

Rapport Technique RT-117

**Modélisation 2D de la  
température de l'eau sur la  
batture Thaïlandier**

Jean Morin, Yves Secretan, Olivier  
Champoux et Alain Armellin

Août 2002

**Pour fin de citation :**

Morin, J., Y. Secretan, O. Champoux et A. Armellin 2002. Modélisation 2D de la température de l'eau sur la batture Thaïlandier. Rapport technique SMC Québec – Section Hydrologie RT-117, Environnement Canada, Sainte-Foy. 61 pages.

© Ministère des Approvisionnements et Services Canada 2002  
N° de catalogue En57-39/103F

ISBN : 0-662-86937-0

# Table de matières

---

<b>TABLE DE MATIÈRES</b> .....	<b>III</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>IV</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>VI</b>
<b>ÉQUIPE DE RECHERCHE</b> .....	<b>VII</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
<b>MÉTHODOLOGIE</b> .....	<b>3</b>
<b>MODÈLES MATHÉMATIQUES</b> .....	<b>4</b>
MODÈLE HYDRODYNAMIQUE .....	4
MODÈLE DE TEMPÉRATURE .....	4
<i>Modèle mathématique</i> .....	5
<i>Implémentation numérique</i> .....	6
<b>DONNÉES ENVIRONNEMENTALES</b> .....	<b>8</b>
DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES .....	8
DONNÉES HYDRODYNAMIQUES .....	8
DONNÉES DE TEMPÉRATURE DE L'EAU .....	9
<b>MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN</b> .....	<b>10</b>
MAILLAGE .....	10
DONNÉES DE TERRAIN .....	10
<i>Topométrie</i> .....	10
<i>Substrat</i> .....	10
<i>Plantes émergentes</i> .....	10
<b>RÉSULTATS HYDRODYNAMIQUES</b> .....	<b>12</b>
VALIDATION DES NIVEAUX .....	12
HYDRODYNAMIQUE .....	12
<b>RÉSULTATS DE SIMULATION DE TEMPÉRATURE</b> .....	<b>13</b>
CALIBRATION STATIONNAIRE.....	13
VALIDATION NON-STATIONNAIRE .....	15
SIMULATION .....	15
<b>CONCLUSION</b> .....	<b>16</b>
BIBLIOGRAPHIE :.....	17

## Liste des figures

---

- Figure 1: Localisation de la zone à l'étude (Îles de Boucherville et batture Thaillandier) et position des thermistors.
- Figure 2 : Équation des ondes longues (forme conservative) en régime permanent résolues par HYDROSIM (Équations de Saint-Venant).
- Figure 3: Variations du niveau d'eau aux stations de mesure de Varennes, Frontenac et de Jetée #1, ainsi que l'interpolation du niveau pour le secteur de Boucherville. Les points représentent l'élévation correspondant au moment de l'exondation des thermistors.
- Figure 4: Variations du débit journalier des trois points d'entrée du modèle hydrodynamique, Lasalle et canal de la rive sud (Lasalle+CRSTotal), Rivières des Mille-Îles et des Prairies (MIP) et rivière l'Assomption.
- Figure 5 : Température relevée par le thermistor 4 et température de l'eau au Port de Montréal en moyenne horaire.
- Figure 6 : Signal d'un thermistor exondé en moyenne horaire (Thermistor 4).
- Figure 7 : Signal d'un thermistor exondé en moyenne horaire (Thermistor 6).
- Figure 8 : Maillage éléments finis global et position des thermistors.
- Figure 9 : Détail - Maillage éléments finis et position des thermistors.
- Figure 10: Topographie du tronçon tel qu'assemblée sur le maillage éléments finis.
- Figure 11: Détail de la topographie tel qu'assemblée sur le maillage éléments finis dans le secteur des thermistors (points rouges).
- Figure 12: Distribution des assemblages de plantes émergentes des Îles de Boucherville, provenant de Martin Jean et Guy Létourneau (CSL).
- Figure 13: Coefficients de frottement de Manning utilisés dans le calcul hydrodynamique.
- Figure 14: Détail des coefficients de frottement de Manning utilisés ainsi que la position des thermistors.
- Figure 15: Résultats de la validation comparant les niveaux simulés et les niveaux mesurés dans le domaine à l'étude.
- Figure 16: Module de la vitesse du tronçon et vecteur vitesse (5 avril 1999).
- Figure 17: Détail sur le secteur à l'étude du module de la vitesse et vecteur vitesse pour le 5 avril 1999.
- Figure 18: Vue détaillée du module de la vitesse et vecteur vitesse près des thermistors (5 avril 1999).
- Figure 19: Profondeur d'eau simulée (5 avril 1999).
- Figure 20: Vue détaillée de la profondeur simulée pour le secteur à l'étude (5 avril 1999).
- Figure 21: Profondeur simulée pour le secteur près des thermistors (5 avril 1999).
- Figure 22: Niveau simulé et position des stations de mesures de niveaux (5 avril 1999).
- Figure 23: Niveau simulé secteur des Îles de Boucherville (5 avril 1999).
- Figure 24: Niveau simulé près des thermistor et position des thermistors (5 avril 1999).
- Figure 25: Fonction courant pour le 5 avril 1999.
- Figure 26: Vue détaillée de la fonction courant dans le secteur à l'étude (5 avril 1999).
- Figure 27 : Température moyenne journalière à la prise d'eau de la Ville de Montréal.
- Figure 28 : Températures mesurées vs températures simulées.
- Figure 29 : Champ de température en moyenne journalière avant calibration.

Figure 30 : Champ de température en moyenne journalière avant calibration – Détail.  
Figure 31 : Champ de température en moyenne journalière après calibration.  
Figure 32 : Champ de température en moyenne journalière après calibration – Détail.  
Figure 33 : Journée du 5 avril 1999 - Signal au thermistor 3.  
Figure 34 : Journée du 5 avril 1999 - Signal au thermistor 4.  
Figure 35 : Journée du 5 avril 1999 - Signal au thermistor 5.  
Figure 36 : Journée du 5 avril 1999 – Signal au thermistor 6.  
Figure 37 : Journée du 5 avril 1999 - Signal au thermistor 7.  
Figure 38 : Signal au thermistor 3 en moyenne horaire.  
Figure 39 : Signal au thermistor 4 en moyenne horaire.  
Figure 40 : Signal au thermistor 5 en moyenne horaire.  
Figure 41 : Signal au thermistor 6 en moyenne horaire.  
Figure 42 : Signal au thermistor 7 en moyenne horaire.

## Liste des tableaux

---

Tableau 1: Propriétés globales. ....	6
Tableau 2: Propriétés nodales. ....	7
Tableau 3: Position (MTM, zone 8, NAD83) des cinq thermistors installés par Amyot et al. (2002) (Centre Saint-Laurent).....	9
Tableau 4 : Températures (°C) aux thermistors avant calibration .....	14
Tableau 5 : Températures (°C) aux thermistors après calibration. ....	14

# ÉQUIPE DE RECHERCHE

---

**Planification, conception et rédaction :**

Jean Morin<sup>1</sup>  
Yves Secretan<sup>2</sup>  
Olivier Champoux<sup>1</sup>  
Alain Armellin<sup>3</sup>

**Révision :**

André Bouchard<sup>1</sup>

**Production des données topométriques :**

Patrice Fortin<sup>1</sup>  
Guy Morin<sup>1</sup>

**Production et assemblage des  
données météorologiques :**

Adrien Julien<sup>4</sup>  
Daniel Rioux<sup>1</sup>

**Mesures de température à la batture Thaïlandier :**

Christiane Hudon<sup>3</sup>  
Jean-Pierre Amyot<sup>3</sup>  
Michel Arseneau<sup>3</sup>

1 : Hydrologie, Service météorologique du Canada, Environnement Canada.

2 : Institut national de la recherche scientifique- Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

3 : Centre Saint-Laurent, Environnement Canada

4 : Centre de Ressources en Impacts et Adaptation au Climat et à ses Changements. Service météorologique du Canada, Environnement Canada.

# Introduction

---

La température de l'eau est un facteur environnemental crucial pour la vie aquatique. De façon directe, elle agit sur les poissons en modulant leurs activités métaboliques, physiologiques et comportementales (Wootton, 1998). Indirectement, elle modifie les caractéristiques environnementales de l'habitat : dissolution des gaz, densité et tension de surface (Wetzel, 2001). La température est considérée comme le principal facteur environnemental expliquant la variabilité des forces de classe d'âge (Koonce *et al.*, 1977 ; Fortin *et al.*, 1982).

Les différentes étapes de la reproduction du Grand Brochet (*Esox lucius* L.) se déroulent à des températures bien définies. La ponte se fait lorsque l'eau atteint une température minimale de 6°C (Massé *et al.*, 1988 ; Raat, 1988 ; Fortin *et al.*, 1982). Les adultes déposent alors leurs œufs sur la végétation submergée. Par la suite, la température de l'eau, exprimée en nombre de degré-jour ou de degré centigrade, déterminera le temps d'incubation des œufs et éventuellement du succès d'éclosion (Hokanson *et al.*, 1973 ; Lindroth, 1946 ; Hassler, 1982). Par exemple, il faudra aux œufs de grand brochet une trentaine de jours pour éclore à 5°C, et 4 à 5 jours à 19°C ( $D$  (durée d'incubation) =  $4 + 1,29^{19 - (\text{température en } ^\circ\text{C})}$  dans Lindroth, 1946). De plus, le taux de tératogénèse, larves mal formées, dépend de la température d'incubation ; les températures au dessous de 4°C ou supérieure à 20°C produisent des larves déformées. Enfin, les températures inférieures à 3°C et plus élevées que 23°C entraînent la mortalité des embryons et des larves vésiculés de grand brochet (Hassler, 1982). La croissance somatique des larves et des alevins est en relation directe avec la température de l'eau ( $TL_{\text{Larve}} = 5,292 + 0,118 DD$  et  $TL_{\text{alevin}} = 0,487 + 0,147 DD$  ; Bry *et al.*, 1991). Finalement, il importe de considérer que les optimums thermiques varient selon les stades de croissance. Ainsi, l'optimum de croissance se fait entre 18 et 25,6°C pour les larves, entre 19 et 21°C pour les juvéniles et à 20°C pour les adultes (Wismer et Christie, 1987).

La simulation des effets de différents scénarios de niveau d'eau sur l'habitat de reproduction du Grand Brochet nécessite l'élaboration d'un modèle de terrain ; lequel doit comporter une couche d'information sur la température de l'eau durant la période de frai. Une première modélisation a été élaborée à la rivière aux Pins ; un petit affluent reconnu pour être une importante frayère à brochet (Rioux et Morin, 2001). Les résultats préliminaires montrent qu'il est possible de prédire, à partir des niveaux d'eau et de la température de l'eau, les années où les conditions minimales à la reproduction du Grand Brochet étaient rencontrées. Il est ici proposé d'appliquer le modèle de température développé par l'INRS-ETE en collaboration avec le Service météorologique du Canada aux Battures Thailandier (situées entre 45°34' et 45°39' par 72°30' et 73°28') à une frayère en eau calme reconnue pour être un site de reproduction du Grand Brochet dans le fleuve Saint-Laurent.

La période de modélisation choisie correspond à la période de frai probable du Grand Brochet pour le printemps 1999. La détermination de la date de frai a été établie selon les critères de degré-jours atteints et de température moyenne de l'air définis pour la rivière aux Pins (Rioux et

Morin 2000). La date estimée correspond au 12 avril 1999. Pour inclure toute la période de frai, la modélisation couvre la période du 5 avril au 5 mai 1999, ce qui correspond une semaine avant la date probable de frai et une semaine après la fin probable de celle-ci.

La modélisation est un outil très puissant permettant une gamme d'application. Ici, l'optimisation de la reproduction des espèces de poissons frayant en zone peu profonde, comme le Grand Brochet, pourrait être suivie en temps réel avec un outil qui permet de connaître la température de l'eau et les niveaux d'eau dans les zones de frai du brochet. De plus, l'implantation et la validation du modèle de température pourraient permettre des développements vers la modélisation de la croissance des larves d'espèces frayant en eaux peu profondes.

L'objectif principal de cette étude est de vérifier s'il est possible d'implanter un modèle de température de l'eau de la batture Thaillandier, qui permettrait de reproduire les températures mesurées durant la période de frai du Grand Brochet au printemps 1999. Ce modèle, en plus de reproduire les points de mesure, permettrait de connaître la température dans l'ensemble du domaine simulé.

La modélisation de la température s'appuie sur des modèles mathématiques résolus sur une grille éléments finis à haute densité. Le modèle hydrodynamique et le modèle de température de même que leurs paramètres et données sont brièvement décrits. Les données de terrain ainsi que les mesures de température sont présentées. La calibration et la validation du modèle sont également présentées en détail.

# Méthodologie

---

La température de l'eau est simulée en utilisant un modèle de transport-diffusion (DISPERSIM) et un modèle hydrodynamique (HYDROSIM) adapté au secteur des Îles de Boucherville.

Les étapes du processus complet de modélisation sont les suivantes :

1. monter le modèle numérique de terrain et maillage de calcul;
2. à l'aide d'un modèle hydrodynamique 2D de Saint-Venant, simuler les vitesses d'écoulement et les niveaux d'eau en moyenne journalière (30 simulations), et ceci pour tous les débits de la période considérée. Le modèle fournit également la profondeur et les coefficients de dispersion;
3. à l'aide d'un modèle de transport-diffusion 2D pour la température, simuler la réponse du système durant la période du 05-04-1999 au 05-05-1999 en pas horaire (744 simulations) à partir des données météorologiques horaires et les simulations hydrodynamiques journalières;
4. utiliser le signal de température et les comparés aux données horaires mesurées par les thermistors sur le terrain.

Remarques :

- La validation des températures simulées est faite par comparaison avec des mesures horaires en 5 points;
- Pour la période considérée, l'hydrodynamique ne varie que lentement et peut être considérée comme une succession d'états stationnaires calculés pour chaque jour, et d'interpoler ensuite;
- La modélisation de la température intègre tous les paramètres météorologiques (11) importants dans l'équilibre des températures de l'eau en milieu fluvial.

# Modèles mathématiques

---

Les modèles hydrodynamique et de température utilisés, sont des modèles 2D horizontaux qui donnent une réponse répartie spatialement, considérant une valeur moyenne dans la colonne d'eau. Les deux modèles utilisent une discrétisation aux éléments finis, une méthode de calcul puissante et bien adaptée au contexte fluvial. Le modèle hydrodynamique fournit les données d'entrée de vitesse et de niveaux au modèle de température.

## Modèle hydrodynamique

La modélisation hydrodynamique est effectuée à l'aide du modèle HYDROSIM, développé à l'INRS-EAU (Heniche *et al.* 1999). L'approche utilisée est basée sur une modélisation numérique bidimensionnelle (2D) des équations d'ondes longues aussi appelées « équations des eaux peu profondes » qui sont résolues par la méthode des éléments finis. Ce modèle utilise la forme conservative des équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement des équations de Saint-Venant et prend en compte localement les paramètres de frottement dus aux substrats, aux plantes aquatiques et à la glace. Il procure en sortie les composantes ( $x$ ,  $y$ ) de la vitesse moyenne (intégrée dans la verticale) sur tous les nœuds de calcul. Tout le domaine de simulation est ainsi décrit soit directement aux nœuds de calcul, ou encore par interpolation entre ces nœuds. Le modèle prend en compte le recouvrement et le découverture des berges en fonction du débit et du niveau d'eau. Le modèle mathématique est représenté par le système d'équation de la Figure 2.

Les éléments utilisés sont des triangles à six nœuds (interpolation P1-isoP2) qui sont tous impliqués dans le calcul des vitesses moyennes. Ces nœuds portent les informations sur le frottement et la topographie. La topographie et le niveau d'eau sont portés par les 3 nœuds sommets, une interpolation linéaire permet de connaître ces variables sur tout l'élément.

## Modèle de température

Dans les cours d'eau naturels, la température de l'eau est principalement contrôlée par les paramètres climatologiques comme la radiation solaire, la température de l'air, la pression atmosphérique, l'humidité, les précipitations et la vitesse du vent (Heniche *et al.*, 2002). Les équations aux dérivées partielles de transport–diffusion (Secretan *et al.* 2000) forment la base du modèle de transport de température. On leurs ajoute des capacités de simulation de la température de l'eau en établissant un bilan thermique sur la colonne d'eau. Ceci consiste à établir la liste des sources et les puits de chaleur, à les modéliser et à les introduire dans les équations. Ainsi, le flux thermique total  $S$  qui contribue à réchauffer ou à refroidir la colonne d'eau s'exprime :

$$S = S_a + S_b + S_i$$

où  $S_a$ ,  $S_b$  et  $S_i$  sont respectivement les flux thermiques d'échange avec l'atmosphériques, d'échange avec le fond et d'échange avec le couvert de glace.

Le flux thermique avec l'atmosphère  $S_a$  représente normalement la contribution la plus importante au budget thermique global  $S$ . Il compte lui-même des composantes de radiation solaire, de radiation infrarouge, d'évaporation, de convection et des précipitations

$$S_a = (H_s - H_l - H_e - H_c - H_p) f_{extinc}$$

amortie par une fonction d'extinction  $f_{extinc}$ .

Le flux thermique avec le fond peut être important, surtout dans les zones peu profondes. En pratique, la détermination de  $S_b$  est difficile. Comme la température souterraine peut être considérée constante, nous utilisons un loi de convection thermique pour représenter les échanges thermiques avec le fond :

$$S_b = -K_b(T - T_b)$$

où  $K_b$  et  $T_b$  sont respectivement le coefficient d'échange thermique et la température souterraine.

La prise en compte du flux thermique d'échange avec le couvert de glace est obligatoire dans les régions froides. Une estimation du flux thermique est donnée par la relation suivant, en faisant l'hypothèse que la concentration de frasil est négligeable :

$$S_i = -K_i(T - T_m)$$

où  $K_i$  est le coefficient d'échange thermique.

## Modèle mathématique

L'équation de transport-diffusion, bidimensionnelle, moyennée sur la profondeur, est à la base du modèle de température. En faisant l'hypothèse de conditions hydrodynamiques stationnaires, l'équation différentielle partielle en formulation non conservative est donnée par :

$$H \frac{\partial T}{\partial t} + H(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial x} H(D_{xx} \frac{\partial T}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial T}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial y} H(D_{yx} \frac{\partial T}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial T}{\partial y}) +$$

$$QH(T - T^0) - \frac{S}{\rho c_p} = 0$$

où  $t$  et  $(x, y)$  sont le temps et les coordonnées cartésiennes ;  $T$ , l'inconnue, représente la température moyenne sur la profondeur ;  $H$  est la profondeur ;  $u$  et  $v$  sont les composantes de la vitesse ;  $Q$  est le débit thermique par unité de volume provenant de tributaires ou de sources souterraines, et  $T_0$  sa température. Dans le dernier terme,  $S$ ,  $\rho$  et  $c_p$  sont le flux thermique présenté à la section précédente, la densité et la chaleur spécifique de l'eau. Les coefficients de dispersion  $D_{xx}$ ,  $D_{yy}$ ,  $D_{xy}=D_{yx}$  sont dérivés de l'hydrodynamique et ajustés afin de reproduire au mieux les mesures.

Le système est résolu dans le temps, après avoir spécifié de conditions aux limites et fourni une solution initiale. Sur une frontière d'entrée, la température est prescrite comme fonction du temps. Sur une frontière de sortie, on prescrit une condition de sortie libre ( $\partial T / \partial n = 0$ ). De plus, il faut tenir compte des zones asséchées, dans lesquelles la profondeur est mise à zéro et la température est également fixée à zéro.

## Implémentation numérique

L'équation de la section précédente est résolue pour la température par la méthode aux éléments finis en utilisation la méthode des résidus pondérés de Galerkin. La discrétisation spatiale est faite sur des éléments finis triangulaires linéaires à 3 nœuds. L'approximation de la température sur ces éléments est linéaire. La dérivée temporelle est approximée par un schéma de premier ordre aux différences finies inconditionnellement stable d'Euler implicite, ou par un schéma de second ordre de Crank-Nicholson moins stable. Le choix du schéma temporel dépend entre autre des caractéristiques du problème à résoudre.

Un aspect important de l'implémentation numérique est lié à la structure des données. Il est manifeste que la quantité de données nécessaire aux sous-modèles des différents termes du budget thermiques est énorme. Un choix judicieux permet de réduire ce volume à une dimension gérable.

On distingue les propriétés globales des propriétés nodales. Une propriété globale est constante dans le temps et dans l'espace, pour tout le domaine de calcul. Une propriété nodale est variable dans le temps et dans l'espace. Elle prend une valeur différente en chaque nœud de calcul. Il est évident que les propriétés nodales exigent beaucoup plus d'espace mémoire, surtout pour des simulations non-stationnaires. Ainsi, le maximum de données physiques a été transféré comme propriétés globales.

Tableau 1: Propriétés globales.

Diffusivités	Propriétés de l'eau	Propriétés de la glace	Donnée météorologique	Données de terrain	Coefficients de régression
$D_M, \beta_V, \beta_H, \beta_L$	$\rho, c_p$	$\rho_i, c_{pi}, L_i$	$P_{atm}$	$T_b$	$A_i, B_i$

Le Tableau 1 énumère les 13 propriétés globales sélectionnées, soit:

- la dispersion moléculaire  $D_M$ ;
- les coefficients de pondération de dispersion  $\beta_V, \beta_H$  et  $\beta_L$ ;
- les propriétés de l'eau  $\rho$  et  $c_p$ ;
- les propriétés de la glace  $\rho_i, c_{pi}$  et  $L_i$ ;
- la pression atmosphérique  $P_{atm}$ ;
- la température souterraine  $T_b$ ;
- les coefficients de régression  $A_i$  et  $B_i$ .

Tableau 2: Propriétés nodales.

Données de terrain	Données hydrodynamiques	Données météorologiques
$K_b, SF, r$	$u, v, H, D_H, D_V$	$H_{si}, T_a, \varepsilon_a, RH, f(W_z), p_r \text{ or } p_s, K_i, f_{extinc}$

Le Tableau 2 montre les 16 propriétés nodales sélectionnées, constituées de trois données de terrain, cinq données hydrodynamiques et 11 données météorologiques. Les données de terrain sont composées :

- du coefficient de transfert thermique avec le fond  $K_b$ ;
- de la fraction de couvert végétal  $SF$  ;
- de la turbidité de l'eau  $r$ .

Les données hydrodynamiques sont composées :

- des composantes de la vitesse  $u$  et  $v$ ;
- de la profondeur  $H$ ;
- des coefficients de dispersion  $D_H$  et  $D_V$ .

Les données météorologiques ainsi que les paramètres dérivés sont :

- la radiation solaire  $H_{si}$  ;
- la température de l'air  $T_a$  ;
- l'émissivité de l'air  $\varepsilon_a$  ;
- l'humidité relative  $RH$  ;
- la fonction du vent  $f(W_z)$  ;
- les précipitations : pluie  $p_r$  si  $T_a \geq 0$  °C ou neige  $p_s$  si  $T_a < 0$  °C ;
- le coefficient de transfert thermique avec le couvert de glace  $K_i$  ;
- la fonction d'extinction  $f_{extinc}$ .

# Données environnementales

---

## Données météorologiques

Les données météorologiques utilisées sont des données horaires, qui proviennent des stations Saint-Hubert (station 7027320), Dorval (station 7025250) et Varennes (station 702327x). Elles sont extraites des bases de données du Service météorologique du Canada d'Environnement Canada pour le période allant du 01-04-1999 au 31-05-1999.

Pour chacune des variables mesurées, la station la plus près du domaine de simulation a été utilisée. Ces variables sont ici jugées représentatives de représentative pour l'ensemble du domaine de simulation. Les variables directement extraites concernent :

- la couverture nuageuse (station 7025250);
- l'humidité relative (station 7027320);
- les précipitations (station 7025250);
- la pression atmosphérique (station 7027320);
- la radiation solaire (station 702327x);
- la température de l'air (station 7027320);
- la vitesse du vent (station 7027320).

Elles sont ensuite combinées pour fournir les 11 variables réparties, données d'entrée au modèle de température et nécessaires à la simulation

- la radiation solaire;
- la turbidité (= 0);
- le couvert végétal (= 0);
- la température de l'air;
- l'émissivité de l'atmosphère;
- la valeur de la fonction du vent;
- l'humidité relative;
- les précipitations;
- le coefficient de transfert thermique avec la glace;
- la fonction d'extinction;
- le coefficient de transfert thermique avec le fond.

## Données hydrodynamiques

Les données de niveaux fournissent les conditions aux limites et les données de validation-calibrations des simulations hydrodynamiques. Ces mesures ont été observés à trois stations le long du tronçon (Jetée #1, Frontenac et Varennes). Les débits mesurés à Lasalle ainsi que ceux mesurés sur les rivières des Mille-Îles, des Prairies et l'Assomption, ont été utilisés afin de

déterminer les conditions limites d'entrée en débit en moyennes journalières. Ces observations proviennent de la série des débits reconstitués du Service météorologique du Canada (Bouchard et Morin, 2000) pour la période du 01-04-1999 au 31-05-1999. Les niveaux utilisés durant cette période sont présentés à la Figure 3 et les débits à la Figure 4.

## Données de température de l'eau

Les données de température proviennent de deux sources distinctes, température du fleuve à l'amont et température de l'eau sur la batarde Thailandier (Îles de Boucherville). La température de la masse d'eau principale, représentant les conditions initiales amont, a été mesurée à la prise d'eau potable de l'aqueduc de la Ville de Montréal. La prise d'eau est localisée dans la partie nord de la section fluviale, immédiatement à l'amont des Rapides de Lachine. La Figure 5 présente l'évolution du signal de température pour la période à l'étude. Ces mesures sont ici considérées comme étant représentatives de la colonne d'eau au point de mesure; toutefois, elle n'est certainement pas représentative de toute la section amont. Le réchauffement de l'eau en berge depuis la centrale de Beauharnois ne peut pas être complètement négligé. Cependant, l'absence de mesures de température en rive sud ne permet pas de connaître exactement les conditions limites de température à l'amont du domaine de simulation, seuls les mesures disponibles ont été utilisées.

La température de l'eau a été mesurée à l'aide de cinq thermistors placés près du fond dans la partie amont de la batarde Thailandier en milieu peu profond (Amyot *et al.*, 2002). La cote d'installation a été relevée en été au moment de l'exondation des thermistors, en niveau relatif au niveau d'eau local, la précision de ces mesures est difficile à déterminer. La position des thermistors a été rapportée sur des photos aériennes au 1 :10 000 et numérisées par la suite. La précision sur la position est ici estimée à environ 30 m autour des points rapportés au Tableau 3.

Tableau 3: Position (MTM, zone 8, NAD83) des cinq thermistors installés par Amyot et al. (2002) (Centre Saint-Laurent).

	Coordonnées UTM zone8 NAD83		Estimation de la cote d'élévation NMM (m)
<b>Thermistor 3</b>	530547	5050606	6.43
<b>Thermistor 4</b>	330538	5050535	6.21
<b>Thermistor 5</b>	430536	5050585	6.43
<b>Thermistor 6</b>	305335	5050562	6.34
<b>Thermistor 7</b>	230532	5050536	5.68

Le signal des thermistors, lorsque ceux-ci sont exondés, est facilement comparé avec le signal en température de l'air de la station de Saint-Hubert. On peut ainsi détecter dans le signal des thermistors le moment où ils sont exondés et, avec les niveaux d'eau du jour, contrôler la cote topographique du thermistor sur le terrain. Par exemple, à partir du 25-04-1999, le thermistor 4 a un signal qui colle au signal de température de l'air mesuré à la station de Saint-Hubert (Figure 6). Par contre, le thermistor 6 (Figure 7) est lui exondé à partir du 21-04-1999, mais son signal a une amplitude supérieure à celle du signal de température de l'air, ce qui suggère que ce thermistor n'est pas installé à l'ombre et subit une influence directe du soleil. Le Tableau 3 présente les cotes de niveau local estimées selon cette méthode.

# Modèle Numérique de Terrain

---

Le modèle numérique de terrain couvre la zone allant du Port de Montréal jusqu'à l'amont des Îles de Verchères soit près de 25 km de distance. Le modèle numérique de terrain est constitué du maillage et des données d'entrée qu'il supporte.

## Maillage

Le maillage éléments finis supporte les données nécessaires au calcul de l'hydrodynamique et de la température de l'eau. Le maillage compte 30951 nœuds et 59220 éléments, sur une grille non structurée et adaptée aux divers besoins de précision spatiale des simulations (Figure 8). Une attention particulière a été apportée à sa construction, spécialement dans la région des thermistors où la densité du maillage est plus grande (Figure 9). De façon globale, la taille des mailles varie de 10 m à 400 m de côté.

## Données de terrain

Les données de terrain comprennent la topographie, tant la partie du lit du fleuve qui est inondée en permanence que celle qui est inondée en période de crue, la description du substrat ainsi que la description des plantes aquatiques.

## Topométrie

La topométrie utilisée est la base de données topométriques assemblée par le Service météorologique du Canada (SMC) à partir des sondages du Service hydrographique du Canada (SHC) (zones profondes) et des sondages effectués par le SMC en zone peu profonde. Il y avait un manque de précision du modèle de terrain dans le secteur de la batture Thaïlandier et plus particulièrement dans le secteur où les thermistors ont été placés. Pour corriger ce problème, une petite portion de la base de donnée de laser aéroporté (CMI) a été utilisée sur une surface de 0.25 km<sup>2</sup> (500m\*500m). Cette information massive contient 23 000 points, elle a été obtenue dans un format préliminaire qui représente la surface et la végétation. Ainsi, seulement quelques points bas (220) situés dans les zones de végétation les moins denses ont été conservés.

Le secteur à l'étude comporte de nombreuses zones peu profondes, particulièrement la batture Thaïlandier où se trouvent les thermistors (Figure 10 et Figure 11).

## Substrat

La distribution spatiale du substrat doit être connue sur tout le tronçon puisque ce facteur contribue à la résistance à l'écoulement. Les cartes de base de substrat élaborées par le SMC ont été utilisées pour les simulations hydrodynamiques. Le frottement lié au substrat est introduit localement dans le calcul de l'hydrodynamique à l'aide d'un coefficient (le «  $n$  » de Manning) qui varie ici, en fonction de la granulométrie.

## Plantes émergentes

Le secteur des Îles de Boucherville et de la batture Thaïlandier est couvert de végétation émergente. La végétation offre une résistance importante à l'écoulement et contribue fortement à

structurer l'écoulement lorsqu'elle est submergée et ce même durant la période printanière où seulement les débris de plantes de la dernière saison de croissance sont présents. Cette résistance peut se traduire dans les équations hydrodynamiques par le coefficient de frottement exprimé par le «  $n$  » de Manning. Ce frottement dû aux plantes varie en fonction de la morphologie, la rigidité et la densité des assemblages. Bien qu'il existe certains travaux de références sur la valeur des «  $n$  » de Manning à appliquer en fonction de certain type de plantes et de la profondeur de submersion, leur applicabilité au Saint-Laurent est encore embryonnaire. Les valeurs des coefficients de Manning utilisés sont déterminées à partir de la densité de tige des assemblages présents, qui ont été mesurés sur le terrain. La distribution des classes de substrat provient des images élaborées à partir de capteurs aéroportés et interprétés par Martin Jean et Guy Létourneau du Centre Saint-Laurent (Figure 12). Les coefficients de Manning qui ont été attribués varient de 0.03 à 0.12. Par exemple, dans les secteurs de peuplement dense de *Phragmites australis*, la valeur de Manning est de 0.12. Les frottements utilisés lors des simulations hydrodynamiques sont présentés à la Figure 13 et à la Figure 14.

## Résultats hydrodynamiques

---

Des simulations hydrodynamiques ont été produites pour chacun des 30 jours de la période simulée avec les conditions de débits et de niveaux d'eau mesurés pour cette journée et ce pour la période du 05-04-1999 au 05-05-1999.

À l'échelle globale du tronçon, comme le modèle utilisé est extrait du modèle générique du Saint-Laurent qui lui a déjà été calibré, la validation des vitesses n'est plus aussi importante et ce n'est seulement que la validation des niveaux qui a été effectuée.

### Validation des niveaux

Les simulations hydrodynamiques ont été calibrées par les niveaux d'eau mesurés aux stations de niveaux d'eau du tronçon. Les résultats sont ceux des deux stations situées respectivement en amont et en aval de la zone des thermistors, approximativement à mi-distance entre ces deux stations. La Figure 15 montre les résultats de la calibration du maillage hydrodynamique.

Les différences entre les niveaux d'eau mesurés et simulés sont de moins de 8 cm pour la station de Frontenac et de 0 cm pour la station de Varennes (condition limite aval), suggérant une faible erreur de niveau de 4 cm (trop bas) pour le secteur des thermistors. Les plus grandes différences correspondent aux périodes de plus haut niveaux (entre le 5 avril et le 18 avril 1999). Ces résultats sont très acceptables compte tenu du fait que le maillage du tronçon est très grossier (sauf dans la région des thermistors). De plus, les différences entre les niveaux d'eau mesurés et simulés sont plus faibles que l'incertitude du positionnement et de l'élévation des thermistors.

### Hydrodynamique

Un total de 30 simulations hydrodynamiques journalières a été produit afin de servir de données d'entrée aux simulations horaires de température. Tous ces résultats ne peuvent pas aisément être présentés dans le cadre de ce rapport. Cependant les résultats du 5 avril 1999 sont montrés en détail. Les vitesses sont présentées (Figure 16 à Figure 18), ainsi que les profondeurs (Figure 19 à Figure 21) et les niveaux simulés (Figure 22 à Figure 24).

La répartition des couloirs de débits est illustrée par la fonction de courant (Figure 25 et Figure 26). Cette fonction permet de connaître l'origine de la masse d'eau et montre que le secteur des thermistors reçoit de l'eau provenant de la rive sud du fleuve. On verra l'importance de cette répartition dans la modélisation de la température.

## Résultats de simulation de température

---

Un total de 24 simulations horaires a été effectué pour chacun des 30 jours de la période à l'étude, ce qui représente 744 simulations de températures sur l'ensemble du domaine de simulation. Ces simulations ont été calibrées et validées, et une analyse de sensibilité a été effectuée afin de bien comprendre le comportement du modèle.

Pour ce faire, trois types de résultats ont été analysés en trois étapes successives :

1. une simulation stationnaire de calibration, en moyenne journalière pour la journée du 05-04-1999;
2. une simulation non-stationnaire de validation sur la journée du 05-04-1999 en pas horaire;
3. la simulation finale, en pas horaire sur toute la période du 05-04-1999 00:00 au 05-05-1999 23:00, soit 744 pas de temps.

L'analyse des résultats des simulations de température ne peut se faire sans une compréhension des incertitudes sur les données mesurées et sur les données produites par simulation mathématiques. D'abord le modèle de terrain manque de précision dans le niveau de détail exigé pour atteindre la précision nécessaire pour simuler parfaitement les température dans un si petit secteur (situés très près l'un de l'autre). De plus, ce milieu est particulièrement hétérogène dû à la présence de forte densité de phragmites. Les vitesses simulées n'ont pas été validées dans les zones de faibles profondeurs, faute de données. La position des thermistors n'est pas connue avec précision ( $\pm 30$  m). Ils sont placés dans une zone présentant des variations de topographies significatives. Ces mêmes thermistors ne sont probablement pas installés à l'ombre, ils semblent plutôt avoir été exposés aux radiations solaires. De plus, l'absence de profils verticaux de température ne permet pas de s'assurer de la représentativité sur la colonne d'eau. Enfin, les mesures de température de l'eau de l'aqueduc de la Ville de Montréal à l'amont du domaine de simulation ne peuvent représenter toute la variation de la température à la frontière amont.

### Calibration stationnaire

La journée du 05-04-1999 peut être considérée comme stationnaire en moyenne journalière (Figure 27). Les variations avec les journées précédentes sont minimales, ce qui permet à la température de se stabiliser. Pour cette journée la température moyenne mesurée à la prise d'eau de la Ville de Montréal est de 2.43 °C. Cette valeur sert de condition aux limites pour toutes les entrées d'eau dans le modèle, soit la frontière amont du modèle, la rivière des Mille-Îles et la rivière l'Assomption.

La carte des températures (Figure 29 et Figure 30) montre bien que le modèle de température réagit correctement aux données hydrodynamiques et météorologiques. Les chenaux peu profonds où le courant est faible sont les plus chauds alors que la température du chenal principal ne varie que très peu. Pour cette simulation, les températures aux positions des thermistors sont

présentées au Tableau 4. Ces températures sont globalement trop basses (Figure 28), avec un écart moyen de 1,17 °C.

Tableau 4 : Températures (°C) aux thermistors avant calibration

Thermistor	Températures mesurées	Températures simulées
3	3,96	3,02
4	3,81	2,69
5	3,90	2,74
6	4,12	2,70
7	3,88	2,67

Il est intéressant de noter que la frontière aval présente un léger gradient de température d'environ 0,1 °C entre la rive gauche et la rive droite. On pourrait s'attendre à avoir une répartition similaire sur la frontière amont où, à défaut de mieux, nous imposons sur toute la frontière une température mesurée près du centre du fleuve. Comme la région des thermistors est baignée par de l'eau provenant de la rive droite, un milieu généralement peu profond donc probablement plus chaud, l'eau entrée dans le modèle est probablement trop froide.

La condition limite en température a été corrigée en rehaussant la mesure de 0,5 °C sur toutes les frontières d'entrée, ce qui hausse tout le niveau de température. D'autre part, le coefficient d'échange par convection avec le fond reste un paramètre de calibration. Dans un premier temps fixé à 0, il a ensuite été fixé à 20 J/m<sup>2</sup> avec une température du fond de 12 °C, ce qui représente la moyenne annuelle de la température de l'eau du fleuve.

La carte des températures (Figure 31 et Figure 32) montre la nouvelle répartition des températures. On note les plus grandes variations de températures, principalement dans les chenaux peu profonds. Ainsi, le modèle est capable de reproduire la gamme des températures mesurées. Tel qu'attendu, toutes les valeurs de températures sont rehaussées (Figure 28). Le Tableau 5 compare les données mesurées aux thermistors et les données simulées. L'écart moyen entre les températures mesurées et les températures simulées est de 0,39 °C; ces résultats apparaissent très satisfaisant compte tenu des incertitudes énumérées plus haut. Après calibration, le modèle est capable de reproduire la gamme des températures mesurées par les thermistors avec une précision intéressante.

Tableau 5 : Températures (°C) aux thermistors après calibration.

Thermistor	Températures mesurées	Températures simulées
3	3,96	4,02
4	3,81	3,43
5	3,90	3,52
6	4,12	3,45
7	3,88	3,39

## Validation non-stationnaire

Pour la même journée du 05-04-1999, l'évolution spatio-temporelle de la température est simulée avec un pas horaire afin de vérifier la dynamique des températures journalières. La simulation compte trois étapes :

1. une simulation stationnaire avec les conditions du 04-04-1999 00:00 afin d'avoir une carte de base en température;
2. une simulation du 04-04-1999 de 00:00 à 23:00, basée sur le résultat précédent, pour initialiser le modèle et amortir toutes les influences de la solution initiale;
3. la simulation du 05-04-1999 de 00:00 à 23:00.

Les figures (Figure 33 à Figure 37) montrent le signal de température au regard des thermistors. Tous les signaux sont en phase. Le thermistor 3 montre globalement la meilleure réponse, alors que les autres manquent d'amplitude. Il est notable que pour tous les thermistors, la réponse durant la nuit est très bonne, alors que généralement la réponse durant le jour manque d'amplitude. Le manque d'amplitude est probablement attribué à une exposition au rayonnement solaire des thermistors qui ne sont pas installés à l'ombre, et ainsi par une mesure de température faussée. Alors que la simulation fournit une température moyenne sur la colonne d'eau, il n'est pas possible de déterminer avec précision quelle valeur est mesurée par les thermistors. Compte tenu de ces incertitudes, les simulations apparaissent satisfaisantes.

## Simulation

La simulation globale couvre la période du 05-04-1999 00:00 au 05-05-1999 23:00 en pas horaire, soit 744 pas de temps. La même stratégie qu'à la section précédente est utilisée pour l'initialisation du calcul. Le résultat brut de la simulation est la série des 744 champs de température couvrant tout le domaine, un champ pour chaque pas de temps. De ces résultats, on extrait le signal en des points particuliers à des fins d'analyse. Les figures (Figure 38 à Figure 42) montrent le signal de température pour tout le mois au regard des thermistors. À partir du 21-04-1999, les thermistors sont tour à tour exondés et le signal perd sa signification. Avant cette date, les signaux sont en phase et suivent correctement la montée en température.

Comme pour la validation du 05-04-1999, on note une différence d'amplitude, beaucoup plus notable certains jours que d'autres, ce qui tend à confirmer l'influence du rayonnement solaire : par exemple, le 17-04-1999 est un jour à couverture nuageuse de 100%.

## Conclusion

---

L'exercice de modélisation de la température du fleuve Saint-Laurent dans la région des Îles de Boucherville pour la période du 05-04-1999 au 05-05-1999 montre bien la capacité des modèles à reproduire la gamme des températures observées. Les résultats obtenus se comparent très bien aux données mesurées. Il ressort de l'analyse que la sensibilité du modèle de température est relativement grande face à la qualité du modèle numérique de terrain (topographie, substrat, plantes aquatiques), surtout dans les zones peu profondes. C'est en effet ces zones qui sont thermiquement les plus dynamiques.

Les données météorologiques à disposition sont suffisantes pour conduire des simulations de température. Par contre, de meilleures informations sur la répartition des températures en amont sont nécessaires. Il est également intéressant de noter que la validation du modèle de température est simple puisqu'il s'agit de simple comparaison de valeur très similaire. Toutefois une meilleure caractérisation de la colonne d'eau serait nécessaire pour déterminer la meilleure position pour les thermistors afin de la comparer aux valeurs simulées, qui sont intégrées sur la colonne d'eau. De plus, un relevé précis de la position des points de mesure et des particularités locales est primordial pour interpréter correctement les différences entre les mesures et les résultats de simulation.

Pour améliorer la qualité des résultats, il faut réduire les incertitudes :

- améliorer le modèle de terrain, surtout dans les zones peu profondes;
- valider le modèle hydrodynamique dans ces zones;
- avoir de meilleures conditions aux limites, soit directement par mesures sur la frontière d'entrée, ou encore en étendant le modèle à l'amont suffisamment pour laisser la répartition de température s'établir et amortir les erreurs sur les conditions limites;
- s'assurer de la cohérence entre les mesures et les valeurs simulées;
- positionner les thermistors en des endroits où ils permettent de valider le modèle, surtout les protéger du rayonnement solaire direct.

Il apparaît que le modèle de température pourrait être comme une des variables d'entrée d'un modèle d'habitat de la frayé du brochet, pour autant qu'un modèle de terrain précis soit disponible. D'un point de vue numérique, le modèle de température est très stable et se résout rapidement même avec un pas de temps horaire. Il est dès lors envisageable de réaliser des calculs en temps réel pour simuler la température et gérer les liens entre les niveaux d'eau et la croissance des larves de poisson frayant en zones peu profondes.

## Bibliographie :

**Amyot, J. P. et C. Hudon (2002).** Mesure de température à la batture Thailandier. Rapport scientifique et technique, Centre Saint-Laurent. Manuscrit non-déposé.

**Bouchard, A. et J. Morin (2000).** Reconstitution des débits du fleuve Saint-Laurent entre 1932 et 1998. Environnement Canada, Service météorologique du Canada, Monitoring et Technologies, Section Hydrologie, Rapport Technique RT-101, 71 pages.

**Bry, C., Hollebecq, M. G., Ginot, V., Israel, G. et J. Manelphe (1991).** Growth patterns of pike (*Esox lucius* L.) larvae and juveniles in small ponds under various natural temperature regimes. *Aquaculture*. **97** : 155-168.

**Casselman, J. M. (1978).** Effects of environmental factors on Growth, survival, activity, and exploitation of Northern Pike. *Am. Fish. Soc. Spec. Publ.* **11** :114-128

**Fortin, R., Dumont, P., Fournier, H., Cadieux, C. et D. Villeneuve (1982).** Reproduction et force des classes d'âge du Grand Brochet (*Esox lucius* L.) dans le Haut-Richelieu et la baie Missisquoi. *Can. J. Zool.* **60** : 227-240.

**Hassler, T. J. (1982).** Effects of temperature on survival of Northern pike embryos and yolk-sac larva. *Prog. Fish-Cult.* **44**(4) : 174-178.

**Heniche, M. Secretan, Y., Boudreau, P. et M. Leclerc (1999).** A new 2-D finite element drying-wetting model for rivers and estuaries. *Advances in water resources*. **23**: 359-372.

**Heniche, M., Secretan, Y., Morin, J., Cantin, J.-F. et M. Leclerc (2002).** Twodimensional depth averaged fluvial thermal regime prediction. Manuscrit à soumettre au *Journal of Hydraulic Engineering*.

**Hokanson, K. E. F, McCornick, J. H. et B. R. Jones (1973).** Temperature requirements for embryos and larvae of Northern Pike, *Esox lucius* (Linnaeus). *Trans. Amer. Sci. Soc.* **102** (1): 89-100.

**Koonce, J. K., Bagenal, T. B., Carline, R. F., Hokanson, K. E. F. et M. Nagiec (1977).** Factors influencing year-class strength of Percids: A summary and a Model of temperature effects. *J. Fish. Res. Board Can.* **34**: 1900-1909.

**Massé, G., Fortin, R., Dumont, P. et J. Ferraris (1986).** Étude et aménagement de la frayère multispécifique de la rivière aux Pins et dynamique de la population de Grand Brochet, *Esox lucius* L., du fleuve Saint-Laurent, Boucherville, Québec. Rapport Technique no. 06-40. Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche, Direction régionale de Montréal.

**Raat, A. J. P. (1988).** Synopsis of biological data on the Northern Pike *Esox lucius* Linnaeus, 1758. Food and agriculture organisation, Rome.

**Rioux, D. et J. Morin (2000).** Modélisation de l'habitat de fraie du Grand Brochet (*Esox lucius L.*) à la rivière aux Pins : production des données de base. Rapport technique RT-100, Service météorologique du Canada, Environnement Canada, Sainte-Foy. 57 pages.

**Smith, K. (1973).** River water temperatures - an environmental review. *Scottish Geographical Magazine*. 211- 220.

**Wetzel, R. G. (2001).** Lymnology, lake and river ecosystems. Academic Press, Third edition. 106 pages.

**Wisner, D. A. et A. E. Christie (1987).** Temperature relationships of Great Lakes Fishes: A data compilation. *Great Lakes Fish. Comm. Pub.* **87** (3): 165 pages.

**Wootton, R. J. (1998).** Ecology of Teleost fishes. Second edition. Kluwer Academic Publishers, Fish and Fisheries Series 24. 286 pages.

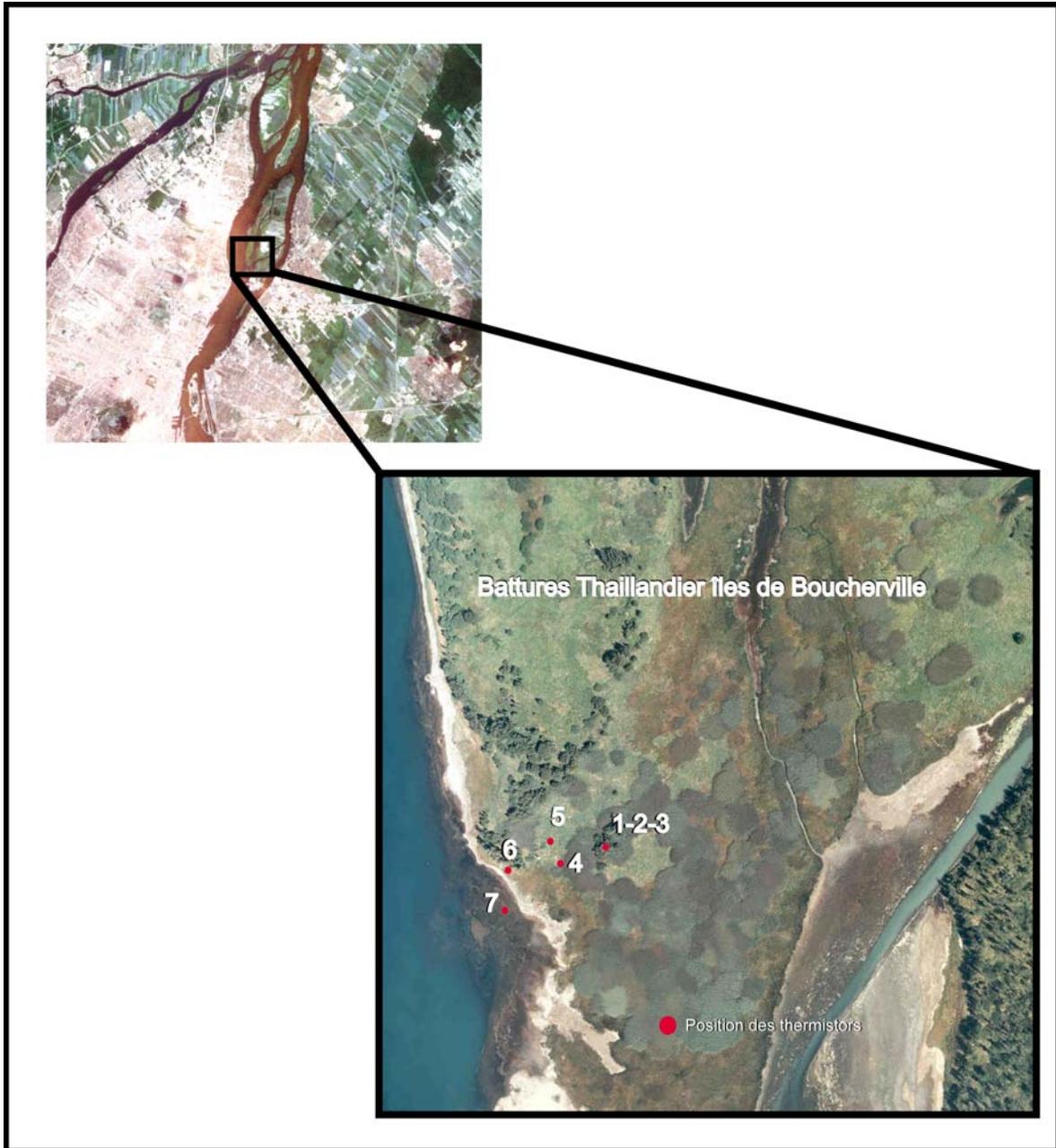


Figure 1: Localisation de la zone à l'étude (Îles de Boucherville et batture Thaïlandier) et position des thermistors.

### Équation de conservation de la masse

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0$$

### Équation de conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{q_x q_x}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q_x q_y}{H} \right) + c^2 \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial}{\partial x} (H \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (H \tau_{xy}) - \tau_x^b - \tau_x^s \right) - f_c q_y = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{q_y q_x}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q_y q_y}{H} \right) + c^2 \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial}{\partial x} (H \tau_{yx}) + \frac{\partial}{\partial y} (H \tau_{yy}) - \tau_y^b - \tau_y^s \right) + f_c q_x = 0$$

$x(x,y)$	= Coordonnées (x vers l'est et y vers le nord)	$f_c$	= force de Coriolis ( $f_c=2\omega \sin\phi$ ) ( $s^{-1}$ )
$q_x, q_y$	= débit spécifique selon x et y ( $m^2/s$ )	$\tau_{ij}$	= contraintes de Reynolds ( $kg/s^2m$ )
$h$	= hauteur d'eau (niveau)	$\tau_x^b, \tau_y^b$	= friction au fond en x et en y ( $kg/s^2m$ )
$H$	= profondeur de la colonne d'eau ( $=h-z_f$ ) (m)	$\tau_x^s, \tau_y^s$	= friction en surface en x et en y ( $kg/s^2m$ )
$c$	= célérité des vagues ( $c = \sqrt{gH}$ ) (m/s)		
$\rho$	= masse spécifique de l'eau ( $10^3 \text{ kg/m}^3$ )		
$u(u,v)$	= composant de la vitesse (m/s) où;		
	$u = q_x / H$ (m/s)		
	$v = q_y / H$ (m/s)		

Figure 2 : Équation des ondes longues (forme conservative) en régime permanent résolues par HYDROSIM (Équations de Saint-Venant).

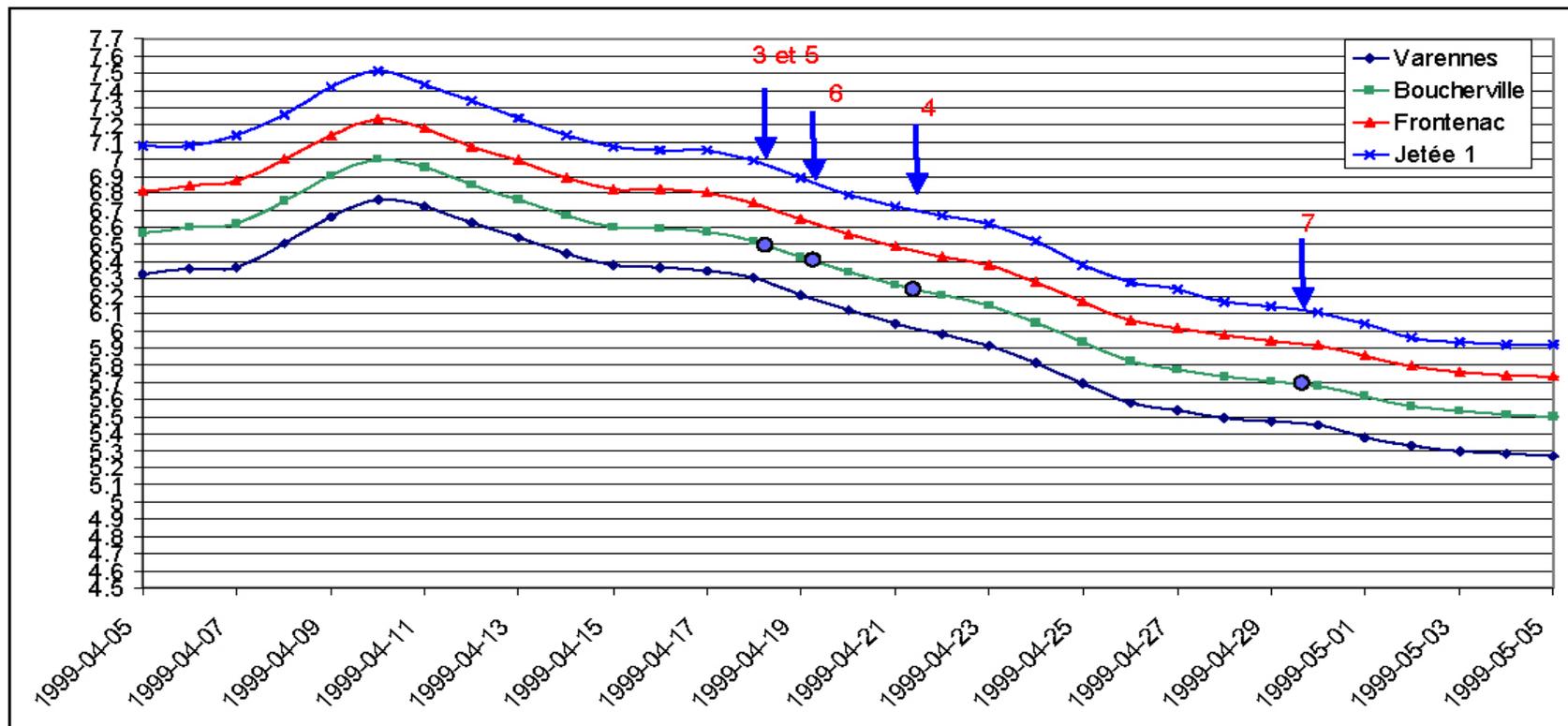


Figure 3 : Variations du niveau d'eau aux stations de mesure de Varennes, Frontenac et de Jetée #1, ainsi que l'interpolation du niveau pour le secteur de Boucherville. Les points représentent l'élévation correspondant au moment de l'exondation des thermistors.

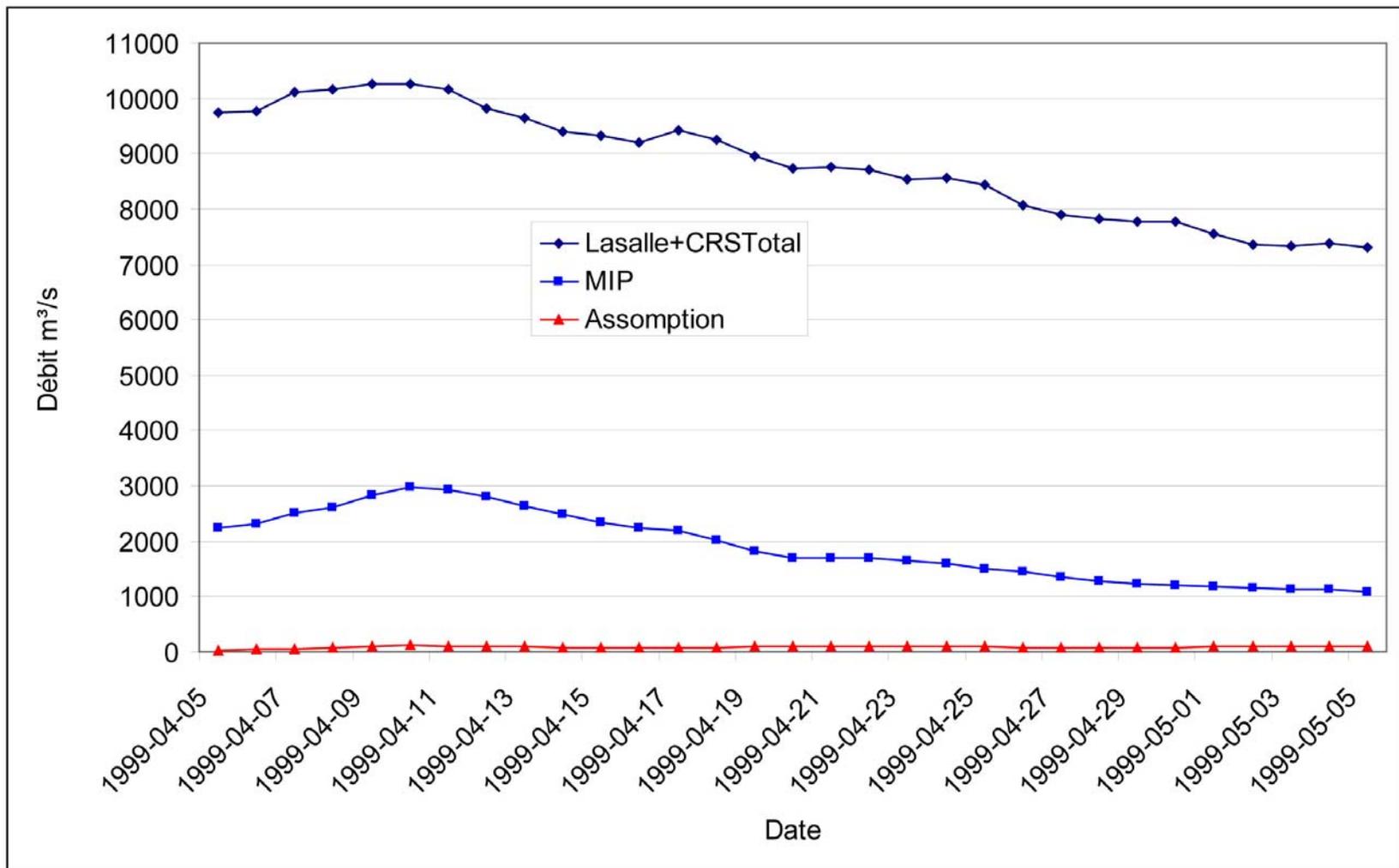


Figure 4 : Variations du débit journalier des trois points d'entrée du modèle hydrodynamique, Lasalle et canal de la rive sud (Lasalle+CRSTotal), Rivières des Mille-Îles et des Prairies (MIP) et rivière l'Assumption.

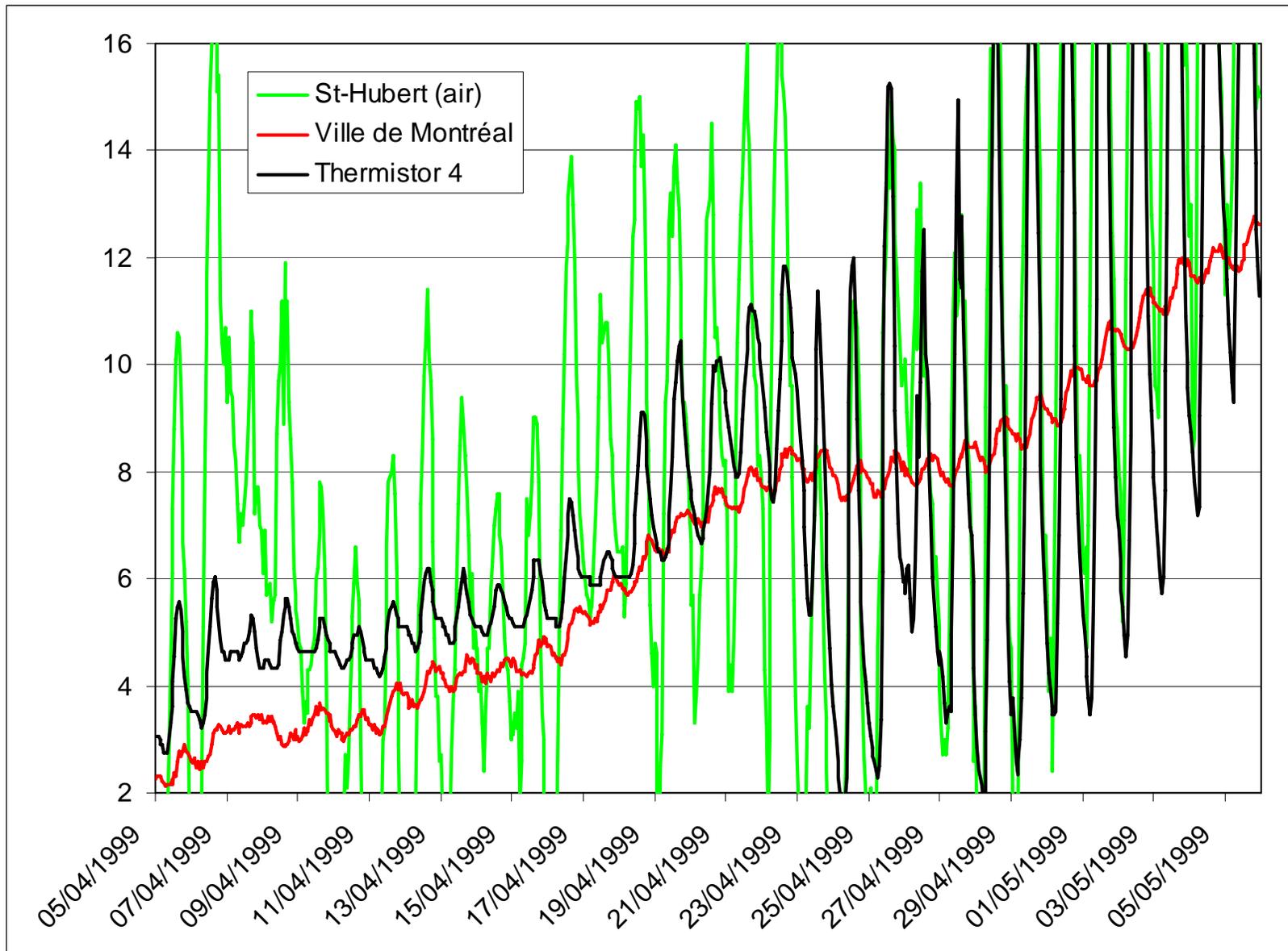


Figure 5 : Température relevée par le thermistor 4 et température de l'eau au Port de Montréal en moyenne horaire.

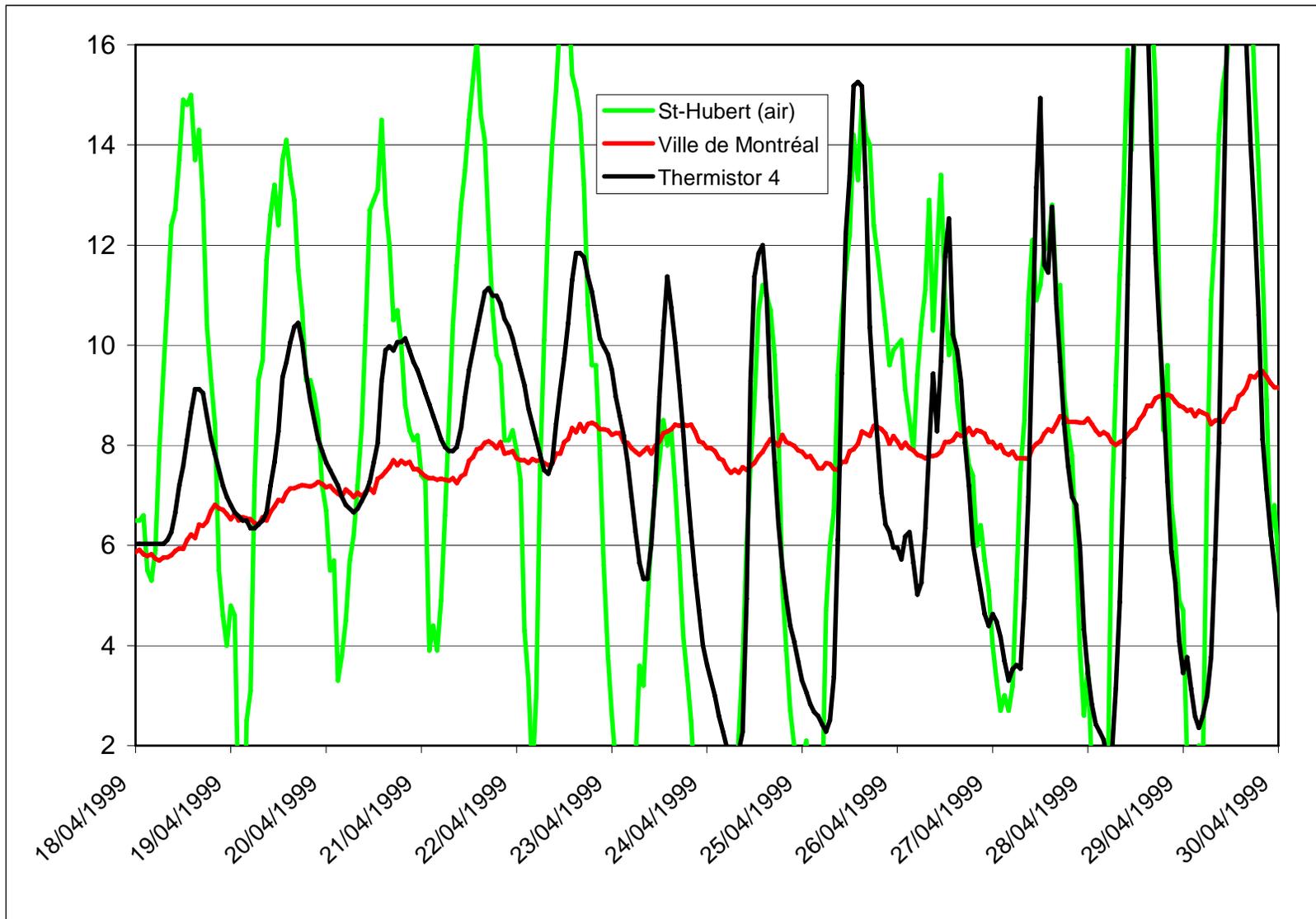


Figure 6 : Signal d'un thermistor exondé en moyenne horaire (Thermistor 4).

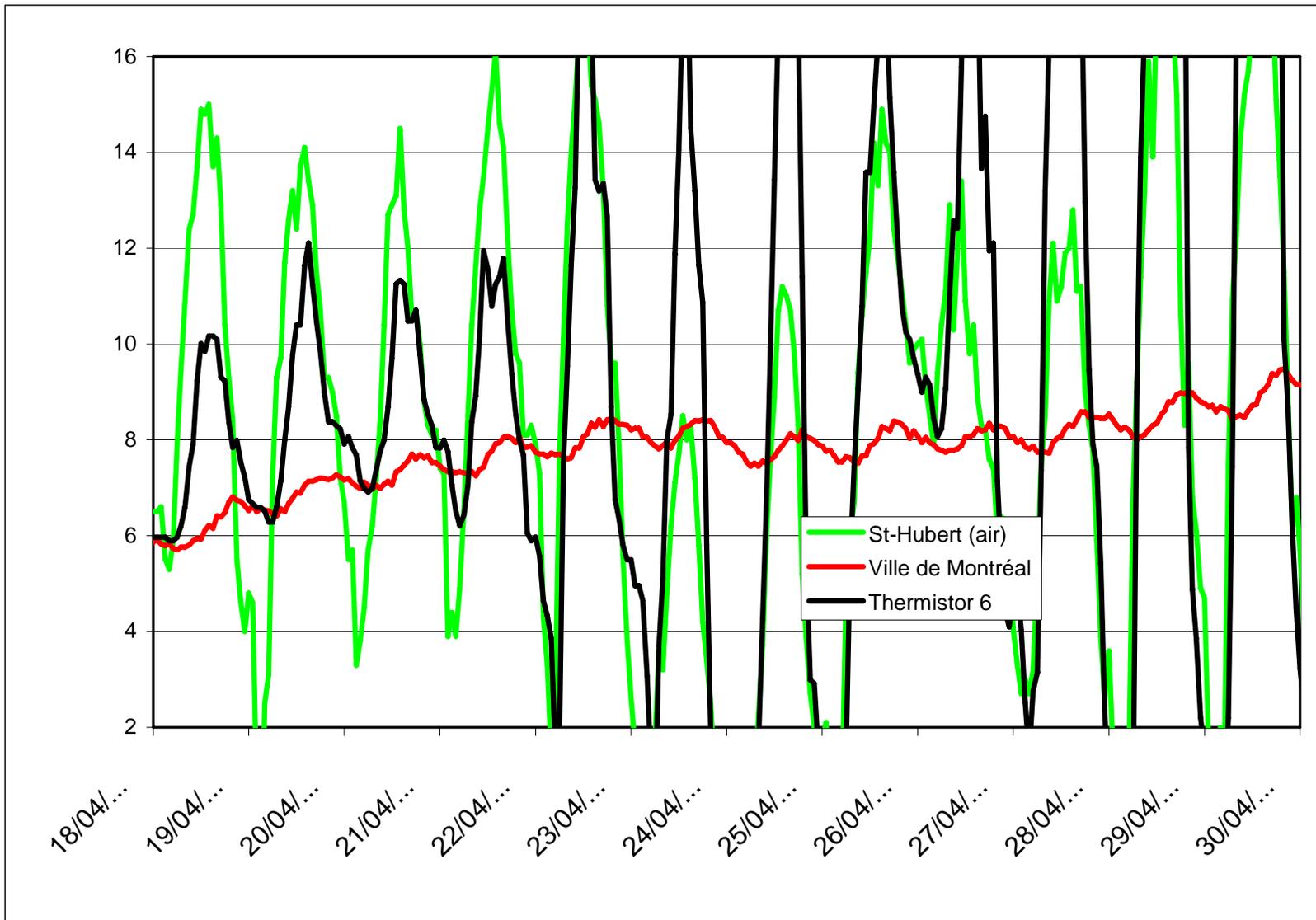


Figure 7 : Signal d'un thermistor exondé en moyenne horaire (Thermistor 6).

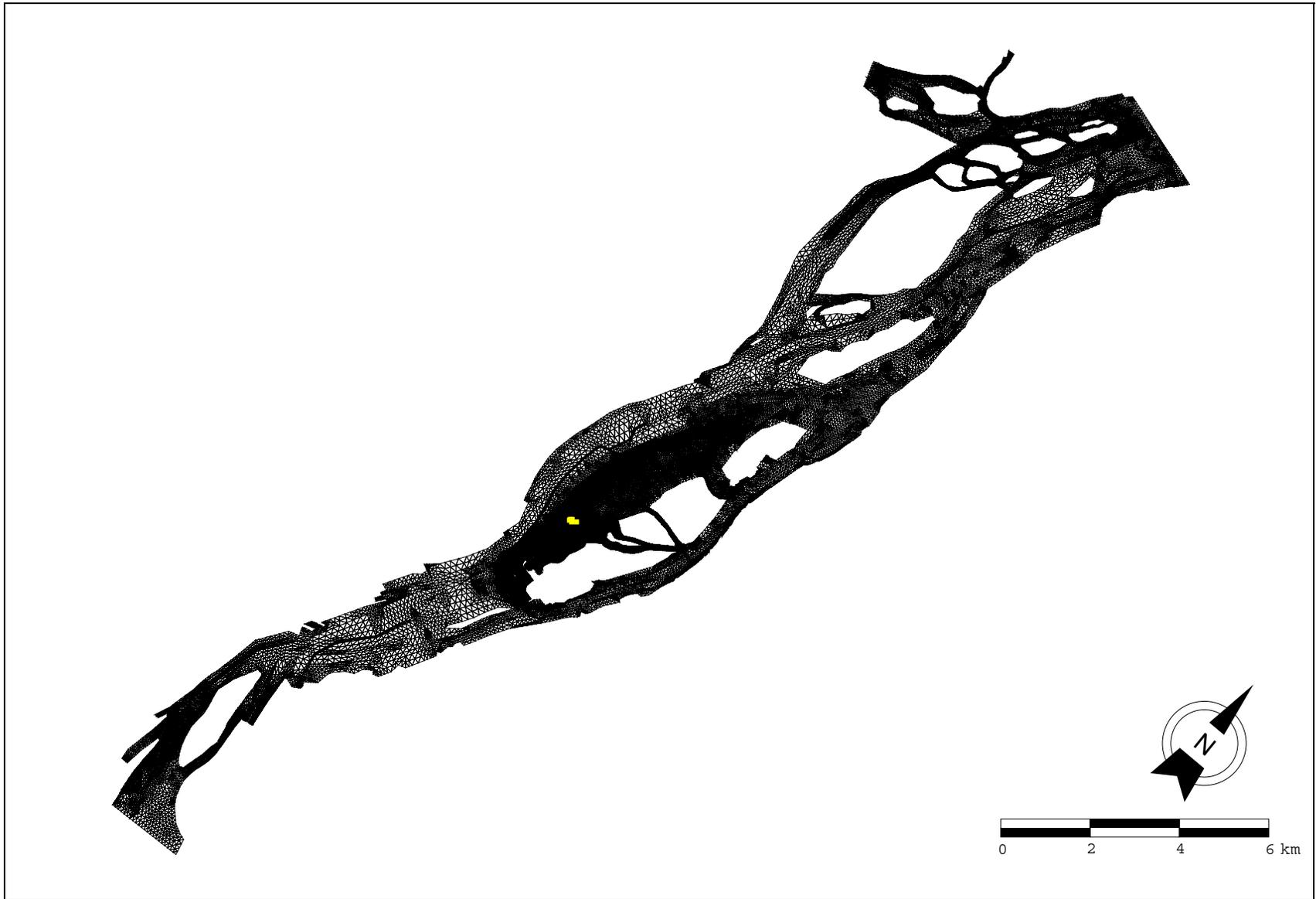


Figure 8 : Maillage éléments finis global et position des thermistors.

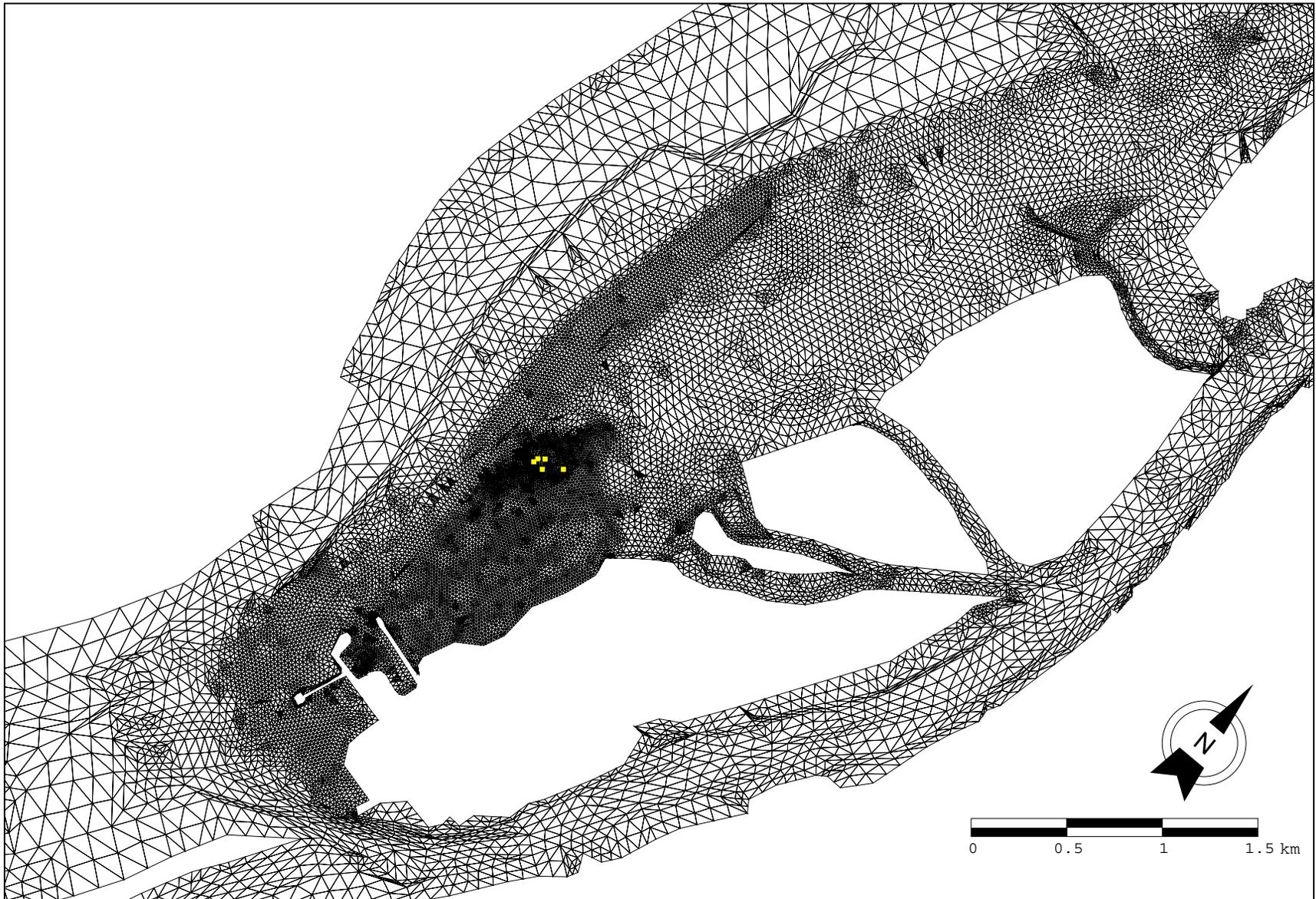


Figure 9 : Détail - Maillage éléments finis et position des thermistors.

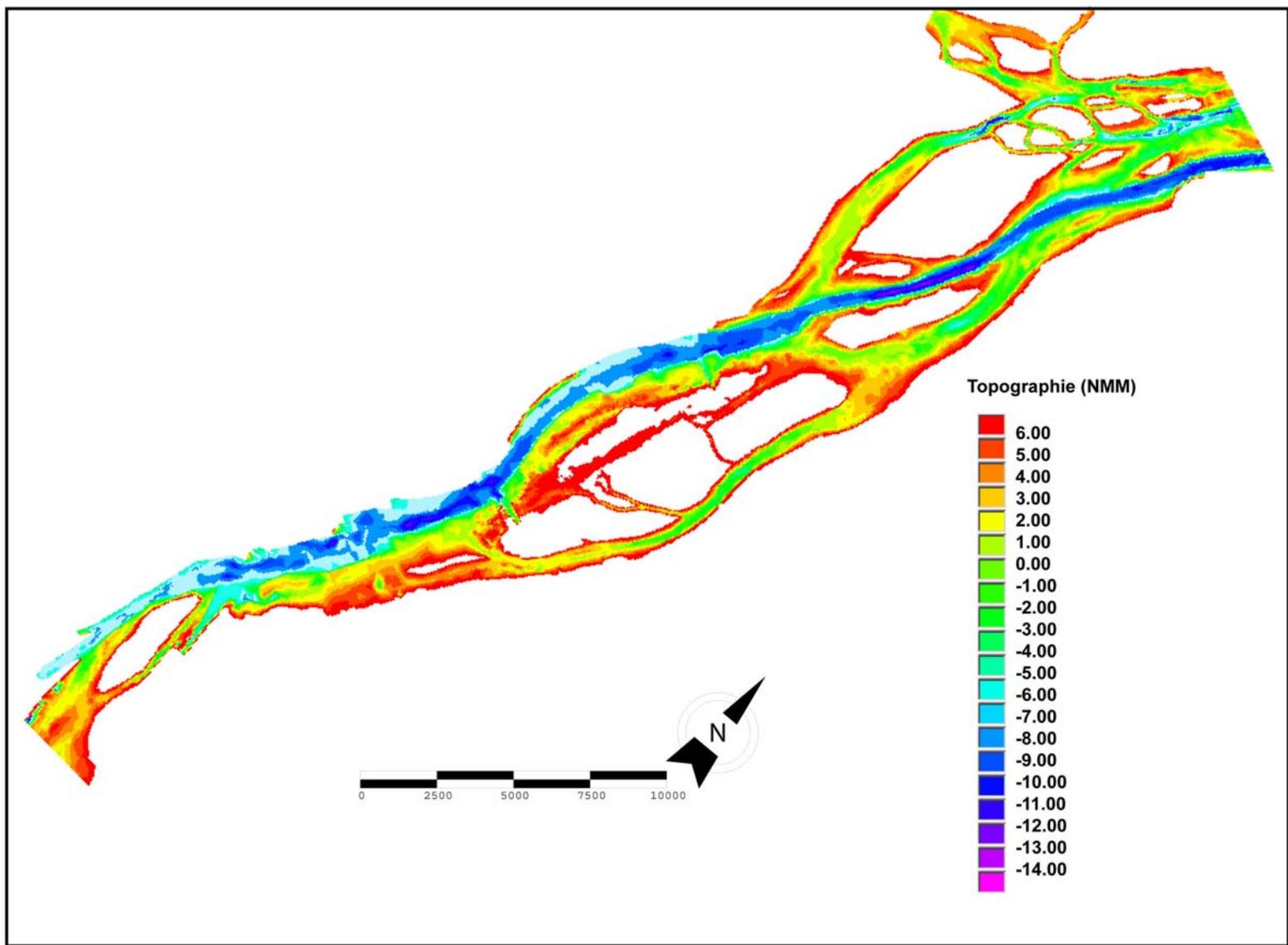


Figure 10 : Topographie du tronçon tel qu'assemblée sur le maillage éléments finis.

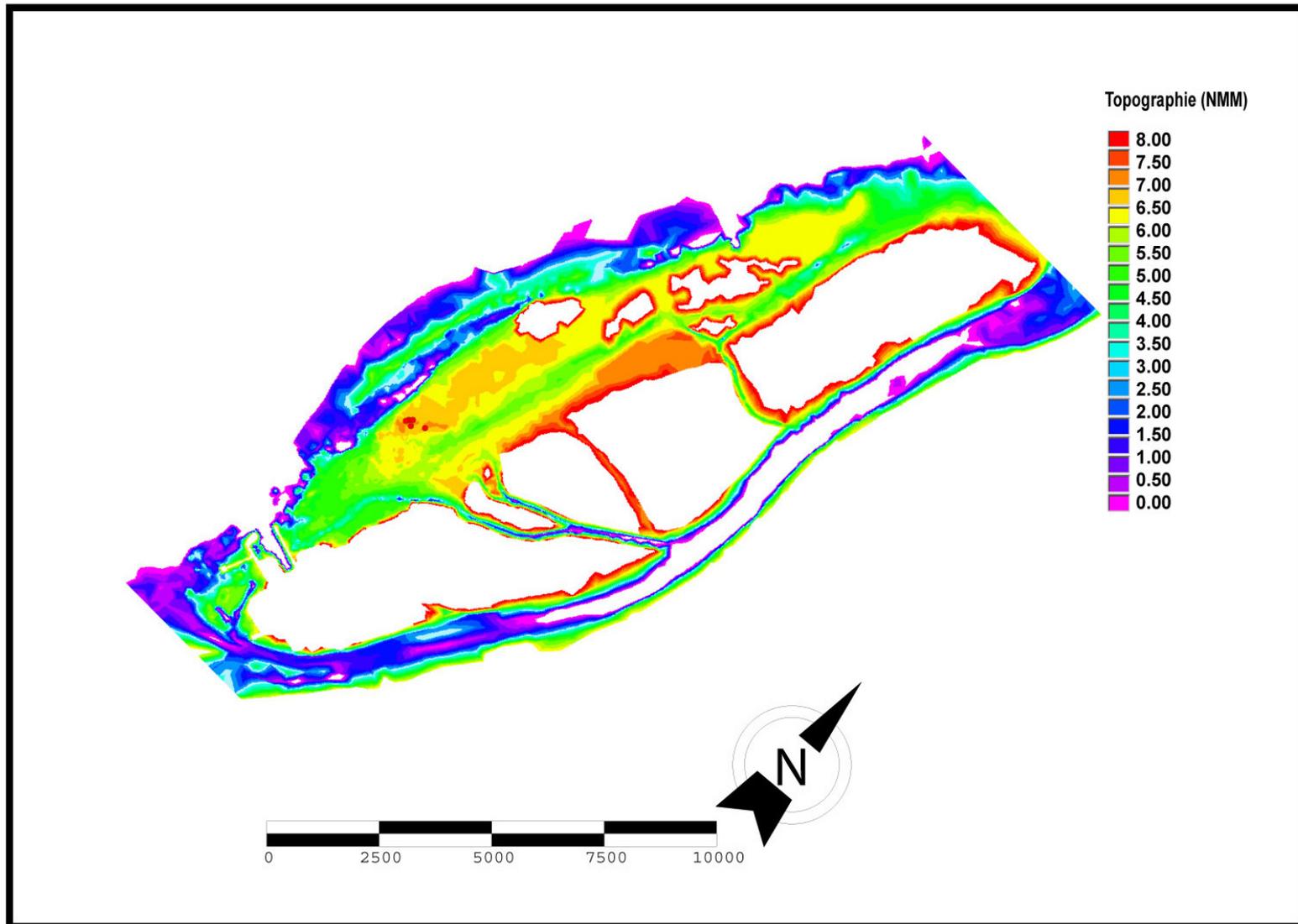


Figure 11 : Détail de la topographie tel qu'assemblée sur le maillage éléments finis dans le secteur des thermistors (points rouges).

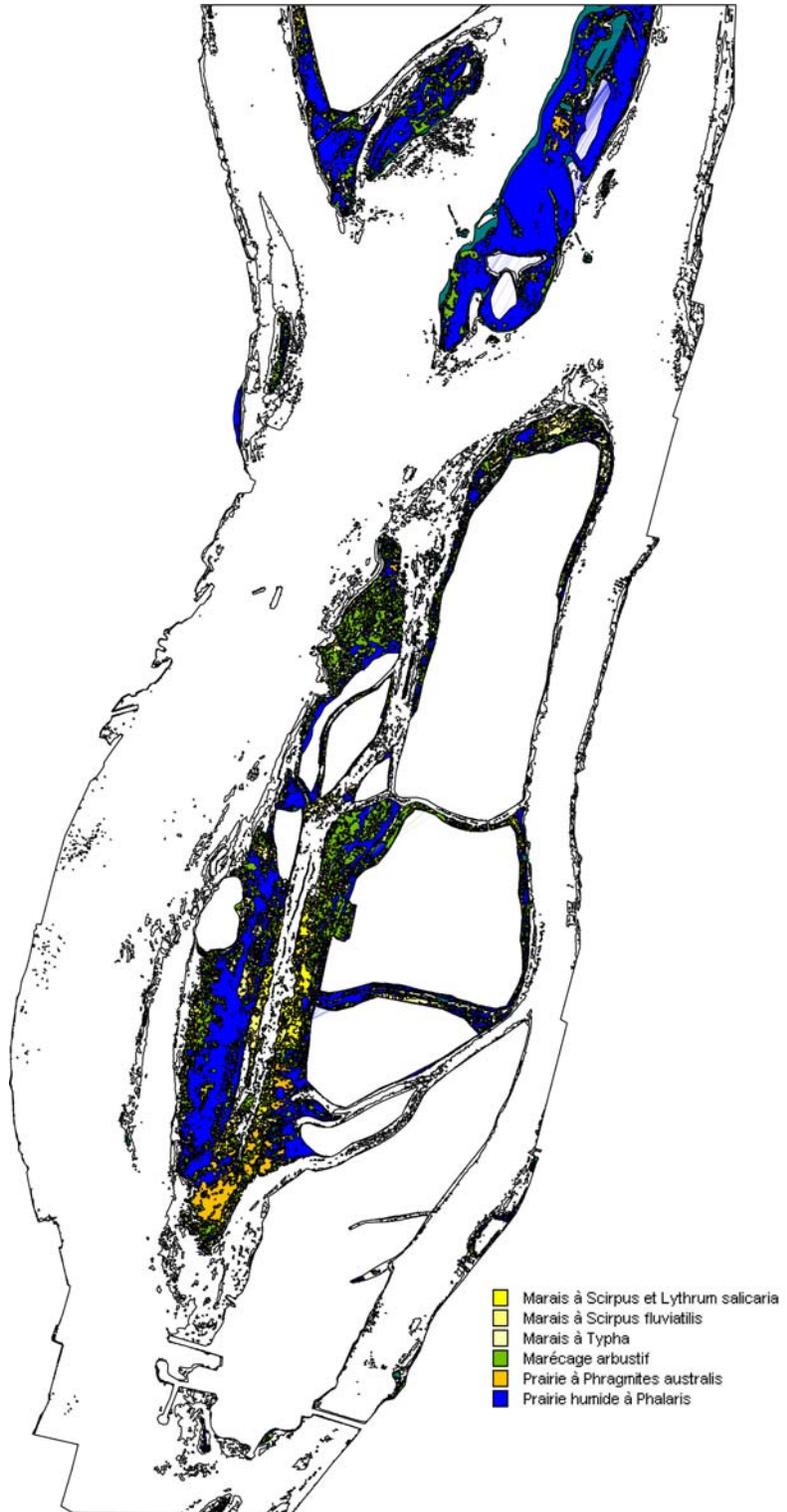


Figure 12 : Distribution des assemblages de plantes émergentes des Îles de Boucherville, provenant de Martin Jean et Guy Létourneau (CSL).

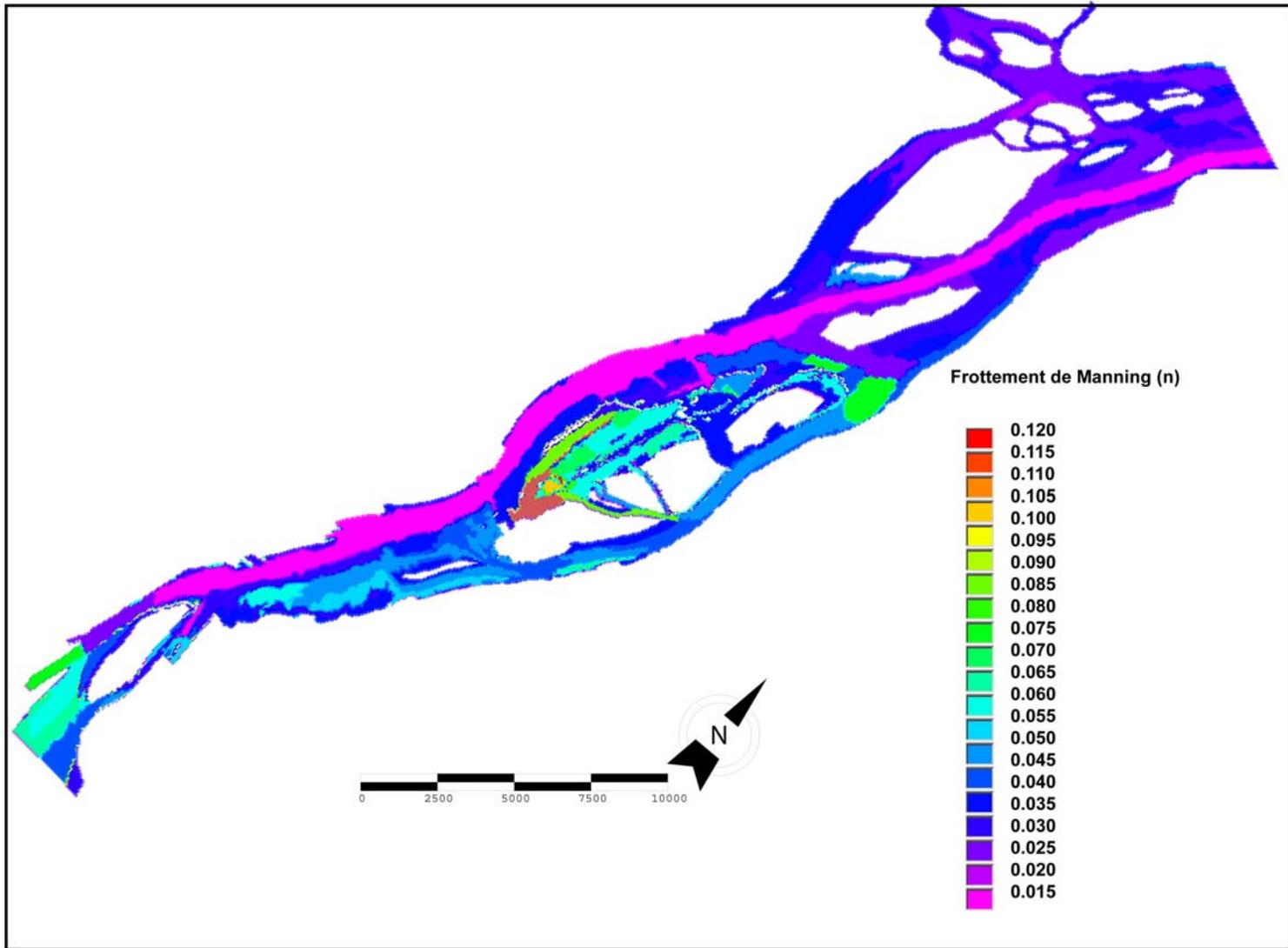


Figure 13 : Coefficients de frottement de Manning utilisés dans le calcul hydrodynamique.

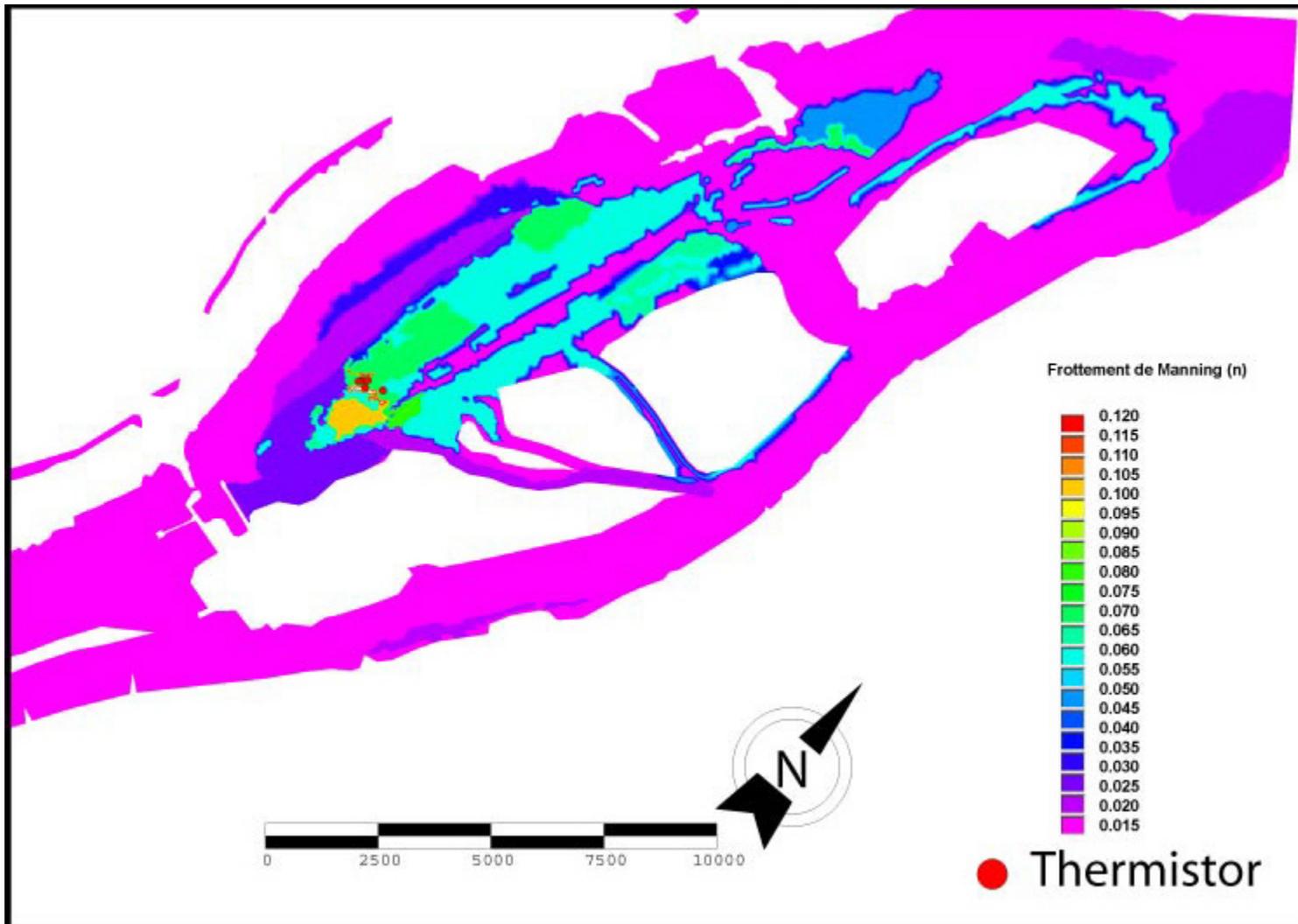


Figure 14 : Détail des coefficients de frottement de Manning utilisés ainsi que la position des thermistors.

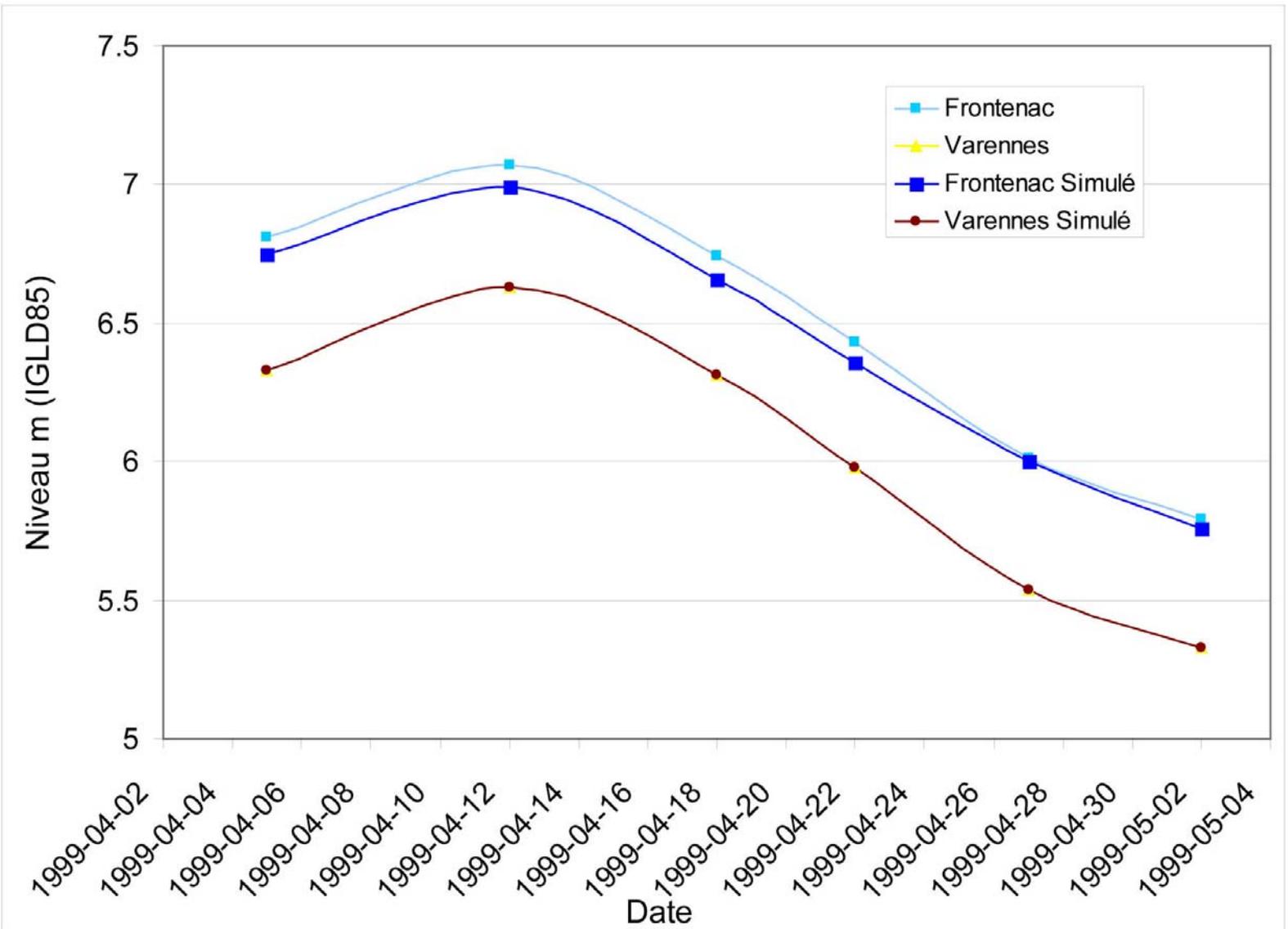


Figure 15 : Résultats de la validation comparant les niveaux simulés et les niveaux mesurés dans le domaine à l'étude.

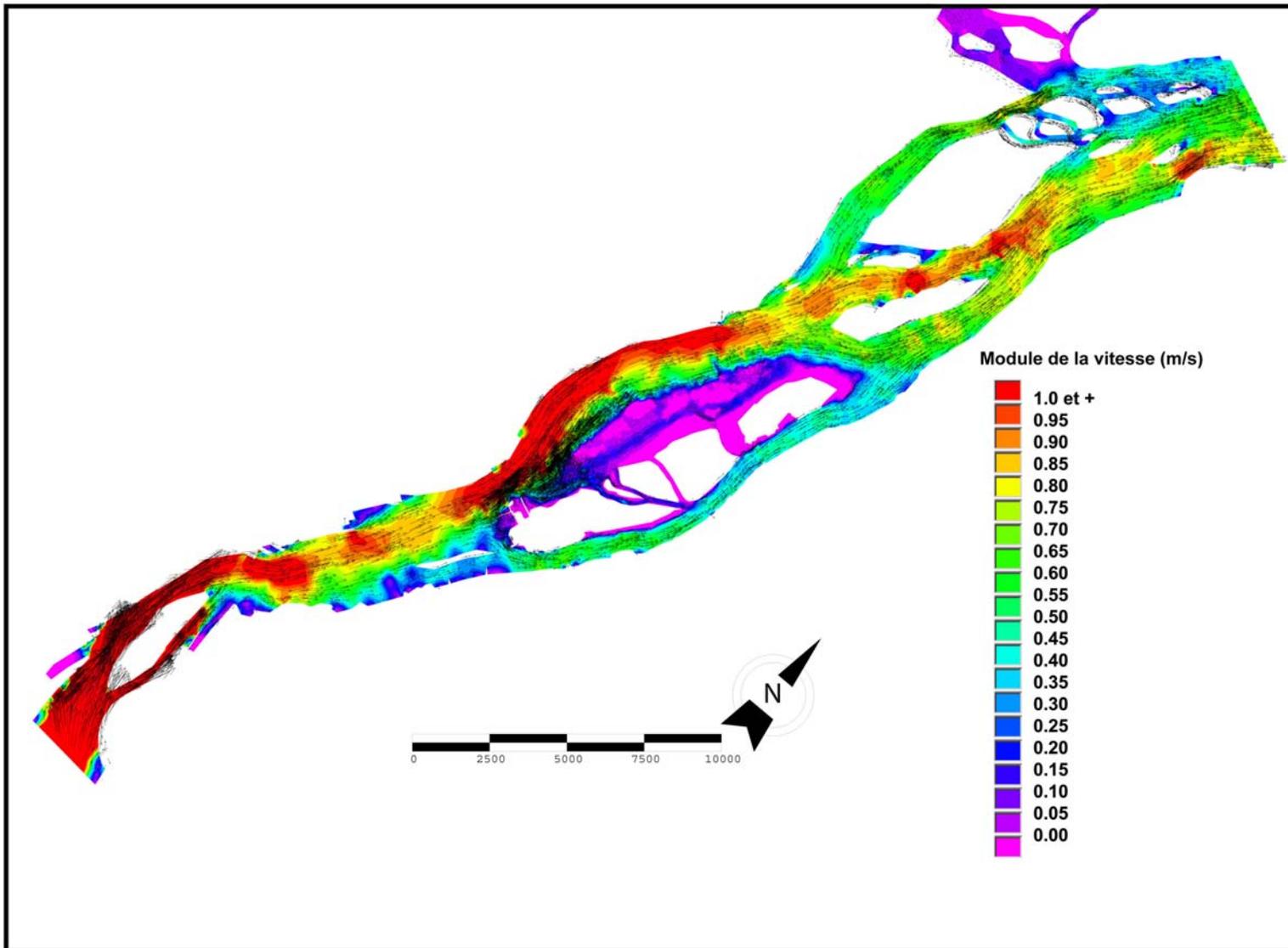


Figure 16 : Module de la vitesse du tronçon et vecteur vitesse (5 avril 1999).

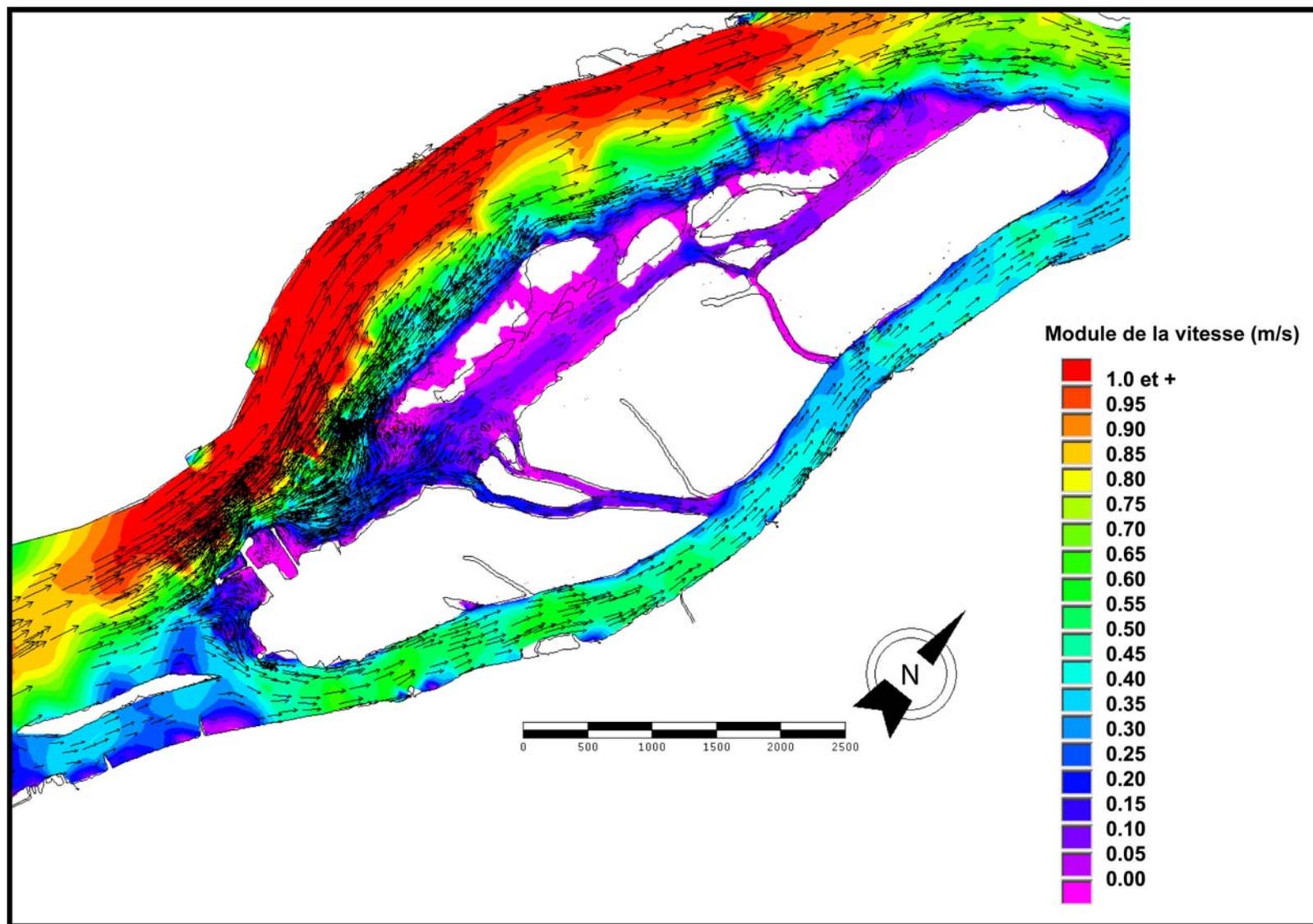


Figure 17 : Détail sur le secteur à l'étude du module de la vitesse et vecteur vitesse pour le 5 avril 1999.

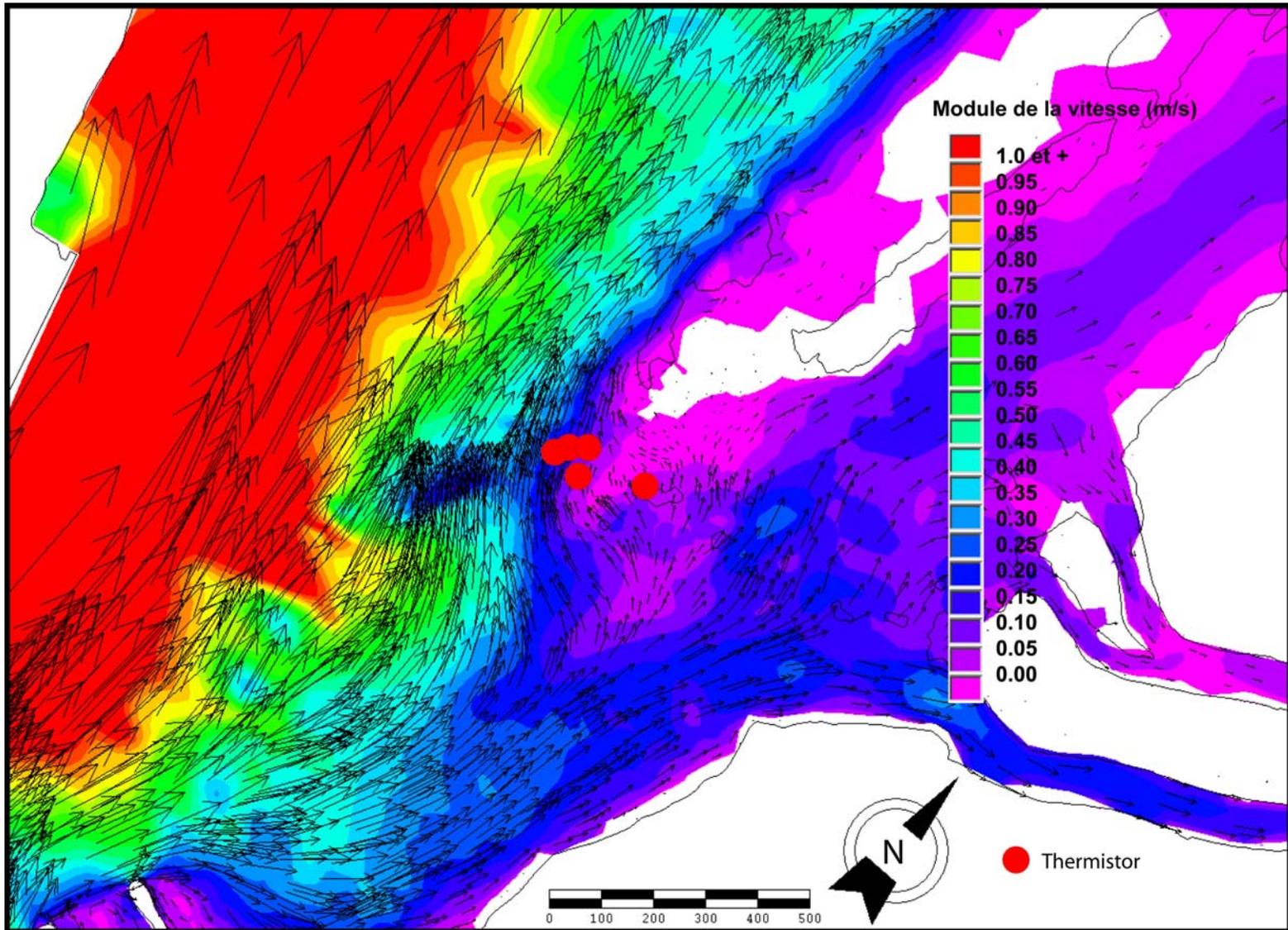


Figure 18 : Vue détaillée du module de la vitesse et vecteur vitesse près des thermistors (5avril 1999).

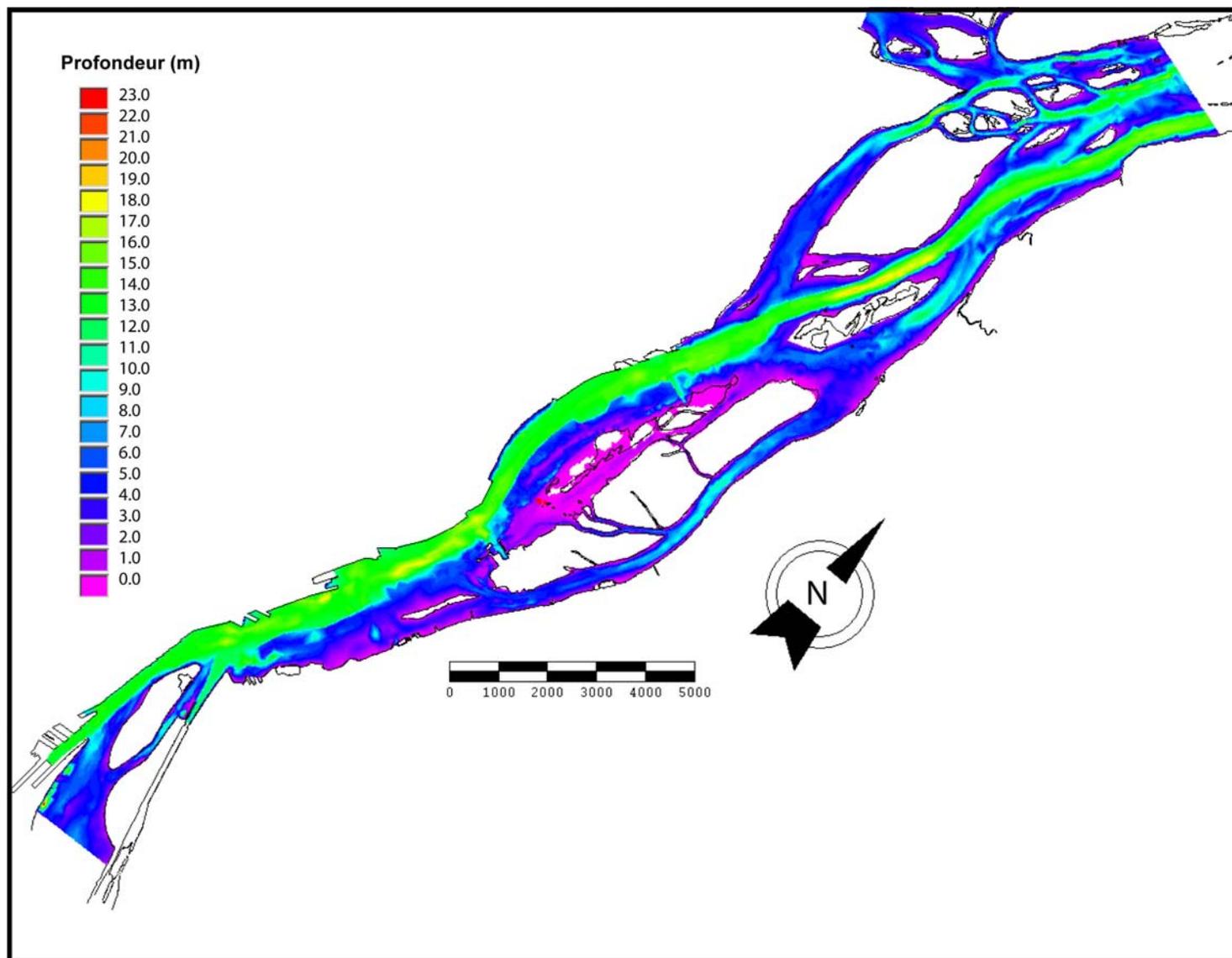


Figure 19 : Profondeur d'eau simulée (5avril 1999).

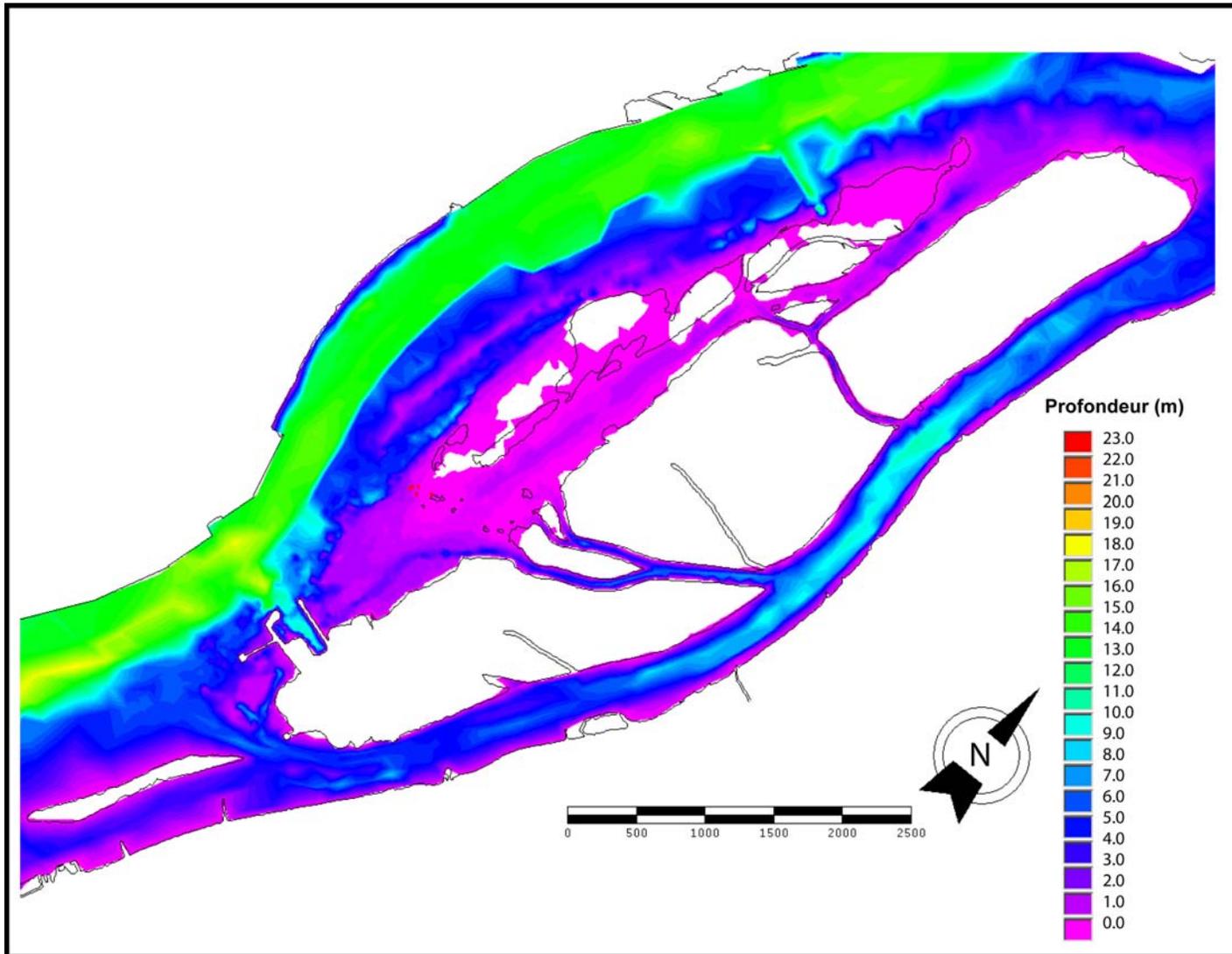


Figure 20 : Vue détaillée de la profondeur simulée pour le secteur à l'étude (5avril 1999).

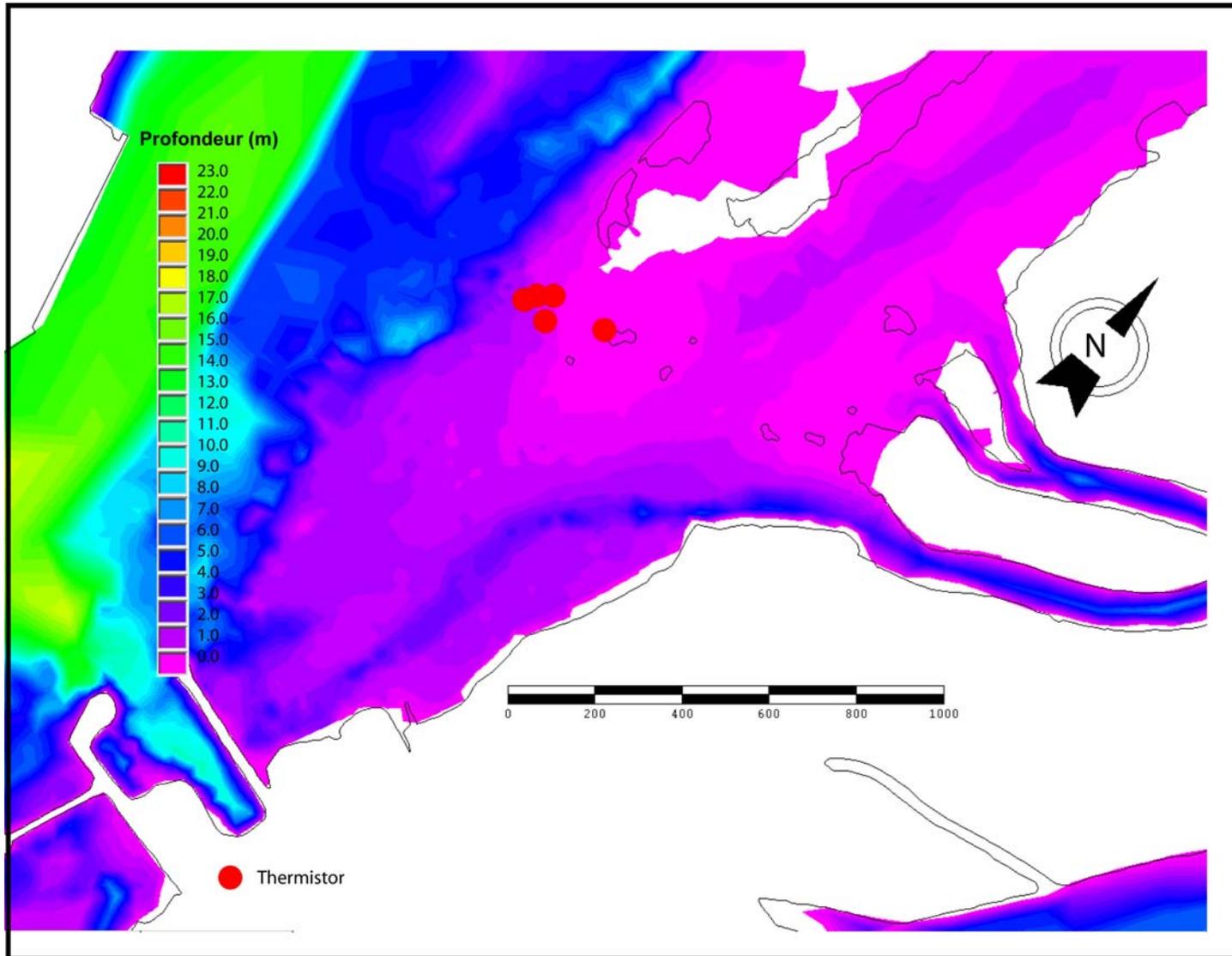


Figure 21 : Profondeur simulée pour le secteur près des thermistors (5avril 1999).

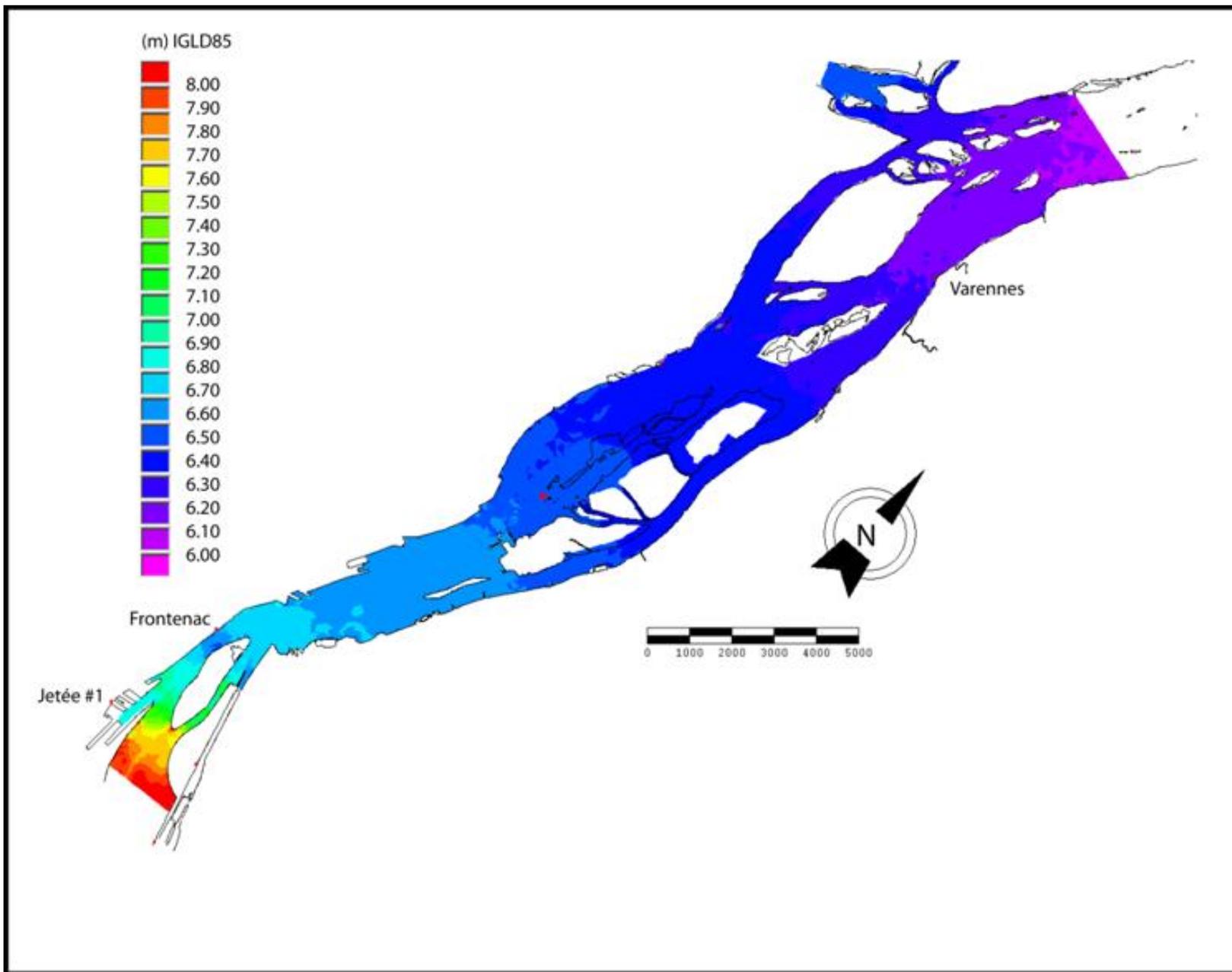


Figure 22: Niveau simulé et position des stations de mesures de niveaux (5 avril 1999).

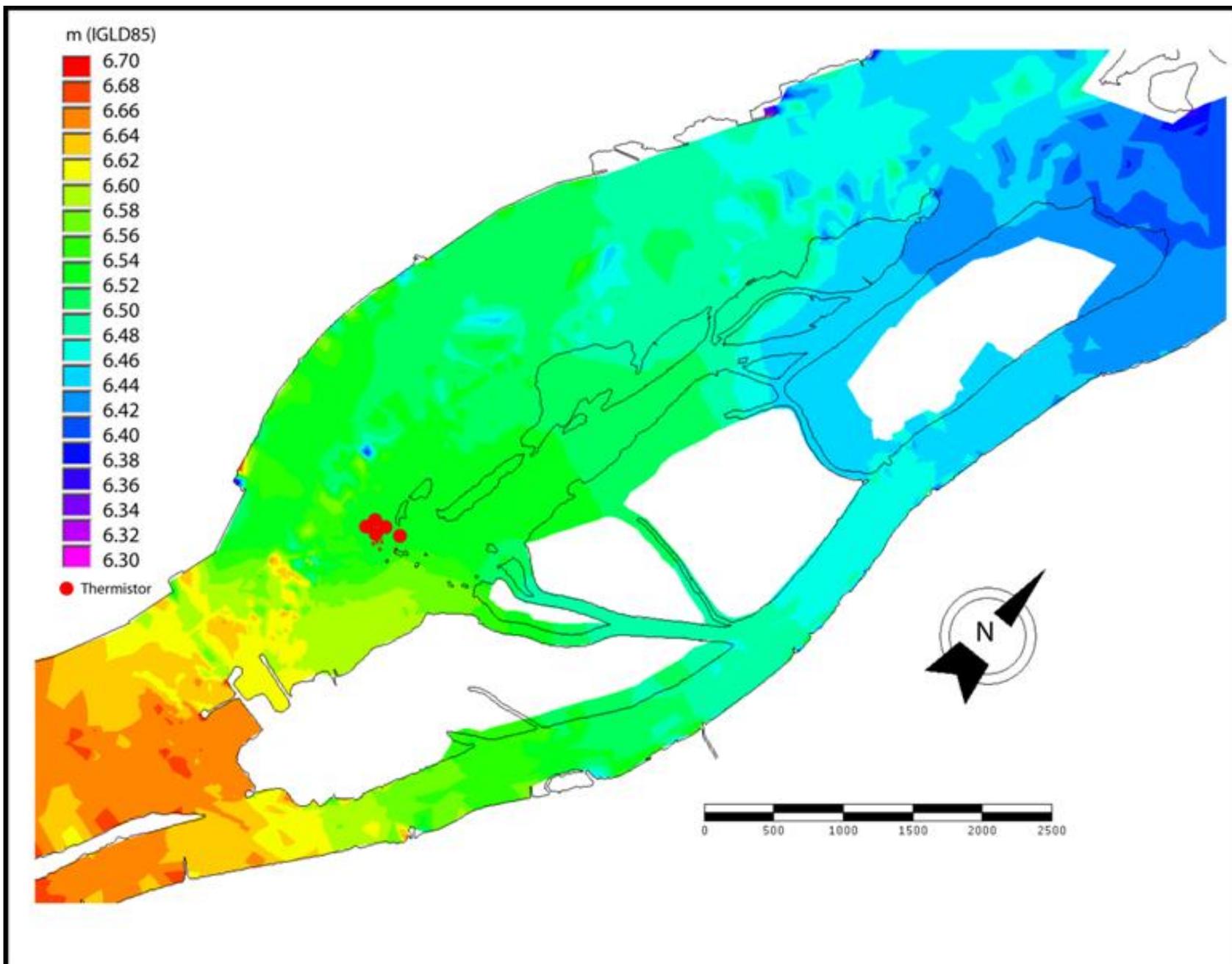


Figure 23: Niveau simulé secteur des Îles de Boucherville (5avril 1999).

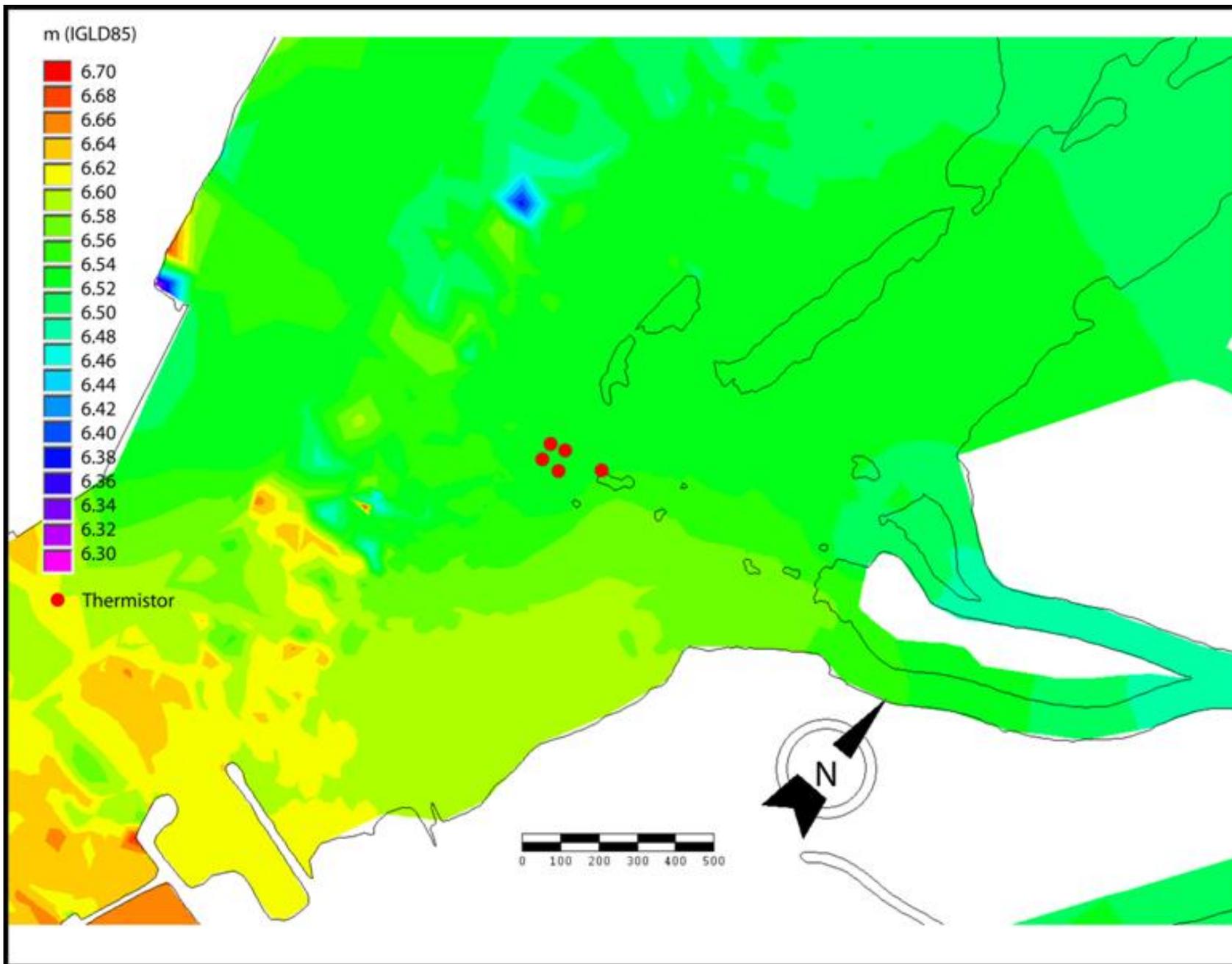


Figure 24: Niveau simulé près des thermistor et position des thermistors (5 avril 1999).

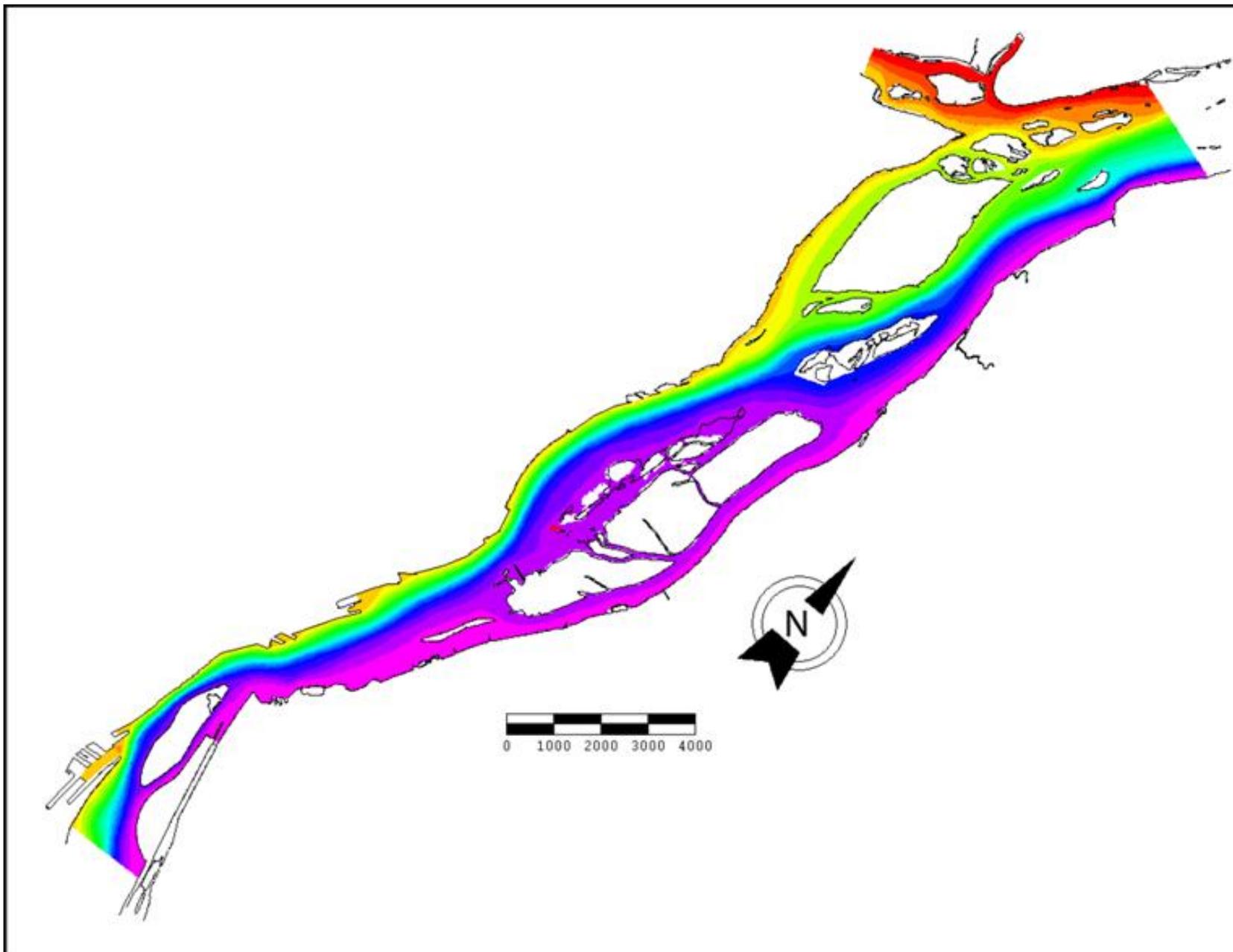


Figure 25: Fonction courant pour le 5 avril 1999.

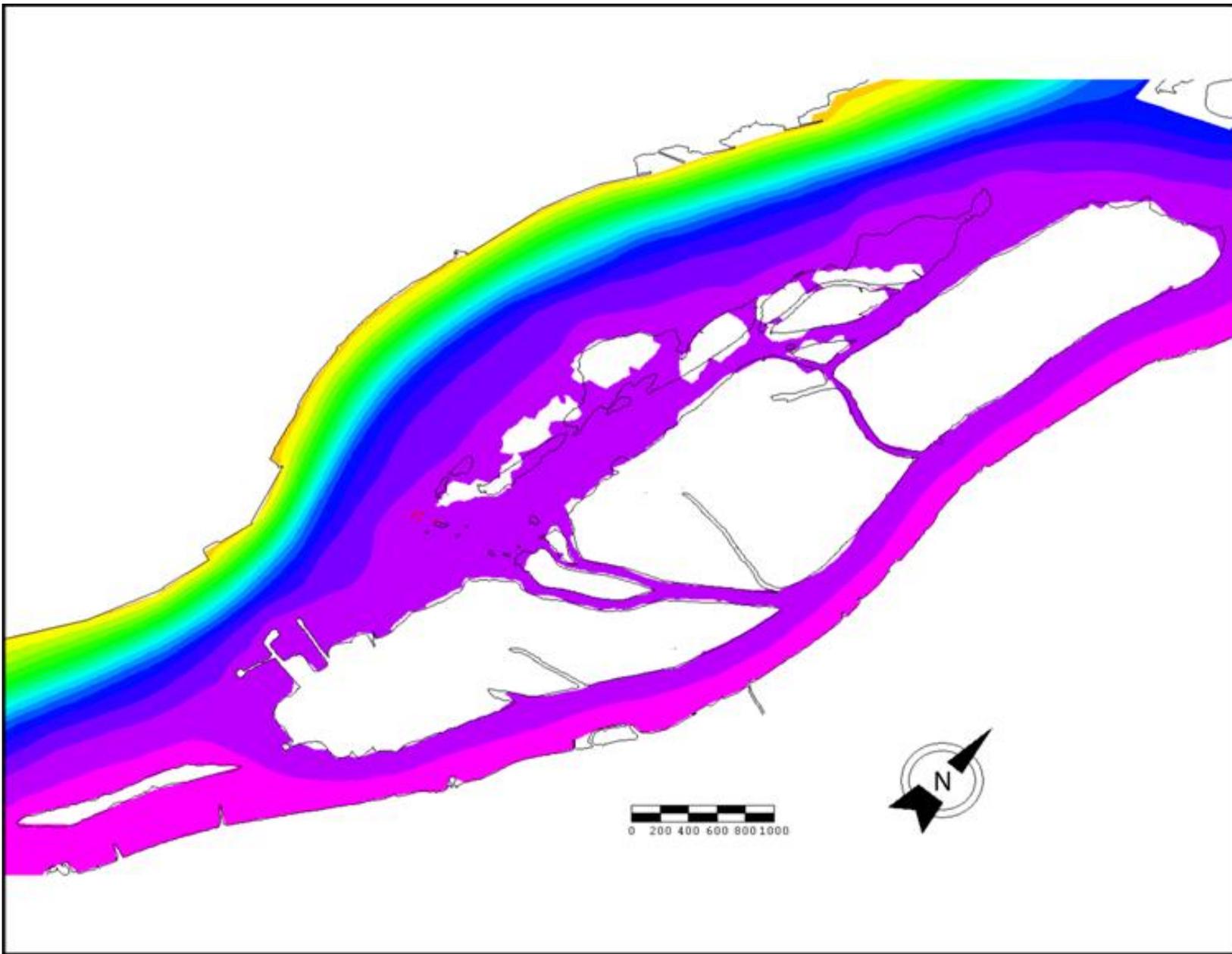


Figure 26: Vue détaillée de la fonction courant dans le secteur à l'étude (5 avril 1999).

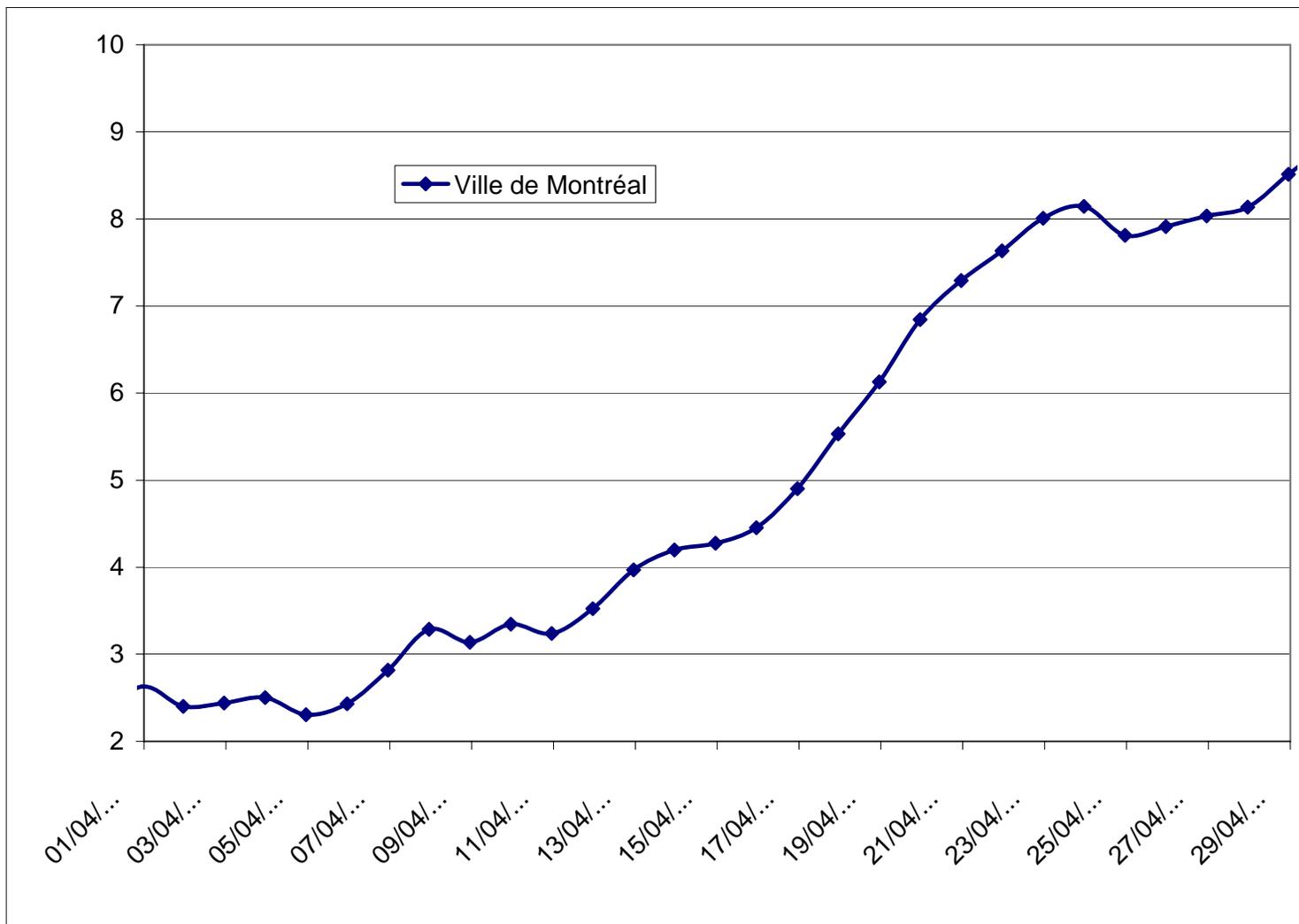


Figure 27 : Température moyenne journalière à la prise d'eau de la Ville de Montréal.

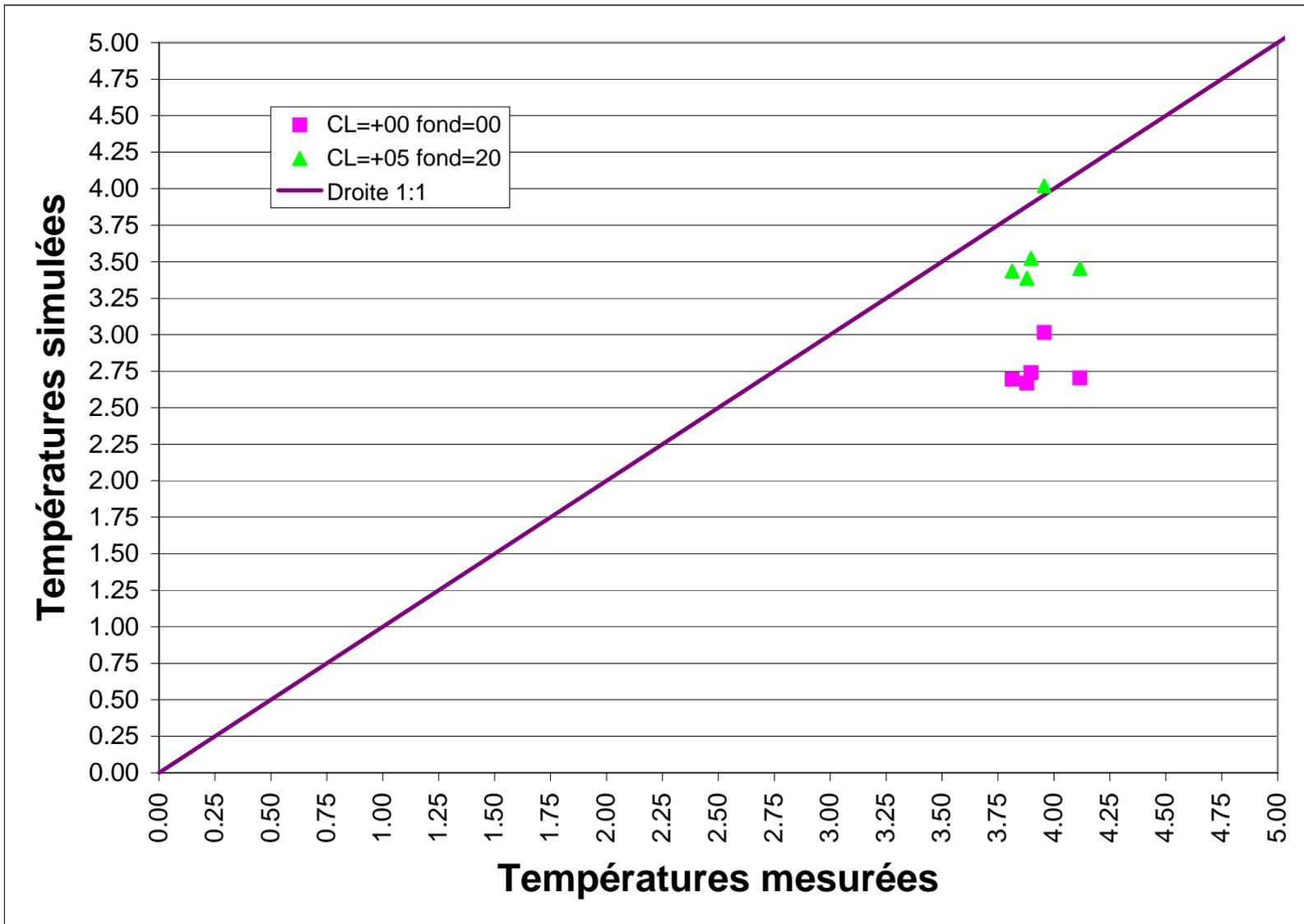


Figure 28 : Températures mesurées vs températures simulées.

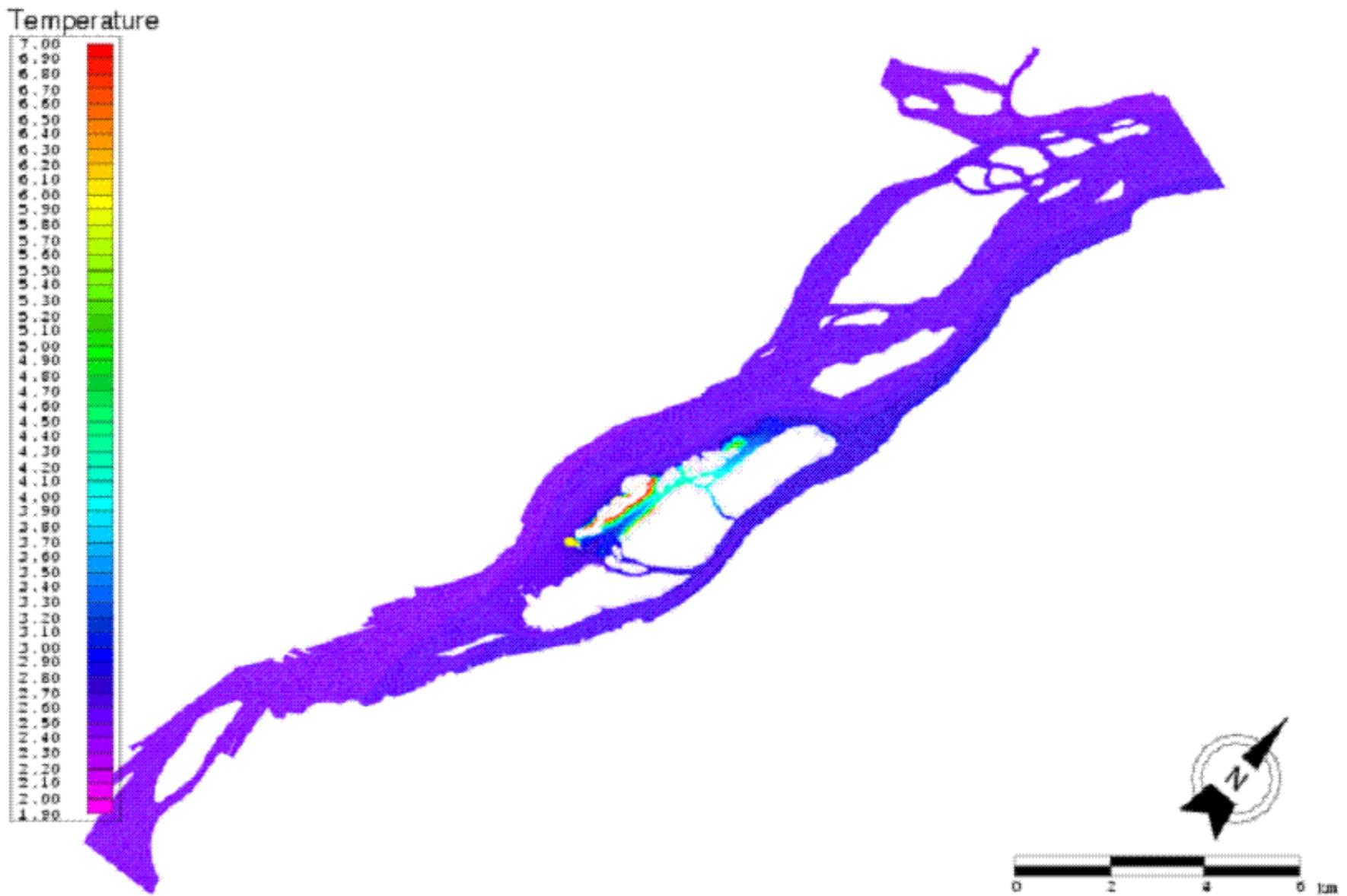


Figure 29 : Champ de température en moyenne journalière avant calibration.

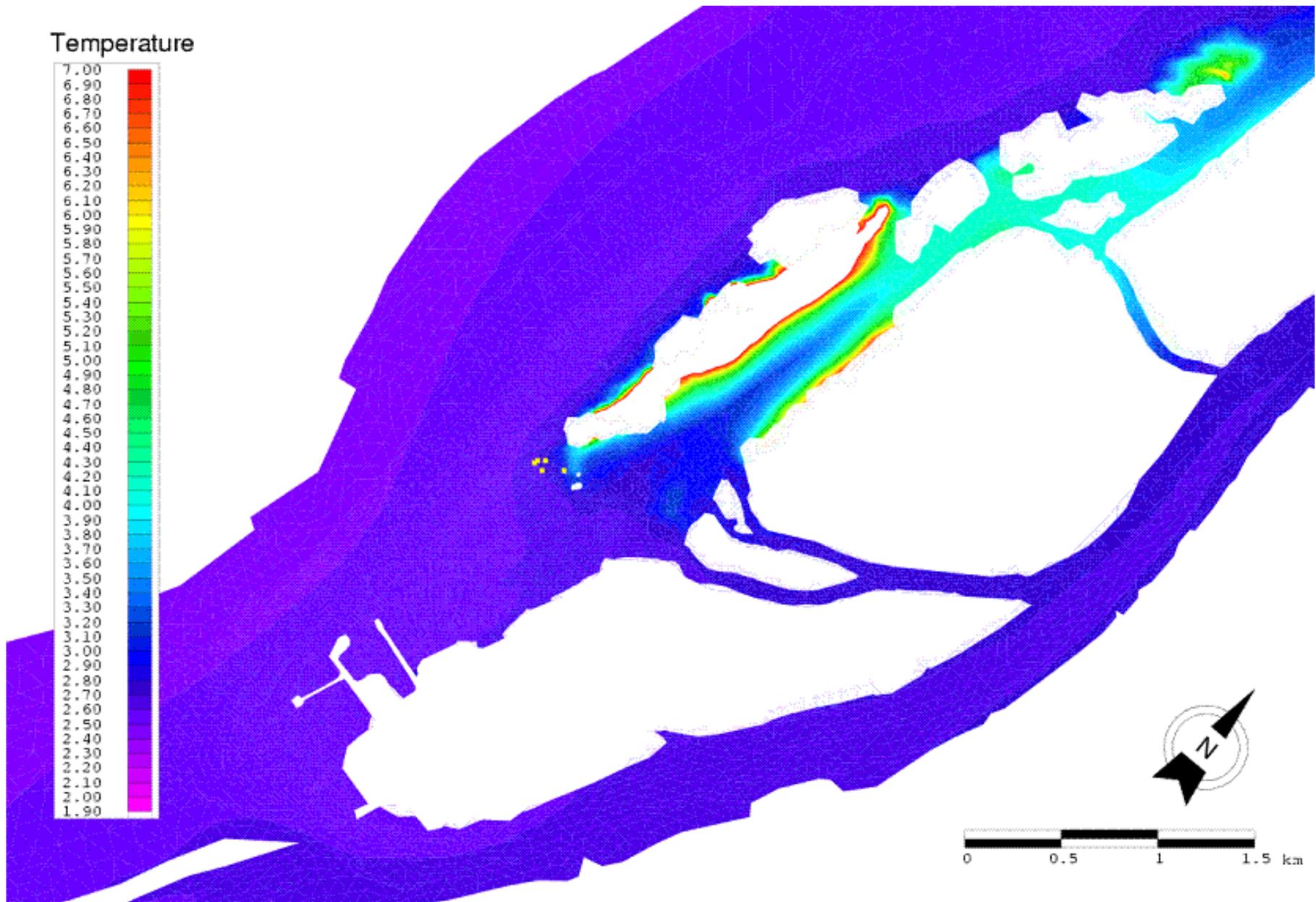


Figure 30 : Champ de température en moyenne journalière avant calibration – Détail.

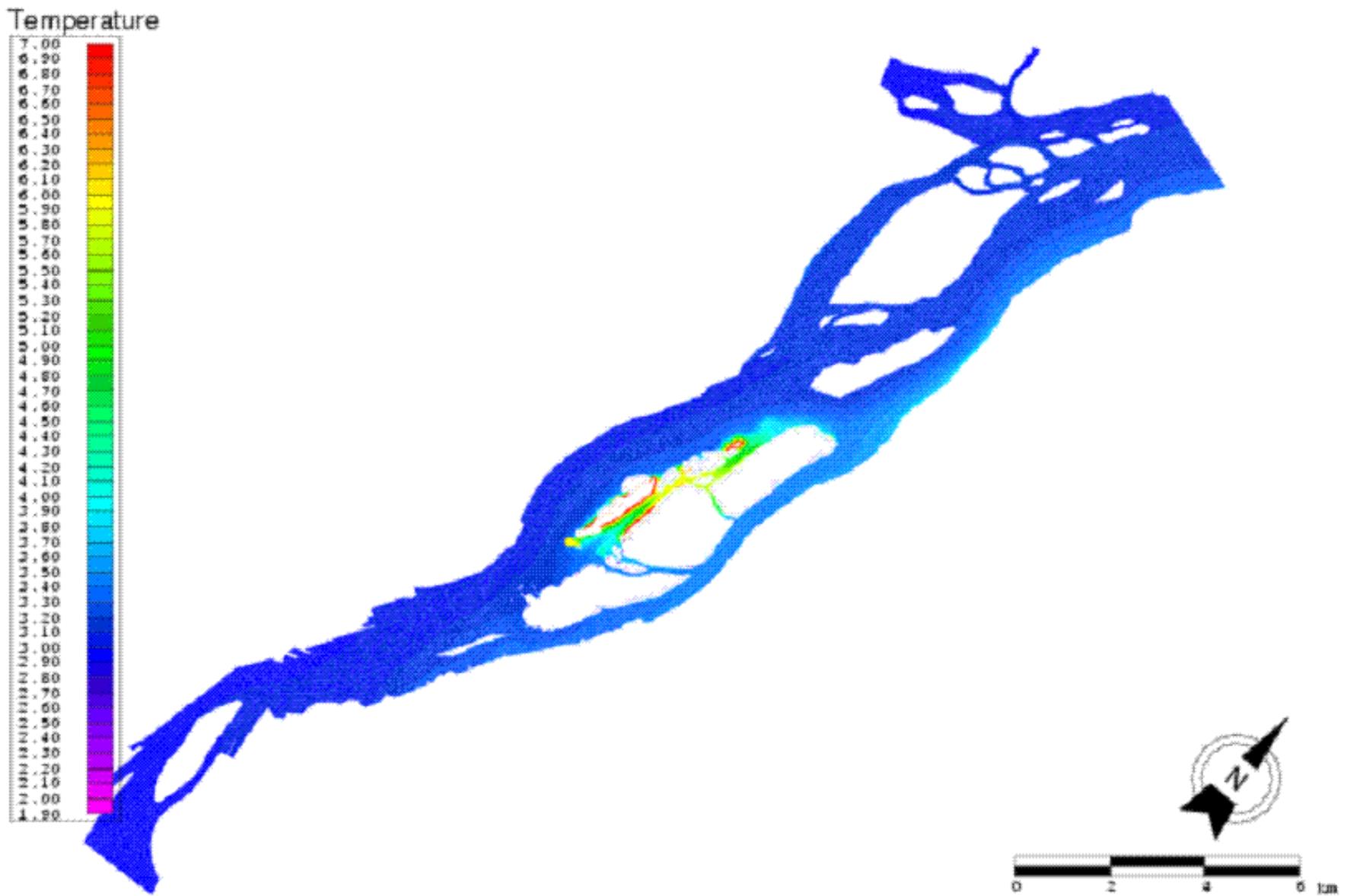


Figure 31 : Champ de température en moyenne journalière après calibration.

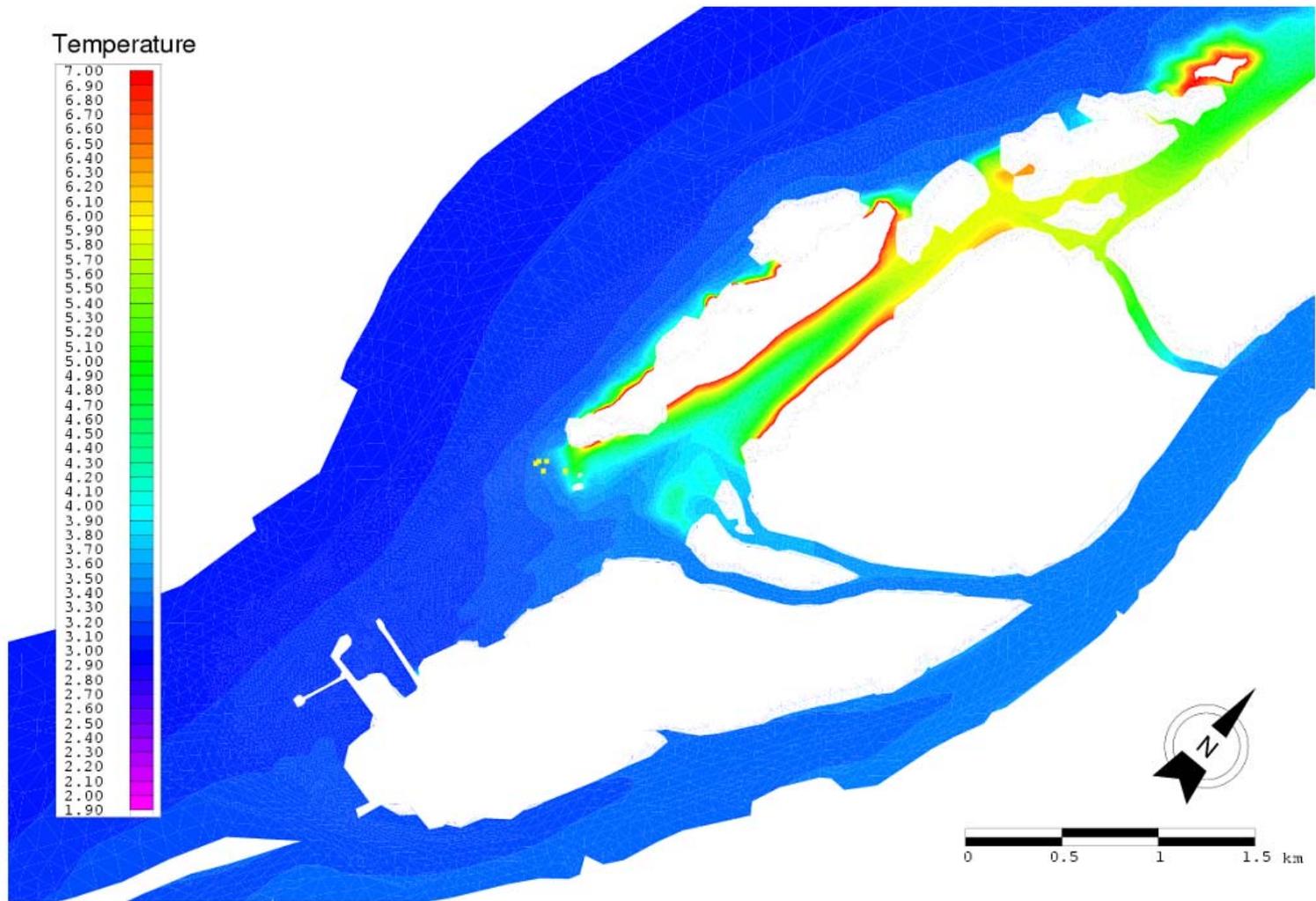


Figure 32 : Champ de température en moyenne journalière après calibration – Détail.

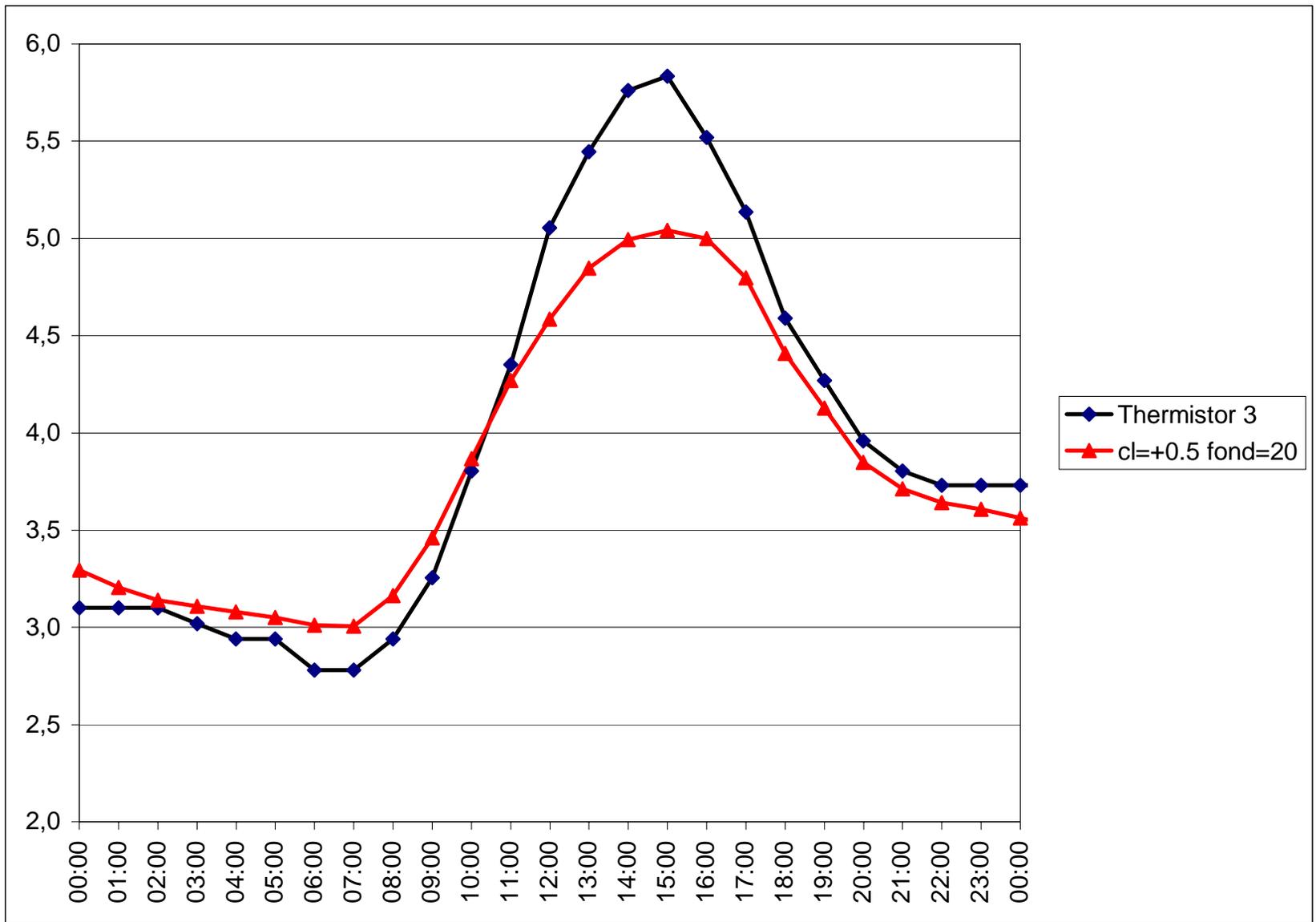


Figure 33 : Journée du 5 avril 1999 - Signal au thermistor 3.

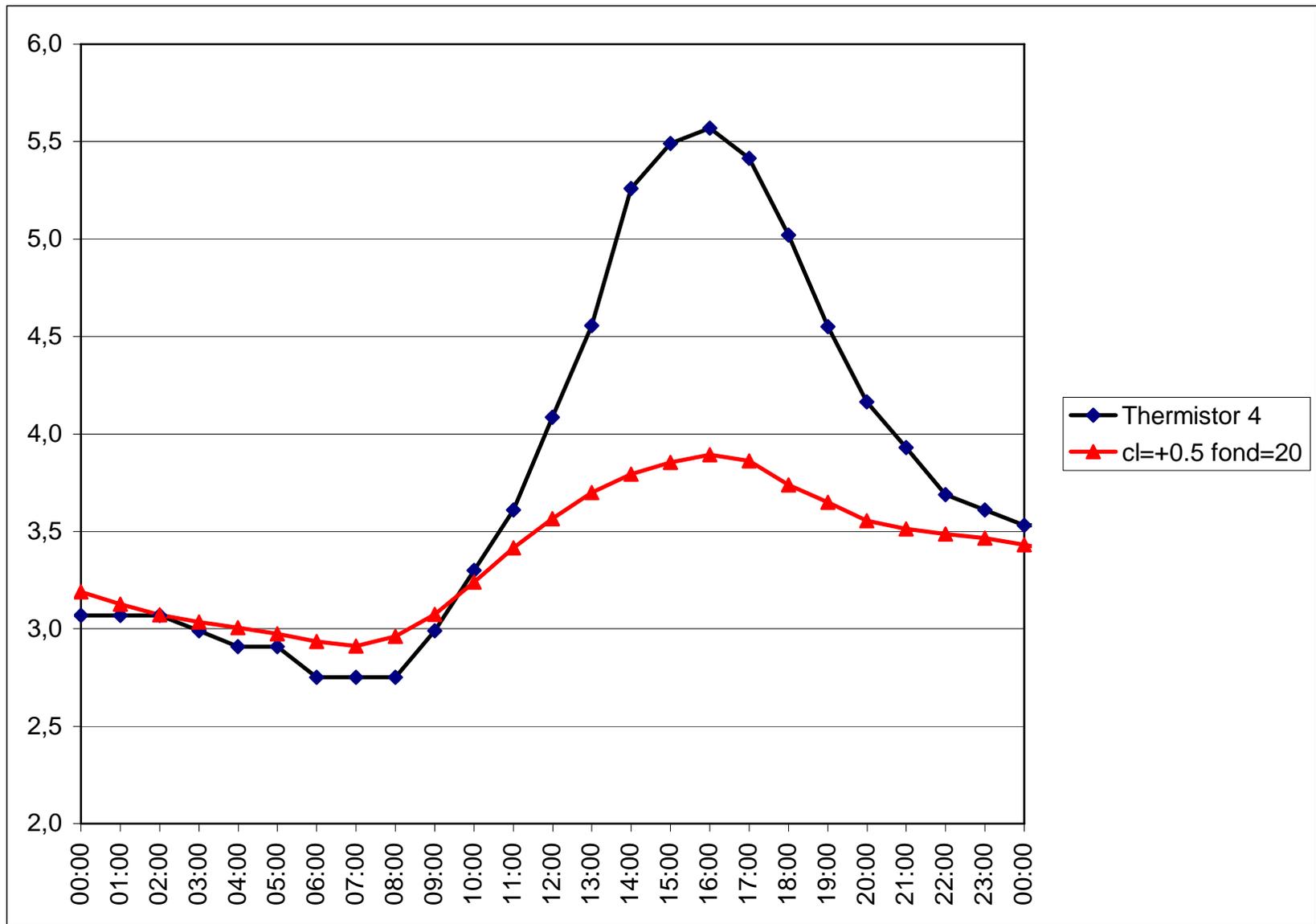


Figure 34 : Journée du 5 avril 1999 - Signal au thermistor 4.

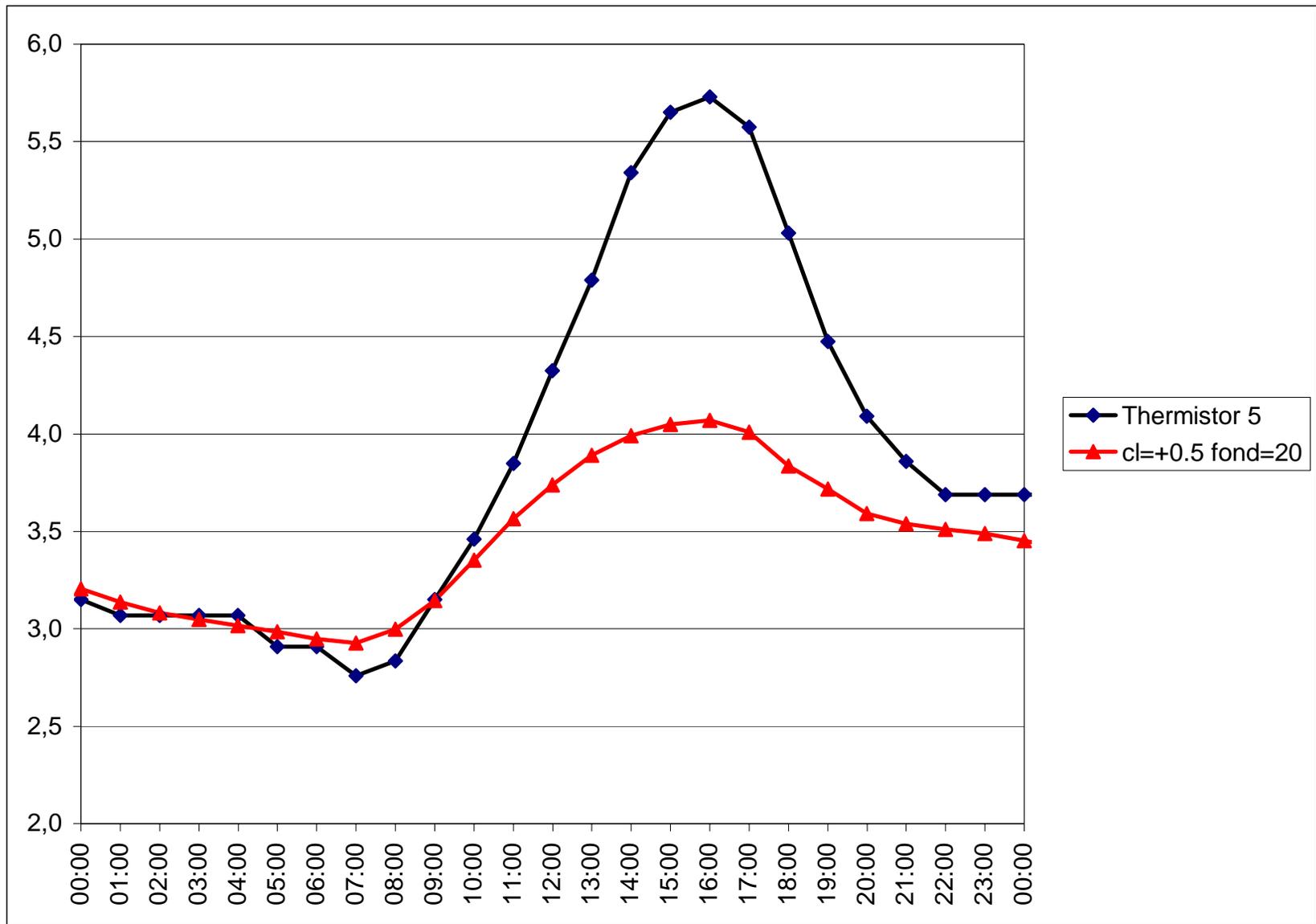


Figure 35 : Journée du 5 avril 1999 - Signal au thermistor 5.

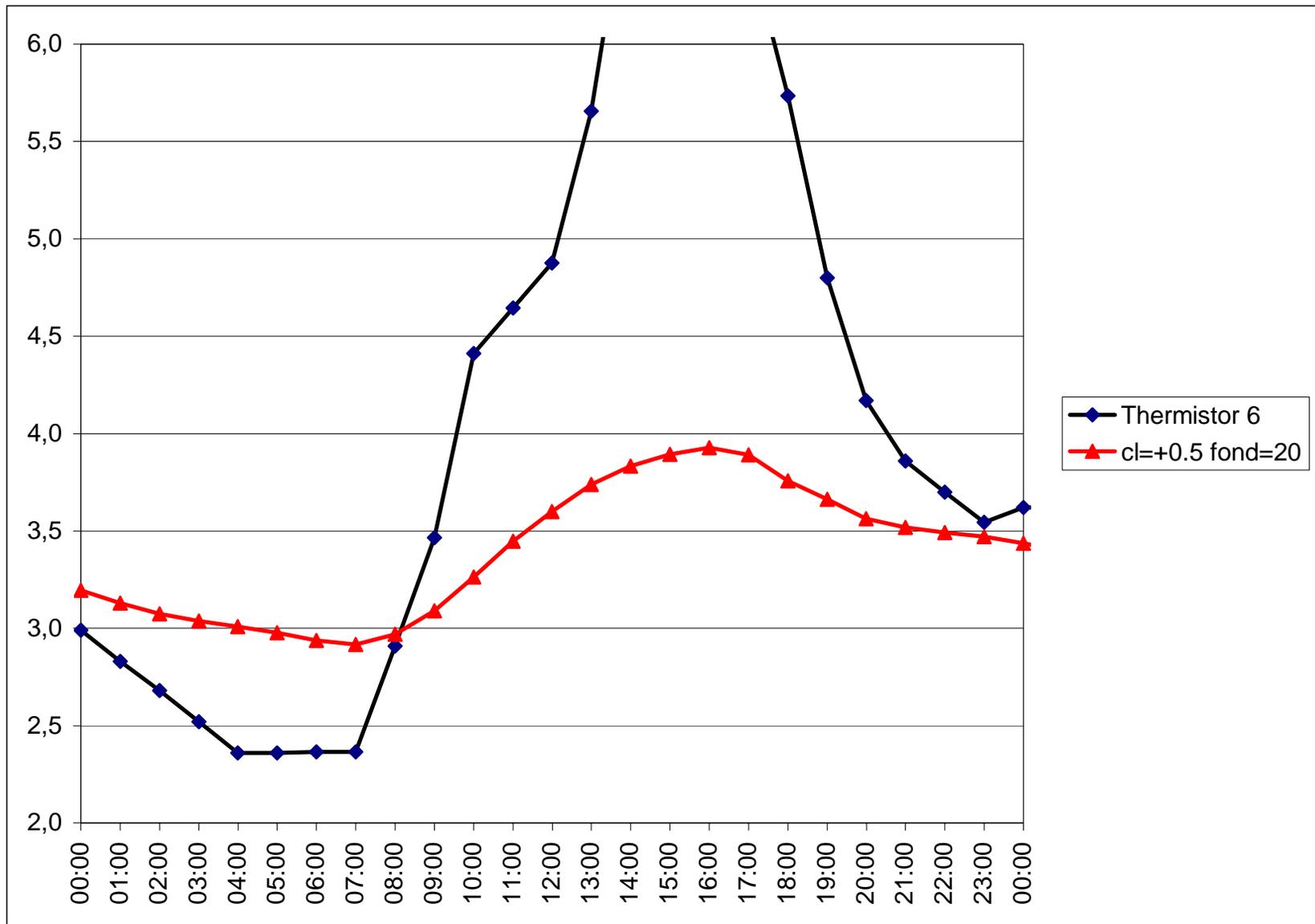


Figure 36 : Journée du 5 avril 1999 – Signal au thermistor 6.

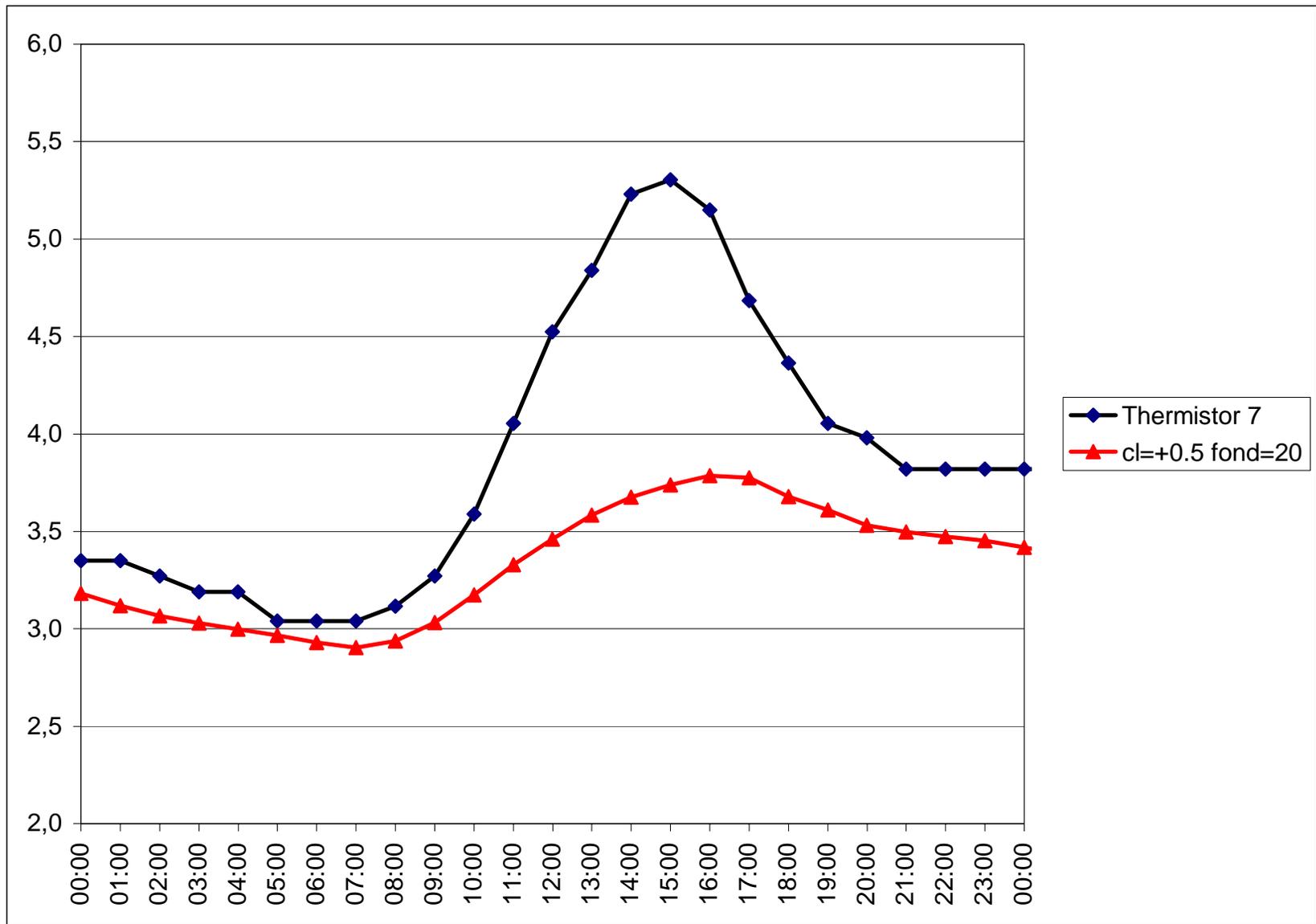


Figure 37 : Journée du 5 avril 1999 - Signal au thermistor 7.

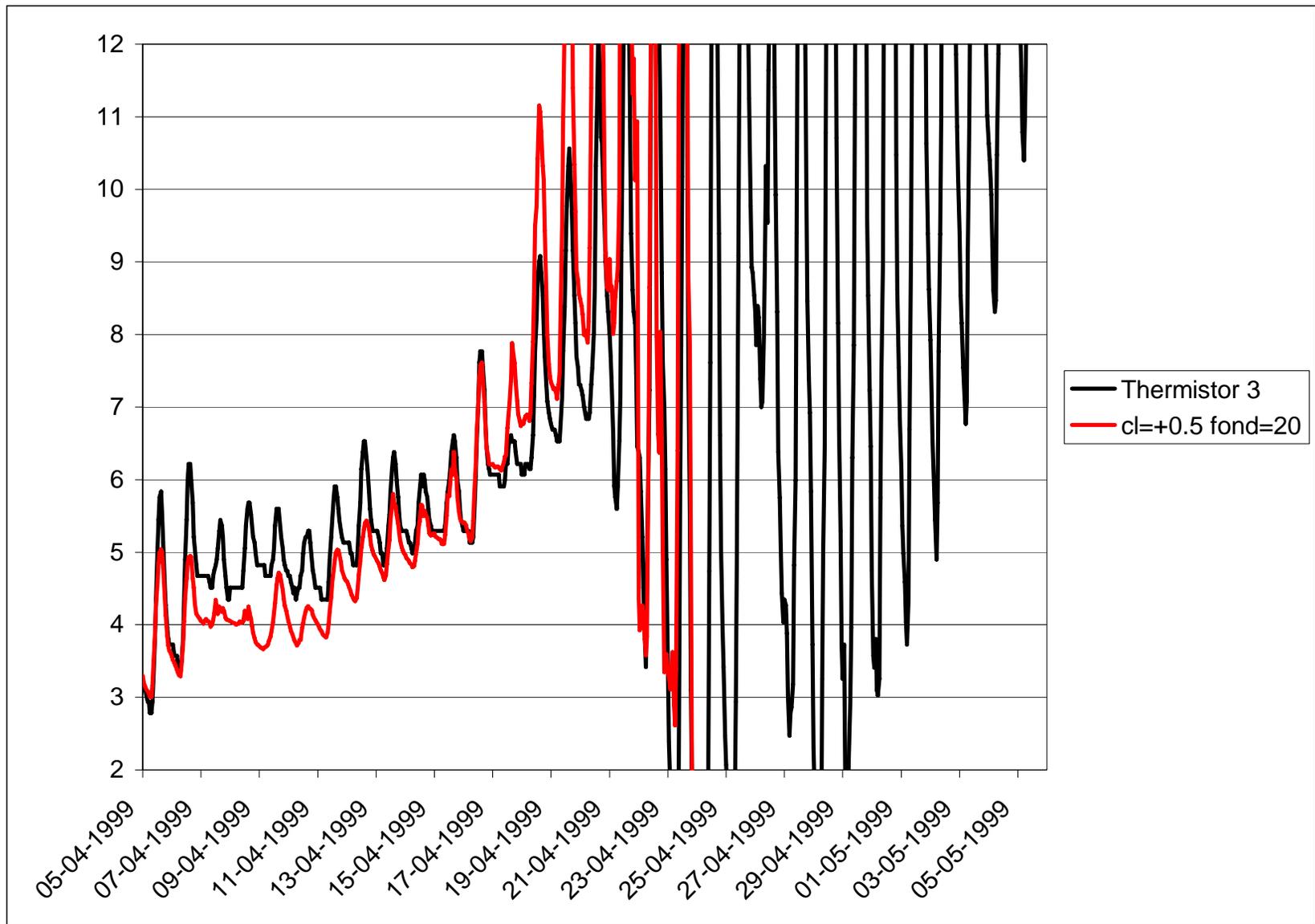


Figure 38 : Signal au thermistor 3 en moyenne horaire.

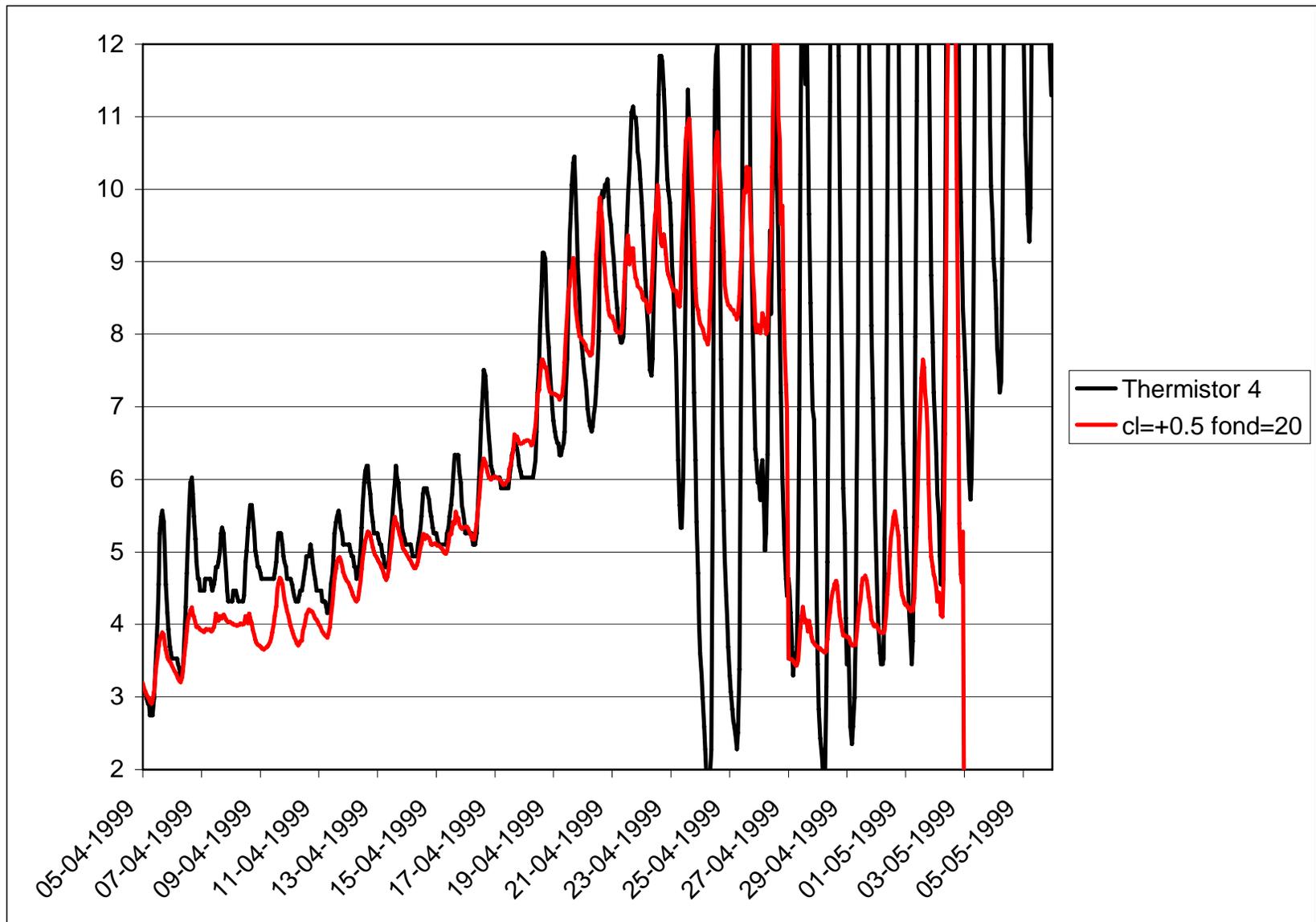


Figure 39: Signal au thermistor 4 en moyenne horaire.

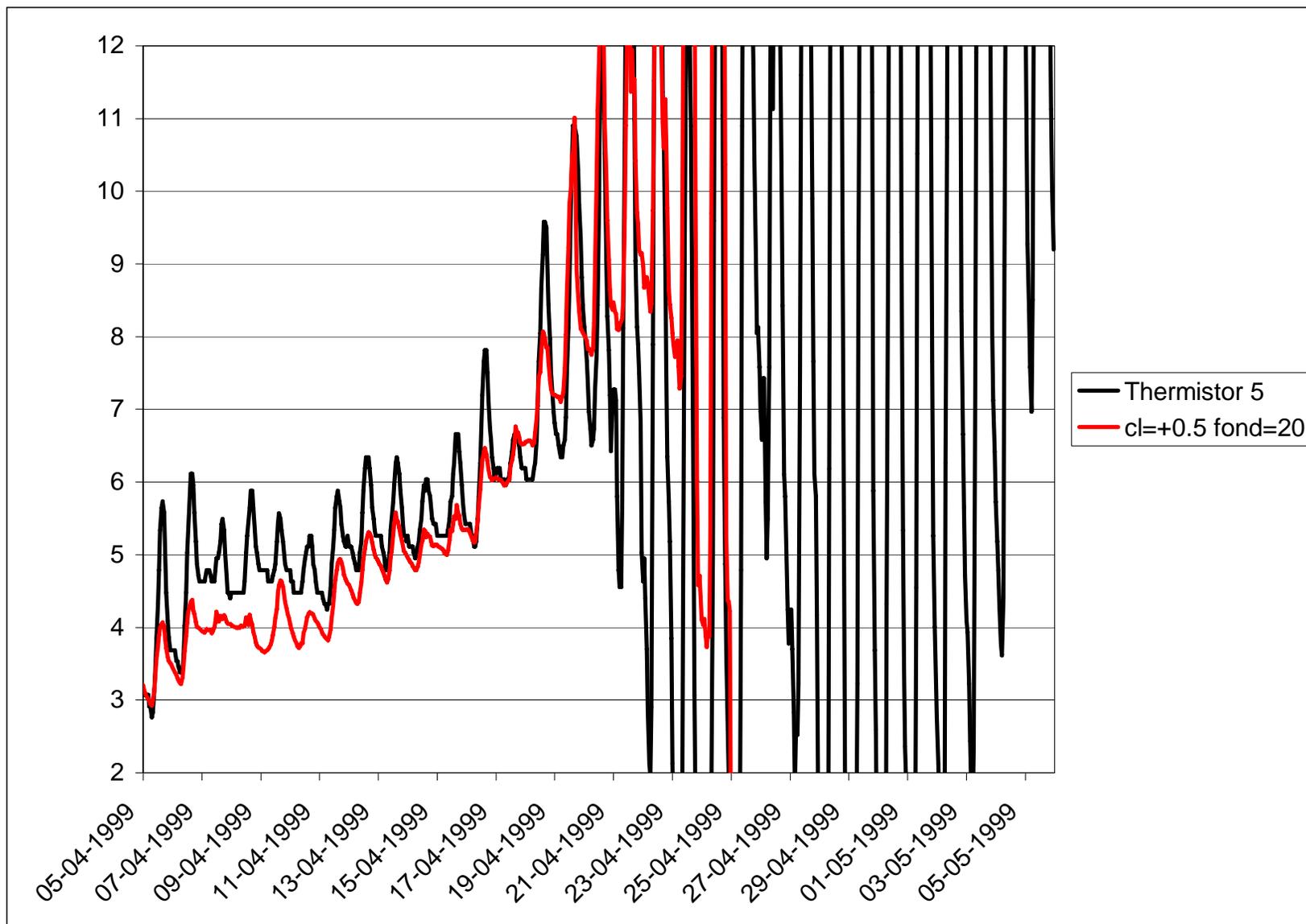


Figure 40 : Signal au thermistor 5 en moyenne horaire.

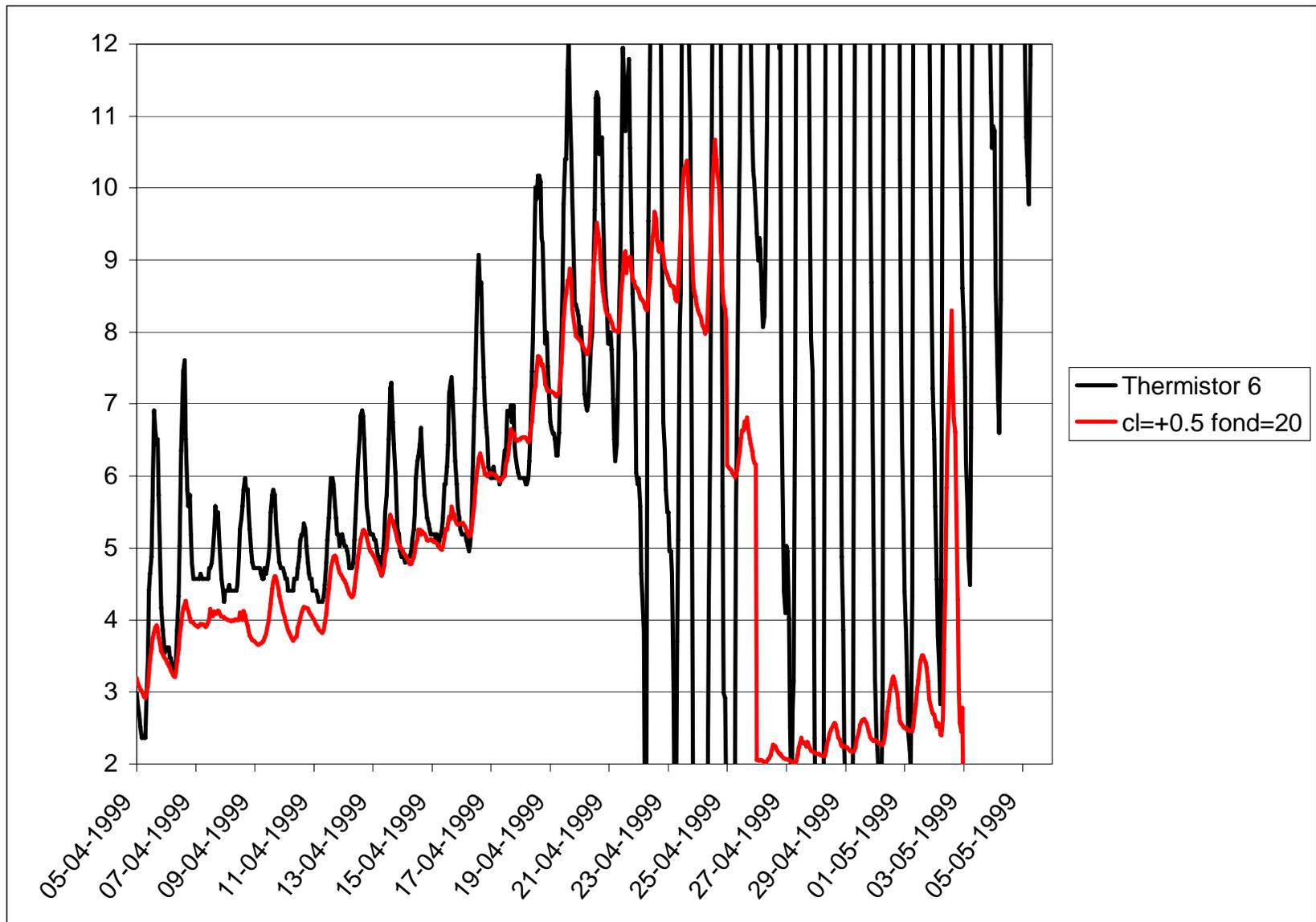


Figure 41 : Signal au thermistor 6 en moyenne horaire.

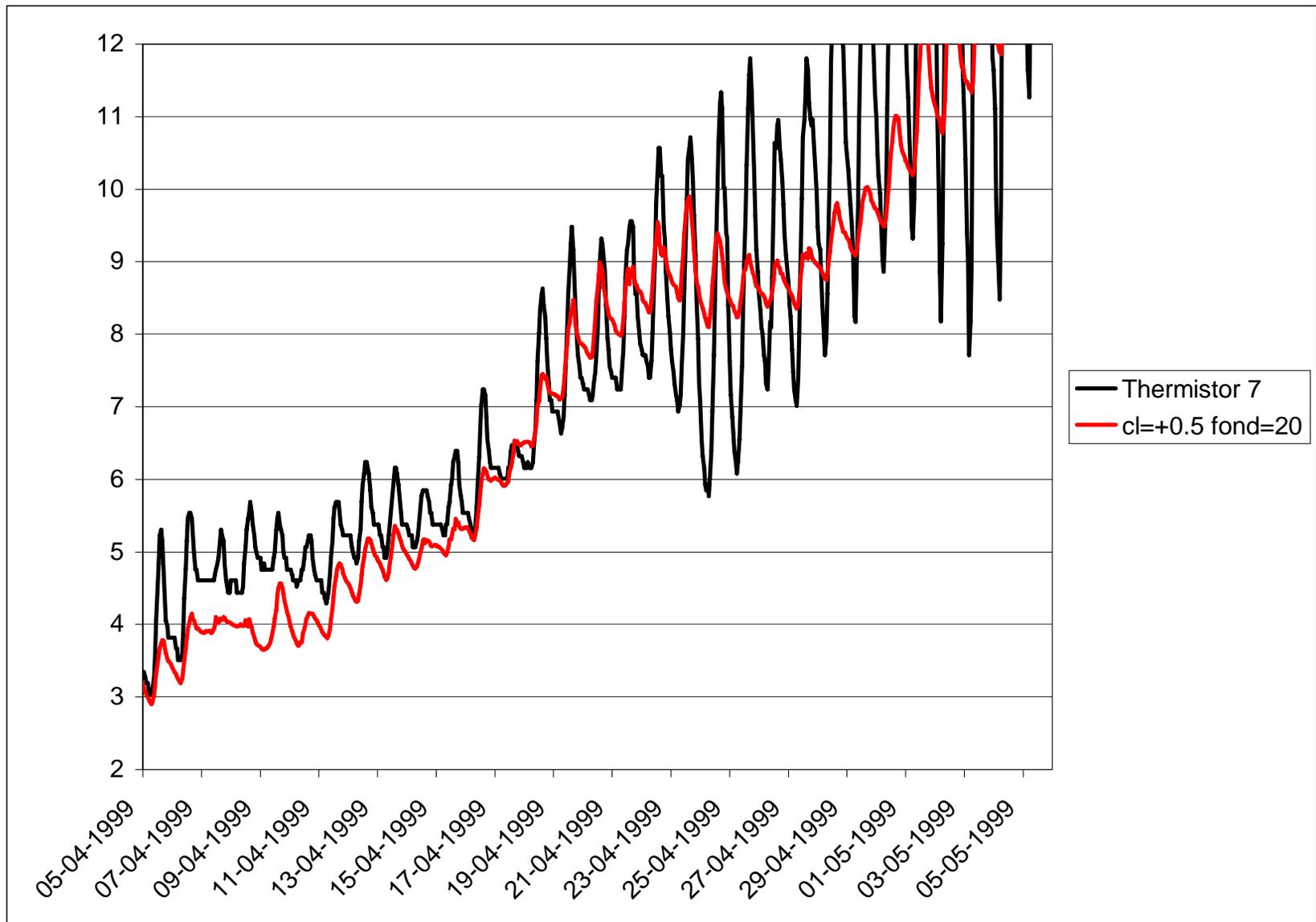


Figure 42 : Signal au thermistor 7 en moyenne horaire.