, donc d'augmenter les températures de retour.

Du point de vue de la régulation, l'ajustement de la consigne de température de distribution par l'exploitant du bâtiment connecté à un niveau adéquat constitue le premier paramètre-clé qui permet d'utiliser la ressource lacustre de manière optimale (*cf. chap. 9.2.6.6 et 9.2.7*). Une bonne compréhension du fonctionnement de l'échangeur de chaleur par l'exploitant et un ajustement adéquat des débits primaires et secondaires constituent le second paramètre-clé.

La prise en compte de ces points permet à l'utilisateur de réduire le coût de l'énergie froid via le réseau GLN ainsi que la consommation d'électricité liée à la distribution dans son bâtiment (pompes, auxiliaires, etc.). De plus, le recours à une machine frigorifique ne devient que très ponctuel. Pour l'exploitant du réseau, cette optimisation lui permet d'augmenter l'efficacité globale du réseau, lui offrant ainsi la possibilité de connecter plus de preneurs (les appels de débit sur le réseau primaire sont abaissés).

9.2 Suivi détaillé du bâtiment B1

9.2.1 Cadre de l'étude

Cette étude est effectuée dans le cadre du Partenariat établi entre SIG et le Groupe Energie-IFAF, qui a pour objectif de renforcer la collaboration entre les deux partenaires pour le développement de la filière académique dans le domaine de l'énergie, tout en permettant à SIG de bénéficier de prestations d'expertise, de recherche et de conseils, notamment dans les domaines de l'efficacité énergétique et de la production et distribution d'énergie. Des Contrats Spécifiques signés par les parties dans le cadre du Partenariat précisent ces prestations. Cette étude s'inscrit dans le Contrat Spécifique « Expertises thermiques ». Ce premier lot comprend diverses expertises, dont le suivi et l'analyse des deux premiers bâtiments connectés (B1 et B2) au réseau GLN.

Les résultats présentés ci-dessous sont pour la plupart issus de l'expertise « *Connexion du bâtiment B1 au réseau GLN: analyse de la première année de fonctionnement* » (Viquerat et al., en cours).

9.2.2 Introduction

Le réseau hydrothermique GLN constitue une réelle innovation dans l'utilisation rationnelle des énergies locales renouvelables. Techniquement, le système mis en œuvre peut être qualifié de « low tech », même si la mise en place d'un tel réseau demande une excellente maîtrise d'œuvre et n'est certainement pas aussi simple qu'il n'apparaît de prime abord. Rappelons ici que par rapport à des projets similaires existants, l'innovation réside principalement dans les deux aspects suivants:

- il n'est pas dédié à un seul utilisateur, si bien que toute l'énergie doit-être vendue. Certains aspects commerciaux sont donc décisifs, comme les problèmes de tarification, l'image verte du projet, mais aussi l'existence de liens antérieurs entre l'exploitant et ses utilisateurs pour la distribution des autres fluides,
- la température de distribution du froid n'est pas contrôlée, puisqu'aucun système de correction (machine frigorifique) n'est intégré dans la boucle primaire du réseau. Les caractéristiques de la ressource thermique dépendent donc directement des caprices de la

nature, ce qui est contraignant pour tout ce qui concerne les aspects de valorisation. Il s'agit donc d'un produit nouveau, encore mal défini, dont l'appropriation par les divers acteurs n'est pas aussi évidente que pour des systèmes productifs classiques.

Afin d'optimiser le système pour les deux partenaires impliqués (exploitant et utilisateur), il est fondamental de bien saisir la manière dont est utilisée le réseau GLN par ces derniers.

Le bâtiment B1 - en réalité composé de plusieurs bâtiments – est connecté au réseau depuis juin 2009. De par la grandeur du site et la variété des besoins de froid, la gestion des installations de distribution existantes est relativement complexe. Les services techniques du bâtiment B1 font donc face à un certain nombre de défis à relever pour connecter efficacement les installations de distribution existantes. Dans un souci d'amélioration des prestations délivrées, un retour d'expérience fouillé de sa connexion a donc été réalisé pour sa deuxième année de fonctionnement (1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011): il s'appuie sur les données mises à disposition par l'exploitant (base de données du réseau) et par les services techniques du bâtiment, ainsi que sur des mesures ponctuelles.

Les analyses ont porté sur l'ensemble de la filière hydrothermique (ressource, transformation et valorisation): compréhension globale de l'utilisation du réseau et de la fourniture d'énergie froid, comparaison des deux systèmes de production (2010 vs 2007), analyse de la régulation au niveau de l'échangeur de chaleur, étude de la prestation froid pour une salle de conférence, et finalement évaluation du coût de l'énergie froid pour l'utilisateur. Cela dit, cette analyse permettra d'identifier les problématiques liées au principe de régulation en vigueur, en lien avec l'utilisation de la ressource lacustre.

A la demande des services techniques du bâtiment B1, des points plus précis ont également été abordés, dont la sécurité de l'approvisionnement en fonction du respect du débit concessionné ainsi que la pertinence d'un transfert 24h/24 vers le bâtiment A avec un approvisionnement via le réseau.

9.2.3 Description

9.2.3.1 Bâtiments

Les bâtiments du site sont occupés par environ 3'000 employés. 10'000 personnes peuvent être présentes lors des grandes conférences estivales. Durant ces périodes, le site compte en moyenne 6'000 personnes, employés et participants aux conférences confondus.

La surface brute totale de l'ensemble des bâtiments est estimée à 207'163 m² (Viquerat et al., 2008b); la surface de référence énergétique pour la prestation froid (SRE_{froid}) est inférieure, d'environ 56'162 m². Les bâtiments ont été construits en deux étapes qui sont détaillées ci-dessous:

A/ 1^{ère} étape (bâtiments A, B, C et D)

Ces bâtiments ont été construits entre 1929 et 1936. Transformés et adaptés à plusieurs reprises, ce groupe de bâtiments a été conçu en deux étapes principales:

- le premier bâtiment a été construit en 1927,
- le bâtiment final, achevé en 1935, résulte d'un compromis entre quatre projets.

Cet ensemble de bâtiments représente 177'000 m² de surface brute (440'000 m³). La structure est en béton armé, la maçonnerie en pierre. Les bureaux sont ventilés naturellement mais non-climatisés. 15 salles de conférence, dont deux de grande taille (1'939 et 456 pers.), halls,

restaurants, cuisines, commerces, datacenters et l'imprimerie sont climatisés (*fig. 9-5*). La surface de référence énergétique (SRE_{froid}) est de 27'621 m², auxquels s'ajoutent 920 m² pour le bâtiment de l'entrée principale du site.

B/ 2^{ème} étape (bâtiment E)

Ce bâtiment a été construit entre 1969 et 1973. Sa structure est en métal renforcé par du béton armé. Il est relié aux bâtiments A, B, C et D par une passerelle piétonnière. Ce bâtiment est subdivisé en deux parties:

- la partie inférieure est occupée par les salles de conférence: la façade sud des halls est constituée d'une large baie vitrée offrant une belle vue sur le Lac Léman et les Alpes,
- les huit étages supérieurs sont dédiés aux bureaux, qui sont répartis de part et d'autre d'un corridor central orienté sud-est - nord-ouest.

Ce bâtiment est entièrement climatisé. Il abrite 700 bureaux et onze salles de conférence, dont quatre de grande taille (675, 641, 941 et 754 pers.). La surface de référence énergétique (SRE_{froid}) est de 28'541 m².

9.2.3.2 Installations de production et de distribution

Les *fig. 9-4* et *fig. 9-5* résument l'ensemble des caractéristiques du système de production/distribution de froid (puissances nominales, débits seuils et nominaux) ainsi que les différences principales de gestion du froid du bâtiment A entre 2007 (production par machine frigorifique = MF, *en rouge*) et 2010 (production via le réseau GLN, *en vert*). La description détaillée des installations de froid se trouve en *annexe 16*.

A/ Installations d'origine (2007)

Il y a deux sous-stations principales:

- bâtiment E: sa sous-station est équipée de quatre machines frigorifiques, dont trois avec une puissance frigorifique de 2 MW chacune et une de 870 kW. Sa boucle froide a été initialement dimensionnée pour opérer au régime classique de températures 6/12°C et alimente un ensemble d'installations de distribution secondaire,
- bâtiment A (couvrant les bâtiments A, B, C et D): sa sous-station est équipée de deux machines frigorifiques avec une puissance frigorifique de 870 kW chacune. Sa boucle froide a également été initialement dimensionnée pour opérer à 6/12°C et alimente un ensemble d'installations de distribution secondaire dédiées aux bâtiments A, B, C et D. Une machine frigorifique complémentaire et indépendante d'environ 200 kW alimente le bâtiment de l'entrée principale du site et opère au régime de températures 16/20°C (plafonds froids).

Une ligne de transfert permet le passage de l'énergie froid d'une sous-station à l'autre (2.78 MW nominal) de manière à garantir la prestation en cas de panne de l'une des deux.

Changées entre 2001 et 2005, les machines frigorifiques sont récentes: leur technologie, de type *Turbo*, garantit ainsi une production de froid efficace.

La capacité globale de production frigorifique est donc importante: 6.87 MW pour le bâtiment E, 1.74 MW pour le bâtiment A et environ 200 kW pour le bâtiment de l'entrée principale du site, soit une capacité totale de 8.81 MW.

2007

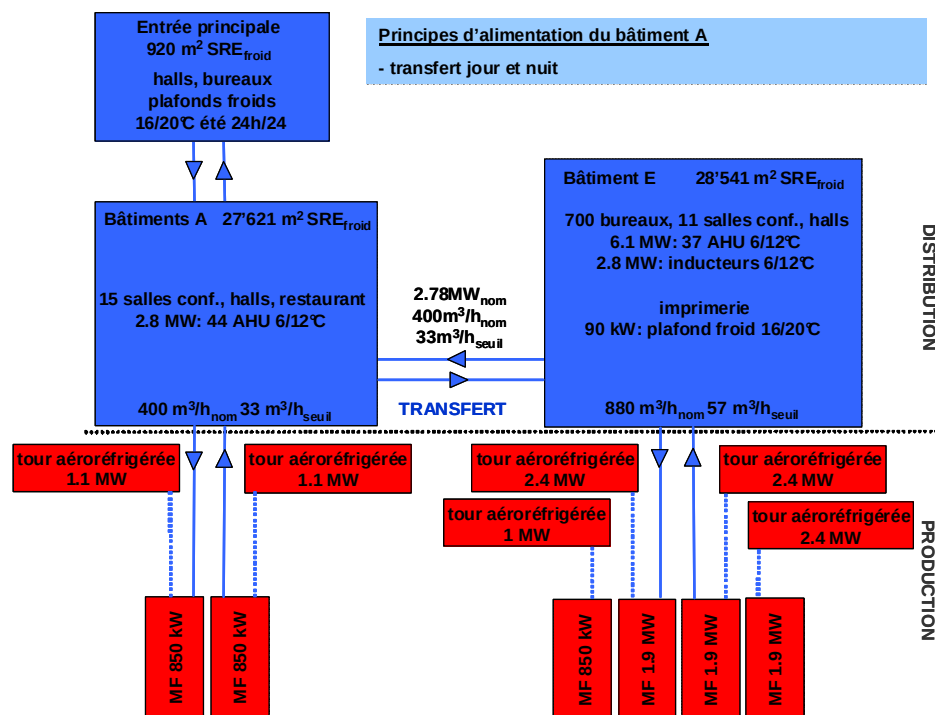


fig 9-4. Installations de production de froid et de distribution/convertisseurs des bâtiments; état 2007 et 2010 (machines frigorifiques = MF, en rouge; GLN, en vert)

B/ Installations 2010

Les bâtiments ont été connectés au réseau GLN en juin 2009: depuis, la production d'énergie froid à partir de machines frigorifiques a été quasiment totalement substituée par une production renouvelable via ce réseau. La puissance de froid concessionnée est de 2.66 MW: elle se traduit par un débit primaire concessionné de 459 m³/h, avec un ΔT de 5°C.

Les deux échangeurs de chaleur (3 MW nominal chacun¹) sont installés dans la sous-station du bâtiment E: ils transfèrent l'énergie froid de la boucle primaire (eau du lac) à la boucle de distribution secondaire existante du bâtiment. En guise d'appoint et/ou de sécurité, deux échangeurs de chaleur secondaires (2.2 MW nominal chacun) ont été connectés sur les quatre machines frigorifiques d'origine du bâtiment E, en substitution des tours aéro-réfrigérées. L'imprimerie et le datacenter du bâtiment E sont alimentés à un régime de température de 16/20°C.

Le bâtiment A est alimenté via le transfert existant. Un datacenter est alimenté à un régime de température de 12/16°C.

La machine frigorifique complémentaire et indépendante de 200 kW qui alimentait le bâtiment de l'entrée principale du site (nuit et week-end) en 2007 a été substituée par la production renouvelable via le réseau GLN jusqu'au 9 juin 2010 (24h/24), en utilisant le transfert E→A puis A→entrée principale. A partir du 9 juin 2010, l'alimentation diurne par le réseau (via le transfert) a été conservée, mais la machine frigorifique a repris la production de froid durant la nuit et le week-end.

¹ Basé sur un débit de 515 m³/h nominal avec un ΔT de 5°C

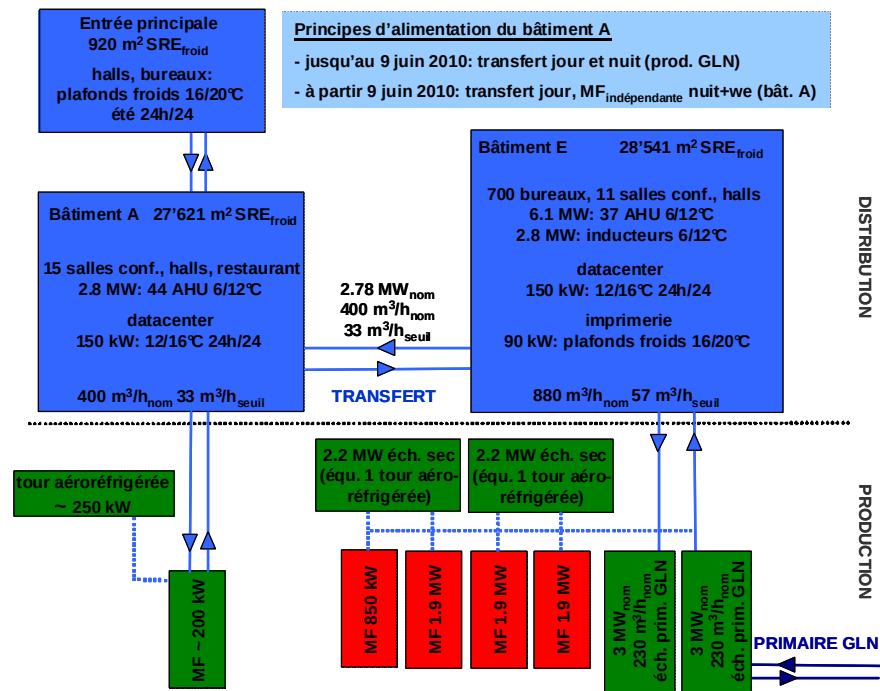


fig. 9-5 Installations de production de froid et de distribution/convertisseurs des bâtiments; état 2007 et 2010 (machines frigorifiques = MF, en rouge; GLN, en vert)

C/ Distribution et convertisseurs

Les installations techniques de distribution n'ont pas été modifiées ou changées suite à la connexion au réseau GLN en juin 2009. Le transfert de l'énergie froid aux espaces climatisés est assuré par des unités de traitement d'air (AHU, Air Handling Unit). 22 % des bureaux (bâtiment E) sont toutefois climatisés via des inducteurs. L'imprimerie (bâtiment E) et le bâtiment de l'entrée principale sont climatisés 24h/24 via des plafonds froids. Deux datacenters (5 et 150 kW) sont également climatisés 24h/24 (fig. 9-5).

Ces AHU se comportent comme des échangeurs thermiques: d'un point de vue technique, elles peuvent être alimentées à des températures de distribution variables, largement supérieures à 6°C pour des charges partielles (Mermoud et al., 2008a). L'énergie de froid absorbée par chaque AHU est généralement contrôlée par des vannes deux-voies, de manière à ajuster un débit individuel permettant d'obtenir précisément la température d'air pulsé requise. Certaines AHU sont toutefois encore régulées selon un concept plus ancien: une vanne trois-voies (débit de distribution constant) contrôle le mélange des fluides neufs et recyclés.

En se basant sur les spécifications de chaque AHU et des autres convertisseurs, la puissance totale des convertisseurs est bien supérieure aux caractéristiques hydrauliques nominales du réseau de distribution et aux capacités de production des machines frigorifiques:

- **bâtiment A**: 34 AHU totalisent une puissance frigorifique de 4.4 MW pour une puissance hydraulique de distribution équivalant à 2.8 MW, et une puissance de production via les machines frigorifiques d'origine de 1.7 MW (1.9 MW avec l'entrée principale),
- **bâtiment E**: 37 AHU totalisent une puissance frigorifique de 8.5 MW pour une puissance hydraulique de 6.1 MW et une puissance de production via les machines frigorifiques d'origine de 6.9 MW. En sus, les inducteurs qui se trouvent dans les bureaux totalisent une puissance de 2.8 MW.

Au total, la puissance des convertisseurs (AHU) atteint 12.9 MW pour une capacité de production de 8.6 MW via les machines frigorifiques d'origine et de 2.66 MW via la concession GLN. Les installations de distribution/conversion d'énergie froid sont donc largement surdimensionnées: étant donné que la connexion au réseau GLN nécessite une élévation des niveaux des températures de travail, cette caractéristique constitue un avantage notoire.

D/ Utilisation finale de l'énergie

L'analyse des équipements installés montre que la plus grande part de la puissance frigorifique est dédiée aux salles de conférence: elle représente 45 % de la puissance des convertisseurs installés (*fig. 9-6*). Cette demande de froid est généralement liée aux nombre d'occupants, mais aussi à l'agenda des salles de conférence qui ne sont que rarement toutes utilisées simultanément (l'occupation de deux semaines estivale typiques est détaillée en *annexe 17*). Dans ces salles, la prestation doit être sûre, d'autant plus que l'activité confériencière est très intense en été.

La seconde part, également importante (40 % de la puissance des équipements), est dédiée aux bureaux: la conversion y est assurée soit par pulsion d'air frais (AHU, 18 %), soit par des échangeurs individuels (inducteurs, 22 %).

La part liée au datacenter n'est que de 1 %. Pour l'année 2010, elle augmente à 5 % avec la mise en service de datacenters supplémentaires.

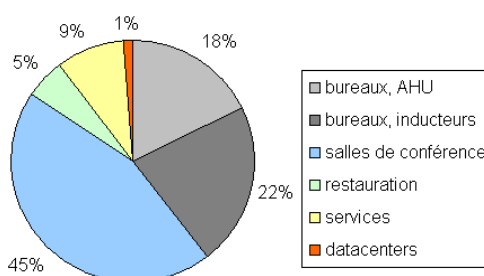


fig. 9-6 Usages du froid en fonction des puissances des convertisseurs installés; situation 2007 (Mermoud et al., 2008a)

9.2.3.3 Salle de conférence 17

Pour évaluer l'influence de la connexion au réseau GLN sur le niveau de confort thermique estival des divers participants aux conférences, deux campagnes de mesure ont été effectuées dans la salle de conférence 17 du bâtiment E (*fig. 9-9*):

- été 2007: approvisionnement via une production classique (machines frigorifiques),
- été 2010: approvisionnement via une production renouvelable (réseau GLN).

Cette salle de conférence de 640 sièges (200 supplémentaires pour les journalistes, les traducteurs et le public) a un diamètre circulaire est de 32.4 m et une hauteur de 7.7 m, ce qui correspond à un volume d'environ 60'000 m³ (*Mermoud et al., 2008b*).

Les conditions de confort thermique y sont contrôlées par une AHU d'une capacité nominale de pulsion de 35'500 m³/h (0.6 vol/h, soit 50 m³/h pers.) alimentée par une batterie froide de 253 kW ou une batterie chaude (*Mermoud et al., 2008b*). L'air pulsé est constitué d'un mélange d'air recyclé et d'au minimum 10 % d'air frais extérieur. Les conditions de confort thermique (température ambiante dans les salles) ne sont régulées que durant la tenue de

conférences. La régulation s'effectue au niveau de l'air pulsé (AHU) selon les consignes suivantes:

- $T_{\text{ambiante}} \geq 23^{\circ}\text{C}$: $T_{\text{air pulsé}}$ consignée à 17°C ,
- $T_{\text{ambiante}} = 22^{\circ}\text{C}$: $T_{\text{air pulsé}}$ consignée à 19°C ,
- $T_{\text{ambiante}} \leq 21^{\circ}\text{C}$: $T_{\text{air pulsé}}$ consignée à 28°C (chauffage).

Avant de recourir à la production de froid ou de chaud, la consigne est maintenue par un ajustement des débits d'air frais et recyclé, les batteries n'étant enclenchées que si cela s'avère nécessaire.

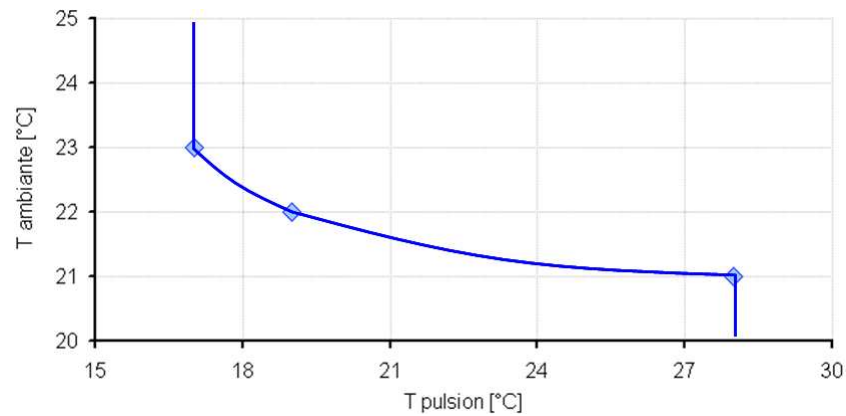


fig. 9-7 Points de consignes et profil de régulation thermique de la salle de conférence 17; température ambiante mesurée derrière la loge des journalistes

9.2.4 Méthodologie de mesure

9.2.4.1 Bâtiments et installations techniques

Les installations de climatisation sont bien instrumentées: elles incluent des débitmètres, compteurs de chaleur et sondes de température, tant pour le système productif que pour la distribution dans les bâtiments et le système de transfert (*fig. 9-8*). Aucune donnée de consommation électrique spécifique n'est cependant disponible, ni pour les machines frigorifiques, ni pour la distribution. De même, l'énergie froid délivrée par chaque AHU n'est pas disponible.

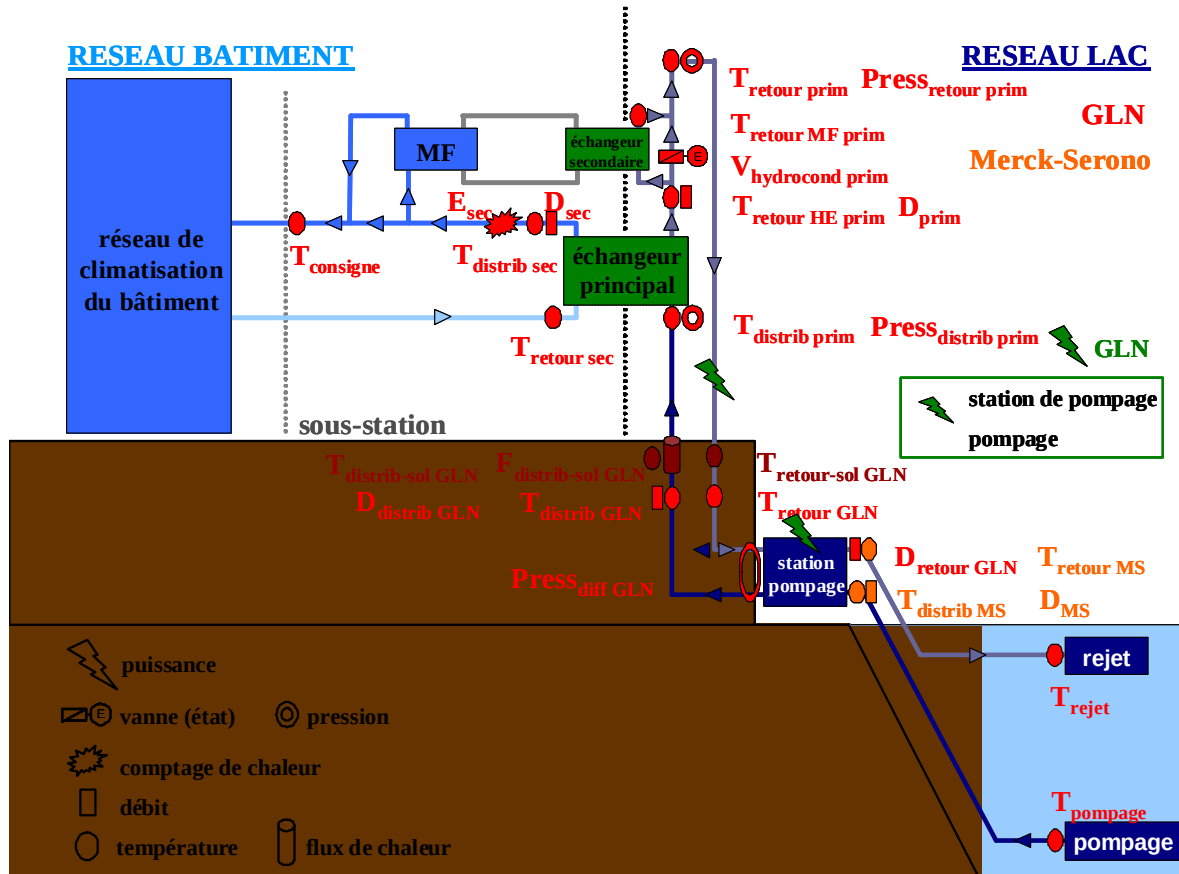


fig. 9-8 Points de mesures du réseau et des bâtiments connectés et numérotation des principaux emplacements de mesure (en bleu)

La liste des variables mesurée est décrite dans le *tableau 9-2* ci-dessous. Ces paramètres sont mesurés en pas de temps horaire par l'exploitant du réseau (base de données GLN), les services techniques du bâtiment B1 (système de contrôle centralisé), ou encore personnellement (météorologie et analyse de la salle de conférence 17). De manière générale, il n'existe pas de données historiques (consommations, performances, etc.) pour ces installations de climatisation; toutefois, des mesures permettant de déterminer le coefficient d'efficacité frigorifique (EER_{moyen}) d'une machine frigorifique ont été effectuées en 2006 sur quelques jours de fonctionnement par les services techniques du bâtiment B1.

acronyme	description	source / remarques
T_{ext}	température extérieure (station Jonction)	Groupe Energie, UNIGE
D_{distrib GLN (5)} D_{lac GLN (13)} D_{prim (9)} T_{distrib prim (6)} T_{retour prim (9)} P_{prim}	production: via échangeur GLN débit primaire (station de pompage) débit primaire (station de pompage) débit primaire (à la sous-station) temp. distribution primaire temp. retour primaire puissance (à l'échangeur primaire)	SIG: base de données GLN distribué dans le réseau GLN qui retourne dans le lac uniquement avec GLN uniquement avec GLN uniquement avec GLN mesurée côté primaire
D_{distrib sec (7)} T_{distrib sec (7)} T_{distrib consigne} T_{retour sec (8)} P_{sec}	débit secondaire (réseau du bâtiment) temp. distribution secondaire consigne de temp. distribution secondaire temp. retour secondaire puissance (à l'échangeur primaire)	système de contrôle centralisé (bâtiment) mesurée côté secondaire
D_{distrib E} T_{distrib sec E} T_{retour sec E}	débit distribution secondaire temp. distribution secondaire temp. retour secondaire	$D_{distrib\ sec} = D_{distrib\ E} + D_{distrib\ A}$ $T_{distrib\ sec} = T_{distrib\ sec\ E}$
D_{distrib A} T_{distrib sec A} T_{retour sec A}	distribution: bâtiment A débit distribution secondaire temp. distribution secondaire temp. retour secondaire	système de contrôle centralisé (bâtiment)
D_{distrib transf} T_{distrib transf} T_{retour transf}	transfert: bâtiment E => bâtiment A débit distribution secondaire temp. distribution secondaire temp. retour secondaire	système de contrôle centralisé (bâtiment) <u>avec GLN:</u> $D_{distrib\ A} = D_{distrib\ transf}$ $T_{distrib\ A} = T_{distrib\ transf}$ $T_{retour\ A} = T_{retour\ transf}$

tableau 9-2 Liste des variables et des points de mesure (2007 et 2010)

9.2.4.2 Salle de conférence 17

Afin d'évaluer le niveau de prestation, la salle de conférence 17 a été instrumentée pendant deux périodes estivales: du 26 mai au 26 juin 2007 avant la connexion au réseau GLN, puis du 4 juillet au 10 août 2010 après la connexion. Les mesures proviennent de deux sources:

- système de contrôle centralisé du bâtiment B1: température ambiante (loge des journalistes), statut de l'AHU (on/off), température de l'air pulsé et humidité relative (sous les pupitres de l'assistance, 3^{ème} rang centre),
- système de mesure complémentaire: température ambiante dans la salle (*en rouge*, fig. 9-9), mesurée sous les pupitres du chairman et de l'assistance (3^{ème} rang au centre, 4^{ème} rang à gauche, avec humidité relative) et contre une paroi à 2.3 m de hauteur derrière la loge des journalistes; température ambiante sur la galerie du 1^{er} étage (*en vert*), mesurée contre le mur à 2.3 m de hauteur (cabine d'interprète) et au plafond (galeries publiques vitrées et non-vitrées).

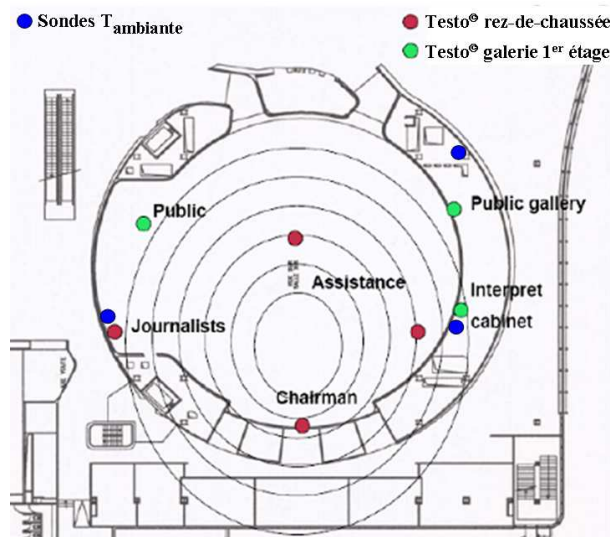


fig. 9-9 Salle de conférence 17: emplacements des sondes de température du système de contrôle centralisé (en bleu) et du système de mesures complémentaires (en rouge et vert)

9.2.5 Analyses et objectifs

Dans les sections qui suivent, plusieurs analyses seront menées sur la base des mesures décrites ci-dessus:

- fonctionnement global, avec un zoom sur deux jours types (*cf. chap. 9.2.6.1 et 9.2.6.2*),
- ressource: analyse de la qualité de la ressource thermique lacustre, des pertes thermiques le long du réseau GLN ainsi que des perturbations thermiques potentielles du rejet (*cf. chap. 9.2.6.3*),
- valorisation: analyse de la demande de froid du bâtiment, des niveaux de températures de travail et de la prestation de confort d'une salle de conférence (*cf. chap. 9.2.6.4*),
- analyse du coût de l'énergie froid via le réseau GLN (*cf. chap. 9.2.6.5*),
- transformation: analyse du fonctionnement et de la régulation de l'échangeur de chaleur entre la boucle primaire (réseau GLN) et la boucle secondaire de distribution dans le bâtiment. Les implications sur la valorisation de la ressource lacustre sont également discutés (*cf. chap. 9.2.6.6*).

A la demande des services techniques, des points plus précis ont également été abordés, dont la sécurité de l'approvisionnement en fonction du respect du débit concessionné ainsi que la pertinence d'un transfert 24h/24 vers le bâtiment A avec un approvisionnement via le réseau GLN (*cf. chap. 9.2.6.7*).

9.2.6 Fonctionnement global

Les résultats ci-dessous concernent la deuxième année d'utilisation du réseau GLN, soit du 1^{er} avril 2010 au 30 mars 2011.

9.2.6.1 Evolution des paramètres

L'évolution horaire sur l'ensemble de la période est représentée sur la *fig. 9-10*. La demande de froid (*en bleu*) est basée sur les mesures effectuées sur la boucle secondaire (réseau de distribution du bâtiment) au niveau des échangeurs principaux situés dans la sous-station du

bâtiment: elle est calculée à partir du débit de distribution et des températures de distribution et de retour.

Durant cette période, la demande de froid a été entièrement couverte via le réseau GLN; les machines frigorifiques connectées au réseau n'ont été utilisées que durant quelques heures (*en orange*), essentiellement lors d'opérations de maintenance. Ne sont pas représentées ici les machines frigorifiques indépendantes qui fonctionnent pour des usages dédiés (nuit et week-end pour le bâtiment A et le bâtiment de l'entrée principale). Globalement, la puissance de froid ne dépasse la valeur concessionnée (2.66 MW) que durant une dizaine de jours. Cependant, le débit primaire dépasse régulièrement la valeur concessionnée (459 m³/h), en raison d'une valorisation de l'eau pompée souvent inférieure à la valeur planifiée de 5°C (ΔT_{prim}).

Au cours de l'année, la demande de froid varie comme suit:

1. jusqu'à mi-avril 2010:

La demande de froid est faible et relativement constante, de type ruban et de l'ordre de 60-80 kW: elle correspond à celle du datacenter du bâtiment E¹ (24h/24, $P_{\text{nom}} = 150$ kW).

Le débit primaire oscille plusieurs fois par jour entre une valeur seuil (50 m³/h) et une valeur proche de 500 m³/h, légèrement supérieure au débit concessionné, tandis que le débit secondaire est en général plus stable (50 ou 150 m³/h); parallèlement, les différences de température entre retour et distribution des côtés primaires et secondaires de l'échangeur (ΔT_{prim} et ΔT_{sec}) restent très bas, généralement inférieurs à 2°C,

2. de mi-avril à mi-octobre 2010:

La semaine du 26 au 30 avril marque le début des grandes conférences printanières et estivales: la demande de froid augmente nettement, pour atteindre une demande maximum d'environ 3.7 MW le 12 juillet (ce qui correspond à 30 % de la demande totale mesurée sur le réseau). L'appel de froid est essentiellement lié à l'activité confériencière. Le débit primaire oscille toujours fortement et dépasse régulièrement le débit concessionné, atteignant 780 m³/h (170 % du débit concessionné). Il en va de même avec les différences de température entre retour et distribution des côtés primaires et secondaires de l'échangeur (ΔT_{prim} et ΔT_{sec}), qui oscillent entre 0.5 et 5.5°C,

3. de mi-octobre 2010 à fin mars 2011:

La puissance de froid redevient faible et relativement constante, mais cette fois-ci de l'ordre de 90-110 kW: en sus du datacenter du bâtiment E, l'installation d'un datacenter dans le bâtiment A en janvier 2010 (climatisé 24h/24, $P_{\text{froid}} = 150$ kW nominal) a accru l'appel de froid ruban. Hormis cette demande de froid ruban, l'activité confériencière ne nécessite plus la climatisation de ses locaux durant l'automne et l'hiver.

Jusqu'à mi-octobre, le débit primaire oscille toujours plusieurs fois par jour entre environ 50 et 500 m³/h, alors que le débit secondaire est relativement stable, d'environ 50 m³/h (hormis lors de la dernière quinzaine de l'année, suite à un problème de régulation qui a depuis lors été résolu).

Côté primaire de l'échangeur, l'écart de température entre le retour et la distribution (ΔT_{prim}) est compris entre 1 et 6°C, correspondant à une meilleure valorisation qu'au cours de l'hiver précédent; côté secondaire, cet écart reste compris entre 1 et 2°C (ΔT_{sec}).

¹ Mise en service en décembre 2009 (installation progressive des serveurs jusqu'à novembre 2010)

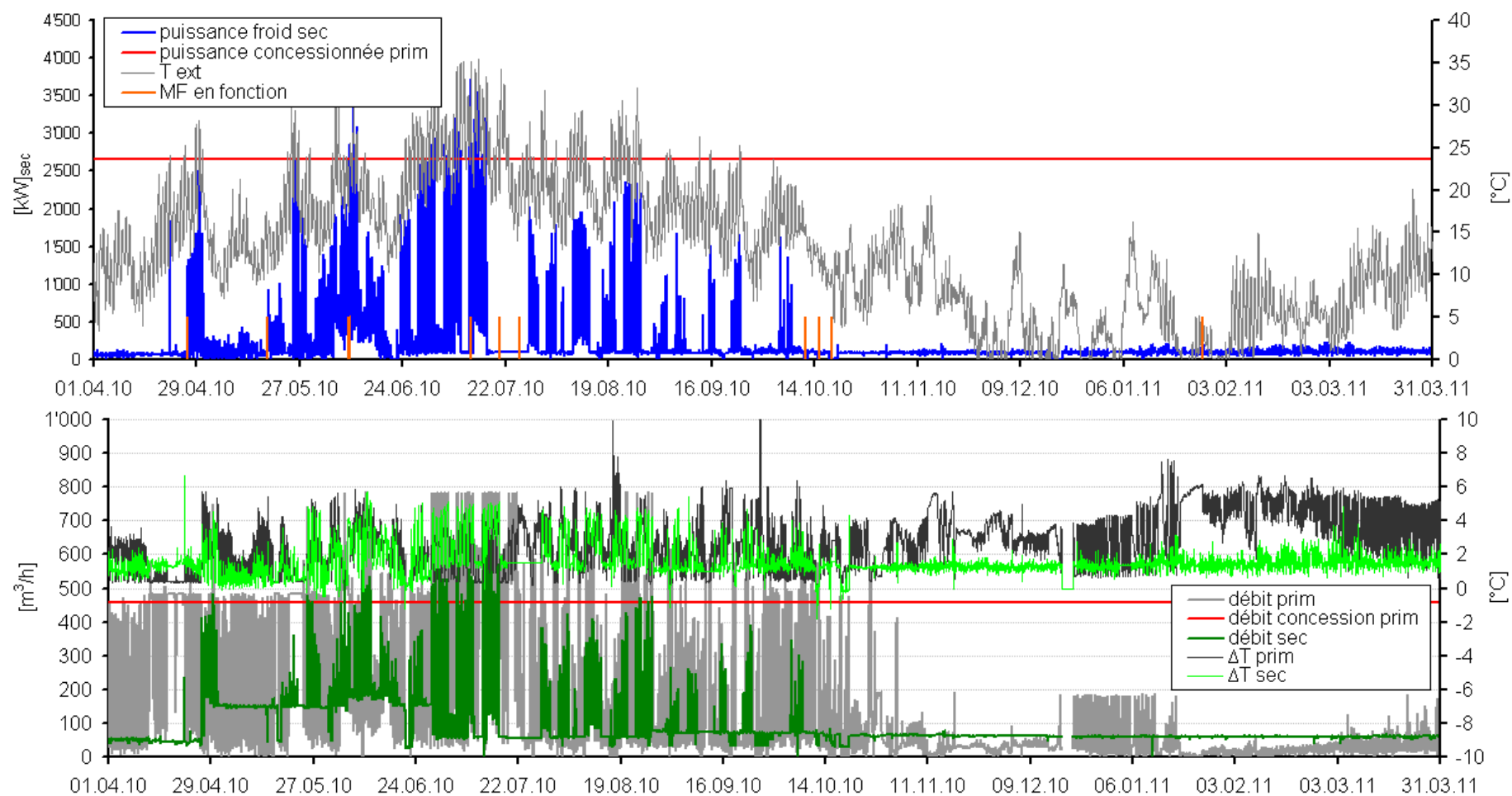


fig. 9-10 Puissance de froid et fonctionnement des machines frigorifiques connectées au réseau (en haut), débits et écarts de températures entre retour et distribution des côtés primaires (ΔT_{prim} , 9, 6) et secondaires (ΔT_{sec} , 8, 7) de l'échangeur de chaleur (en bas); données horaires du 1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011

A/ Jour type d'été (8 juillet 2010)

En été (fig. 9-11), la demande de froid est essentiellement liée au climat et à l'utilisation des salles de conférence. Ainsi, le 8 juillet 2010, la température extérieure passait de 20°C au petit matin à 32°C en fin d'après-midi. La puissance de froid envoyée dans les bâtiments passe ainsi d'une centaine de kW de nuit (imprimerie,...) à plus de 3 MW l'après-midi, au plus chaud de la journée, pour redescendre à 700 kW durant la soirée. Le taux d'occupation des salles de conférence (annexe 17) valait ce jour là 41 % pour le bâtiment E et 34 % pour le A, soit une occupation dans la normale en cette saison. La puissance mesurée au niveau du réseau primaire (P_{prim}), est légèrement supérieure à celle mesurée au niveau du secondaire (P_{sec}): ceci n'est autre qu'un problème lié à la précision de mesure de la température et de faibles écarts entre ces températures. Les débits varient aussi fortement: de 40 m³/h du côté primaire et 60 m³/h du côté du bâtiment (distribution), ces valeurs augmentent fortement dès la mise en condition climatique des salles et atteignent respectivement 780 et 550 m³/h lors de la pointe de puissance. A cette période, le débit primaire appelé par le bâtiment B1 représente environ la moitié du débit total du réseau GLN.

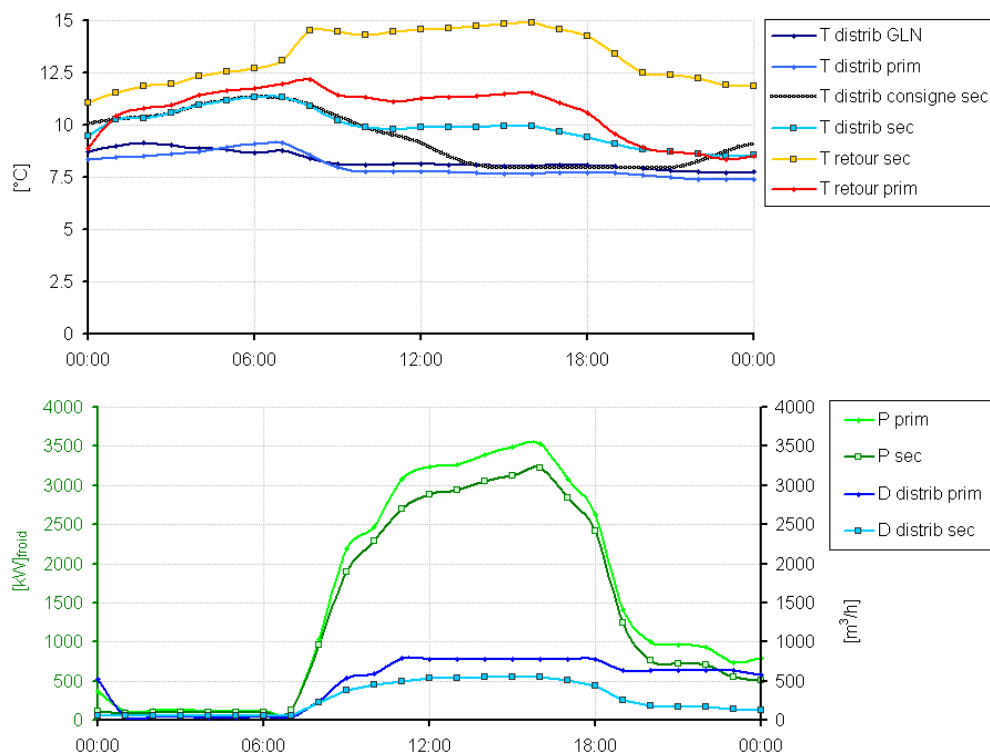


fig. 9-11 Fonctionnement du réseau GLN (5, 6, 9) et du réseau de distribution secondaire (7, 8) du bâtiment B1 lors d'un jour typique d'été; données horaire du 8 juillet 2010

Au niveau des températures, on peut remarquer les points suivants:

- le départ du réseau GLN à la station de pompage ($T_{\text{distrib GLN}}$) et la température d'entrée du primaire sur l'échangeur du bâtiment B1 ($T_{\text{distrib prim}}$) sont proches mais pas égales: cette dernière est inférieure à la valeur mesurée à la station de pompage, ce qui n'est pas logique et tient avant tout à des problèmes de mesure. En effet, l'écart mesuré n'est que de 0.3°C environ et reste dans la limite de précision des thermomètres utilisés pour la régulation,
- la consigne de température (distribution dans le réseau secondaire) est bien suivie par la température sortant du secondaire de l'échangeur de chaleur ($T_{\text{distrib sec}}$), sauf pendant les pointes de puissance où un départ à 10°C au lieu de 8°C demandé par la consigne permet de pleinement profiter du réseau GLN, avec un écart de température important entre le retour et la distribution

secondaire ($\Delta T_{\text{sec}} = 5^\circ\text{C}$). Suivre la consigne pendant les périodes de pointe aurait conduit à une utilisation importante et inutile des groupes de froid,

- la température de retour du bâtiment ($T_{\text{retour sec}}$) fluctue entre 12 et 15 °C, alors que celle retournant au lac ($T_{\text{retour prim}}$) va se situer aux environs de 10-11 °C, avec une baisse à près de 8°C à partir de 19 h, quand la demande de climatisation chute,
- notons encore que quelles que soient les puissances de froid demandées, les températures de retour du bâtiment ($T_{\text{retour sec}}$) ne s'élèvent pas au-dessus de 15°C (entre 8 et 14 h).

B/ Jour type hiver (20 février 2011)

En hiver (fig. 9-12), la demande de froid liée aux datacenters est de l'ordre de 80-120 kW (aucune demande de refroidissement liée au climat n'existe à cette période). Le débit secondaire (distribution) est également constant, de l'ordre de 60 m³/h. Du côté primaire, le débit reste relativement fluctuant (5–30 m³/h) et suit les oscillations des températures de distribution primaires du réseau GLN à la station de pompage ($T_{\text{distrib GLN}}$) et à l'entrée de l'échangeur de chaleur du bâtiment ($T_{\text{distrib prim}}$).

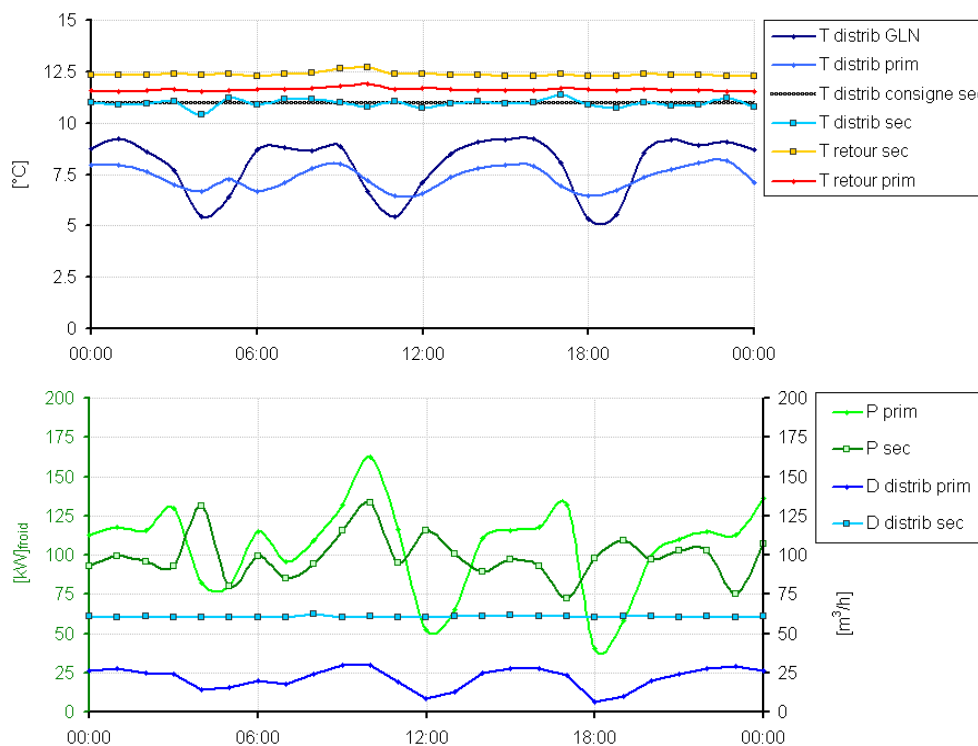


fig. 9-12 Fonctionnement du réseau GLN (5, 6, 9) et du réseau de distribution secondaire (7, 8) du bâtiment B1 lors d'un jour typique d'hiver; données horaire du 20 février 2011

Ces oscillations résultent d'une utilisation du réseau GLN qui, en hiver, se fait majoritairement en boucle fermée (sans pompage/rejet d'eau du lac; fig. 9-13). Ceci permet de réduire très fortement la consommation électrique du pompage jusqu'à environ 10 kW ($P_{\text{él pompes}}$), qui sont nécessaires uniquement pour vaincre les pertes de charge du réseau. Cependant, afin de contrer la dérive en température de la boucle de distribution, un pompage d'eau du lac permet ponctuellement de rabaisser à 5°C la température de distribution dans le réseau GLN ($T_{\text{distrib GLN}}$). A ce moment, la puissance électrique des pompes grimpe à plus de 100 kW, nécessaires à vaincre la gravité liée au pompage en sus des pertes de charge liées à la distribution.

Ce fonctionnement en boucle fermée est possible en hiver, pour les raisons suivantes:

- les apports de chaleurs liés à la climatisation sont faibles,
- les échanges thermiques du réseau GLN avec le terrain sont faibles, car le sol se trouve à une température proche de l'eau circulant dans le réseau,
- ce fonctionnement est par ailleurs favorisé par l'utilisation du réseau GLN pour le chauffage de certains bâtiments, via une pompe à chaleur: le prélèvement de calories dans le réseau primaire rabaisse ses niveaux de température.

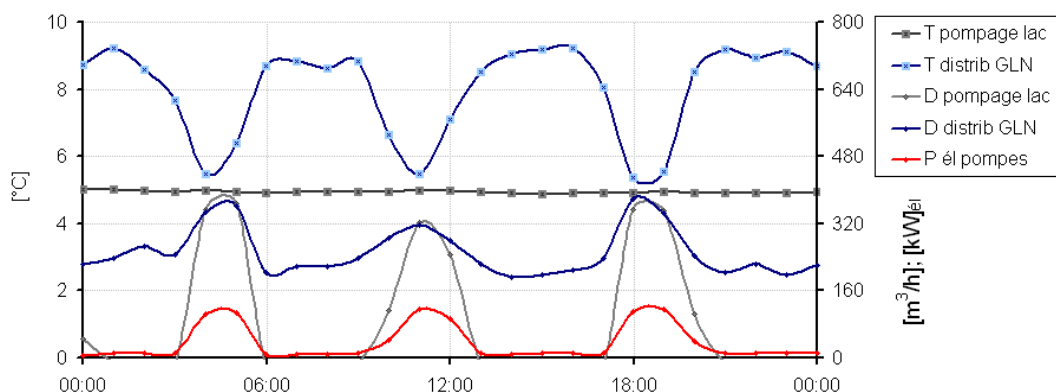


fig. 9-13 Fonctionnement du réseau GLN (4, 5, 13) en boucle ouverte/fermée lors d'un jour typique d'hiver; données horaire du 20 février 2011

9.2.6.2 Bilans et indices énergétiques

Pour cette seconde année de fonctionnement, 2,15 GWh de froid ont été délivrés, ce qui équivaut à 810 h de fonctionnement à la puissance concessionnée (2,66 MW). La puissance frigorifique maximum appelée est de 3,72 MW. Le débit moyen observé côté primaire de l'échangeur vaut 152 m³/h (non pondéré) pour un réchauffement moyen correspondant de 2,9°C (non-pondéré) ou 3,3°C en valeur pondérée par l'énergie froid délivrée ($E_{\text{froid sec}}$).

Rappelons que le dimensionnement des installations est basé sur une demande de froid annuelle équivalant à 1'250 h de fonctionnement à puissance nominale et un ΔT_{prim} moyen de 5°C. Notons aussi que les deux échangeurs de chaleur installés ont une capacité de débit de 1'030 m³/h (2 x 515 m³/h): du point de vue de la puissance échangeable, leur dimensionnement est suffisant pour couvrir les demande de pointes (sans recours à une production additionnelle via des machines frigorifiques), à condition que l'eau pompée soit bien valorisée (ΔT_{prim} et ΔT_{sec} élevés) et que les niveaux des températures de la ressource le permettent (cf. chap. 9.2.6.3 et 9.2.6.6 ci-dessous).

A/ Energie thermique

Au cours de cette deuxième année de connexion, l'indice de climatisation mesuré est de 38,3 kWh/m² (sur la base d'une SRE_{froid} de 56'162 m²) et la puissance de pointe se monte à 66 W/m².

B/ Energie électrique

Une économie d'électricité¹ de 924 MWh a été relevée sur le site du bâtiment B1 depuis la mise en service du réseau GLN, soit environ 7 % comparé à la moyenne de consommation des quatre années précédentes (tableau 9-3). Outre les économies d'électricité liés à la connexion au réseau, d'autres facteurs expliquent cette diminution: renouvellement de matériels plus efficaces

¹ Sur la base des compteurs SIG pour la période d'octobre 2009 à septembre 2010 (consommation globale)

(informatique, éclairage), mais également changements de comportements (campagnes d'information sur l'utilisation rationnelle de l'énergie dans le cadre d'une charte de développement durable nouvellement adoptée). D'autre part, des équipements supplémentaires ont été installés, comme un datacenter de 150 kW_{th} en janvier 2011 (correspondant à une consommation supplémentaire d'environ 220 MWh_{él} à fin mars 2011¹, compte non tenu de son refroidissement).

Une mesure ponctuelle des performances des machines de froid a indiqué une efficacité frigorifique de 4.31 (EER²), ce qui conduit à une économie d'électricité réalisée par le réseau GLN au niveau des groupes de froid non utilisés d'environ 500 MWh/an pour la production d'énergie froid, auxquels il faut ajouter plusieurs auxiliaires comme ceux liés à l'évacuation des calories via les tours aéro-réfrigérées. Il est donc difficile de donner une valeur très précise du gain électrique réalisé, mais on peut l'estimer entre 600 et 900 MWh/an.

	production de froid		bâtiment B1		
	EER	GWh _{él} nécessaires (estimation)	GWh _{froid}	GWh _{él}	GWh _{él} économisés
moyenne 05-09	4.31	0.5	2.15	13.6 ± 0.15	-
2010	6.8 ³	0.32		12.7	0.92

tableau 9-3 Consommation électrique et production de froid des installations de climatisation; consommation électrique globale du bâtiment B1 (compteurs SIG); période du 1^{er} avril au 31 mars (années 2005 à 2010)

9.2.6.3 Ressource: du lac au bâtiment, puis retour au lac

A/ Considérations générales

Pour rappel et comme il a été détaillé au *chapitre 8.2*, la ressource en énergie froid provient d'un pompage d'eau lacustre situé à 37 m prof., en dessous de la thermocline. La température de ces couches d'eau hypolimniques n'est que très peu touchée par les variations annuelles de la température extérieure. La qualité de cette ressource est déterminée à la fois par son niveau de température et sa stabilité.

Hormis sa qualité intrinsèque au point de pompage, son parcours jusqu'aux sous-stations des bâtiments connectés est susceptible de la péjorer par des échanges thermiques avec le milieu environnant: tout d'abord avec les différentes couches d'eau du lac pendant son parcours dans la conduite d'adduction sous-lacustre, puis avec le sol durant son parcours la menant de la station de pompage jusqu'au sous-stations des bâtiments connectés.

B/ Pertes thermiques et qualité de la ressource à la sous-station du bâtiment B1

En hiver, et comme vu précédemment, le réseau GLN fonctionne principalement en boucle fermée. Ceci est rendu possible par le fait que la demande en froid est faible, que le sol est froid, et qu'une demande de chaleur via des pompes à chaleur contribue à refroidir les eaux du réseau primaire. On remarque ainsi une succession de fonctionnement alternant entre une configuration en boucle fermée (températures plus élevées) et en boucle ouverte (températures basses), lorsque le pompage d'eau du lac est activé (*fig. 9-14*).

¹ Sur la base d'une demande constatée de 100 kW_{th} de janvier à mars 2011

² L'efficacité frigorifique d'une machine frigorifique a été mesurée par les services techniques pendant une semaine en continu (EER-machine, distribution et tous aéro-réfrigérées non-comprises)

³ Efficacité frigorifique moyenne du réseau GLN mesurée du 1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011

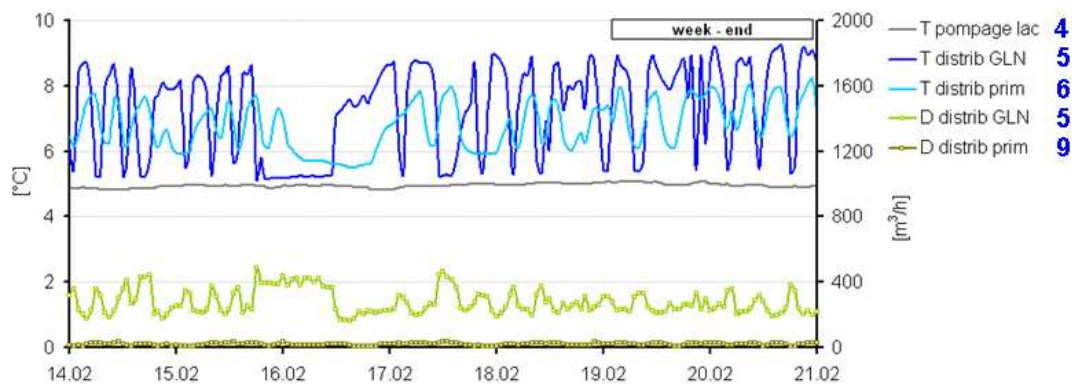


fig. 9-14 Température d'eau et débits dans le réseau GLN pour une semaine hivernale typique: pompage à 37 m prof., station pompage et sous-station du bâtiment B1; données horaire du 14 au 21 février 2011

En été, la situation est plus complexe (fig. 9-15): le lac est thermiquement actif, le réseau ne fonctionne qu'en boucle ouverte et la demande de froid est très variable. Il en résulte des variations thermiques de la ressource plus importantes et non-contrôlées. Que ce soit au niveau du pompage, de la distribution dans le réseau GLN mais aussi de la sous-station du bâtiment B1, les températures du réseau varient entre 8 et 10°C pendant cette période chaude: en effet, elles sont dépendantes à la fois des fluctuations naturelles existant dans le milieu lacustre, mais aussi de la variation de débit dans la boucle primaire principale et dans l'embranchement primaire destiné au bâtiment B1.

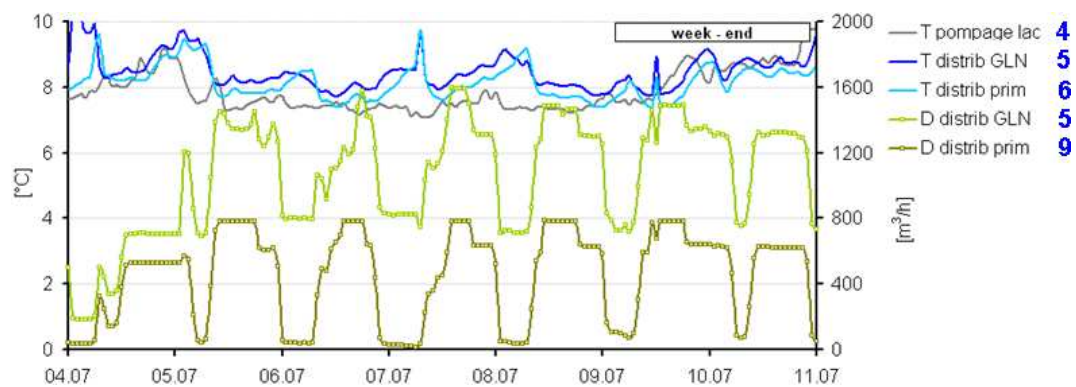


fig. 9-15 Températures et débits d'eau du lac dans le réseau GLN pour une semaine estivale typique: pompage à 37 m prof., station pompage et sous-station du bâtiment B1; données horaire du 4 au 11 juillet 2011

Fait surprenant, la température mesurée à la sous-station du bâtiment B1 est environ 0.4°C en dessous de celle mesurée à la station de pompage: cela doit principalement être interprété comme une imprécision de mesure, le sous-sol étant en moyenne plus chaud que l'eau, ce qui devrait provoquer une augmentation de température.

En effet, la température mesurée à la station de pompage résulte de la température existant spontanément au point de pompage, qui subit un premier échauffement lors de la traversée des couches superficielles plus chaudes, avec des valeurs maximums de quelques dixièmes de degrés (fig. 9-47). Une fois à la station de pompage, l'eau est envoyée aux diverses sous-stations du réseau. Il en résulte deux phénomènes: un réchauffement de l'eau par diffusion de chaleur dans le sol, et un retard dû au temps de transit.

Pour le cas du bâtiment B1, le trajet est relativement simple et se compose de deux grandes parties de distances équivalentes (fig. 9-16):

- un premier tronçon sur la boucle principale avec des conduites de diamètres importants (600 et 700 mm); seules deux connexions peu importantes se trouvent sur ce tronçon (elles représentent moins de 5 % du débit total du réseau GLN),
- un second tronçon spécifique au bâtiment B1, d'un diamètre légèrement inférieur.

Le temps de transit est donné par un simple rapport entre le volume d'eau à transiter et le débit (tableau 9-4). Ainsi, le temps de transit est très court à plein régime (100 % du débit): cela signifie que les fluctuations de température au niveau du pompage lacustre vont se propager rapidement à la sous-station du bâtiment B1; ce temps de transit peut toutefois s'élever jusqu'à deux heures pendant les périodes « creuses » de faible demande (10 % du débit).

débit	100 %	10 %
réseau principal (180 m ³)	3 min	30 min
embranchement bâtiment B1 (150 m ³)	10 min	100 min
total	13 min	130 min

tableau 9-4 Temps de transit entre la station de pompage et la sous station du bâtiment B1

Un deuxième effet plus important est l'échange diffusif entre l'eau circulant dans le réseau GLN et le terrain. Une étude par simulation numérique (Bordy *et al.*, 2007) a quantifié l'effet attendu de cette diffusion et conclut à la non nécessité d'isoler le réseau primaire. La fig. 9-16 montre les échauffements attendus pour les différentes sous-stations, sous hypothèse d'un débit de distribution du réseau constant de 3'400 m³/h et d'une température de distribution constante de 8°C à la station de pompage. Avec ces hypothèses, la température attendue à la sous station du bâtiment B1 serait d'environ 0.05°C plus élevée que celle à la station de pompage.

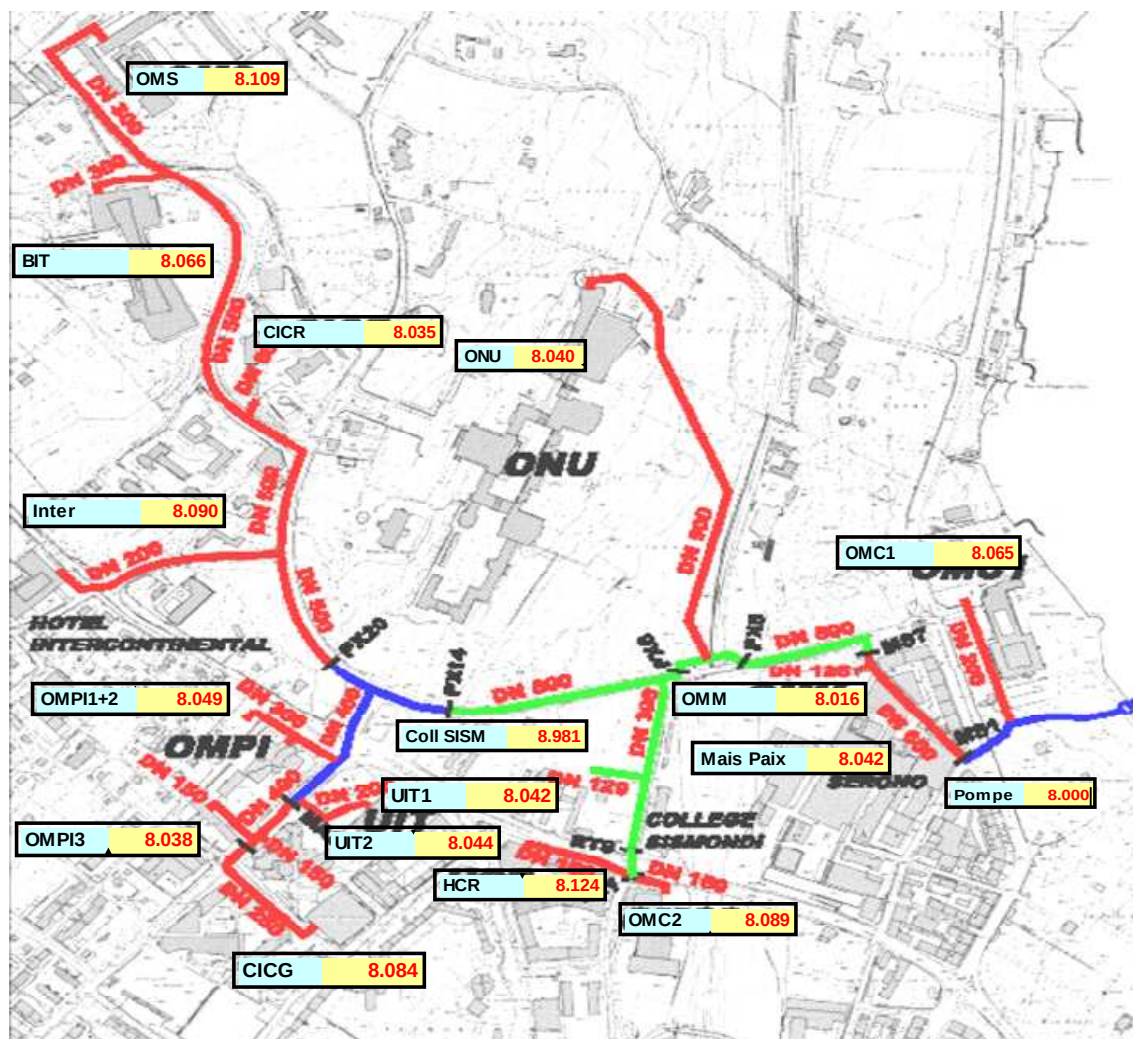


fig. 9-16 Simulation des températures d'eau aux différentes sous-stations (hypothèses: débit total de 3'400 m³/h, température de distribution du réseau GLN de 8°C à la station de pompage)

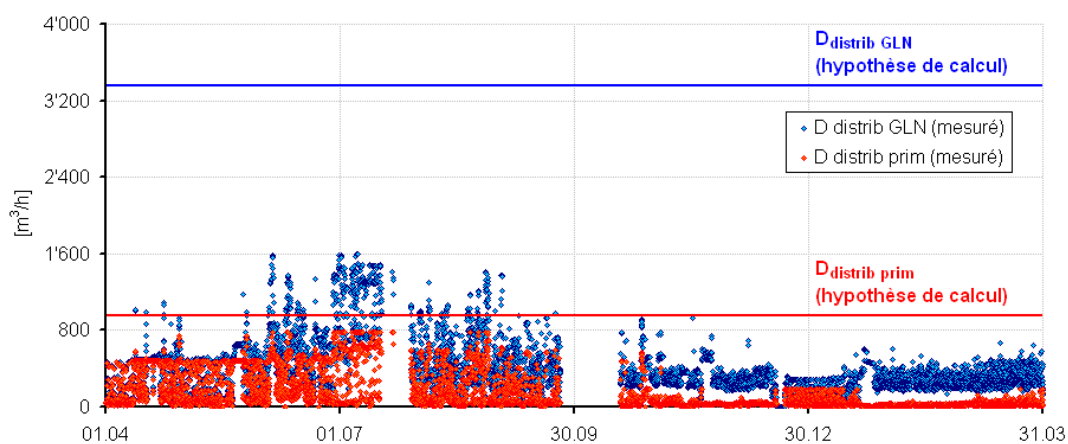


fig. 9-17 Débits du réseau principal ($D_{\text{distrib GLN}}$, 5) et de l’embranchement du bâtiment B1 ($D_{\text{distrib prim}}$, 9): comparaison entre les valeurs mesurées et les hypothèses de calcul

Cependant, les débits effectivement observés sont 3 à 10 fois plus faibles que ceux considérés dans la simulation (fig. 9-17). On devrait dès lors s’attendre à un effet également 3 à 10 fois plus important, soit un réchauffement moyen de l’ordre de 0.2°C . Comme vu précédemment, ces faibles écarts de températures ne sont pas détectés par les sondes de régulation. Tout au plus, cette analyse confirme le bien fondé de ne pas isoler les conduites dans le terrain.

Suite à la connexion des trois autres bâtiments, la part du débit primaire dévolue au bâtiment B1 a fortement diminué en une année, puisque de pratiquement 100 % au printemps 2010, sa part ne vaut plus que 10 % au printemps 2011 (fig. 9-18).

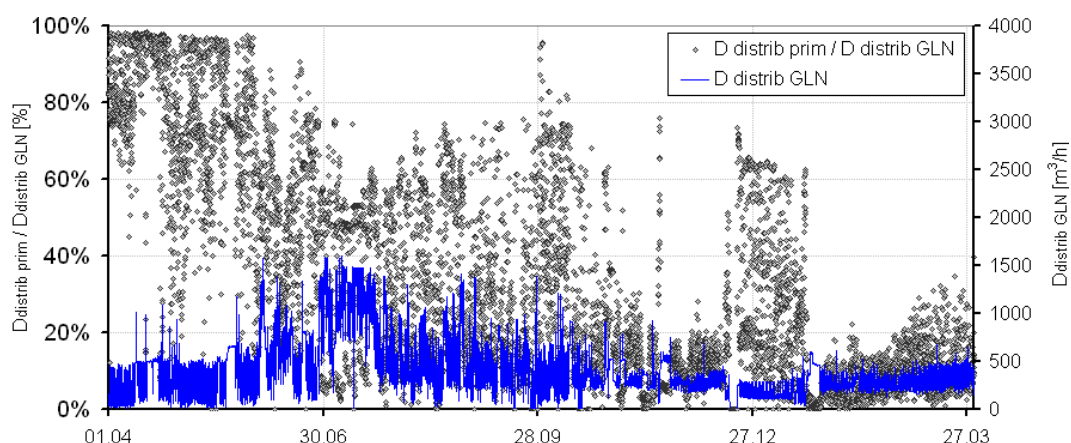


fig. 9-18 Part du débit utilisé par le bâtiment B1 ($D_{\text{distrib prim}}$, 9) par rapport au débit total du réseau GLN ($D_{\text{distrib GLN}}$, 5); données horaire du 1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011

C/ Impact potentiel au niveau du rejet dans le lac

Le volume d’eau lacustre pompé annuellement et rejeté dans l’épilimnion lacustre à 4.5 m prof. est d’environ 1.35 millions de m^3 . Le volume d’eau pompé durant la période chaude (avril à septembre) en représente plus de 85 %.

Les eaux rejetées sont bien plus fraîches que celles du milieu récepteur (fig. 9-19): le potentiel de refroidissement de l’épilimnion et l’impact potentiel induit sont d’autant plus importants que les niveaux des températures de retour du bâtiment sont bas. Pour rappel, soulignons que le fait de refroidir la couche superficielle du lac n’est pas considéré comme une atteinte importante à l’environnement. Cela peut même présenter des avantages sur le plan de la qualité de l’eau exigée par certaines espèces de poissons (cf. chap. 8.4.2.3) et celui de l’intensification de la filière hydrothermique régionale (cf. chap. 10.3).

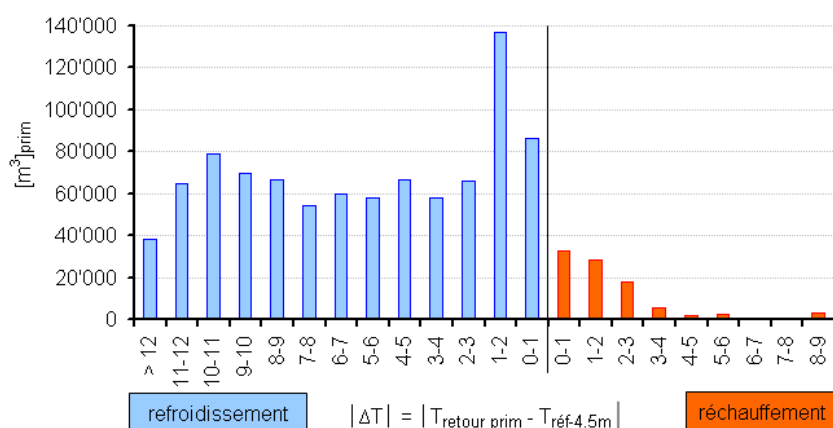


fig. 9-19 Potentiel de modification de la température de l'épilimnion (11, 2) en fonction du volume d'eau rejetée par le réseau GLN; données horaires du 1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011

9.2.6.4 Valorisation de la ressource

A/ Signature énergétique, débits et températures de travail

L'un des résultats fondamental pour l'analyse énergétique de l'installation est la « signature énergétique », qui détermine la corrélation entre la demande de froid et la température extérieure (Mermoud et al., 2008a; cf. chap. 9.1). En raison de la dispersion des données horaires due à une activité confériencière variable et donc à une demande variable, une certaine fluctuation est présente; on peut tout de même distinguer sur la fig. 9-20 la tendance à une demande de froid proportionnelle à la température extérieure, avec une valeur moyenne (en rouge) et une fluctuation autour de cette valeur moyenne dépendant entre autre de l'activité confériencière¹.

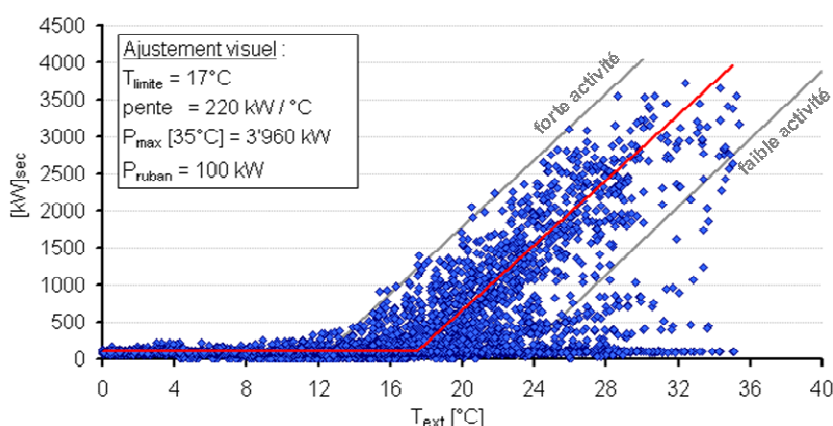


fig. 9-20 Signature de la puissance de froid du bâtiment B1 (secondaire, 7, 8); données horaires du 1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011

La demande de froid peut donc se décomposer de la façon suivante:

- en dessous d'une température extérieure T_{limite} de 17°C, une demande approximativement constante et faible de 100 kW, correspondant aux charges constantes de « ruban » (datacenters, imprimerie,...):

$$P_{froid} = P_{ruban} = 100 \pm 30 \text{ kW}$$

¹ Information obtenue par des observations effectuées dans ce bâtiment et des discussions avec les services techniques. L'analyse de la variation de charge en fonction du taux d'activité confériencière permettrait de détailler ce point mais n'a pas été jugée fondamentalement nécessaire dans le cadre de cette analyse

- en dessus de cette limite, une demande croissant linéairement avec la température extérieure et fluctuant d'environ ± 500 kW et correspondant à la demande de « confort ». Elle augmente de 220 kW supplémentaire par °C pour atteindre une valeur maximum estimée à 3'960 kW pour une température extérieure de 35°C:

$$P_{\text{froid}} = P_{\text{ruban}} + (T_{\text{ext}} - T_{\text{limite}}) \cdot \text{constante}$$

$$= 100 + (T_{\text{ext}} - 17) \cdot 220 \text{ (kW)}$$

Le débit de distribution de la boucle froide secondaire augmente linéairement avec la puissance de froid (*fig. 9-21*); à puissance nulle, il réside un débit seuil d'environ 50 m³/h au-dessous duquel les pompes de circulation ne fonctionnent plus de manière fiable.

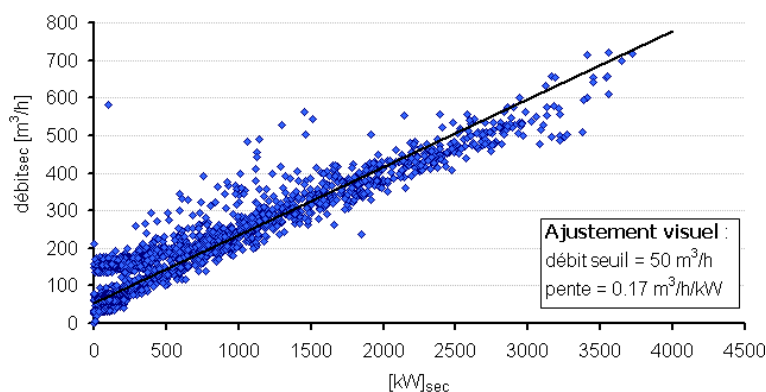


fig. 9-21 Dépendance du débit de distribution (7) avec la puissance de froid (secondaire, 7, 8) du bâtiment B1; données horaires du 1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011

Lorsque la demande de froid est élevée, la température de distribution est en général basse, aux alentours de 9-10°C. Pour les plus faibles charges, elle s'élève progressivement jusqu'à 12-13°C (*fig. 9-22*). Le niveau des températures de retour est fonction du débit de distribution, qui varie linéairement avec la puissance en jeu. Elles atteignent 15-16°C à pleine charge, ce qui correspond la plupart du temps à une différence de température de 5°C entre retour et distribution; pour les plus faibles charges, elle s'abaisse jusqu'à 12-13°C du fait du débit seuil de 50 m³/h vu précédemment.

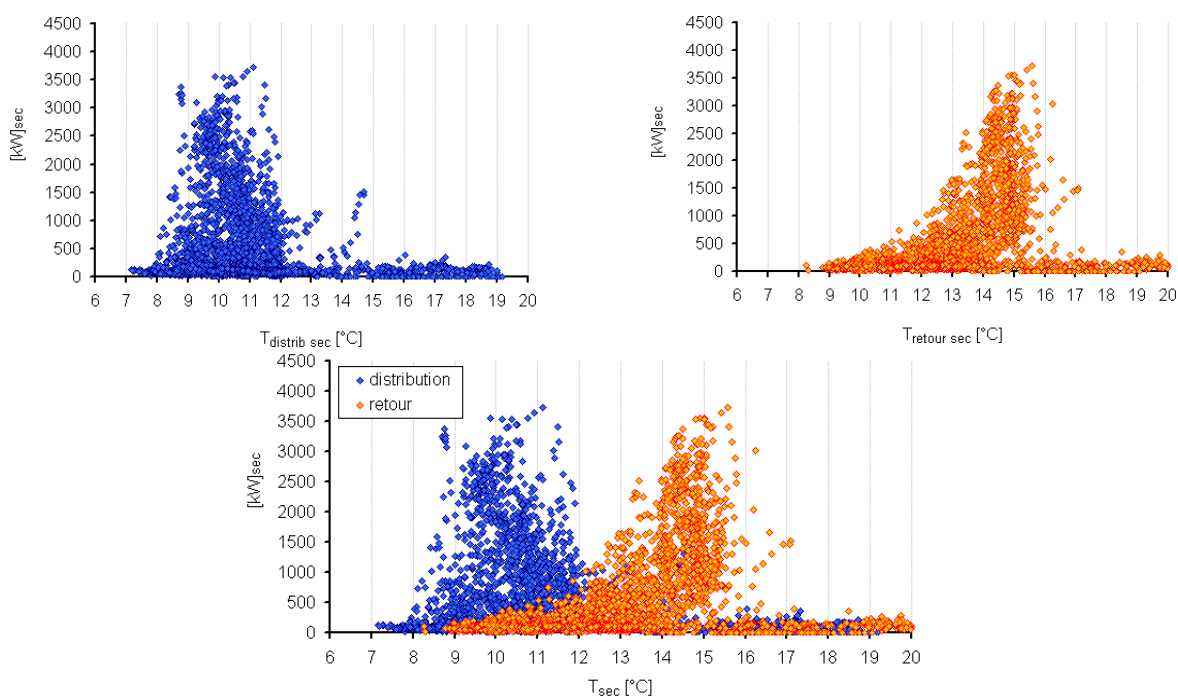


fig. 9-22 Températures de travail du côté secondaire de l'échangeur de chaleur (entrée de l'échangeur = retour, 8; sortie de l'échangeur = distribution, 7); données horaires du 1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011

B/ Energie et puissance

La *fig. 9-23* montre la courbe de charge classée de la demande de froid durant une année ainsi qu'un zoom sur les 1'500 heures supérieures.

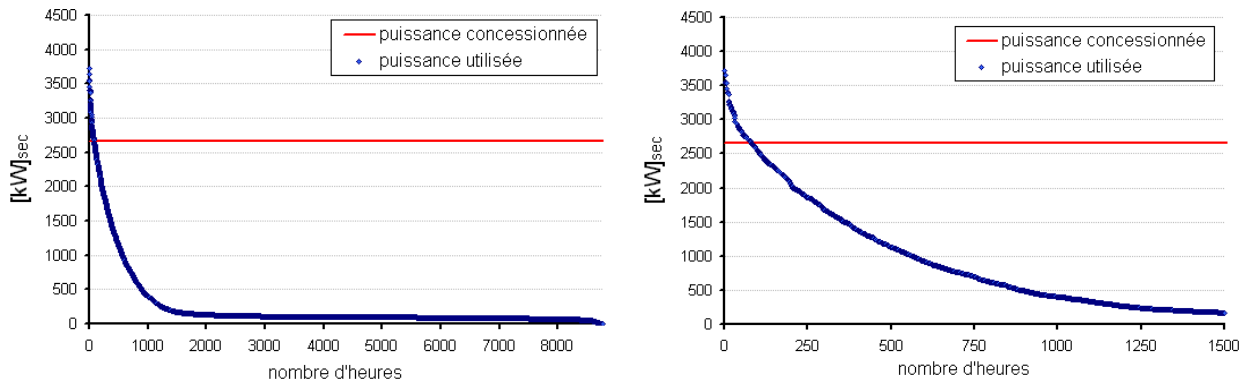


fig. 9-23 Courbe de charge froid du bâtiment B1 (secondaire, 7, 8); données horaires du 1^{er} avril 2010 au 31 mars

La pointe de la demande de froid est très courte et l'allure générale de la courbe très pointue. Le rapport entre l'énergie froid totale et la puissance de pointe correspond à un peu moins de 600 heures; la durée équivalente de la puissance concessionnée équivaut à 810 heures. Ainsi, comme le montre le *tableau 9-5*, la prestation ruban, bien que ne mobilisant qu'une faible puissance (5 %), requiert une importante quantité d'énergie (42 %). La situation est inverse pour la prestation de confort.

prestations	P _{seuil} [kW] _{utilisé}	% [kW] _{concessionné}	[MWh]	% [MWh]	nbre heures
ruban	< 130	5	883	41	8'760
confort	< 3'720	140	1'270	59	1'250
total			2'153	100	8'760

tableau 9-5 Estimation de l'énergie délivrée pour les prestations ruban et confort (secondaire) au bâtiment B1; données horaires du 1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011

De façon plus détaillée, la *fig. 9-24* montre la relation entre puissance relative (100 % correspond au maximum observé, soit 3'720 kW ou 1.4 fois la puissance concessionnée) et énergie relative (par rapport à l'énergie totale fournie de 2.15 GWh). Ainsi les périodes pendant lesquelles la prestation ruban domine permettent déjà d'absorber près de 30 % de l'énergie vendue. À partir de là, la relation montre que l'appel de puissance devient plus important (prestation confort), mais 90 % de l'énergie est tout de même obtenue avec seulement 43 % de la puissance.

Le dimensionnement de la puissance concessionnée semble *a priori* satisfaisant, car il couvre près de 90 % de l'énergie froid consommée. L'utilisateur doit toutefois se poser la question de sa volonté ou non de couvrir l'entier de la puissance frigorifique demandée via le réseau GLN, ou s'il juge opportun de conserver une production classique d'appoint/sécurité.

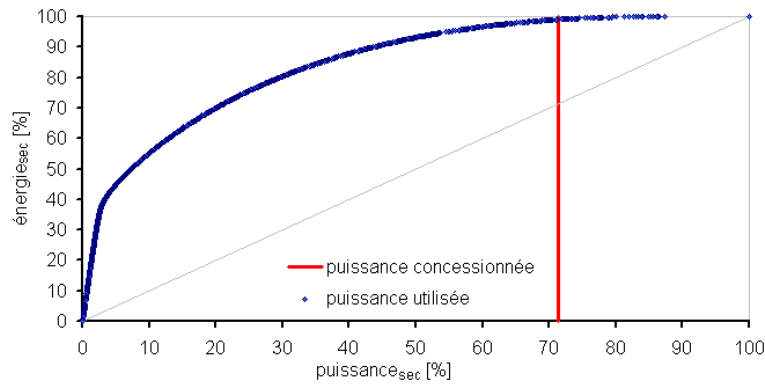


fig. 9-24 Relation puissance relative – énergie relative (sec); données horaires du 1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011

En valorisant le maximum d'énergie via le réseau GLN sans mobiliser un débit démesuré, la puissance concessionnée nous semble adéquate: au-dessus de cette puissance, une production classique complémentaire serait à notre avis souhaitable. Ce point essentiel pour l'optimisation de la connexion et du réseau est repris au *chapitre 9.2.7*.

Du point de vue de la puissance concessionnée, l'approvisionnement via le réseau GLN semble *a priori* garanti avec un débit ne dépassant pas celui fixé par la concession. Toutefois et dans des conditions particulières (p. ex. utilisation en parallèle des plusieurs grandes salles de conférence), il se peut que ce soient les niveaux de température qui posent problème (*voir ci-dessous*). Dans ce cas, une production classique complémentaire s'avère également opportune.

C/ Comparaison avec la situation avant la connexion au réseau GLN

L'étude détaillée réalisée en 2007 avec les installations d'origine permet la comparaison avec la connexion au réseau GLN (situation 2010). On se focalisera pour cela sur des périodes estivales pour lesquelles les données sont disponibles au niveau des bâtiments A et E (*détail des mesures à l'annexe 18*):

- 2007: période du 26 mai au 27 juin,
- 2010: périodes du 17 au 24 mai et du 3 au 8 juin (traitées en bloc).

Signatures énergétiques

De façon générale, les signatures énergétiques sont similaires en 2007 et 2010, ce qui montre que le réseau GLN a substitué la production via les machines frigorifiques de façon satisfaisante (*fig. 9-25*). La similitude est un peu moins évidente au niveau du bâtiment A, où les appels de puissances sont fortement dépendants non seulement de la température extérieure, mais aussi de l'activité confériencière, qui n'a pas forcément été la même au cours des deux périodes en question.

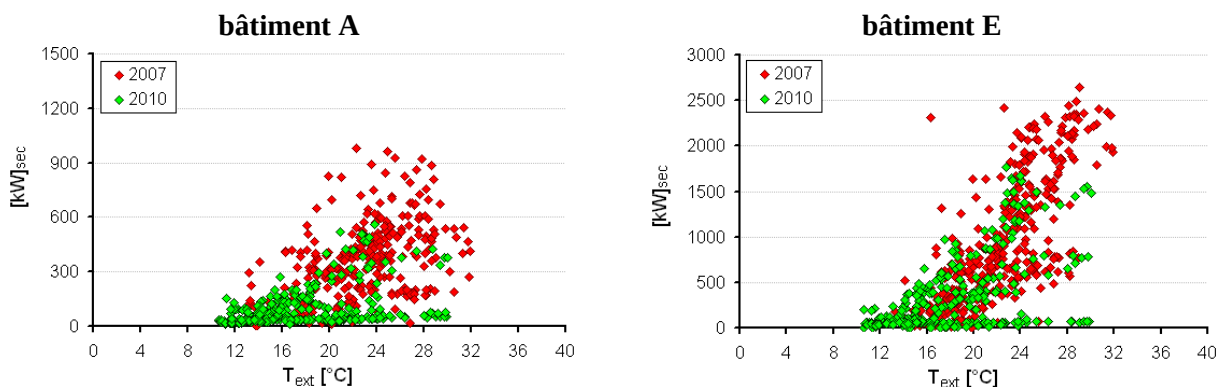


fig. 9-25 Signatures froid des bâtiments A et E en 2007 et 2010 (secondaire, 7, 8) du bâtiment B1; données horaires pour les périodes estivales considérées

Débits

De façon générale, la régulation du débit de la boucle secondaire n'a guère changé entre 2007 et 2010 (fig. 9-26). Ainsi ce débit augmente linéairement avec la puissance de froid. A puissance nulle, il réside cependant un débit seuil, au-dessous duquel les pompes de circulation ne fonctionnent plus de manière fiable.

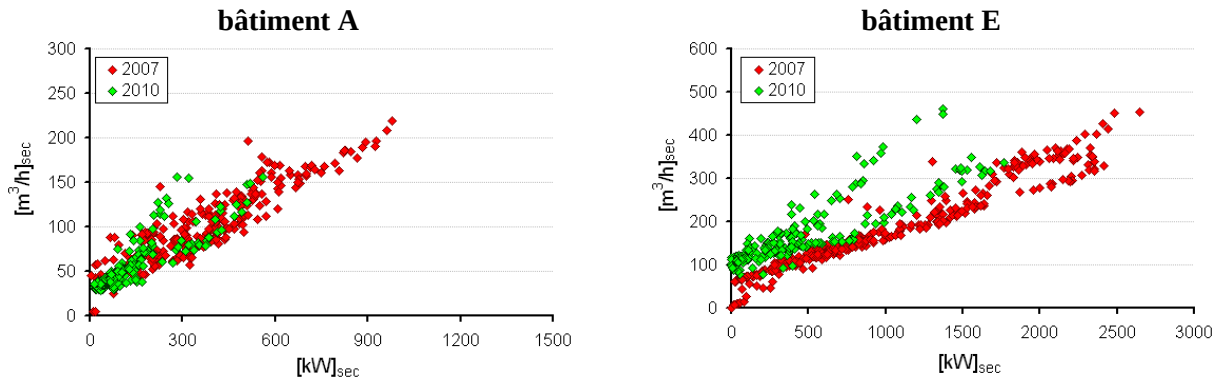


fig. 9-26 Débits secondaires (7, 8) des bâtiments A et E en 2007 et 2010; données horaires pour les périodes estivales considérées

Températures de travail

Pour les deux bâtiments, les changements induits par la connexion au réseau GLN sont importants, car les températures de travail (distribution et retour secondaires) ont été relevées en fonction de celles de la ressource lacustre (fig. 9-27).

En particulier, les conditions des températures de distribution ont évolué comme suit:

- 2007: la température de distribution est fixée par les machines frigorifiques. Elle est constante, de l'ordre de 7-8°C quelle que soit la puissance de froid appelée,
- 2010: la température de distribution est variable et non totalement contrôlée par l'utilisateur. Durant la période analysée, elle est généralement comprise entre 10 et 12°C, en particulier lorsque la demande en énergie froid est importante. Quelques points de travail dérivent vers des températures de distribution supérieures (entre 12 et 16°C), s'approchant ainsi des conditions ambiantes de la sous-station des bâtiments A et E; toutefois, ils apparaissent essentiellement lorsque la demande de froid est réduite (nuit et/ou week-end).

La régulation du débit de distribution n'ayant pas changé entre 2007 et 2010, la variation de l'écart de température en fonction de la puissance n'a pas fondamentalement changé, si bien que l'élévation de la température de distribution suite à la connexion au réseau GLN se répercute quasi intégralement sur les températures de retour.

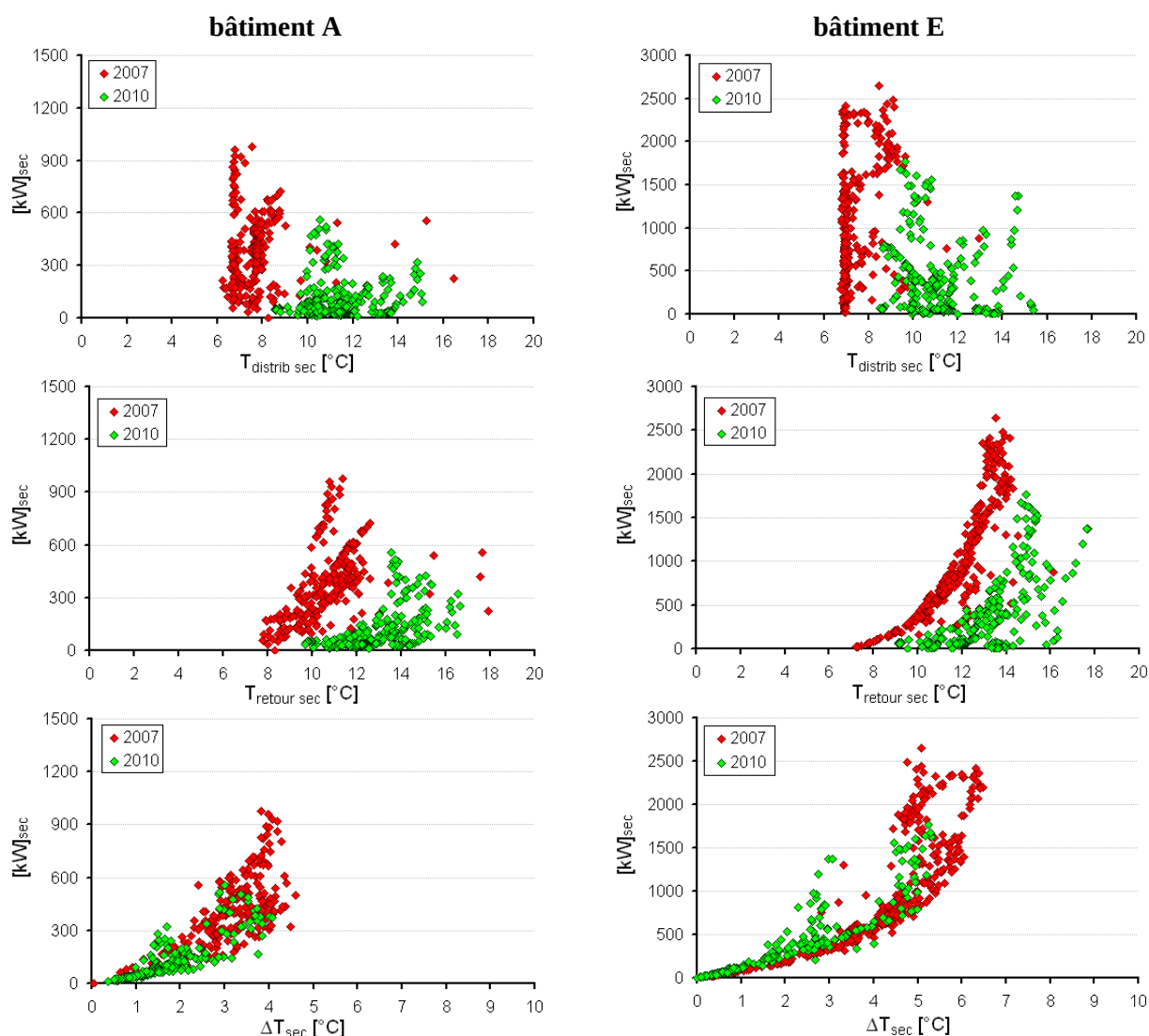


fig. 9-27 Températures de travail secondaires et écart de température entre retour (8) et distribution (7) des bâtiments A et E en 2007 et 2010 (bâtiment B1); données horaires pour les périodes estivales considérées

D/ Prestation de confort: salle de conférence 17

Afin d'évaluer le confort thermique, la salle de conférence 17 a également été instrumentée pendant deux périodes estivales (*fig. 9-28*), avant puis après la connexion au réseau GLN:

- 2007: du 30 mai au 26 juin,
- 2010: du 4 juillet au 29 juillet.

Pendant l'occupation des salles, l'unité de traitement d'air (AHU) est active. On constate que:

- les températures de pulsion sont similaires en 2007 et 2010 (généralement entre 16 et 22 $^{\circ}\text{C}$), entièrement compatibles avec les niveaux de température de la ressource lacustre,
- dans l'assemblée, la température ambiante se situe toujours entre 22 et 25 $^{\circ}\text{C}$, et l'humidité relative dans la plage de 40 à 65 %,
- il en va de même au niveau des cabines d'interprètes, particulièrement sensibles, qui se situent dans la même zone de température.

L'analyse détaillée pour chacun des points de mesure (assemblée, galeries et cabines) se trouve à l'*annexe 19*.

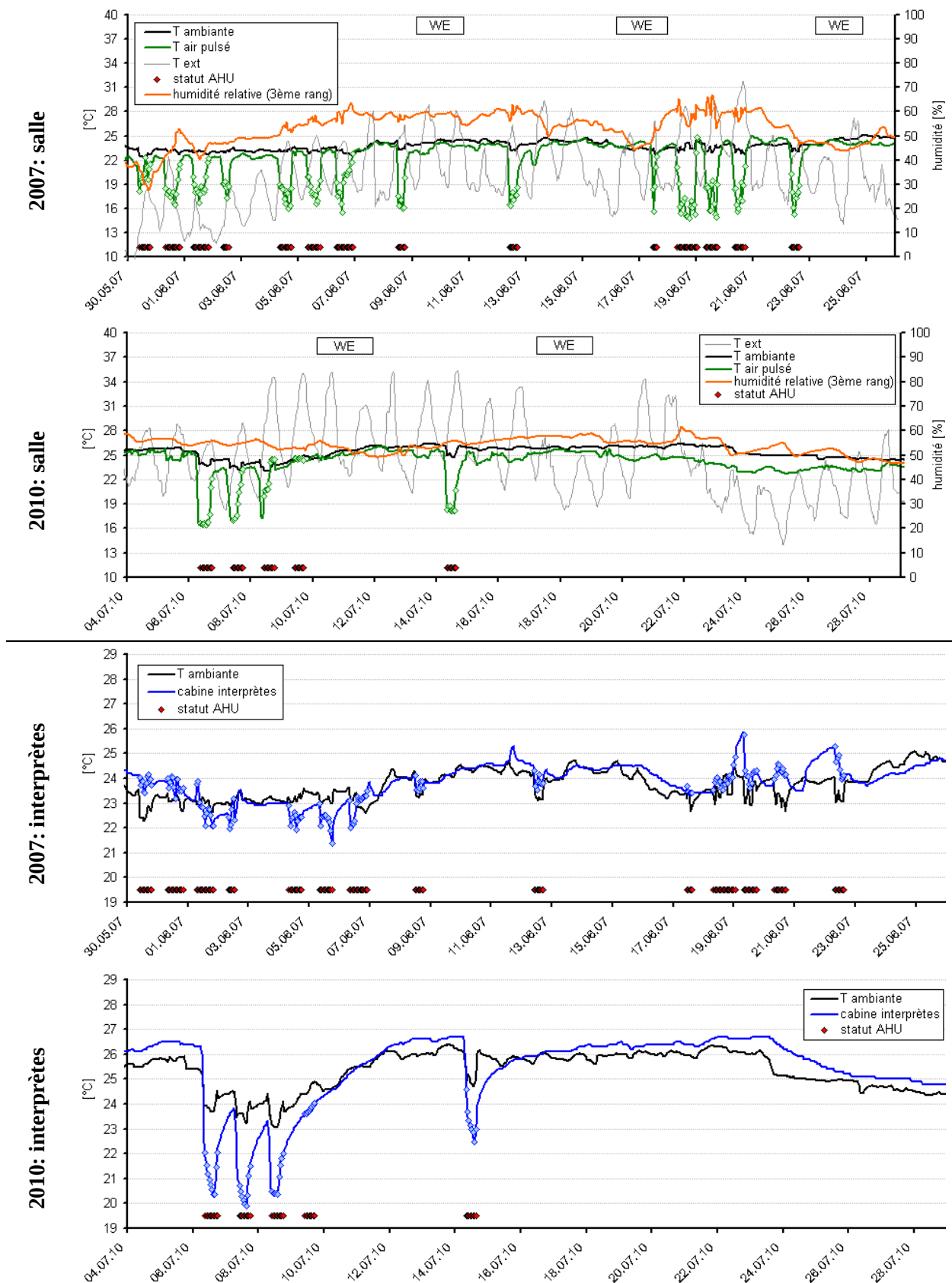


fig. 9-28 Conditions hygrothermiques de la salle de conférence 17 du bâtiment B1; données horaires pour les périodes 2007 et 2010 considérées (mise en évidence des périodes d'occupation par des points en surbrillance)

Ces mesures montrent que la substitution de l'approvisionnement a permis de conserver le même niveau de prestation. Ceci confirme que le réseau GLN fournit une prestation de froid de qualité équivalente à un système de production classique. De plus, l'absence de plainte durant les périodes

de mesure semble confirmer la satisfaction des usagers. Pour généraliser ce constat, il faudrait toutefois étudier le confort thermique d'autres salles de conférences: en effet, les systèmes techniques, dimensionnés sur une régulation-type 6/12°C, varient selon les salles, leurs spécificités techniques et les agendas des conférences.

E/ Optimisation de la prestation de confort (salle de conférence 17)

Plusieurs solutions permettraient d'optimiser la quantité d'énergie consommée pour la prestation de confort (p.ex. salle de conférence 17), tout en conservant une prestation de qualité:

1. ventilation nocturne,
2. augmentation des niveaux de température de l'air pulsé,
3. augmentation des niveaux de la température ambiante,
4. remplacement de certaines installations techniques.

Ventilation nocturne

Les caractéristiques climatiques locales y étant favorables, le recours à la ventilation nocturne pourrait permettre de diminuer la consommation d'énergie via un système productif. La durée de fonctionnement du système de climatisation pourrait ainsi être réduite, avec une diminution probable de la consommation d'électricité: reste toutefois à vérifier que la diminution de consommation liée à l'approvisionnement via le réseau GLN compenserait l'augmentation liée à la ventilation mécanique. Le principe pourrait être celui d'une ventilation modulée en fonction des températures extérieures et ambiantes, avec un profil de consigne diurne (recours à la batterie froide si nécessaire) et un profil de régulation nocturne par ventilation (sans recours à la batterie froide) (Picard *et al.*, 2001).

Par exemple, la première quinzaine de juin 2007 montre des températures nocturnes s'abaissant jusqu'à 13°C et des maximums diurnes restant inférieurs aux températures ambiantes mesurées dans la salle. Pour les conférences de la semaine du 5 juillet 2010, ce type de rafraîchissement aurait également été possible: au matin de la conférence du 6 juillet 2010, la température ambiante est déjà supérieure à 25°C, alors qu'une ventilation nocturne durant une ou deux nuits avant le début des conférences aurait pu l'abaisser sensiblement (Eicker *et al.*, 2006).

Augmentation des niveaux de température de l'air pulsé

Une augmentation sensible des niveaux de température des points de consigne de la régulation froid du réseau de distribution secondaire est actuellement à l'étude. Cela pourrait se réaliser selon le principe d'essai-erreur, en analysant *ex post* les paramètres mesurés. Des modifications plus fines pourraient alors être envisagées par la suite. En agissant seulement sur la régulation, ce type d'optimisation des installations de ventilation existantes a le grand avantage de n'engendrer que peu de coûts.

Augmentation des niveaux de température ambiante

Les températures ambiantes qui ont été mesurées en 2007 et 2010 n'excèdent que très ponctuellement 26°C dans la salle de conférence et l'enveloppe de ces températures satisfait largement aux recommandations de la norme SIA 382/2. Une élévation sensible du niveau des températures ambiantes pourrait être testée conjointement à une augmentation du niveau de température de l'air pulsé. Notons encore que cette recommandation SIA fait preuve de souplesse, puisqu'elle mentionne une autorisation de dépassement de 28°C (limite supérieure) lorsque la température extérieure excède 30°C, sans obligation de garantir la limite supérieure de fluctuation.

Remplacement des installations

Une autre piste d'optimisation, plus coûteuse, consiste à remplacer le matériel désuet de l'AHU par du matériel neuf et performant. En particulier, les pompes de pulsion actuelles opèrent à débit fixe: leur remplacement par des pompes à débit variable permettrait d'ajuster la régulation de manière bien plus fine.

9.2.6.5 Coût de l'énergie froid via le réseau GLN

Entre avril 2010 et mars 2011, le coût annuel moyen de l'énergie froid via le réseau GLN est de 14.6 cts/kWh: la part variable y contribue pour deux tiers (10.2 cts), la part constante pour un tiers (4.4 cts).

Le coût annuel de l'énergie froid délivrée via le réseau GLN (partie variable uniquement) est d'environ 220 KCHF (*fig. 9-29*) pour un peu plus de 2.1 GWh délivrés. 90 % de ces coûts sont imputés aux deux niveaux de température de retour inférieurs à 15°C pour lesquels le prix de l'énergie est le plus élevé.

Le coût annuel de la taxe de puissance (partie fixe = 40 CHF/kW_{concessionné}) représente environ 30 % du coût total, soit environ 95 KCHF. L'optimisation de la distribution de froid dans la boucle secondaire du bâtiment, en particulier par une augmentation de l'écart de température entre retour et distribution, est une source potentielle de diminution des coûts.

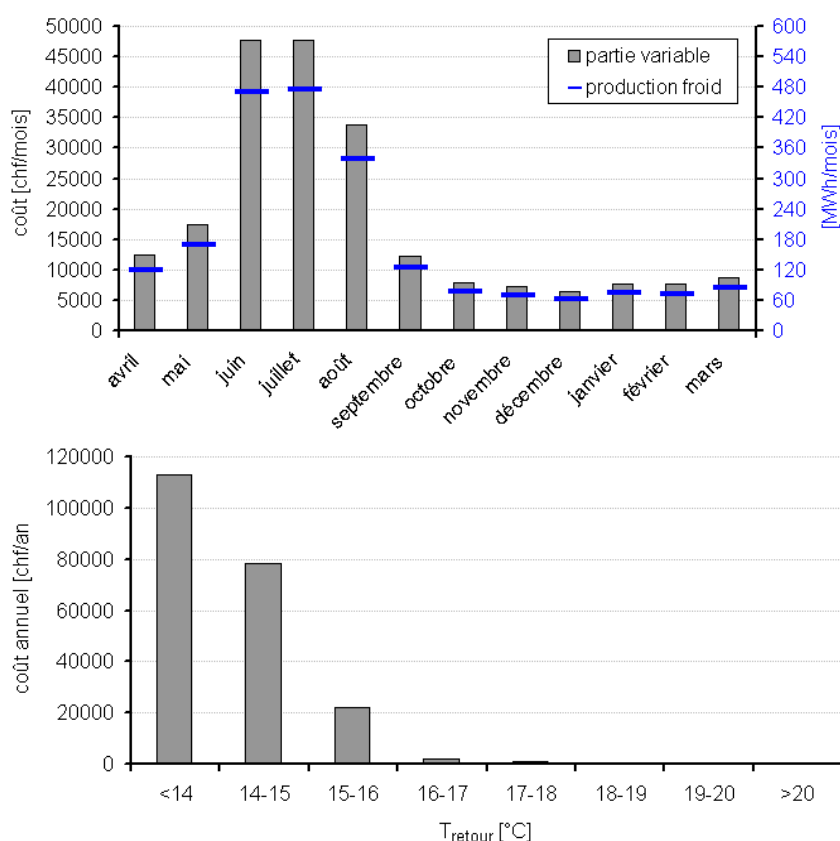


fig. 9-29 Coûts mensuel de l'énergie froid (part variable) via le réseau GLN (en haut) et répartition du coût annuel par niveaux de température de retour (9, en bas); données horaires du 1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011

Dans la mesure où l'utilisateur a intégralement conservé ses machines frigorifiques, le coût global de la prestation de climatisation est indéniablement supérieur à celui qu'il obtenait avant sa connexion au réseau GLN. Rappelons que l'exploitant a fixé le prix de sa prestation froid sur la base d'une couverture intégrale de la demande de froid via le réseau: dans la réalité, cet utilisateur, comme les trois autres déjà connectés, ne voulait et/ou pouvait pas prendre le risque d'une rupture

d'approvisionnement dans des conditions particulières (p.ex. perte de qualité de l'énergie froid délivrée: température de distribution non-contrôlée).

Pour ces questions de sécurité, le choix de l'exploitant d'un approvisionnement 100 % renouvelable se répercute sur une augmentation des coûts de l'utilisateur. Nous pensons qu'un modèle de production bivalent (renouvelable + appoint par machine frigorifique), entièrement pris en charge par l'exploitant, permettrait à l'utilisateur de se départir d'une grande partie de sa capacité de production classique.

Il n'en reste pas moins délicat de comparer les coûts liés à une climatisation à partir d'une production classique (machine frigorifique) et ceux via le réseau GLN. Le type de production ainsi que les relations utilisateur-exploitant (contractuelles, limites d'intervention et de compétence) sont en effet totalement différents. A part les installations techniques de la boucle de distribution secondaire dans le bâtiment qui restent similaires quel que soit le système de production adopté, les différences primordiales sont les suivantes:

1. au niveau des charges financières:

- système classique: les charges incombent à l'utilisateur. Elles incluent les investissements du matériel productif et les frais d'exploitation (maintenance, achat d'électricité et d'eau dédiées),
- réseau GLN: les charges incombent à l'exploitant, qui supporte les coûts d'investissement (réseau, échangeur de chaleur), leur maintenance ainsi que l'achat d'électricité dédiée. Ces coûts sont reportés sur le prix de l'énergie froid vendue à l'utilisateur, qui supporte toutefois les coûts liés à l'adaptation de ses installations de distribution,

2. au niveau du coût final:

- kWh_{froid}classique: son prix dépend pour partie du coût de l'électricité: le bâtiment B1 l'achète à SIG 15 cts/kWh. En se basant l'efficacité frigorifique moyenne de 4.31 de ses machines frigorifiques (voir pp. 176ss), la part du coût de l'électricité est estimée à 3.5 cts auxquels s'ajoutent environ 0.5 cts pour l'achat d'eau¹ dédiée (3.13 l/kWh_{froid}), soit un total de 4 cts/kWh_{froid}. Notons que ce coût ne tient compte ni de l'investissement ni de la maintenance des systèmes de production et de distribution,
- kWh_{froid}GLN: le prix annuel moyen n'est pas représentatif d'une utilisation optimale de la ressource lacustre. La faible valorisation de l'eau pompée induit des températures de retour pour la grande majorité inférieures à 14°C, pour lesquelles l'énergie vendue est la plus chère.

Ce type de production renouvelable n'étant que très peu documenté, un retour d'expérience sur un ou plusieurs bâtiments connectés permettrait d'établir des comparaisons solides. Néanmoins, dans le cadre d'un projet suisse similaire au réseau GLN, le coût de revient de l'énergie froid produite classiquement a été évalué sur des installations existantes (Matthey, 2011): il en ressort que la part de l'amortissement dans le coût de revient est de 6.4 cts, celui de la maintenance de 1.2 cts.

Pour le bâtiment B1, le coût de revient de l'amortissement doit probablement être plus élevé, de l'ordre de 8-12 cts/kWh, car les installations sont redondante et largement surdimensionnées. Sur cette base, le prix annuel moyen de l'énergie froid via le réseau GLN qu'il a payé (14.6 cts) doit probablement être légèrement inférieur à celui payé pour une production classique (15-20 cts, amortissement, maintenance et énergie compris).

Il n'en reste pas moins que pour l'utilisateur, le coût global de la prestation de climatisation est actuellement élevé, indéniablement supérieur à celui qu'il obtenait avant sa connexion au réseau GLN. L'expérience retirée de ses deux premières années d'approvisionnement via le réseau devrait

¹ http://www.sig-ge.ch/img/documents/pdf/tarifs_reglements/eau/tarifs/tarif_oc.pdf (février 2011)

le rassurer quant à la qualité de son approvisionnement, et lui permettre d'envisager de se départir d'une partie de sa capacité de production classique, en conservant seulement une puissance d'appoint et de sécurité qui resterait à déterminer.

9.2.6.6 Analyse du transformateur principal: l'échangeur de chaleur

A/ Caractéristiques de l'échangeur de chaleur

L'extraction de la chaleur des bâtiments vers le lac se fait par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur, ce qui permet de séparer physiquement le réseau GLN des réseaux de distribution secondaires de chaque bâtiment couplé au réseau. Pour une bonne compréhension du système, une analyse de ce composant est fondamentale dès lors que le système est soumis d'une part à de très grandes contraintes sur le niveau des températures et que, d'autre part, les puissances en jeu peuvent être importantes.

Tout d'abord, une comparaison entre les puissances horaires entrant (côté primaire) et sortant (côté secondaire) de l'échangeur montre une très bonne corrélation générale: la puissance qui y entre est en moyenne supérieure de 5 % à la puissance qui en sort (*fig. 9-30*). Par la suite, nous sélectionnerons les points avec un écart « entrée-sortie » inférieur à 10 %. Pour tout calcul utilisant la puissance échangée, nous retiendrons le côté secondaire (P_{sec}), car les mesures sont basées sur les senseurs des compteurs de chaleur (température et débit), plus fiables et précis que les autres senseurs (*cf. chap. 7.7.2*).

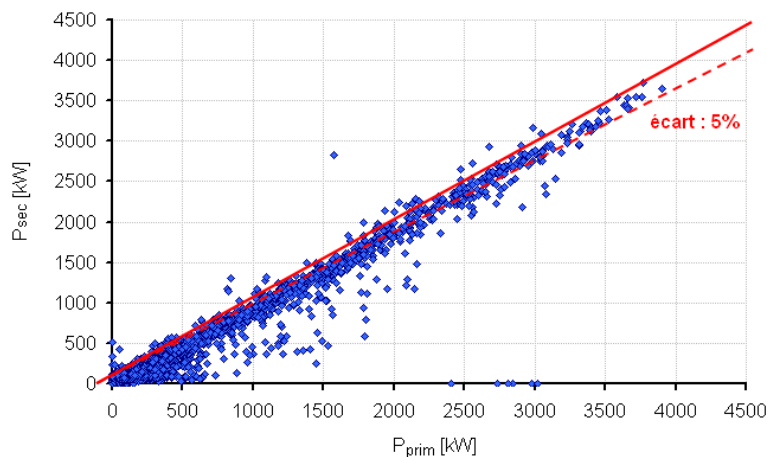


fig. 9-30 Comparaison entre la puissance d'entrée (côté primaire, 6, 9) et de sortie (côté secondaire, 7, 8) de l'échangeur du bâtiment B1; données horaires du 1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011

Parmi les très nombreuses références existantes sur la théorie des échangeurs de chaleur, nous avons choisi celle de *Morisot et Marchio (1999)*, dont nous nous inspirons fortement.

L'efficacité d'échange de chaleur ϵ est définie comme le ratio entre l'échange de chaleur effectif et l'échange maximum possible, pour des conditions de température et de débits données:

$$Q = C_{\text{prim}} \cdot (T_{\text{prim entrée}} - T_{\text{prim sortie}}) = C_{\text{sec}} \cdot (T_{\text{sortie sec}} - T_{\text{entrée sec}})$$

$$Q_{\text{max}} = C_{\text{min}} \cdot (T_{\text{max}} - T_{\text{min}})$$

$$Q = \epsilon \cdot Q_{\text{max}}$$

avec:

- C_{prim} : débit calorifique du fluide côté primaire de l'échangeur, soit le produit du débit par la chaleur spécifique du fluide [W/K],
- C_{sec} : débit calorifique du fluide côté secondaire de l'échangeur [W/K],

- $C_{\min}$: minimum entre C_{prim} et C_{sec} [W/K]. Si les fluides sont identiques (et à des températures proches), cette valeur est donnée par le plus petit des deux débits,
- Q : échange de chaleur effectif [W],
- $Q_{\max}$: échange de chaleur maximum possible [W], correspondant à un échangeur infini,
- $T_{\text{entrée prim}}$ et $T_{\text{sortie prim}}$: températures d'entrée et de sortie du côté primaire de l'échangeur [°C],
- $T_{\text{entrée sec}}$ et $T_{\text{sortie sec}}$: idem mais du côté secondaire de l'échangeur [°C],
- $T_{\max}$ et $T_{\min}$: maximum et minimum des quatre températures précédentes [°C].

Ainsi, l'efficacité de l'échangeur est définie par rapport au débit calorifique le plus faible, dont la température a tendance à rejoindre celle du débit calorifique le plus fort. Dans la mesure où le rapport des débits peut varier, comme cela est le cas sur l'échangeur de chaleur du bâtiment B1, une discontinuité apparaît à l'équilibre des débits, lorsque la valeur minimale du débit capacitif $C_{\min}$ passe d'un fluide à l'autre, c'est-à-dire du côté primaire au côté secondaire de l'échangeur.

La *fig. 9-31* montre l'efficacité de l'échangeur de la sous-station du bâtiment B1 en fonction du rapport de débit secondaire sur primaire. Comme prévu, l'efficacité est minimum à l'équilibre des débits et vaut alors environ 60 %. Elle augmente quand les débits sont déséquilibrés pour atteindre 90 % pour des débits très déséquilibrés (rapport supérieur à 4 ou inférieur à 0.25).

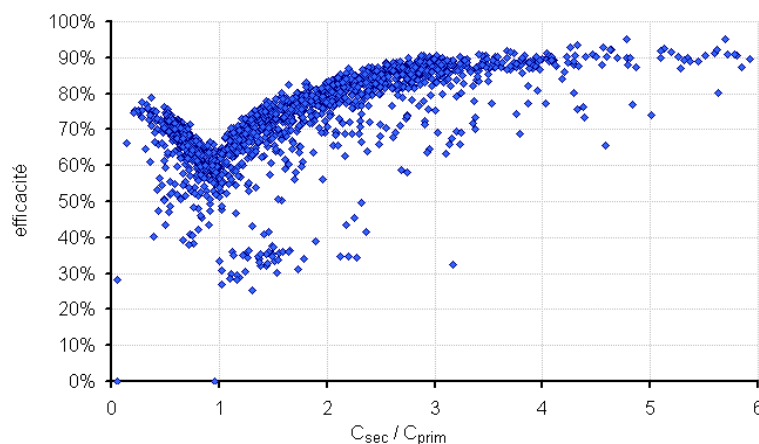


fig. 9-31 Efficacité de l'échangeur de la sous station du bâtiment B1 exprimée en fonction du rapport de débit secondaire/primaire (7/9); données horaires du 1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011

De façon générale, cette efficacité dépend de deux variables sans dimension, déterminées par les fluides en jeux ainsi que les caractéristiques physiques de l'échangeur:

$$C = C_{\min} / C_{\max}$$

$$NUT = KS / C_{\min}$$

avec:

- C : rapport de débit calorifique (nombre sans dimension, compris entre 0 et 1),
- NUT : nombre d'unité de transfert (nombre sans dimension),
- KS : facteur d'échange de l'échangeur (W/K), dépendant des fluides, de la température et des débits.

Ainsi, pour une configuration avec écoulements à contre courants, l'efficacité s'exprime de la façon suivante:

$$\varepsilon = (1 - \exp(-NUT \cdot (1 - C))) / (1 - C \cdot \exp(-NUT \cdot (1 - C)))$$

Cette relation permet de calculer le facteur d'échange KS, qui peut-être mis en relation avec le débit minimum transitant dans l'échangeur:

$$KS = C_{\min} / (1 - C) \cdot \ln((1 - \varepsilon \cdot C) / (1 - \varepsilon))$$

La corrélation excellente que l'on observe pour l'échangeur du bâtiment B1 (*fig. 9-32*) signifie que le facteur d'échange est proportionnel au débit minimum traversant l'échangeur. Ceci indique que les effets convectifs dans les fluides sont les facteurs limitant de l'échange. Ainsi, la relation entre facteur d'échange KS et débit minimum $C_{\min}$ est:

$$KS \text{ (kW)} = 1.9 C_{\min} \text{ (m}^3\text{/h)}$$

ou, en tenant compte de la chaleur spécifique de l'eau:

$$KS \text{ (kW)} = 1.65 C_{\min} \text{ (kW/K)}$$

Ceci correspond à une valeur constante de NTU de 1.65 quelque soit le débit minimum le traversant.

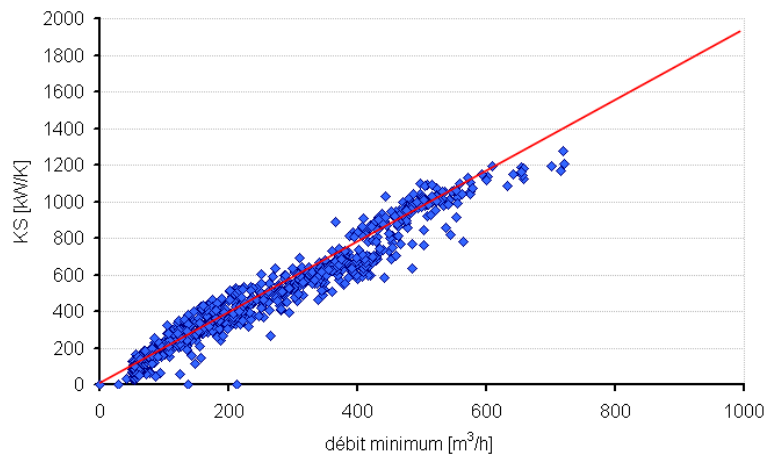


fig. 9-32 Facteur d'échange de l'échangeur de la sous-station du bâtiment B1 exprimé en fonction du débit minimum y transitant (7, 9); données horaires du 1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011

Notons finalement que la prise en compte des deux débits plutôt que du seul débit minimum n'apporte pas d'amélioration notable au modèle (analyse non présentée ici). Même si elle est plus logique physiquement, la complication apportée n'est pas justifiée pour la suite de ce travail.

B/ Fonctionnement et implications sur les débits et températures de travail

Grâce à la bonne et relativement simple caractérisation de l'échangeur de chaleur effectuée ci-dessus, on peut analyser plus en détail le fonctionnement de l'échangeur de chaleur à la sous station du bâtiment B1 et ses implications sur les débits et les températures de travail.

A cet effet, et afin de simplifier le calcul, nous utiliserons par la suite une forme linéaire des expressions dérivées ci-dessus (*fig. 9-33*). La linéarisation introduite ici est justifiée par les conditions de température observées. Une description complète logarithmique complique inutilement sans apporter de précision supplémentaire notable. Toutefois, certaines conditions limites sont très mal prises en compte par une approche linéaire, comme par exemple un très fort NTU correspondant à une forte chute de température d'un côté ou de l'autre de l'échangeur.

L'échange peut dès lors se représenter de la façon simplifiée suivante:

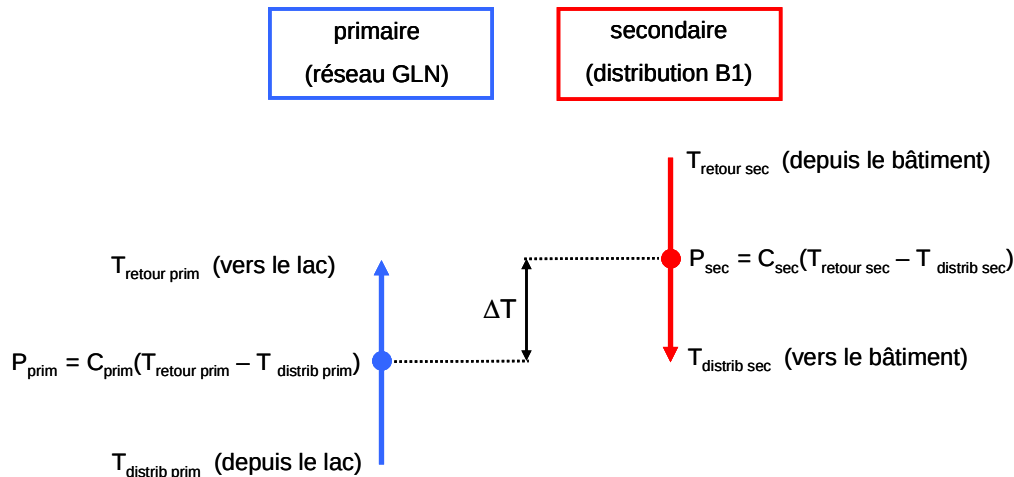


fig. 9-33 Schéma simplifié de l'échangeur

Côté primaire, l'eau du lac rentre dans l'échangeur à la température $T_{\text{distrib prim}}$ et ressort à $T_{\text{retour prim}}$. La puissance évacuée par le réseau GLN est donc:

$$P_{\text{prim}} = C_{\text{prim}} \cdot (T_{\text{retour prim}} - T_{\text{distrib prim}})$$

avec:

- C_{prim} : débit calorifique côté primaire [W/K],
- $T_{\text{distrib prim}}$: température entrée côté primaire, en provenance du lac [°C],
- $T_{\text{retour prim}}$: température sortie côté primaire, rejetée au lac [°C].

De façon symétrique, côté secondaire (bâtiment B1), le retour du bâtiment rentre dans l'échangeur à la température $T_{\text{retour sec}}$ et ressort à $T_{\text{distrib sec}}$, en principe fixée par la consigne de distribution. La puissance extraite du bâtiment B1 vaut:

$$P_{\text{sec}} = C_{\text{sec}} \cdot (T_{\text{retour sec}} - T_{\text{distrib sec}})$$

avec:

- C_{sec} : débit calorifique côté secondaire [W/K],
- $T_{\text{retour sec}}$: température entrée côté secondaire, retour bâtiment [°C],
- $T_{\text{distrib sec}}$: température sortie côté secondaire, distribution [°C].

En négligeant les effets thermiques des pertes de l'échangeur, les deux puissances sont égales. Avec l'approximation linéaire, elles correspondent à un échange entre températures moyennes du côté primaire et secondaire:

$$P_{\text{prim}} = P_{\text{sec}} = KS \cdot \Delta T$$

avec:

ΔT : écart moyen de température entre primaire et secondaire, soit:

$$\Delta T = (T_{\text{retour sec}} + T_{\text{distrib sec}})/2 - (T_{\text{distrib prim}} + T_{\text{retour prim}})/2$$

Il est dès lors possible d'analyser l'effet du choix de certains paramètres sur les autres variables du système. Etant données la température en provenance du lac ($T_{\text{distrib prim}}$), la puissance de froid à

évacuer (P_{sec}), ainsi que la température désirée/acceptée en retour du bâtiment ($T_{\text{retour sec}}$), seules une des quatre variables restante peut être fixée librement, les deux autres s'adaptant en conséquence. Ainsi, si l'on fixe la consigne de distribution ($T_{\text{distrib sec}}$), les débits secondaire et primaire ainsi que la température de rejet vers le lac ($T_{\text{retour prim}}$) s'adapteront en conséquence:

- afin de baisser la température de distribution de la boucle secondaire alimentant le bâtiment ($T_{\text{distrib sec}}$), il est nécessaire de ralentir le débit du secondaire, afin d'en augmenter la chute de température,
- pour conserver la puissance échangée, il faut en parallèle augmenter le débit dans le primaire afin d'en baisser la température et d'assurer ainsi un écart de température suffisant entre primaire et secondaire. Cet effet sera renforcé par le fait que le facteur d'échange KS diminue avec le débit minimum – ici au secondaire,
- on a donc un système qui peut devenir instable: si une température de distribution ($T_{\text{distrib sec}}$) trop proche de celle de la ressource ($T_{\text{distrib prim}}$) est demandée par l'utilisateur (bâtiment), le débit du primaire va fortement augmenter, pour un gain d'échange de plus en plus marginal.

Ce fonctionnement est confirmé par les mesures sur le bâtiment B1. Sur la *fig. 9-34*, le rapport entre les débits primaire et secondaire a été tracé en fonction des écarts de températures relatifs (par rapport à l'écart maximal $\Delta T_{\text{max}} = T_{\text{retour bâtiment}} - T_{\text{ressource réseau GLN}}$):

- côté primaire (réseau GLN):

$$\Delta T_{\text{prim}} / \Delta T_{\text{max}} = (T_{\text{retour prim}} - T_{\text{distrib prim}}) / (T_{\text{retour sec}} - T_{\text{distrib prim}})$$
- côté secondaire (bâtiment B1):

$$\Delta T_{\text{sec}} / \Delta T_{\text{max}} = (T_{\text{retour sec}} - T_{\text{distrib sec}}) / (T_{\text{retour sec}} - T_{\text{distrib prim}})$$

Ces écarts de température relatifs varient entre zéro et un. Pour une puissance donnée, une valeur proche de zéro (écart nul) correspond à un débit de fluide élevé, alors qu'une valeur proche de 1 (écart maximal possible) correspond à un débit faible.

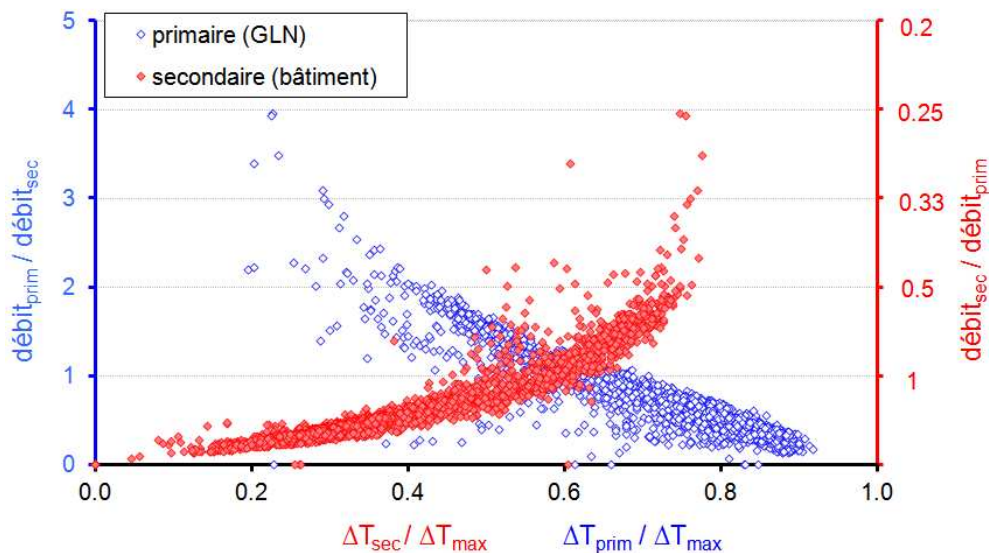


fig. 9-34 Relation entre écarts de température réduits et rapport de débits pour l'échangeur du bâtiment B1; données horaires du 1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011

Comme on peut le voir, si les débits sont les mêmes (rapport de 1 sur les axes verticaux), les écarts de température côté primaire et secondaire sont identiques (*fig. 9-34*): 0.6, soit la valeur minimale de l'efficacité de l'échangeur (*fig. 9-31*). Si on déséquilibre les débits en favorisant le primaire (points avec une valeur plus grande que 1 sur l'axe vertical), on diminue le réchauffement relatif

côté primaire et, par la même, on augmente l'écart de température côté secondaire (la distribution dans le bâtiment s'approche de la température de la ressource GLN). L'effet inverse est visible pour les rapports de débits plus petits que 1 (points avec une valeur plus petite que 1 sur l'axe vertical gauche).

Ainsi, pour diminuer la température de distribution, il faut augmenter le débit primaire. Dès que l'on veut atteindre ou dépasser 75 % de l'écart possible dans le secondaire, le débit dans le primaire – côté GLN – diverge vers de grandes valeurs de débits, avec de moins en moins d'effet sur la température de distribution.

Ce modèle peut également être utilisé en valeur absolue, pour ces valeurs spécifiques. Ainsi, pour une puissance frigorifique de 2'500 kW, une température de la ressource à l'entrée de la sous-station de 8°C (température de distribution primaire disponible) et une température de retour du bâtiment fixée à 15°C ($T_{\text{retour sec}}$), le choix de la température de distribution secondaire affecte directement les débits primaires et secondaires (fig. 9-35) ainsi que la température de rejet sur le retour du réseau GLN ($T_{\text{retour prim}}$):

- l'égalité des débits (460 m³/h) se fait pour une consigne de 10.5°C, soit un écart de température de 4.5°C sur les 7°C disponibles et possibles (efficacité d'environ 60 %). Ce même écart est reporté sur le côté primaire (rejet sur le retour du réseau GLN à 12.5°C),
- une consigne fixée à une température supérieure, à 13°C, va amener à plus que doubler le débit de distribution secondaire (côté bâtiment) et à un peu ralentir le débit côté primaire. A un écart de température de 2°C côté secondaire va correspondre un écart de 6°C côté primaire (température de rejet sur le réseau GLN de 14°C).

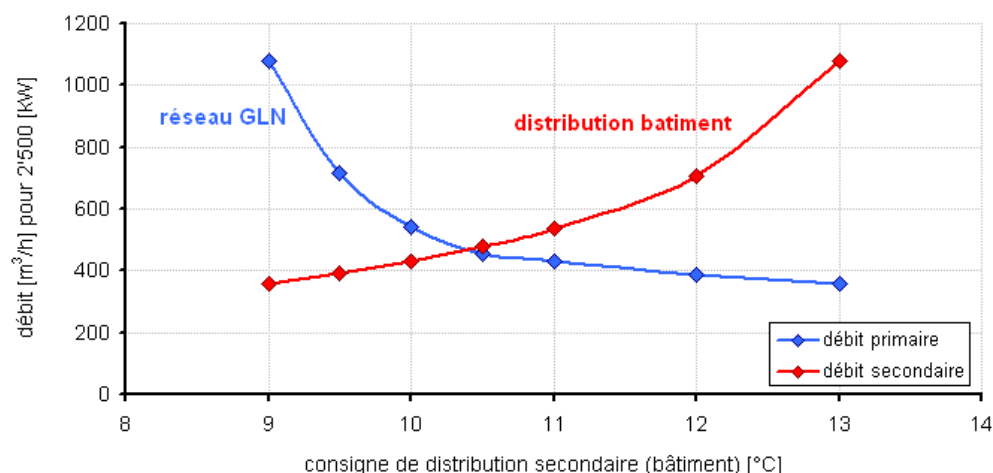


fig. 9-35 Simulation de l'échangeur de chaleur: expression des débits primaire (9) et secondaire (7) pour obtenir 2'500 kW_{froid} selon la température de consigne secondaire désirée (axe horizontal), avec une température de distribution primaire fixe de 8°C ($T_{\text{distrib prim}}$, 6) et une température de retour du bâtiment fixe de 15°C ($T_{\text{retour sec}}$, 8)

C/ Implications sur la valorisation de la ressource lacustre

De manière à utiliser au mieux la ressource lacustre, l'augmentation de température côté primaire de l'échangeur de chaleur doit être maximale: cela signifie que pour une puissance frigorifique donnée, le débit côté primaire doit être le plus faible possible. Ceci n'est pas automatiquement compatible avec un fort écart de température côté secondaire (utilisateur). Le compromis se trouve *a priori* quand les débits sont comparables. L'analyse du fonctionnement de ce système et surtout de son utilisation a mis en lumière qu'il y a un conflit entre quantité d'énergie renouvelable utilisée et qualité d'utilisation de la ressource; autrement dit, les objectifs et intérêts de l'exploitant du réseau et de l'utilisateur (bâtiment connecté) doivent trouver un point de convergence de manière à satisfaire ces deux parties. Ces aspects non-techniques dépassent le cadre de cette étude mais doivent impérativement être pris en compte dans le processus d'optimisation de la connexion.

Pour cela, cette dernière section illustre le bilan en débits et températures de travail, du côté primaire et secondaire de l'échangeur. La *fig. 9-36* retrace les débits en fonction de la puissance, en valeurs horaires. Le *tableau 9-6* donne la valeur annuelle moyenne des débits et des écarts de température entre retour et distribution. Les moyennes sont calculées en valeur horaire simple, ainsi que pondérées par l'énergie. Finalement, la *fig. 9-37* représente les fréquences de répartition (en heure et en énergie) des écarts de température (entre retour et distribution) et des températures de retour.

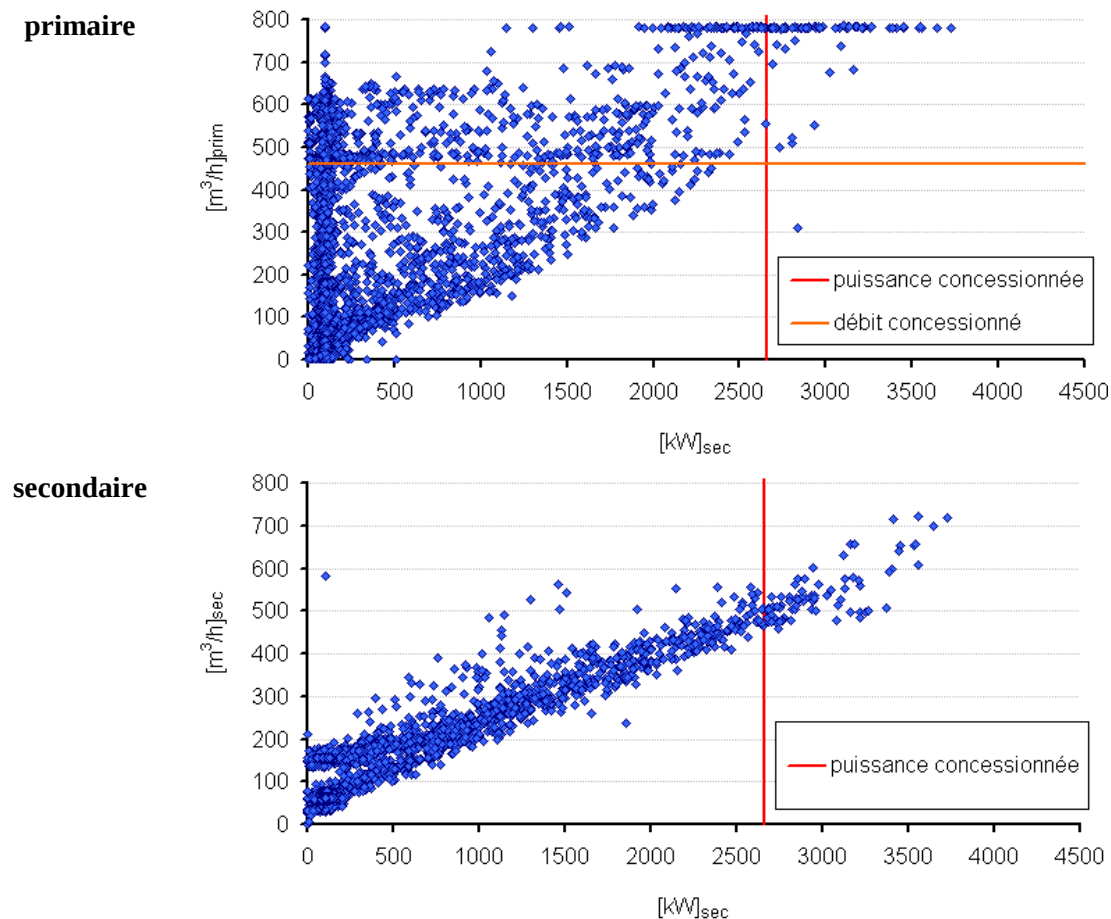


fig. 9-36 Débits primaire (9) et secondaire (7) en fonction de la puissance exprimée du côté secondaire de l'échangeur; données horaires du 1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011

	concession (primaire)	primaire	secondaire	primaire _{pondéré}	secondaire _{pondéré}
débit _{moyen}	459	152	98	97	133
ΔT_{moyen}	5 (planifié)	2.9	1.6	3.3	3.1

tableau 9-6 Débits et ΔT moyens (primaire et secondaire) pondérés et non-pondérés par l'énergie lorsque le débit $\neq 0$; données horaires du 1^{er} avril au 31 mars 2011

Au niveau du secondaire:

- le débit est régulé linéairement en fonction de la puissance, avec un débit résiduel à faible puissance (*fig. 9-36*). La majorité de l'énergie étant délivrée à faible puissance (ruban), la moyenne annuelle horaire (en fonctionnement) est de 98 m³/h, alors que la moyenne pondérée par l'énergie de 133 m³/h (*tableau 9-6*),
- ainsi que nous l'avons vu précédemment (*cf. chap. 9.2.6.4*), le débit résiduel induit un différentiel de température qui chute fortement à faible puissance. Ainsi, la moyenne

annuelle horaire (en fonctionnement) est de 1.6°C, alors que la moyenne pondérée par l'énergie de 3.1°C.

Au niveau du primaire:

- étant donné le fonctionnement de l'échangeur décrit ci-dessus, l'appel de débit primaire n'est pas directement corrélé à l'appel de puissance et par la même au débit secondaire (*fig. 9-36*). Afin de maintenir la consigne de température imposée au départ du secondaire, l'appel de débit primaire est au contraire régulièrement supérieur au débit secondaire. Alors que la puissance concessionnée n'est dépassée que pendant 80 heures, le débit concessionné est quant à lui très régulièrement dépassé, même à faible puissance,
- la majorité de l'énergie étant délivrée à faible puissance (ruban), la moyenne annuelle horaire (en fonctionnement) de 152 m³/h se situe cependant en dessous de la valeur concessionnée, de même que la moyenne pondérée par l'énergie de 97 m³/h (*tableau 9-6*). Au niveau de l'écart de température entre retour et distribution, la moyenne annuelle horaire (en fonctionnement) est de 2.9°C, contre 3.3°C en valeur pondérée. La valorisation de la ressource est donc bien plus faible que prévue (5°C) et ne pourra être augmentée qu'en agissant parallèlement sur le réseau de distribution secondaire du bâtiment B1.

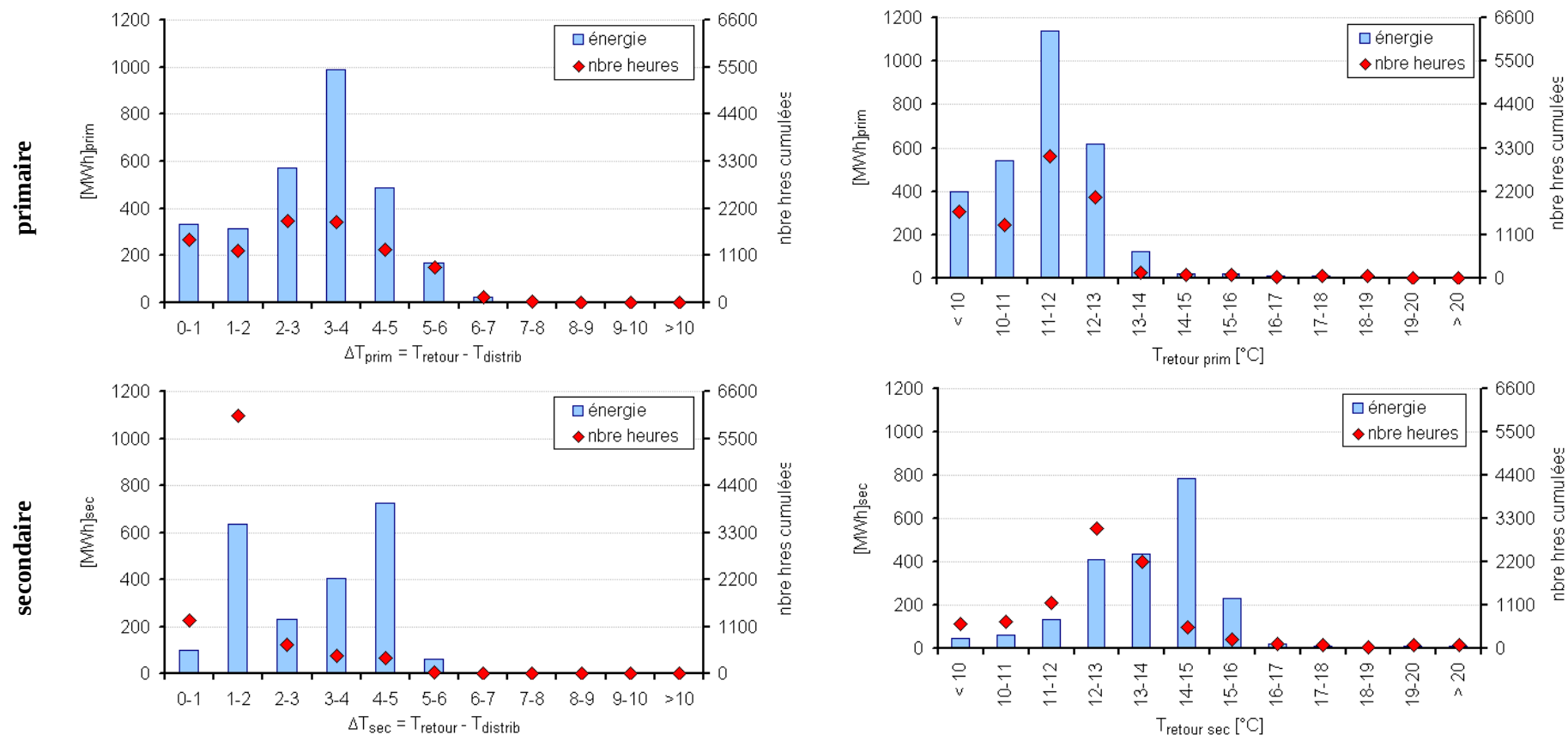


fig. 9-37 Bilan d'énergie exprimés en fonction de l'écart de température entre retour (9 et 8) et distribution (6 et 7) et par niveau de température de retour (respectivement primaires et secondaires); données horaires du 1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011

9.2.6.7 Prestation de ruban nocturne: via GLN ou machine frigorifique ?

Pour le datacenter du bâtiment E, l'approvisionnement est assuré jour et nuit via le réseau GLN. Pour le datacenter du bâtiment A et le bâtiment de l'entrée principale, deux scénarios d'approvisionnement sont actuellement envisagés par les services techniques du bâtiment B1:

1. utilisation 100 % via le réseau GLN (pratiquée jusqu'au 9 juin 2010),
2. utilisation via le réseau GLN en journée et via une machine frigorifique la nuit et le week-end (pratiquée à partir du 9 juin 2010).

Sur la base de la demande frigorifique de ruban constatée avant le 9 juin 2010, soit environ 50 kW pour le bâtiment A et d'environ 60 kW pour le bâtiment E (tableau 9-7), les scénarios sont les suivants:

	[MWh] _{froid}		CHF GLN	CHF MF ¹	CHF TOTAL
	via GLN	via MF			
scénario 1 T _{retour} < 14 °C	964	0	101'000	0	101'000
scénario 1 T _{retour} > 16 °C			87'000		87'000
scénario 2 T _{retour} < 14 °C	682	282	72'000	11'000	83'000
scénario 2 T _{retour} > 16 °C			62'000		73'000

tableau 9-7 Scénarios d'approvisionnement pour le datacenter du bâtiments A et l'entrée principale du bâtiment B1; estimation des coûts induits

Il en ressort clairement que si l'approvisionnement est effectué à 100 % via le réseau GLN pour les bâtiments A et E, il est nécessaire d'augmenter au maximum les températures de retour pour que la prestation soit financièrement rentable.

Sans une utilisation optimale du réseau GLN, le coût annuel du scénario 1 resterait en effet environ 20 % plus élevé que celui du scénario 2. Si les températures de retour sont suffisamment élevées, le surcoût du scénario 1 est de 5 % par rapport au scénario 2; les frais d'entretien et de maintenance de la machine frigorifique n'étant pas inclus dans le scénario 2, le système GLN devient de ce point de vue favorable.

9.2.7 Discussion et synthèse

Techniquement, le système GLN peut être qualifié de « low tech » et de simple, même si la mise en place d'un tel réseau demande une excellente maîtrise d'œuvre et n'est certainement pas aussi simple qu'il n'apparaît de prime abord. A cet égard, l'innovation de GLN réside principalement dans les deux aspects suivants:

- il n'est pas dédié à un utilisateur, si bien que toute l'énergie doit-être vendue. Les aspects commerciaux sont décisifs: problèmes de tarification, image verte du projet, liens déjà établis par SIG pour la distribution des autres fluides, etc.,
- la température de distribution du froid n'est pas contrôlée, puisqu'il n'existe pas de système de correction (machine de froid). On dépend donc directement des caprices de la nature, ce qui est contraignant pour tout ce qui concerne les aspects de valorisation: il s'agit en fait d'un produit

¹ Hypothèses (voir pp. 176ss): EER = 4.31, coût de l'électricité = 15 cts/kWh, coût de l'eau = 0.5 cts/m³; les coûts de maintenance et d'investissement ne sont pas pris en compte

nouveau, donc encore mal défini, dont l'appropriation par les divers acteurs n'est pas aussi évidente que pour des systèmes classiques.

L'analyse de la première année de fonctionnement de la connexion GLN-bâtiment B1 permet donc à la fois de vérifier le bon fonctionnement du système, mais aussi de dessiner des pistes d'optimisation pour les deux partenaires (exploitant et bâtiment(s) connecté(s)). A cet égard, cette analyse permet de tirer les conclusions suivantes:

Au niveau de la demande thermique du bâtiment B1:

- durant cette première année de fonctionnement, la demande de froid (2.15 GWh) a été entièrement couverte via le réseau GLN; la machine de froid connectée au réseau n'a été utilisée que durant quelques heures, lors d'opérations de maintenance. Le réseau GLN a donc substitué les machines de froid de façon satisfaisante,
- au niveau des appels de puissance, la demande de froid ruban (130 kW) ne représente que 3 % de la puissance de pointe, mais couvre 40 % de la demande annuelle en énergie ! La puissance concessionnée (2.66 MW) couvre 99 % de la demande annuelle en énergie. Pour les 1 % restant, des appels de pointe jusqu'à 3.72 MW ont ponctuellement eu lieu durant cette première année de fonctionnement,

Au niveau d'autres indicateurs liée à la prestation de froid:

- au niveau du confort, des mesures de température avant et après connexion au réseau GLN montrent que la substitution de l'approvisionnement a permis de conserver le même niveau de prestation. Ceci confirme que le système GLN fourni une prestation de froid de qualité équivalente à un système de production de froid classique,
- au niveau électrique, une économie globale de 924 MWh a été relevée pour le site du bâtiment B1 suite à la mise en service de GLN. Si d'autres facteurs ont pu contribuer à cette diminution (renouvellement de matériel informatique et éclairages plus efficaces), on peut estimer entre 600 et 900 MWh par an l'économie induite par la connexion au réseau,
- au niveau financier, le coût annuel de l'énergie froid achetée par le bâtiment B1 sur le réseau GLN est de 14.6 cts/kWh: la part variable y contribue pour deux tiers (10.2 cts), la part constante pour un tiers (4.4 cts). Dans la mesure où les services techniques du bâtiment ont décidé de conserver intégralement leurs machines frigorifiques, récemment rénovées, le coût global de la prestation de climatisation est indéniablement supérieur à celui qu'ils obtenaient avant la connexion au réseau GLN,

Au niveau de possibles optimisations (pour le bâtiment B1 ou le cas plus général de réseaux ou connexions futures):

- au niveau de la gestion de la puissance de pointe, un appel limité à 50 % de la puissance concessionnée (35 % de la puissance de pointe observée) permettrait de couvrir aux alentours de 85 % de la demande d'énergie annuelle. Au niveau de la gestion globale du système, cela pose la question du bien-fondé d'une couverture à 100 % des appels de pointes via le réseau GLN, qui réduit la valorisation complète de la ressource à une période très courte, et limite l'accès à la ressource pour d'autres bâtiments potentiellement connectables. Cela est particulièrement vrai pour les bâtiments existants déjà connectés, car les machines de froid installées pourraient suppléer à l'appel de puissance de pointe, éventuellement même en injection sur le réseau (mutualisation),
- au niveau du réseau secondaire (boucle de distribution du froid dans le bâtiment), une optimisation de la régulation en lien avec la connexion au réseau GLN pourrait amener une diminution considérable de l'appel de débit sur le réseau GLN, avec à la clé un avantage à la fois

pour l'exploitant du réseau (réduction de la puissance de pompage, respectivement libération de débit pour d'autres preneurs) et pour les bâtiments connectés (réduction du coût de la prestation). L'analyse du fonctionnement de l'échangeur de chaleur fournit à cet égard des pistes intéressantes. L'utilisation de deux échangeurs en cascade – un premier dimensionné pour la puissance ruban, un second pour la puissance de confort – permettrait certainement de mieux gérer l'appel de débit sur le réseau GLN.

Cette analyse fouillée a clairement mis en évidence la nécessité d'un travail en commun entre l'exploitant du réseau et ses utilisateurs. Ce travail, qui doit commencer bien en amont de la connexion du bâtiment (audit et dimensionnement), devrait être poursuivi durant les premières années d'exploitation, car c'est au cours de cette période cruciale que l'optimisation de la régulation peut s'opérer par tâtonnement et de manière progressive année après année. Cette stratégie pragmatique d'accompagnement de l'utilisateur dans sa démarche de connexion nous paraît un passage obligé pour optimiser la qualité de l'échange thermique aux coûts minimums.

Le réseau devrait arriver à sa pleine capacité d'ici 2015. D'ici là, nous recommandons vivement l'établissement de collaborations étroites entre l'exploitant, les utilisateurs et partenaires académiques: durant cette période d'apprentissage, il y a en effet encore beaucoup de points à comprendre et de problématiques nouvelles à résoudre, d'autant plus que chaque bâtiment connecté a ses spécificités, et porte avec lui le poids de ses années. Bien que les potentiels d'optimisation y soient importants, l'optimisation d'installations existantes est en effet bien plus ardue que celle de systèmes neufs.

9.2.7.1 Principe d'une régulation alternative

Le principe actuel de la régulation, basé sur les niveaux de température de la consigne de distribution, montre ses limites (débit primaire appelé supérieur au débit concessionné, valorisation non-optimale de l'eau pompée, etc.). Un principe de régulation alternatif qui s'appuie à la fois sur la quantité et la qualité de l'énergie pourrait être envisagé pour ce type de système. Pour cela, l'appel de débit primaire serait prioritairement consigné sur la température de retour secondaire, en lieu et place de la température de distribution secondaire.

La *fig. 9-38* illustre les principes d'une telle régulation, qui permettrait de mieux valoriser l'eau pompée tout en garantissant une prestation de qualité. Pour cela, la température de consigne est fixée quels que soient les besoins, mais devrait être adaptée en fonction de la saison et jour/nuit:

1. lorsque la température de distribution primaire disponible est inférieure à celle de la consigne de distribution secondaire, le débit appelé devrait être consigné sur la température de retour secondaire (ou le ΔT_{sec}). Dans ces conditions, seul le réseau GLN est utilisé, jusqu'à un débit équivalent au débit concessionné,
2. lorsque la température de distribution primaire disponible devient supérieure à celle de la consigne de distribution secondaire et que le débit primaire atteint le débit concessionné, il est préférable de recourir à une machine frigorifique, de manière à conserver l'écart de température exploité sur le réseau GLN (ΔT_{sec}) aussi haut que possible.

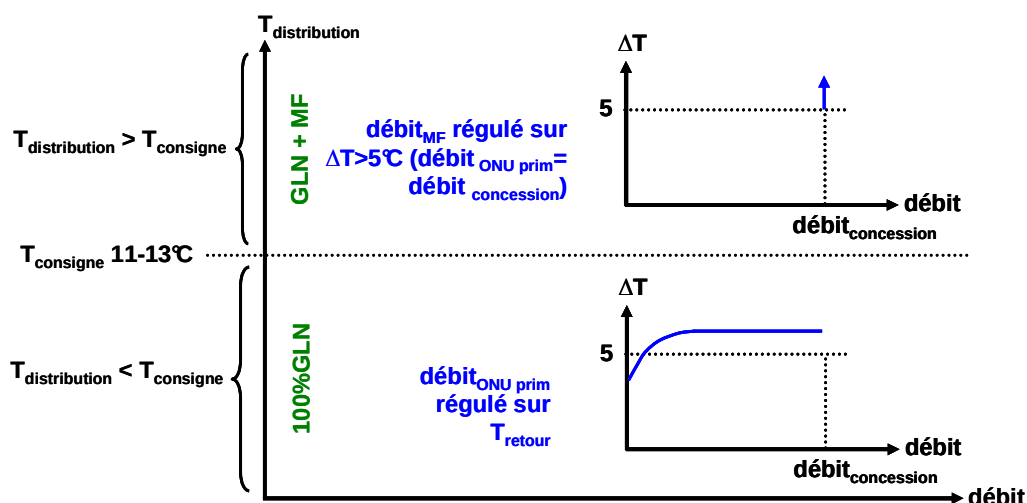


fig. 9-38 Principe de régulation envisageable

Ce principe permet de maximiser l'énergie renouvelable soutirée via le réseau GLN (aspect quantitatif), tout en permettant d'abaisser les niveaux de température de distribution via une machine frigorifique lorsque la demande de froid s'intensifie fortement (aspect qualitatif). De cette manière, ce principe de régulation alternatif permet de garantir la prestation tout en valorisant au maximum l'eau pompée (avantage exploitant) et en minimisant le coût de l'énergie froid (avantage utilisateur).

Bien entendu, cela doit nécessairement être discuté avec les services techniques du bâtiment concerné, de manière à déterminer quelles sont les opportunités réelles de la mise en place d'une telle régulation, cela d'autant plus que ces principes sont en rupture avec la philosophie qui sous-tend les modes de régulation généralement en vigueur.

9.3 Bâtiments connectés

Pour la seconde année de fonctionnement du réseau GLN (1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011), quatre bâtiments sont connectés (B1, B2, B3 et B4). La connexion du bâtiment B1 ayant été étudiée en détail, seuls les bilans d'énergie froid et les aspects principaux susceptibles d'optimiser leur connexion sont explicités ci-dessous. De plus, l'impact de la connexion au réseau GLN sur leurs consommations d'électricité et d'eau potable est évalué (analyse de l'évolution entre 2005 et 2010).

9.3.1 Fourniture d'énergie froid via le réseau GLN

L'évolution des puissances de froid des bâtiments B1, B2 et B3 suivent les mêmes profils, avec une demande qui augmente avec la température extérieure (fig. 9-42, fig. 9-43, fig. 9-44), typique d'une demande de froid confort. Pour ces trois bâtiments, l'activité administrative et conférencière est importante et largement prépondérante sur la demande de froid ruban (fig. 9-40, fig. 9-41):

- **B1 et B3:** les demandes de froid ruban contribuent une puissance correspondant généralement à moins de 5 % des puissances maximums appelées; par contre, cette prestation de ruban représente respectivement environ 40 et 30 % de l'énergie consommée,
- **B2:** il n'y a pas de demande de froid ruban. L'approvisionnement en énergie froid confort n'est donc effective qu'environ 3'000 heures durant l'année.

En revanche, la demande de froid du bâtiment B4 n'est que de type ruban (fig. 9-44). La demande de froid s'effectue à une puissance faible et constante tout au long de l'année: le profil des courbes de charge (énergie et puissance) est quasi linéaire (fig. 9-40).

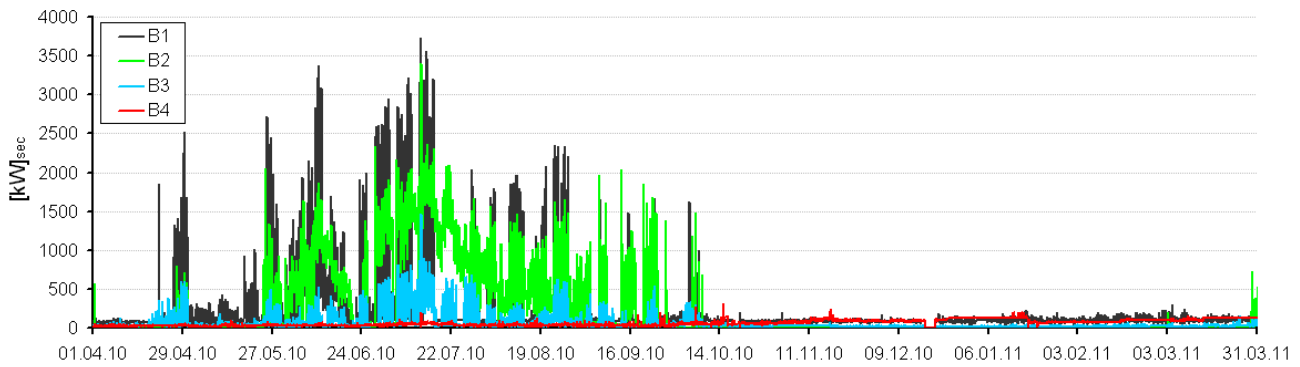


fig. 9-39 Puissance de froid des bâtiments connectés (secondaire, 7, 8); données horaires du 1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011

Pour les quatre bâtiments, l'énergie consommée est inférieure aux valeurs planifiées (1'250 heures de fonctionnement équivalentes à puissance nominale et $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$) (fig. 9-40, fig. 9-41, tableau 9-10):

- **B1:**

- l'énergie consommée représente environ 80 % de la consommation planifiée. Ses courbes de charge montrent que la puissance concessionnée ne couvre que 70 % de la puissance maximum appelée; par contre, en excluant la demande de pointe, elle couvre entièrement la demande de confort, ce qui indique un dimensionnement (débit concessionné) d'un ordre de grandeur *a priori* satisfaisant,
- un certain nombre d'améliorations reste toutefois réalisables (cf. chap. 9.2),

- **B2:**

- comme pour le bâtiment B1, l'énergie consommée représente environ 80 % de la consommation planifiée. En revanche, ses courbes de charge montrent que la puissance concessionnée est bien supérieure à la puissance maximum appelée et pourrait être abaissée de 17 % sans aucune perte de prestation sur tout le domaine des puissances appelées,
- compte tenu de la manière peu optimale dont est utilisé le réseau GLN (ΔT_{sec} faible, recours ponctuel aux machines frigorifiques en juillet 2010), un abaissement supplémentaire de l'ordre de 10-20 % pourrait être raisonnablement envisagé¹: en excluant la demande de pointe qui pourrait être couverte par une machine frigorifique de faible puissance, il permettrait à la fois de couvrir entièrement la demande de confort et de libérer du débit primaire sur le réseau GLN pour d'autres preneurs, d'autant plus que le nombre d'heures d'utilisation est relativement faible (pas de consommation hivernale),
- les installations de distribution secondaires sont relativement anciennes et complexes (modifications successives et partielles depuis les années 1970, sans vue d'ensemble). Si l'on voulait valoriser plus efficacement l'eau pompée via le réseau GLN, des pompes à débit variable et un système de récupération de l'air vicié intérieur devraient être installés. Dans ces conditions, la connexion au réseau ferait beaucoup plus de sens pour l'optimisation du système dans son ensemble,

- **B3:**

- l'énergie consommée représente seulement 50 % de la consommation planifiée. Cette valeur particulièrement basse s'explique par deux faits: premièrement, la demande de froid liée à son activité confériencière n'est qu'épisodique et souvent à charge partielle; deuxièmement,

¹ Sans optimisation. Si l'échange d'énergie était optimisé (augmentation du ΔT), la marge de réduction serait encore plus importante

ses courbes de charge montrent que la puissance concessionnée est très supérieure à la puissance maximum appelée,

- compte tenu de la manière peu optimale dont est utilisé le réseau GLN et du surdimensionnement important du débit concessionné, un abaissement de l'ordre de 40 % de la puissance concessionnée semblerait raisonnable, cela sans péjorer les prestations de ruban et de confort. Comme pour le bâtiment B2, cela permettrait à la fois de libérer du débit primaire sur le réseau GLN pour d'autres preneurs et de baisser les coûts de connexion de cet utilisateur,
- notons encore que la valorisation de l'eau pompée est meilleure que pour les trois autres bâtiments ($\Delta T_{\text{sec}} = 3.3^{\circ}\text{C}$, non-pondéré par le débit).

- B4:

- l'énergie consommée représente moins de 50 % de la consommation planifiée et ses courbes de charge montrent que la puissance concessionnée est plus du triple de la puissance maximum appelée,
- le bâtiment B4, en réalité composé de plusieurs bâtiments, est actuellement en pleine restructuration, tant au niveau de ses bâtiments que de ses installations techniques: il est pour le moment difficile de juger du fonctionnement de sa connexion au réseau GLN. En effet, le débit concessionné auprès de l'exploitant tient compte de la demande à terme de l'ensemble des bâtiments du site,
- la très faible valorisation actuelle de l'eau pompée via le réseau GLN ($\Delta T_{\text{sec}} = 1.1^{\circ}\text{C}$, non-pondéré par le débit) est liée au fait que les pompes de distribution de la boucle secondaire fonctionnent en permanence à leur débit seuil: en effet, elles sont dimensionnées en prévision de la demande nominale qui va croître ces prochaines années.

Globalement, les conclusions qui ressortent de l'analyse détaillée du bâtiment B1 (*cf. chap. 9.2*) sont aussi valables pour les trois autres bâtiments connectés. En ce qui concerne l'accroissement des écarts de température utilisés (ΔT_{sec}) par augmentation des températures de retour, mais également la gestion des débits de distribution (contraintes liées à la nature des pompes: limite supérieure du débit seuil, débit fixe vs variable), les défis liés à la connexion d'installations de climatisation existantes à un réseau hydrothermique sont sensiblement les mêmes.

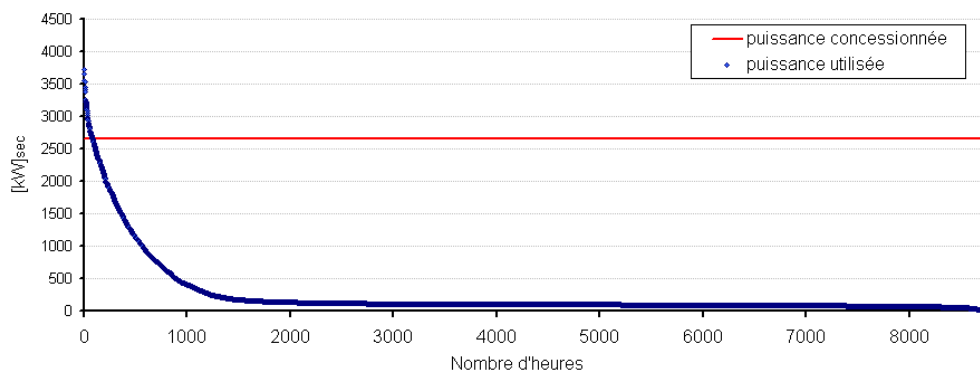
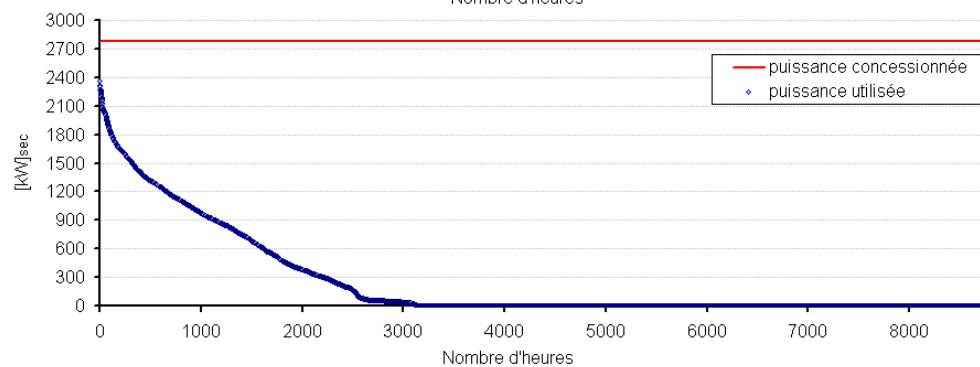
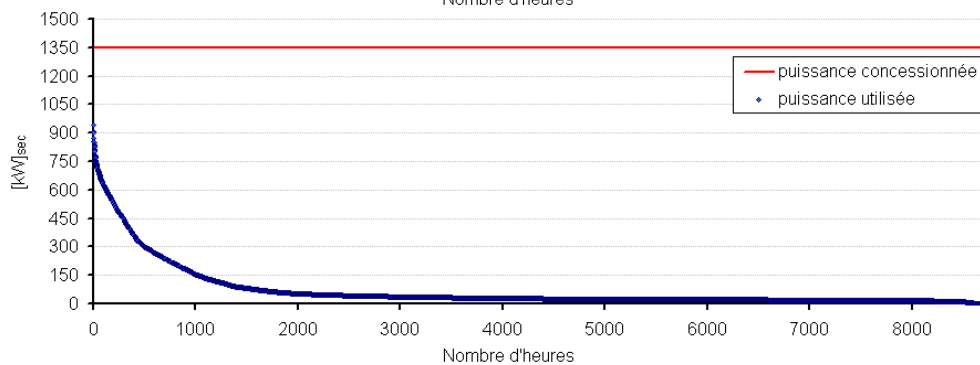
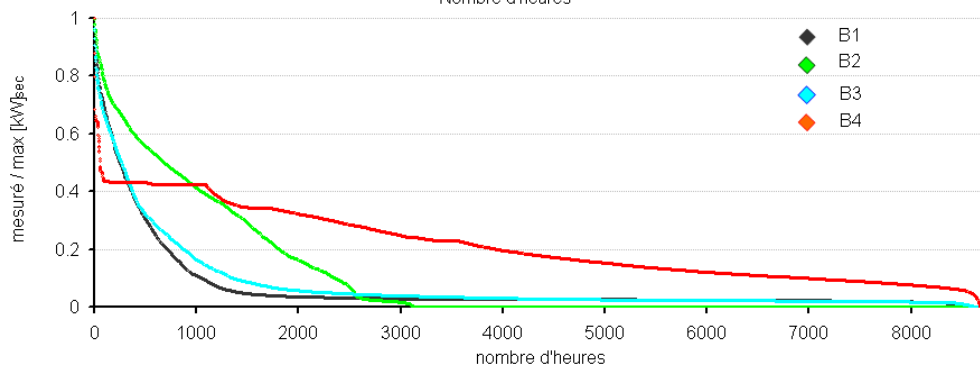
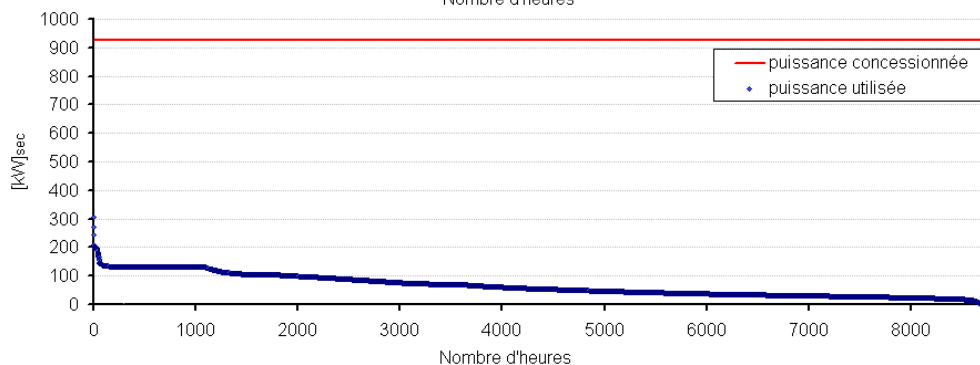
B1**B2****B3****B4**

fig. 9-40 Courbes de charge froid des bâtiments B1, B2, B3 et B4 et rapports des courbes de charge de ces quatre bâtiments (en bas); données horaires du 1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011

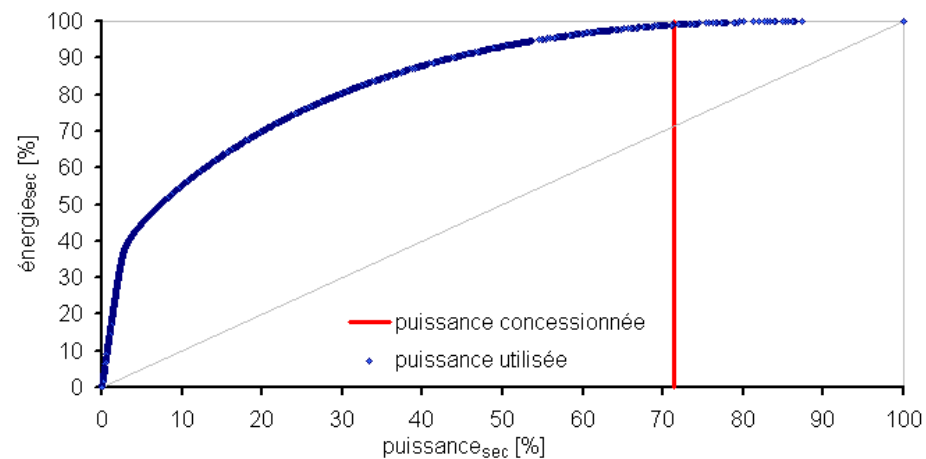
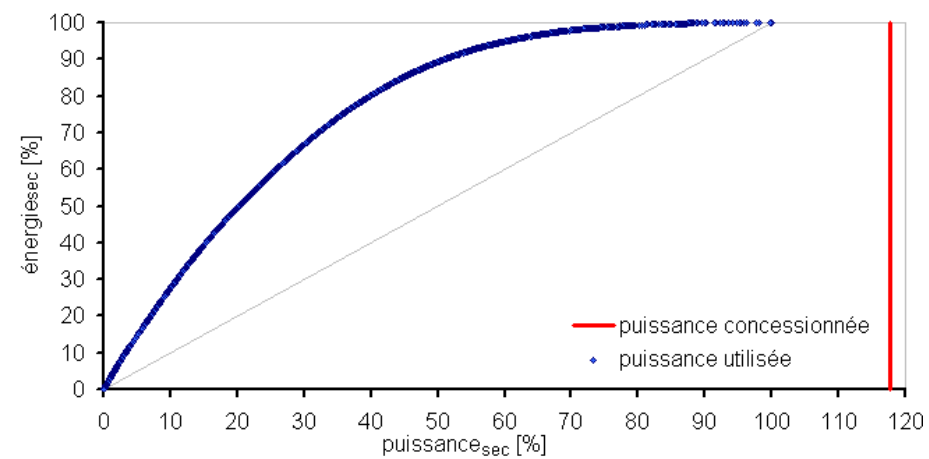
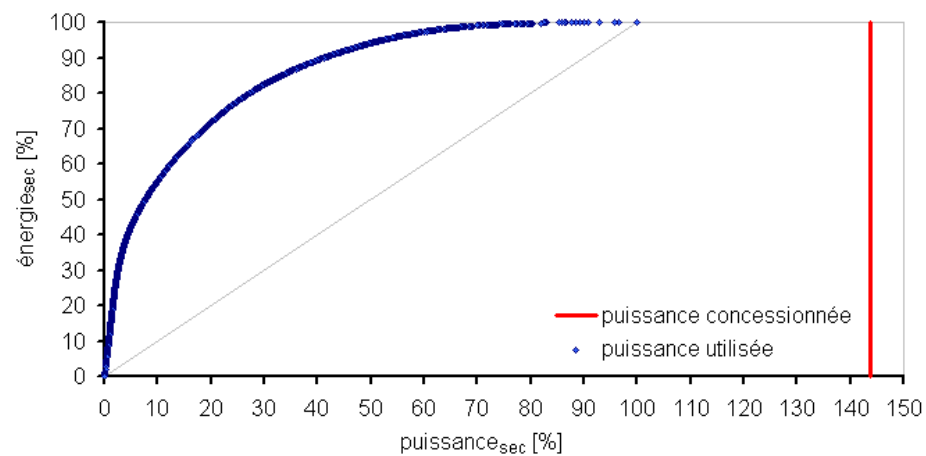
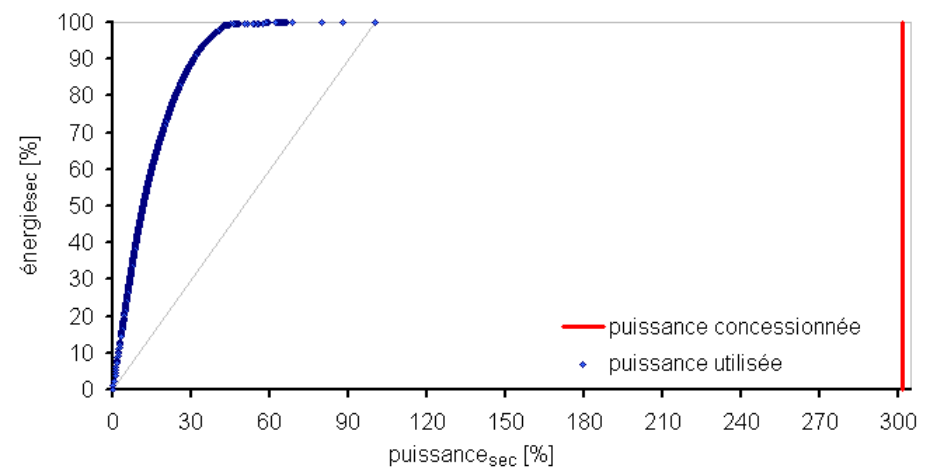
B1**B2****B3****B4**

fig. 9-41 Relation puissance relative – énergie relative (secondaire); données horaires du 1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011

B2

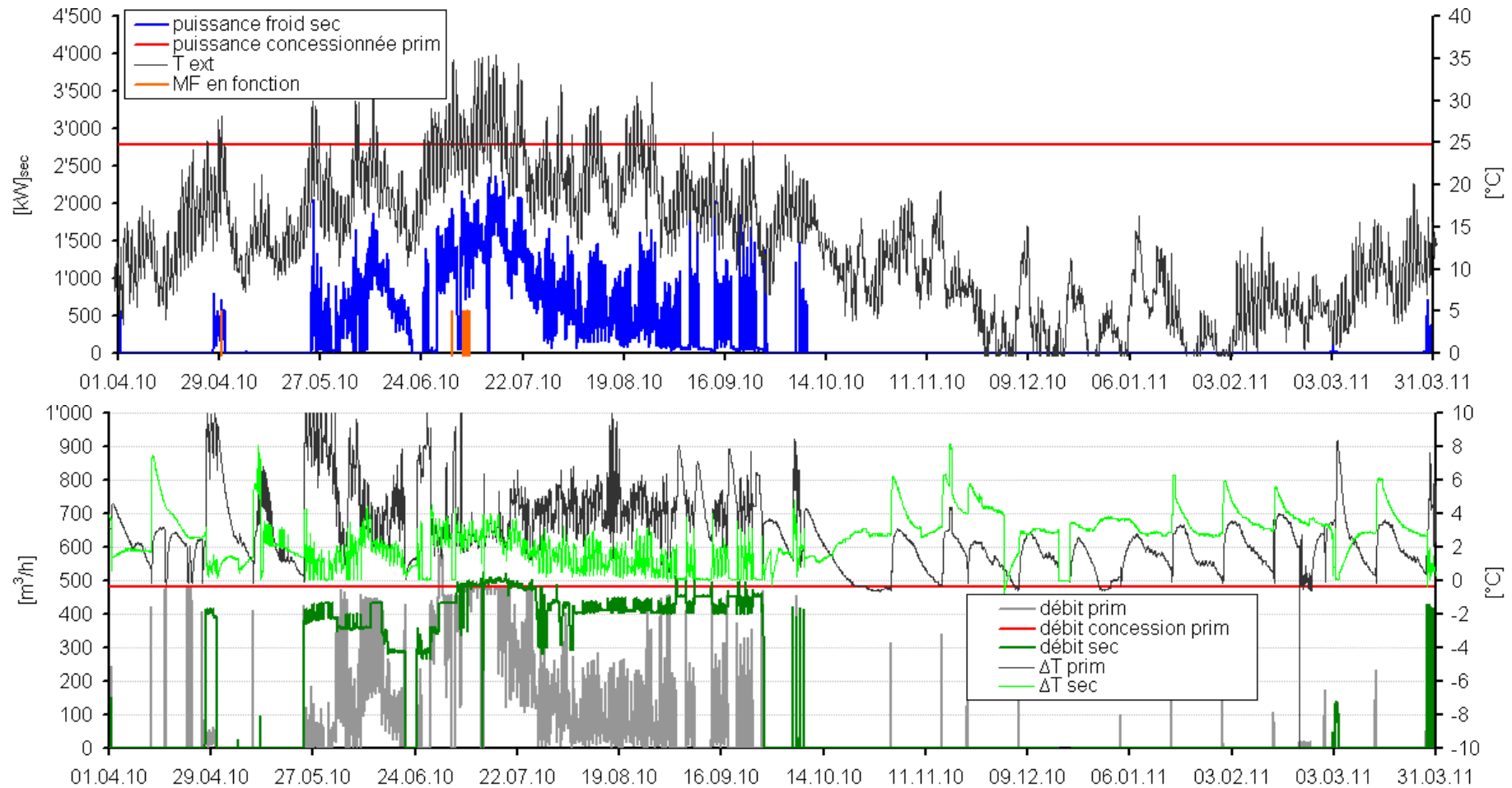


fig. 9-42 Puissance de froid et fonctionnement des machines frigorifiques connectées au réseau (en haut), débits et écarts de température entre retour et distribution des côtés primaires (ΔT_{prim} , 9, 6) et secondaires (ΔT_{sec} , 8, 7) de l'échangeur de chaleur (en bas); données horaires du bâtiment B2 du 1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011

B3

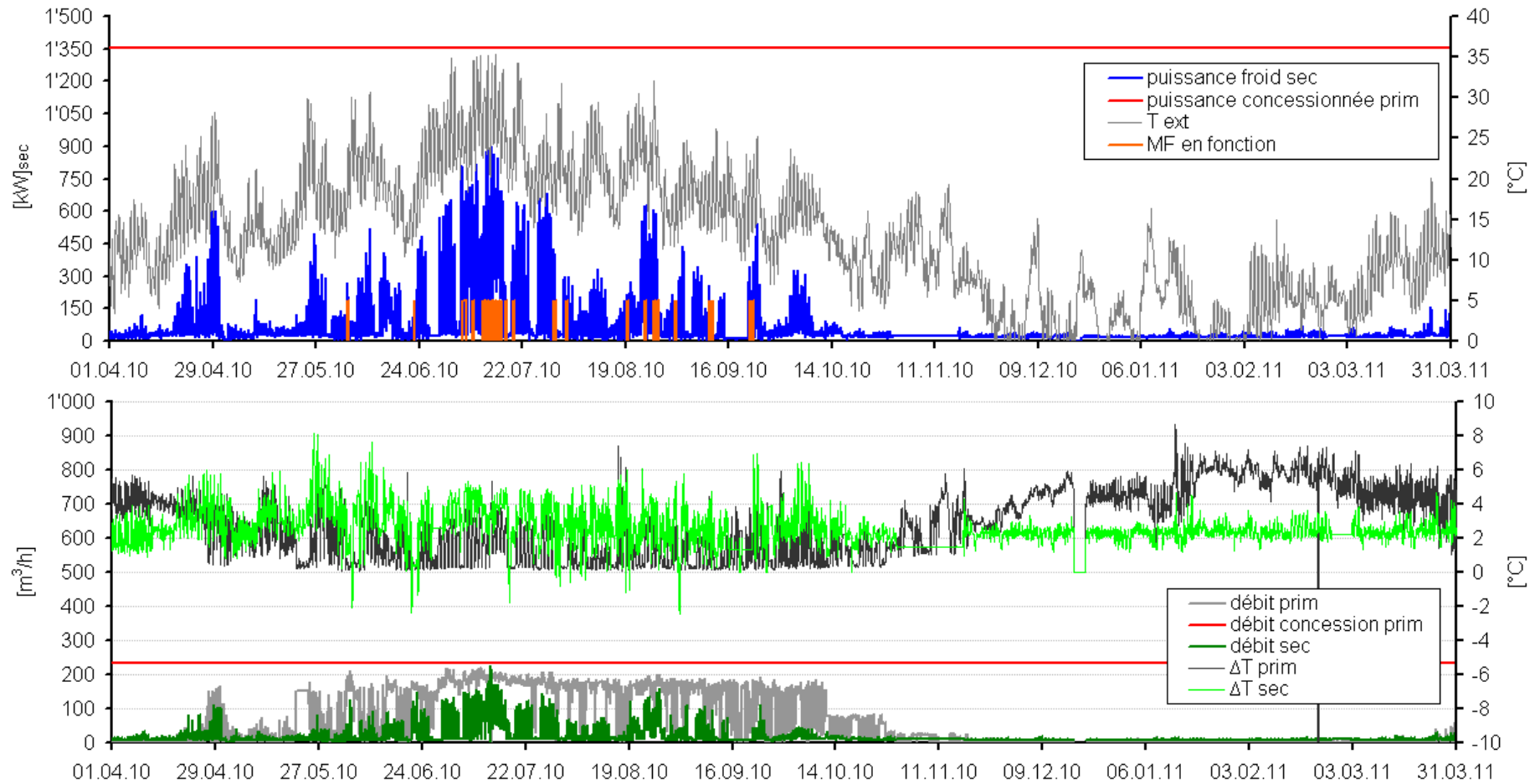


fig. 9-43 Puissance de froid et fonctionnement des machines frigorifiques connectées au réseau (en haut), débits et écarts de température entre retour et distribution des côtés primaires (ΔT_{prim} , 9, 6) et secondaires (ΔT_{sec} , 8, 7) de l'échangeur de chaleur (en bas); données horaires du bâtiment B3 du 1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011

B4

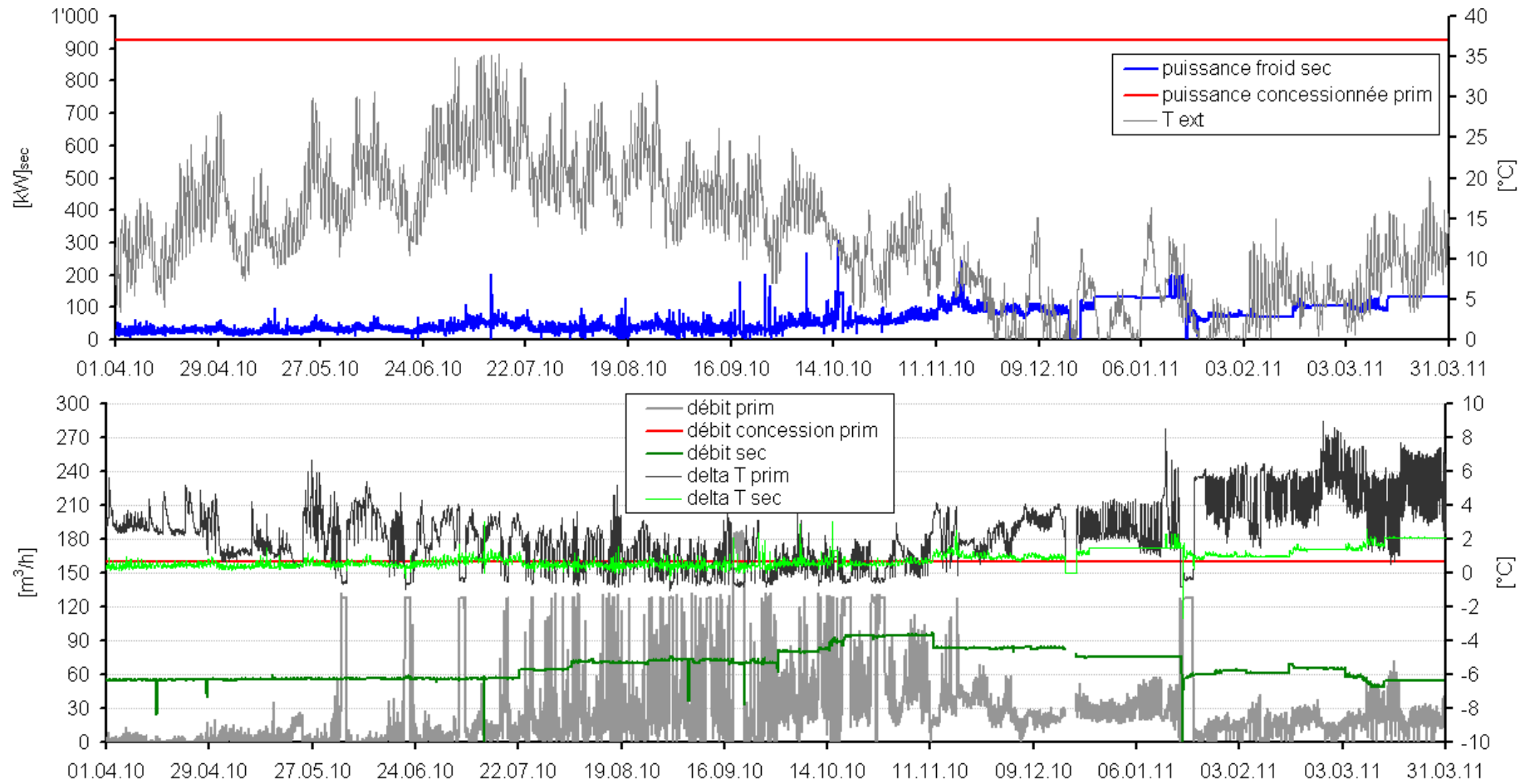


fig. 9-44 Puissance de froid et fonctionnement des machines frigorifiques connectées au réseau (en haut), débits et écarts des températures entre retour et distribution des côtés primaires (ΔT_{prim} , 9, 6) et secondaires (ΔT_{sec} , 8, 7) de l'échangeur de chaleur (en bas); données horaires du bâtiment B4 du 1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011

9.3.2 Evolution des consommations d'électricité et d'eau potable

A/ Electricité

Les consommations d'électricité sont mesurées par SIG du 1^{er} octobre au 30 septembre de l'année suivante et ont été collectées pour tous les bâtiments du quartier de 2006 à 2011. Pour chacun d'eux, un compteur comptabilise la globalité de la consommation, sans distinction d'usage.

Au niveau du quartier (tel que défini à la *fig. 6-8*), la consommation d'électricité a augmenté de 2006 à 2008 et est liée à l'implantation d'importants nouveaux bâtiments (p. ex. Merck-Serono). Depuis, elle semble se stabiliser aux environs de 110 GWh/an (*Viquerat et al., 2011b; tableau 9-8*).

La mise en place du réseau GLN a une influence certaine sur cette stabilisation de la consommation. En effet, la consommation de trois des quatre bâtiments connectés (B1, B2 et B3) a clairement diminué (entre 7 et 11 %) et ils représentent à eux seuls environ 23 % de la consommation du quartier. A eux quatre, ils représentent une diminution globale de 1'328 MWh_{él}/an. Ces prochaines années, la connexion d'autres grands bâtiments administratifs devrait permettre une diminution supplémentaire au niveau du quartier, car les bâtiments prospectés par l'exploitant représentent plus des trois quarts de la consommation du quartier (*Viquerat et al., 2011a, b*).

La consommation du bâtiment B4 a augmenté de 23 %, mais n'a aucun rapport avec sa connexion au réseau GLN: c'est l'adjonction de nouveaux bâtiments et une forte augmentation des emplois sur le site qui en sont responsables (*Viquerat et al., 2011a*).

	unité	B1	B2	B3	B4	quartier
moyenne 06-10	GWh_{él}	13.6 ± 0.2	10.1 ± 0.5	3.6 ± 0.5	3 ± 0.4	100 ± 8
2011		12.7	9.4	3.2	3.7	110
variation %		- 7	- 7	- 11	+23	+ 9
moyenne 06-10	kWh_{él}/m²	41 ± 1	58 ± 3	127 ± 14	88 ± 15	
2011		38	54	113	113	

tableau 9-8 Evolution des consommations annuelles d'électricité du quartier et des bâtiments connectés au réseau; données annuelles de 2006 à 2011

Bien qu'ayant été analysés, les indices de dépense en électricité ne sont pas fournis, car leur incertitude est bien trop importante: d'une part, les surfaces de référence ne sont pas comptabilisées de la même manière pour tous les bâtiments, et d'autre part la consommation d'électricité spécifique à la climatisation (production et/ou distribution) n'est pas connue.

Comme explicité dans l'étude détaillée du bâtiment B1 (*cf. chap. 9.2.6.2*), l'économie de la consommation de 924 MWh_{él} est en partie liée à sa connexion au réseau GLN, cela malgré de nouveaux besoins de climatisation (datacenters). Etant donné que les performances des machines frigorifiques respectives des bâtiments B2 et B3 ne sont pas connues, il n'est pas possible d'évaluer l'impact de la connexion au réseau sur la diminution de leur consommation électrique. Toutefois, si l'on prend en compte les mêmes hypothèses que pour le bâtiment B1 (*voir ci-dessus*), la diminution de leurs consommations électriques serait plus importante que celle liée à leur seule connexion au réseau: comme pour le bâtiment B1, cette diminution est probablement liée à d'autres facteurs qui s'y additionnent (efficacité énergétique, campagnes d'informations, etc.).

Au niveau global du réseau GLN, une comparaison complète de l'électricité épargnée n'est actuellement pas possible, du fait de son régime de mise en route. Tous les bâtiments ne sont pas connectés et un apprentissage est nécessaire afin d'augmenter ses performances énergétiques: son efficacité frigorifique n'était que de 6.8 au cours de sa deuxième année d'exploitation (*cf. chap. 9.4.1.3*). Cette valeur devrait sensiblement augmenter et pourrait à terme atteindre des valeurs voisines de 20, comme dans les rares systèmes similaires existants à travers le monde. Une telle analyse n'aura de sens que quand le système aura atteint son régime de croisière. Ces

diminutions de consommations sont encourageantes mais elles devront être confirmées ces prochaines années.

A/ Eau potable

La consommation d'eau potable est mesurée par SIG du 1^{er} octobre au 30 septembre de l'année suivante et a également été collectée pour tous les bâtiments du quartier de 2006 à 2011. De la même manière que pour l'électricité, un compteur comptabilise pour chacun d'eux la consommation globale, sans distinction d'usage.

Au niveau du quartier (tel que défini à la *fig. 6-8*), la consommation d'eau potable a diminué d'environ 14 % depuis 2006¹ (*tableau 9-9*) malgré l'implantation de nouveaux gros consommateurs (p. ex. Merck-Serono avec une consommation d'environ 35'000 m³/an). Sur cette diminution totale de 150'000 m³, la diminution de consommation des quatre bâtiments connectés au réseau GLN a une influence notable: la diminution totale de trois d'entre eux (B1, B2 et B3) en représente près de la moitié (env. 70'000 m³); l'autre moitié est essentiellement liée à la diminution de l'eau potable d'arrosage du Jardin Botanique de la Ville de Genève (piquage sur les eaux de retour du réseau), cela malgré le fait que 2010 ait été une année plus sèche que la moyenne des quatre précédentes (*fig. 9-45*).

La consommation du bâtiment B4 a augmenté de 14 %, mais n'a aucun rapport avec sa connexion au réseau GLN: c'est l'adjonction de nouveaux bâtiments et une forte augmentation des emplois sur son site qui en sont responsables (*Viquerat et al., 2011a*).

m ³ · 1'000	B1	B2	B3	B4	quartier	pluviométrie
moyenne 06-10	157 ± 22	83 ± 9	12 ± 2	18 ± 4	1'068 ± 40	1'029 ± 122
2011	134	47	1.5	20	918	812
variation %	- 15	- 44	- 87	+ 14	- 14	-21

tableau 9-9 Evolution des consommations annuelles d'eau potable du quartier et des bâtiments connectés au réseau GLN; pluviométrie; données annuelles de 2006 à 2011 (octobre-septembre)

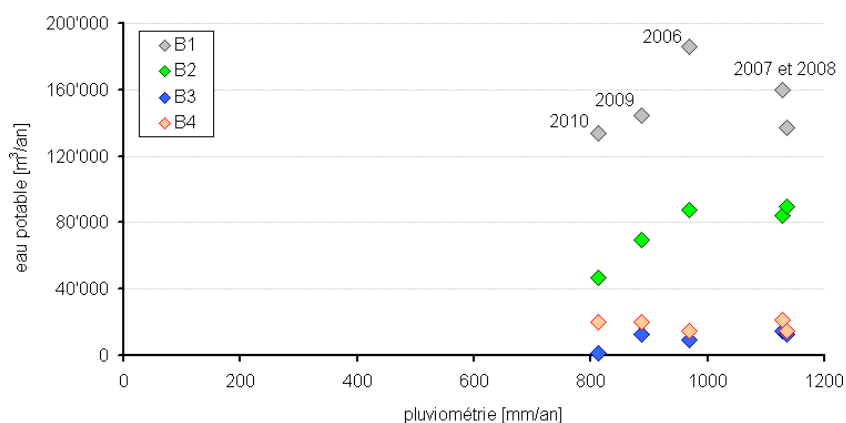


fig. 9-45 Consommation d'eau potable de 2006 à 2010 exprimée en fonction de la pluviométrie pour les quatre bâtiments connectés au réseau GLN; moyenne annuelle

Pour les bâtiments connectés, rappelons qu'outre la fourniture d'énergie froid qui permet de se départir des tours aéro-réfrigérées, l'eau du réseau peut être valorisée pour l'arrosage de leurs larges espaces verts. Pour les bâtiments B1, B2 et B3, l'arrosage ne semble pas être la principale cause de la diminution d'eau potable, car malgré le fait que 2010 soit une année plus sèche que la moyenne des quatre précédentes, la consommation d'eau potable est en diminution depuis 2006. Bien que les

¹ Par comparaison de l'année 2011 avec la moyenne des années 2006 à 2010 (*Viquerat et al., 2011b*)

usages ne peuvent pas être distingués, cette diminution sensible est probablement liée à des efforts d'économie entrepris à différents niveaux par les services techniques de ces bâtiments, mais aussi à la connexion au réseau GLN via la suppression des tours aéro-réfrigérées.

Pour les bâtiments B1, B2 et B3, la suppression de ces installations gourmandes en eau contribue de la manière suivante à leur diminution globale de 70'000 m³:

- **B1**: elles y contribuent pour environ un tiers: une consommation d'eau des tours aéro-réfrigérées installées d'environ 3.13 l/kWh_{froid}, relativement importante¹, a été estimée par les services techniques du bâtiment B1: sur cette base, l'économie directement réalisée est estimée à environ 7'000 m³/an durant la deuxième année d'approvisionnement en énergie froid via le réseau GLN, auxquels s'ajoutent 16'000 m³/an supplémentaires liés à d'importants efforts consentis par les usagers du bâtiment²,
- **B2**: la situation est à peu près identique à celle du bâtiment B1, sauf que les besoins en arrosage sont bien plus importants (environ 30'000 m³/an),
- **B3**: l'économie réalisée, très importante (87 %), est à mettre sur le compte de la suppression des tours aéro-réfrigérées, une activité conférencière probablement bien plus faible que les années précédentes, ainsi qu'une meilleure gestion de l'eau potable.

Ces prochaines années, la connexion d'autres grands bâtiments administratifs devrait permettre une diminution encore plus importante au niveau du quartier, car les bâtiments prospectés (pour la connexion) représentent plus de la moitié de la consommation en eau du quartier (Viquerat et al., 2011a, b). Ces diminutions, encourageantes, devront également être confirmées.

9.3.3 Bilans et comparaison avec les objectifs initiaux

Pour cette année, environ 5.6 GWh_{froid} ont été délivrés (*tableau 9-10*) aux quatre bâtiments connectés. Comparées aux objectifs à moyen terme que s'était fixés l'exploitant dans son plan financier en 2008, les quantités d'énergie froid délivrées en 2010 sont entre 20 et 50 % en dessous des ventes planifiées (*cf. chap. 9.4.2*). Cela s'explique en partie par le fait que le dimensionnement des puissances concessionnées n'est pas adéquat. La régulation du réseau primaire et des réseaux de distribution secondaire (niveaux de température) des bâtiments connectés constitue également une raison à ces écarts (p. ex. en recourant à une production additionnelle via une machine frigorifique): les raisons de ces écarts sont expliquées au *chapitre 9.3.1* et de manière particulièrement approfondie pour le bâtiment B1 au *chapitre 9.2*.

¹ Selon les sources, la consommation d'eau des tours aéro-réfrigérées varie: un modèle développé par l'Ecole des Mines de Paris l'estime en moyenne à 1.4 l/kWh_{froid} (Marchio et al., 2001)

² Mesures techniques prises sur le réseau de distribution, campagnes de sensibilisation aux usagers (PNUE, 2010)

	B1	B2	B3	B4	Σ
$T_{\text{retour}}^{\circ\text{C}}$	2.58 MW _{souscrit} 3.72 MW _{max mesuré}	2.70 MW _{souscrit} 2.36 MW _{max mesuré}	1.35 MW _{souscrit} 0.94 MW _{max mesuré}	0.93 MW _{souscrit} 0.15 MW _{max mesuré}	MWh
< 14	1087	726	208	522	2'543
14-15	783	966	290	11	2'050
15-16	231	321	87	18	657
16-17	20	36	18	0	74
17-18	9	89	5	5	110
18-19	4	18	3	5	30
19-20	10	22	1	8	41
> 20	9	60	8	4	83
MWh vendus	2'153	2'238	624	573	5'588
planifiés	2'580	2'700	1'350	930	7'120
ΔT_{prim} moyen	2.9°C	2.9°C	2°C	2.4°C	2.9°C
ΔT_{prim} moyen pondéré avec MWh vendus	3.3°C	4.5°C	3.3°C	5.3°C	3.2°C
ΔT_{sec} moyen	1.6°C	2.4°C	2.5°C	0.8°C	2.5°C
ΔT_{sec} moyen pondéré avec MWh vendus	3.1°C	2.3°C	3.6°C	1.1°C	2.6°C
hrs équivalent P _{souscrit}	810 h	829 h	476 h	636 h	

tableau 9-10 Bilan énergétique des bâtiments connectés du 1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011

Malgré le fait que les objectifs en termes d'énergie froid délivrée ne soient pas atteints, il faut noter que la diminution de la consommation d'électricité de trois bâtiments (B1, B2 et B3) parmi les quatre connectés est importante (*tableau 9-11*). Tous usages confondus, leur diminution de consommation est plus du double que celle qui serait évitée par une production classique d'énergie froid (valeur calculée). Ce transfert productif via leur connexion au réseau GLN contribue à environ 50 % de leur réduction globale de consommation électrique. De ce point de vue, l'impact de ce système productif renouvelable est très positif.

La consommation totale d'eau potable de trois bâtiments (B1, B2 et B3) parmi les quatre connectés a également diminué de manière significative et représente une économie d'environ 7 % à l'échelle du quartier. En s'appuyant sur une consommation d'eau potable des tours aéroréfrigérées de l'ordre de 1.5-3 l/kWh_{froid} (*Marchio et al., 2001*), l'économie directe est estimée à environ 8'500 m³/an. Ce transfert productif contribue à environ 10 % de la réduction globale de la consommation d'eau de ces bâtiments: comme expliqué dans le chapitre précédent, la part majoritaire de ces économies est liée à des mesures techniques prises sur les réseaux de distribution des bâtiments et à des campagnes de sensibilisation destinées aux usagers (*PNUE, 2010*).

EER _{réseau} / EER _{MF} ¹	électricité MWh _{él} /an		eau potable	émissions de CO ₂
	calculé	mesuré (consommation totale B1+B2+B3)	m ³	tonne CO ₂ équ ²
6.8 / 3	935 ³	2'000	70'000	610

tableau 9-11 Economies réalisées grâce à la substitution des machines frigorifiques par le réseau GLN pour la production de froid pour les bâtiments B1, B2 et B3 (1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011)

¹ L'efficacité frigorifique d'une machine frigorifique a été mesurée par les services techniques du bâtiment B1 pendant une semaine en continu (EER-machine, distribution et tous aéro-réfrigérées non-comprises)

² Liée à la consommation d'électricité: facteur européen = 500 g CO₂ équ/kWh_{él}

³ Mesuré pour les bâtiments connectés au réseau sur la base d'un EER_{MF} dynamique moyen = 3

9.4 Réseau

Pour la deuxième année de fonctionnement, les puissances concessionnées des quatre bâtiments connectés représentent environ 50 % de la capacité nominale du réseau GLN. Cela dit, l'analyse présentée ci-dessous n'est pas représentative du fonctionnement du réseau à sa pleine capacité. Elle a toutefois le mérite de mettre en évidence ses potentialités et les possibilités d'optimisation liées à des modes d'utilisation alternatifs: valorisation énergie vs matière, énergie chaud vs froid, prestations ruban vs confort pour l'énergie froid.

Basée sur le modèle financier développé par l'exploitant, l'étude économique montre que les marges de rentabilité de ce type d'installation énergétique (innovante et lourde en termes d'investissement) sont minces. Cet équilibre financier fragile met en évidence qu'un système de ce type nécessite d'être exploité de manière optimale et diversifiée.

Sur la base de ces analyses, des critères fondamentaux de faisabilité ont été établis pour ce type de système hydrothermique: ils sont repris et détaillés dans le *chapitre 10.2.3*.

9.4.1 Aspects énergétiques et environnementaux

Pour cette analyse, deux périodes sont prises en compte:

- 1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011: évolution des puissances et des températures de travail, efficacité frigorifique (EER) et simultanéité,
- 5 au 11 juillet 2010 (*fig. 9-46*): les diagrammes de Sankey (niveaux de température et énergie) sont étudiés sur une semaine estivale typique d'une forte demande de froid.

9.4.1.1 Evolution des puissances de froid et températures de travail

L'évolution de la puissance de froid du réseau primaire comprend la chaleur évacuée par les quatre bâtiments connectés (*fig. 9-46*), ainsi que les gains de chaleur provenant des échanges thermiques¹ entre le réseau terrestre et le sol avoisinant.

Comme attendu, la demande de froid augmente de manière considérable avec la température extérieure (prestations de confort et de ruban). En hiver, la demande est constante et relativement faible (prestation de ruban uniquement): elle augmente toutefois sensiblement à partir du mois de janvier 2011, car des bâtiments supplémentaires ont été connectés en début d'année (HCR, OMPI et un bâtiment supplémentaire pour le bâtiment B4).

La température de distribution primaire du réseau GLN (mesuré à la station pompage) varie fortement, entre 5 et 18-20°C: la majorité d'entre elles sont comprises entre 5 et 10°C. Lorsque la demande de froid est la plus importante, le niveau de température de distribution est généralement satisfaisant, de l'ordre de 8°C.

La température de retour atteint des niveaux maximums de 13-14 °C et correspond en général à d'importants écarts de température sur le réseau primaire ($\Delta T_{\text{GLN}} = T_{\text{retour GLN}} - T_{\text{distrib GLN}}$), de l'ordre de 4-5°C lorsque la demande de froid globale est importante. Malgré le fait que la température de retour représente le cumul de la chaleur rejetée par les quatre bâtiments connectés, et qu'il soit de ce fait difficile de distinguer leurs influences respectives, on observe malgré tout une diminution claire des niveaux de la température de retour pour des charges plus faibles. Globalement, la valorisation de l'eau pompée (ΔT_{GLN}) est moins bonne à faibles charges. Cela a une influence directe sur l'efficacité énergétique du réseau (*cf. chap. 9.4.1.3*).

¹ Un système de mesure permettant de quantifier les échanges thermiques entre les conduites du réseau et le sol a été mis en place mais les données n'ont pas été analysées dans le cadre de ce travail. Il est détaillé à l'annexe 4

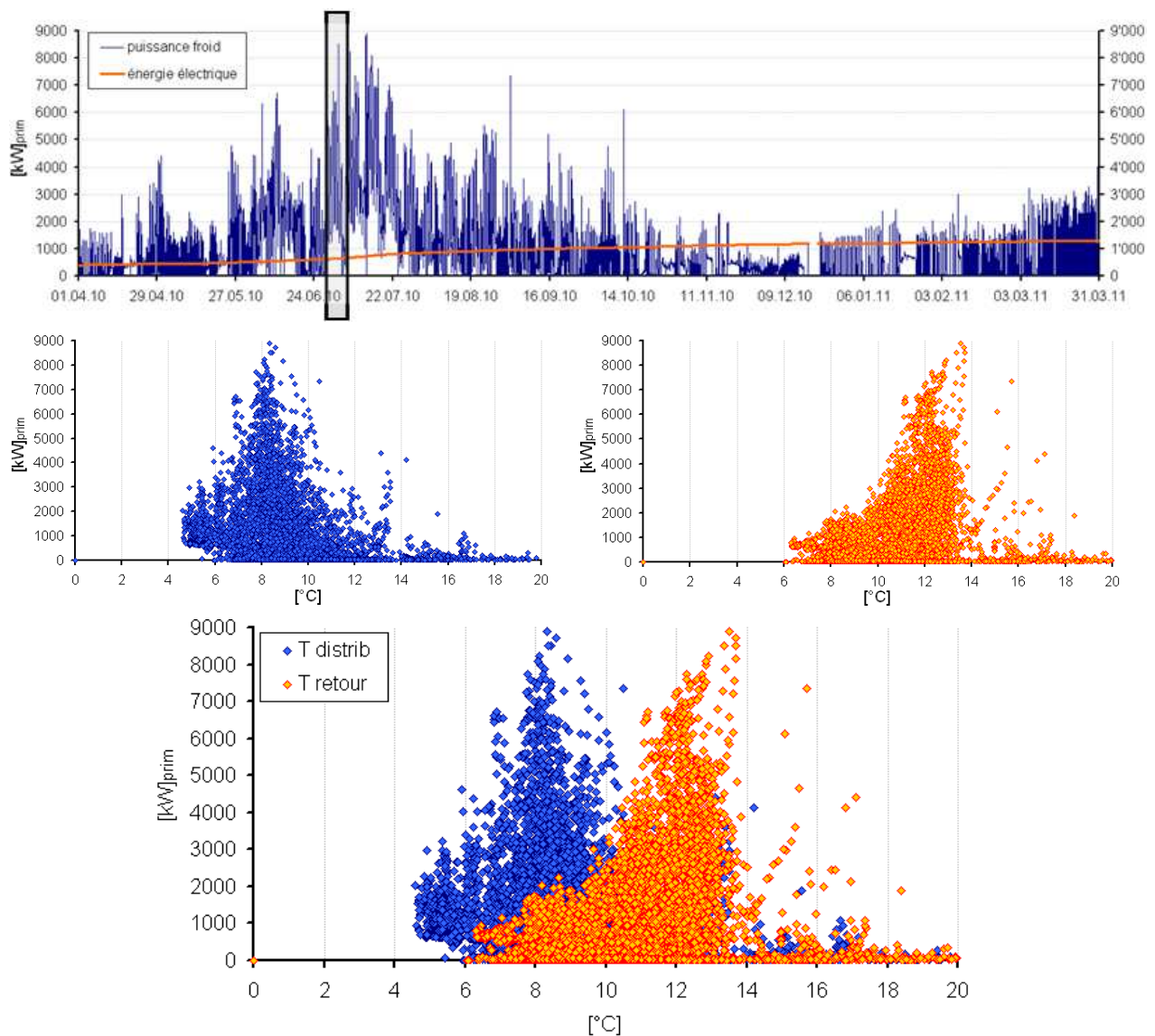


fig. 9-46 Puissance de froid totale demandée sur le réseau GLN et énergie électrique consommée (en haut); températures de distribution (5) et de retour (12) du réseau GLN (au milieu et en bas); données horaires, du 1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011

9.4.1.2 Diagrammes de Sankey pour une période estivale typique

De manière à bien comprendre la répartition des flux d'énergies (chaleur, électricité, gains/pertes) intervenant dans le système énergétique (réseaux Merck-Serono et GLN), deux diagrammes de Sankey sont présentés ci-dessous: le premier synthétise les niveaux de température mis en jeu, le second les flux d'énergie respectifs.

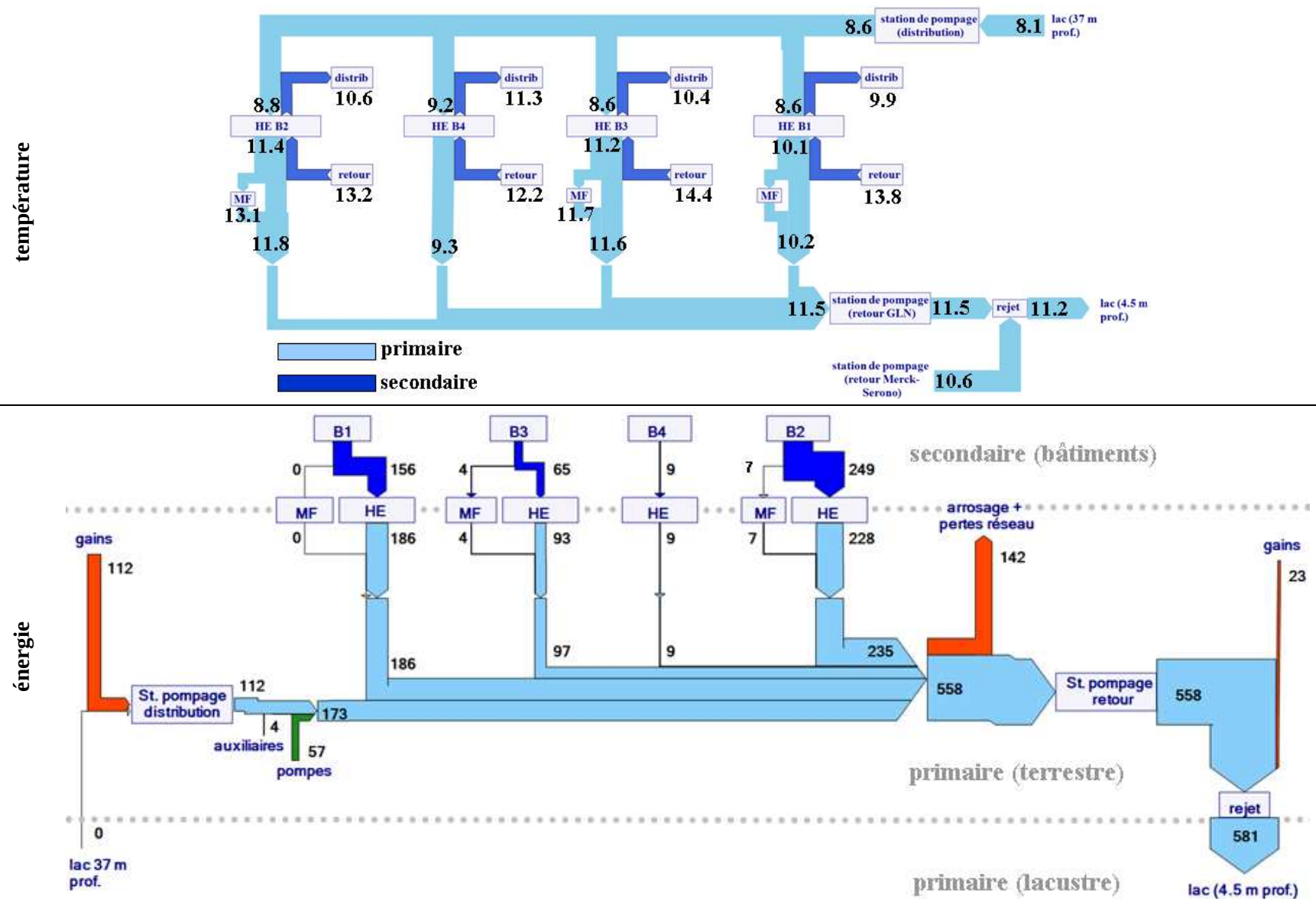


fig. 9-47 Diagramme de Sankey des niveaux de température (pondérés par les débits; en haut) et des flux d'énergie (chaleur et électricité exprimés en MWh; en bas) du réseau GLN; données horaires du 5 au 11 juillet 2010

A/ Niveaux de température

Rappelons tout d'abord que la précision absolue des mesures de température est de 0.2°C (cf. chap. 7.7). Compte tenu de cette incertitude, les informations issues du diagramme de Sanké ci-dessus (fig. 9-47) sont tout de même représentatives des tendances de fonctionnement du réseau. Les températures obtenues résultent d'une pondération avec les débits mobilisés.

Au cours de son parcours à travers le réseau, l'eau est constamment réchauffée. En été, étant donné que le réseau fonctionne en permanence en mode ouvert (cf. chap. 9.2.6.3), seule la température de distribution est contraignante pour la prestation froid.

Durant la semaine estivale chaude étudiées ($T_{\text{ext moy}} = 26.2^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{ext max}}$ dépassant largement 30°C pendant quatre jours), la température de la ressource lacustre reste stable et à un niveau suffisamment bas (7.8°C en moyenne: fig. 9-15) pour pouvoir assurer la climatisation en direct via le réseau GLN. Au cours de son parcours dans le réseau, les niveaux de température de l'eau pompée évoluent de la manière suivante (fig. 9-47):

1. pompage – station de pompage (distribution): le lac réchauffe les eaux pompées de quelques dixièmes de degrés via les échanges thermiques qui prennent place à travers les conduites¹ (la conduite d'adduction mesure 2'500 m dont environ 930 m à moins de 10 m prof.). Leur réchauffement est particulièrement marqué par leur passage dans ces couches de surface, car les eaux lacustres y sont bien plus chaudes que les eaux pompées (fig. 8-4),

2. station de pompage – sous-stations (distribution):

- durant ce parcours terrestre, le réchauffement des eaux distribuées est généralement faible, au maximum de 0.2 °C, sauf pour le bâtiment B4 pour lequel il s'élève à 0.6°C (situation transitoire qui devrait s'améliorer, car le débit de distribution primaire utilisé est actuellement bien en deçà des valeurs nominales planifiées),
- les conduites, non-isolées, sont enterrées à environ 2 m prof., généralement sous les voies de circulation routière. D'après l'étude par simulation numérique effectuée (Bordy, 2007), l'élévation de température dans l'ensemble du réseau non-isolé, ne dépasse pas 0.2°C dans des conditions estivales habituelles (cf. chap. 9.2.6.3),
- les résultats obtenus durant la semaine du 5 au 11 juillet 2010, effectivement représentative des conditions climatiques estivales (fig. 9-15), confirment bien les résultats de cette simulation. Il semble donc que l'isolation des conduites n'est pas nécessaire, pour autant que les débits de distribution primaire soient suffisamment élevés (voir bâtiment B4: fig. 9-47),

3. échangeurs:

- pour les quatre bâtiments connectés, les écarts de température moyens côté primaire de l'échangeur (ΔT_{prim}) sont généralement faibles, de l'ordre de 1.5-1.6°C (0.1°C pour le bâtiment B4). Pour les bâtiments B2 et B4, l'augmentation des niveaux de température entre la distribution primaire et la distribution secondaire dans les bâtiments est relativement faible (0.8°C); par contre, elle augmente à 1.3°C pour le bâtiment B1 et même à 2.1°C pour le bâtiment B3: pour ces deux derniers, l'échange de chaleur n'est donc pas optimal et pèjore la « qualité » de l'énergie froid distribuée dans les bâtiments (perte en niveau de température relativement importante). Comme il l'a été expliqué en détail pour le bâtiment B1 (cf. chap. 9.2.6.6), c'est une régulation inadaptée du débit primaire qui en est responsable. Lorsque la demande de froid est importante (prestation de confort en journée), c'est l'ajustement des débits de part et d'autre de l'échangeur, via l'ajustement du niveau de

¹ Les analyses effectuées sur la prise d'eau potable du Prieuré ont montré un léger échauffement des eaux pompées dans les sections de conduites sous-lacustres situées dans l'épilimnion. Cette échauffement s'accroît au cours de la saison chaude et peut atteindre 0.5-1.5°C au mois de septembre (Viquerat et al, 2008c)

température de la consigne de distribution secondaire, qui pèse la qualité de l'échange (fig. 9-48, à droite). Lorsque la demande de froid est faible (p. ex. prestation de ruban, nuit et week-end), la qualité de l'échange est parfois encore plus fortement pèse, car l'impossibilité d'abaisser le débit des pompes de distribution secondaire en dessous d'un seuil technique s'ajoute à la problématique de régulation des débits (fig. 9-48, à gauche).

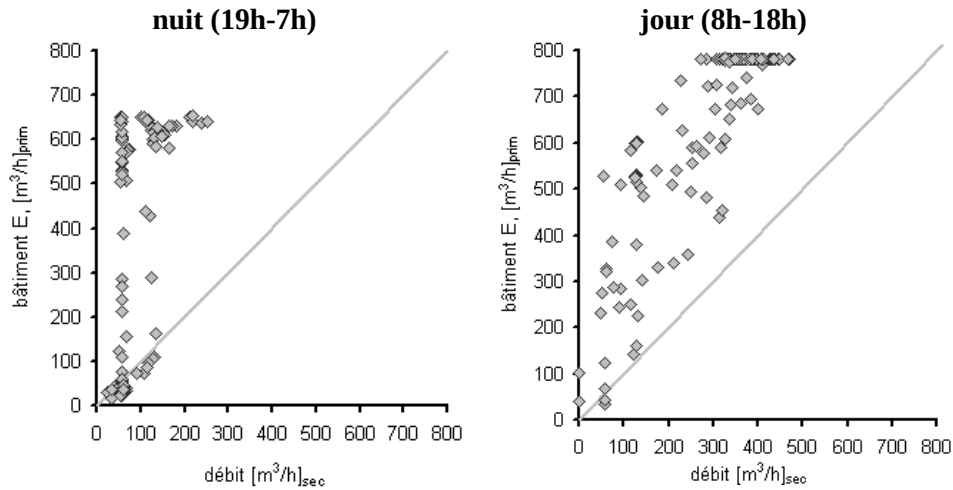


fig. 9-48 Débit de distribution primaire (9) exprimé en fonction du débit de distribution secondaire (7) du bâtiment E (bâtiments B1); données horaires du 5 au 11 juillet 2010

4. machines frigorifiques: seuls les bâtiments B2 et B3 y ont eu recours de manière significative. L'élévation des niveaux de températures est de l'ordre de 0.4°C,
5. station-de pompage – rejet (retour): les eaux de retour du réseau Merck-Serono sont plus froides que celles du réseau GLN, car la valorisation de l'eau pompée n'y est pour le moment pas du tout optimale: les eaux de ces deux réseaux se réunissent à la station de pompage avant d'être rejetées communément dans les couches de surface du lac. Le niveau de température du rejet est bas (11.2°C), bien plus faible que celui des eaux réceptrices (compris entre 19 et 24°C): le potentiel d'impact thermique sur le lac est d'autant plus important que cette différence de température est importante (cf. chap. 8.4.2).

Lorsque le réseau fonctionne en mode fermé (boucle de circulation hivernale), la gestion des niveaux de température dans le réseau primaire est plus complexe, car à la fois les températures de distribution et de retour deviennent contraignantes: les rejets de chaleur liés à la prestation de froid ruban augmentent les niveaux de température du réseau primaire, tandis que le prélèvement de calories pour la prestation de chauffage (via des pompes à chaleur) les abaissent. Ce mode de fonctionnement n'a pas été spécifiquement étudié dans le cadre de cette étude. Toutefois, dans une perspective d'optimisation et d'utilisation synergique du réseau GLN, il serait nécessaire d'approfondir ce point: étant donné que les enjeux énergétiques du chauffage à Genève sont importants, il est fort probable, et d'ailleurs souhaitable, que ce réseau soit à l'avenir bien plus sollicité selon ce mode d'exploitation.

B/ Flux d'énergie

Comme pour l'analyse des niveaux de température, rappelons tout d'abord que l'erreur sur l'énergie peut atteindre 10-15 % (cf. chap. 7.7.2).

Les points suivants se dégagent de l'analyse du diagramme de Sankey:

1. durant cette semaine estivale chaude, caniculaire ($T_{\text{ext moy}} = 26.2^\circ\text{C}$, $T_{\text{ext max}}$ dépassant largement 30°C pendant quatre jours), l'énergie calorifique évacuée par les bâtiments connectés est importante (fig. 9-47), d'environ 527 MWh. La chaleur déversée dans le lac est environ 10 %

supérieure à l'énergie à évacuer des bâtiments (581 MWh). Dans ces conditions météorologiques particulièrement exigeantes, le réseau a permis d'évacuer cette chaleur quasiment sans recours aux machines frigorifiques (elles ne représentent qu'environ 1 % de l'énergie totale évacuée),

2. pour assurer le fonctionnement des pompes de distribution primaire et des auxiliaires, 62 MWh_{el} ont été injectés dans le réseau: cette énergie représente un peu plus de 10 % de l'énergie calorifique à évacuer des bâtiments (*voir chap. ci-dessous*),
3. les gains d'énergie résultant du réchauffement des eaux pompées au cours de leur transport du pompage lacustre jusqu'à la station de pompage sont relativement importants (112 MWh): ils sont du même ordre de grandeur que les pertes de chaleur liées aux pertes de charge et aux prélèvements sur les eaux de retour pour l'arrosage¹,
4. de part et d'autre des échangeurs de chaleur, les flux d'énergie ne sont pas identiques. Cela est lié à l'efficacité de l'échangeur et aux incertitudes sur la mesure du débit et des températures (*cf. chap. 7.7.2 et 9.2.6.6*).

9.4.1.3 Performance énergétique du réseau

Pour une production d'énergie thermique via un réseau hydrothermique, le coefficient de performance exprimé est un coefficient d'efficacité thermique: il représente le rapport entre l'énergie thermique délivrée et l'énergie électrique spécifique consommée. Ce coefficient d'efficacité est donc défini par le rapport entre l'énergie thermique (froid et chaud) délivrée aux bâtiments connectés (côté secondaire des échangeurs de chaleur), et l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement des pompes de distribution du réseau primaire²:

$$\text{EER (efficacité thermique)} = \sum P_{\text{thermique secondaire (bâtiments)}} / \sum P_{\text{électrique pompe distribution (réseau)}}$$

Pour la deuxième année de fonctionnement (1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011), l'efficacité thermique du réseau GLN est en réalité une efficacité frigorifique: malgré le fait qu'un immeuble résidentiel (Foyer Sécheron: 600 kW_{chaud}) et qu'un immeuble administratif (PWC Varembe: 160 kW_{chaud}) prélèvent de la chaleur sur le réseau GLN depuis décembre 2010 (*annexe 1*), seules les prestations de climatisation des bâtiments B1, B2, B3 et B4 ont pu être comptabilisés. Précisons aussi que les efficacités frigorifiques des mois de janvier, février et mars 2011 sont sous-estimés d'environ 40 %, car les demandes de froid du HCR, de l'OMPI et d'un bâtiment supplémentaire du site du bâtiment B4, tous connectés en janvier 2011, n'ont pas pu être prises en compte.

L'efficacité frigorifique annuelle du réseau GLN est de 6.8 (*fig. 9-49*). Sur une base mensuelle, elle varie fortement, de 2.7 en octobre 2010 à 9.5 en août 2010. Durant l'été 2010, elle a atteint des valeurs comprises entre 8 et 10. Dans ces conditions d'utilisation (pas de prestation de chauffage), l'efficacité du système augmente clairement avec la charge de froid (*fig. 9-50*).

Pour comparaison, l'efficacité d'un système de production classique (machine frigorifique) du bâtiment B1 actuellement connecté a été mesurée et vaut 4.3 (*cf. chap. 9.2.6.2*). Pour cette année, le réseau GLN offre donc une efficacité frigorifique bien supérieure à celle d'une production classique centralisée. Une comparaison avec d'autres systèmes hydrothermiques similaires est effectuée au *chapitre 10.2.2*: elle montre que la marge d'optimisation du réseau GLN, actuellement encore en phase d'implémentation et d'apprentissage, est très importante. L'exploitant s'est d'ailleurs fixé l'objectif d'atteindre une efficacité moyenne annuelle de 12-15 d'ici 2013.

¹ Pertes de charge et arrosage ne peuvent pas être distingués, car les débits et la température de chaque piquage pour l'eau d'arrosage ne sont pas disponibles

² Bien que l'énergie électrique totale inclut l'énergie des pompes et des auxiliaires (contrôle-commande, vannes, etc.), seule celle des pompes de distribution est prise en considération, car elle représente la grande majorité de l'énergie électrique (environ 93 %)

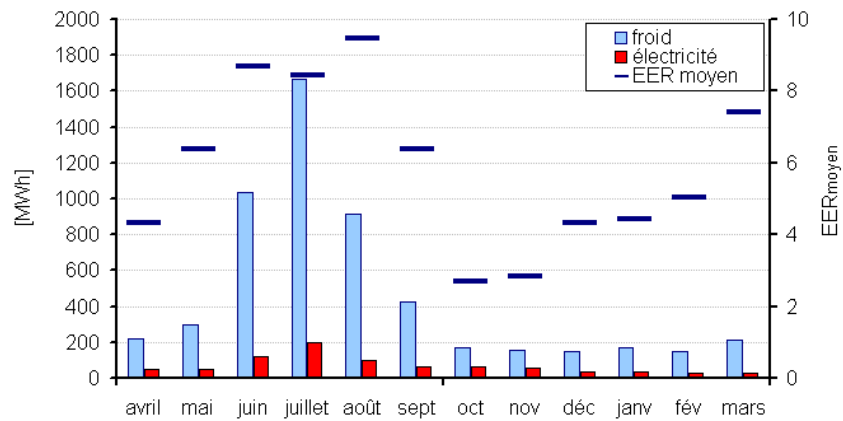


fig. 9-49 Efficacité frigorifique du réseau GLN, énergie froid délivrée aux bâtiments B1, B2, B3 et B4 (7, 8) et électricité de pompage relative (13); données horaires du 1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011

L'efficacité frigorifique du réseau GLN est à la fois dépendante de critères purement techniques (charge du réseau, nature des installations techniques, régulation, etc.), mais aussi et avant tout de la manière dont il est exploité, tant par l'opérateur que chacun des preneurs. Depuis janvier 2011, l'efficacité augmente nettement et atteint une valeur de 7.4¹ au mois de mars. Globalement, l'amélioration de l'efficacité frigorifique s'explique par plusieurs faits agissant de manière synergique (fig. 9-50):

- modification de la régulation: l'augmentation des températures de distribution secondaire chez certains preneurs (p. ex. le bâtiment B1) a amélioré l'échange d'énergie à travers l'échangeur de chaleur et de ce fait diminué les appels de débit primaire en permettant d'optimiser l'échange d'énergie à travers l'échangeur de chaleur (cf. chap. 9.2.6.6). Ce type d'optimisation se traduit notamment par un accroissement de la valorisation de l'eau circulant dans le réseau primaire lorsqu'il fonctionne en boucle ouverte, soit une augmentation des écarts de température entre le retour et la distribution primaire du réseau à la station de pompage ($\Delta T_{\text{GLN}} = T_{\text{retour GLN}} - T_{\text{distrib GLN}}$),
- fonctionnement en boucle fermée: lorsque les besoins en énergie froid ne sont pas trop importants (saison froide), le réseau GLN peut fonctionner en boucle fermée (désactivation du pompage lacustre lorsque $\Delta T_{\text{GLN}} < 0.5^\circ\text{C}$ et $P_{\text{froid}} < 1'000 \text{ kW}$ sur les fig. 9-50). Cette configuration hydraulique nécessite une énergie de pompage bien plus faible qu'en boucle ouverte, ce qui permet d'utiliser une pompe de circulation hivernale faiblement dimensionnée. Ainsi, la consommation électrique chute drastiquement tout en permettant d'assurer les mêmes prestations thermiques qu'en boucle ouverte. Une utilisation de cette boucle fermée aussi longtemps que les niveaux de température restent adéquats permet d'augmenter l'efficacité jusqu'à des valeurs voisines de 100,
- modification de la régulation hydraulique: à demande de froid égale, l'activation en cascade d'une pompe lacustre supplémentaire fait chuter l'efficacité de manière importante. La fig. 9-50 montre que la marge d'optimisation sur la mise en route des pompes supplémentaires est importante: par exemple, pour une demande de froid comprise entre 1 et 3 MW, l'élévation du seuil d'enclenchement de la deuxième pompe permettrait de doubler l'efficacité,
- augmentation de la demande de froid ruban: dès le mois de décembre, les bâtiments B1 et B4 ont augmenté leur demande de froid ruban (ajout de datacenters),

¹ Les données du printemps 2011 n'ont pas été analysées, mais d'après les informations reçues de l'exploitant, des efficacités de l'ordre de 12-15 ont été atteintes. L'analyse ultérieure de ces données devrait confirmer ces valeurs

- adaptation/remplacement d'installations: certaines unités de traitement d'air (AHU), parfois désuètes, mal dimensionnées ou encore situées au bout de la boucle de distribution, requièrent des niveaux de température de distribution si bas qu'elles pénalisent et contraignent l'ensemble de la distribution secondaire dans les bâtiments. En raison de l'incompatibilité entre les niveaux de température requis au niveau des boucles secondaires et ceux disponibles via le réseau hydrothermique, c'est un exemple typique d'installation secondaire qui est susceptible de pénaliser l'efficacité du réseau: un changement de matériel pourrait dans ces conditions s'avérer très pertinent.

Pour pouvoir intégrer l'ensemble des points énoncés ci-dessus dans le processus de connexion et d'optimisation de la connexion, il apparaît fondamental d'initier une collaboration active et concertée entre l'exploitant et les utilisateurs: ce point s'avère crucial, car la régulation du réseau primaire (effectuée par l'exploitant) est dépendante de la gestion de l'énergie froid (boucle secondaire de distribution) par chacun des utilisateurs, et mutuellement.

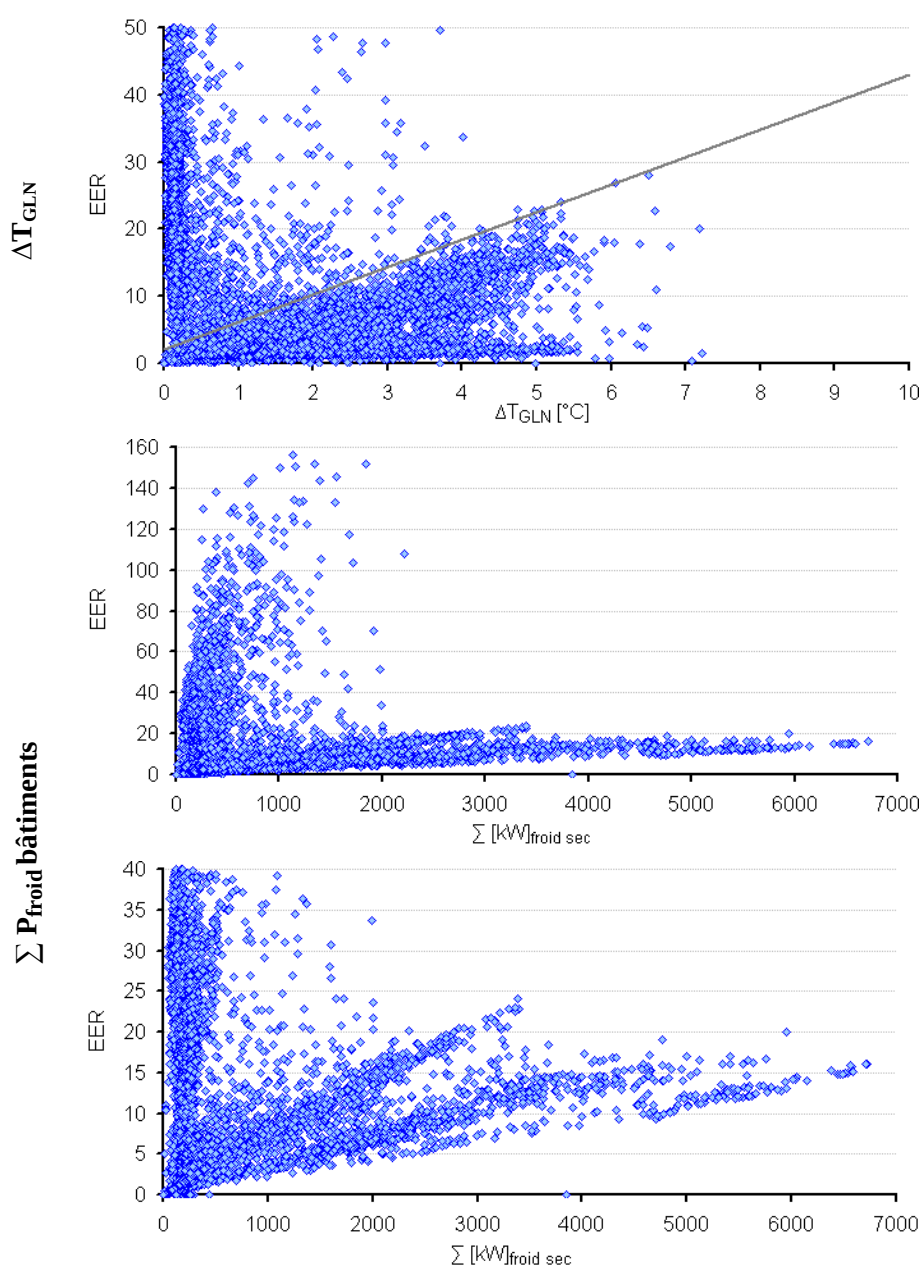


fig. 9-50 Efficacité frigorifique du réseau GLN en fonction de l'écart de température entre le retour (12) et la distribution (5) du réseau (ΔT_{GLN} ; en haut) et de la puissance thermique délivrée aux bâtiments B1, B2, B3 et B4 (au milieu; en bas, zoom sur les basses valeurs d'efficacité, 7, 8); données horaires du 1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011

Bien que les prestations de chauffage n'aient pas été étudiées dans le cadre de cette étude, il faut souligner que la possibilité de valoriser le réseau pour ce type de prestation est également un important facteur d'optimisation. D'une part, cette seconde prestation permet d'augmenter l'efficacité thermique globale: en effet, le prélèvement de calories dans l'eau du réseau primaire permet de ramener sa température à des niveaux plus bas, ce qui est favorable pour les prestations froid lorsque le réseau opère en boucle fermée. D'autre part, le même volume d'eau pompée est valorisé deux fois (prestation double pour une même quantité d'électricité injectée). Finalement, cette utilisation complémentaire et synergique permet d'amortir plus rapidement l'investissement conséquent de cette infrastructure (cf. chap. 9.4.2).

Rappelons encore que d'une manière générale, les besoins de chauffage sont sous les latitudes suisses quantitativement plus importants que ceux de climatisation, et qu'ils représentent le véritable enjeu d'approvisionnement thermique des bâtiments. Nous pensons donc que cette prestation devrait être reconsidérée avec bien plus d'intérêt que jusqu'à présent.

9.4.1.4 Simultanéité de fonctionnement à pleine charge

Pour la deuxième année de fonctionnement (1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011), seuls quatre bâtiments sont approvisionnés en énergie froid via le réseau GLN: ils correspondent à une puissance frigorifique concessionnée totale de 7.56 MW, soit environ 50 % du potentiel total du réseau (15.6 MW) en termes de puissances et de débits primaires concessionnés. Les autres bâtiments qui se connecteront prochainement vont petit à petit accroître la charge totale sur le réseau.

Le coefficient de simultanéité est défini ici comme le rapport instantané entre le débit primaire mesuré sur le réseau et le débit maximum théorique de ce dernier (s'applique aussi à la charge thermique). Ce paramètre permet d'évaluer les possibilités ou au contraire les contraintes de la dynamique d'approvisionnement de manière instantanée, cela dans des conditions particulièrement critiques (p.ex. lors d'événements caniculaires ou d'activité confériencièrè très intense).

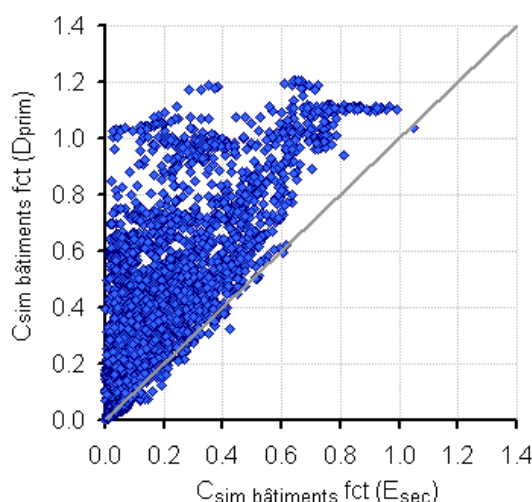


fig. 9-51 Coefficient de simultanéité du réseau GLN exprimé par rapport au débit primaire (9), en fonction de celui exprimé par rapport à l'énergie froid délivrée aux bâtiments B1, B2, B3 et B4 (7); données horaires du 1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011

Pour la gestion de l'approvisionnement, la fig. 9-51 ci-dessus montre que le coefficient de simultanéité exprimé en fonction du débit primaire est plus contraignant que s'il est exprimé en fonction de la charge thermique totale. L'analyse de la simultanéité de fonctionnement à pleine charge ci-dessous est donc basée sur les débits primaires.

Etant donné que le réseau est dans une phase transitoire de mise en route, nous n'avons considéré que le coefficient de simultanéité exprimé en fonction des débits primaires demandés par les

bâtiments déjà connectés, car il apporte des informations directes sur la gestion de la charge réelle durant l'année d'étude:

$$C_{sim} = \sum \text{Débit}_{\text{primaire}} (\text{mesuré}) / \sum \text{Débit}_{\text{primaire max}} (\text{concessionné par les bâtiments})$$

Le coefficient de simultanéité exprimé en fonction du débit nominal du réseau (2'700 m³/h) est tout de même illustré ci-dessous pour montrer les potentiels et contraintes que le réseau présente encore: la *fig. 9-52* montre que la simultanéité de pleine charge varie au cours des saisons: elle est faible et relativement constante en hiver, inférieure à 20 %, car la charge des bâtiments connectés est très partielle, la plupart du temps uniquement de type ruban. La simultanéité à pleine charge augmente à partir du printemps et jusqu'à début juillet, où elle atteint très ponctuellement des valeurs maximums comprise entre 100 et 120 %. Cela est essentiellement dû au fait que l'exploitant a temporairement autorisé les bâtiments connectés à dépasser leur débit concessionné, car la marge de débit disponible est pour le moment encore importante. Ces dérogations provisoires de débit ont permis à l'exploitant de « s'approprier » le réseau (phase d'apprentissage) tout en garantissant l'approvisionnement aux bâtiments connectés, également confrontés à des nouvelles contraintes de production de l'énergie froid et de gestion de la distribution.

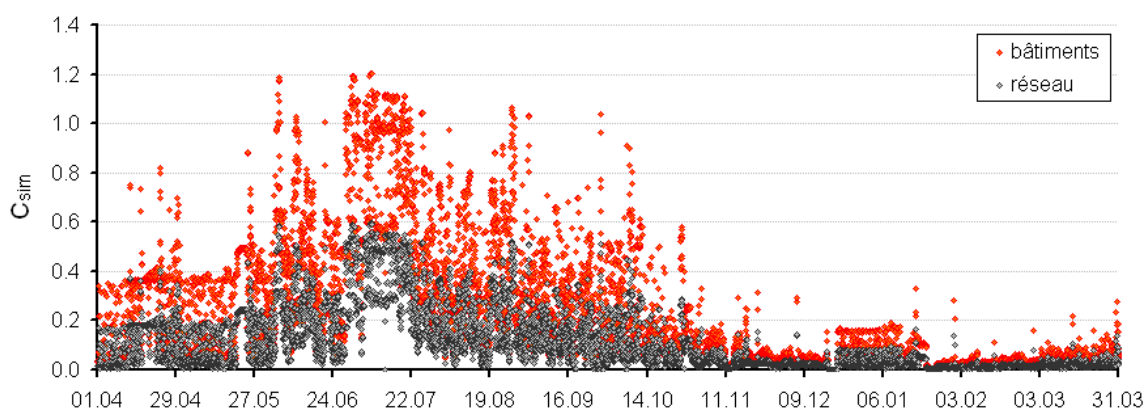


fig. 9-52 Evolution des coefficients de simultanéité du réseau GLN exprimés en fonction du débit primaire (9); données horaires du 1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011

Afin de mieux cerner les enjeux liés à la gestion des débits primaires, la simultanéité à pleine charge en fonction du respect ou non du débit global concessionné par l'ensemble des bâtiments (*fig. 9-53*) a également été mise en relation avec les conditions météorologique (T_{ext}), la valorisation de l'eau pompée (écart de température entre le retour et la distribution du réseau GLN, ΔT_{GLN}) et l'efficacité frigorifique du réseau (EER).

Bien qu'ils ne représentent qu'environ 50 % de la capacité nominale du réseau, les quatre bâtiments connectés présentent tous des profils de demande similaires, très fortement dépendants de la température extérieure (prestation de confort). Cela dit, il apparaît clairement que la connexion de bâtiments supplémentaires, jusqu'à la capacité nominale du réseau, pourrait présenter quelques difficultés d'approvisionnement durant les périodes chaudes de l'année. En effet, les services techniques des bâtiments connectés privilégient parfois de forts appels de débits primaires lorsque les besoins en froid augmentent: il apparaît à nouveau qu'une bonne compréhension du fonctionnement des échangeurs de chaleur et surtout de leur régulation sont des éléments essentiels pour une gestion des débits qui nécessite d'être optimale (*cf. chap. 9.2.6.6*).

Du point de vue de l'exploitant, il va de soi que cette situation n'est pas optimale, car l'approvisionnement des bâtiments s'effectue avec des débits excédant les débits concessionnés. En effet, lorsque les débits concessionnés se rapprocheront du débit nominal du réseau, cette situation ne sera plus possible. Cela dit, la marge d'optimisation du réseau primaire reste importante: les

écarts de température entre le retour et la distribution du réseau (ΔT_{GLN}) pourraient encore être augmentés.

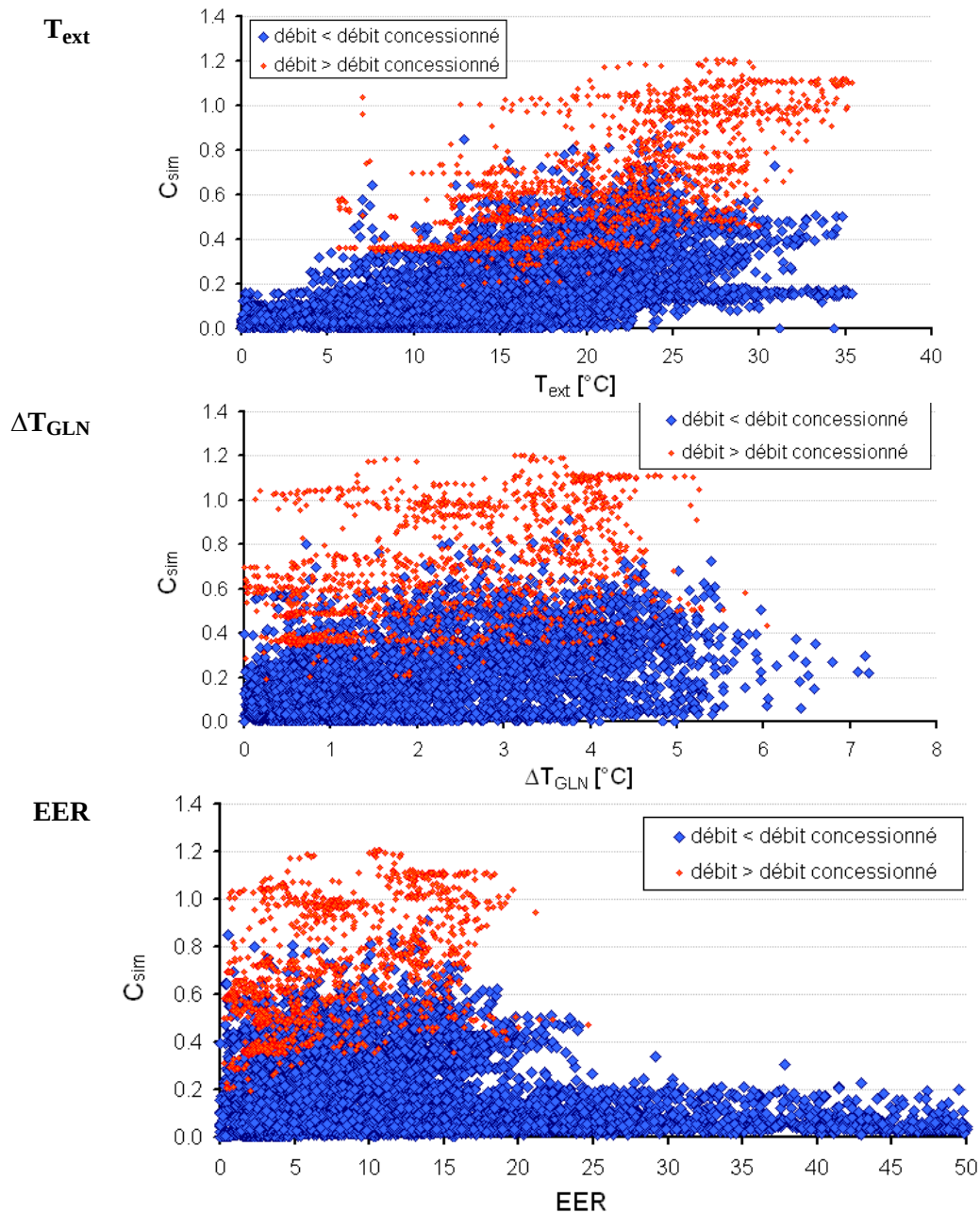


fig. 9-53 Coefficient de simultanéité des bâtiments connectés en fonction de la température extérieure (en haut), de l'écart de température entre le retour (12) et la distribution (5) du réseau GLN (ΔT_{GLN} ; au milieu) et de l'efficacité frigorifique (en bas); données horaires du 1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011

Il apparaît clairement que les choix opérés durant la phase de projet, tant du point de vue commercial (approvisionnement 100 % renouvelable via le lac) que du point de vue technique (dimensionnement des débits concessionnés sur la puissance maximum demandée par le preneur) ont une influence déterminante sur la simultanéité à pleine charge. Dans ces conditions, l'exploitant doit trouver un équilibre entre un dimensionnement qui lui permet de connecter un maximum de bâtiments (efficacité énergétique du réseau et amortissement), tout en garantissant un approvisionnement de qualité pour chacun d'eux, cela dépassement des débits concessionnés.

Tout comme les services techniques de bâtiments connectés qui ont conservé leur production classique via des machines frigorifiques, nous ne sommes pas persuadés que le choix d'un approvisionnement monovalent (100 % renouvelable) soit le plus judicieux de ces points de vue:

une production bivalente, privilégiant une maximisation de la valorisation de la ressource renouvelable (composante « énergie ») avec une couverture des pointes de puissance par une production classique (composante « puissance ») nous apparaît être une solution plus pertinente.

Pour cela, un important travail d'audit des bâtiments à connecter devrait être mené tôt durant la phase de projet (cf. chap. 9.1), de manière à pouvoir proposer à leurs services techniques un dimensionnement mieux adapté, tout en garantissant un approvisionnement de qualité, cela à des coûts raisonnables pour les deux parties (cf. chap. 9.4.2): en termes de potentialités de connexion, le bénéfice pour l'exploitant est dans ce cas bien plus intéressant (maximisation des ventes d'énergie par unité de débit concessionné).

9.4.2 Aspects économiques

Les aspects économiques constituent l'un des aspects déterminants pour la viabilité de ce type de système. De plus, il y a une rupture importante par rapport aux modèles en vigueur pour les systèmes de production classique, tant pour l'exploitant que pour les utilisateurs (bâtiments connectés).

L'étude proposée ici est sommaire et ne constitue que l'ébauche d'une étude économique complète, qui serait à terme nécessaire: étant donné que seule une partie des bâtiments est pour le moment connectée au réseau, les incertitudes sont pour le moment trop importantes pour pouvoir apporter des chiffres précis relatifs à un fonctionnement à un « régime de croisière » du réseau, sur lequel il faudrait pour cela s'appuyer.

L'analyse proposée ici se restreint donc à dresser le bilan des coûts de revient de l'énergie froid (déterminés par l'exploitant) et des coûts à charge des utilisateurs (fonctions de la tarification). A partir de quelques points fondamentaux mis en évidence, nous proposons finalement quelques orientations et pistes envisageables en ce qui concerne sa viabilité (opération financièrement non-déficitaire pour l'exploitant).

9.4.2.1 Coût de revient « exploitant » de l'énergie froid via le réseau GLN

Durant la phase de projet, le réseau GLN et ses installations techniques ont été dimensionnés pour un approvisionnement en énergie froid, la prestation de chauffage ayant été considérée comme secondaire. Le coût de revient de l'énergie froid via ce réseau ($\text{kWh}_{\text{froid GLN}}$) a été déterminé par l'exploitant sur la base de l'investissement nécessaire et des consommations d'énergie qu'il a planifiées pour chacun des utilisateurs prospectés. Pour cela, le modèle financier qu'il a développé tient compte de deux phases successives:

1. phase de mise en route (2006 à 2010) durant laquelle les principaux investissements sont consentis et les premiers bâtiments connectés (pas d'amortissement),
2. phase d'exploitation et d'optimisation (2011 à 2040) au cours de laquelle les investissements sont terminés; la plupart puis tous les bâtiments sont connectés (phase d'amortissement).

A partir de ce modèle financier, le coût de revient annuel de l'énergie froid est analysé sur la base des quatre scénarios ci-dessous (tableau 9-12; annexe 20):

- scénarios « 10-planifié » et « 11-40 planifié »: établis par l'exploitant en 2005 durant la phase de projet, ce sont des scénarios optimistes, basés sur une importante consommation d'énergie: tous les bâtiments prospectés sont connectés et le système est optimisé (+ 15 % d'énergie froid vendue¹),

¹ Par rapport à l'énergie vendue aux bâtiments dont la connexion a été planifiée dans le modèle financier

- scénarios « 11-40 réaliste-bas » et « 11-40 réaliste haut »: ils sont établis en 2011 dans le cadre de cette étude, en tenant compte du retour d'expérience effectué, de l'état actuel des connexions (retards, abandons, etc.) et de discussions avec l'exploitant. Ils sont moins ambitieux mais à notre avis plus réalistes, basés sur une consommation d'énergie environ 20 % plus faible par rapport aux deux premiers scénarios.

scénarios	10 planifié	11-40 planifié	11-40 réaliste-haut	11-40 réaliste-bas
	exploitant		cette étude	
année	annuité 2010	annuités de 2011 à 2040		
taux d'intérêt	5 % (6.5 % sur fonds propres, 4 % sur fonds étrangers)			
prix de l'électricité	15 cts/kWh en 2010 (taux d'inflation de 1.25 %)			
divers et imprévus	11 % inclus			
EER	20			16
P _{froid} nominal	15.7 MW (2'700 m ³ /h, ΔT _{GLN} = 5°C)			
GWh _{froid} /an	19 (21.5 à partir de 2014)		16	
nbre h/an équ. P _{froid} nominal	1'200		1'000	
frais de gestion [chf/an]	non-compris		50'000, soit ~ 0.3 cts/kWh _{froid}	

tableau 9-12 Hypothèses retenues pour les scénarios de coût de revient annuel de l'énergie froid via le réseau GLN

A/ Investissements

Au bénéfice d'une subvention de l'Union Européenne de 1'650 Kchf (programme « Concerto ») équivalant à 5.5 % de l'investissement total (30'100 Kchf), ce dernier s'abaisse à 28'450 Kchf. Par rapport au coût total du système, l'investissement se répartit de la manière suivante (tableau 9-13): ces coûts comprennent les coûts initiaux ainsi que le remplacement de certains équipements après 15-20 ans (une seule fois durant la période du plan financier). Ils ont été estimés par l'exploitant sur la base des prix actuels des équipements et des travaux de chantier. Ils comprennent également une réserve de 11 % (divers et imprévus) et intègrent les frais financiers liés aux intérêts de la dette. En revanche, aucun budget n'a été initialement envisagé pour la couverture – même partielle – des coûts liés aux éventuels investissements sur les réseaux secondaires: dans ce modèle, ils restent à la charge de l'utilisateur.

postes	prise d'eau du lac	station de pompage	réseau (distribution, rejet)	équipement des sous-stations	ingénierie et études
en %	3	22	47	16	12

tableau 9-13 Répartition de l'investissement financier en fonction des postes du réseau GLN

B/ Charges annuelles

Les coûts de revient annuels sont décomposés en trois parties: le financement des investissements, les frais d'exploitation (opération et maintenance) et les frais de l'énergie (achat d'électricité):

- investissement: le taux d'intérêt moyen pris en compte est de 5 %: le capital investi provient pour 70 % de fonds propres (taux = 6 %) et pour 30 % de fonds étrangers (taux = 4 %). L'annuité est de 6.505 % sur une période d'amortissement de 30 ans (de 2011 à 2040). Le taux de rendement pris en considération pour le coût de revient est de 0 %, mais l'objectif affiché par l'exploitant est de 8 % à l'horizon 2040.

Le montant des annuités s'élève donc à un peu moins de 2'000 Kchf,

- frais d'exploitation: ils comprennent les frais opérationnels et de maintenance destinés à l'entretien de la station de pompage et des sous-stations (personnel et matériel), les assurances

ainsi que les frais de gestion (comptabilité, facturation, etc., estimés à 50 KCHF; *information obtenue auprès des services financiers de SIG en 2011*).

Ils sont estimés à environ 400 KCHF par an,

- **énergie**: la plus grande partie de l'électricité nécessaire est celle des pompes du réseau primaire. Le coût de l'électricité étant de 15 cts/kWh en 2010 (*tarif pour les professionnels, SIG 2011*), les charges annuelles s'élèvent à environ 400 KCHF.

C/ Coût de l'énergie froid via le réseau GLN

En tenant compte des trois postes détaillés ci-dessus, on obtient les coûts de revient suivants (*fig. 9-54*):

- **scénario « 10-planifié »**: le coût de revient n'est pas représentatif du coût réel durant la phase d'exploitation, car l'amortissement n'est pas encore pris en compte,
- **scénario « 11-40 planifié »**: le coût de revient annuel est estimé à 13.5 cts/kWh_{froid}. Il est basé sur une quantité importante d'énergie vendue (21.5 GWh/an): elle représente une durée de fonctionnement équivalente d'environ 1'200 heures à puissance nominale, et prend en compte tous les prospects identifiés en 2005 lors de la phase de projet. De plus, ce coût de revient inclut environ 3 GWh/an supplémentaires vendus via le réseau: ils sont liés à son optimisation à partir de 2014 (*tableau 9-14*).

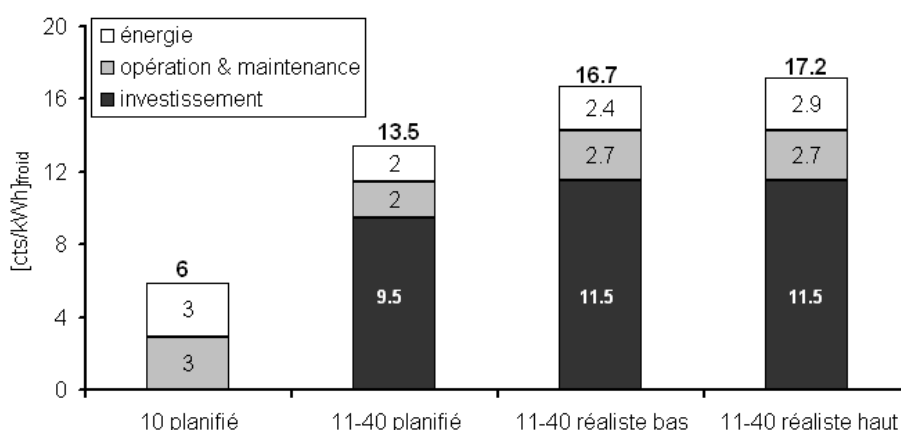


fig. 9-54 Coûts de revient annuels de l'énergie froid via le réseau GLN pour les quatre scénarios considérés; parts relatives de l'énergie, de l'exploitation et de l'amortissement

Sur la base des constatations effectuées du 1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011, il apparaît clairement que le scénario « *planifié* » est trop ambitieux:

- certains petits preneurs d'énergie se sont retirés (diminution d'environ 500 MWh/an),
- les durées de fonctionnement équivalentes à puissance concessionnée constatées sont très inférieures à la durée planifiée: en 2010, elles sont comprises entre 476 et 835 h (*tableau 9-10*),
- en moyenne annuelle, l'écart de température entre le retour et la distribution primaire (ΔT_{GLN}) qui a réellement été utilisé est bien inférieur à la valeur planifiée de 5°C: il est de 2.5°C en moyenne, compris entre 2 et 5.3°C selon les bâtiments (*tableau 9-10*).

Ainsi, deux scénarios plus réalistes ont été envisagés dans le cadre de cette étude. Toujours basés sur le modèle financier de l'exploitant, les consommations d'énergie froid sont revues à la baisse d'environ 20 %; pour le scénario « *11-40 réaliste haut* », une efficacité frigorifique de 20 est conservée et abaissée à 16 pour le scénario « *11-40 réaliste bas* ». Ainsi, la durée de fonctionnement équivalente est ramenée à une valeur plus réaliste d'environ 1'000 heures, toujours supérieure aux valeurs constatées en 2010 mais réalisable après optimisation du système et un

éventuel redimensionnement de la puissance concessionnée par les bâtiments concernés (réduction). Malgré ces différences, le coût de revient de la puissance frigorifique souscrit reste du même ordre de grandeur pour le scénario de l'exploitant et les scénarios proposés (tableau 9-14).

scénarios	11-40 planifié	11-40 réaliste bas	11-40 réaliste haut
GWh _{froid} /an	19-21.5	16	
durée fct équ. à puissance nominale [h]	1'200	1'000	
coût de revient kW _{froid} [chf/kW]	168	171	176

tableau 9-14 Production d'énergie froid et coût de revient moyen de la puissance de froid concessionnée (kW_{froid}) sur le réseau GLN pour trois des quatre scénarios étudiés

9.4.2.2 Coût « utilisateur » de l'énergie froid via le réseau GLN

En appliquant le modèle tarifaire en vigueur (cf. chap. 6.4) aux quatre bâtiments connectés, le prix de vente moyen de l'énergie froid via le réseau GLN est de 15.4 cts au cours la deuxième année de fonctionnement (tableau 9-15). Il est majoritairement déterminé par les importantes consommations des bâtiments B1 et B2, pour lesquels la taxe de puissance (part fixe) représente environ un tiers du prix et l'énergie (part variable) les deux autres tiers.

Pour les bâtiments B3 et B4, le prix moyen est environ 20 % plus élevé. En effet, la taxe de puissance leur « coûte » proportionnellement plus cher, car les puissances qu'ils ont concessionnées sont importantes au regard de leurs besoins actuels (fig. 9-40): en prévision de l'augmentation de sa surface climatisée, le débit réservé par le bâtiment B4 est important et à l'heure actuelle encore loin d'être entièrement exploité. La situation est différente pour le bâtiment B3: c'est la nécessité d'une garantie absolue de confort thermique pour la tenue de conférences, quelle que soit la charge du bâtiment, qui a conduit cet utilisateur à concessionner un débit très important par rapport aux demandes de froid observées.

bâtiment connectés	part fixe	part variable	total
	cts/kWh _{froid} CHF		
B1	4.4	10.2	14.6
B2	5	9.9	14.9
B3	8.8	10	18.8
B4	6	10.4	16.4
GLN _{moyen} ¹	5.3	10.1	15.4

tableau 9-15 Coût moyen de l'énergie froid via le réseau GLN pour les bâtiments connectés du 1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011

9.4.2.3 Revenus pour l'exploitant: énergie froid et eau d'arrosage

Pour l'exploitant, différentes sources de revenus sont possible avec le réseau GLN: ceux issus de la vente d'énergie thermique (froid et chaud²) mais aussi ceux de la vente d'eau d'arrosage (piquage sur les eaux de retour du réseau).

¹ Le coût moyen du kWh_{froid}GLN est pondéré par l'énergie consommée par chaque bâtiment

² Bien que deux preneurs soient connectés depuis décembre 2010 pour une prestation de chauffage (760 kW), seuls les revenus de la vente d'énergie froid et d'eau d'arrosage sont pris en compte

A/ Energie froid

Le *tableau 9-16* ci-dessous résume les quantités d'énergie froid vendues via le réseau GLN pour les quatre bâtiments connectés et les revenus qu'elles ont générés:

		B1	B2	B3	B4	Σ
GWh_{vendu/planifié} [%]		70	70	39	51	62
KCHF	part variable	219	221	62	60	562
	part fixe	103	108	53	36	300
	Σ	322	329	115	96	862

tableau 9-16 Revenus générés par la vente d'énergie froid via le réseau GLN du 1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011 (exprimés en KCHF)

B/ Eaux d'arrosage

Cette prestation permet d'apporter des gains complémentaires à l'exploitant. Outre le fait de contribuer à l'amortissement de l'installation, elle est intéressante à tout point de vue:

- la diminution des volumes d'eau à traiter par la filière standard¹ (production, traitement des eaux usées) abaisse les coûts d'exploitation et l'intensité de la demande,
- la diminution des eaux rejetées réduit les impacts du système sur le lac,
- pour l'utilisateur, les coûts d'arrosage sont sensiblement amortis.

La *fig. 9-55* illustre la dynamique de prélèvement d'eau sur les eaux de retour du réseau GLN. Leur valorisation pour l'arrosage représente un volume important, d'environ 180'000 m³ au cours de la deuxième année de fonctionnement (*Viquerat et al., 2011a*), imputable à deux consommateurs: la ville de Genève pour l'arrosage du Jardin Botanique (150'000 m³) et le bâtiment B2 pour alimenter un large bassin d'accumulation (environ 30'000 m³ utilisés pour l'arrosage du site).

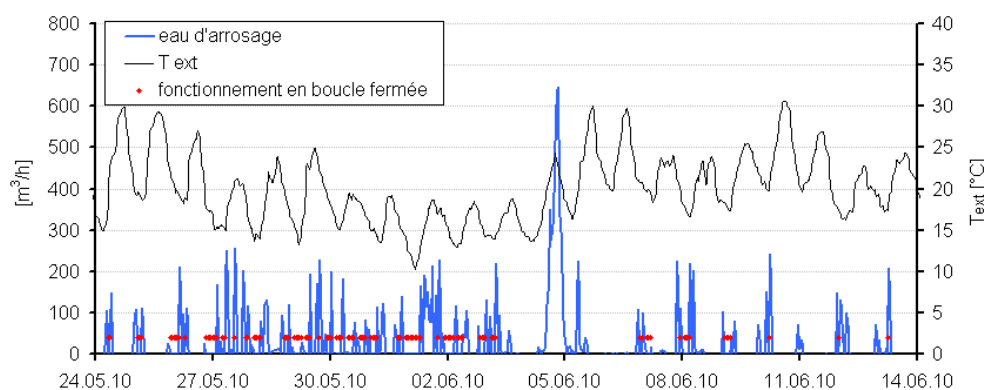


fig. 9-55 Débits d'eau d'arrosage prélevés sur les eaux de retour du réseau GLN; données horaires du 24 mai au 15 juin 2010

Le prix de vente de l'eau d'arrosage via le réseau a été fixé par l'exploitant à 70 cts/m³. Ce tarif est modulable et négocié avec l'utilisateur; l'exploitant a d'ailleurs décidé de fournir un volume initial d'eau d'arrosage gratuit, au-dessus duquel les prélèvements commencent seulement à être facturés. Jusqu'au 1^{er} mars 2011, l'exploitant n'a tiré aucun revenu de la vente d'eau d'arrosage, car les deux preneurs n'ont pas dépassé les quantités gratuites dont ils bénéficiaient.

¹ Le tarif de l'eau potable se décompose en une prime annuelle de débit (170 CHF/m³/h) et un prix de vente du volume d'eau (1.29 CHF/m³), ce qui revient grosso modo à 2-2.5 CHF/m³ pour ces deux utilisateurs; http://www.sig-ge.ch/img/documents/pdf/tarifs_reglements/eau/tarifs/tarif_oc.pdf (février 2011)

Toutefois, le quartier jouit de nombreux et vastes espaces verts: à l'avenir, les gains de vente d'eau d'arrosage pourraient donc être importants. L'arrosage des jardins du bâtiment B1 et de certains parcs de la rive droite sont d'ailleurs projetés et des études de faisabilité sont en cours¹. Le développement d'une telle prestation devra également être soigneusement étudié par l'exploitant, car il induit de nouvelles contraintes de gestion hydraulique du réseau.

C/ Bilan économique

Entre le 1^{er} avril 2010 et le 31 mars 2011, le bilan économique de l'exploitant est positif²: planifiés à 640 KCHF, les revenus réalisés leur sont supérieurs (860 KCHF). Il faut toutefois rester très prudent sur son interprétation, car il est en grande partie dû au fait que l'amortissement de l'investissement n'est pas pris en compte jusqu'en 2011.

En réalité, la quantité d'énergie vendue (environ 5.6 GWh) est deux fois plus faible que celle qui était planifiée, mais également 38 % en dessous de celle que les quatre bâtiments connectés auraient dû consommer par rapport aux puissances respectivement concessionnées (1'200 heures de fonctionnement équivalentes à puissance nominale).

9.4.2.4 Viabilité à moyen terme: repères et pistes

La viabilité du réseau GLN est définie par l'exploitant par un bilan économique neutre sur les trente années de financement du projet: cela signifie que l'ensemble des coûts engendrés doit être au minimum compensé par les recettes générées (taux de rendement nul). Le but est ici de discuter des conditions minimales dont il faudrait tenir compte pour que de tels réseaux puissent se réaliser. Définie de cette manière, il est bien entendu que la viabilité est théorique; la mise en place de systèmes énergétiques similaires, de type commerciaux, ont et auront généralement certaines exigences en termes de rendement financier.

A partir de l'année 2011 et d'après le scénario de base issu du modèle financier de l'exploitant (« 11-40 planifié »), le coût de l'énergie froid via le réseau GLN revient en moyenne à 13.5 cts (fig. 9-54). D'après le tarif mis en place, il a été vendu en 2010 à un prix moyen légèrement supérieur (15.4 cts; tableau 9-15). Etant du même ordre de grandeur, ils montrent que le modèle économique développé est globalement cohérent. Par contre, en tenant compte des conditions de fonctionnement constatées en 2010 (quantités d'énergie délivrée bien inférieures aux valeurs planifiées) et de leurs implications, nous estimons que les deux autres scénarios que nous avons proposés (« 11-40 réaliste-bas » et « 11-40 réaliste-haut ») semblent plus aptes à prendre en compte l'amortissement de l'investissement (qui représente une part prépondérante du coût de revient de l'énergie froid quel que soit le scénario envisagé), car ils sont plus représentatifs d'un fonctionnement probable du système au cours de années à venir.

Ne pouvant toutefois pas présager du développement et de l'utilisation réelle du réseau ces prochaines années, il subsiste actuellement bien trop d'incertitudes pour se prononcer avec assurance sur l'un ou l'autre de ces scénarios. Il n'en demeure pas moins que de ce point de vue économique, l'optimisation globale du système est impérative. D'après les dernières informations obtenues par l'exploitant, ce travail est en cours depuis le printemps 2011: les améliorations de fonctionnement constatées sont très encourageantes mais devront être analysées de plus près.

Pour le réseau GLN et les systèmes hydrothermiques en général, il apparaît clairement que les coûts majoritaires sont ceux de l'investissement. Pour que ces systèmes soient viables, des critères fondamentaux de faisabilité ainsi que des repères sur lesquels la réflexion devrait s'orienter doivent

¹ <http://www.ville-geneve.ch/themes/developpement-durable-energie/energie-climat/politique-energetique-climatique/gestion-rationnelle/eaux-recyclees-arrosage> (juillet 2011), <http://www.ville-geneve.ch> (juillet 2011), <http://www.sig-ge.ch> (février 2011)

² Uniquement sur la base des revenus issus de la vente d'énergie froid

être pris en compte. Dans un premier temps mis en évidence, ces critères sont par la suite mis en perspective et discutés sur la base de comparaisons avec les propriétés et conditions d'utilisation d'autres réseaux hydrothermiques existants ou en projet (cf. chap. 10.2.2).

9.4.2.5 Pistes de tarifications alternatives

Pour rappel, le modèle tarifaire adopté s'appuie sur la quantité d'énergie vendue et la puissance concessionnée par l'utilisateur: la prime annuelle de puissance (part fixe) est déterminée sur une puissance qui devrait garantir l'approvisionnement aux utilisateurs à 100 % en direct; la partie énergétique du tarif (part variable) est indexée sur la température de retour et est en partie représentative de la qualité d'énergie consommée. Le choix de ce modèle de tarification trouve probablement son explication dans des aspects liés à une tradition commerciale: producteur et distributeur d'électricité, l'exploitant s'inscrit dans une pratique de vente de l'énergie au kWh; d'autre part, ce choix s'explique par le concept d'approvisionnement qui a été retenu (en direct, 100 % via le lac).

Sur la base du retour d'expérience mené, ce modèle comporte deux points faibles:

- bien qu'il ait le mérite d'inciter les preneurs d'énergie froid à minimiser la mobilisation de débits primaires importants par une réduction du coût de l'énergie lorsque les niveaux de température de retour sont augmentés, son effet n'est actuellement pas manifeste (*tableau 9-10*). De plus, il paraît peu probable que les températures de retour puissent être supérieures à 16-17°C pour des bâtiments de conception ancienne¹,
- le modèle s'appuie sur la seule puissance de pointe, qui est souvent supérieure à la demande réelle maximum des bâtiments. De plus, il ne prend pas en compte la dynamique annuelle de la demande de puissance. La puissance maximum concessionnée, parfois trop élevée, est de plus réservée pour cet utilisateur tout au long de l'année, alors qu'il n'en a réellement besoin qu'en été.

L'adaptation de ce modèle tarifaire pourrait permettre de mieux intégrer les autres prestations possibles, inciter les preneurs d'énergie à utiliser de manière plus rationnelle l'eau pompée, mais aussi permettre d'amortir plus facilement les investissements consentis. Sans apporter de solution miracle, les points suivants fournissent quelques pistes:

- modulation de la tarification: la taxe de puissance mensuelle pourrait être proportionnelle à la puissance moyenne mensuelle demandée,
- tarification différenciée: établissement d'une taxe de puissance variable, préférentielle pour le froid de ruban que pour le froid de confort; sans modification du principe de la part variable,
- modification de la part variable: étant donné les niveaux des températures de retour constatés, une modification plus incitative de cette part pourrait être envisagée (léger abaissement des niveaux ou du tarif en vigueur),
- tarification basée sur le volume d'eau: l'exploitant se départit de la manière dont l'eau pompée est valorisée par l'utilisateur dans la boucle secondaire de distribution de ses bâtiments.

Notons encore que certains utilisateurs considèrent que les prestations de climatisation offertes sont relativement chères. Sans nous prononcer ici sur la réalité de ce point, notons que cette perception a également des conséquences négatives sur l'utilisation efficiente du réseau et sur sa viabilité.

¹ Malgré le fait que quelques nouveaux bâtiments qui seront connectés peuvent fonctionner à « haute température » (contribution partielle à la quantité totale d'énergie)

10 Développement et reproductibilité

Dans un premier temps, ce chapitre propose de dresser un court historique conduisant à l'émergence des systèmes renouvelables en réseau (réseaux hydrothermiques de types DLWC et DSWC) et les co-bénéfices qu'ils induisent.

Ensuite, en s'appuyant sur le retour d'expérience effectué dans ce travail et en comparant le système genevois avec d'autres systèmes similaires, il s'agit de dégager les conditions – techniques, politiques, financières, mais aussi socio-environnementales – pour lesquelles ces systèmes sont pertinents ainsi que les facteurs principaux de leur viabilité et de leur reproduction à plus large échelle. En effet, certains restent depuis longtemps au stade d'étude, voire de projet avancé: il y a donc un ensemble de raisons qui favorisent leur réussite (réalisation concrète et fonctionnement satisfaisant), ou au contraire qui concourent au fait qu'ils ne puissent pas voir le jour.

Finalement et sur la base des spécificités de la région genevoise, nous esquisserons quelques pistes pour l'intensification de la filière hydrothermique sur ce territoire.

10.1 Vers quels systèmes de climatisation ?

En Suisse comme au niveau européen, la demande en énergie froid explose et représente un marché en pleine expansion (*Santamouris et al., 2004*). Déjà très majoritairement représentés, les systèmes classiques peu efficaces (RAC ou CAC¹) sont les principaux responsables de l'accroissement du parc (*tableau 10-1*). Leur multiplication se traduit notamment par des pics de demande électrique estivaux qui posent un certain nombre de problèmes de gestion (coût, garantie de l'approvisionnement, dimensionnement, etc.), tout particulièrement lors d'épisodes caniculaires de forte demande (gestion de la demande électrique de pointe).

Face à la situation énergétique actuelle au niveau international et national, de nombreuses agglomérations réorientent leurs politiques sectorielles vers une diminution de la dépendance énergétique et une utilisation plus rationnelle et économe des énergies (fossiles et renouvelables). Dans ce sens, la multiplication de systèmes classiques de climatisation, très gourmands en électricité et souvent peu rationnels, ne représentent donc pas une solution durable. En revanche, la planification coordonnée des systèmes énergétiques de réseau (thermiques), bien plus efficaces que les systèmes classiques décentralisés, permet de mieux maîtriser la demande de froid et d'organiser le développement des filières de manière synergique (froid et chaud) au niveau des agglomérations, tout en apportant des avantages certains sur la gestion de l'approvisionnement électrique (stratégie thermo-électrique; *Faessler, 2011*).

En cela, les systèmes hydrothermiques constituent des alternatives très intéressantes, car ils présentent à la fois des potentiels productifs importants, des propriétés de rationalité énergétique avancées mais aussi de nombreux co-bénéfices. Toutefois, de par leur conception et des nombreux facteurs contribuant à l'inertie du marché de la climatisation, ils sont les héritiers d'une lente évolution des systèmes de froid classiques décentralisés suivie par celle des systèmes centralisés dans des zones urbaines de forte demande (*Harvey, 2006; Thévenot, 1978*). Le basculement de systèmes décentralisés vers des systèmes de réseau est fondamental. En effet, les systèmes centralisés créent un ensemble de conditions, certes non-suffisantes, mais néanmoins nécessaires et préalables à l'émergence de systèmes hydrothermiques.

¹ RAC « room air conditioning »; CAC « centralized air conditioning »

production	lieu	distribution	EER	coût de revient chf/kW _{froid}
climatiseur individuel	Europe	par pièce (RAC)	2.07 - 2.48	620 - 310 ¹
machine frigorifique		par bâtiment (CAC)	2.35 - 4.09	173 - 240 ¹
hydrothermique (en direct)	Hawaii	réseau (DC) ³	~ 2	246 ²
	Genève	GLN (DC) ³	~ 17	195 - 212 ²
			~ 9	168 - 176 ⁴

tableau 10-1 Coûts de revient annuels de la puissance froid installée (RAC, CAC) et concessionnée (réseaux) de différents systèmes de climatisation (Europe: Santamouris M. et al., 2004; Hawaii: State of Hawaii, 2002)

En s'appuyant sur l'ensemble du parc européen des systèmes de climatisation installés (RAC, CAC et DC), Santamouris et al. (2004) a montré que le coût de revient du kW_{froid} varie en fonction de la densité spatiale de la demande (tableau 10-1, fig. 10-1): il apparaît clairement que les systèmes en réseau (DC, renouvelable ou non) deviennent favorables sur les systèmes décentralisés à partir d'un certain seuil de densité, typique des centres urbains. De ce point de vue, les systèmes renouvelables en réseau (DLWC, DSWC) se présentent comme de sérieux concurrents.

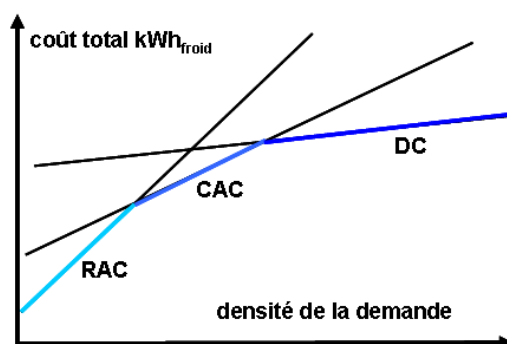


fig. 10-1 Coûts relatifs du kW_{froid} pour les différents systèmes de climatisations présents en Europe, exprimés en fonction de la densité de la demande

Notons toutefois que bien qu'ils soient moins efficaces, qu'ils aient des coûts de revient plus élevés et qu'ils n'apportent que peu de co-bénéfices comparés aux systèmes renouvelables en réseau, les systèmes décentralisés se justifient parfois en dessous d'un certain seuil de densité.

10.1.1 Systèmes classiques centralisés vs décentralisés

De manière générale, les prestations énergétiques délivrées par des réseaux thermiques (production centralisée) sont bien plus efficaces que celle apportées par des systèmes productifs dédiés à un seul bâtiment (production décentralisée). En termes d'efficacité énergétique et de sobriété environnementale, leur implantation à l'échelle d'un quartier représente donc des gains très significatifs. De plus, ils génèrent de nombreux co-bénéfices pour la région. Les technologies qui leurs sont liées ne sont pas plus complexes que pour des systèmes classiques décentralisés, car elles restent bâties autour de compétences d'ingénierie thermique et civile depuis longtemps acquises. Le caractère innovant de ces infrastructures réside donc plutôt dans des aspects organisationnels, de mise en lien de compétences diverses et de politiques volontaristes.

¹ Exprimé en chf, sur la base du cours moyen de l'Euro en 2004 (www.oanda.com)

² Exprimé en chf, sur la base du cours moyen du dollar américain en 2002 (www.oanda.com)

³ DC « district cooling »

⁴ Ces coûts de revient sont issus des scénarios proposés au chapitre 9.4.2

Pour voir apparaître des systèmes hydrothermiques, ce basculement de systèmes productifs décentralisés vers des systèmes de réseau est fondamental, car il crée en un ensemble de conditions nécessaires, mais non-suffisantes, pour leur émergence.

A/ Aspects exploitant et co-bénéfices pour la société: études Climespace

Deux études menées par l'exploitant du réseau de froid parisien *Climespace* (Merchat et al., 2009; Poeuf et al., 2010) démontrent clairement les bénéfices énergétiques et environnementaux d'un système centralisé de production classique (via machine frigorifique) par rapport à de nombreuses installations décentralisées. Pour cette étude, quatre bâtiments ont été successivement analysés avant puis après leur connection au réseau de froid. Des bâtiments équipés d'installations récentes, bien entretenues et dont le fonctionnement est continu tout au long de l'année ont été volontairement choisies, de manière à ce que les résultats obtenus soient fiables et représentatifs de gains potentiels minimaux reproductibles. La prestation froid fournie, qui comprend du froid de types ruban (datacenters, bloc opératoires, frigos) et confort (magasins, bureaux), est représentative de la structuration de la demande présente dans le centre-ville.

Sur deux ans de mesures en continu, les machines frigorifiques montrent une efficacité frigorifique moyenne de 2 (EER¹; *tableau 10-2*), bien plus faible par rapport au coefficient de performance (COP²) annoncé par les fabricants. Cela s'explique par la conjonction de plusieurs paramètres: moindre efficacité des machines frigorifiques à charge partielle (fonctionnement la plupart du temps), mauvais choix de régulation (débit fixe vs variables, ajustement des niveaux de température, etc.) et de matériel, maintenance insuffisante (en particulier celui des tours aéro-réfrigérées). L'efficacité de ces installations semble donc globalement représentative de la pratique actuelle, comme le confirment diverses études menées à Genève (instrumentation de plusieurs installations existantes; Faessler, 2009a) et sur le continent américain, où les efficacités sont sensiblement les mêmes (*information obtenue auprès de l'exploitant du réseau de Toronto en 2009; Enwave, 2008*).

bâtiment	année de mise en route	P _{installée} [kW]	P _{mov} utilisée [%]	EER _{dynamique} système	COP _{statique} MF
hôpital	2000	1'260	35	2	4.3
hôpital	1996	940	40	2.9	4.8
banque	1990	484	25	2.1	3.3
commerce	2008	776	30	0.8	3.9
EER _{moyen}				2	

tableau 10-2 EER_{moyens} de quatre installations parisiennes de production classique de froid (Merchat et al., 2009); mesures effectuées en continu durant deux ans

Comme expliqué ci-dessus, l'entreprise *Climespace* a comparé les performances de son réseau de froid avec celles des quatre bâtiments approvisionnés classiquement³. Pour la production centralisée, les gains d'efficacité sont les suivants:

- l'efficacité frigorifique (EER) est de 3.7, bien plus élevée qu'avec une production décentralisée. Elle se traduit par une diminution de 47 % de la consommation d'électricité,
- en été, la demande électrique moyenne est abaissée de moitié, soit de 62 MW_{él} (*tableau 10-3*). Cela est rendu possible à la fois par la mutualisation des besoins de froid et l'utilisation centralisée de machines frigorifiques très performantes qui fonctionnent toute le temps proche de

¹ Mesuré dans des conditions de fonctionnement réelles de la machine (dynamique)

² Mesuré sur une courte période et dans les conditions nominales de fonctionnement de la machine (statique)

³ Extrapolation à tous les bâtiments connectés au réseau sur la base des quatre bâtiments sélectionnés

leur capacité maximale; de plus, les condenseurs des machines frigorifiques sont presque tous refroidis avec l'eau de La Seine (hydrocondenseurs), ce qui accroît encore leurs performances. Pour comparaison, le réseau de Toronto influence positivement l'écrtage de la demande de pointe électrique de la ville, avec une diminution de 5 % de la charge électrique moyenne de la ville par rapport à la situation précédant son implémentation (*Metro DES Working Group, 1995*),

- les contributions directes (pertes de fluides frigorigènes) et indirectes (production électrique) à l'effet de serre diminuent également de manière importante: cumulées, les économies sont d'environ 59'000 tonneCO₂équ, ce qui représente 148 gCO₂équ/kWh_{froid}, dont 119 gCO₂équ/kWh_{froid} économisés pour la seule diminution de la consommation d'électricité dédiée.

production	centralisée (réseau)	décentralisée (bâtiments)
puissance souscrite [MW] _{froid}	305	
consommation [GWh/an] _{froid}	398	
puissance installée [MW] _{froid}	236	366
EER _{moyen mesuré}	3.7	2
consommation [GWh/an] _{él}	107.5	202
demande de pointe estivale moyenne [MW] _{él}	56	118
ratio de pertes de fluide réfrigérant	2 %	12.6 %
émissions CO ₂ évitées (fluides) [tonne CO ₂ équ] ¹	11'444	
émissions CO ₂ évitées (électricité) [tonne CO ₂ équ]	47'285	

tableau 10-3 Comparaison des performances mesurées entre une production centralisée et décentralisée (Poeuf et al., 2010); mesures effectuées durant deux ans

B/ Avantages financiers pour l'utilisateur: étude de l'agence internationale de l'énergie (IEA)

Les aspects énergétiques et environnementaux, largement en faveur d'une production centralisée, ne constituent souvent pas des arguments suffisants pour qu'un utilisateur potentiel décide de connecter son bâtiment à ce type de réseau. Il faut garder à l'esprit que pour les institutions occupant des bâtiments de grande taille, la gestion de l'énergie n'est de loin pas une priorité. En revanche, les prestations énergétiques doivent impérativement répondre à la satisfaction des usagers et peser le moins lourd possible dans les charges financières de l'institution.

L'IEA montre clairement que les gains financiers sont importants lorsque le bâtiment est approvisionné via un réseau de froid par un exploitant extérieur (*Skagestad et al., 2002*). Le bâtiment administratif étudié est situé à Houston (USA): construit en 1961, sa surface climatisée est de 17'200 m². En 2001, son système de production classique de froid doit être renouvelé et représente un investissement important, d'environ 950 Kchf (\$ 2001²) pour une puissance frigorifique installée de 1'758 kW.

A ce moment, ce lourd investissement, inévitable, et la présence opportune d'un réseau de froid dans le quartier ont conjointement joué en la faveur de sa connexion:

¹ Facteur de conversion européen = 500 g CO₂ équ/kWh_{él}

² Exprimé en chf, sur la base du cours moyen du dollar américain en 2001 (www.oanda.com)

- coût annuel global lié à une production décentralisée (avant connexion): 291 KCHF,
- coûts de conversion liés à la connexion: ils s'élèvent à 403 KCHF: équipements de la sous-station et adaptation de la distribution dans le bâtiment (remplacement de vannes 3-voies par des vannes 2-voies, remplacement des pompes de distribution, etc.),
- coût annuel global lié à une production centralisée (payé à l'exploitant): 142 KCHF.

Sur la base du fonctionnement observé durant la première année d'approvisionnement via ce réseau, cette étude montre que les coûts spécifiques de connexion (coûts de conversion) peuvent être amortis par l'utilisateur en moins de trois ans, ce qui représente pour lui une bonne opportunité commerciale.

10.1.2 Systèmes centralisés hydrothermiques et classiques

Comme le montrent les études de cas explicitées ci-dessus, les systèmes de réseaux sont plus efficaces que les systèmes de production décentralisés: constituant une évolution avancée de ces derniers, les systèmes hydrothermiques démontrent des efficacités énergétiques et environnementales encore supérieures.

Dans ce chapitre, les résultats de plusieurs réseaux existants sont présentés et démontrent clairement leurs avantages. De plus, la comparaison du système Merck-Serono - GLN avec ces systèmes similaires (existants ou en projet) permet de mettre en évidence les perspectives d'amélioration du système genevois en termes d'efficacité, de même que les potentialités de développement de cette filière, tant au niveau régional qu'à plus large échelle.

10.1.2.1 Aspects économiques

Le bureau d'ingénieurs *Makaii Ocean Engineering* basé à Hawaï possède une expérience incomparable dans le domaine des réseaux hydrothermiques. Il a grandement contribué à la réalisation des réseaux de Toronto et de l'Université de Cornell, mais a également participé à une étude de faisabilité détaillée pour l'implantation de systèmes similaires sur l'archipel d'Hawaï (*State of Hawaii, 2002*).

En s'appuyant sur six études de cas au total, ce bureau a comparé les coûts d'un système hydrothermique de type DSWC avec ceux d'un système de climatisation classique (production de froid décentralisée par machines frigorifiques dédiées à chaque bâtiment). Cette évaluation a été effectuée sur la base de la minimisation conjointe des coûts et des consommations d'énergie.

Au niveau de la structuration des coûts, il ressort que l'investissement initial à consentir constitue le poste déterminant (*fig. 10-2*): son importance relative dépend de la distance horizontale d'accès à la ressource et de sa profondeur, de l'emplacement et de la longueur du réseau de distribution terrestre, mais aussi du dimensionnement des conduites et des contraintes liées à leur pose. En comparaison, les coûts des deux autres postes principaux (opération/maintenance et achat d'électricité) sont faibles et généralement du même ordre de grandeur.

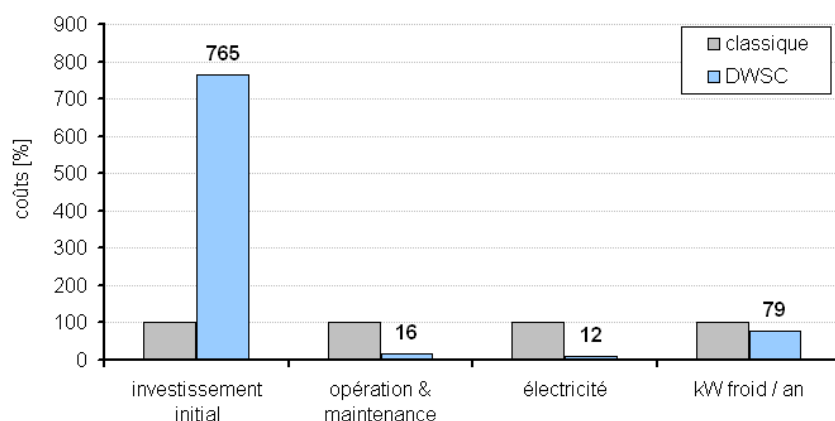


fig. 10-2 Répartition des coûts de revient annuels sur 20 ans du réseau de Waikiki (State of Hawaii, 2002)

Parmi les six sites étudiés à Hawaii, trois d'entre eux se sont révélés trop coûteux, principalement en raison de l'emplacement du pompage (profondeur, longueur des conduites d'adduction, etc.). En revanche, le gain économique est important pour les trois autres, de l'ordre de 20 % après 20 ans (*tableau 10-4*); les économies d'électricité correspondantes sont de l'ordre de 90 %.

Il ressort également d'une analyse de sensibilité économique (*annexe 21*) intégrant de nombreux paramètres (durée de vie, taux d'intérêts, coûts imprévus, indexation du coût de l'électricité, taxes, modèles d'amortissement, incitation des services publics, crédits d'impôts sur l'investissement, taux d'imposition à la production, impôts fonciers, tarifs d'assurances) que les potentiels d'économie des systèmes de type DSWC peuvent atteindre, dans les meilleurs cas, 60 % par rapport aux systèmes classiques. De plus, il ressort également que les incitations économiques semblent occuper un poste prépondérant et déterminant sur ces économies.

Bien que la société *Makaii Ocean Engineering* Makaii ait fait la preuve de ses compétences en ingénierie de projet à travers les réalisations remarquables des réseaux de Toronto et de l'Université de Cornell, il faut rester prudent sur la reproductibilité de leurs succès pour d'autres systèmes hydrothermiques, car les conditions de réussite diffèrent en fonction des nombreux paramètres qui les caractérisent.

	production décentralisée (MF)	DSWC	
	coût de revient du kW _{froid} /an [chf] ¹	P _{installée} [MW] _{froid}	
Waikiki	246	195	29.3
Honolulu	246	196	29.8
Kakaako	247	212	25.5

tableau 10-4 Coûts annuels de la puissance de froid pour trois réseaux à Hawaii (State of Hawaii, 2002)

10.1.2.2 Aspects énergétiques et co-bénéfices environnementaux

Afin de déterminer les potentialités d'amélioration du réseau GLN, une comparaison est effectuée avec le réseau hydrothermique de l'Université de Cornell (en fonction depuis plus de dix ans) et le réseau parisien Climespace (production hybride²: classique et hydrothermique; cf. *chap. 3.4*).

¹ Exprimé en chf, sur la base du cours moyen du dollar américain en 2002 (www.oanda.com); coût actualisé à 20 ans

² Pour ce réseau parisien, la production est majoritairement classique (machines frigorifiques): en plus d'évacuer la chaleur des condenseurs, l'eau de La Seine est utilisée pour la production de froid « en direct » durant la période froide de l'année

Les résultats les plus significatifs du réseau de Cornell sont les suivants (*tableau 10-5*):

- les économies annuelles d'électricité qui ont été réalisées depuis la mise en service sont considérables, en moyenne de 23.2 GWh/an pour une production d'énergie froid de 136 GWh/an (comparaison avec la production par machine frigorifique de 1990),
- au cours de ses dix années de fonctionnement, l'efficacité frigorifique annuelle moyenne est d'environ 20 pour la climatisation des bâtiments de l'ensemble du site (*Cornell Utilities, 1998-2008*).

	GLN	Cornell	Climespace
puissance nominale MW	15.7	71	236
EER réseau / décentralisé	6.8 ¹ / 3	23.6 ² / 4	3.7 / 1.97
économie électricité %	66 ³	80	47
économie électricité GWh_{él}/an	1.22	23.2	94.5
économie électricité kWh_{él}/kW_{froid}	75	330	400
économie d'eau l/kWh_{froid}	12	nd	
diminution tonne CO₂ équ⁴	610	11'600	47'200

tableau 10-5 Efficacité énergétique et diminution des émissions de CO₂ de trois réseaux de froid

Comparées à celles des réseaux français et américain, les performances actuelles du réseau GLN sont nettement inférieures et sont principalement liées à sa « jeunesse »: parallèlement à la quantité d'énergie délivrée qui devrait considérablement augmenter ces prochaines années, son exploitation devrait beaucoup s'améliorer (*cf. chap. 9.2, 9.3 et 9.4*).

10.2 Conditions de réussite pour l'implantation de systèmes hydrothermiques

Les divers retours d'expérience de réseaux hydrothermiques à travers le monde, existants ou planifiés, sont riches d'enseignements. Chacun d'eux met en évidence des points-clés ou des particularités qui ont contribué - ou y contribueront espérons-le !- à leur réussite. Les avantages et contraintes à prendre en compte sont nombreux et en partie les mêmes que pour des réseaux de froid classique, à la différence qu'ils sont souvent plus marqués et/ou plus contraignants pour les systèmes renouvelables hydrothermiques.

Ces avantages et contraintes sont mis en évidence et discutés à partir des coûts de revient de la puissance frigorifique installée et de l'énergie de froid de chacun des systèmes comparés.

10.2.1 Caractéristiques déterminantes

Avant cela, il est nécessaire de revenir sur les caractéristiques principales et les spécificités propres de ces réseaux hydrothermiques (*tableau 10-6*), car les choix qui sont opérés durant la phase d'étude conditionnent leur faisabilité. Bien que ces réseaux aient en commun l'utilisation d'eaux de surface comme ressource, une vocation commerciale (réseaux non-dédiés) et l'approvisionnement en énergie froid de bâtiments, ils se distinguent fondamentalement sur les points suivants:

¹ Moyenne mesurée du 1^{er} avril 2010 au 31 mars 2011

² Moyenne mesurée sur 8 ans (2001-2008)

³ Valeur retenue pour les bâtiments connectés au réseau ($EER_{MF} = 3$) sur la base des différentes mesures effectuées sur les parcs genevois (Faessler, 2009a) et parisien (Merchat et al., 2009)

⁴ Liée à la consommation d'électricité: facteur européen = 500 g CO₂ équ/kWh_{él}

- au niveau du pompage, seul le réseau d'Hawaii est océanique, donc très profond: les coûts des infrastructures immergées y est bien plus élevé (longueur, complexité de la mise en oeuvre, sensibilité accrue des matériaux à l'eau salée) et l'énergie de pompage nécessaire au relevage des eaux y est bien plus importante que pour les trois autres réseaux lacustres,
- la conception des réseaux et de l'approvisionnement en énergie froid est très variable et a des incidences prépondérantes sur les points suivants:
 1. le réseau d'Hawaii approvisionne les bâtiments uniquement via la ressource renouvelable (production monovalente) tandis que les réseaux genevois et canadiens le font via un système bivalent (renouvelable et classique),
 2. pour les systèmes monovalents, il va de soi que la prestation de froid est entièrement assurée « en direct ». En revanche, la situation est variable pour les deux systèmes bivalents: à Genève, il a été prévu que le pompage lacustre couvre la totalité de la production de froid (minimisation du recours aux machines frigorifiques), alors qu'à Toronto, le pompage lacustre a été dimensionné dès le départ pour ne contribuer que partiellement à la capacité totale de production du système,
 3. l'emplacement des machines frigorifiques au sein des deux systèmes bivalents n'est pas identique: à Toronto, elles font partie intégrante du réseau (sous la responsabilité et à charge de l'exploitant), tandis qu'à Genève, elles sont décentralisées dans chacun des bâtiments connectés (sous la responsabilité et à charge des utilisateurs),
 4. le nombre annuel d'heures d'utilisation de la puissance nominale renouvelable, initialement planifié par les exploitants respectifs, varie également fortement: d'environ 1'000 heures pour les systèmes suisses, il s'élève à 3'000 heures à Toronto et même à 5'400 heures à Hawaii,
- outre l'approvisionnement en énergie froid, des prestations supplémentaires sont diversement disponibles: chauffage, eaux d'arrosage (aspersion et condensation¹) et industrielles, développement d'activités économiques connexes (p. ex. parc biotechnologique) mais encore maintenance de la qualité des eaux (rinçage de canaux, ports, etc.).

réseaux	pompage	climatisation				prestations secondaires
		$P_{\text{renouvelable}}^2$ h/an	production	MF	$P_{\text{renouvelable}}/P_{\text{système}}$ prévue [%]	
GLN	lac 37 m	1'200	bivalente sans stockage	bâtiment	100	chauffage, eau d'arrosage
Toronto	lac 83 m	3'000	bivalente avec stockage	réseau	17	eau d'arrosage
Hawaii	océan 1'000 m	5'400	monovalente avec stockage	-	100	froid industriel arrosage par condensation rinçage: port, canaux biotechnologie marine

tableau 10-6 Principales propriétés de trois réseaux hydrothermiques commerciaux (non-dédiés)

¹ A Hawaii, certains parcs et golfs sont arrosés par ce principe original: l'humidité de l'air se condense grâce à la fraîcheur de leurs sols (induite par circulation d'eau froide océanique dans des tubes enterrés)

² Ce nombre d'heures d'utilisation est comptabilisé sur la base de la puissance nominale

10.2.2 Discussion: comparaison entre les différents systèmes

Pour comparer la situation du réseau GLN avec différents réseaux hydrothermiques, le coût de revient annuel moyen de la puissance frigorifique installée et celui de l'énergie froid délivrée sont mis en perspective avec ceux de différents systèmes hydrothermiques existants ou en construction. Cette comparaison économique ne constitue toutefois qu'un point de départ: en effet, la discussion ci-dessous s'appuie sur les principales contraintes et co-bénéfices relatifs à chacun d'eux. Elle permettra de mettre en évidence les critères de faisabilité fondamentaux dont il faut tenir compte pour réaliser et exploiter de tels systèmes avec succès, et surtout de manière rationnelle.

A/ Coûts de revient (énergie et puissance)

Le *tableau 10-7* ci-dessous montre clairement que le coût de revient de l'énergie froid via le réseau GLN se tient dans la fourchette moyenne de celui des réseaux hydrothermiques de froid que nous avons pris en compte. Cet ordre de grandeur satisfaisant constitue une première indication du développement pertinent du réseau GLN (cohérence globale du modèle financier développé). Malgré le fait que le réseau GLN soit encore dans une phase d'apprentissage et de montée en puissance, ceci constitue un signe clairement positif et très encourageant. Précisons tout de suite que cela n'aurait pas été possible en se limitant aux seuls facteurs techniques (optimisation): la prise en compte de l'importance des aspects institutionnels a permis d'amorcer des changements dans les relations entre les acteurs (notamment entre l'exploitant, l'Etat, les partenaires privés, les utilisateurs et les académiques), en ouvrant la porte à d'autres projets similaires de grande ampleur. De ces points de vue, le réseau GLN apparaît comme une innovation réussie, et ce quelles que soient les améliorations qu'il connaîtra probablement à l'avenir.

Comme nous l'avons discuté au *chapitre 9.4.2*, le coût de revient planifié par l'exploitant nous a paru très ambitieux: toutefois, les nettes améliorations en cours laissent présager un abaissement probable du coût de revient de l'énergie froid pour l'avenir: il pourrait se situer dans une fourchette comprise entre 14-16 cts, ce qui reste légèrement plus élevé que pour les systèmes similaires.

coût de revient	GLN planifié ¹	GLN réaliste-haut ¹	Hawaii	Toronto
[cts/kWh] _{froid}	13.5	16.7	13.4	13.3

tableau 10-7 Coût de revient de l'énergie froid pour trois réseaux hydrothermiques (deux scénarios sont pris en compte pour le réseau GLN)

En revanche et parmi les systèmes considérés, la dispersion du coût de revient de la puissance frigorifique installée (*fig. 10-3*) est plus importante que celle du coût de revient de l'énergie: c'est donc à ce niveau que les caractéristiques fondamentales de chacun de ces réseaux se font le plus ressentir. Notons encore que le coût de revient de la puissance installée pour ces trois systèmes renouvelables (*en bleu*) reste bien en dessous de celui des systèmes classiques décentralisés (*en vert*).

¹ Les deux scénarios du réseau GLN sont définis au chapitre 9.4.2

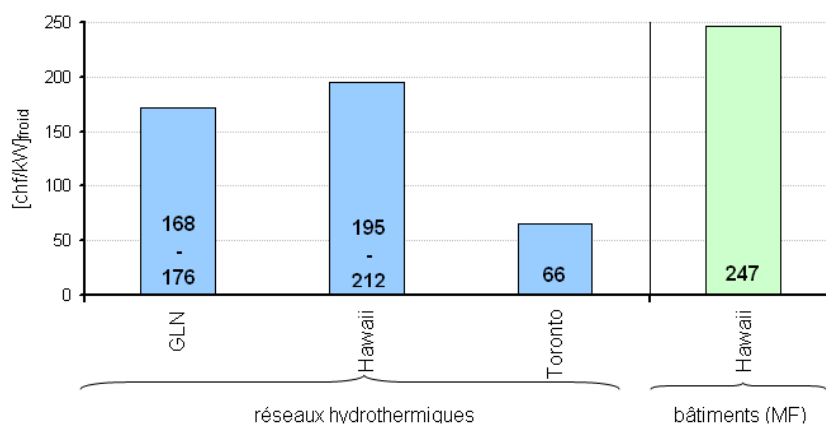


fig. 10-3 Coût de revient exprimé en CHF de la puissance frigorifique pour trois réseaux hydrothermiques (en bleu); comparaison avec une production classique décentralisée pour l'un d'entre eux (en vert)

B/ Discussion

Tout d'abord, il nous semble que l'exploitation de ces systèmes hydrothermiques devrait être abordée sous un angle global, autrement dit en tant que système multi-ressources: bien que leur destination première soit l'approvisionnement en énergie thermique (froid et chaud), un ensemble de prestations « matière » permet de rentabiliser plus facilement le lourd investissement à consentir.

Comparaison avec le système de Toronto

A Toronto, le faible coût de revient relatif de la puissance frigorifique installée est lié à cette prise en compte conjointe de valorisation « énergie » et « matière »: les coûts d'investissement liés au réseau d'adduction d'eau profonde (réseau lacustre, station de pompage et sous-station principale) ont été pris en charge par le prestataire d'énergie mais aussi par les collectivités locales pour leur approvisionnement en eau potable. En cela, la mutualisation des coûts à travers ce type de partenariat public-privé montre son efficacité, sans oublier que cette forte implication des pouvoirs publics, qui intervient très tôt dans la phase de projet, joue un rôle moteur pour l'acceptation du projet par l'ensemble des acteurs impliqués et constitue un gage de confiance pour les futurs utilisateurs. Il va de soi que l'économie d'échelle est marquée à Toronto, car la puissance de production de froid installée est plus de dix fois supérieure à celle du réseau GLN.

Une autre raison qui explique le bas coût de revient de la puissance frigorifique installée à Toronto est la manière dont est intégrée puis valorisée la puissance renouvelable installée (via le pompage lacustre): la production est en effet bivalente, majoritairement classique (environ deux tiers de la puissance de production installée est celle de machines frigorifiques). Ce choix, qui offre l'avantage indéniable de se départir de l'éventuelle fluctuation des niveaux de température de la ressource et garantit ainsi le niveau de température du fluide distribué quelles que soient les conditions extérieures, permet aussi de maximiser la durée d'utilisation de la puissance renouvelable installée (environ 3'000 h/an équivalente à puissance nominale): cette dernière est utilisée comme production de type ruban, les machines frigorifiques n'intervenant qu'en aval comme appoint (abaissement du niveau de température du fluide distribué et couverture des demandes de fortes puissances). Bien que le fluide soit distribué à très basse température (3.3°C) et que la prestation de confort soit peu rationnelle (hauts niveaux d'exigence et de sécurité), cette manière de procéder permet de rentabiliser l'important investissement lié au seul coût de la puissance renouvelable, tout en sécurisant l'approvisionnement.

Cette stratégie de production bivalente est également appliquée à Genève, mais son concept diffère par plusieurs points. Actuellement, la température du fluide délivré à l'utilisateur n'est pas garantie, et c'est à lui que revient le choix de recourir ou non à une production additionnelle via ses machines frigorifiques: ce choix s'explique d'une part par la volonté initiale de l'exploitation de délivrer une prestation 100 % renouvelable, et d'autre part par le fait que le dimensionnement de la puissance

renouvelable concessionnée est effectué sur la puissance de pointe. Cela dit, les problèmes de stabilité thermique de la ressource (élévation fréquente des niveaux de température) et de limitation de la puissance délivrable via le lac se font quand même ressentir au niveau de la gestion du réseau primaire. De plus, cette stratégie empêche de maximiser l'utilisation de la puissance renouvelable (< 900 h/an équivalentes à puissance nominale pour les quatre bâtiments actuellement connectés).

La stratégie genevoise est plutôt orientée « puissance », car le dimensionnement est avant tout calé sur la couverture des besoins de puissance des bâtiments (sécurité de l'approvisionnement) que sur la valorisation énergétique de sa ressource renouvelable (stratégie « énergie », cas de Toronto): cela nous apparaît comme étant l'une des principales raisons qui conditionne le coût de revient relativement élevé de la puissance de froid du système genevois. De plus, cette dernière n'intègre pas la puissance des machines frigorifiques, qui reste à charge des utilisateurs: ainsi, le coût de revient « réel » de la puissance de production totale est encore sous-estimé.

Cela dit, notre position s'arrête sur le choix d'un système bivalent, car il nous apparaît comme étant le plus souple et celui qui offre le plus d'avantages, à condition qu'il soit basé sur une stratégie d'approvisionnement adéquate: pour cela, faut prendre le temps de se poser les bonnes questions très tôt dans la phase de projet, que ce soit en termes de dimensionnement (proportions relatives des puissances renouvelables et classiques), de leurs durées d'utilisations relatives (puissance vs énergie), mais aussi pour la prise en charge de la production. L'une d'entre elles est l'emplacement des machines frigorifiques: elles peuvent être soit centralisées (cas de Toronto, où l'exploitant délivre une prestation complète aux utilisateurs en maîtrisant l'entier de la production) ou décentralisées (cas de Genève), où la production classique additionnelle est gérée par chaque utilisateur au niveau de son bâtiment. A nouveau notre choix se porterait sur une solution centralisée, pour laquelle les coûts sont abaissés et la gestion simplifiée: à Genève, cela implique qu'il faudrait trouver un emplacement adéquat, vers le début de réseau de distribution, qui permettrait d'accueillir les installations de production classiques complémentaires. Il faut noter que cela doit se faire dans le cadre de discussions étroites entre les utilisateurs et l'exploitant, car cette substitution de la production induit également certaines problématiques (pertes d'emplois, réactivité opérationnelle, etc.). La capacité de production classique d'un bâtiment situé en début de réseau pourrait également être réallouée pour l'approvisionnement du réseau. Pour ces deux alternatives, les avantages seraient nombreux, en particulier en termes de gestion opérationnelle et d'efficacité énergétique.

Quoi qu'il en soit, il ressort que la puissance renouvelable ne peut être rentabilisée que par une maximisation des ventes d'énergie: elles passent soit par le recours à un système bivalent (utilisation en ruban de la puissance renouvelable), soit par un accroissement de la proportion des prestations ruban (datacenters, réfrigérateurs, etc.) sur la prestation de confort. Dans ces deux cas, la durée de vie escomptée du système de production renouvelable (60-100 ans), qui est bien supérieure à celle de systèmes de production classique (20-30 ans), constitue un argument de poids en leur faveur: il n'est toutefois pas suffisamment pris en compte, puisque dans les deux situations comparées (canadiennes et suisses), le modèle financier n'est basé que sur une durée de 30 ans. De plus, des prestations secondaires, comme la vente d'eau d'arrosage à Genève mais aussi de chaleur, mériteraient d'être intégrées à la réflexion pour le financement global du système, en tant que système multi-ressources plutôt qu'en ne tenant compte que de la seule prestation de climatisation. Les conditions climatiques locales présentes à Genève nécessitent en effet une longue période de chauffage de bâtiments: cette demande énergétique constitue une opportunité de prestation secondaire, mais son application est effectivement plus contraignante (immeuble à hautes performances énergétiques, neufs ou rénovés) que pour la climatisation (des immeubles existants peuvent être connectés après des adaptations techniques mineures).

Comparaison avec le système d'Hawaii

La situation est quelque peu différente pour les réseaux hydrothermiques dont la ressource est plus profonde (mer, océan, au minimum 500-600 m prof.). Pour eux, les surcoûts liés aux installations de

pompage sont encore plus considérables: les matériaux sont beaucoup plus chers (corrosion par l'eau salée), le réseau immergé plus long et plus profond, et l'énergie de pompage plus importante. Les données relatives au projet de réseau à Hawaii montrent que le coût de revient de la puissance frigorifique renouvelable installée est environ 20 % supérieur à celui du système genevois.

Notons tout de suite que les revenus issus des prestations secondaires ne sont pas intégrés au modèle financier hawaïen. Cela dit, les services rendus sont nombreux et pourraient être pris en compte, mais nous n'avons malheureusement pas d'indication sur les montants qu'ils pourraient générer. Il semble que ces prestations secondaires (froid industriel, arrosage de parcs et de golf par condensation, rinçage du port et de canaux attenants) sont mentionnées dans ce projet comme co-bénéfices « non-monétarisés » pour les collectivités locales.

Le coût de revient de ce projet a toutefois été estimé comme viable par les responsables hawaïen pour décider de lancer la construction du réseau (en cours). De manière encore plus marquée qu'à Toronto, le concept de ce réseau s'appuie sur une durée d'utilisation très importante de la puissance renouvelable (env. 5'400 h/an équivalentes à puissance nominale). Cette durée s'explique par trois raisons spécifiques au cas hawaïen:

- géographique: Hawaii se trouvant sous des latitudes élevées, la demande de climatisation est effective tout au long de l'année,
- prestations de climatisation: les conditions climatiques requièrent à la fois la prestation de confort mais aussi la déshumidification des locaux,
- concept adopté: étant donné l'importance des surcoûts des installations de pompage, une production de type monovalente (100 % renouvelable) avec stockage d'énergie froid a été retenue. En effet, une production additionnelle via des machines frigorifiques se serait avérée prohibitive (*fig. 10-3*); l'option de stockage permet de parer à d'éventuelles instabilités thermiques de la ressource (rares mais possible même à grandes profondeurs) et d'assurer la prestation de confort même pour les demande de pointes, avec l'avantage décisif de réduire légèrement la puissance totale qu'il est nécessaire d'installer.

L'intérêt de ce système réside à notre avis dans les choix stratégiques qui ont été opérés durant la phase de projet, et sur la volonté des différents acteurs à le mener à bien en dépit des contraintes financières que présentent un pompage profond en eau salée. En s'appuyant sur l'expérience acquise durant le montage du projet de Toronto, le bureau Makaii, également en charge du projet hawaïen, a fait le choix d'une production renouvelable, monovalente, mais en étant pleinement au fait de la nécessité de maximiser sa valorisation: en couplant la production de froid « en direct » à une source de froid additionnelle (en l'occurrence un stockage) qui tire parti du système de pompage lui-même, le coût global de la puissance frigorifique devient bien inférieur à celui qu'il aurait coûté en ajoutant une production additionnelle classique par machine frigorifique.

C/ Co-bénéfices

Comparés à un système classique de climatisation, ces systèmes sont beaucoup plus efficaces (aspects énergétiques, environnementaux et économiques) et offrent des avantages aux utilisateurs, à l'exploitant, mais aussi à la société dans son ensemble (*Gilmour et al., 2008; Metro DES Working Group, 1995; Santamouris et al., 2004*). Bien que n'étant pas intégrés dans le coût de revient de la puissance frigorifique installée, les multiples co-bénéfices induits par l'implémentation de tels systèmes ont une influence certaine sur l'abaissement de certains coûts imputés aux collectivités locales (externalités positives). Pour ces dernières, ces systèmes sont donc à la fois bénéfiques et avantageux, notamment par la diversification de l'approvisionnement énergétique, la relocalisation des flux financiers, tant du point de vue de l'achat d'énergie que de celui de l'investissement, mais aussi le développement local de compétences d'ingénierie, la

génération d'emplois directs et indirects, sans oublier des gains certains en terme d'image (Skagestad et al., 2002).

Sans prétendre dresser une liste exhaustive des co-bénéfices, nous proposons ci-dessous ceux des qui nous semblent être dignes d'intérêts:

- environnementaux, santé publique:

1. les impacts directs et indirects sur le cycle de l'eau diminuent de manière importante: premièrement, la consommation d'eau potable liée à la suppressions/diminution du nombre de tours aéro-réfrigérées est donc directement et fortement réduite; deuxièmement, la réduction de la consommation d'électricité réduit la pression sur la production électrique, et en cascade sur les écosystèmes impliqués dans ces systèmes (notamment hydro-électrique). Finalement, une stratégie de production énergétique synergique, intégrant la production thermique de chaud et de froid ainsi que la valorisation de rejets de chaleur fatale existants permet de minimiser les impacts thermiques sur l'environnement aquatique régional,
2. l'amélioration de la qualité de l'air est effective au niveau local, par la suppression/diminution du nombre de tours aéro-réfrigérées (réduction du risque de prolifération de légionelles pathogènes) potentiellement sources d'importants et graves risques sanitaires (*Légionella*, annexe 22), et par la diminution des émissions de NO_x et PM10 dans le cas d'une production d'électricité à partir d'agents fossiles. Au niveau global, les émissions de CO₂ sont drastiquement réduites, d'une part directement grâce à une diminution plus ou moins massive des pertes de fluides frigorigènes (CFC) en fonction du degré d'utilisation des machines frigorifiques, et d'autre part indirectement par la diminution de la consommation d'électricité pour la production de froid,

- énergie et gestion du réseau:

1. la production de froid n'étant plus assurée par des machines frigorifiques, la consommation spécifique d'électricité consommée diminue drastiquement. A l'échelle d'une agglomération, ce type de système contribue positivement à la gestion de la demande électrique (demand side management): dans le cadre d'une stratégie thermo-électrique à l'échelle régionale (Faessler, 2011), le développement de ces réseaux constitue donc une opportunité significative pour améliorer et faciliter la gestion de la demande de pointe (écrêtage),
2. l'énergie froid issue de la valorisation d'une ressource renouvelable locale (p. ex. le lac) n'a plus à être produite via de l'électricité issue de filières non-renouvelables (p. ex. nucléaire, centrales fossiles ou hydroélectriques). Cette relocalisation partielle de la production d'énergie froid permet également d'améliorer la maîtrise et la sécurité de l'approvisionnement,
3. la gestion centralisée du réseau (ensemble des sous-stations des bâtiments connectés) est beaucoup plus efficace que si la production de froid était gérée de manière autonome et indépendante par chaque utilisateur (systèmes décentralisés): les éventuelles pannes et interruptions sont gérées et assumées par l'exploitant 24h/24 et ce 365 jours par an. Bien que rares, les interruptions de service sont généralement de courte durée; au besoin et pour pallier cela, l'exploitant peut installer une machine frigorifique délocalisée dans le bâtiment d'un utilisateur qui nécessite une garantie absolue de la prestation (p. ex. pour des datacenters sensibles),
4. les activités de maintenance sont très fortement allégées: les réglages et révisions programmées des machines frigorifiques (nettoyage, ramonage, lubrification) pris en charge par l'exploitant ne sont plus/moins nécessaires, et l'entretien des échangeurs de chaleur est beaucoup plus simple (système statique); le renouvellement des consommables (suivi, achat et changement d'un ensemble de petites pièces: joints, valves, moteurs) diminue également

très fortement, car la conception des échangeurs de chaleur est beaucoup plus simple et leur fonctionnement moins sollicitant que celui d'une machine frigorifique,

5. en termes de planification énergétique, les réseaux de chaleur, conçus de manière à pouvoir être étendus, offrent beaucoup plus de souplesse que des systèmes classiques décentralisés. En permettant une approche rationnelle de la gestion énergétique au niveau du quartier voire de la ville, ils constituent un atout essentiel pour le développement de centres urbains modernes,

- aspects économiques:

1. l'investissement est généralement centralisé, la plupart du temps assuré par l'exploitant du réseau. Les machines frigorifiques n'étant plus nécessaires dans chaque bâtiment, les services techniques du bâtiment sont ainsi libérés de la charge de temps, d'argent, de personnels et de compétences nécessaires à l'exploitation du système productif,
2. pour la production de l'énergie froide, le prix d'achat moyen de l'énergie électrique dédiée (14-15 cts à Genève) généralement pris en compte est souvent inférieur à celle que doit acheter l'exploitant du réseau durant les heures de pointe (jusqu'à 2 chf). Ainsi, la réduction de consommation électrique liée à l'amélioration de l'efficacité frigorifique permet à l'exploitant de minimiser l'achat de grands volumes d'électricité à des prix prohibitifs sur le marché spot¹,
3. pour les utilisateurs, la mise en place des installations nécessaires à leur connexion à un réseau apporte de la plus-value à leurs bâtiments. De plus, la diminution de l'espace nécessaire dédié à la production d'énergie est notable et peut être valorisé pour d'autres usages ou encore loué; en particulier, la possibilité de libérer de l'espace en toiture (suppression des tours aéro-réfrigérées) peut permettre sa valorisation (p. ex. surélévation, systèmes de production d'eau chaude sanitaire et/ou d'électricité, terrasse, etc.),
4. le coût de l'assurance bâtiment de l'utilisateur diminue, car l'utilisation de produits dangereux (gaz, mazout, CFC, huiles, etc.) n'est plus nécessaire. L'exploitation est de ce point de vue bien moins risquée,
5. au regard des autres systèmes de climatisation disponibles dans la région, cette nouvelle infrastructure offre à l'exploitant la possibilité de proposer une prestation alternative et compétitive. La génération de contrats à longs termes (p. ex. 10 ans au minimum pour le réseau GLN) lui garantit des gains réguliers, indispensables pour planifier avec assurance le déploiement de ses activités et prestations. Ainsi, le prix de l'énergie peut être mieux contrôlé par l'exploitant (diminution de la dépendance à la variation des coûts de production de l'électricité) et sa stabilité constitue un argument fort pour inciter la connexion de bâtiments,
6. les investissements consentis, effectués au niveau régional, génèrent des emplois locaux et capturent une partie des flux d'argent (achat d'énergie à l'étranger) par la valorisation de la ressource locale. A Toronto, il a été estimé que la relocalisation de ces flux monétaires, de par leur passage par plusieurs agents locaux, génèrent le double de bénéfice,

- infrastructures et attractivité:

1. le développement de telles infrastructures constitue une valeur ajoutée certaine en termes d'attractivité. De plus, les réseaux thermiques ont des durées de vie escomptées plus longues que celles de systèmes classiques; en particulier, celle des systèmes hydrothermiques est

¹ Ce point particulier mériterait d'être étudié, car nous pensons que sa contribution sur le coût de revient de l'énergie froide est probablement significative

estimée à 60-100 ans, soit environ trois à quatre fois plus que celle d'un système classique (*Cornell Utilities, 2001*),

2. dans le cas des systèmes de pompage d'eau profonde, le recours à une source d'énergie renouvelable offre une image positive et constitue un argument important en faveur d'une éthique d'entreprise et une communication en cohérence avec des modes de vie plus soutenables.

10.2.3 Synthèse: critères de faisabilité recommandés

La faisabilité de systèmes hydrothermiques lacustres ou océaniques est dépendante de nombreux facteurs. Les critères que nous proposons ci-dessous devraient être pris en compte dans tous les cas de figure. Ils sont successivement énumérés conformément à la stratégie d'étude des systèmes complexes que nous défendons (approche « RTV »: ressource-transformation-valorisation), sans oublier la contribution des aspects institutionnels:

- ressource:

1. constituant une contrainte d'ordre géographique, l'accès à une ressource hydrothermique de qualité n'est pas une évidence. Les agglomérations desservies doivent être situées proche de la ressource, en bordure de lacs qui possèdent des caractéristiques adéquates (stratifiés et présentant une couche-ressource fraîche), en zone côtière (mer ou océan) ou éventuellement en bordure de rivières (eaux fraîches durant toute l'année),
2. cette première condition est nécessaire mais pas suffisante, car elle ne garantit pas que la ressource soit exploitable: l'emplacement du site de pompage et l'évaluation de la qualité de la ressource (profondeur, régimes des températures, etc.) méritent d'être soigneusement étudiés (p.ex. par modélisation) et évalués (confirmation par mesures *in situ*),
3. les coûts de construction d'un réseau sont très importants et contribuent de manière prépondérante à l'investissement total (*fig. 10-2, tableau 9-13*): sa longueur doit être minimisée et le quartier alimenté devrait être localisé le plus proche possible du site lacustre/océanique qui présente un profil bathymétrique adéquat,

- distribution:

1. En sus du contexte géologique, l'occupation très dense du sous-sol dans certains centres urbains existants peut induire des coûts de réalisation insupportables ou parfois tout simplement empêcher la mise en place d'un réseau. Cette complexité conduit à privilégier des réseaux compacts dans les zones les plus favorables, c'est-à-dire où les densités spatiales, quantitatives et temporelles de la demande de froid sont élevées. Sur la base des réseaux de froid classiques qui existent en Europe, une densité de demande de 3 kW/m de réseau¹ a été estimée comme étant le seuil inférieur de rentabilité (*Santamouris et al., 2004*). C'est pour ce poste que les économies d'échelle sont les plus significatives,
2. en fonction de caractéristiques territoriales (p. ex. dénivellation), du type de production choisi (mono- ou bivalent) ainsi que des prestations secondaires envisagées, le mode de fonctionnement du réseau de distribution (ouvert/fermé) doit être pris en compte, car il conditionne les adaptations et modifications ultérieures que l'on pourrait lui apporter,
3. de même, les solutions techniques qui sont opérées au moment du design (choix des matériaux, systèmes de contrôle-commande, isolation ou non, etc.) doivent être en adéquation avec les prestations envisagées, d'autant plus que la durée de vie de ces réseaux est importante,

¹ Notons que cette valeur ne s'applique strictement qu'à des réseaux urbains de climatisation (production classique)

- transformation – valorisation (choix à opérer pour l'exploitation):

1. de manière générale, la prise en compte des besoins énergétiques réels (quantitatifs et qualitatifs et temporels) des bâtiments à connecter devrait s'opérer bien en amont durant la phase de projet: un audit spécifique de connectabilité, basé sur les consommations réelles et projetées, devrait permettre de clairement positionner les objectifs de l'exploitant et des utilisateurs,
2. le financement des adaptations techniques dans la boucle de distribution du bâtiment peuvent être sous la responsabilité et à charge de l'utilisateur et/ou de l'exploitant. La marge de manœuvre financière et les compétences des services techniques du bâtiment peuvent constituer un frein à l'efficacité de sa connexion: il nous semble préférable que ces adaptations soient prises en charge par l'exploitant (intégration des coûts dans son modèle financier), à condition que des collaborations très étroites puissent s'établir à partir de relations de confiance bien acquises. Cela dit, les limites de gestion et le degré d'intervention de chacune des parties prenantes (exploitant et utilisateur) doivent être clairement établies, à la fois pour la production et la distribution d'énergie. Hormis l'exploitation de la distribution dans les bâtiments, il apparaît préférable que la gestion du réseau soit intégralement assurée par l'exploitant, devenant ainsi prestataire d'un service global pour ses utilisateurs (valable pour les productions mono- et bivalentes),
3. étant donné l'importance des coûts liés aux installations sous-lacustres, et au fait que la capacité de puissance est limitée par la taille des installations de pompage, la production d'énergie froid via la source renouvelable doit être valorisée autant que possible. Le système n'est rentable que si le maximum d'énergie renouvelable possible en est retiré: un fonctionnement de type ruban (aspect « énergie ») est à privilégier sur celui de type confort (aspect « puissance »). Cela ne signifie pas pour autant que la prestation de confort doit être reléguée en seconde position, mais que des stratégies permettant à la fois d'assurer cette prestation et la rentabilité économique doivent être envisagées,
4. l'échangeur de chaleur constitue la pièce maîtresse de la transformation énergétique au niveau de chaque bâtiment. Lorsqu'une ressource renouvelable est utilisée, l'amplitude de température sur laquelle s'effectue l'échange de chaleur est relativement faible (cas du réseau GLN): ce « pincement » oblige à une réflexion poussée sur sa régulation, en particulier sur une gestion optimale des débits (le débit primaire est physiquement limité par le dimensionnement du réseau primaire). De plus, la température de la ressource est non contrôlée et à des niveaux supérieurs à ceux produits par une machine frigorifique (cas du réseau GLN): il est donc primordial de travailler aux niveaux de température les plus élevés possibles, d'une part pour valoriser au mieux la ressource renouvelable, d'autre part pour minimiser le débit primaire appelé pour pouvoir l'allouer à d'autres preneurs,
5. l'ajout d'une production classique complémentaire (machines frigorifiques) devrait s'intégrer dans la stratégie globale de la production d'énergie thermique (froid et chaud): pour la production de froid, la centralisation semble *a priori* préférable (voir point 1 ci-dessus) et le dimensionnement des machines devrait être basé sur la couverture exclusive des demandes de pointe (stratégie orientée « puissance » pour sécuriser l'approvisionnement; voir point 3 ci-dessus). Dans certaines situations (p. ex. réseau de distribution fermé), le recours à des machines réversibles (froid et chaud) pourrait se justifier d'un point de vue énergétique, tout en permettant de les rentabiliser,

- prestations (utilisations principales et secondaires):

une utilisation du type « multi-ressources » d'un réseau thermique est favorable du point de vue financier (revenus supplémentaires) tout en générant des co-bénéfices intéressants:

1. *valorisations « énergie »*: selon les impératifs climatiques locaux, les seules prestations de climatisation ne permettent pas, ou difficilement, d'amortir les importants investissements

consentis, car les quantités d'énergie vendues sont trop faibles. Dès lors, d'autres prestations thermiques commercialisables sont fortement encouragées (chauffage), d'autant plus pour les zones climatiques fraîches et/ou lorsque des rejets locaux de chaleur fatale rendent plus opportune l'exploitation synergique de ces flux,

2. *valorisations « matière »*: les utilisations secondaires d'eau douce ou salée, très diverses, accroissent la rentabilité financière de l'installation, mais peuvent également offrir de nombreux avantages énergétiques, environnementaux, sanitaires voire touristiques,

- aspects institutionnels:

1. bien que présentant de nombreuses caractéristiques favorables à leur implantation, la mise en place de tels systèmes fait face à un certain nombre de défis, que ce soit pour l'exploitant, les utilisateurs ou encore pour les collectivités publiques (Gilmour *et al.*, 2008). Le principal d'entre eux est probablement le fait qu'aucun des acteurs impliqués ne peut agir de manière indépendante, sans tenir compte des intérêts et des contraintes des autres. Les nombreuses problématiques devraient être abordées sous un angle interdisciplinaire, en créant une « communauté d'intérêt » qui rassemble toutes les parties concernées, durant la phase de projet mais aussi durant les premières années d'exploitation (mise en service, optimisation, apprentissages par retours d'expérience),
2. le rôle des autorités publiques est de ce point de vue primordial: les différents services impliqués doivent de concert créer un environnement favorable à la réalisation du réseau, en supportant l'exploitant dans sa démarche, en incitant les utilisateurs potentiels à en devenir les partenaires, mais aussi en informant le grand public sur les véritables enjeux. Pour les communautés locales, l'aspect innovant et le peu ou l'absence d'expérience liée à ce type de système peuvent renforcer la réticence à l'établissement de certaines collaborations. De plus, l'utilisation d'une ressource renouvelable - qui de surcroît possède une forte valeur patrimoniale - par une infrastructure énergétique d'envergure suscite méfiance et interrogations quant à la pertinence, l'efficacité et la robustesse de ce type de système,
3. d'un point de vue commercial, la relation aux utilisateurs potentiels doit être repensée de manière globale: les stratégies de communication (plus-value liée à l'image « verte ») et commerciales (tarification, lien avec les autres énergies vendues, outsourcing, etc.) sont en effet déterminantes sur une évolution des attentes et habitudes de consommation (voir ci-dessus point 2 *transformation - valorisation*). Cette évolution, qui se doit d'aller dans le sens d'une utilisation rationnelle de l'énergie pour utiliser efficacement de systèmes renouvelables hydrothermiques, conditionne les modèles commerciaux et pose la question des meilleures stratégies à adopter,
4. un accompagnement des services techniques des bâtiments connectés durant les premières années de connexion permettrait à la fois à l'utilisateur et à l'exploitant de tirer le meilleur parti du système énergétique. Le coût de ce conseil mériterait fortement d'être intégré dans le modèle financier de l'exploitant,
5. l'apprentissage, l'acquisition de connaissances et le développement des compétences spécifiques est une condition *sine qua none* pour le développement de ces filières renouvelables innovantes. La prise en compte des savoirs est absolument nécessaire pour définir avec réalisme la stratégie de transition énergétique des décennies à venir. Si ces connaissances/compétences n'existent pas au niveau local, il est préférable d'aller les chercher où elles existent déjà: le raccourcissement des processus d'apprentissage est au bénéfice du développement local de ces filières renouvelables,

6. vision à long terme:

- dans les centres urbains, la pression sur le foncier est très forte: une politique d'aménagement du territoire proactive est requise, car elle permet de légitimer l'existence de ces systèmes en les inscrivant dans une vision stratégique à long terme,
- une concordance temporelle entre la politique énergétique et la planification de l'investissement financier est favorable pour le développement d'infrastructures énergétiques d'envergure: comme la durée de vie pressentie de ces systèmes est très longue (60-100 ans), un financement à long terme conduit à un abaissement de leur coût de revient. Malheureusement, le temps du financier et celui du politique est souvent bien plus court que celui du planificateur. Un financement de ce type nécessite donc une forte implication des autorités publiques (p. ex. partenariat public-privé, couverture et/ou partage du risque financier avec l'investisseur, etc.),
- un investissement programmé sur une longue période ne génère pas rapidement d'importants bénéfices mais intensifie de manière durable l'activité économique locale (emplois, relocalisation de flux d'argent, etc.). Très favorable à l'économie régionale, l'implantation de tels systèmes devrait faire partie intégrante de la politique de développement économique de la région concernée.

10.3 AFVG¹ et hydrothermie: pistes pour le développement intensif de la filière

Comme l'a montré *Faessler (2011)*, le développement intensif de la filière hydrothermique constitue une part importante du potentiel énergétique renouvelable de l'agglomération franco-valdo-genevoise: pour tendre d'ici à quelques décennies vers le concept de société à 2'000W récemment adopté par le canton de Genève, le développement de cette filière est indispensable pour l'approvisionnement thermique (chaud et froid). De plus, l'approvisionnement énergétique de notre région à moyen terme doit être pensé de manière globale, en prenant en compte à la fois les aspects thermiques et électriques (vision stratégique thermo-électrique). Nous pensons donc que le développement de cette filière jouera certainement un rôle croissant dans le système énergétique régional dans les décennies à venir.

Depuis les phases d'étude jusqu'à son exploitation, l'institution en charge du réseau (en l'occurrence les SIG) doit faire face à de nombreuses problématiques durant tous les « stades de vie » du réseau: comme le retour d'expérience l'a montré, elles sont avant tout d'ordre techniques, financières et organisationnelles. En apportant quelques principes et pistes de réflexion sur les aspects quantitatifs liés au développement de la cette filière au niveau de la région, nous précisons que l'analyse proposée ci-dessous ne constitue qu'une contribution à l'analyse globale à mener.

10.3.1 Concordance entre potentiels et demande de froid

A/ Concordance quantitative entre potentiels et demande de froid

La concordance entre la quantité des besoins en énergie froid et les potentiels énergétiques lacustres est un paramètre-clé qui est abordé très tôt dans le processus d'étude d'un nouveau réseau. Sur la base d'une étude qui s'est appuyée sur les requêtes d'autorisation d'installations de climatisation déposées à Genève depuis 1980 (*Hollmuller et al., en cours*), la puissance frigorifique nominale actuellement installée est estimée à 272 MW au niveau cantonal², dont 25 % est dédiée à des

¹ AFVG: agglomération franco-valdo-genevoise

² D'autres installations n'étant pas déclarées, la demande réelle est probablement supérieure; en contrepartie, notons que la puissance installée est souvent inférieure à la puissance déclarée; de plus, la puissance installée n'est souvent utilisée que partiellement, voire très partiellement

datacenters. Sur la base d'un fonctionnement moyen d'environ 2'900 h/an (hypothèses: 8'760 h/an pour les prestations de ruban et 1'000 h/an pour les prestations de confort), l'ensemble de ces installations équivaldrait à une consommation d'énergie frigorifique annuelle d'environ 800 GWh. Précisons que malgré de nombreuses incertitudes liées à la base de données cantonale, l'ordre de grandeur de cette consommation annuelle d'énergie froid demeure cohérent.

Les potentiels hydrothermiques que nous avons déterminés montrent que le Petit-Lac Léman pourrait tout à fait couvrir cette demande en énergie de froid par l'ajout de systèmes hydrothermiques supplémentaires (*tableau 10-9*), car la demande annuelle en énergie froid ne représente qu'un peu plus d'un tiers du potentiel énergétique offert par le Petit-Lac (*tableau 10-8*). Cela signifie que la couverture globale de la demande de froid cantonale actuelle est envisageable tant du point de vue quantitatif qu'environnemental. Précisons encore que les hypothèses qui ont été retenues pour la détermination de ces potentiels sont très conservatives, ce qui renforce encore le potentiel de couverture des besoins.

	GWh_{th}/an	MW_{th} (moyenne annuelle)	MW_{th} (moyenne mensuelle)
froid	2'145	248	1'000 (juillet)
chaud	1'890	182	263 (janvier)
total	4'035	430	

tableau 10-8 Récapitulatif des potentiels hydrothermiques du Petit-Lac Léman (exprimés en énergie thermique annuelle)

B/ Couverture spatiale de la demande de froid

Les potentiels énergétiques ne constituant pas une contrainte du point de vue quantitatif. Ce sont plutôt les aspects liés à la connexion de bâtiments au réseau qui constituent les véritables limites à l'intensification de la filière hydrothermique.

Pour l'exploitant, ces contraintes apparaissent au cours de tous les « stades de vie » du réseau. En particulier, celles qui sont liées aux aspects géographiques se présentent très tôt dans le processus d'étude. D'une part, les difficultés inhérentes à l'implémentation de la partie terrestre d'un nouveau réseau sont multiples (densité élevée du tissu urbain genevois, occupation dense du sous-sol, contraintes logistiques pour des chantiers d'envergure) rendent l'étude de son tracé et son déploiement très contraignants.

D'autre part, la partie lacustre d'un nouveau réseau doit être soigneusement étudiée: en particulier, l'emplacement du pompage conditionne la qualité et la pérennité de la ressource, et influence le tracé des conduites (longueur et profondeur). Or, la distance qui sépare le centre-ville de Genève - où se trouve une des zones de forte densité de demande de froid cantonale¹ - et la portion du Petit-Lac qui devrait présenter les meilleures caractéristiques pour des prestations thermiques, est relativement importante (> 4-5 km). Du point de vue de l'investissement lié aux infrastructures sous-lacustres, un pompage situé le plus proche des consommateurs, c'est-à-dire dans la Rade de Genève, offrirait le potentiel le plus intéressant. En revanche, le pompage y étant peu profond, la qualité de la ressource pourrait fortement péjorer sa valorisation. Pour alimenter le centre-ville de Genève, il y a donc un équilibre subtil à trouver entre la qualité de la ressource requise et l'investissement financier que l'exploitant serait prêt à consentir pour l'allongement de l'adduction d'eau.

¹ Dans le cadre d'études prospectives des Services Industriels de Genève, le Groupe Energie a été mandaté pour étudier les zones de fortes demande en énergie froid au niveau du canton de Genève (Faessler et al., en cours)

10.3.2 Intégration territoriale de la filière hydrothermique

A l'échelle du bassin versant du Rhône, depuis sa source alpine jusqu'à son estuaire méditerranéen, il est actuellement difficile de distinguer les conditions de l'état naturel du réseau hydrologique de celles de son état anthropisé. En effet, le Rhône joue depuis plusieurs siècles un rôle de cordon structurant autour et à partir duquel se sont développées et organisées les activités de nos sociétés (Duc *et al.*, 2008): il est à la fois utilisé comme axe de transport et ressource de matières, mais également comme ressource énergétique. A ce niveau, le cycle de l'eau est fortement géré par la main de l'homme. Les implications pour la filière hydrothermique sont donc nombreuses, tant au niveau de la qualité de la ressource lacustre que de son potentiel: d'une part, les usages multiples du lac doivent être pérennes, et d'autre part, il faut tenir compte des installations énergétiques existantes.

A/ Implications à l'échelle régionale (AFVG)

Etant donné ses nombreuses implications, la réflexion du développement de cette filière au niveau régional est fondamentale. Elle permet de tirer parti des propriétés hydrologiques différentes du lac et des rivières avals en tenant compte des infrastructures et installations existantes: ainsi, des potentiels réalistes peuvent être maximisés tout en minimisant avec assurance les impacts thermiques à cette échelle.

Exploitées de manière synergique et intégrée à un niveau régional, les abondantes ressources en eaux de surface du canton (Petit-Lac genevois, Rhône et Arve) représentent une opportunité en termes d'intensification de la production et de minimisation des impacts sur le cycle de l'eau (tableau 10-9). En particulier, les rejets de systèmes hydrothermiques de type GLN refroidissent les eaux de surface du lac: cette caractéristique peut alors être exploitée en aval, au niveau du Rhône émissaire, pour intensifier les rejets thermiques (plus chauds) liés aux systèmes classiques de climatisation tout en réduisant/minimisant l'impact thermique global sur le Rhône plus en aval. Pour cela, l'intensification de la filière hydrothermique nécessite une planification rigoureuse.

		Petit-Lac	Rhône ¹	TOTAL AFVG
		MW		
total	mobilisé ²	3.5	132	135
	mobilisable	430	450	880
froid	mobilisé ²	2.7		
	mobilisable	245		
chaud	mobilisé ²	0.7		
	mobilisable	217		

tableau 10-9 Inventaire de l'utilisation de la filière hydrothermique régionale en 2010; état des potentiels déjà mobilisés et encore mobilisables (exprimés en puissance de production moyenne annuelle)

De plus, les besoins en chaud étant importants sous nos latitudes, le déploiement de cette filière devrait se développer dans le sens d'une mutualisation des besoins (chaud et froid), ce qui représente un argument de plus à l'avantage de la protection du système hydrologique: l'eau lacustre pompée pourrait être utilisée plusieurs fois avant d'être rejetée, minimisant ainsi d'autant plus l'impact thermique. Il s'agit entre autre d'étudier la possibilité de faire circuler l'eau dans des boucles terrestre fermées à des niveaux de température permettant à la fois la production de chaud et de froid (thermoducs). Notons encore que les rejets thermiques importants sur le Rhône genevois

¹ Données issues de Faessler (2011)

² On considère la concession Merck-Serono – SIG (4'000 m³/h): 23.5 MW_{froid} nominal (1'000 h/an de fonctionnement à puissance nominale, $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$) et 3 MW_{chaud} nominal

(STEP, usine d'incinération des Cheneviers, CERN, industries diverses) ne sont actuellement pas valorisés et constituent un gisement énergétique non négligeable: intégrés à la réflexion régionale de production thermique, ils renforceraient encore une gestion mutualisée et cohérente de ces flux anthropiques.

Quoi qu'il en soit, le potentiel hydrothermique lacustre est très important et ne limite actuellement pas le développement de cette filière: notamment pour des raisons économiques et urbanistiques, la connexion des bâtiments en constitue la véritable contrainte. Dans le cas des deux réseaux actuellement projetés par les SIG et tout particulièrement pour le réseau GLU, les possibilités réelles de connexion des bâtiments devraient être évaluées rigoureusement, car les contraintes liées à la densité du tissu urbain y sont encore plus importantes que pour la zone périurbaine destinée au déploiement du réseau GLA.

B/ Implications à l'échelle du bassin versant

La filière hydrothermique régionale doit être replacée dans le contexte hydrologique de son bassin versant. D'une part, la pérennité de la ressource peut avoir une influence sur son intensification à moyen terme; d'autre part, la mise en perspective avec sa partie aval met en évidence la pertinence d'une réflexion de valorisation des flux naturels et anthropiques au niveau régional:

1. contexte amont:

- à cet échelon supérieur, la filière hydrothermique lémanique est conditionnée par la qualité à long terme de la ressource que représente le Lac Léman. La température du lac est influencée par son principal affluent, le Rhône, dont la dynamique hydrologique est elle-même dépendante de la production hydroélectrique: la dynamique annuelle de la température du Rhône affluent, liée à la production hydroélectrique, n'est pas répercutée directement sur la dynamique de la température des couches profondes du Petit-Lac (homogénéisation des masses d'eau profondes). Cela dit, l'influence actuelle sur la ressource énergétique est faible, car les niveaux de température restent bas et permettent une valorisation adéquate,
- cela reste le cas à moyen terme (< 100 ans) même si leur réchauffement se poursuivait au même rythme. L'influence univoque du réchauffement climatique sur le niveau de température de l'hypolimnion n'est pour le moment pas clairement démontrée; en revanche, il pourrait allonger la période durant laquelle des pics thermiques peuvent se présenter. De plus, et bien qu'une intensification massive de la filière hydroélectrique soit peu probable, l'évolution de cette activité devrait être prise en compte dans les stratégies de développement de la filière hydrothermique lémanique. Dans le même sens, la prospection de sites idéaux de pompage d'eau lacustre profonde devrait être abordée de manière rigoureuse (mesures *in situ* nécessaires),

2. contexte aval: plusieurs études montrent que Le Rhône se réchauffe jusqu'à son estuaire méditerranéen: le réchauffement anthropique (1-2°C) semble être du même ordre de grandeur que celui lié au réchauffement climatique global. En aval de Genève, la stratégie thermo-industrielle en vigueur (implantation centralisée de site de production électrique et de rejets thermiques industriels importants) ne permet pas actuellement de valoriser la chaleur fatalement produite: cette stratégie productiviste, à l'encontre de la politique énergétique menée à Genève, suscite de nombreuses controverses quant à la préservation de bonnes conditions environnementales et en faveur d'une utilisation rationnelle et efficace de l'énergie. En ce sens, l'intégration des filières hydrothermiques au niveau régional dans une conception plus large de l'approvisionnement énergétique nous semble être globalement bien plus prometteuse et pleine d'espoirs.

11 Conclusions et perspectives

Malgré le fait que le développement de filières énergétiques locales basées sur une production renouvelable s'avère de plus en plus nécessaire, les systèmes utilisant des eaux profondes pour l'approvisionnement thermique de bâtiments (systèmes hydrothermiques) sont encore très peu nombreux. Pourtant, ils offrent de nombreuses et prometteuses perspectives du point de vue énergétique, environnemental et socio-économique.

Le retour d'expérience que nous avons mené ici, qui s'appuie sur l'étude de cas fouillée du système hydrothermique genevois nouvellement construit (composé des réseaux GLN et Merck-Serono) et sur un benchmarking avec les quelques autres systèmes similaires qui existent à travers le monde, a permis de mettre en évidence les principaux aspects qui contribuent à leur faisabilité, en particulier les nombreux obstacles et contraintes qui doivent être pris en compte, intégrés puis gérés, de la phase de projet à la gestion d'un tel système.

Bien qu'elle se focalise sur les prestations de froid, cette étude a permis d'apporter des pistes sur l'utilisation synergique des prestations thermiques dans leur globalité et sur la nécessité d'une ou de plusieurs valorisations secondaires: ces dernières permettent en effet d'envisager plus sereinement l'amortissement des importants investissements à consentir, mais aussi et surtout d'intégrer ces systèmes de manière très rationnelle et intelligente dans des zones urbaines denses dans lesquelles les besoins en eau non-potable sont multiples.

Il apparaît clairement que les choix opérés durant la phase de projet, tant du point de vue commercial (approvisionnement 100 % renouvelable via le lac, ou mixte) que du point de vue technique (dimensionnement des débits concessionnés sur la puissance maximum demandée, ou non) ont une influence déterminante sur la simultanéité à pleine charge. Dans ces conditions, l'exploitant doit trouver un équilibre entre un dimensionnement qui lui permet de connecter un maximum de bâtiments (efficacité énergétique du réseau et amortissement), tout en garantissant un approvisionnement de qualité pour chacun d'eux, cela sans dépassement des débits concessionnés.

Tout comme les utilisateurs actuels qui ont conservé leur production classique via des machines frigorifiques, nous ne sommes pas persuadés que le choix d'un approvisionnement monovalent (100 % renouvelable) soit le plus judicieux de ces points de vue: une production bivalente, privilégiant une maximisation de la valorisation de la ressource renouvelable (aspect « énergie ») avec une couverture des pointes de puissance par une production classique nous apparaît être une solution plus pertinente. Cela dit, la solution commerciale que l'exploitant a imaginée pour ses utilisateurs est à notre avis avant tout liée à un choix marketing (volonté initiale d'une production d'énergie froid 100 % renouvelable) et aux options techniques retenues. Grâce à ce premier retour d'expérience, il nous apparaît maintenant opportun de reconsidérer ce type de système innovant comme un tout indissociable (technique, économique, mais aussi organisationnel). Pour cela, un audit des bâtiments à connecter est nécessaire et devrait être mené tôt durant la phase de projet, de manière à pouvoir proposer aux futurs utilisateurs un dimensionnement mieux adapté – notamment par une meilleure prise en compte des puissance et niveaux de température réellement requis - en garantissant un approvisionnement de qualité à un coût raisonnable. En termes de potentialités de connexion, le bénéfice pour l'exploitant est dans ce cas bien plus intéressant (maximisation des ventes d'énergie par unité de débit concessionné).

De manière à évaluer très en amont la faisabilité de tels systèmes, les conditions-cadres que nous avons pu mettre en évidence nous semblent fondamentales, et applicables de manière générale à la reproduction de tout type de système hydrothermique, mais aussi à celui d'un développement intensif d'une telle filière pertinente à l'échelon local-régional. En cela, il nous semble que ce travail constitue un apport significatif à l'étude de ces systèmes renouvelables. Toutefois, il faut rester tout à fait conscient qu'il ne constitue qu'une première phase exploratoire à leur étude, mais qu'il met en avant des éléments fondamentaux sur lesquels de vastes champs d'études pourraient

s'appuyer. Un de ces champs serait notamment la mise en valeur intégrée des ressources énergétiques renouvelables au niveau local, en particulier via des systèmes hydrothermiques.

12 Bibliographie

- Aeschimann D., Burdet H., 1989.** « Flore de la Suisse et des territoires limitrophes », Ed. du Griffon, Neuchâtel, Suisse,
- Alabastar J. S., 1971.** « Discussion: Developing thermal requirements for freshwater fishes. In P. A. Krenkel and F. L. Parker (Eds.), *Biological aspects of thermal pollution: proceedings of the National symposium on thermal pollution* », Oregon June 3-5, 1968. Portland, Oregon, USA: Vanderbilt University Press, pp. 354-370,
- Allan J. D., 1995.** « *Stream Ecology* », 388 p., Ed. Chapman and Hall, London,
- APHA, 1995.** « *Standard methods for the examination of water and wastewater, 20th Edition* », American Public Health Association, Washington DC,
- Armstrong J. D., Kemp P. S., Kennedy M., Ladle M. et al., 2003.** « *Habitat requirements of Atlantic salmon and brown trout in rivers and streams* », Fisheries Research 62: 143-170,
- Barko J., Gunnison D., Carpenter S., 1991.** « *Sediment interactions with submersed macrophyte growth and community dynamic* », Aquatic Botany, 41: 41-65,
- Bétant A., Perrenoud G., 1931.** « *Etudes sur la partie occidentale du Lac de Genève – Courants et températures* », Mémoire de la Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève, vol. 41, fascicule 2,
- Beauchamp H., 2006.** « *Heated effluents and the Rhône River in Geneva: thermal pollution or sustainable development ?* », Diplôme MESSNE n°140, Université de Genève,
- Beauchamp H., Beetschen C., Haas P., Lachal B., Viquerat P. –A., Pampaloni E., 2006.** « *Rejets thermiques dans le Rhône urbain genevois: mesures et modélisation* », in: Archive des Sciences, 59, pp.291-298,
- BG, 2009.** « *Planification énergétique et environnementale du territoire* », BG Ingénieurs-Conseil, Genève,
- Bordy A., Guillon L., Hollmuller P., Lachal B., 2007.** « *Etude de l'influence de la température extérieure sur la température de l'eau circulant dans le réseau GLN: conclusions de l'étude* », CUEPE, Université de Genève,
- Bouët M., 1985.** « *Climat et météorologie de la Suisse romande* », Ed. Payot, Lausanne,
- Brundtland G. H. et al., 1987.** « *Report of the world commission on environment and development: development and international economic cooperation - environment* », United Nations, New-York,
- Bruslé J., Quignard J. –P., 2001.** « *Biologie des poissons d'eau douce européens* », Coll. Aquaculture-Pisciculture, E. Technique & Documentation, Paris,
- Bruslé J., Quignard J. –P., 2004.** « *Les poissons et leur environnement: écophysiologie et comportements adaptatifs* », Ed. Lavoisier,
- Buttiker B., 1984.** « *Le Léman, synthèse des travaux de la Commission internationale pour la protection des eaux du Léman contre la pollution 1957-1992* », pp. 315-323, CIPEL,
- Buttiker B., Matthey G., 1983.** « *La truite lacustre du Léman, In: Gestion de la truite lacustre* », Les Cahiers de la pêche n° 41, Office Fédéral de la Protection de l'Environnement, Berne,
- Chenal M., 2008.** « *Versoix: chaleur et carburant de proximité* », SuisseEnergie, Bio-Eco Sàrl, Suisse,
- CIPEL, 1983.** « *Rapport de synthèse des travaux de la CIPEL, Le Léman 1957-1982* », Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., CIPEL,
- Conti E., 2010.** « *Ville de Versoix: PDQ Versoix centre-ville, concept énergétique, contracting* », Séminaire CREM/EPFL du 25 mars 2010, Martigny,
- Cooper A., 1990.** « *The times atlas and encyclopaedia of the sea* », Ed. A. Couper, Harper and Row, New York, 272 pp.,
- Cornell Utilities, 2001.** « *Lake Source Cooling at Cornell: plaquette synthétique de présentation* », Cornell University, New-York State,
- Cornell Utilities, 1998-2008.** « *Cornell University Energy fast facts* », Cornell University, New-York State,

- Cramer B., 2010.** « Politique d'économies d'énergie à Genève et expériences acquises, in: Université de Genève (Ed.), Actes de la 20^{ème} journée du CUEPE "Economies d'énergie: toujours plus? », Université de Genève,
- CSD, 2002.** « Serono – projet d'implantation du centre mondial de recherche et siège du groupe Serono à Sécheron », Rapport d'Impact sur l'Environnement », Genève,
- CSD, 2002.** « Serono – projet d'implantation du centre mondial de recherche et siège du groupe Serono à Sécheron », Rapport d'Impact sur l'Environnement », Genève,
- Doudoroff P., 1971.** « Discussion: Developing thermal requirements for freshwater fishes. In P. A. Krenkel and F. L. Parker (Eds.), *Biological aspects of thermal pollution: proceedings of the National symposium on thermal pollution* », Oregon June 3-5, 1968. Portland, Oregon, USA: Vanderbilt University Press, pp. 140-147,
- Duc G., Frei A., Perroux O., 2008.** « Eau, gaz, électricité, une histoire des énergies à Genève (XVIII^{ème} siècle à nos jours) », Ed. Infolio, Gollion, Suisse,
- ECOTEC, 1993.** « Bilan écologique des rives genevoises du Léman », Genève,
- ECOTEC, 1999.** « La végétation macrophytique du Léman », Genève,
- Elliot J. M., 1989.** « Mechanisms responsible for population regulation in young migratory trout *Salmo trutta* L. The critical time for survival », *Journal of animal ecology* 38: 987-1001,
- Enwave Company, 2008.** « Personal discussion with K. Loughborough, Technical Director », Toronto, Canada,
- Etat de Genève, 2011.** « Projet de plan directeur cantonal 2030 », document en consultation, Etat de Genève,
- Faessler J., 2008.** « Rhône urbain: évaluation des impacts des rejets thermiques des climatisations », rapport R1, projet VIRAGE, Groupe Energie, Université de Genève,
- Faessler J., 2009a.** « Utilisation thermique réelle du Rhône urbain: analyse énergétique de quelques utilisations et propositions pour la gestion de la ressource thermique », rapport R2, projet VIRAGE, Groupe Energie, Université de Genève,
- Faessler J., 2009b.** « Utilisation thermique du Rhône genevois: modélisation, scénarios et recommandations sur la ressource », rapport R6, projet VIRAGE, Groupe Energie, Université de Genève,
- Faessler J., 2011.** « Valorisation intensive des énergies renouvelables dans l'agglomération franco-valdo-genevoise (VIRAGE) dans une perspective de société à 2'000W », Thèse de Doctorat en cours d'impression, Université de Genève, Suisse,
- Faessler J., Hollmuller P., Lachal B., en cours.** « Etude d'opportunité pour le projet GLU/GLA: pertes thermiques du réseau lac, connexion aux bâtiments et potentiel de froid: évaluations et recommandations », Partenariat SIG – UNIGE, Contrat spécifique « ExpTherm », Université de Genève,
- Forsberg C., 1989.** « Importance of sediment in understanding nutrient cycling in lakes », *Hydrobiologia*, 176/177: 263-277,
- Frutiger A., 1996.** « Embryogenesis of *Dinocras cephalotes*, *Perla grandis* and *P. marginata* (Plecoptera: Perlidae) on different temperature regimes », *Freshwater Biology* 36: 497-508,
- Gattermann L., 1946.** « Manuel pratique de chimie organique », pp. 309-314, Ed. Payot, Suisse,
- Gilmour B., Warren J., 2008** « The New District Energy: Building Blocks for Sustainable Community Development: On-Line Handbook », Canadian Urban Institute, Toronto,
- Girardclos A., 2001,** « Sismographie et structure sédimentaire en 3D d'un bassin lacustre, du retrait glaciaire à nos jours (Lac Léman, Suisse) », Thèse de Doctorat n° 3275, Université de Genève, Suisse,
- Gregory J. S., Beeseley S. S., Van Kirk R. W., 2000.** « Effect of springtime water temperature on the time of emergence and size of *Pteronarcys californica* in the Henry's Fork catchment, Idaho, USA », *Freshwater Biology* 45: 75-83,
- GREN, 2007.** « Pompage hydrothermique Serono SIG–GLN Parc Barton; suivi de l'impact sur la biologie, rapport 2007 », Mandat pour SIG-Merck-Serono, Genève,

GREN, 2009. « *Pompage hydrothermique Serono SIG–GLN Parc Barton; suivi de l’impact sur la biologie, rapport 2009* », Mandat pour SIG-Merck-Serono, 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,

Gumy D., De Alencastro L. F., 2001. « *Origine de la pollution du Léman par le chlore* », Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2000, 261-278, CIPEL,

Harvey D. L. D., 2006. « *A handbook on low-energy buildings and district energy systems* », Edited by L. D. Danny Harvey,

Hill B. –H., 1979. « *Uptake and release of nutrient by aquatic macrophytes* », Aquatic Botany, 7: 87-93,

Hollmuller P., Hunziker S., Lachal B., en cours. « *Enjeux de la climatisation au niveau genevois et tour d’horizon de possibles alternatives* », Partenariat SIG – UNIGE, Contrat spécifique « AlterClim » rapport n°1, Université de Genève,

IEA, 1986. « *Energy for buildings* », 156 p., OECD/IEA, Paris,

IIF, 2006. « *Aperçu sur l’histoire de la production de froid* », IIF, Paris,

Ineichen P., 2006. « *M-été-O données climatiques estivales dans la region genevoise: valeurs moyennes et extrêmes* », Rapport de recherche du CUEPE n°7, Université de Genève,

Intercontinental Bora-Bora Resort and Thalasso Spa, 2008. « *Sea-water air-conditioning system* », Polynésie Française,

Jaquet J. – M., Juge R., Lachavanne J. – B., Lod-Crozet B., 1992. « *Diagnose écologique des rives lacustres* », 57 p., FPH/LEBA, Université de Genève, Suisse,

Jaquet J. –M., Vernet J. –P., 1978. « *Formes du phosphore dans les sédiments lémaniques en 1978* », Rapport CIPEL 1978, pp. 310-326, Lausanne,

Khalanski M., Carrel G., Desaint G., Fruget J. –F., Olivier J. –M., Poirel A., Souchon Y., 2008. « *Etude thermique globale du Rhône – Impacts hydrobiologiques des échauffements cumulés* », Hydroecol. Appl., 16: pp. 53-108,

Kirchhofer A., Zaugg B., Pedroli J. –C., 1990. « *Liste rouge des poissons et cyclostomes de suisse* », 24 p., Centre suisse de cartographie de la faune, Neuchâtel,

Klemetsen A., Amundsen J. B., Dempson B., Jonsson B. et al., 2003. « *Atlantic salmon *Salmo salar* L., brown trout *Salmo trutta* L., and Arctic charr *Salvelinus alpinus* (L): a review of aspects of their life histories* », Ecology Freshwater fish 12: 1-59,

Le Thi A. D., 2008. « *Circulation modelling of Lake Geneva using finite elements* », Travail de diplôme MESNE n°160, Université de Genève,

L2.05, 1961. « *Loi sur les eaux* », Administration cantonale, Genève,

L2.30, 1986. « *Loi sur l’énergie* », Administration cantonale, Genève,

L2.30.01, 1988. « *Règlement d’application de la loi sur l’énergie* », Administration cantonale, Genève,

L2.30.01, 2010. « *Règlement modifiant le règlement d’application de la loi sur l’énergie* », Administration cantonale, Genève,

La Revue Durable n° 9, 2004. « *Dossier: Adapter les bâtiments au froid et aux canicules* », Cerin Sàrl, Fribourg,

Lachal B., 2003. « *Confort d’été et énergie: une étude de cas à Genève* », In Hollmuller .P et al. (Eds.), pp. 43-53, Habitat, confort et énergie, Actes de la 13^{ème} Journée du CUEPE, Colloque du cycle de formation du CUEPE 2002-2003, Université de Genève,

Lachal B., 2004. « *Energie, économie et environnement* », Cours MESNE, Université de Genève,

Lachal B., Mermoud A., Week-endber W., Viquerat P. –A., Bisson Y., Haefeli P., Willemmin C., 2007. « *Auditing the existing buildings to be connected to a Deep Lake Water Cooling System: state of the art of the methods* », Integrated Project FP6 Priority 6.1 “ Sustainable Energy Systems”, Université de Genève, Suisse,

Lachavanne J.- B., Jaquet J.- M., Juge B., Perfetta J., 1985. « *Zustand, Erhaltung und Schutz des Ufer des Vierwaldstättersees* », Ed, Bundesamt für Forttsweek-endsen und landschaftschutz, 109 p., Aufsicht Kommission Vierwaldstätter-see und Universität Genf,

- Lachavanne J. -B., 1976.** « *Contribution à l'étude des macrophytes du Léman* », Thèse de Doctorat de l'Université de Genève, Suisse,
- Lachavanne J. -B., Wattenhofer R., 1975.** « *Les macrophytes du Léman* », Conservatoire botanique de Genève, 147 p., Genève,
- Landolt E., 1991.** « *Plantes vasculaires menacées en Suisse, Liste Rouge* », OFEFP, 183 p, Berne,
- Lang G., 1981.** « *Die Ufervegetation des week-endstlichen Bodensee* », Arch. Hydrobiol, Suppl. Bd 32, 437-574,
- LCO₂, 1999.** « *Loi sur réduction des émissions de CO₂* », Loi du 8 octobre 1999, Administration Fédérale, Berne,
- LEaux, 1991.** « *Loi sur la protection des eaux* », Loi du 24 Janvier 1991, Administration Fédérale, Berne,
- Lessard J. L., Hayes D. B., 2003.** « *Effects of elevated water temperature of fish and macroinvertebrates communities below small dams* », River research and applications 19: 721-732,
- Lemmin U., 2005a.** « *Limnologie physique in Pourriot R. et Meybeck M., Dir., Limnologie générale* », Paris, Masson, 956 p.,
- Lemmin U., Mortimer C. H., Bauerle E., 2005b.** « *Internal Seiche dynamics in Lake Geneva* », Limnol. & Oceanogr., 50: 207-216,
- Lemmin U., 2006.** « *The influence of climate change on Lake Geneva* », Verh. Internat. Verein. Limnol., 29 (1): 1806-1810,
- Littre E., 1874.** « *Dictionnaire de la langue française* », Ed. Hachette, Paris,
- Livingston D. M., 1993.** « *Temporal structure in the deep-water temperature of four Swiss lakes: a short-term climatic change indicator?* », Verhandlungen der internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie 25, 75-81,
- Lobon-Cervia J., Mortensen E., 2005.** « *Population size in stream-living juveniles of lake-migratory brown trout Salmo trutta L.: the importance if stream discharge and temperature* », Ecolgy of Freshwater Fish, 14: 394-401,
- LPE, 1983.** « *Loi sur la protection de l'environnement* », Loi du 7 octobre 1983, Administration Fédérale, Berne,
- Malama O. A., 2009.** « *Modélisation numérique 2-D du comportement phénoménologique des plumes de chaleur au rejet: cas du projet Genève-Lac-Nations* », Travail de diplôme MESNE n°165, Université de Genève,
- Marchal E., Laurent P. J., 1977.** « *Première estimation de la population piscicole du Lac Léman par échointégration* », Cah. O.R.S.T.O.M., série Hydrobiol., 11 (1): 3-16,
- Masson F., 2011.** « *Genève-Lac-Aéroport: comparaison circuit ouvert/circuit fermé* », présentation interne SIG, Suisse,
- Marchio D., Stabat P., 2001.** « *Tour aéroréfrigérante humide ouverte* », Centre d'Energétique, Ecole des Mines de Paris, France,
- Mathur S. P., 1976.** « *Thermal discharges. In H. W. Gehm and J. I. Bregman (Eds.): Handbook of water resources and pollution control* », pp. 719-779, Van Nostrand Reinhold Company, New-York,
- Matthey B., 2011.** « *Ville de Neuchâtel – Freecooling Maladière: réseau de distribution d'eau froide par captage d'eau du lac dans le quartier de la Maladière* », Rapport confidentiel pour la Ville de Neuchâtel, Bernard Matthey Ingénieurs-Conseils, Suisse,
- Matthey B., Affolter M., 2009.** « *Freecooling en milieu urbain: réseau de distribution d'eau de lac et d'eau souterraine pour couvrir les besoins en rafraîchissement et en chaleur des bâtiments. Etude de faisabilité pour la Ville de Neuchâtel, Suisse* », Mandat pour l'OFEN, Bernard Matthey Ingénieurs-Conseils, Suisse,
- Mayer A., 2011.** « *Synthetic description of the whole buildings of the GLN network perimeter (i.e. connected or forecast to be connected to GLN network)* », European Integrated Projects FP6 Priority 6.1 "Sustainable energy systems", TetraEner Project, ScanE, Geneva,
- Merchat M., Faurel C., Senejean B., Thibault S., Bennassis F., 2009.** « *Performance énergétiques globales des systèmes de réfrigération* », Etude interne Climespace, France,

- Mermoud A., Lachal B., Weber W., Viquerat P. –A., 2008a.** « *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 Systems”, Université de Genève, Suisse,
- Mermoud A., Lachal B., Weber W., Viquerat P. –A., 2008b.** « *UN Building: measuring cooling installations and auditing for deep lake direct cooling network connectivity* », Integrated Project FP6 Priority 6.1 “Sustainable Energy Systems”, Université de Genève, Suisse,
- Mermoud A., Lachal B., Weber W., Viquerat P. –A., 2008c.** « *HCR Building: measuring cooling installations and auditing for deep lake direct cooling network connectivity* », Integrated Project FP6 Priority 6.1 “Sustainable Energy Systems”, Université de Genève, Suisse,
- Metro DES Working Group, 1995.** « *The potential for District Energy in Metropolitan Toronto* », Toronto, Canada,
- Morisot O., Marchio D., 1999.** « *Logiciel HEATEX pour échangeur de chaleur: modèle NUT-ε en enthalpie ou en température de l’HVAC2 Toolkit* », ConsoClim, Cahier des algorithmes, réf. 99079R, Paris,
- Mount D. I., 1971.** « *Discussion: effects of heated discharges on freshwater in Britain.* In P. A. Krenkel and F. L. Parker (Eds.), *Biological aspects of thermal pollution: proceedings of the National symposium on thermal pollution* », Oregon, June 3-5, 1968. Portland, Oregon, USA: Vanderbilt University Press, pp. 140-147,
- Müller R., 1996.** « *Suivi de l’écologie du Rhône après la mise en service du barrage de régulation et de l’usine hydro-électrique du Seujet: rapport final* », 130 p., Dübendorf (ZH), EAWAG, Forschungszentrum für Limnologie, Kastanienbaum,
- Novatlantis, 2005.** « *Vivre plus légèrement: une nouvelle conception de nos ressources pour un développement durable: la société 2’000W* », Novatlantis, OFEN, SIA, Zürich,
- NYSDEC, New-York State Department of Environmental Conservation, 1998.** « *Final Environmental Impact Statement, Lake Source Cooling Cornell University* », Vol II, cf. chap.1-7, Cornell University,
- OCDE, 1982.** « *Eutrophisation des eaux: méthode de surveillance, d’évaluation et de lutte* », Publ. OCDE, Paris, 164 p.,
- OEaux, 1998.** « *Ordonnance sur la protection des eaux* », Ordonnance du 28 octobre 1998, Administration Fédérale, Berne,
- OFEN, 2007.** « *Directive: mesures librement consenties visant à réduire la consommation d’énergie et les émissions de CO₂* », Administration Fédérale, Berne,
- Ouzilou O., 2011.** « *Genève du projet Genève-Lac-Nations* », présentation non publiée, BG Ingénieurs Conseils, Genève,
- Peer T., Joyce W. S., 2002.** « *Lake Source Cooling* », ASHRAE Journal (avril 2002), p. 37-39,
- Picard P. et al, 2002.** « *Rafraîchissement d’été des immeubles de bureaux* », Revue CFP, n° 521, France,
- PNUE 2010.** « *Séminaire PNUE-Etat de Genève du 28 septembre 2010* », Genève,
- Poeuf P., Senejean B., Ladaurade C., 2010.** « *District cooling system: the most efficient system for urban applications* », Sustainable Refrigeration and Heat Pump Technology Conference, KTH Royal Institute of Technology, Suède,
- Poirel A., Lauters F., Desaint B., 2009.** « *1977-2006: trente années de mesures des températures de l’eau dans le bassin du Rhône* », Hydroécol. Appl. (16) p. 191-213,
- Quetin P., 2006.** « *Bilan des apports par les affluents au Léman et au Rhône à l’aval de Genève* », Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 2005, pp. 147-172, CIPEL,
- Raney E. C., 1971.** « *Discussion: effects of heated discharges on freshwater in Britain.* In P. A. Krenkel and F. L. Parker (Eds.), *Biological aspects of thermal pollution: proceedings of the National symposium on thermal pollution* », Oregon June 3-5, 1968. Portland, Oregon, USA: Vanderbilt University Press, pp. 371-374,
- RDInstruments, 2001.** « *Workhorse Sentinel ADCP User’s Guide* », RD Instruments, San Diego, USA,

- Rossier O., 1995.** « *La zone littorale lacustre comme habitat pour les poissons* », Thèse n° 2'784 de l'Université de Genève,
- Rossolim L. L., 1957.** « *Temperaturnyj rezim ozera Bajkal* », Moskva, Akademia nauk SSSR, Rtudy Jakal'skoj limnologiceskoj Stancii n° 16,
- Roujol S., 2007.** « *Etude technico-économique de différents systèmes de production de froid* », Girus Ingénieurs, France,
- Santamouris M., Adnot J., Alvarez S., Klitsikas N., 2004.** « *Cooling the cities/rafraîchir les villes* », 263 p., Ecole des Mines de Paris, Paris,
- Sastre V., Arpagaus P., 2008.** « *Cartographie bathymétrique du Lac Léman (Petit-Lac)* », Institut Forel, Université de Genève,
- ScanE, 2007.** « *Plan directeur cantonal de l'énergie 2005-2009* », Administration cantonale, Genève,
- ScanE, 2010.** « *Modalités d'application de la nouvelle loi sur l'énergie (3^{ème} partie): planification énergétique territoriale* », Rencontres du ScanE, 22 octobre 2010, Genève,
- Schmid J., 2005.** « *Centrale de chauffe par thermopompes* », Domaine Immobilier et Infrastructures de l'EPFL, Suisse,
- SECOE, 2004.** « *Rappel succinct des conditions à respecter concernant le rejet des eaux utilisées à des fins hydrothermiques* », Administration cantonale, Genève,
- SIA, 1982.** « *Indices de calcul pour les installations du bâtiment* », Société suisse des Ingénieurs et Architectes, norme SIA n° 504 416/1, Suisse,
- SIA, 1992.** « *Performances techniques requises pour les installations de ventilation et de climatisation* », Société suisse des Ingénieurs et Architectes, recommandation SIA n° V382/1, Suisse,
- SIG, 2005.** « *APD- Avant-Projet détaillé n° 6'253-24-plans annexés* », Genève,
- SIG, 2008.** « *Rafrâchir et chauffer le quartier des Nations avec l'eau du lac* », Plaquette de présentation réalisée par SIG, Genève,
- SIG, 2011.** « *Tarifs de l'eau potable à Genève* »,
- Skagestad B., Mildenstein P., Y., 2002.** « *Programme of Research, development and demonstration on district heating and cooling: district heating and cooling connection handbook* », IEA, France,
- SNCU, 2009.** « *Enquête nationale sur les réseaux de chaleur et de froid: rapport provisoire* », Ministère de l'Ecologie, France,
- Spitzli M., 2008.** « *Rafrâchir et chauffer la Genève Internationale avec l'eau du lac: le projet Genève-Lac-Nations* », Actes du 3^{ème} Symposium sur les énergies renouvelables et l'environnement dans le bâtiment, 9-10 octobre 2008, Yverdon-les-Bains, Suisse,
- State of Hawaii., 2002.** « *Sea water district cooling feasibility analysis for the state of Hawaii* », Department of Business, Economic Development and Tourism, Hawaii,
- Steinmann Y., 1990.** « *Elaboration d'un système d'information géoréférée pour le suivi et la diagnose écologique d'une zone côtière du Léman: la Rade de Genève* », Travail de diplôme, 96 p., Université de Genève,
- Testard P., 1995.** « *Rôle des macrophytes littoraux dans le fonctionnement des écosystèmes lacustres* », In Limnologie générale pp. 296-327, Ed. Masson, Paris,
- Thévenot R., 1978.** « *Essai pour une Histoire du Froid Artificiel dans le Monde* », Institut International du Froid, Paris,
- Ulmann M., 2000.** « *Etude du contexte sédimentaire et hydrothermique de la zone Versoix – Les Hauts-Monts (Lac Léman, Suisse)* », Travail de diplôme, 94 p., Université de Genève,
- Union Européenne., 1978.** « *Directive du Conseil n° 78-695 du 18 juillet 1978 concernant la qualité des eaux douces ayant besoin d'être protégées ou améliorées pour être aptes à la vie des poissons* », 78/695, Bruxelles,
- Viquerat P. –A., Lachal B., Mermoud A., Week-endber W., Thomann P., Pampaloni E., 2008a.** « *Report of the energetic balances and of the environmental situation before the GLN-project* »,

European Integrated Projects FP6 Priority 6.1 “Sustainable energy systems”, TetraEner Project, CUEPE–Université de Genève,

Viquerat P. –A., Lachal B., Pampaloni E., 2008b. « *Report of the monitoring installations* », European Integrated Projects FP6 Priority 6.1 “Sustainable energy systems”, TetraEner Project, CUEPE–Université de Genève,

Viquerat P. –A., Lachal B., 2008c. « *Annual report of the energetic balances and environmental state of the project* », European Integrated Projects FP6 Priority 6.1 “Sustainable energy systems”, TetraEner Project, CUEPE–Université de Genève,

Viquerat P. –A., Lachal B., 2008d. « *Suivi environnemental lié à la concession du pompage hydrothermique Merck-Serono – SIG. Effets sur le Lac Léman à la hauteur du parc Barton, 1^{er} rapport: année 2007* », Mandat réalisé pour Merck-Serono et les Services Industriels Genève, Groupe Energie–Université de Genève,

Viquerat P. –A., Lachal B., 2009a. « *Annual report of the energetic balances and environmental state of the project* », European Integrated Projects FP6 Priority 6.1 “Sustainable energy systems”, TetraEner Project, CUEPE–Université de Genève,

Viquerat P. –A., Lachal B., 2009b. « *Suivi environnemental lié à la concession du pompage hydrothermique Merck-Serono – SIG. Effets sur le Lac Léman à la hauteur du parc Barton, 2^{ème} rapport: année 2008* », Mandat réalisé pour Merck-Serono et les Services Industriels Genève, Groupe Energie–Université de Genève,

Viquerat P. –A., Lachal B., 2010a. « *Annual report of the energetic balances and environmental state of the project* », European Integrated Projects FP6 Priority 6.1 “Sustainable energy systems”, TetraEner Project, Groupe Energie–Université de Genève,

Viquerat P. –A., Lachal B., 2010b. « *Suivi environnemental lié à la concession du pompage hydrothermique Merck-Serono – SIG. Effets sur le Lac Léman à la hauteur du parc Barton, 3^{ème} rapport: année 2009* », Mandat réalisé pour Merck-Serono et les Services Industriels Genève, Groupe Energie–Université de Genève,

Viquerat P. –A., Lachal B., 2011a. « *Annual report of the energetic balances and environmental state of the project* », European Integrated Projects FP6 Priority 6.1 “Sustainable energy systems”, TetraEner Project, Groupe Energie–Université de Genève,

Viquerat P. –A., Lachal B., 2011b. « *Final report evaluating the efficiency of the GLN project* », European Integrated Projects FP6 Priority 6.1 “Sustainable energy systems”, TetraEner Project, Groupe Energie–Université de Genève,

Viquerat P. –A., Lachal B., 2011c. « *Suivi environnemental lié à la concession du pompage hydrothermique Merck-Serono – SIG. Effets sur le Lac Léman à la hauteur du parc Barton, 4^{ème} rapport: année 2010* », Mandat réalisé pour Merck-Serono et les Services Industriels Genève, Groupe Energie–Université de Genève,

Viquerat P. –A., Hollmuller P., Lachal B., en cours. « *Connexion du bâtiment B1 au réseau GLN: analyse de la première année de fonctionnement* », Partenariat SIG – UNIGE, Contrat spécifique « ExpTherm », Université de Genève,

Vuille F. V., 2004. « *Bilan des énergies du site de l’EPFL à Ecublens: année 2003* », Service des constructions et d’exploitation de l’EPFL, Suisse,

Ward J. V., 1992. « *Aquatic insect ecology I. Biology and habitat* », Ed. John Wiley & Sons, Inc., New-York, NY,

Week-endtzel, R. G, Likens G. E., 1991. « *Limnological Analyses* ». 2nd Edition. Springer-Verlag, New York. 391 pp.,

WHO, 2007. « *Turbidity measurement – the importance of measuring turbidity* », Fact sheet 2.33, <http://www.who.int/en/>, WHO,

Wright J. F., Winder J. M., Gunn R. J. M., Blackburn J. H. et al., 2000. « *Minor effects of a River Thames power-station on the macroinvertebrates fauna* », Regulated Rivers: Research and Management 16:159-174,

Wüest A. et al., 2003. « *Effet à distance des centrale hydroélectriques alpines sur les lacs et cours d’eau situés en aval* », EAWAG News n° 55, pp. 18-20, Ed. EAWAG, Dübendorf,

Yik F. W. H., Burnett J., Prescott I., 2001. « *Predicting air-conditioning energy consumption of a group of buildings using different heat rejection method* », *Energy and Buildings* 33: 151-166,
Zraggen J. –M., 2010. « *Bâtiments résidentiels locatifs à haute performance énergétique: objectifs et réalités* », Thèse de doctorat n° 4'218, Université de Genève.