

Rejets thermiques dans le Rhône urbain genevois: mesures et modélisation

Hélène BEAUCHAMP¹, Cédric BEETSCHEN²,
 Patrick HAAS², Bernard LACHAL¹, Pierre-Alain VIQUERAT¹ et Eric PAMPALONI¹

Ms. reçu le 17 juillet 2006, accepté le 16 août 2006

I Abstract

Heated effluents and the urban Rhône in Geneva: measurements and simulations. - The effects of heated effluents on the thermal regime of the urban Rhône in Geneva have been analysed. The investigation into the effects of air-conditioning effluents involved in situ temperature measurement and the recording and analysis of meteorological conditions, as well as detailed simulations of thermal exchanges between heated effluents and the receiving waters. The computer simulations were validated using measured temperature profiles and water temperature data. Thermal effects were detected and described at a localized scale as well as more globally for the stretch of river considered. The impact of the current volume of heated effluents on the water temperature is slight, although localized warming does occur. The tools developed in the course of the project will permit resource-use planners to evaluate and minimize these effects.

Keywords: Rhône river; temperature; air-conditioning; thermal regime; simulation

I Résumé

Les effets des rejets thermiques dans le Rhône urbain genevois sur le régime thermique du fleuve ont été étudiés. Un modèle de simulation hydro-thermique du fleuve dans la région considérée a été réalisé. Les résultats des simulations ont été confirmés par des séries de mesures effectuées durant l'été 2005. Aussi bien l'échelle très locale («plume» thermique des rejets) que l'échelle globale (le réchauffement du Rhône et les conséquences éventuelles sur la vie fluviale) ont été traitées et montrent que si, à leur niveau actuel, les impacts environnementaux globaux des rejets thermiques sont très faibles, les réchauffements locaux peuvent être minimisés grâce aux outils et connaissances développés dans ce travail.

Mots clefs: Rhône urbain; rejets thermiques; rafraîchissement; simulation.

I La problématique

Dans le cadre du refroidissement de bâtiments et d'installations industriels, les cours d'eau représentent une source très convoitée. Elle permet d'augmenter l'efficacité des groupes de climatisation de manière sensible (Santamouris et al. 2004). A Genève, bien que les puissances thermiques dissipées actuellement dans le Rhône urbain soient relativement modestes, de nombreuses questions se posent sur les zones de concentration qui peuvent exister. On constate notamment que les rejets sont systématiquement situés sur les rives et que, de ce fait, la majeure partie du courant d'eau n'est pas concernée.

Il existe actuellement seize installations de climatisation disposées de part et d'autre du Rhône entre le Pont du Mont-Blanc et le barrage du Seujet (Tableau 1). L'effet de ces rejets doit être quantifié afin de garantir que l'utilisation du Rhône à des fins hydrothermiques soit réalisée dans une marge acceptable par le milieu. Dans ce but, des mesures de la température de l'eau du Rhône en amont et en aval des rejets thermiques ont été utilisées pour valider un modèle tridimensionnel du Rhône.

Les législations cantonale et fédérale décrivent les conditions à respecter en vertu de l'Ordonnance sur la protection des eaux du 28 octobre 1998 (OEaux). Cette dernière précise que:

¹ Cuepe, Centre Universitaire d'étude des problèmes de l'énergie, Université de Genève, 7 rte de Drize, CH1227 Carouge, - bernard.lachal@cuepe.unige.ch, - <http://www.cuepe.ch>

² CMEFE, Groupe de compétences en mécanique des fluides et procédés énergétiques, HES-SO, 4 rue de la prairie, CH 1202 Genève, - patrick.haas@hesge.ch - <http://www.cmefc.ch>

- L'eau rejetée ne doit pas dépasser la température de 30°C et ne pas augmenter la température du cours d'eau récepteur de plus de 1,5°C après mélange homogène.
- La température du cours d'eau récepteur ne doit en outre pas dépasser 25°C.
- Les eaux rejetées doivent être mélangées rapidement avec celles du cours d'eau; les mesures techniques mises en oeuvre pour assurer ce mélange doivent être soumises au département pour approbation (loi cantonale sur la protection des eaux).

Dans le canton de Genève, la totalité des cours d'eau sont considérés comme étant des zones à truites (OEaux).

Le Rhône est considéré comme un fleuve à la sortie du Léman, à partir du pont du Mont-blanc jusqu'au pont de Peney où commence la retenue du barrage de Verbois considérée, elle, comme un lac (OEaux). Ce tronçon est coupé par le barrage du Seujet qui constitue un obstacle pouvant être considéré comme une nouvelle condition limite, le brassage étant très fort. En effet, ce pont est équipé d'une centrale hydro-électrique et le passage au travers de cette installation offre un mélange suffisant pour admettre que le mélange possède en aval une température uniforme. Notre étude se limite à la partie urbaine du Rhône, c'est-à-dire à celle comprise entre le pont du Mont-Blanc et le barrage du Seujet.

■ Les rejets

La position des lieux de pompages et de rejets est donnée à la figure 1. Des données sur les rejets existant dans la partie du Rhône étudiée est présenté au tableau 1. La puissance actuellement injectée dans le Rhône urbain par les rejets thermiques avoisine 30 MW.

■ Mesures dans le Rhône urbain

La campagne de mesures de températures réalisée s'inscrit dans le cadre d'un travail de diplôme de Master en sciences naturelles de l'environnement de l'Université de Genève (Beauchamp 2006). Des mesures de la température faites *in situ* pendant la période de mi-juillet à mi-septembre 2005 ont permis de relever des profils thermiques de l'eau du Rhône et de comparer l'évolution horizontale et longitudinale de ces profils entre le Pont du Mont Blanc et le Pont de Sous-Terre. Ces profils mettent en évidence les effets réels localisés des rejets thermiques.

Les mesures ont été effectuées de manière ponctuelle et continue. Les températures ont été relevées à l'aide de thermocouples. L'analyse des températures enregistrées réalisée en tenant compte du fait que l'eau d'un fleuve ne reste pas stationnaire et qu'il

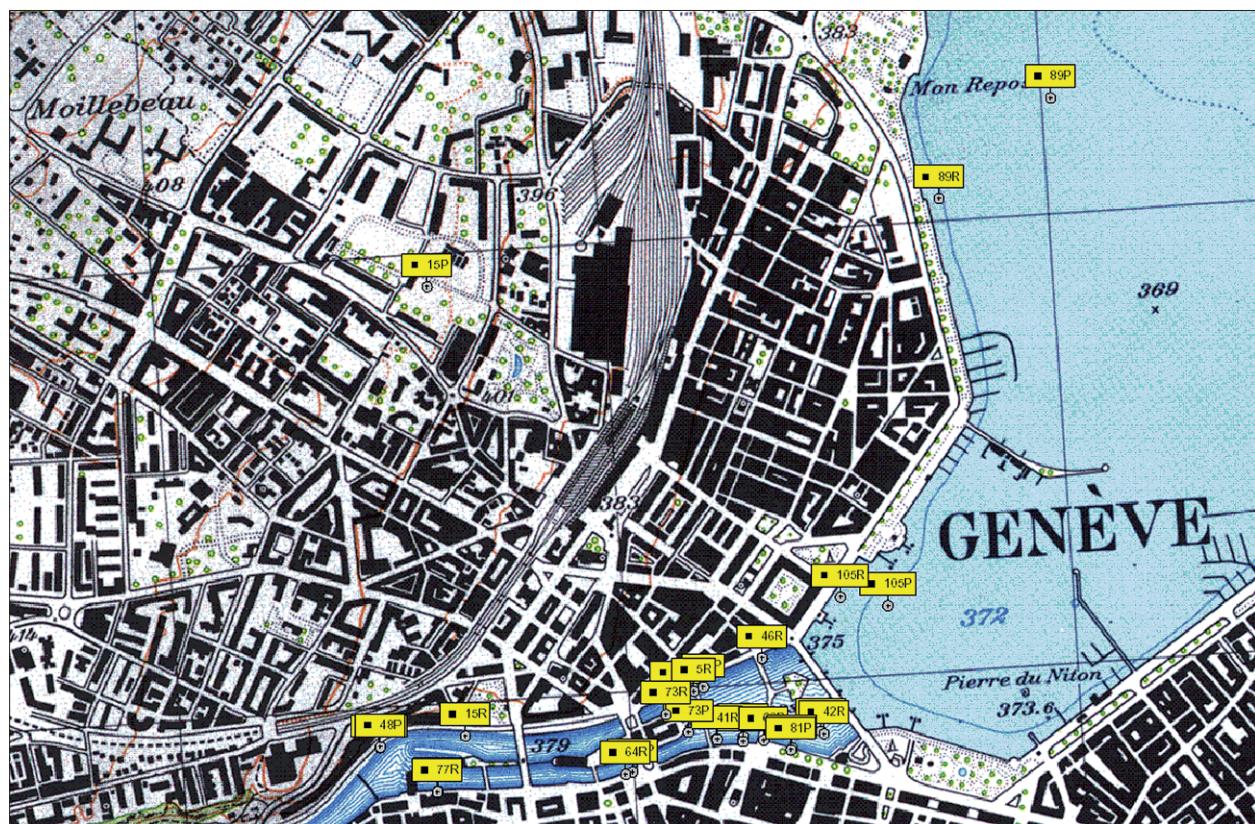


Fig. 1: Situation des rejets thermiques dans le Rhône urbain genevois (pont du Mont-Blanc – pont du Seujet, soit env. 1 km, selon les autorisations délivrées DIAE, P = lieu de pompage, R = lieu de rejet).

N°	Titulaire	Y [m]	X [m]	H [m]	Débit [l/min]
5	Grands magasins Manor	357	103	369.4	9700
15	Fondation prof. et sociale de Genève	870	169	368.7	1320
28	BNP Paribas (Suisse) SA	398	106	370.2	250
31	Coop City, centre Rhône-Fusterie	256	221	369	3600
39	Dresner Bank (Suisse) SA	255	221	368.6	4000
41	U.B.S.	312	216	368.5	11000
42	Zurich Assurance	74	216	370.15	2250
46	Hotel des Bergues	201	39		2383
48	Caisse de pention du canton de Zurich	1060	187	367.75	3833
62	Au Grand Passage-Innovation SA	147	243		1500
64	Credit Suisse First Boston	520	277	368.6	6500
73	Banque Cantonale de Genève	422	150	370.1	2000
77	Societe Le Capital Immobilier	940	289		2000
78	Lloyds bank A placer				300
81	Credit Agricole Indosuez (Suisse) SA	150	243		130
111	CGI Immobilier	1062	189	367.75	1333

Il y a des effets thermiques engendrés par les échanges entre le fleuve et l'atmosphère. En ce qui concerne les mesures ponctuelles, l'heure de chaque mesure a été notée. Une correction de 0.2°C par heure en moins des mesures prises successivement, soit dans la direction aval, soit dans la direction horizontale dans chaque zone mesurée a été effectuée. Ce chiffre correspond au taux d'échauffement mesuré au Pont du Mont Blanc et donc en amont de tout rejet thermique le jour des mesures. Lors des périodes de mesure réalisées, l'augmentation de la température à l'entrée du Rhône a été déduite des mesures effectuées. De cette manière, la valeur de référence est celle du Rhône au début de la période de mesure qui dure quelques heures.

Pour les mesures continues, la correction tient compte du fait que nous voulions évaluer l'évolution longitudinale de la température d'une même masse d'eau qui voyage à travers le Rhône urbain genevois. Ainsi, pour chaque moment où nous voulions comparer les températures amont et aval, nous avons calculé le temps de transit d'une masse d'eau en fonction du volume de la zone étudiée et du débit enregistré au barrage du Seujet. Le temps de transit varie entre 112 minutes quand le Rhône est à son débit minimum estival de 100 m³/s et 19 minutes quand il est au maximum d'environ 600 m³/s. Ce temps de transit nous renseigne sur le moment où la masse d'eau se trouvait en amont et aval du tronçon.

Un bilan thermique du Rhône a également été réalisé. Il tient compte des flux de radiation solaire, de radiation infrarouge, d'évaporation et de convection (Molineaux et al. 1994).

I Résultats

Les mesures ponctuelles ont permis la mise en évidence d'effets thermiques à une échelle plutôt localisée, se manifestant sur une distance de 10 à 100 mètres en aval des rejets. A de telles distances, des «plumes» d'eau chaude provenant des tuyaux de rejets se forment, engendrant des élévarions de température typiques de 0,4 à 0,6°C et parfois allant jusqu'à 1,0°C.

Tableau 1: Liste des rejets et position géographique dans le tronçon du Rhône étudié (partie urbaine). Donnée DIAE Genève.

L'enregistrement continu de la température de l'eau pendant quatre semaines a permis d'évaluer l'évolution de la température selon des cycles journaliers et hebdomadaires.

La température du Rhône varie en fonction du moment de la journée, des conditions météorologiques et des apports thermiques dus aux rejets d'origine humaine. La figure 3 montre les températures enregistrées à trois points au niveau du Pont du Mont-Blanc.

Il est intéressant de remarquer que la température ne franchit pas la valeur limite légale de 25°C autorisant le rejet.

Les températures varient également entre les rives droite et gauche de façon quasi-permanente. En effet, au Pont du Mont Blanc ainsi que sur la longueur du tronçon étudié, la température de l'eau sur la rive droite est légèrement plus élevée que celle sur la rive gauche (en moyenne de 0,3°C).

La dernière étape de l'analyse a consisté à quantifier l'échauffement de l'eau du Rhône entre le Pont du Mont Blanc et le Pont de Sous-Terre, et de calculer la part de cet échauffement qui est due aux rejets thermiques. Les flux météorologiques ont été pris en compte et le bilan final des échanges thermiques évalué. Le schéma de la Figure 5 montre les quantités ainsi obtenues. Il s'avère que les flux d'énergie les plus importants sont ceux de la radiation infrarouge entrant et sortant du Rhône. Les flux de radiation solaire et des rejets thermiques sont proches, et finalement ceux de l'évaporation et de la convection sont nettement plus faibles.

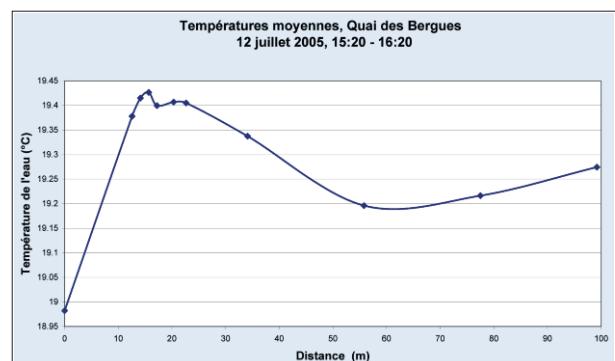


Fig. 2: Températures moyennées verticalement enregistrées le long du Quai des Bergues. Le pic de température vient juste après le rejet n° 5. Le point 0 correspond au Pont du Mont-Blanc.

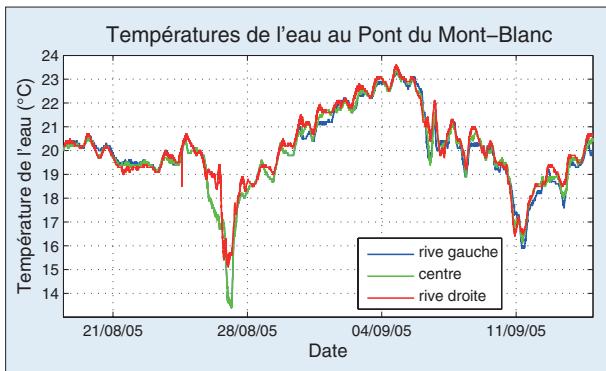


Fig. 3: Températures de l'eau enregistrées sur les rives droite et gauche du Rhône et au centre du Pont du Mont-Blanc (17 août 2005 au 15 septembre 2005).

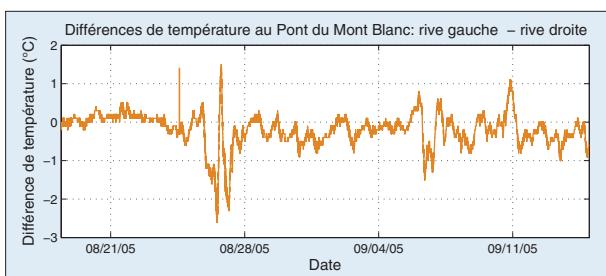


Fig. 4: Différences de température entre la rive gauche et la rive droite du Rhône au niveau du Pont du Mont-Blanc.

Une fois que les flux énergétiques ont été calculés, une comparaison a été faite entre l'échauffement de l'eau, calculé à partir des mesures enregistrées à l'amont et l'aval de la zone étudiée, et celui qui aurait eu lieu si les apports thermiques des rejets de climatisation n'étaient pas présents. Le graphique de la figure 5 montre les résultats obtenus. L'échauffement apparaît moins important que celui qui a été mesuré. L'échauffement résiduel typique, ou celui qui est attribuable aux rejets thermiques anthropiques, varie entre 0,2°C et 0,4°C. Des valeurs supérieures à celles-ci ont parfois été enregistrées. Il s'agit cependant de cas exceptionnels engendrés par les importantes précipitations au mois d'août 2005. Il est intéressant de noter que la valeur limite d'élévation de température de 1,5°C a été atteinte pendant un cours laps de temps. La température du fleuve était à environ de 15°C. La situation actuelle ne présente pas d'effet thermique correspondant à une situation de pollution thermique significative.

Modélisation hydraulique et thermique

Dans le voisinage de la buse de rejet, les vitesses du fluide chaud et du cours d'eau sont très différentes tant en direction qu'en amplitude. Dans cette région,

on constate qu'un fort mélange est présent. Quelques mètres plus en aval, la situation est déjà différente. L'eau rejetée se déplace avec une vitesse sensiblement égale à celle du cours d'eau et monte lentement vers la surface. Des nappes chaudes de surface se forment et sont transportées à l'aval sur plusieurs centaines de mètres.

Modèle géométrique

Un modèle géométrique a été construit sur la base de données bathymétriques réalisées par l'Institut F.A. Forel. Ces mesures ont été effectuées à l'aide d'un bateau muni d'un GPS et d'un sonar. Les nuages de points sont utilisés pour créer des coupes chaque 10 mètres. Dans la région du Seujet, des mesures bathymétriques réalisées lors de la construction du

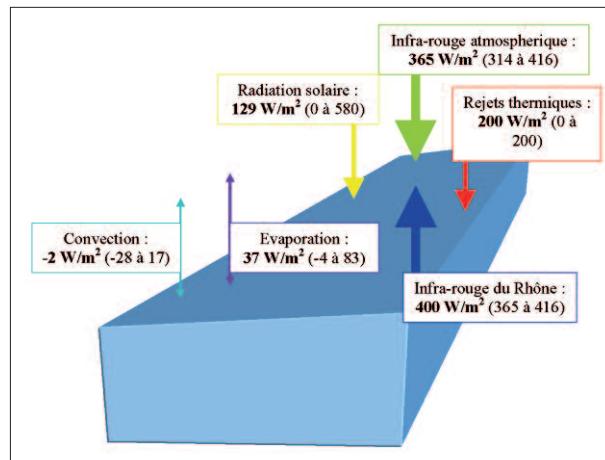


Fig. 5 (a): Flux énergétiques sortant et entrant du fleuve. Le bilan de ces flux donne un effet global d'échauffement ou de refroidissement.

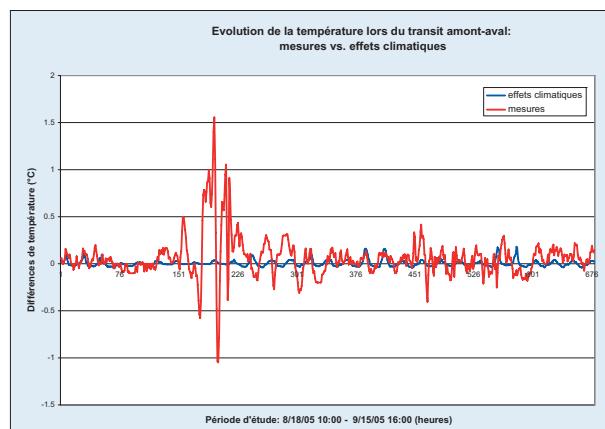


Fig. 5 (b): Comparaison entre l'échauffement réel entre le Pont du Mont Blanc et le Pont de Sous-Terre et l'échauffement théorique du uniquement aux conditions météorologiques.

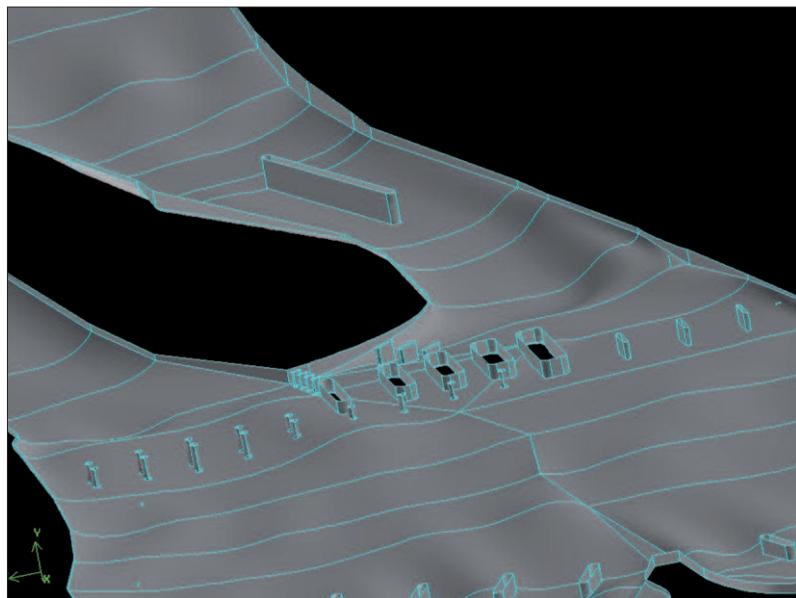
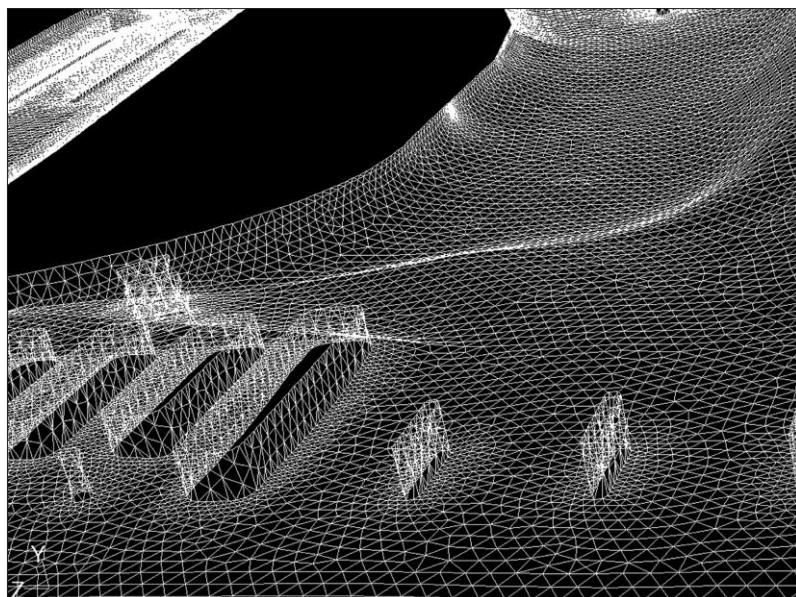


Fig. 6: Surfaces de lissage utilisées pour le modèle.

barrage en 1996 ont été utilisées. Sur la base de ce nuage de points des surfaces de lissage ont été créées et un volume a été généré (Fig. 6).

Maillage

Le modèle de simulation utilisé nécessite la découpe du domaine de calcul en éléments de volume. Pour cela le domaine est décomposé en deux millions de tétraèdres dont la taille varie en fonction de la distance entre le point considéré et certaines surfaces. Il s'agit du lit du fleuve, des bords, des piles de ponts et des surfaces de rejets (Fig. 7). La dimension des arêtes des tétraèdres varie de 0.1 m à 1.5 m. Le facteur de grossissement entre deux tétraèdres voisins n'excède pas 1.2.



Validation du modèle

Diverses situations ont été simulées. Elles correspondent à des jours différents. Les résultats présentés ci-dessous sont ceux valables le 12 juillet 2005 à 10h00. Il s'agit d'une situation typique existante durant l'été. Les valeurs mesurées au pont de la Machine et sur le quai Besançon-Hughes (rive gauche) seront utilisées pour valider le modèle. Le tableau 2 résume les conditions aux limites appliquées.

Fig. 7: Maillage du lit du Rhône (pont de la Machine).

Modèle et conditions aux limites

Le modèle de calcul utilisé est basé sur un schéma tridimensionnel en volumes finis. Il est largement décrit dans la littérature (Ferziger et Peric 2002; Patankar 1980). Un modèle de turbulence de type $\kappa-\varepsilon$ utilisant deux équations et deux variables permet de simuler les effets de la turbulence aux échelles plus petites que celle des mailles. Les deux nouvelles variables ajoutées aux équations de Navier-Stokes sont l'énergie cinétique de fluctuation κ et son taux de dissipation ε . Le modèle utilisé est celui de Launder et Spalding (1972), c'est le modèle dit standard. Des simulations avec la version RNG du modèle, tel que décrit par Choudhury en 1993 ont également été réalisées.

Les conditions aux limites du domaine de calcul sont de type stationnaire. Un flux thermique est appliqué à la surface du fleuve. Il est calculé à partir du flux solaire, de la convection et de l'évaporation (Molineaux et al. 1994). La limite amont au pont du Mont-Blanc est une entrée de masse avec des températures et des vitesses imposées selon les mesures effectuées. Les conditions initiales sont de type uniforme. Une température et une vitesse correspondant aux valeurs imposées en amont (pont du Mont-Blanc) sont appliquées dans tout le domaine. Puis, au temps initial, les charges thermiques sont appliquées et le calcul commence.

Tableau 2: Conditions aux limites du domaine de calcul valables le 12 juillet 2005.

Données	Valeurs	Unités
Lieu de la mesure	PM-BD	
Heure de la mesure	10h00	
Rayonnement direct et diffus	134	W/m ²
Humidité relative	68	%
Température de l'air	17	°C
Vitesse du vent	1	m/s
Température du Rhône	18.2	°C
Température des rejets	30	°C
% de turbulence du Rhône	1	%
% de turbulence des rejets	5	%
Coefficient de convection à la surface	51.4	W/m ² °C
Débit du Rhône	450	m ³ /s
Vitesse du Rhône (Mt- Blanc)	0.78	m/s
Temps de transfert d'un volume d'eau	23.76	min

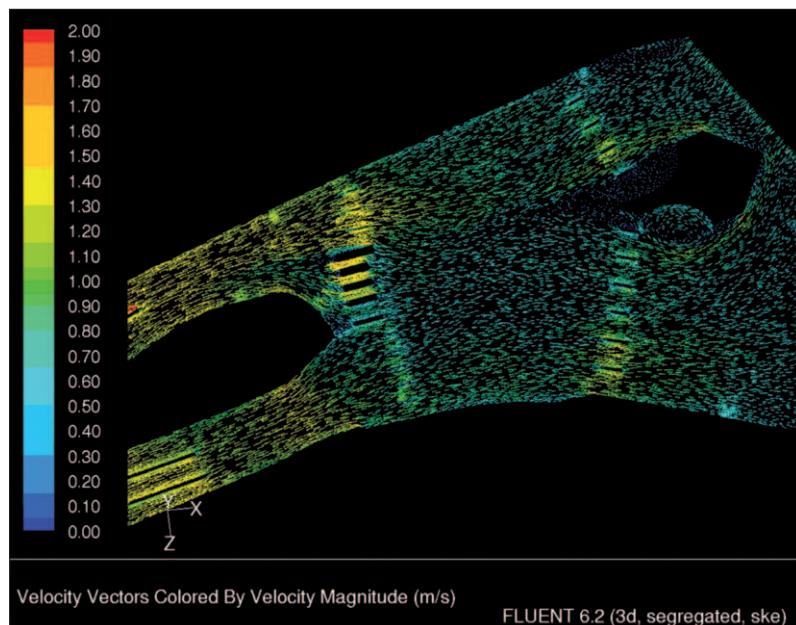


Fig. 8: Champ de vitesses à la surface du Rhône du Pont du Mont-Blanc à l'Ile rue des Moulins (12 juillet 2005).

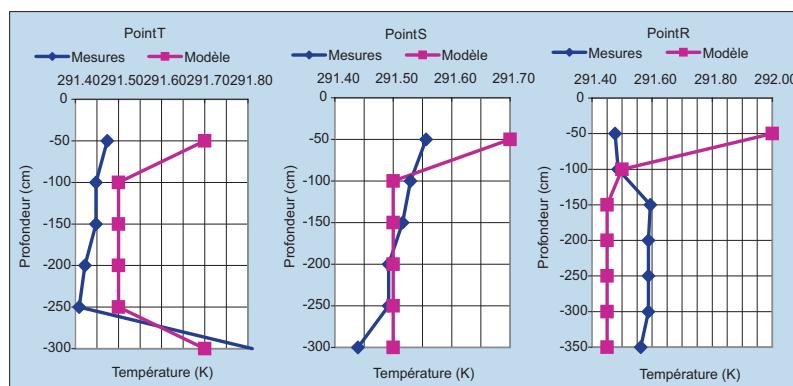


Fig. 9: Validation du modèle à l'aide de profils de températures mesurées au Pont de la Machine (12 juillet 2005).

Le modèle converge après environ 12 h de calcul. La figure 8 montre le champ de vitesses obtenu à la surface. On distingue nettement les zones à forte recirculation en aval de l'île Rousseau, ainsi que les augmentations locales de la vitesse proche des obstacles comme les piles de pont.

Le modèle a été validé sur la base des résultats expérimentaux. La figure 9 montre des comparaisons entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées pour des profils de température au pont de la Machine. La figure 10 montre les champs de températures. Les traînées laissées par les rejets sont clairement visibles. Bien que les écarts de température de ces panaches soient très faibles, on note que les échanges thermiques entre ces derniers et le fleuve sont quasi nuls à partir d'une distance de quelques mètres du point de rejet.

Les effets thermiques correspondent bien aux résultats de la modélisation, ce qui donne deux informations importantes: le modèle décrit bien la réalité de la situation thermique du Rhône urbain genevois, et l'effet de chaque rejet peut être quantifié, tant au niveau individuel qu'au niveau cumulatif.

Discussion

Une étude détaillée des échanges existant le long des trajectoires montre que 60 mètres en aval du point de rejet, la température atteint une valeur environ 0.1°C supérieure à celle du fleuve récepteur (Fig. 11). Cette valeur est ensuite constante sur plusieurs centaines de mètres. Le gradient de la température passe de 5°C/m proche du rejet à moins de 0.01°C/m une centaine de mètre plus en aval. Sur la figure 12 qui représente l'évolution de l'enthalpie massique, nous pouvons observer que 90% de l'échange d'énergie est réalisé dans les 2 premiers mètres. Une étude de l'évolution des vitesses et de la vorticité le long des trajectoires montre que les distributions de ces variables correspondent bien

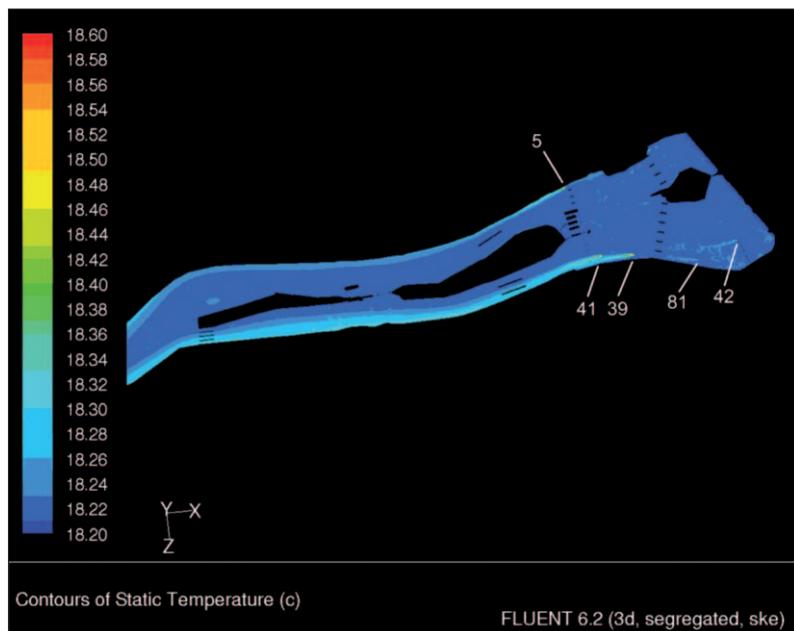


Fig. 10: Champ de températures à une profondeur de 2 m (12 juillet 2005).

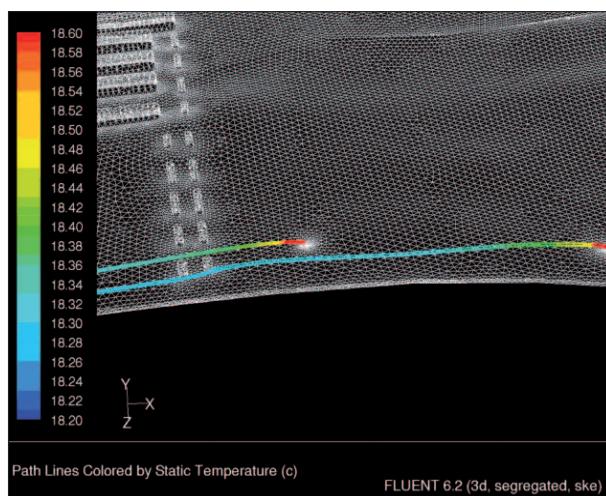


Fig. 11 (a): Rejets 39 et 41: Evolution de la température de l'eau de rejet (12 juillet 2005).

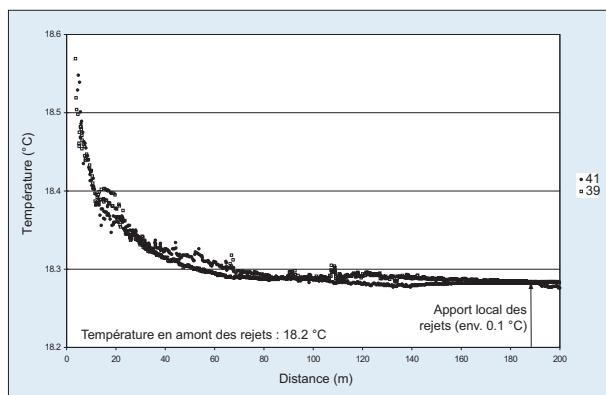


Fig. 11 (b): Rejets 39 et 41: Evolution de la température le long des trajectoires (12 juillet 2005).

aux effets observés sur les échanges d'énergie. Lorsque la vorticité ou une différence de vitesse élevée existe entre le rejet et le courant du fleuve, l'échange est fort.

D'une manière générale, les échanges entre l'eau de rejet et l'eau du fleuve s'effectuent par convection et par mélange dans la région de la buse de rejet, puis par conduction en aval de cette région. Les fortes différences de vitesse existant proche du rejet conduisent à un mélange des eaux. L'eau de rejet est entraînée et monte progressivement en surface. Lorsque la vitesse devient voisine de celle du fleuve, nous sommes alors en présence d'une nappe qui est portée par le fleuve et qui n'échange quasiment pas d'énergie avec l'extérieur. La température varie alors selon les gradients très faibles observés.

En s'imposant une limite pour l'augmentation de la température après mélange aussi basse que 0,2°C dans les périodes de bas débit (nuits et week-ends), la puissance thermique nominale des rejets pourraient être portée à trois fois sa valeur actuelle, soit environ 100 MW.

Conclusion

La présente étude a montré que les choix retenus pour la simulation du phénomène physique étudié, à savoir le modèle de turbulence, l'échelle de la discréétion spatiale, les conditions aux limites, ainsi que le modèle de calcul en volumes finis, permettent d'obtenir des résultats qui sont situés dans une marge d'erreur de la température inférieure à 0,1°C (Fig. 9).

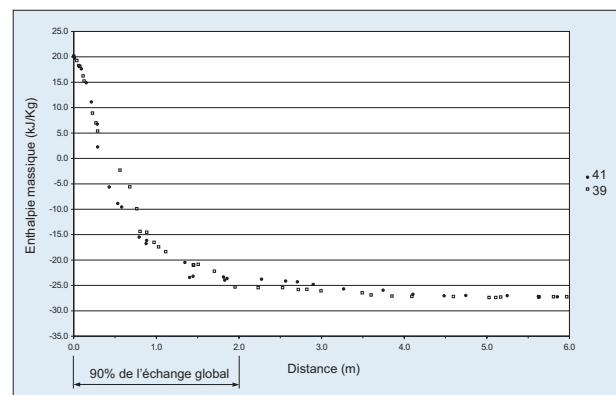


Fig. 12: Rejets 39 et 41: Evolution de l'enthalpie le long des trajectoires (12 juillet 2005).

Il a été montré que le mélange des eaux de rejets avec le cours d'eau récepteur est intense dans une région située à moins de quelques mètres du point de rejet. Dans cette région, des gradients de 5°C/m sont facilement observables. La variation de l'enthalpie est égale à 90% de la variation totale à 2 m du point de rejet (Fig. 12). Plus en aval, la situation est très différente, la différence de température entre le panache et le milieu récepteur atteint 0.1°C et est pratiquement constante (Fig. 11b). Cette conclusion montre l'intérêt de l'approche proposée. Un modèle de simulation tridimensionnel permet de choisir des emplacements favorables pour les points de rejets de manière à ne pas favoriser des zones de concentration et à épargner les lieux sensibles que sont notamment les berges.

L'approche développée est également utilisée par les auteurs dans le cadre du projet Européen TetraEner (TetraEner 2006) qui inclut une activité de démonstration intitulée «Genève - lac - Nations» des Services

Industriels de Genève (SIG). Ce sous-projet dont l'objectif est le rafraîchissement d'un quartier genevois pour une puissance totale de 12 MW, est aussi analysé en regard des aspects liés à l'environnement. Afin de garantir la conservation de l'habitat aquatique, le développement de l'utilisation du Rhône comme source froide doit s'insérer dans une optique d'utilisation rationnelle de l'énergie. Les autorisations existantes actuellement (Tableau 1) ne créent pas de situation de pollution thermique dans le sens légal du terme, bien que leur effet soit quantifiable. Enfin, un aspect qui devrait être pris en considération est le décalage temporel entre la période la plus sensible à l'élévation de la température du point vue écologique, qui est l'hiver et le printemps, et celle de l'exploitation de la ressource à des fins hydro-thermiques, qui est principalement l'été (rafraîchissement). Cet aspect n'est pas pris en compte actuellement dans la législation en vigueur qui mentionne des limitations identiques pour toute l'année.

Références

- **BEAUCHAMP H.** 2006. Heated effluents and the Rhône River. *In* Geneva: Thermal pollution or sustainable development? Master en sciences naturelles de l'environnement, faculté des sciences, Université de Genève, mémoire n° 140.
- **OEAUX.** 1998. – Ordonnance sur la protection des eaux, RS 814.201.
- **CHOWDHURY D.** 1993. Introduction to the renormalization group method and turbulence modeling, Fluent Inc. technical memorandum TM-107.
- **FERZIGER JH, PERIC M.** 2002. Computational methods for fluid dynamics, 3rd ed. Springer, Berlin.
- **LAUNDER BE, SPALDING DB.** 1972. Lectures in mathematical models of turbulence, Academic Press, London.
- **MOLINEAUX B, LACHAL B, GUISAN O.** 1994. Thermal analysis of five outdoor swimming pools heated by unglazed solar collectors, *Solar Energy*, 53: 21-26.
- **PATANKAR S.** 1980. Numerical heat transfer and fluid flow, 1rst ed. Hemisphere Publishing Corporation, New York.
- **SANTAMOURIS M, ADNOT J, ALVAREZ S, KLITSIKAS N ET AL.** 2004. Cooling the cities / Rafraîchir les villes. Ecole des Mines de Paris, Paris.
- **TETRAENER.** 2006. Projet Européen, sixième programme cadre FP6.