

MODÉLISATION GÉOSTATISTIQUE DES TEMPÉRATURES DE L'EAU DU RHÔNE

Rapport de recherche R1015

Septembre 2008

MODÉLISATION GÉOSTATISTIQUE DES TEMPÉRATURES DE L'EAU DU RHÔNE

Yves Trambly¹

Hervé Capra²

André Saint-Hilaire¹

¹ Chaire en Hydrologie statistique, INRS-ÉTÉ, Québec, Canada

² Laboratoire Dynam, CEMAGREF, Lyon, France

Rapport de recherche R1015

Septembre 2008

Référence

TRAMBLAY Y., CAPRA, H., SAINT-HILAIRE A., (2008). Modélisation géostatistique de l'eau du Rhône. INRS-ETE, rapport de recherche R-1015, 34 pages et 3 Annexes. ISBN 978-2-89146-583-0

REMERCIEMENTS

Je tiens tout particulièrement à remercier :

Hervé Capra pour son accueil à Lyon au laboratoire Dynam du Cemagref et le suivi des mes travaux.

Pascal Roger et Guillaume Rogel pour leur aide sur le terrain.

André Saint-Hilaire, pour ses conseils avisés tout au long de mes analyses

TABLE DES MATIERES

1-INTRODUCTION	8
2-PROBLÉMATIQUE ET MÉTHODES	10
2.1 PRINCIPE DU KRIGEAGE	11
2.2 ANALYSE CANONIQUE DES CORRELATIONS.....	14
2.3 COMPARAISON DE L'EFFICACITÉ DES APPROCHES.....	15
3-TEMPÉRATURES DU RHÔNE EN 2006	17
3.1 CARACTÉRISTIQUES ET VARIABILITÉ.....	17
3.2 SELECTION DES DATES IMPORTANTES	19
4-RESULTATS COMPARÉS DES DEUX APPROCHES DE KRIGEAGE	21
4.1 SÉLECTION DES THERMOGRAPHES ET VARIABLES EXPLICATIVES	21
4.2 KRIGEAGE DANS L'ESPACE GÉOGRAPHIQUE	22
4.3 KRIGEAGE DANS L'ESPACE CANONIQUE	25
4.4 COMPARAISONS DES DEUX APPROCHES	27
4-CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	29
RÉFÉRENCES	31
ANNEXES	32

INDEX DES FIGURES

Figure 1: Localisation des thermographes.....	9
Figure 2 : Températures moyennes journalières pour tous les thermographes	17
Figure 3 : Maximum de température enregistré pour chaque thermographe	18
Figure 4: Débit du Rhône à l’aval de la centrale	20
Figure 5 : Krigage de la température maximale du 16 juillet dans l’espace géographique	23
Figure 6 : Représentation de la position des thermographes dans l’espace canonique définit pour le 16 juillet.....	26
Figure 7 : Comparaison des RMSE pour les approches de krigage géographique et canonique.....	28

INDEX DES TABLEAUX

Tableau 1 : Débit moyen des jours sélectionnés	20
Tableau 2 : Corrélations entre variables de températures et caractéristiques des thermographes	22
Tableau 3 : Résultats du krigage dans l’espace géographique.....	25
Tableau 4 : Résultats du krigage dans l’espace Canonique	27

1-INTRODUCTION

L'objectif de cette étude est de tester une modélisation géostatistique de la température de l'eau sur un tronçon du Rhône (France) en comparant l'efficacité d'un krigeage classique dans un espace cartésien défini par la longitude et la latitude des stations, par rapport à un krigeage multivarié dans un espace Canonique défini par plusieurs variables physiographiques. Le secteur d'étude est la section comprise entre les communes de Sault-Brenaz et Jons à proximité de Lyon, tronçon sur lequel se situe la centrale nucléaire de Bugey, deux affluents principaux : l'Ain et la Bourbe et deux lônes (ou bras morts). Trente neuf thermographes ont été déposés le long de la section d'étude (Fig.1), sur les deux berges du Rhône et sont restés en fonctionnement à partir du mois de mai 2006. La lône (dite du Méant) équipée d'un thermographe est « bouchée » à l'amont (qui se situe juste à l'aval de la confluence de l'Ain) et est ouverte sur le Rhône dans sa partie aval. C'est dans cette partie aval que nous avons placé le thermo 34-14. Enfin, cette lône est en rive droite du Rhône. Une seconde lône, en rive gauche, fonctionne de la même manière, mais débouche juste en amont du pont de Jons, i.e. sur la limite aval du secteur étudié. Les thermographes ont été relevés en décembre 2006 et les données ont été extraites, ces données constituent la base de ce présent rapport, combinées avec des données issues du modèle hydrodynamique Modeleur, ainsi que les données hydrométriques de débit de la Banque Hydro.

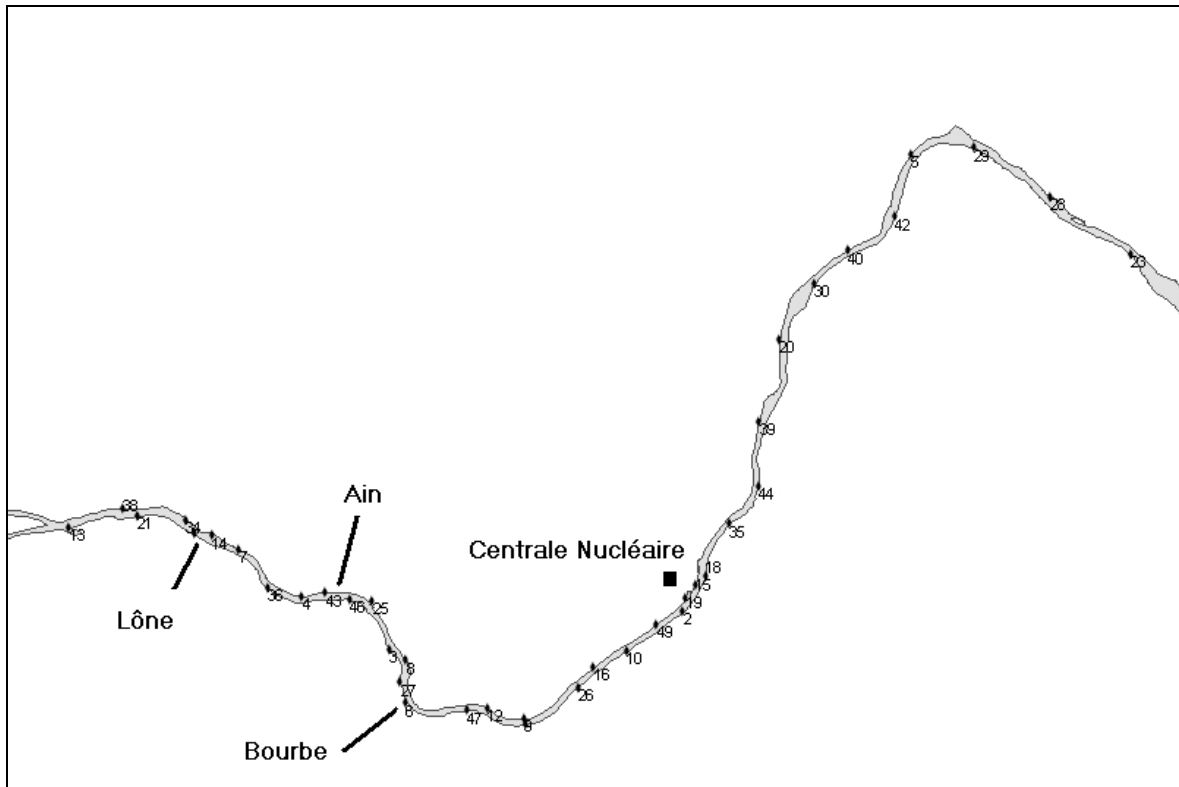


Figure 1: Localisation des thermographes

2-PROBLÉMATIQUE ET MÉTHODES

La température de l'eau est une variable essentielle de qualité de l'eau, en particulier pour l'étude des habitats aquatiques car ses variations ont des conséquences sur les propriétés biologiques et chimiques de l'eau (e.g. la concentration en oxygène dissous). Connaître sa variation spatiale pour différentes saisons ou périodes plus ou moins chaudes est d'un intérêt majeur dans la connaissance des populations de poissons notamment pour identifier les zones refuges ou de stress thermique (Gardner *et al.*, 2002). Le but de ce travail est de proposer une méthode d'interpolation spatiale basée sur les données enregistrées en des points de la rivière, et ainsi généraliser cette information sur l'étendue du tronçon. On emploie ici la méthode du krigeage, employée largement dans différents champs des sciences de la terre pour interpoler divers paramètres continus dans l'espace qui peuvent être des indicateurs climatiques (température, précipitation), pédologiques (propriétés des sols), etc. Nous allons comparer deux approches ; une approche de krigeage classique dans l'espace cartésien définit par les coordonnées en latitude et longitude des points de mesure, avec une autre approche de krigeage dite multivariée, dans un espace Canonique définit par des variables corrélées avec les températures de l'eau. L'efficacité relative des ces deux approches pour différents paramètres décrivant la température de l'eau sera mesurée par ré-échantillonnage.

2.1 PRINCIPE DU KRIGEAGE

La théorie de base du Krigeage, et par extension de l'approche géostatistique, est que les données sont continues dans l'espace, soit de manière uniforme, on parlera alors d'isotropie, ou de manière sélective (anisotropie), angulaire ou par distance d'influence. La variance intersites dépend ainsi de la distance entre les sites (Goovaerts 1999). Pour s'assurer que les données répondent à ce critère, il est nécessaire de générer un variogramme préalablement à l'estimation par Krigeage. Quand la forme du variogramme est connue, il devient possible d'estimer les valeurs pour les sites où l'on ne dispose pas de données en appliquant un modèle sur le variogramme pour interpoler les valeurs là où on ne dispose pas de mesure.

a) Dépendance spatiale

Pour décrire l'organisation spatiale d'une variable z , l'information disponible consiste en des valeurs de z à n sites. L'organisation spatiale des données est généralement donnée par le variogramme (équation 1), qui mesure la dissimilitude des données séparées d'une distance h .

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [x_i - y_i]^2 \quad (1)$$

Un variogramme peut être caractérisé par 3 paramètres : l'effet de pépité, le seuil et la distance d'influence, correspondant au début de la courbe et la distance au-delà de laquelle

il n'y a plus de dépendance spatiale. Plus le nombre de données disponible est grand, plus le variogramme sera précis.

b) Modélisation de la dépendance spatiale

La simple description des variations spatiales est rarement le but ultime de l'analyse géostatistique, on cherche souvent à prédire les valeurs de la variable d'intérêt là où l'on ne dispose pas de mesure. L'étape la plus importante entre la description et la modélisation de la dépendance spatiale entre les données est le choix d'un modèle de la distribution spatiale. L'hypothèse de base du Krigage est que l'ensemble des valeurs que l'on cherche à estimer est un ensemble de variables aléatoires avec une dépendance spatiale (Goovaert, 1997). Chaque donnée $z(u_a)$ est ainsi la réalisation particulière d'une variable aléatoire $Z(u_a)$. Pour modéliser les semi-variogrammes on utilise classiquement des fonctions de type exponentielles, sphériques ou gaussiennes. Un tel modèle s'écrit :

$$\gamma(h) = \sum_{l=0}^L b^l g_l(h) \quad (2)$$

Avec b^l est la pente du modèle de variogramme $g_l(h)$

De même que pour le variogramme, il est possible d'utiliser deux variables ou plus conjointement. Il existe différentes méthodes d'ajustement des modèles de variogramme,

dont certaines sont sujettes à des discussions, depuis l'ajustement graphique aux méthodes supervisées (Goovaert, 1997).

c) Prédiction

Les principales applications du krigeage sont l'estimation et la représentation cartographique. Le Krigeage est le nom générique adopté pour toute une famille d'algorithmes de régression par méthode des moindres carrés (Goovaert, 1997). Il existe différents types de krigeage ; simple, qui considère que la moyenne est connue et constante sur toute la zone d'étude, ordinaire, qui ne considère que la moyenne des points d'un voisinage, le Krigeage avec tendance ou encore le co-krigeage. Dans ce cadre de ce travail, seul le krigeage ordinaire, le plus couramment utilisé, sera retenu. Tous les types de Krigeage sont des variantes de l'estimation régression linéaire exprimée sous la forme :

$$Z(u) - m(u) = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}(u) [Z(u_{\alpha}) - m(u)] \quad (3)$$

Dans cette étude, toutes les étapes de krigeage (ajustement de modèles de variogrammes, estimation et ré-échantillonnage) ont été réalisées en utilisant le module « Geostatistical Analysis » de ArcGIS 9.

2.2 ANALYSE CANONIQUE DES CORRELATIONS

L'analyse canonique des corrélations développée en 1936 par H. Hotelling englobe en réalité la plupart des méthodes d'analyse des données comme cas particulier, qu'il s'agisse de la régression multiple, l'analyse de variance ou encore les analyses de correspondance (Bouroche et Saporta 2002). On peut trouver une description détaillée de cette méthode dans Lebart et al. (2000).

Dans notre étude, notre intérêt est de définir un nouvel espace en utilisant des variables physiographiques ayant une influence sur les températures de l'eau. Le but de l'analyse canonique est d'étudier les relations linéaires existant entre deux groupes de caractères quantitatifs observés sur un même ensemble d'individus. Soit $Y' = (Y_1, \dots, Y_r)$ et $X' = (X_1, \dots, X_q)$ respectivement des variables décrivant la température de l'eau et les variables physiographiques utilisées. On recherche une combinaison linéaire des caractères du premier ensemble et une combinaison linéaire des caractères du deuxième qui soient le plus corrélés possibles. On a W , le vecteur des variables canoniques de température et V , le vecteur des variables canoniques physiographiques :

$$W = \alpha_1 Y_1 + \dots + \alpha_r Y_r = \alpha' Y$$

$$V = \beta_1 X_1 + \dots + \beta_q X_q = \beta' X$$

Les vecteurs α et β sont estimés sous les conditions suivantes :

- Maximiser $\text{Corr}(W_i, V_i) = \lambda_i$ avec $i = 1, \dots, p$

- $Corr(W_i, W_j) = 0 \quad i \neq j$
- $Var(W_i) = Var(W_j) = 1$ avec $i = 1, \dots, p$

On suppose que les vecteurs de variables canoniques W et V suivent une distribution multivariée normale. La distribution conditionnelle de W étant donné V est alors p-normale. L'analyse Canonique permet donc de créer un espace Canonique, défini par V à partir des corrélations entre les variables physiographiques et de températures. Les points de mesure ne sont plus représentés dans cet espace seulement par leur position géographique. Il est alors possible de procéder à l'interpolation des températures par krigeage en substituant cet espace Canonique à l'espace cartésien en longitude/latitude.

2.3 COMPARAISON DE L'EFFICACITÉ DES APPROCHES

Dans le but de comparer l'efficacité relative de chacune des deux approches pour la prédiction des températures de l'eau, on utilise une technique de ré-échantillonnage par Jack-Knife. On retire successivement chaque observation de température puis on procède à l'estimation de cette observation manquante. Une fois cette opération réalisée pour tous les points de mesure, on obtient un ensemble de valeurs de températures estimées pour chaque point. On peut ainsi calculer différents indicateurs de performances telles que les biais relatif (RBIAS), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'erreur quadratique relative (RRMSE):

$$RBIAS[\%] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{T_t^i - Te_t^i}{T_t^i} \right) \times 100$$

$$RRMSE[\%] = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{T_t^i - Te_t^i}{T_t^i} \right)^2} \times 100$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_t^i - Te_t^i)^2}$$

N est le nombre d'individus, T les températures mesures au temps t , Te les températures estimées au temps t .

3-TEMPÉRATURES DU RHÔNE EN 2006

3.1 CARACTÉRISTIQUES ET VARIABILITÉ

Les données de température disponibles s'étendent du mois d'avril au début décembre 2006. La figure 2 montre pour l'ensemble des thermographes la température moyenne calculée pour chaque jour. On voit une alternance de périodes froides au printemps mais aussi au cours de l'été, tandis que les températures les plus élevées ont été enregistrées au mois de juillet.

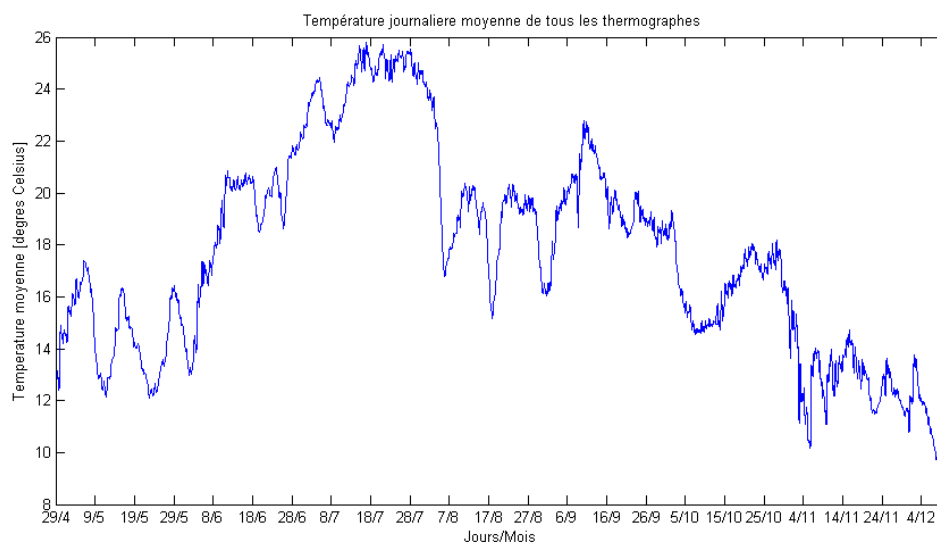


Figure 2 : Températures moyennes journalières pour tous les thermographes

La figure 3 montre pour chaque thermographe la température maximale enregistrée au cours de l'année 2006. On voit nettement à partir du thermographe 14 (19 sur la figure 1), directement en aval de la centrale nucléaire de Bugey, l'influence que peut avoir ses rejets

d'eau plus chaude que celle du Rhône. Tous les thermographes situés en aval de la centrale, en rive droite, enregistrent des températures maximales annuelles plus élevées que les autres thermographes. Pour certains thermographes, leur localisation à faible profondeur entraîne une exondation fréquente dans l'année pendant des périodes de faibles débits. Or les données de débit (figure 3) montrent une variabilité importante, de 200 à 1000 m³/s au cours de l'année, le régime naturel étant influencé par les retenues en amont et les déversements périodiques. Ainsi les séries de certains thermographes ne sont pas continues, entrecoupées de périodes où c'est la température de l'air qui est en fait enregistrée. Sur la figure 3 les faibles températures enregistrées par le thermographe 31 sont celles de la Lône, le thermographe étant situé dans celle-ci, à 200 mètres avant la jonction avec le Rhône.

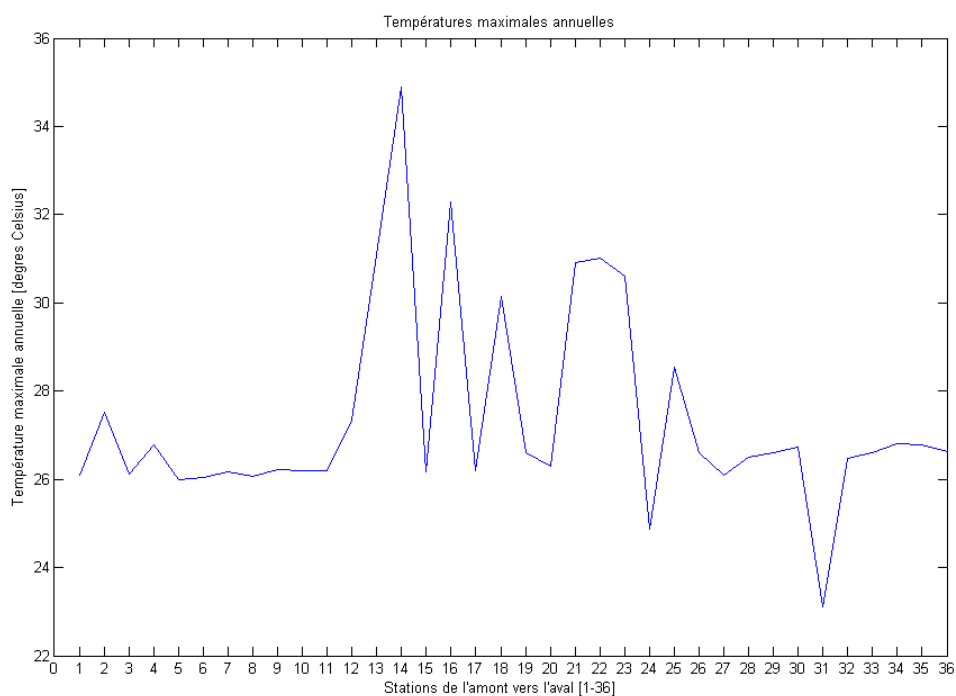


Figure 3 : Maximum de température enregistré pour chaque thermographe

3.2 SELECTION DES DATES IMPORTANTES

Au vu de ces différentes caractéristiques des températures de l'eau et du débit du Rhône (figure 4), plusieurs journées ayant un comportement thermique de l'eau pouvant avoir un impact sur les populations de poissons ont été retenues afin de tester les approches d'interpolation :

- 21 mai : Jour où est enregistré le débit maximum durant la période
- 1 juin : Pendant la période de reproduction, une baisse de 4°C en trois jours est observée (défavorable).
- 11 juin : Pendant la période de reproduction, remontée de température de 8°C (favorable).
- 16 juillet : Jour avec les températures annuelles les plus élevées.
- 27 juillet : Après l'éclosion la température maximale (26°C) est stable sur plusieurs jours (favorable).
- 5 août 2006 : Pendant la période de croissance survient une très forte baisse (presque 10°C en 5 jours) jusqu'à 15.6°C (défavorable).
- 10 décembre : Fin de la période de croissance : l'arrivée de l'hiver avec des températures inférieures à 10°C qui vont stopper la croissance (phase délicate et défavorable, surtout pour les jeunes).

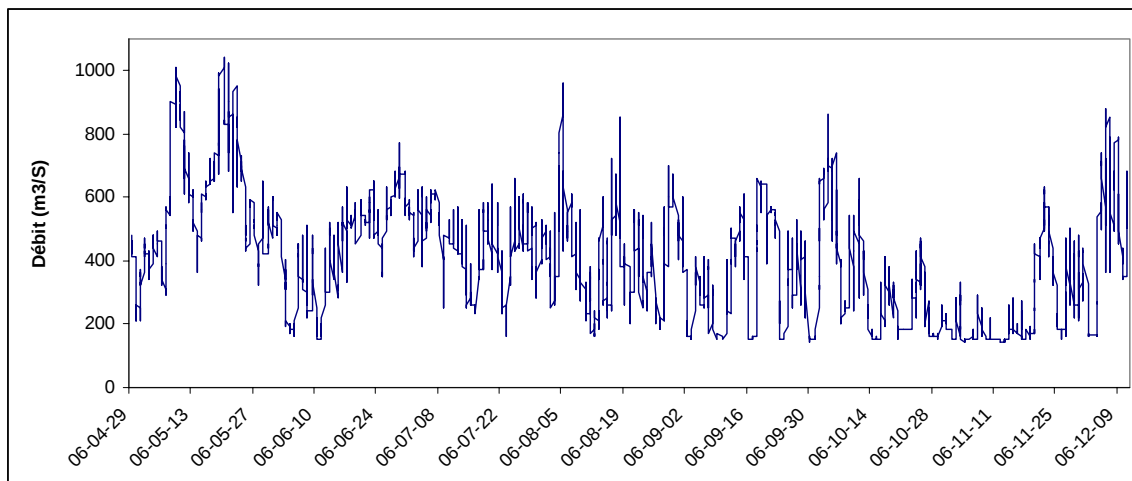


Figure 4: Débit du Rhône à l'aval de la centrale

Pour chacune de ces journées sélectionnées, on extrait la valeur maximale et minimale de températures, qui seront les indicateurs de température pour lesquels on va tester l'interpolation spatiale par krigeage. Les données de températures sont dans l'annexe 1 et les graphiques de l'annexe 2 représentent les valeurs maximales et minimales de température pour chaque thermographe conservé.

Tableau 1 : Débit moyen des jours sélectionnés

jours	m3/s
21-mai	837
01-juin	526
11-juin	172
16-juil	246
27-juil	531
05-août	679
10-déc	401

4-RESULTATS COMPARÉS DES DEUX APPROCHES DE KRIGEAGE

4.1 SÉLECTION DES THERMOGRAPHES ET VARIABLES EXPLICATIVES

Les thermographes situés dans les affluents tels que la Bourbe ont été retirés, car les températures enregistrées y sont généralement plus froides. La table des thermographes utilisés est en annexe 1. Outre les coordonnées en latitude et longitudes disponibles, différents attributs des emplacements où sont situés les thermographes sont disponibles, issus du modèle hydrodynamique Modeleur (INRS; Leclerc M., Secretan Y., Boudreau P., et coll.). La modélisation a été étalonnée, mais pas validée (Michon, 2007). Pour les quelques points où les données n'étaient pas disponibles, des mesures prises à la main ont permis de compléter la banque de données. Les variables disponibles sont :

- Altitude du fond du cours d'eau
- Vitesse d'écoulement à 300 m3
- Vitesse d'écoulement à 500 m3
- Hauteur d'eau à 300 m3
- Hauteur d'eau à 500 m3

La sélection des variables utilisées est basée sur les corrélations avec les variables de températures. Dans un souci de parcimonie, seules les variables de latitude, longitude, altitude du fond, vitesse et hauteur d'eau à 500 m3 ont été retenues (annexe 1). La table 2

indique les corrélations entre les variables de températures et les différentes variables sélectionnées. On voit que les corrélations ne sont pas systématiques entre les indicateurs de température et les variables décrivant la localisation des thermographes. De manière générale les coefficients de corrélation sont faibles pour plusieurs paramètres selon les journées sélectionnées.

Tableau 2 : Corrélations entre variables de températures et caractéristiques des thermographes (coefficient de corrélation de Spearman, en gras les corrélations significatives au seuil de 5%)

	LAT	LON	Z_MOY	VIT_50	HAUT_500
Max-1jun	0,411	-0,601	-0,553	0,488	0,382
Min-1jun	0,354	-0,562	-0,528	0,458	0,356
Max-11jun	0,366	0,009	0,054	0,016	-0,240
Min-11jun	0,261	-0,395	-0,265	0,273	0,275
Max-27juil	0,361	-0,420	-0,357	0,216	0,159
Min-27juil	0,178	0,747	0,769	-0,632	-0,425
Max-5aug	0,182	-0,698	-0,661	0,616	0,366
Min-5aug	0,124	-0,705	-0,657	0,585	0,292
Max-10dec	0,427	-0,590	-0,506	0,429	0,301
Min-10dec	0,395	-0,585	-0,523	0,449	0,373

4.2 KRIGEAGE DANS L'ESPACE GÉOGRAPHIQUE

Dans ce cas de krigeage, on utilise uniquement les coordonnées géographiques des thermographes en latitude / longitude. Afin de modéliser de manière plus réaliste la dépendance spatiale des températures (ne pas interpoler les températures en dehors du cours

d'eau) les coordonnées ont été modifiées afin de représenter linéairement le Rhône, conservant la distance amont aval représentée par la longitude tandis que la latitude représente la situation rive gauche ou rive droite par une distance constante de $8 \cdot 10^{-3}$ degrés décimaux.

Le modèle sphérique de variogramme étant celui produisant le meilleur ajustement dans la majorité des cas, il a été retenu pour modéliser la dépendance spatiale de chacune des variables de températures sélectionnées afin de faciliter la comparaison entre les résultats.

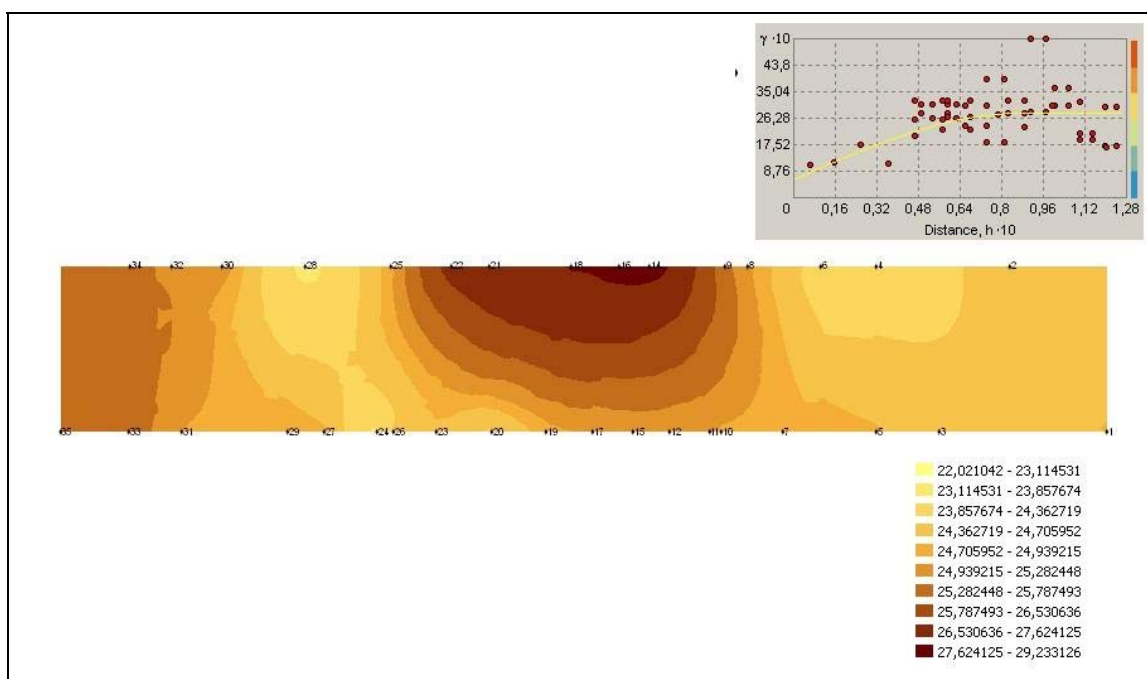


Figure 5 : Krigeage de la température maximale du 16 juillet dans l'espace géographique

La figure 5 montre le krigeage réalisé pour la température du 16 juillet, la journée avec la température la plus élevée de l'année. Le variogramme avec le modèle ajusté sont

représentés en haut à droite. La largeur du Rhône a été artificiellement agrandie pour faciliter la représentation. On observe nettement le panache thermique du rejet de la centrale au niveau du thermographe 14, ainsi que la zone de refroidissement au niveau de la confluence avec l'Ain (thermographe 28). On remarque aussi que l'interpolation ne prend pas en compte le sens de l'écoulement, car le panache thermique induit par le rejet au niveau de la centrale est visible également en amont de ce dernier.

Les résultats du ré-échantillonnage sont présentés dans la table 3. On observe une grande variabilité des performances, avec des RMSE de 0,3 à 5 degrés Celsius. La plus forte incertitude est mesurée pour l'interpolation des températures du 10 décembre et du 11 juin avec des RMSE supérieurs à 3 degrés. A l'inverse la meilleure performance est obtenue pour la modélisation des températures maximales et minimales du 27 juillet, avec des RMSE inférieurs à 1 degré. Il n'y a pas d'erreurs systématiques entre les maximums et minimums de température.

Tableau 3 : Résultats du krigeage dans l'espace géographique

	ERREUR MOY	Biais R	RMSE	RMSE R
Max-21may	-0,041	-1,77%	2,115	13,49%
Min-21may	-0,047	-1,50%	1,713	11,77%
Max-1jun	-0,068	-2,72%	2,731	17,57%
Min-1jun	-0,099	-3,35%	2,693	18,96%
Max-11jun	0,111	-3,13%	5,024	19,42%
Min-11jun	-0,022	-4,19%	3,479	21,44%
Max-16juil	-0,035	-0,59%	2,202	7,90%
Min-16juil	0,041	-1,19%	2,734	13,84%
Max-27juil	-0,011	-0,06%	0,372	1,38%
Min-27juil	0,002	-0,02%	0,418	1,67%
Max-5aug	-0,007	-0,12%	0,562	2,91%
Min-5aug	0,003	-0,14%	0,712	4,15%
Max-10dec	-0,116	-6,69%	3,411	31,21%
Min-10dec	-0,092	-10,39%	3,354	46,71%

4.3 KRIGEAGE DANS L'ESPACE CANONIQUE

Dans ce cas, on utilise d'une part les variables physiographiques de latitude, longitude, altitude du fond, vitesse et hauteur d'eau à 500 m3 pour définir un espace canonique. D'autre part, on utilise pour chaque journée le couple des valeurs maximales et minimales de température pour chaque thermographe. C'est dans l'espace canonique défini par ces deux ensembles de variables que l'on procède au krigeage. La figure 6 montre l'espace canonique défini pour le krigeage des températures du 16 juillet. La position relative de

chaque thermographe n'est dans ce cas pas uniquement déterminée par la position en latitude et longitude. On observe néanmoins une répartition des sites entre rive droite et rive gauche. Comme dans le cas du krigeage dans l'espace géographique, on utilise un modèle sphérique de variogramme.

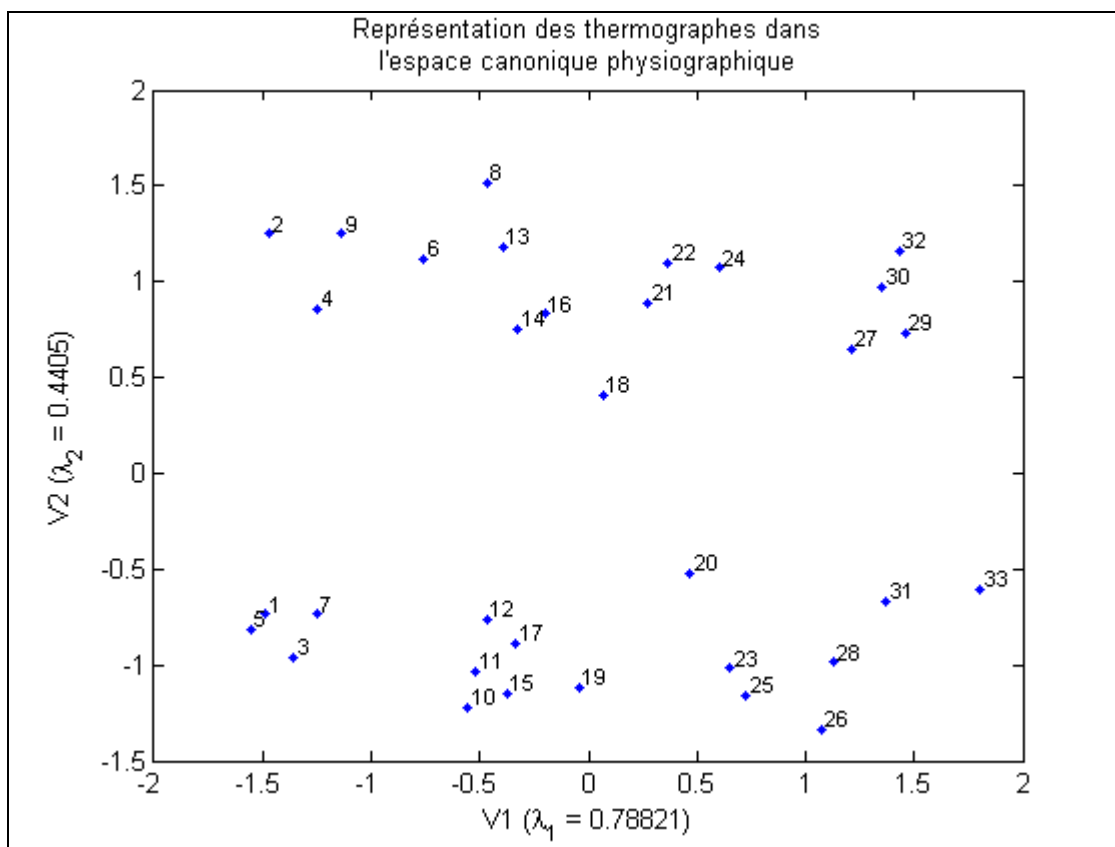


Figure 6 : Représentation de la position des thermographes dans l'espace canonique défini pour le 16 juillet

La table 3 présente les indicateurs de performance du krigeage dans l'espace canonique pour chaque journée. Les performances varient fortement selon les jours considérés, avec des RMSE variant de 0,3 à 4,9 et des RMSE relatifs de 1 à 45%. Tout comme dans le cas du krigeage dans l'espace géographique on observe les plus faibles performances

d'estimation pour les journées du 11 juin et du 10 décembre, et les meilleurs pour le 27 juillet 2006 (Température élevée).

Tableau 4 : Résultats du krigeage dans l'espace Canonique

	ERREUR MOY	Biais R	RMSE	RMSE R
Max-21may	-0,068	-1,70%	1,704	10,10%
Min-21may	-0,043	-1,17%	1,306	8,22%
Max-1jun	-0,102	-2,41%	2,124	13,29%
Min-1jun	-0,096	-2,79%	2,138	14,74%
Max-11jun	0,051	-3,23%	4,999	20,48%
Min-11jun	-0,111	-4,50%	3,290	21,42%
Max-16juil	-0,014	-0,26%	1,379	5,09%
Min-16juil	0,084	-0,92%	2,640	12,90%
Max-27juil	-0,004	-0,03%	0,334	1,24%
Min-27juil	-0,002	-0,03%	0,359	1,42%
Max-5aug	-0,006	-0,13%	0,608	3,16%
Min-5aug	-0,002	-0,19%	0,734	4,30%
Max-10dec	-0,060	-5,09%	2,784	24,00%
Min-10dec	-0,097	-9,89%	2,853	45,26%

4.4 COMPARAISONS DES DEUX APPROCHES

La figure 7 montre la comparaison des RMSE des températures maximales pour les deux approches de krigeage. Le graphique représentant les températures minimales présente les mêmes caractéristiques et n'a donc pas été représenté. Les erreurs d'estimations sont de

même ordre de grandeur dans les deux approches de krigeage pour les journées considérées. Hormis les maximums et minimums de température enregistrés la journée du 5 aout, le krigeage des températures dans l'espace canonique donne de meilleurs résultats que dans l'espace géographique (tables 2 et 3). Les RMSE sont plus faibles en moyenne de 0,3 degrés dans le cas du krigeage dans l'espace canonique. Il n'y a pas de lien apparent entre les erreurs d'estimation, les températures, les corrélations avec les variables physiographiques et le débit de journées considérées.

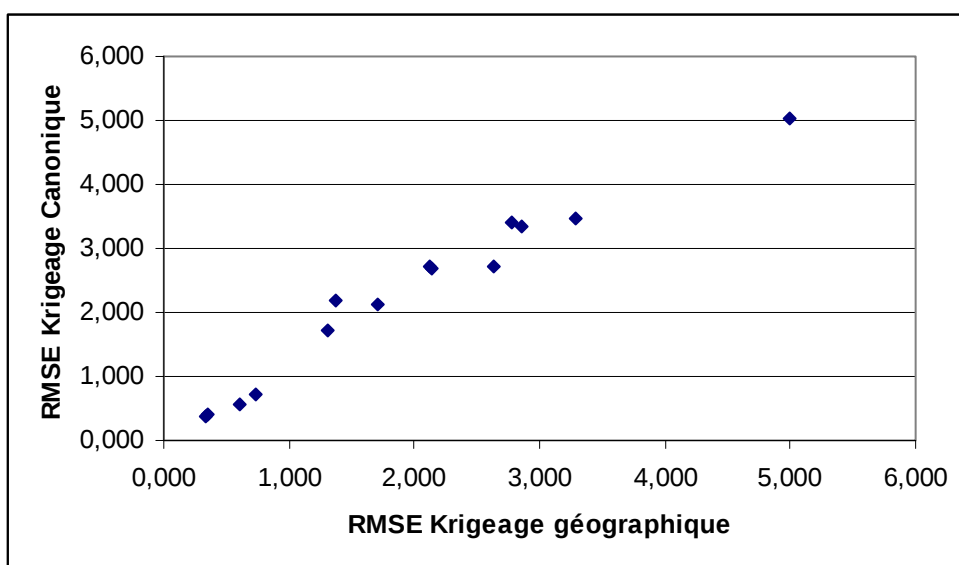


Figure 7 : Comparaison des RMSE pour les approches de krigeage géographique et canonique

4-CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

- Le krigeage des températures du Rhône donne de meilleurs résultats quand il est réalisé dans un espace canonique défini par des variables explicatives d'altitude, débit et niveau d'eau plutôt que dans le cas d'un krigeage réalisé uniquement avec les coordonnées géographiques des thermographes. La performance de l'estimation varie de 0,3 à 5 degrés, selon les jours sélectionnés.
- La difficulté principale du krigeage canonique réside dans la représentation cartographique des résultats. Si dans le cas du krigeage géographique chaque point est représenté par ses coordonnées en latitude et longitude, dans le cas du krigeage canonique représenter les résultats sur une carte implique de calculer les caractéristiques d'altitude, débit et niveau d'eau en chaque point du cours d'eau préalablement à l'interpolation.
- La forte variabilité des températures dans les données originales se retrouve dans les résultats de l'interpolation, les RMSE varient de 0,3 à 5 degrés selon les jours considérés. Cette variabilité peut être causée par différents facteurs; la régulation du cours d'eau en amont, qui engendre une modification du régime annuel, le rejet de la centrale, dont la température peut varier au cours du temps et l'emplacement des thermographes dont certains sont situés sur des emplacements fréquemment exondés à faible débit.
- Cette étude se base sur des données décrivant l'emplacement des thermographes, issus d'un modèle hydrodynamique. D'autres tests de krigeage pourraient être

menés en utilisant non seulement des variables issues de modèles d'écoulement mais également des mesures prises in situ caractérisant les sites de mesure.

- Dans le but d'améliorer la modélisation de la dépendance spatiale des températures, d'autres approches de krigeage pourraient être testées, telles que le co-krigeage par exemple si l'une des variables explicatives s'avérait fortement liée avec les températures observées.

RÉFÉRENCES

Bouroche, J.M., Saporta, G. (1980) L'analyse des données, Paris, Presses Universitaires de France, Col. Que sais-je ?.

Gardner, B., Sullivan, P.J., Lembo, A.J. (2003) Predicting stream temperatures: geostatistical model comparison using alternative distance metrics. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 60: 344–351.

Goovaerts, P. (1999), Geostatistics in soil science: state-of-the-art and Perspectives, Geoderma 89: 1–45.

Lebart L., Piron, M., Morineau A. (2000) : Statistique exploratoire multidimensionnelle, Dunod, 439p.

ANNEXES

ANEXE 1 : Liste des thermographes

T	LAT	LON	Z_MOY	VITES_500	HAUT_500
t1	45,75	5,4074	187,75	0,50	1,00
t2	45,751	5,378	192,78	0,20	0,50
t3	45,75	5,3567	191,99	0,70	1,00
t4	45,751	5,338	190,26	0,90	2,00
t5	45,75	5,3378	191,11	0,50	2,00
t6	45,751	5,3212	189,99	0,50	0,70
t7	45,75	5,3097	189,95	0,50	2,00
t8	45,751	5,2992	188,83	0,20	0,40
t9	45,751	5,2925	188,25	0,40	3,00
t10	45,75	5,291	186,24	3,55	3,24
t11	45,75	5,2877	186,23	2,09	2,39
t12	45,75	5,2757	188,36	0,79	1,08
t13	45,751	5,272	187,46	0,63	1,25
t14	45,751	5,2695	186,26	2,55	2,89
t15	45,75	5,2647	186,92	2,92	2,72
t16	45,751	5,2603	186,62	2,03	2,13
t17	45,75	5,2524	186,22	1,55	2,44
t18	45,751	5,2459	185,51	8,37	3,91
t19	45,75	5,2383	185,92	3,34	2,62
t20	45,75	5,2221	185,61	0,72	0,53
t21	45,751	5,2215	186,37	2,12	1,56
t22	45,751	5,2099	186,92	1,12	1,00
t23	45,75	5,2056	178,81	6,61	5,06
t26	45,751	5,1918	182,66	2,07	2,38
t27	45,75	5,1925	182,95	6,62	2,56
t29	45,75	5,1718	182,44	12,95	2,71
t30	45,751	5,1661	182,08	8,89	2,36
t31	45,75	5,1607	181,50	5,42	2,15
t33	45,751	5,1409	179,25	10,52	3,81
t35	45,751	5,1259	180,27	4,78	3,40
t36	45,75	5,1129	180,52	2,78	2,36
t37	45,751	5,1132	179,07	3,26	3,60
t38	45,75	5,0922	176,95	3,94	3,03

ANNEXE 2 : Données de température

T	Max1jun	Min1jun	Max11jun	Min11jun	max21juin	min21juin	max16juil	min16juil	Max27juil	Min27juil	Max5aug	Min5aug	Max10dec	Min10dec
t1	13,2	11,8	31,1	11,5	12,3	11,7	25,6	24,4	26,1	25,4	18,4	16	8,7	8,7
t2	12,74	11,49	34,28	12,27	12,43	11,81	25,2	24,0	26,72	24,61	19,26	16,19	8,08	2,75
t3	12,28	11,2	24,9	14,13	12,12	11,66	29,8	18,9	26,12	25,42	17,94	15,71	8,72	8,26
t4	12,05	10,82	32,36	16,74	11,74	11,43	30,4	17,4	25,89	25,02	17,71	15,32	8,33	8,03
t5	12,15	10,91	19,91	14,32	11,84	11,53	25,1	19,1	25,99	25,12	17,97	15,57	8,43	8,28
t6	12,39	11,16	31,53	12,08	12,08	11,62	27,2	21,5	26,04	25,01	18,04	15,67	8,84	8,37
t7	12,28	11,04	20,02	13,52	11,97	11,51	26,1	24,7	26,07	25,04	18,08	15,54	8,57	8,11
t8	12,41	11,18	19,21	17,27	11,95	11,64	26,2	23,9	26,08	25,04	18,23	15,53	8,54	8,08
t9	12,49	11,26	19,97	17,05	12,03	11,72	26,4	24,0	26,06	24,84	18,49	15,62	8,77	8,31
t10	13,2	12	19,7	17,1	12,4	11,7	30,3	16,6	26,2	24,5	19,2	16,2	8,6	8,3
t11	12,47	11,22	17,82	14,64	12,16	11,69	27,3	20,3	26,19	24,97	18,47	15,59	8,58	8,28
t12	12,37	11,13	34,04	12,68	12,22	11,6	31,1	28,0	26,2	24,81	18,51	15,64	8,51	8,2
t13	15,76	14,34	25,13	20,58	14,49	13,57	25,7	24,1	27,77	26,18	20,26	18,15	14,81	12,95
t14	23,2	21,9	24,7	16,6	22,2	19,7	26,4	24,3	26,6	24,7	19,7	16,6	18,6	18,3
t15	12,39	11,16	20,32	17,26	12,08	11,62	26,6	24,7	26,08	24,87	18,38	15,51	8,52	8,22
t16	21,3	19,9	29,1	24,7	17,4	15,9	25,7	24,0	26,6	24,5	19,7	16,5	18,4	17,8
t17	13,3	12,1	20,3	17,2	12,6	11,8	25,3	24,1	26,2	24,4	19,4	16,3	8,7	8,4
t18	19,07	17,44	28,12	23,88	16,49	15,06	29,9	25,1	26,68	25,1	19,07	16,33	17,61	16,64
t19	12,56	11,31	20,86	15,37	12,24	11,77	26,7	24,5	26,35	24,6	18,74	15,68	8,51	8,2
t20	12,44	11,37	24,9	13,68	12,29	11,83	29,2	18,9	26,29	24,21	18,74	15,72	9,2	8,27
t21	18,3	17,2	26,4	23,9	15,9	14,6	28,7	25,6	26,6	24,7	19,9	16,8	16	14
t22	18,1	16,66	28,06	23,01	16,03	14,76	25,6	24,2	26,81	25,07	19,23	16,5	16,03	15,08
t23	13,6	12,4	33,2	12,9	12,9	12,1	29,1	25,4	26,4	24,2	19,7	16,5	9	8,7
t26	15,53	14,12	31,84	13,04	14,43	13,66	26,2	24,0	26,66	24,74	19,06	16,17	12,11	11,64
t27	14,2	13,3	25,2	12,1	13,5	12,7	25,9	24,2	26,4	24,2	19,7	16,8	10,2	9,5
t29	14,3	13,3	22,4	20	13,5	12,7	25,7	24,2	25,9	24,5	20	16,6	10,3	9,5
t30	13,57	11,4	33,78	12,02	13,57	11,87	26,2	23,9	26,16	23,74	20,74	18,15	9,85	9,23
t31	13,6	12,1	21,8	18,1	13,5	11,8	25,7	24,2	26,2	23,7	20,6	18,4	9,8	9,5
t33	13,89	12,34	22,26	19,14	13,73	12,34	29,3	23,2	26,38	24,29	19,79	17,69	10,02	9,55
t35	14,24	12,85	24,82	17,08	13,31	12,69	26,6	21,9	26,38	24,47	19,17	16,13	10,53	10,06
t36	14,2	13,2	21,9	18,8	13,6	12,4	25,9	24,0	26,4	24	19,5	18,4	10,1	9,6
t37	14,6	13,8	22,4	19,9	13,8	13	26,6	25,1	26,6	24,4	20	16,8	10,6	9,8
t38	13,93	12,38	22,13	19,18	13,62	12,53	29,2	25,3	26,43	24,17	19,51	17,41	10,06	9,59

ANNEXE 3 : Températures maximales (trait plein) et minimales (trait hachuré) pour chaque thermographe de l'amont vers l'aval

