

Rapport Technique RT-124

**Modélisation 2D de la température
de l'eau aux îles de Boucherville
durant le printemps 2002**

Jean Morin, Yves Secretan, Olivier
Champoux et Alain Armellin 2003

Pour fins de citation :

Morin, J., Y. Secretan, O. Champoux et A. Armellin 2003. Modélisation 2D de la température de l'eau aux îles de Boucherville durant le printemps 2002. Rapport technique RT-124, Service Météorologique du Canada, Environnement Canada, Sainte-Foy. 64p.

Table de matières

Table de matières.....	3
Liste des figures.....	4
Liste des tableaux.....	6
Introduction.....	9
Méthodologie.....	11
Modèles mathématiques.....	13
Modèle hydrodynamique.....	13
Modèle de température.....	13
Modèle mathématique.....	14
Implémentation numérique.....	15
Données environnementales.....	17
Données météorologiques.....	17
Données hydrodynamiques.....	17
Données de température de l'eau.....	18
Modèle Numérique de Terrain et Hydrodynamique.....	19
Maillage.....	19
Données de terrain.....	19
Topométrie.....	19
Substrat.....	19
Plantes émergentes.....	19
Hydrodynamique.....	20
Résultats de simulation de température.....	21
Conclusion.....	25
Bibliographie :.....	26

Liste des figures

Figure 1: Localisation des thermistors aux îles de Boucherville.....	28
Figure 2 : Équation des ondes longues (forme conservative) en régime permanent résolues par HYDROSIM (Équations de Saint-Venant).....	29
Figure 3: Variations des niveaux mesurés aux station de Frontenac et de Varennes, ainsi que les fluctuations des niveaux simulés aux thermistors.....	30
Figure 4: Variations du débit journalier des trois points d'entrée du modèle hydrodynamique, Lasalle et canal de la rive sud , Rivières des Milles-îles et des Prairies (MIP) et rivière Assomption.....	31
Figure 5 : Signal au thermistor M-199, entre le 13 avril 2002 et le 27 avril 2002 utilisé comme conditions aux limites à l'amont du modèle. La ligne rouge représente les valeurs de température simulées à la bouée M199 par le modèle de température.....	32
Figure 6 : Maillage éléments finis global et position des thermistors.....	33
Figure 7 : Détail - Maillage éléments finis et position des thermistors.....	34
Figure 8: Topographie du tronçon tel qu'assemblée sur le maillage éléments finis.....	35
Figure 9: Détail de la topographie tel qu'assemblée sur le maillage éléments finis dans le secteur des thermistors (points rouges).....	36
Figure 10: Distribution des assemblages de plantes émergentes des Îles de Bouchervilles, provenant de Martin Jean et Guy Létourneau (CSL).....	37
Figure 11: Coefficients de frottement de Manning utilisés dans le calcul hydrodynamique.....	38
Figure 12: Détail des coefficients de frottement de Manning utilisés ainsi que la position des thermistors.....	39
Figure 13: Module de la vitesse du tronçon (6 avril 2002).....	40
Figure 14: Détail sur le secteur à l'étude du module de la vitesse et vecteur vitesse pour le 6 avril 2002.....	41
Figure 15: Vue détaillée du module de la vitesse et vecteur vitesse près des thermistors (6 avril 2002).....	42
Figure 16: Profondeur d'eau simulée (6 avril 2002).....	43
Figure 17: Vue détaillée de la profondeur simulée pour le secteur à l'étude (6 avril 2002).....	44
Figure 18: Niveau simulé secteur des Îles de Boucherville (6 avril 2002).....	45
Figure 19: Niveau simulé près des thermistor et position des thermistors (6 avril 2002).....	46
Figure 20 : Champ de température du 06-05-2002 06 :00.....	47
Figure 21 : Champ de température du 06-05-2002 06:00 – Détail.....	48
Figure 22 : Champ de température du 06-05-2002 17:00.....	49
Figure 23 : Champ de température du 06-05-2002 17:00 – Détail.....	50
Figure 24 : Signal de température du 06-05-2002 au thermistor TS1.....	51
Figure 25 : Signal au thermistor TS1.....	52
Figure 26 : Signal au thermistor T1.....	53
Figure 27 : Signal au thermistor TS2.....	54
Figure 28 : Signal au thermistor T2.....	55
Figure 29 : Comparaison Mesure/Simulation - TS1 minimums.....	56
Figure 30 : Comparaison Mesure/Simulation - TS1 maximums.....	57

Figure 31 : Comparaison Mesure/Simulation - T1 minimums..... 58
Figure 32 : Comparaison Mesure/Simulation - T1 maximums. 59
Figure 33 : Comparaison Mesure/Simulation – TS2 minimums..... 60
Figure 34 : Comparaison Mesure/Simulation – TS2 maximums. 61
Figure 35 : Comparaison Mesure/Simulation – T2 minimums. 62
Figure 36 : Comparaison Mesure/Simulation – T2 maximums. 63
Figure 37 : Différence entre les signaux au thermistor TS1 et au thermistor M199 (signal d'entrée)..... 64

Liste des tableaux

Tableau 1: Propriétés globales.....	15
Tableau 2: Propriétés nodales.....	15
Tableau 3: Position (UTM, zone 8, NAD83) des thermistors.....	18
Tableau 4 : Coefficient de détermination de la droite de régression linéaire	22
Tableau 5 : Ordonnée à l'origine de la droite de régression linéaire	22

ÉQUIPE DE RECHERCHE

Planification, conception et rédaction :

Jean Morin¹
Yves Secretan²
Olivier Champoux¹

Révision :

André Bouchard¹

Production des données topométriques :

Patrice Fortin¹
Guy Morin¹

**Production et assemblage des
données météorologiques :**

Adrien Julien⁴

Mesures de température à la batture Thailhandier :
Alain Armellin³

Michel Arseneau³

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 et sa concordance avec les fluctuations de niveau, contrôle la période de frai et le succès reproducteur de plusieurs espèces de poisson du fleuve se reproduisant tôt au printemps. Afin de pouvoir déterminer l'influence du contrôle des débits et des niveaux sur la température de l'eau en milieux peu profonds, il est essentiel de mettre en place un modèle spatialisé, prédictif de la température de l'eau. Dans cette optique, les travaux de modélisation de la température de l'eau aux battures Thaïlandier du printemps 1999 (Morin et al. 2002) avaient permis de monter l'efficacité et le potentiel de la modélisation 2D de la température en zones peu profondes.

Dans cette même étude, les problèmes de positionnement des thermistors et leur faible représentativité de la variation spatiale de la température ont forcé la production d'une calibration-validation plus avancée afin de s'assurer de la justesse des prédictions du modèle. Les variations verticales des températures avaient également été questionnées. Le nouvel échantillonnage effectué au printemps 2002, contient 4 sites différents aux îles de Boucherville (Figure 1) avec 4 thermistors à chaque site placés à différentes hauteurs dans la colonne d'eau. Afin de corriger les problèmes de conditions limites en température, un thermistor a été placé à l'amont du domaine de simulation dans le chenal principal.

Contexte scientifique

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) = $4 + 1,29^{19 - t(\text{température en } ^\circ\text{C})}$ 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 vesiculés 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 nous 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 de valider et d'appliquer le modèle de température développé par l'INRS-ETE en collaboration avec le Service Météorologique du Canada aux îles de Boucherville (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 (Figure 1).

La période de modélisation choisie correspond à la période de frai du Grand Brochet pour le printemps 2002. Les échantillonnages d'œufs, de larves et de juvénile effectués durant cette période vont permettre dans une prochaine étape de mettre en place un modèle de croissance des jeunes stades de vie du Grand brochet en combinant les données spatialisées de température et d'habitat de frai.

L'objectif principal de cette étude est de calibrer et de valider le modèle de température de l'eau dans le secteur des îles de Boucherville, qui permettrait de reproduire les températures mesurées durant la période de frai du Grand brochet au printemps 2002. 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 (52 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 05-04-2002 au 27-05-2002 en pas horaire (52 jours * 24 simulations horaires= 1248 simulations) à partir des données météorologiques horaires et des simulations hydrodynamiques journalières;
4. utiliser le signal de température et le comparer aux données horaires mesurées par les thermistors sur le terrain. Généralement 4 thermistors ont été posés à chacun des sites, à des hauteurs différentes au dessus du fond (0 cm, 10 cm 60 cm et 110 cm).

Remarques :

- Pour la période considérée, l'hydrodynamique ne varie que lentement et peut être considérée comme une succession d'états stationnaires calculées pour chaque jour, et d'interpolées 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 découvrément 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 précipitation 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 des 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'atmosphère, 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 , ρ 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'hydrodynamiques 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 et la vitesse sont mises à zéro et fonction d'extinction 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 simulation non-stationnaires. Ainsi, le maximum de données physiques ont été transférées comme propriété globales.

Tableau 1: Propriétés globales

Diffusivités	Propriétés de l'eau	Propriétés de la glace	Donnée météorologique	Données de terrain	Coefficients de régression
$D_M, \beta_V, \beta_H, \beta_L$	ρ, c_p	ρ_i, c_{pi}, L_i	P_{atm}	T_b	A_l, B_l

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

- la dispersion moléculaire D_M ;
- les coefficients de pondération de dispersion β_V, β_H et β_L ;
- les propriétés de l'eau ρ et c_p ;
- les propriétés de la glace ρ_i, c_{pi} et L_i ;
- la pression atmosphériques P_{atm} ;
- la température souterraine T_b ;
- les coefficients de régression A_l et B_l .

Tableau 2: Propriétés nodales

Données de terrain	Données hydrodynamiques	Données météorologiques
K_b, SF, r	u, v, H, D_H, D_V	$H_{si}, T_a, \epsilon_a, RH, f(W_z), p_r$ 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 composée :

- des composantes de la vitesse u et v ;
- de la profondeur H ;
- des coefficient 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 ϵ_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 05-04-2003 au 27-05-2003.

Pour chacune des variables mesurées, la station la plus près du domaine de simulation a été utilisée. Ces variables sont ici jugées 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-calibration 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 Milles-Iles, des Prairies et Assomption, ont été utilisés pour 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 05-04-2002 au 27-05-2002. 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 de l'eau servant de conditions limites amont proviennent de la masse d'eau centrale du Saint-Laurent (bouée M-199). Les données pour cette station débute le matin du 12 avril 2002, pour cette raison les données de température présentées dans ce rapport commence le 13 avril 2002. Nous avons tenté de reconstituer les données de température pour la période manquante entre le 5 et le 12 avril 2002 en pas horaire à partir de mesure de température au lac Saint-Louis. Cependant, les résultats comportaient beaucoup d'erreur surtout durant la nuit et causaient des problèmes majeurs dans le calcul des température aux thermistor. Cette portion de la série temporelle a donc été enlevée de l'analyse des résultats. Elle pourra toujours être régénérée si des données de température amont fiables sont trouvées, par exemple à la Ville de Montréal. La Figure 5 présente l'évolution du signal de température à la bouée M-199 pour la période à l'étude.

La température de l'eau dans le secteur des îles de Boucherville a été mesurée à cinq sites contenant chacun plusieurs thermistors placés près du fond (0 cm) et dans la colonne d'eau (10, 60, 110 cm). La cote d'installation de chacun des thermistors a été relevée sur le modèle numérique de terrain à partir des positions dGPS relevé sur le terrain (Tableau 3).

Tableau 3: Position (UTM, zone 8, NAD83) des thermistors.

	Coordonnées UTM zone8 NAD83		Estimation de la cote d'élévation NMM (m)
Thermistor TS1	618027	5051001	5.49
Thermistor T1	618265	5051680	5.51
Thermistor TS2	618856	5053258	5.31
Thermistor T2	619280	5055103	5.49
Thermistor T3	618748	5053589	5.92
Thermistor M-199	613852	5041333	bouée

Le signal des thermistors, lorsqu'ils 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. Cette méthode a permis de déterminer que le modèle de terrain provenant des sondages bathymétrique du Service Hydrographique du Canada (SHC) contient des erreurs de niveau de base de près de 30 cm.

Modèle Numérique de Terrain et Hydrodynamique

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 48 434 nœuds et 23 434 éléments, sur une grille non structurée et adaptée aux divers besoins de précision spatiale des simulations (Figure 6). Une attention particulière a été apportée à sa construction, spécialement dans la région des thermistors où la densité du maillage est plus grande (Figure 7). 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 topométrique 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. Les zones situées en dehors des données bathymétriques (sondages) ont été bâties à l'aide des données LIDAR (laser aéroportés). Le portrait global du modèle de terrain complet entre le fond du fleuve et sa plaine inondable sont présentés à la Figure 1. Le modèle de terrain tel que vu par le modèle hydrodynamique, c'est à dire importé sur le maillage hydrodynamique est présenté à la Figure 8 et Figure 9.

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 Thaillandier 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 10). 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 valeurs de Manning est de 0.12. Les frottements utilisés lors des simulations hydrodynamiques sont présentés à la Figure 11 et à la Figure 12.

Des simulations hydrodynamiques ont été produites pour chacun des 52 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 05-04-2002 au 27-05-2002.

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. L'erreur sur les niveaux est inférieur à 5 cm à la station de Frontenac pour les 52 jours de simulation de l'hydrodynamique, l'erreur locale aux îles de Boucherville est environ la moitié plus petite puisque les conditions limites aval ont été fixées près de la station de varennes.

Hydrodynamique

Un total de 52 simulations hydrodynamiques journalières ont été produites pour pouvoir 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 6 avril 2002 sont montrés en détail. Les vitesses sont présentées (Figure 13 à Figure 15), ainsi que les profondeurs (Figure 16 et Figure 17) et les niveaux simulés (Figure 18 et Figure 19).

Résultats de simulation de température

Les simulations de température valables couvrent la période du 13-05-2002 au 27-05-2002, soit 43 jours avec un pas de temps horaire pour un total de 1032 pas de temps. Le signal du thermistor M199 n'est disponible qu'à partir du 13-05-2002. Une tentative de reconstruction d'un signal compatible pour la période du 05-04-2002 au 13-04-2002 à partir de la température mesurée à la station de Lasalle au lac Saint-Louis s'est révélée infructueuse. Une analyse de sensibilité sur certains paramètres du modèle a été effectuée afin de mieux dégager le comportement du modèle.

Nous avons utilisé comme condition limite amont le signal du thermistor M199 (Figure 5) ce qui, à défaut d'autres données, ne permet que d'imposer une valeur constante sur tout le largeur de la section d'entrée. Cette même valeur est imposée aux rivières des Milles-Îles, des Prairies et de l'Assomption, ce qui n'a pas d'impact du la région d'intérêt, ces affluents se situant en aval. En sortie, c'est le modèle qui impose automatiquement une condition de limite de type Neumann, un type de condition limite qui laisse la température s'établir librement.

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 par endroit surtout dans les zones peu profondes de la bathymétrie mesurée par le SHC. Le projet actuel a permis de découvrir une erreur systématique de près de 30cm dans les mesures du secteur. Or, le modèle de température montre la plus grande sensibilité dans les zones très peu profondes et à faible courant. Par contre, la position des thermistors est connue avec une bonne précision. De plus, en chaque point on a des mesures sur la verticale qui permettent de s'assurer de la représentativité des mesures sur la colonne d'eau.

Les simulations globale couvrent donc la période du 13-04-2002 au 27-05-2002 en pas horaire. Le calcul est chaque fois initialisé par une simulation stationnaire pour avoir une carte de base de température. En résultat, nous obtenons donc la variation de température pour tout le domaine pour toute la période de simulation. De ces données, on extrait ensuite le signal de température à la position de chaque thermistor afin de les comparer avec les mesures disponibles.

L'analyse des résultats se fait sur plusieurs niveaux, par étude :

- des cartes de température;
- du signal complet au droit des thermistors;
- de statistiques sur le signal;
- de l'écart entre le signal d'un thermistor avec le signal d'entrée.

Les cartes de températures ne peuvent être étudiées pour chaque pas de temps. Nous retenons ici deux figures contrastées qui correspondent respectivement au minimum (Figure 20 et Figure 21) et au maximum (Figure 22 et Figure 23) pour la journée du 06-05-2002. Le minimum est à 06:00h avant que la radiation solaire ne commence à réchauffer le système; de même le maximum est en fin d'après-midi à 17 :00h (Figure 24). Les plus fortes variations sont dans les

petits chenaux peu profond et protégés. Ces cartes font bien ressortir la complexité morphologique et l'intérêt d'une modélisation 2D.

Si l'on s'intéresse au signal global, on note le bon comportement général du signal (Figure 5, Figure 24 à Figure 28) à part pour le thermistor T3 qui n'est pas représenté ici. Celui-ci est localisé sur un petit chenal qui devrait être en eau mais qui à cause des erreurs du modèle de terrain n'est pas alimenté par l'amont. La réponse en température ne correspond dès lors plus du tout à ce qui est mesuré.

Les signaux sont en phase, les amplitudes sont globalement bien représentées. Il est intéressant de noter que pour une même position les thermistors placés à différentes profondeurs présentent peu de différences, à part celui posé sur le fond ($H=0\text{cm}$)(Figure 27), sauf lorsqu'ils sont exondés (Figure 26, $H=110\text{cm}$).

Dans un second temps, nous analysons de manière statistique le signal en nous basant sur les minimums et maximums journaliers. Pour les thermistors nous prenons la moyenne des mesures en un point en éliminant le signal au sol pour ensuite filtrer les minimums et maximums. On porte en abscisse la mesure et en ordonnée la simulation avec un point pour chaque jour de simulation : Figure 29, Figure 33 et Figure 35 pour les minimums et Figure 30, Figure 32, Figure 34 et Figure 36 pour les maximums. La simulation de référence est notée « Diff. Long : $1e4$ » pour un coefficient de diffusivité longitudinal de 10^4 . Une simulation faite avec un coefficient de 5×10^3 ne montre que peu de différence. De même deux autres résultats obtenus en bougeant la position des thermistors ne permet pas d'améliorer la régression.

La corrélation entre mesures et simulation est généralement bonne, meilleure pour les minimums que pour les maximums (Tableau 4). On note de même que l'ordonnée à l'origine (Tableau 5) est toujours positive, ce qui montre que la simulation a en moyenne des valeurs plus élevées que la mesure.

Tableau 4 : Coefficient de détermination de la droite de régression linéaire

Thermistor	min	max
TS1	0,94	0,90
T1	0,86	0,79
TS2	0,81	0,82
T2	0,97	0,95

Tableau 5 : Ordonnée à l'origine de la droite de régression linéaire

Thermistor	min	max
TS1	0,42	0,19
T1	1,20	0,24
TS2	1,71	0,11
T2	0,71	0,10

Finally, Figure 28 represents the difference of simulated signals between the position TS1 and M199 which serves as a condition at the limits on the upstream limit. We subtract from TS1 the signal of base which corresponds to the transport part in order to retain only the dispersion components due to the flow and the aspect of temperature modeling. Daily temperature variations are important, reaching 2 degrees and showing well the dynamics brought by the temperature model. The TS1 signal is, with few exceptions, warmer than the base signal.

Conclusion

L'exercice de modélisation de la température du fleuve Saint-Laurent dans la région des îles de Boucherville pour la période du 13-04-2002 au 27-05-2002 montre bien la capacité des modèles à reproduire la gamme des températures observées. Les résultats obtenus se comparent très bien aux données mesurées avec des erreurs maximum d'environ 1 degré. Il ressort de l'analyse que la sensibilité du modèle de température est relativement grande 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. Les températures mesurées sont précises et permettent une bonne validation du modèle de température. Il est intéressant de noter que cette validation est simple puisqu'il s'agit de simple comparaison de valeur très similaire. De meilleures informations sur la répartition de température en amont seraient souhaitables pour pouvoir imposer une condition limite plus précise.

Pour obtenir des résultats de qualité, il faut contrôler les incertitudes, et principalement :

- avoir un modèle de terrain précis, 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.

Il apparaît que le modèle de température peut être utilisé 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. Dans le cadre de la régularisation des débits du Saint-Laurent le modèle de température 2D validé aux îles de Boucherville apparaît être l'outil idéal pour déterminer les impacts de la gestion des niveaux et des débits sur la température de l'eau.

Bibliographie :

- [1] Amyot, J.P., C. Hudon 2002 Mesure de température à la batture Thaïlandier. Rapport scientifique et technique Centre Saint-Laurent. Manuscrit non-déposé.
- [2] 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
- [3] Bry, C., Hollebecq, M.G., Ginot, V., G. Israel et Manelphe, J. (1991) Growth patterns of pike (*Esox lucius* L.) larvae and juveniles in small ponds under various natural temperature regimes. *Aquaculture* 97 : 155-168
- [4] Casselman, J. M. (1978) Effects of environmental factors on Growth, survival, activity, and rexploitation of Northern Pike. *Am. Fish. Soc. Spec. Publ.* 11 :114-128
- [5] Fortin, R., Dumont, P., Fournier, H., Cadieux, C. et Villeneuve, D. (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
- [6] Hassler, T. J. (1982) Effects of temperature on survival of Northern pike embryos and yolk-sac larva. *Prog. Fish-Cult.* 44(4) : 174-178.
- [7] Heniche, M. Y. Secretan, P. Boudreau et M. Leclerc. 1999 A new 2-D finite element drying-wetting model for rivers and estuaries. *Advances in water resources*.
- [8] Heniche, M., Y. Secretan, J. Morin, J.F. Cantin, et M. Leclerc 2002 Twodimensional depth averaged fluvial thermal regime prediction. Accepté avec corrections par le Journal of Hydraulic Engineering.
- [9] Hokanson, K. E. F., McCornick, J. H. et Jones, B. R. (1973) Temperature requirements for embryos and larvae of Northern Pike, *Esox lucius* (Linnaeus). *Trans. Amer. Sci. Soc.* 102(1) : 89- 100
- [10] Koonce, J. K., Bagenal, T. B., Carline, R. F., Hokanson, K. E. F. et Nagiec, M. (1977) Factors influencing year-class strength of Percids : A summary and a Model of temperature effects. *J. Fish. Res. Board Can.* 34 : 1900-1909.
- [11] Massé, G., Fortin, R., Dumont, P. et Ferraris, J. (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
- [12] Morin, J., Y. Secretan, O. Champoux et A. Armellin 2002. Modélisation 2D de la température de l'eau sur la batture Thaïlandier. Rapport technique RT-117, Service Météorologique du Canada, Environnement Canada, Sainte-Foy. 71 p.
- [13] Raat, A. J. P. (1988) *Synopsis of biological data on the Northern Pike Esox lucius Linnaeus*, 1758. Food and agriculture organisation, Rome.

- [14] 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 p.
- [15] Smith, K. (1973) River water temperatures - an environmental review. Scottish Geographical Magazine 211- 220
- [16] Wetzel, R. G. (2001) Lymnology, lake and river ecosystems. Academic Press, Third edition. 106 pages.
- [17] Wismer, D. A. et Christie, A. E. (1987) Temperature relationships of Great Lakes Fishes : A data compilation. Great Lakes Fish. Comm. Pub. 87-3, 165 pages.
- [18] Wootton, R. J. (1998) Ecology of Teleost fishes. Second edition. Kluwer Academic Publishers Fish and Fisheries Series 24. 286 pages.

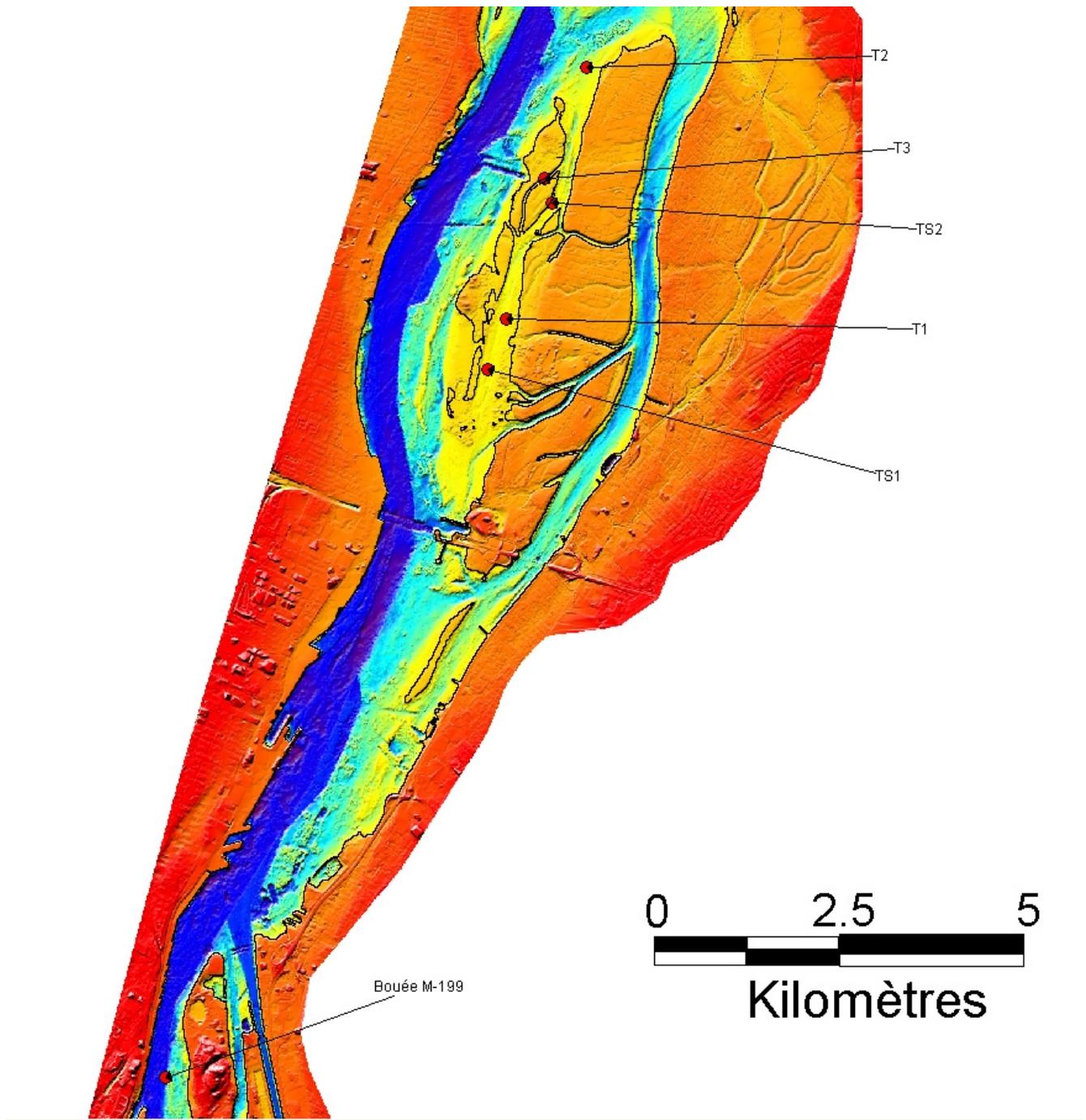


Figure 1: Localisation des thermistors aux îles de Boucherville.

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

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

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

$\mathbf{x}(x,y)$	= 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)	τ_{ij}	= contraintes de Reynolds (kg/s^2m)
h	= hauteur d'eau (niveau)	τ_x^b, τ_y^b	= friction au fond en x et en y (kg/s^2m)
H	= profondeur de la colonne d'eau ($=h-z_f$) (m)	τ_x^s, τ_y^s	= friction en surface en x et en y (kg/s^2m)
c	= célérité des vagues ($c = \sqrt{gH}$) (m/s)		
ρ	= masse spécifique de l'eau ($10^3 kg/m^3$)		
$\mathbf{u}(u,v)$	= 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).

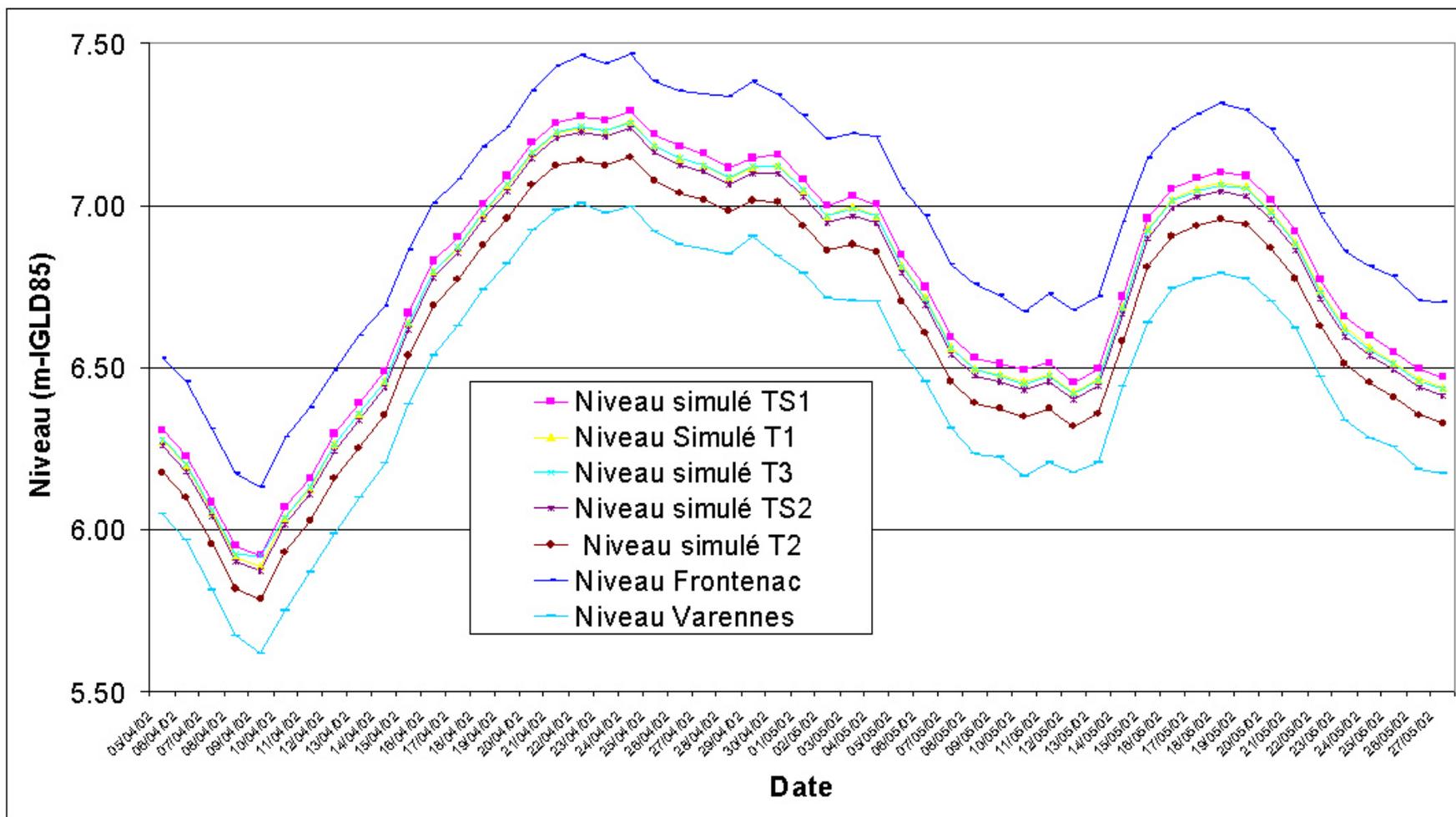


Figure 3: Variations des niveaux mesurés aux station de Frontenac et de Varennes, ainsi que les fluctuations des niveaux simulés aux thermistors.

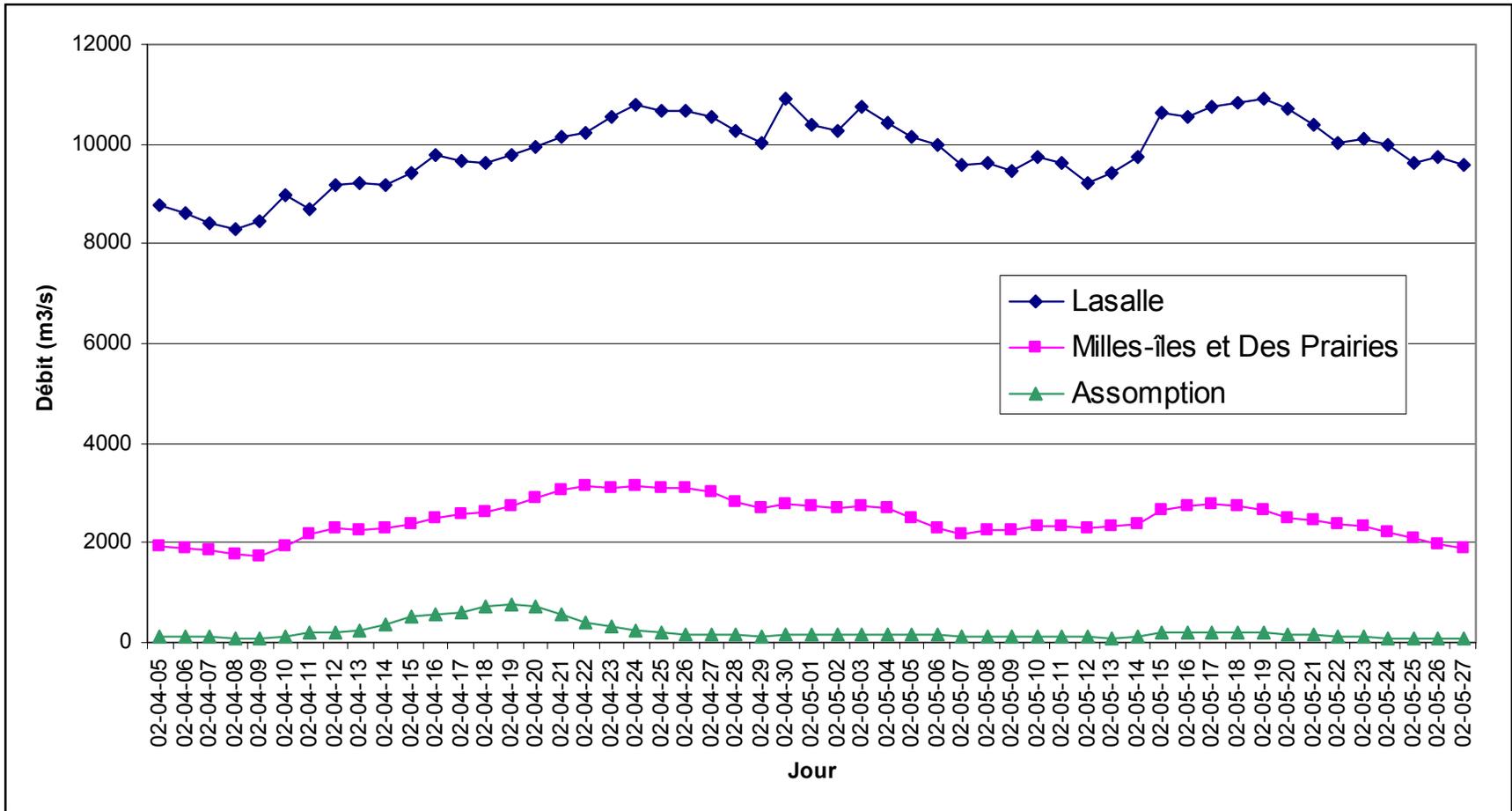


Figure 4: Variations du débit journalier des trois points d'entrée du modèle hydrodynamique, Lasalle et canal de la rive sud , Rivières des Milles-îles et des Prairies (MIP) et rivière Assomption.

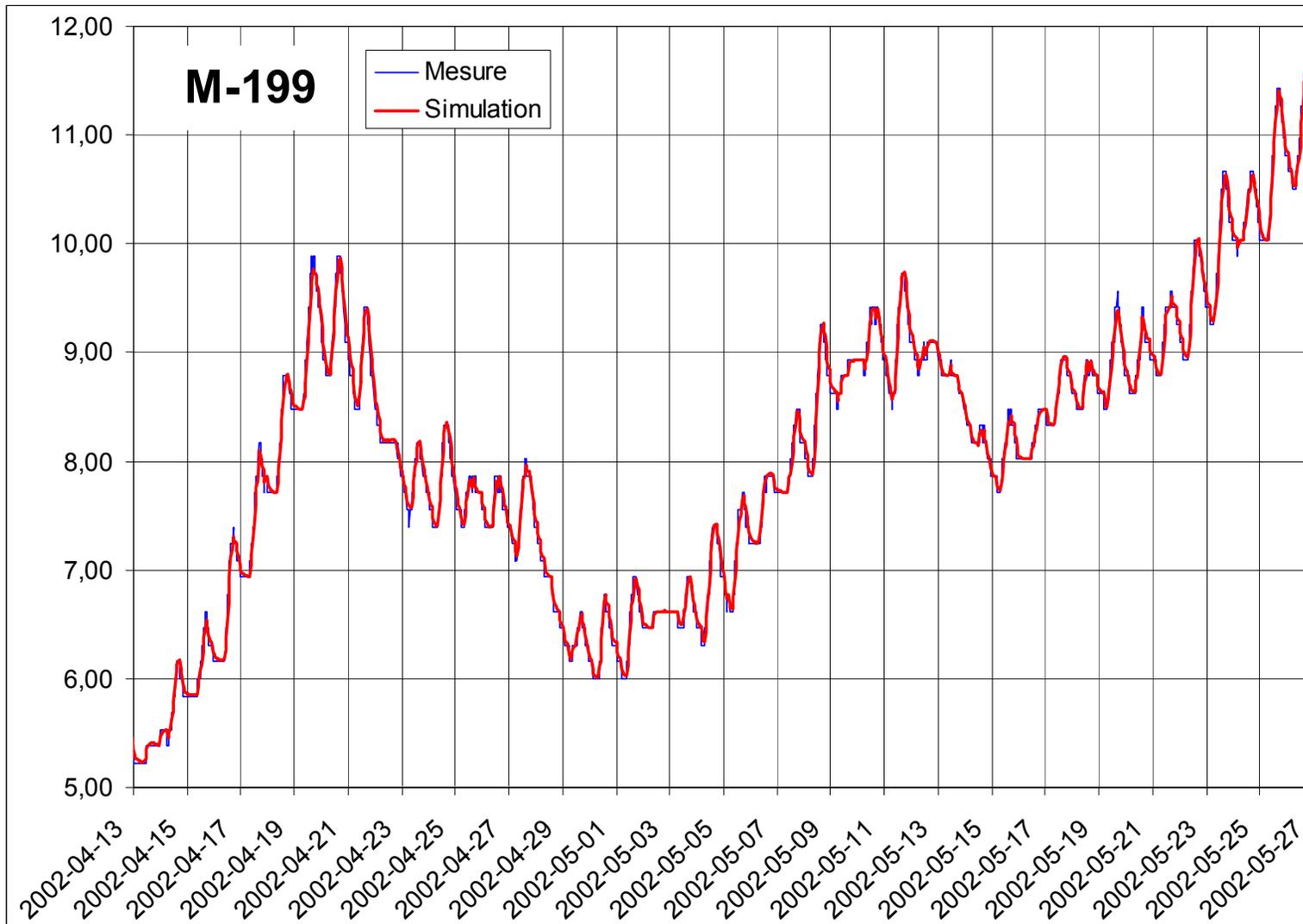


Figure 5 : Signal au thermistor M-199, entre le 13 avril 2002 et le 27 avril 2002 utilisé comme conditions aux limites à l'amont du modèle. La ligne rouge représente les valeurs de température simulées à la bouée M199 par le modèle de température.

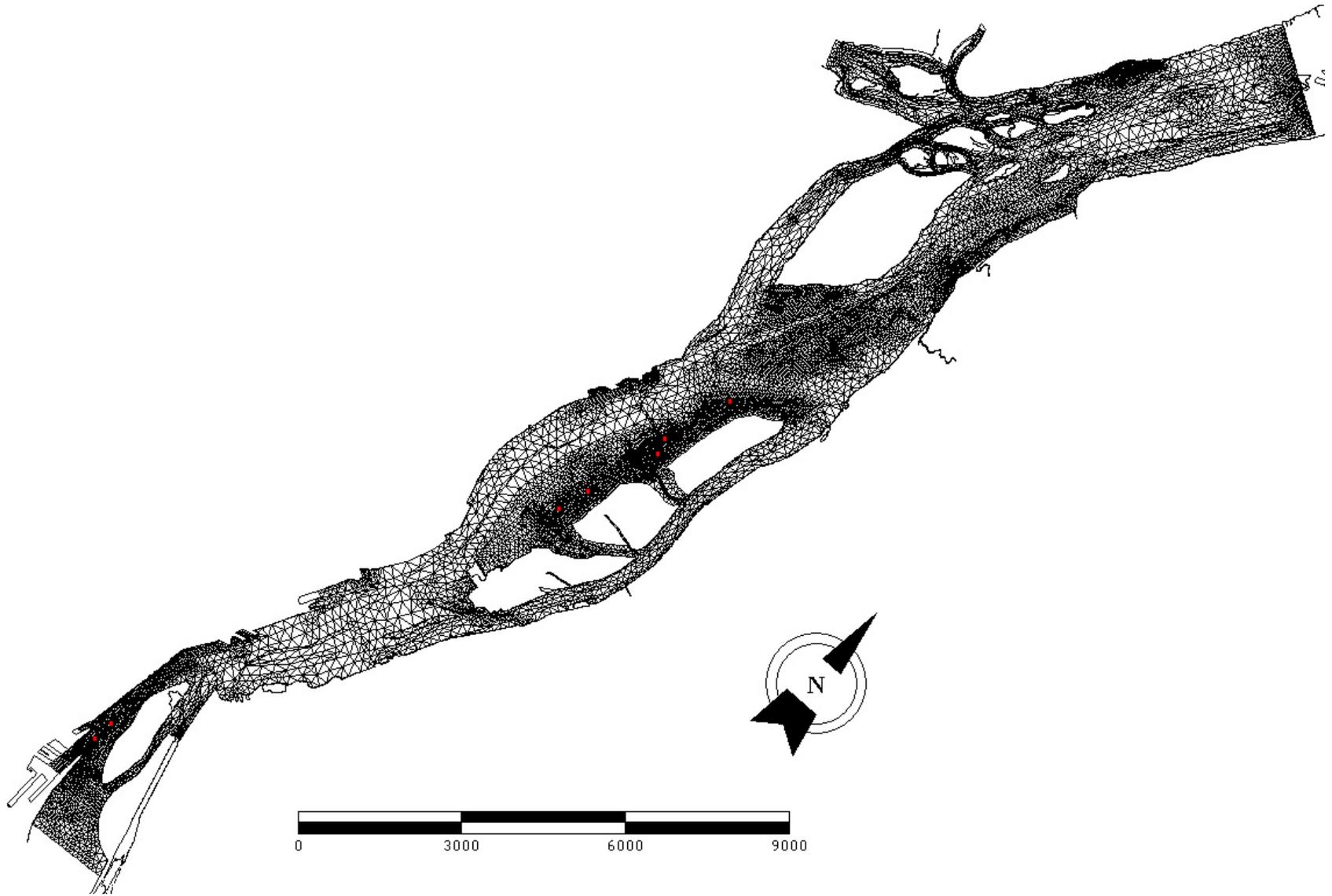


Figure 6 : Maillage éléments finis global et position des thermistors.

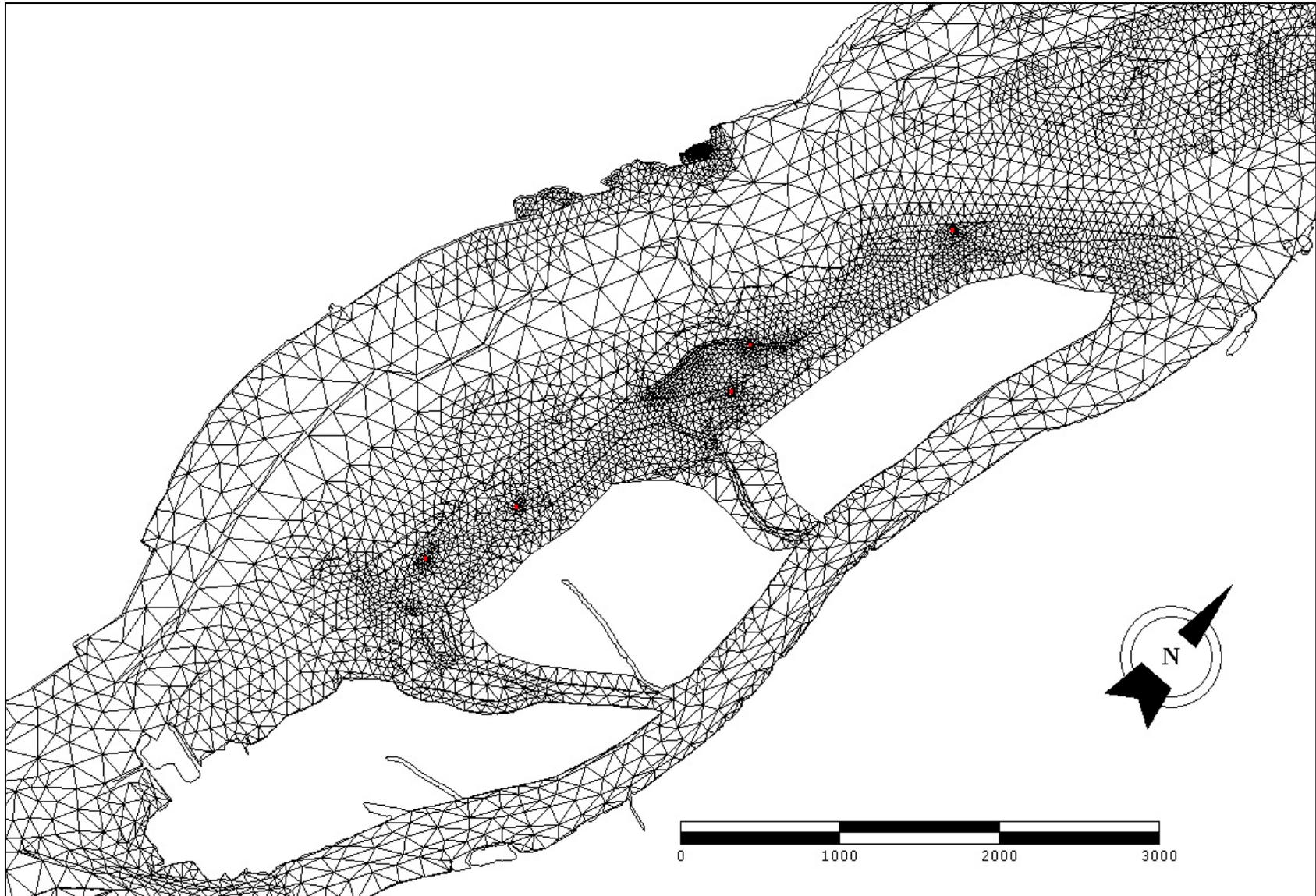


Figure 7 : Détail - Maillage éléments finis et position des thermistors.

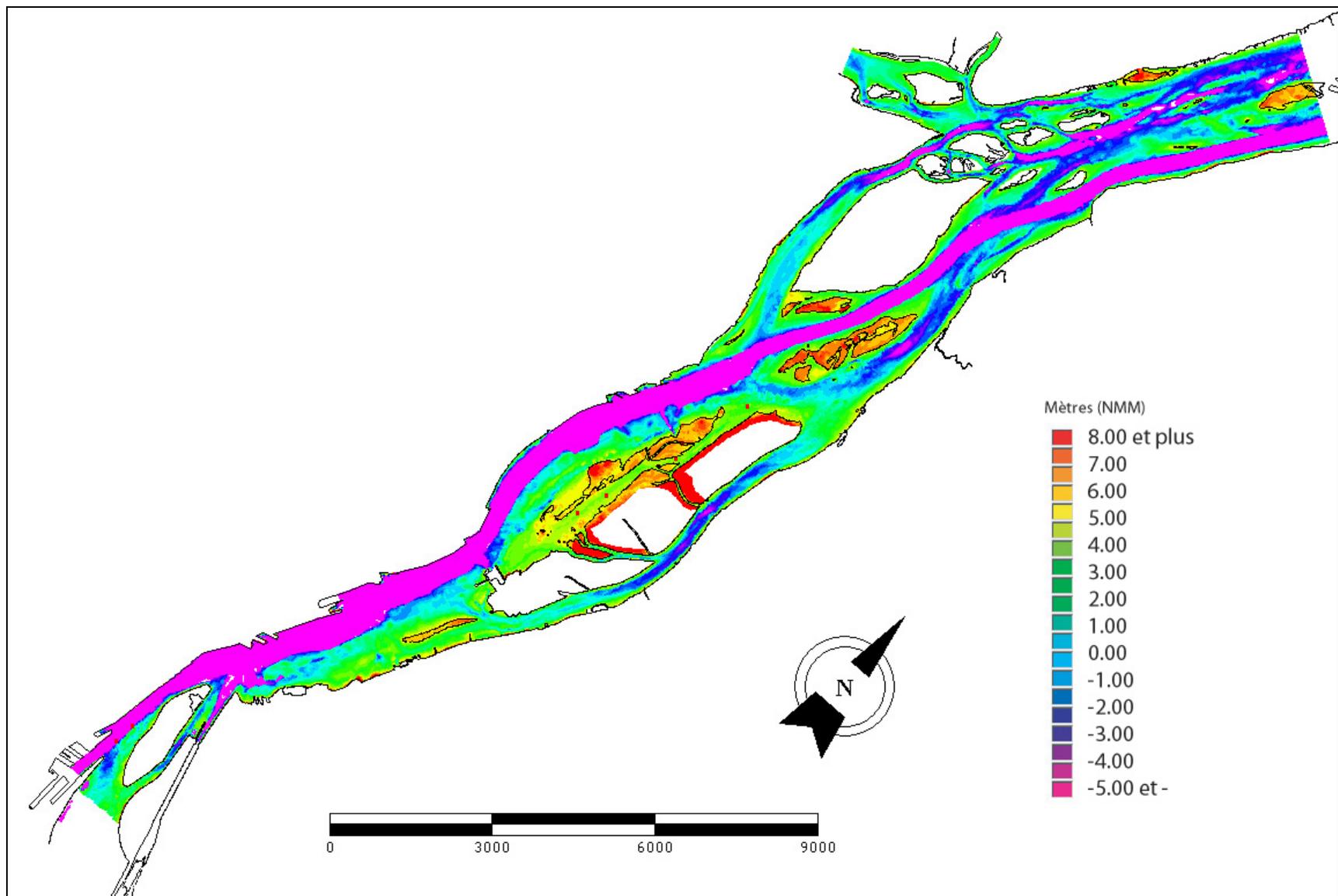


Figure 8: Topographie du tronçon tel qu'assemblée sur le maillage éléments finis.

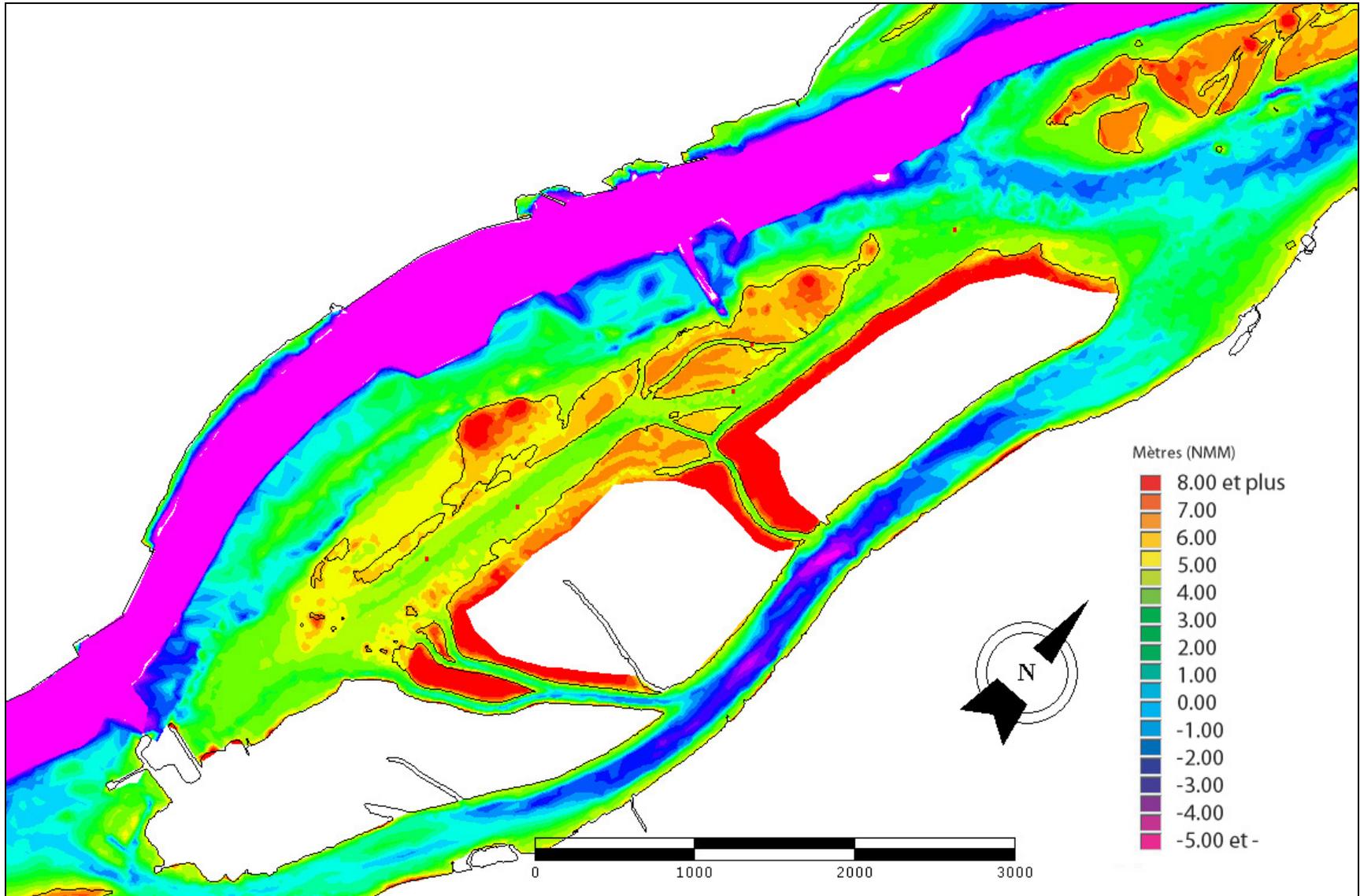


Figure 9: Détail de la topographie tel qu'assemblée sur le maillage éléments finis dans le secteur des thermistors (points rouges).

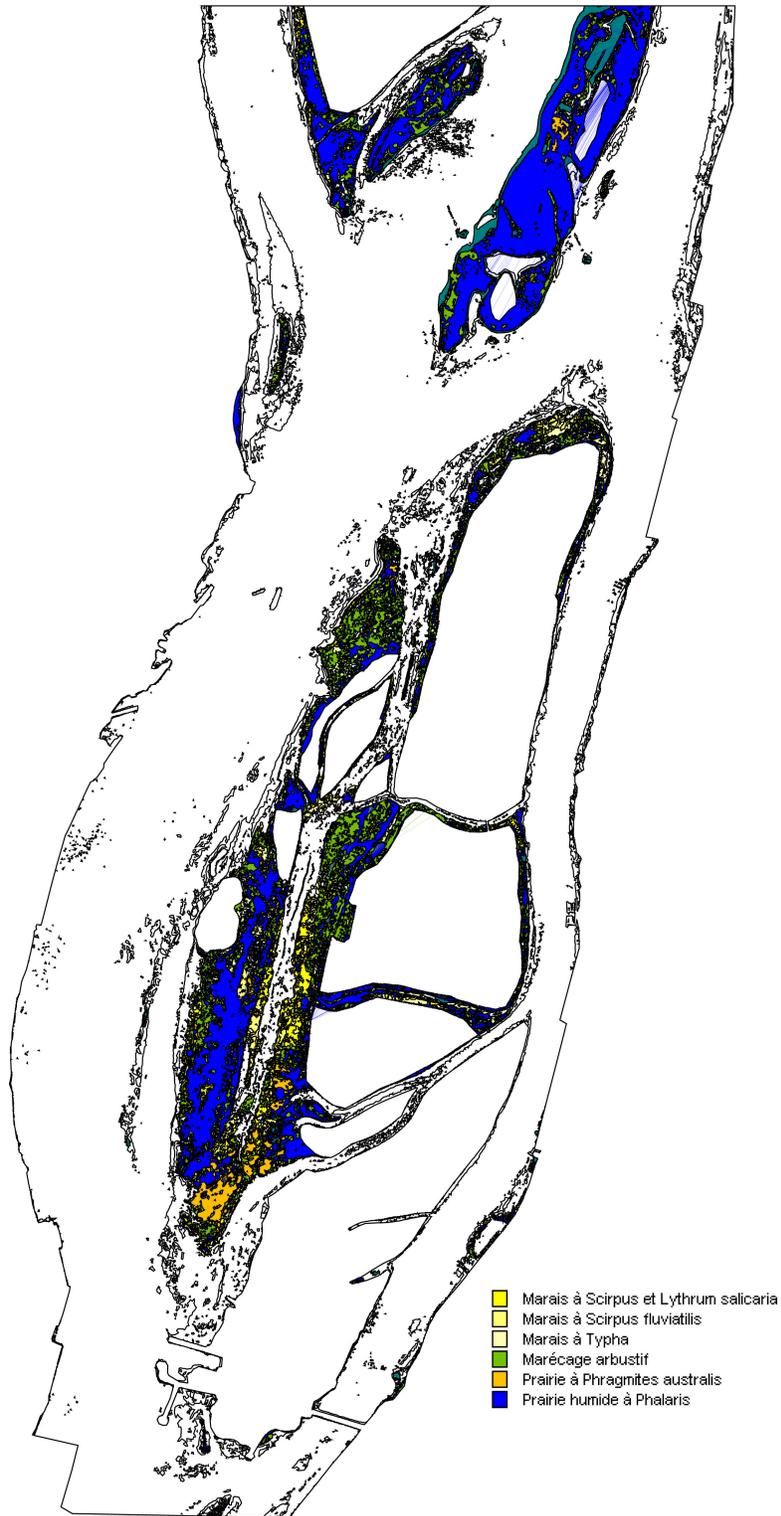


Figure 10: Distribution des assemblages de plantes émergentes des Îles de Boucherville, provenant de Martin Jean et Guy Létourneau (CSL).

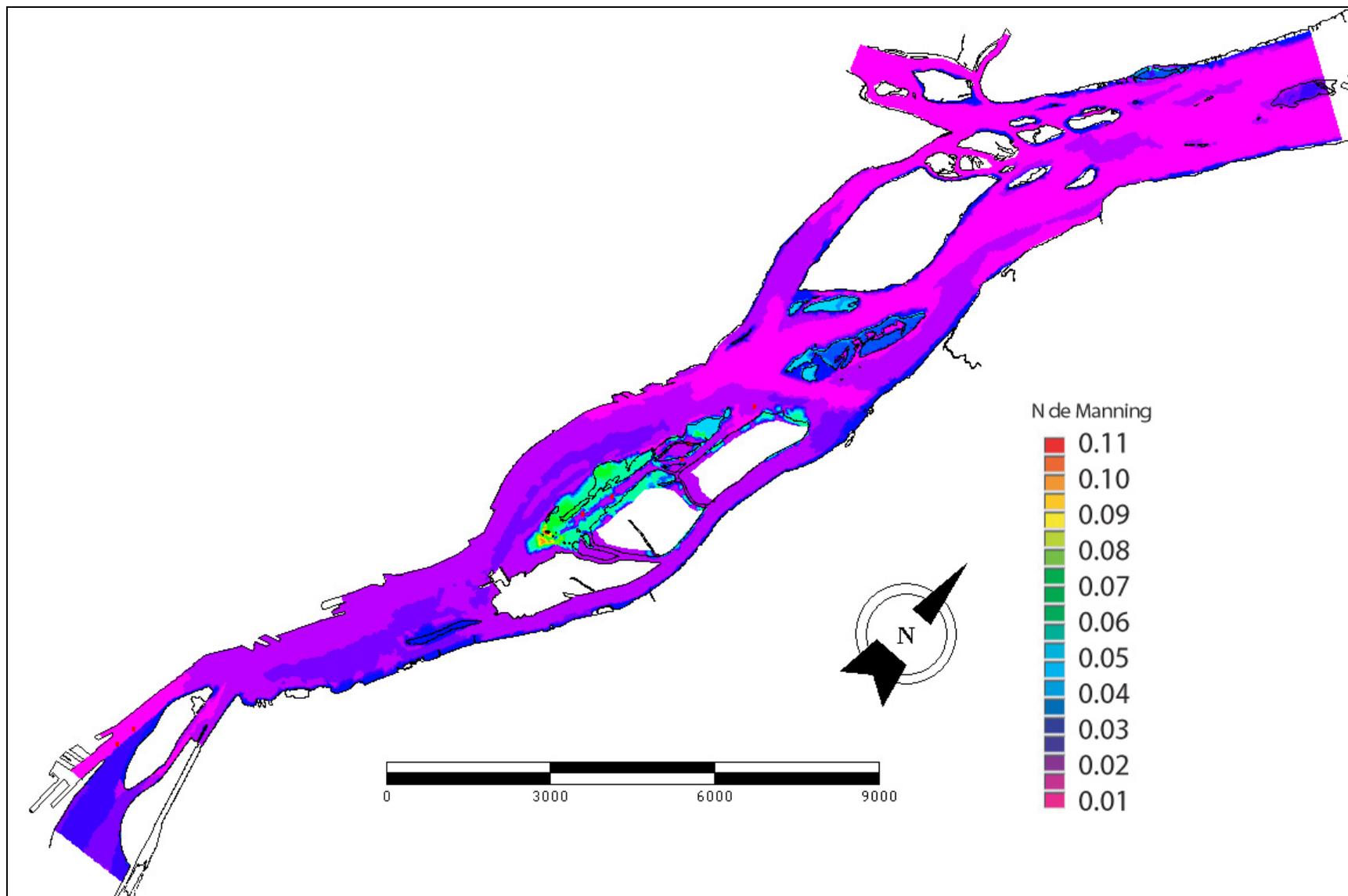


Figure 11: Coefficients de frottement de Manning utilisés dans le calcul hydrodynamique.

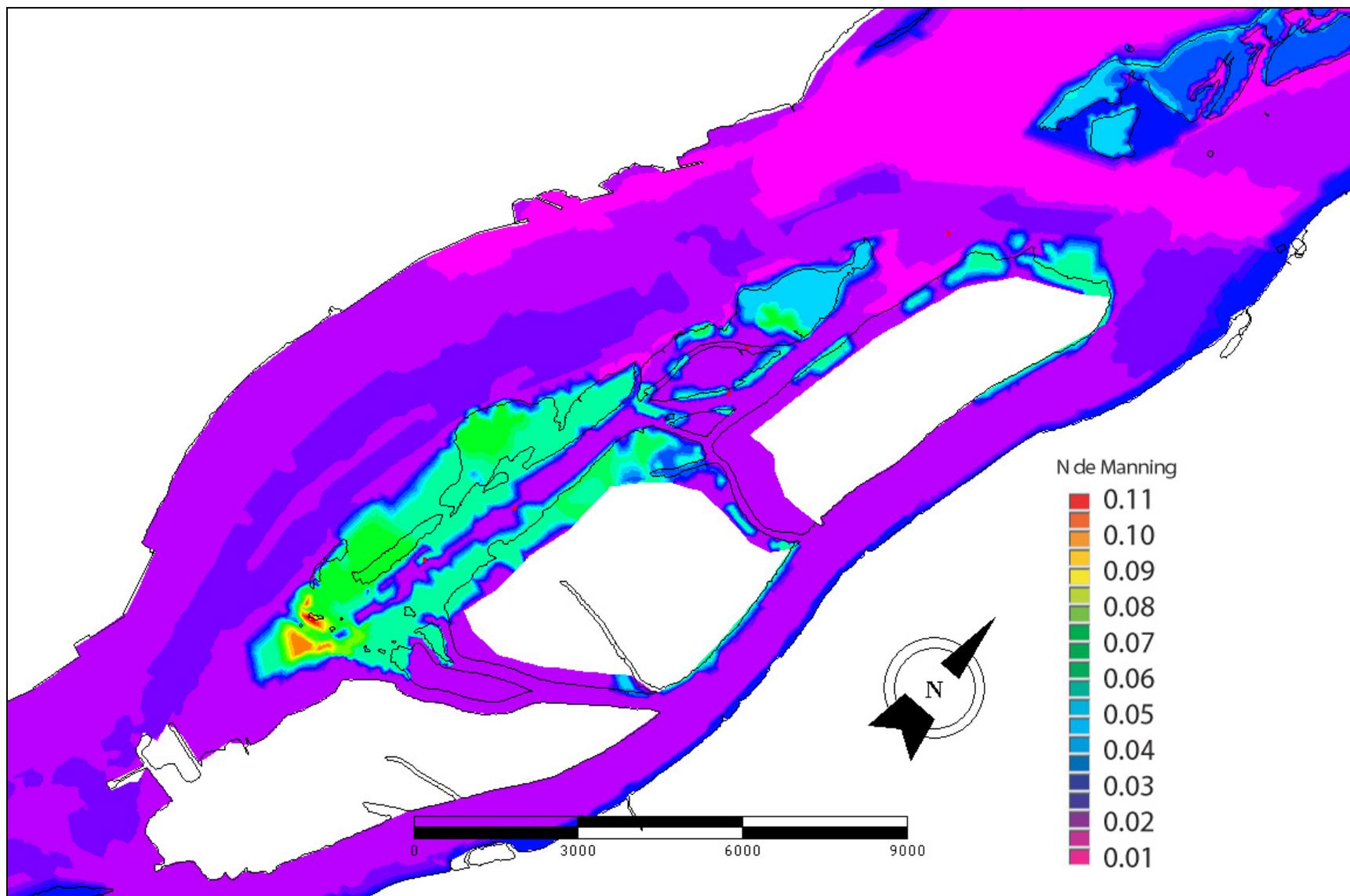


Figure 12: Détail des coefficients de frottement de Manning utilisés ainsi que la position des thermistors.

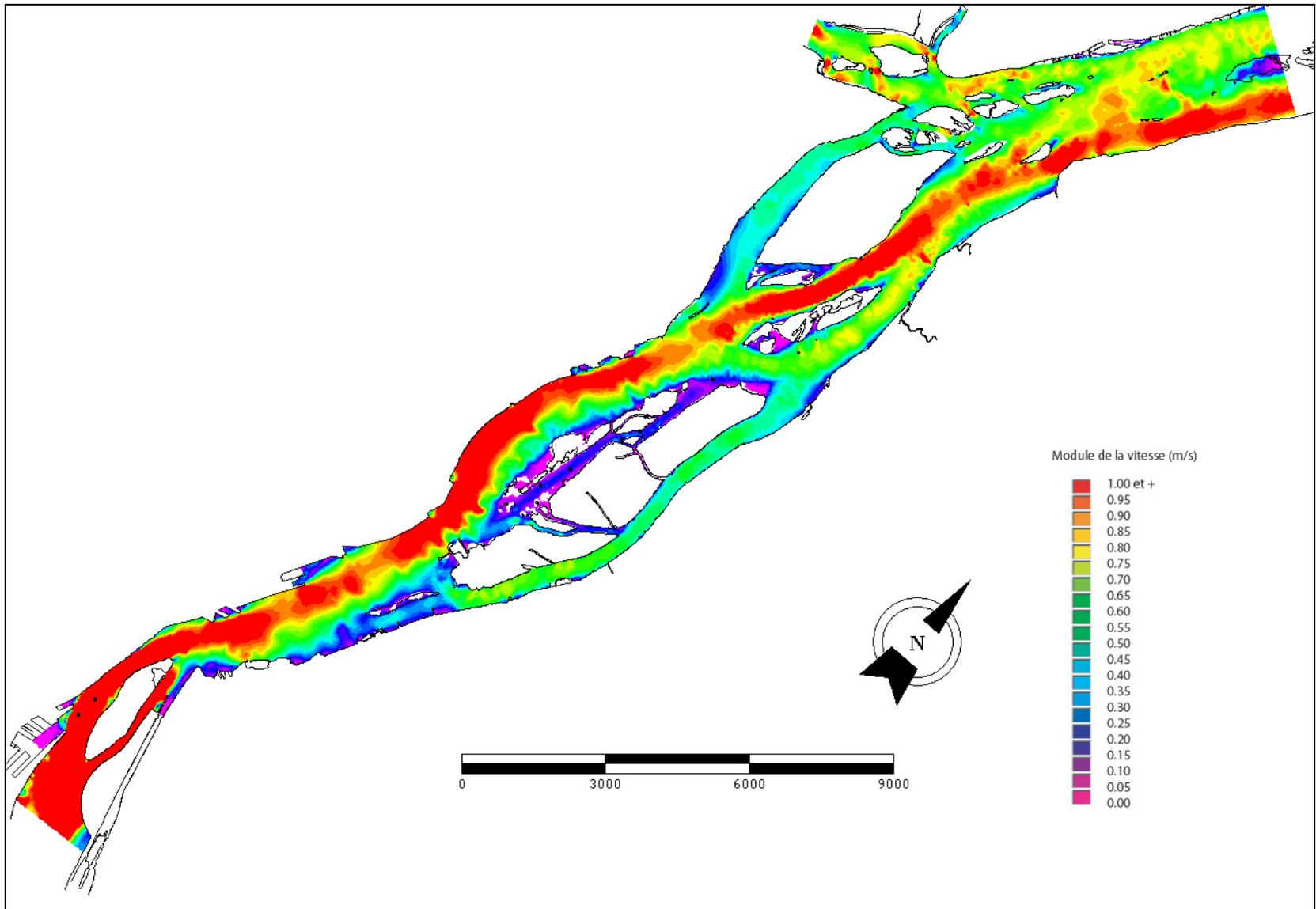


Figure 13: Module de la vitesse du tronçon (6 avril 2002).

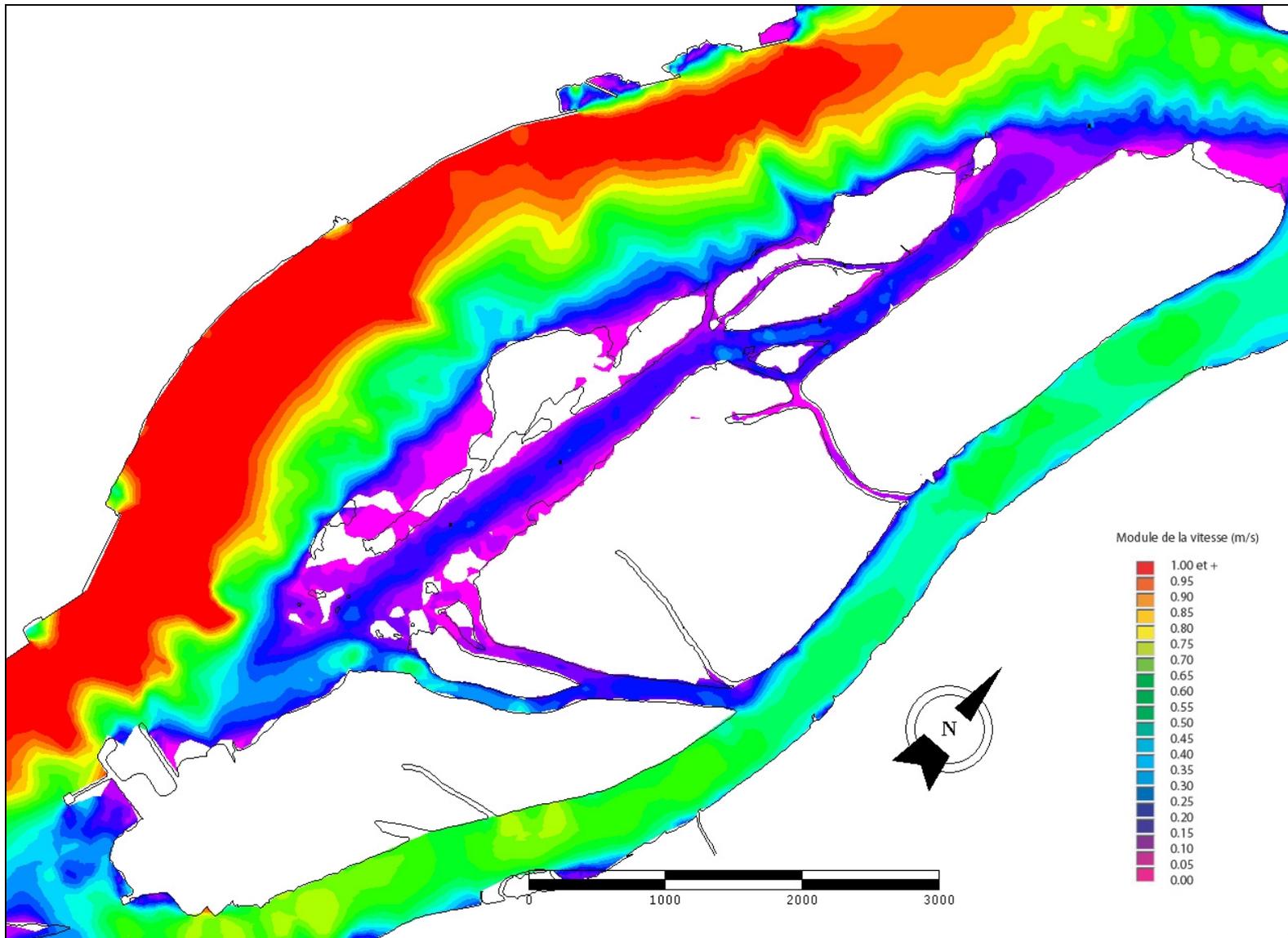


Figure 14: Détail sur le secteur à l'étude du module de la vitesse et vecteur vitesse pour le 6 avril 2002.

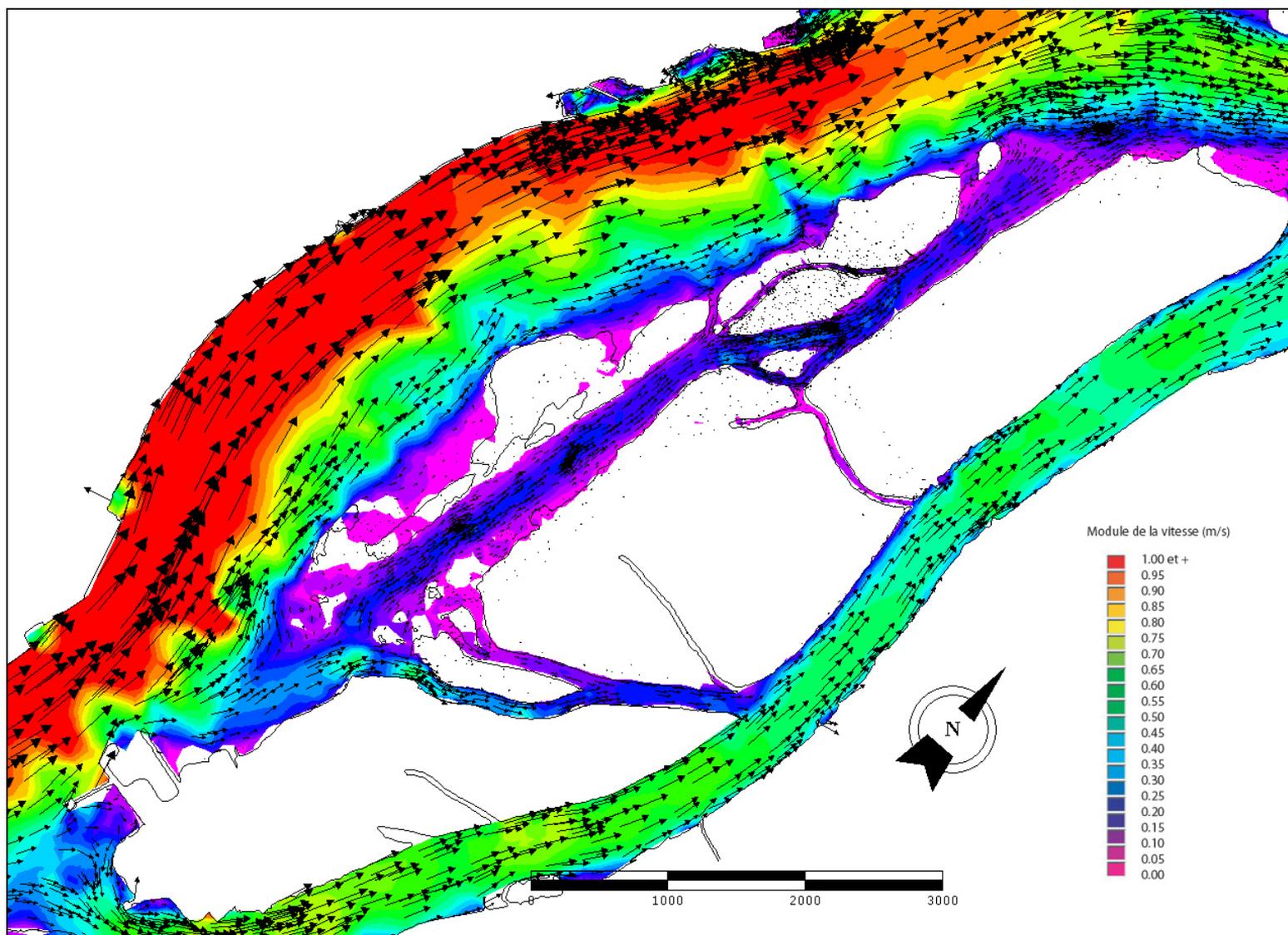


Figure 15: Vue détaillée du module de la vitesse et vecteur vitesse près des thermistors (6 avril 2002).

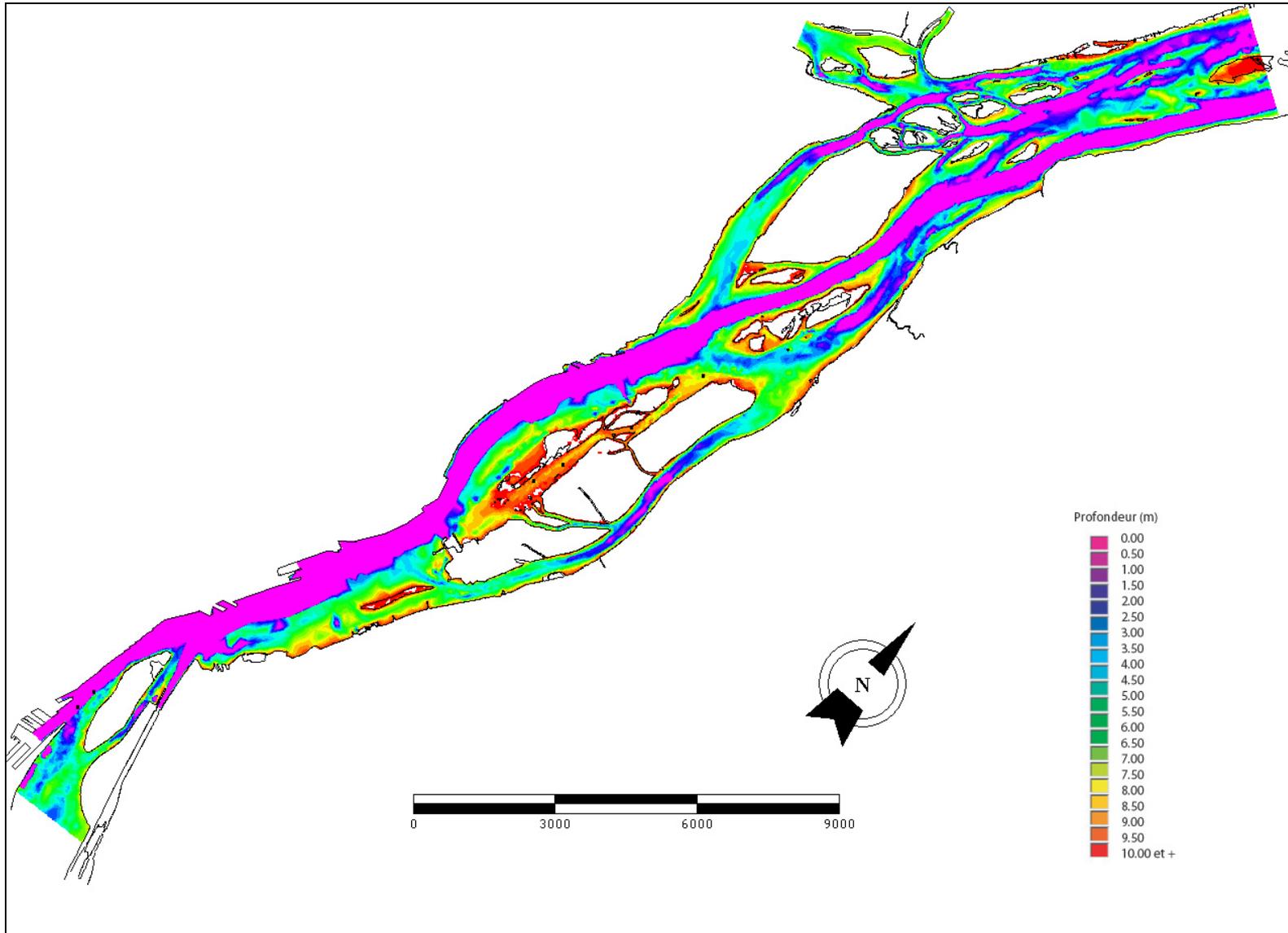


Figure 16: Profondeur d'eau simulée (6 avril 2002).

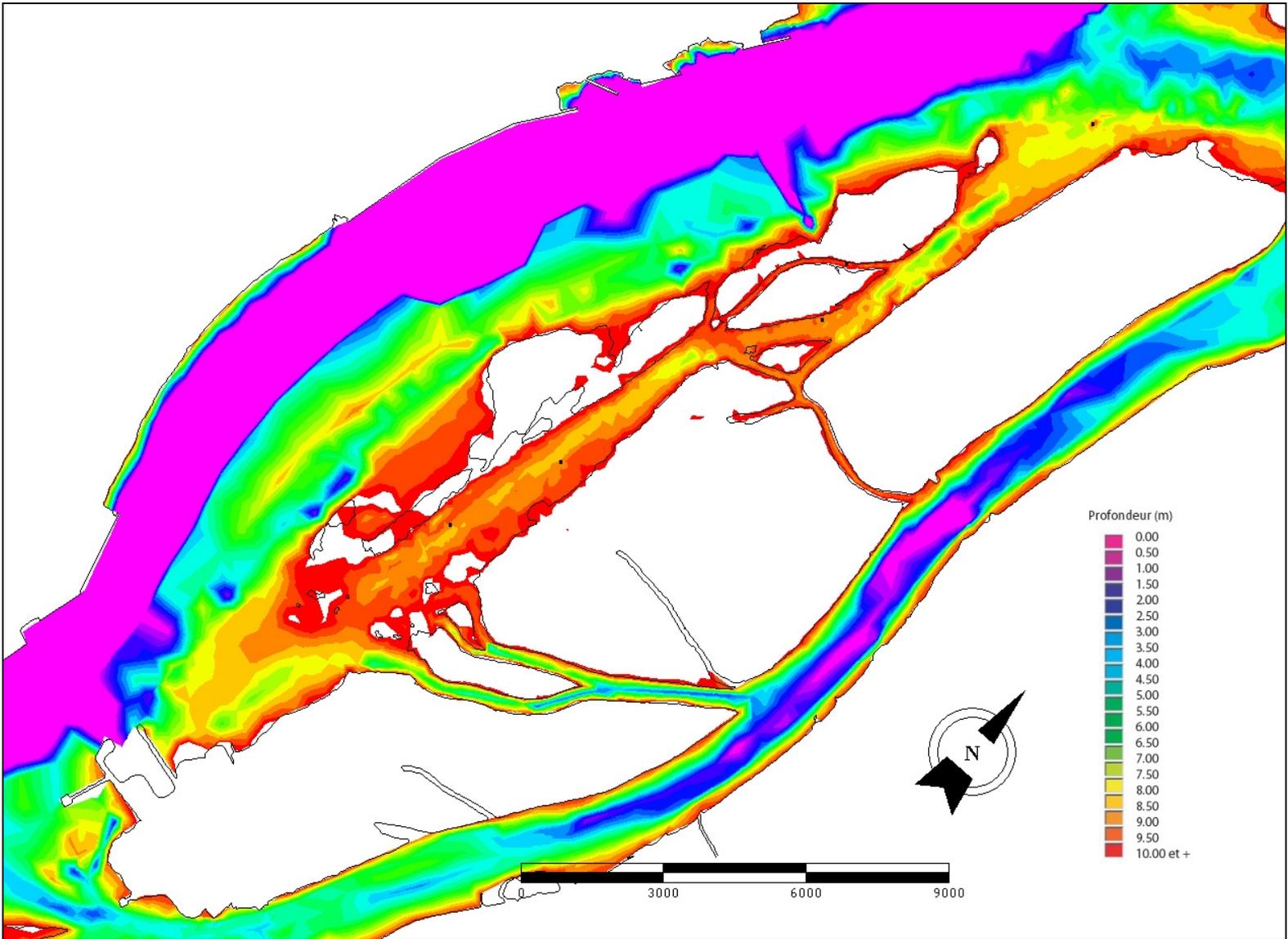


Figure 17: Vue détaillée de la profondeur simulée pour le secteur à l'étude (6 avril 2002).

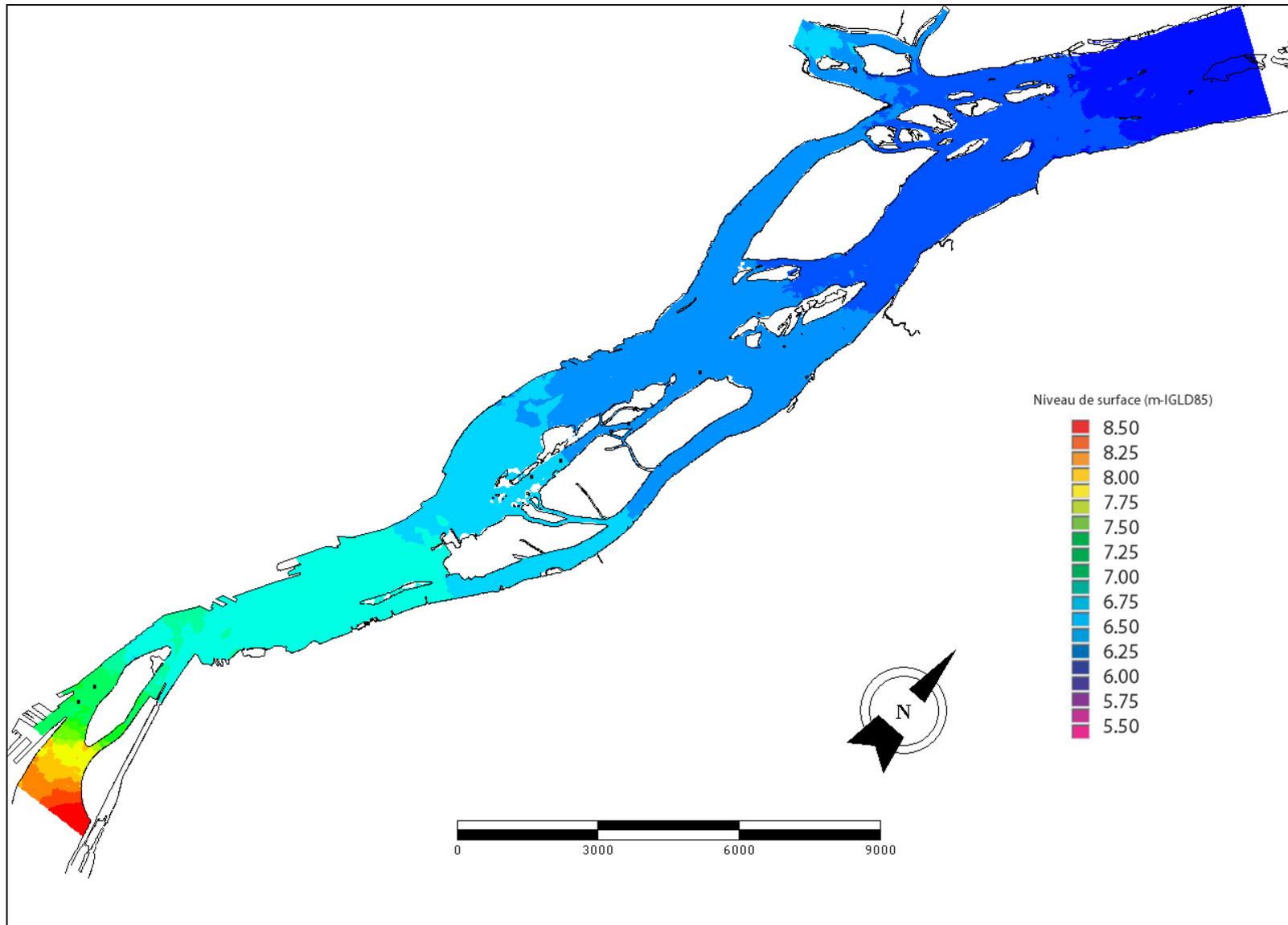


Figure 18: Niveau simulé secteur des Îles de Boucherville (6 avril 2002).

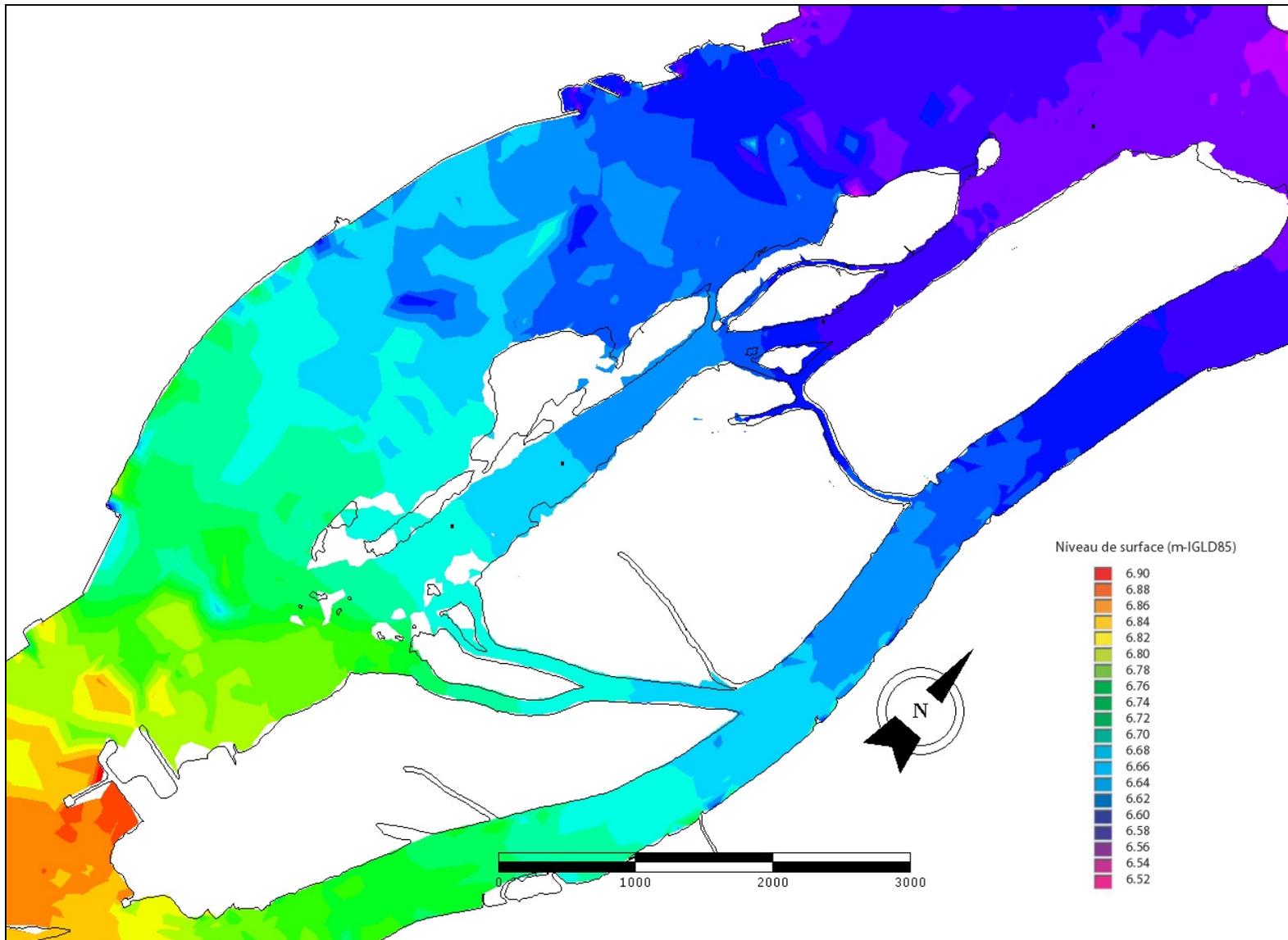


Figure 19: Niveau simulé près des thermistor et position des thermistors (6 avril 2002).

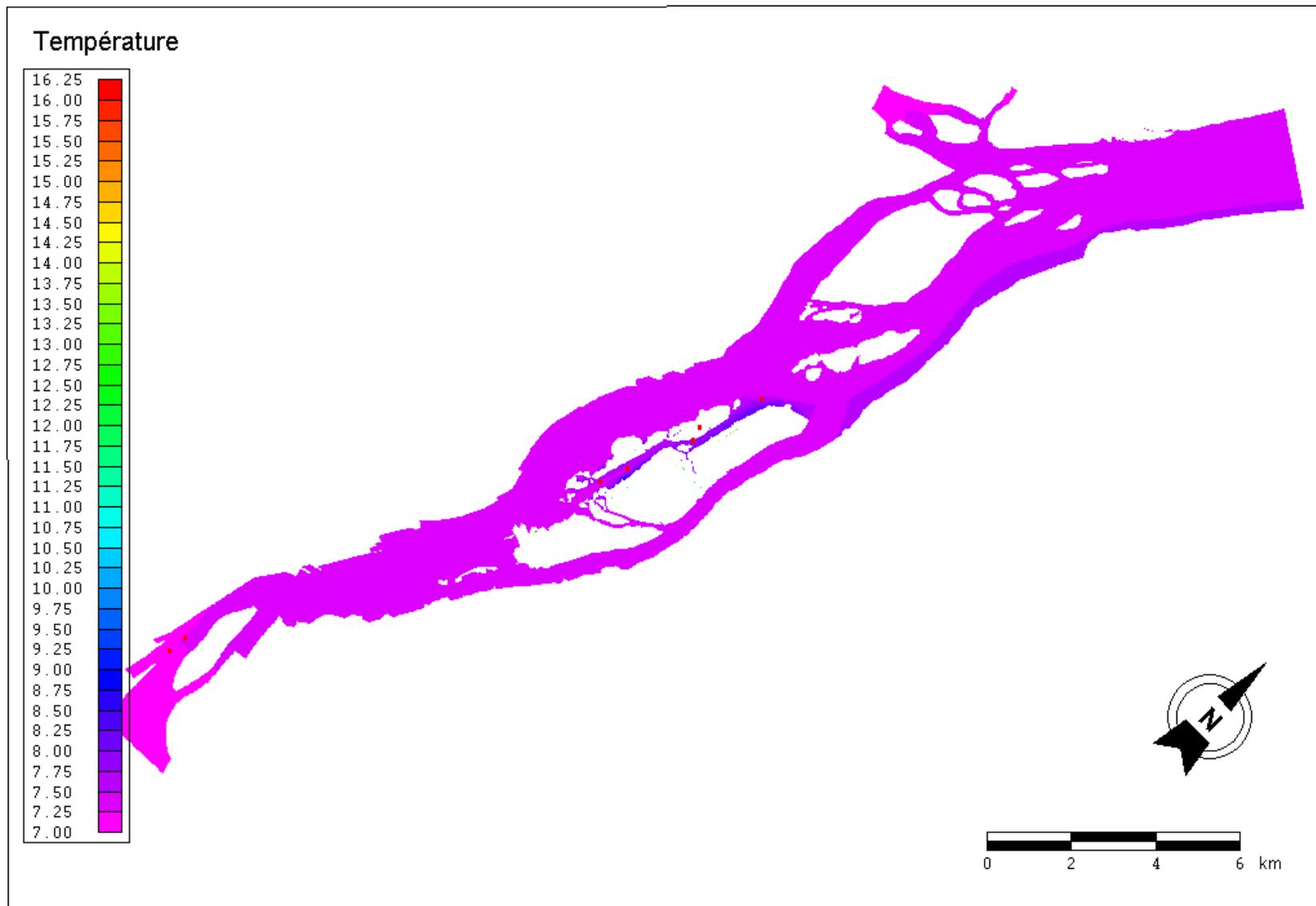


Figure 20 : Champ de température du 06-05-2002 06 :00.

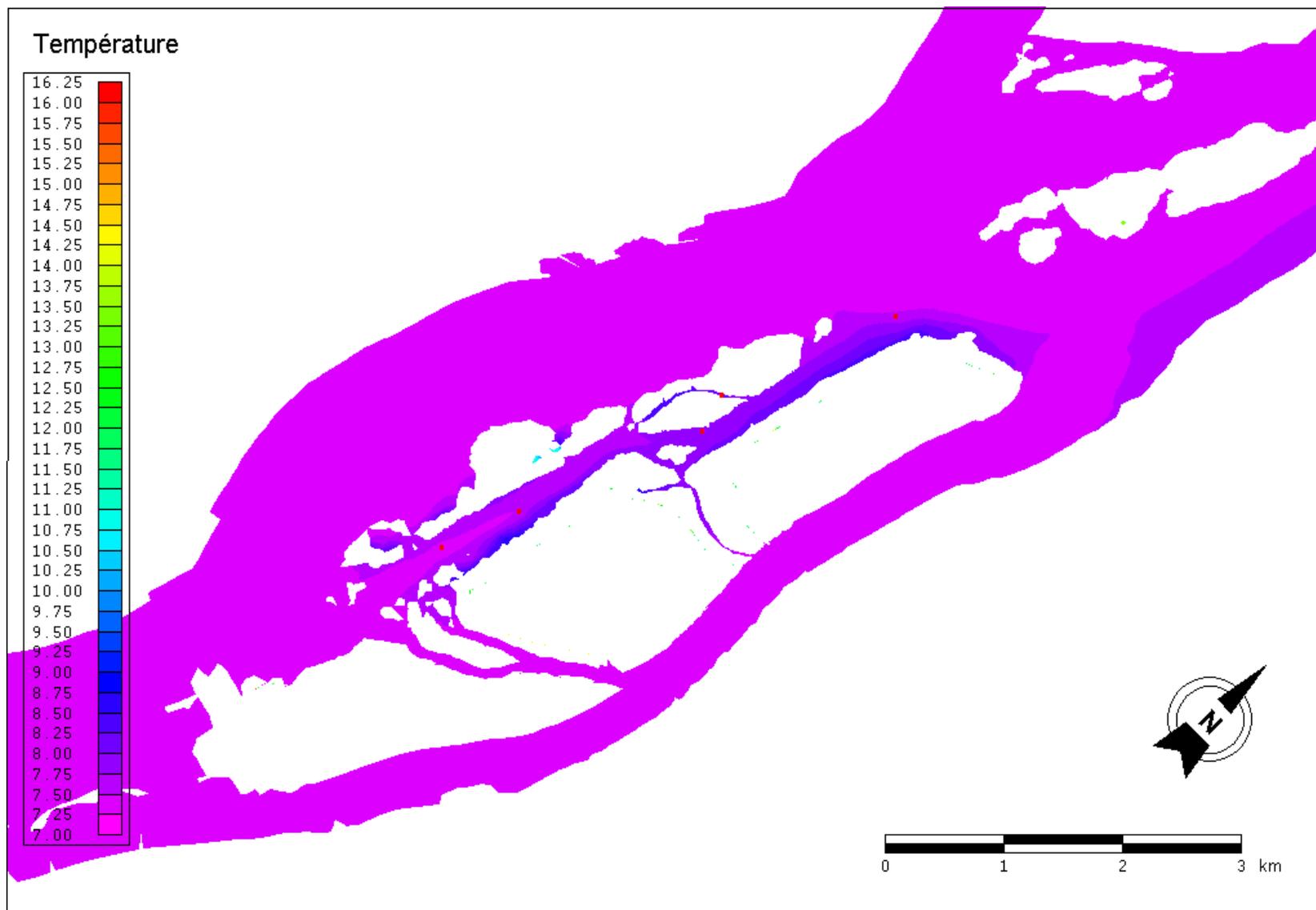


Figure 21 : Champ de température du 06-05-2002 06:00 – Détail.

Temperature

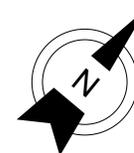
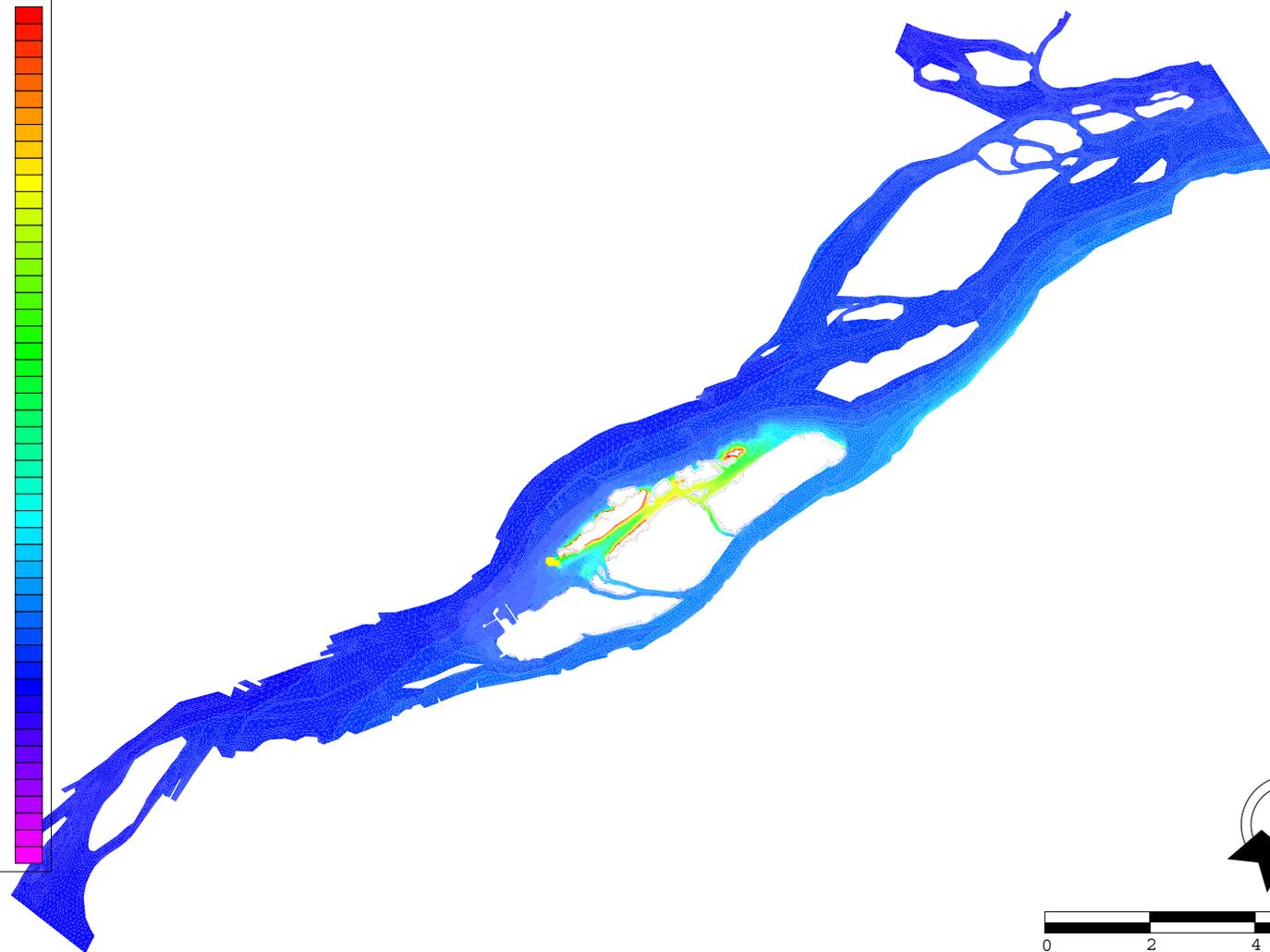
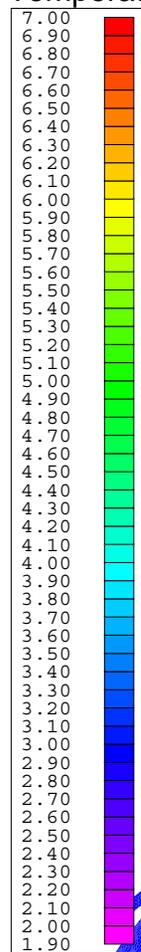


Figure 22 : Champ de température du 06-05-2002 17:00.

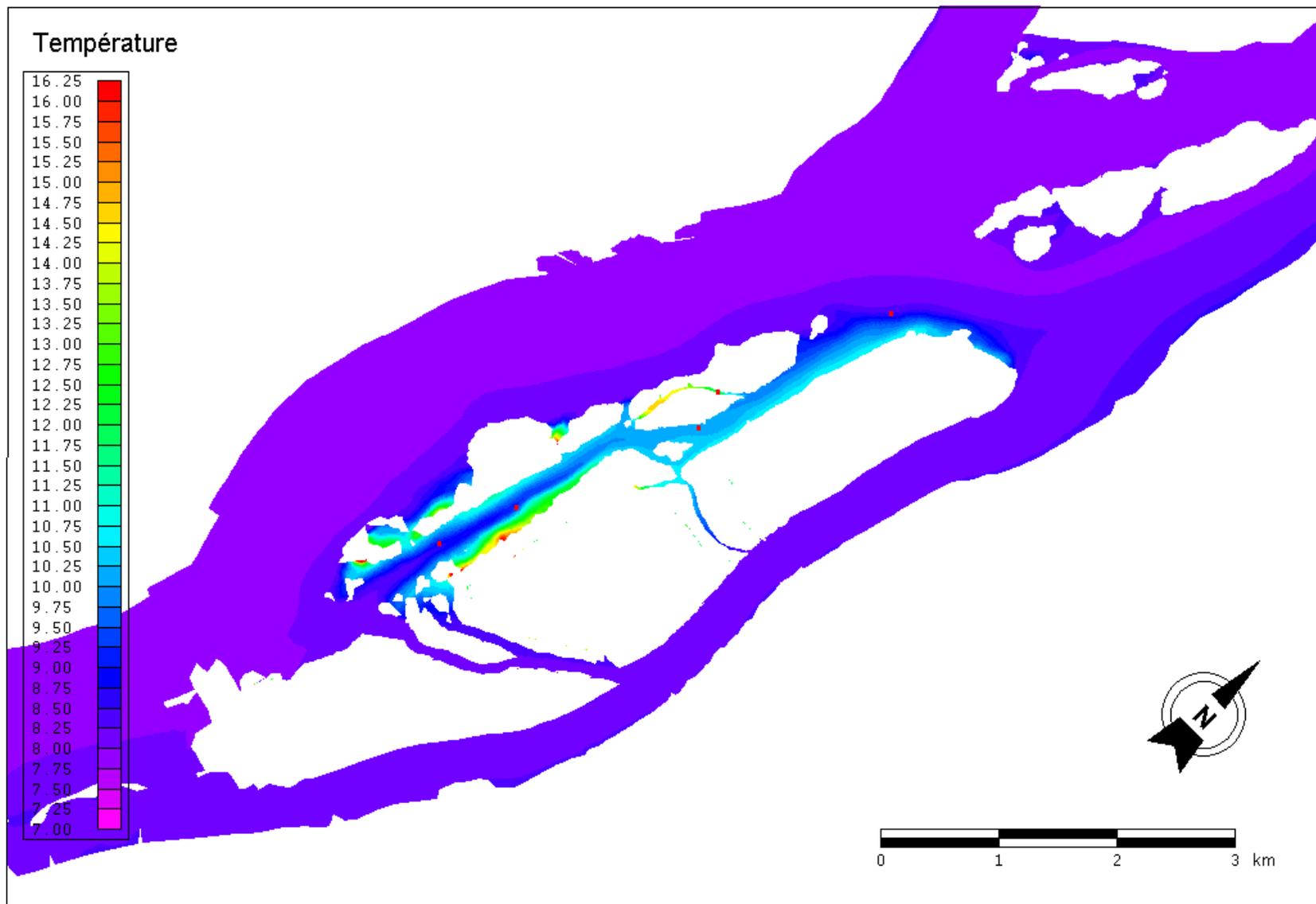


Figure 23 : Champ de température du 06-05-2002 17:00 – Détail.

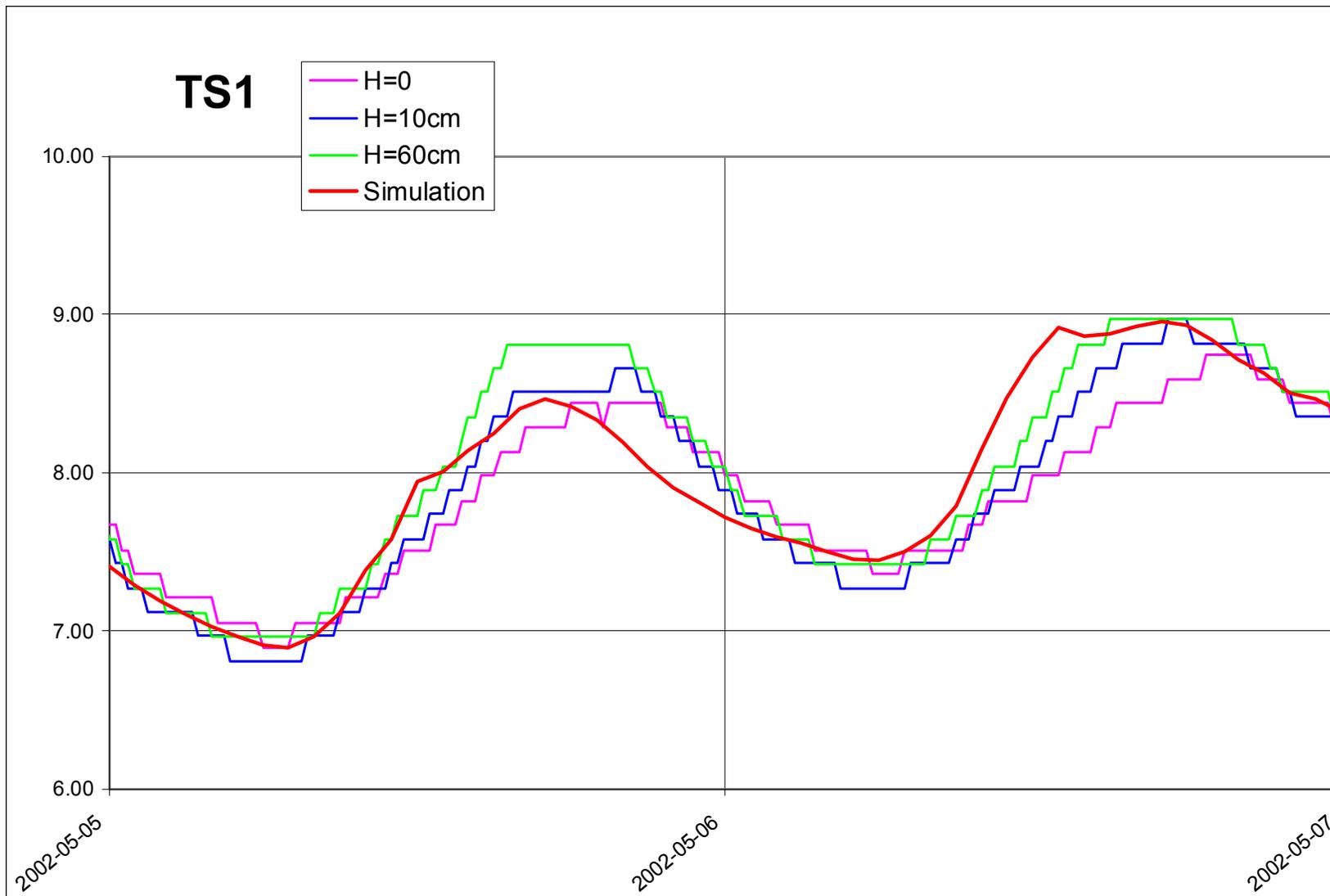


Figure 24 : Signal de température du 06-05-2002 au thermistor TS1.

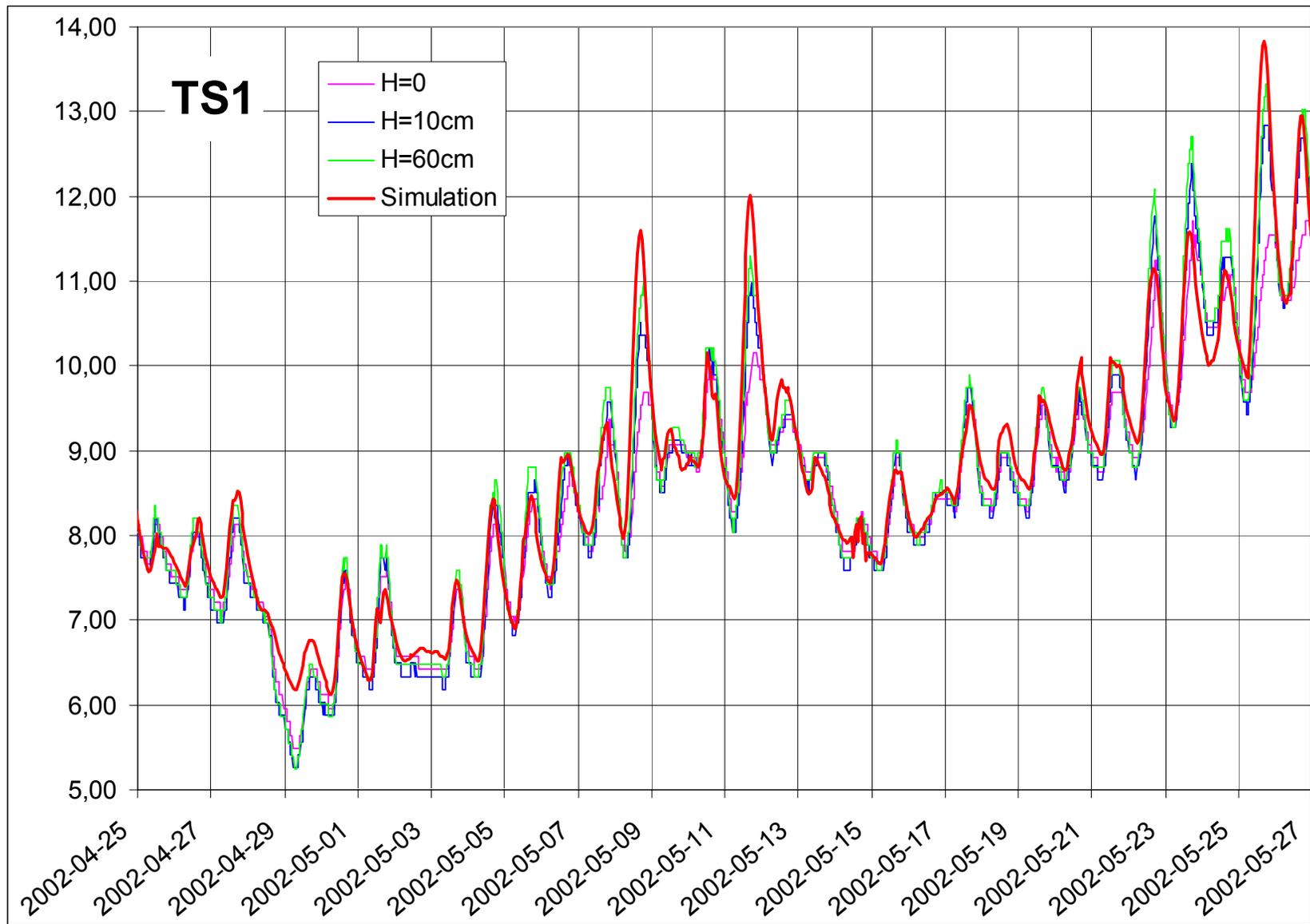


Figure 25 : Signal au thermistor TS1.

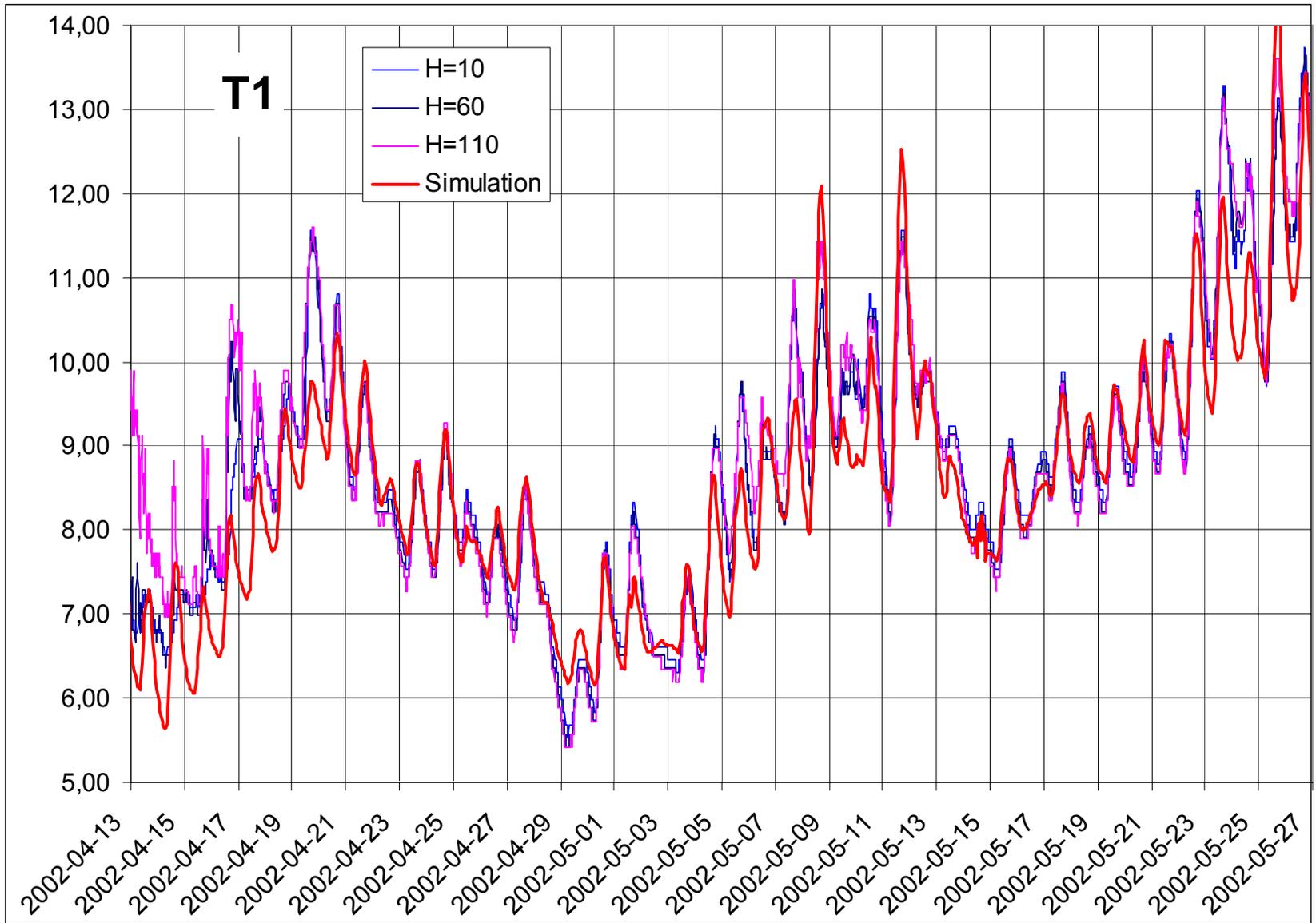


Figure 26 : Signal au thermistor T1.

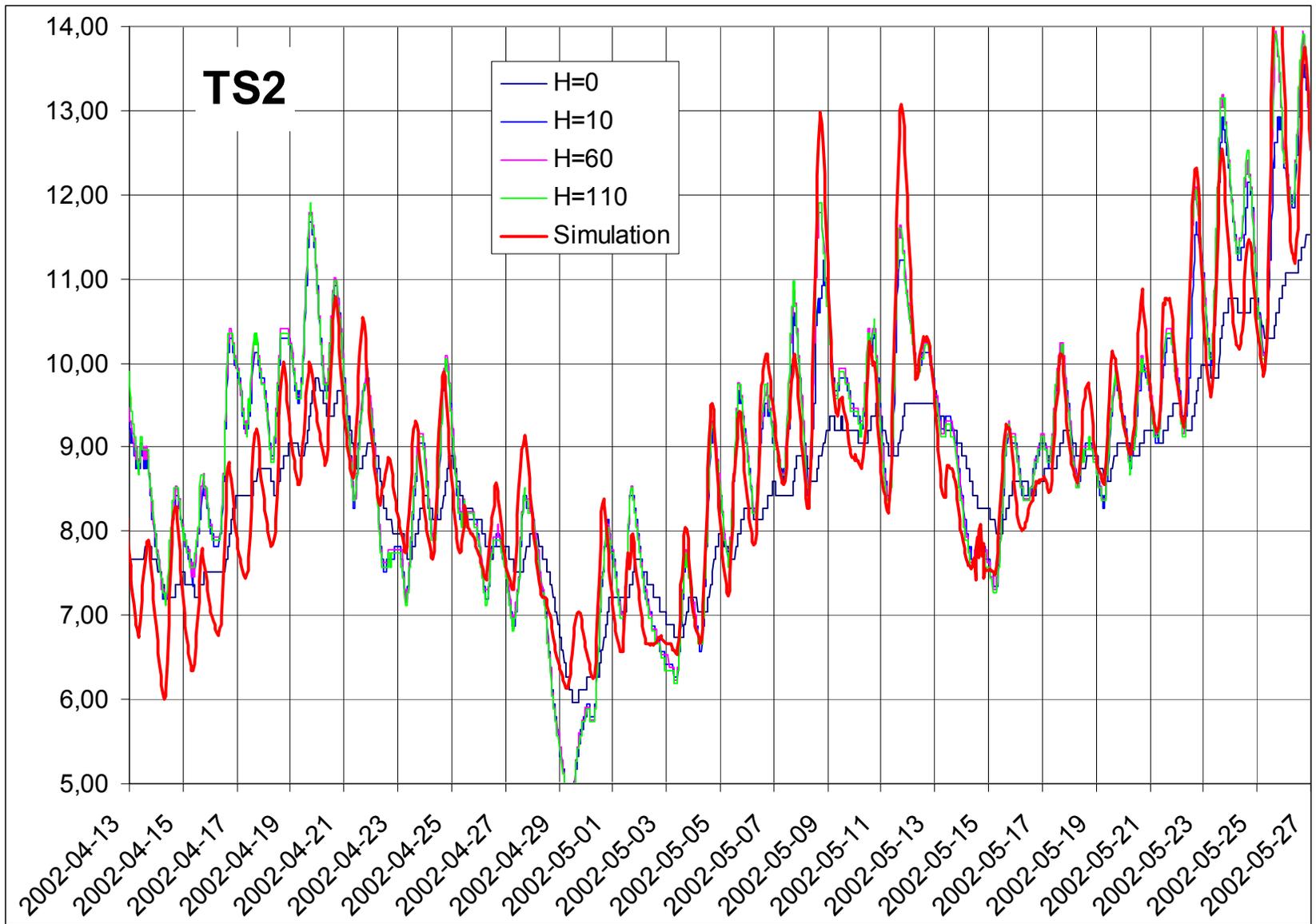


Figure 27 : Signal au thermistor TS2.

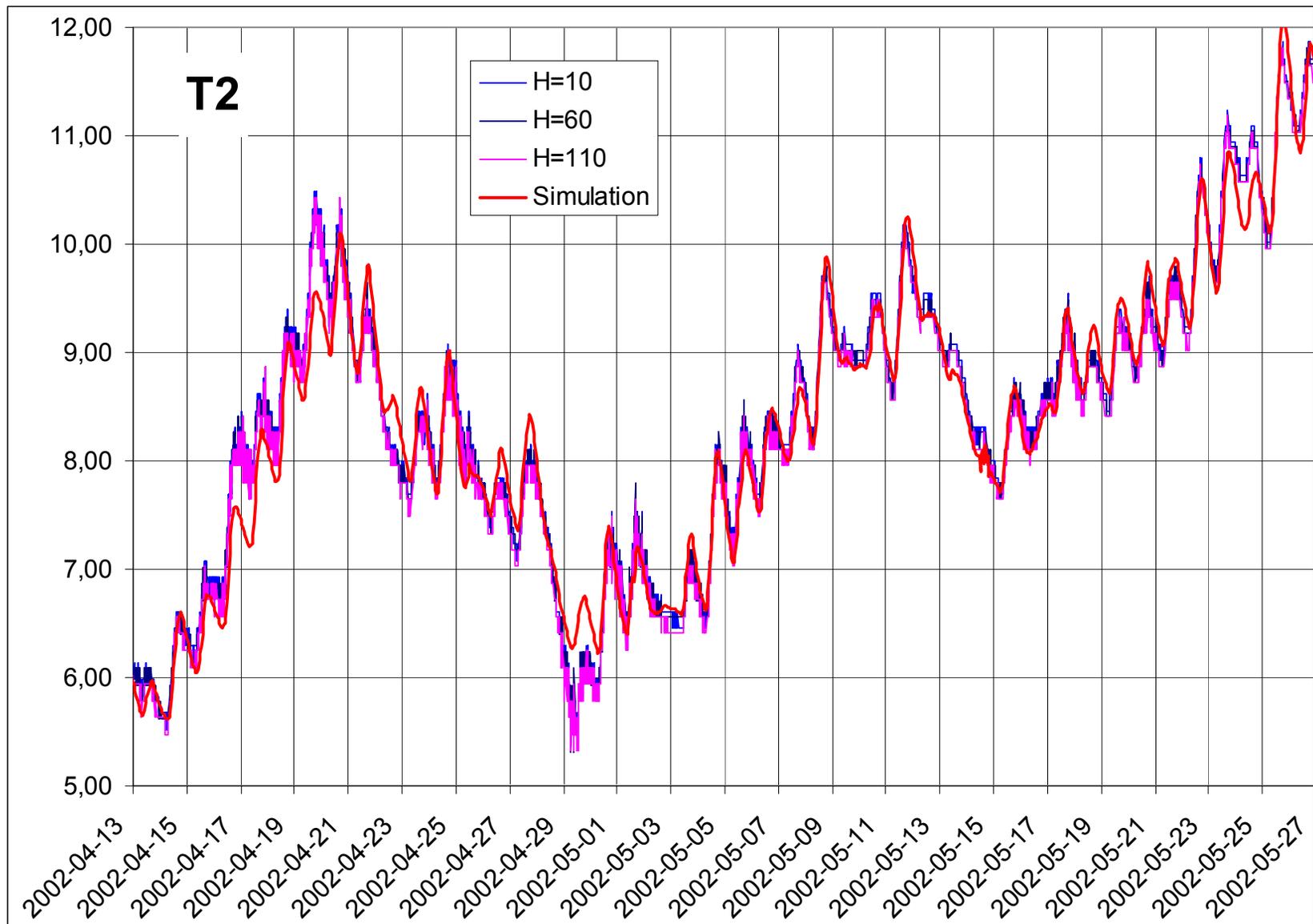


Figure 28 : Signal au thermistor T2.

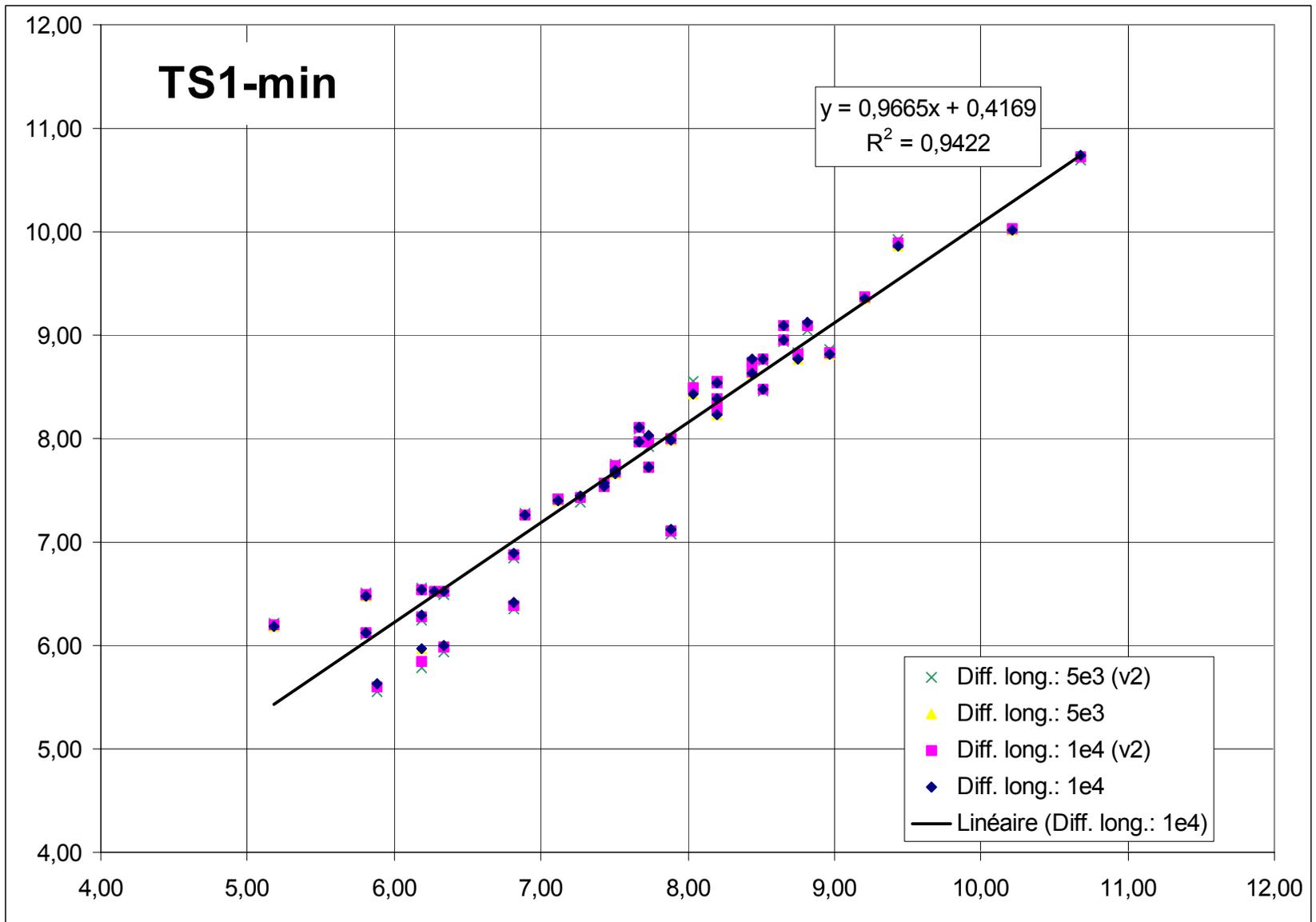


Figure 29 : Comparaison Mesure/Simulation - TS1 minimums.

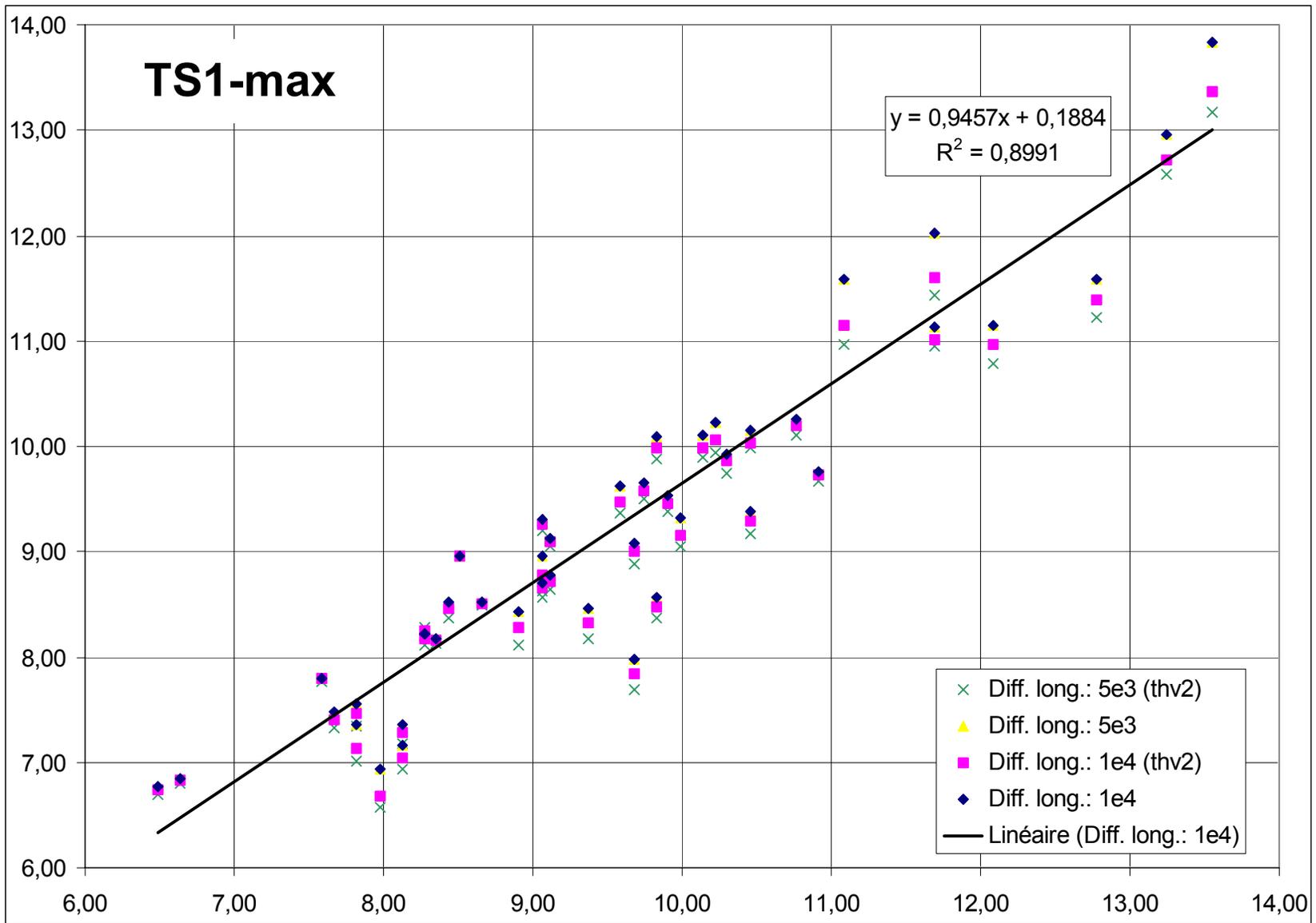


Figure 30 : Comparaison Mesure/Simulation - TS1 maximums.

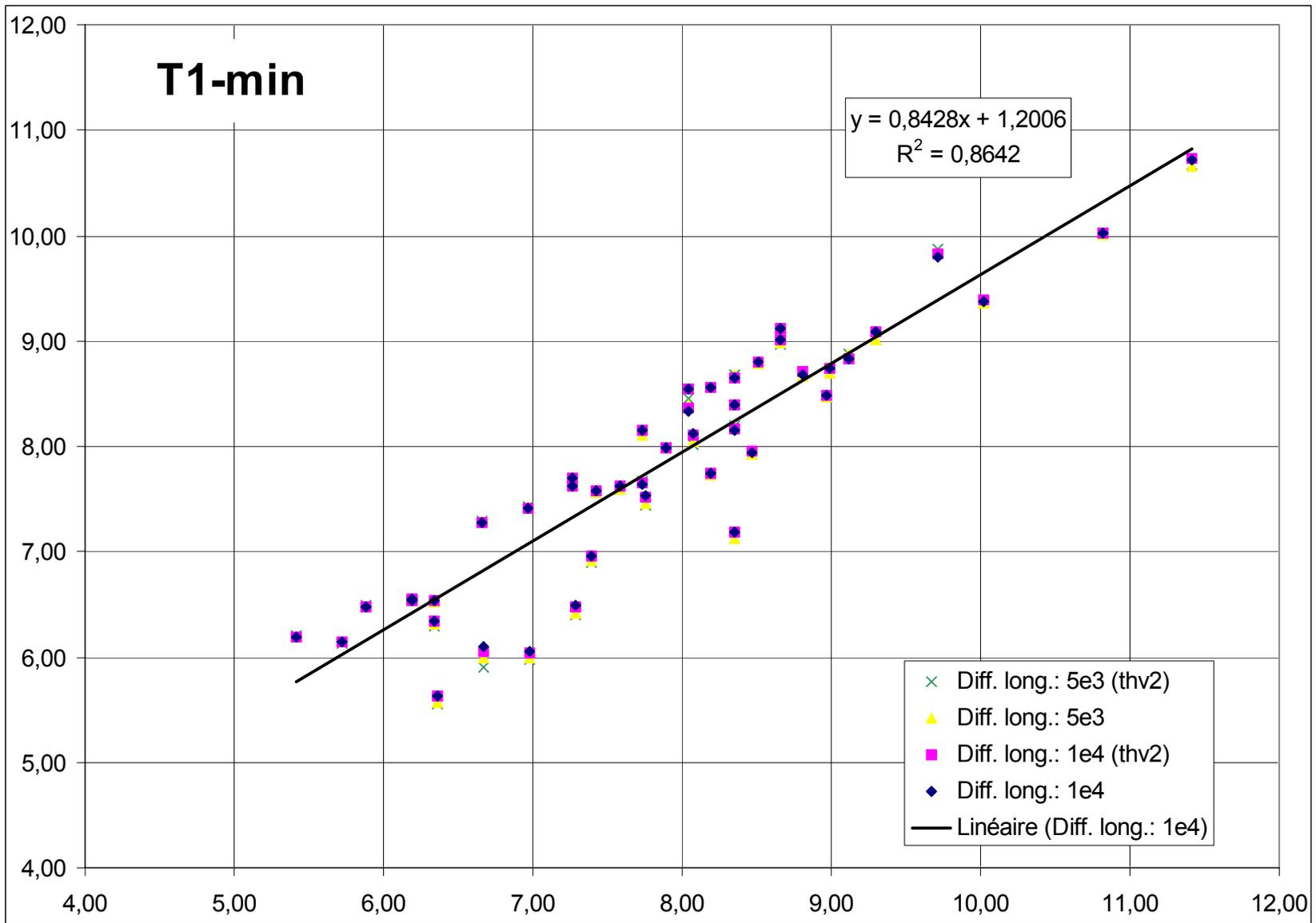


Figure 31 : Comparaison Mesure/Simulation - T1 minimums.

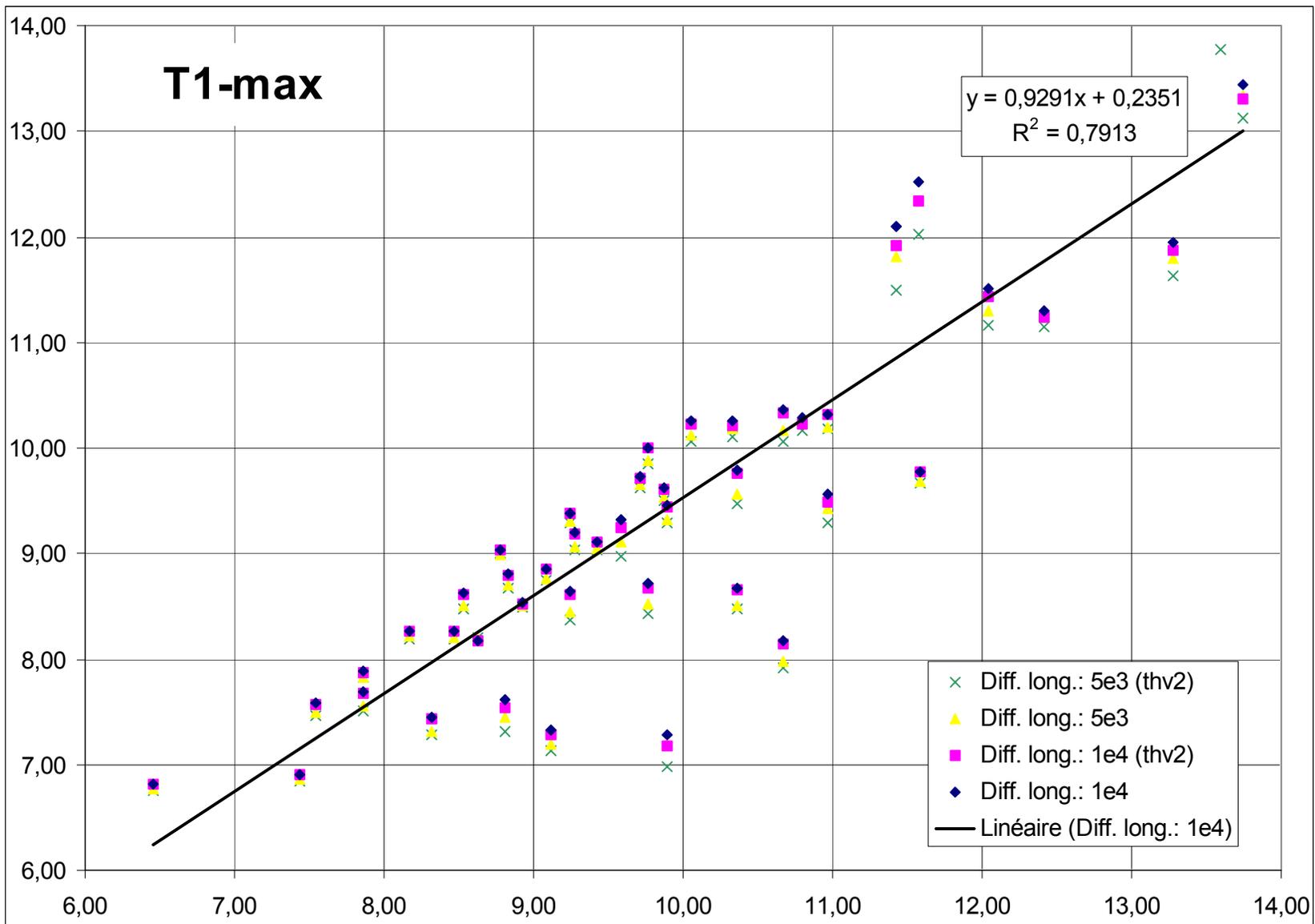


Figure 32 : Comparaison Mesure/Simulation - T1 maximums.

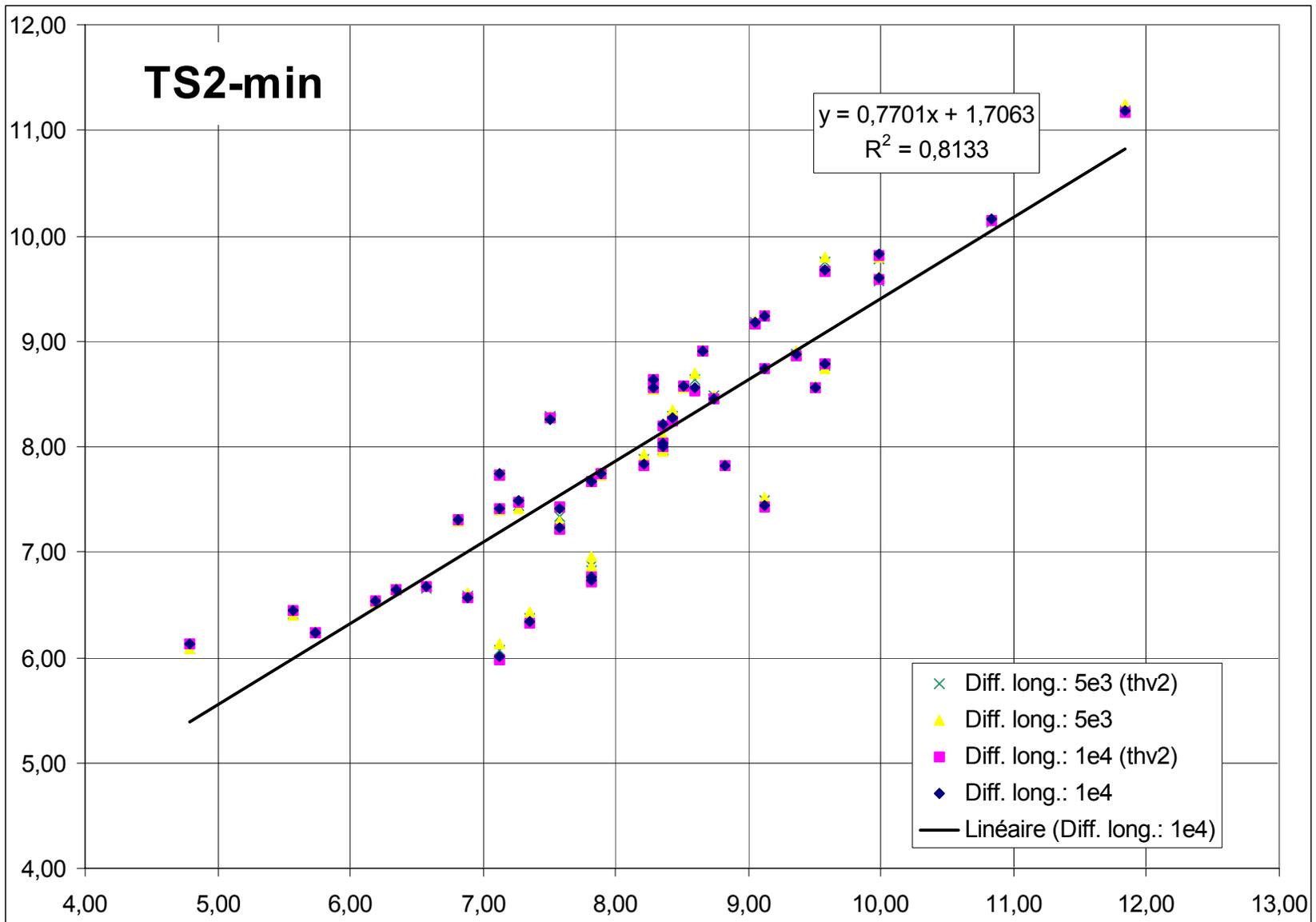


Figure 33 : Comparaison Mesure/Simulation – TS2 minimums.

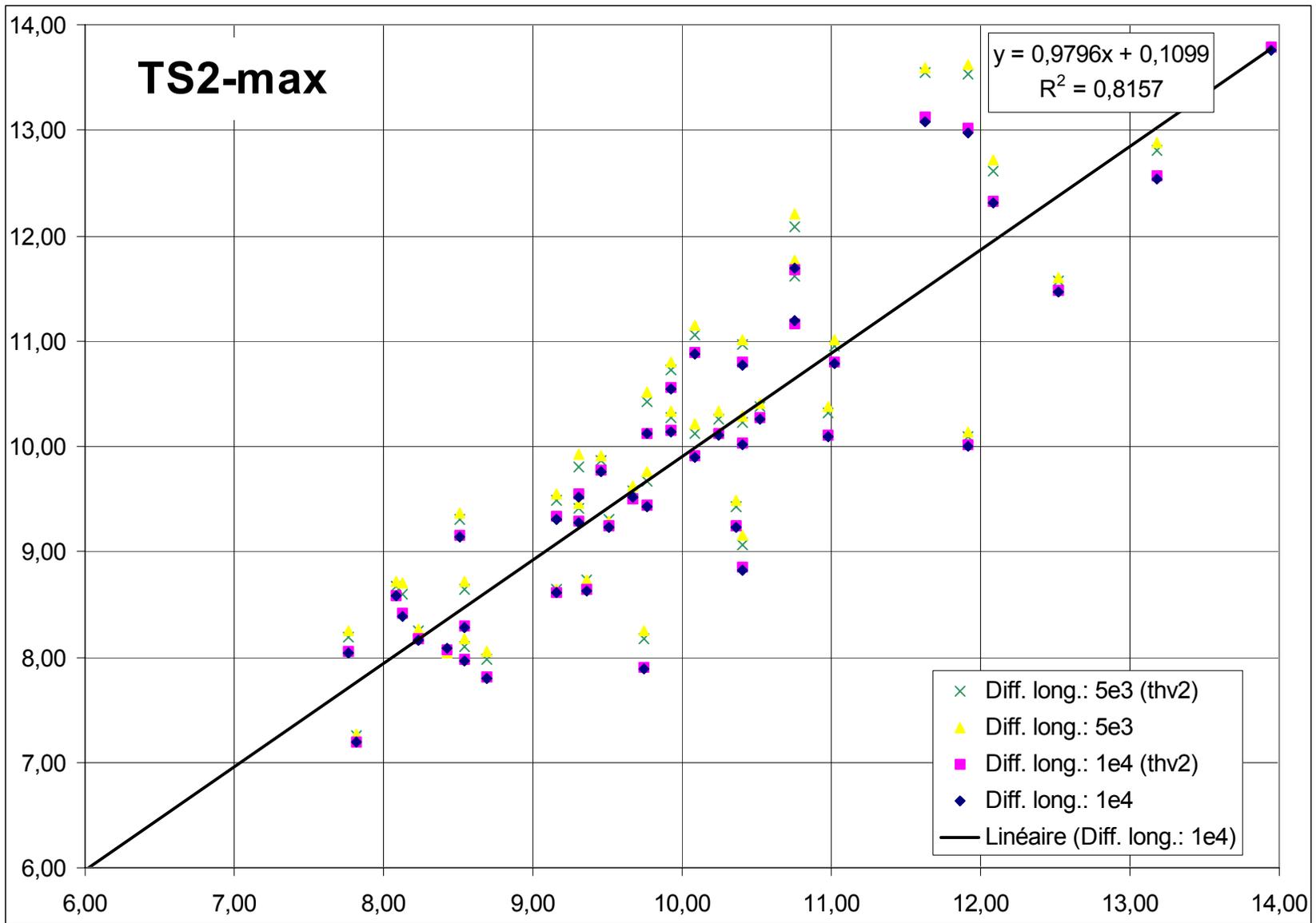


Figure 34 : Comparaison Mesure/Simulation – TS2 maximums.

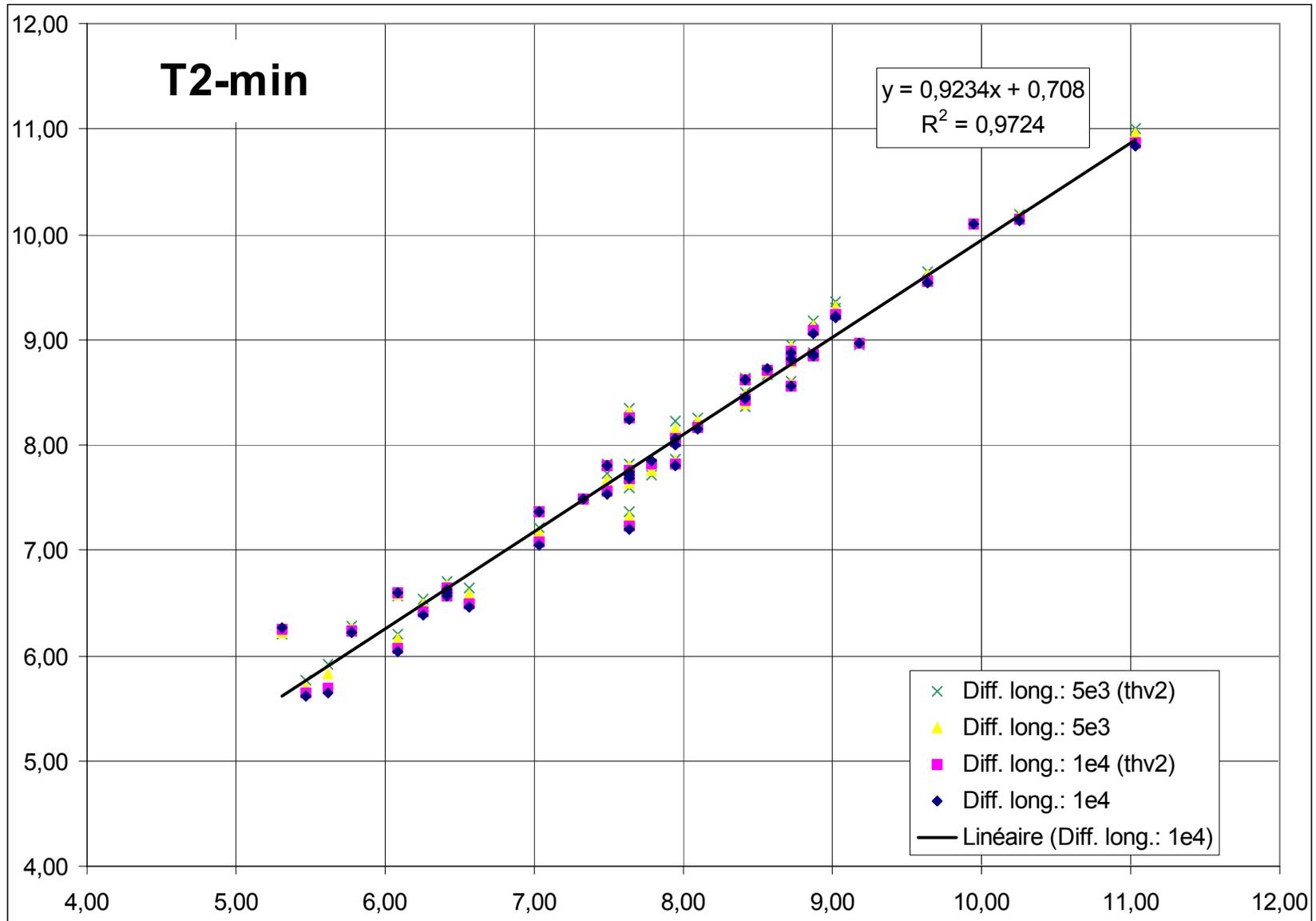


Figure 35 : Comparaison Mesure/Simulation – T2 minimums.

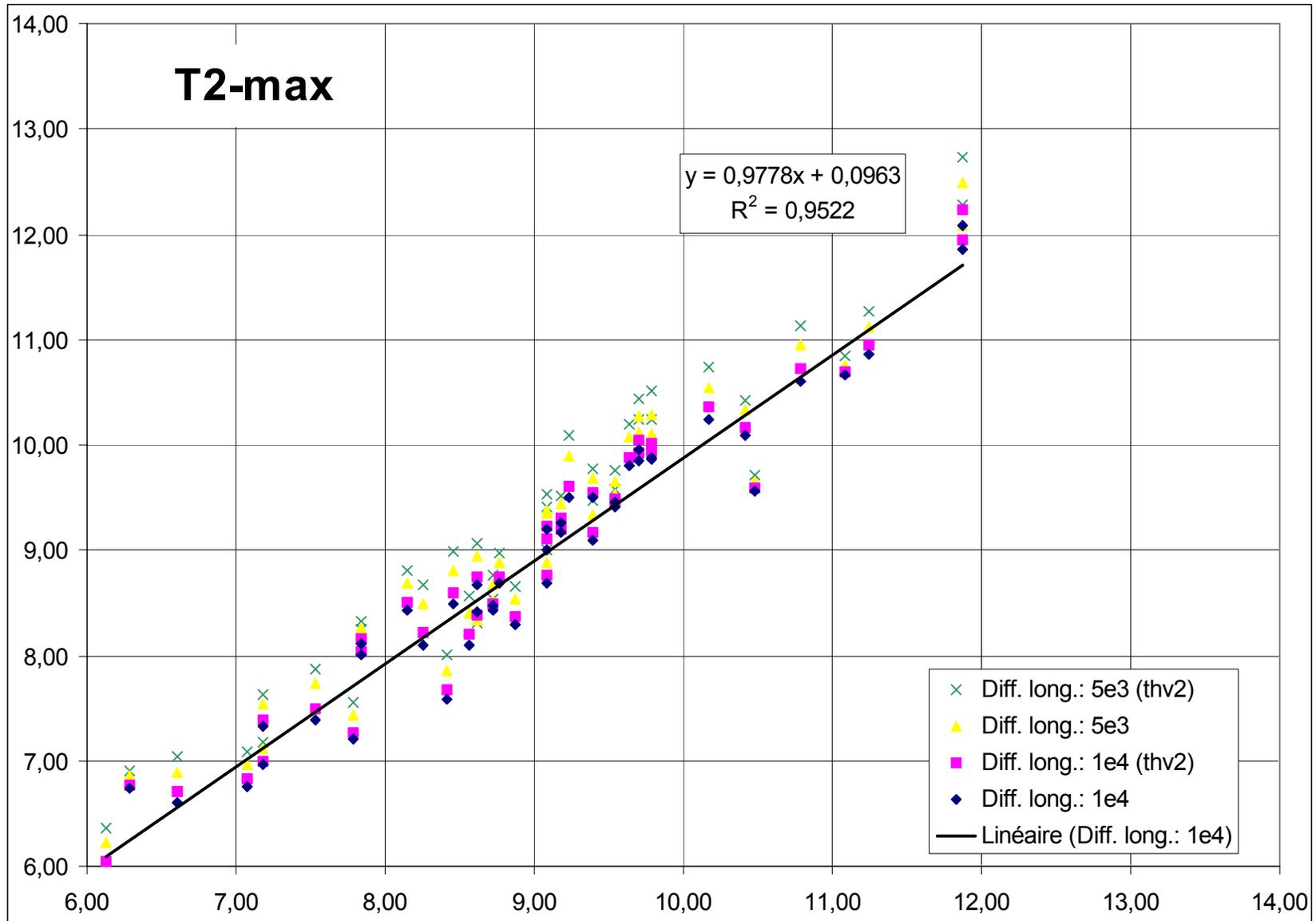


Figure 36 : Comparaison Mesure/Simulation – T2 maximums.

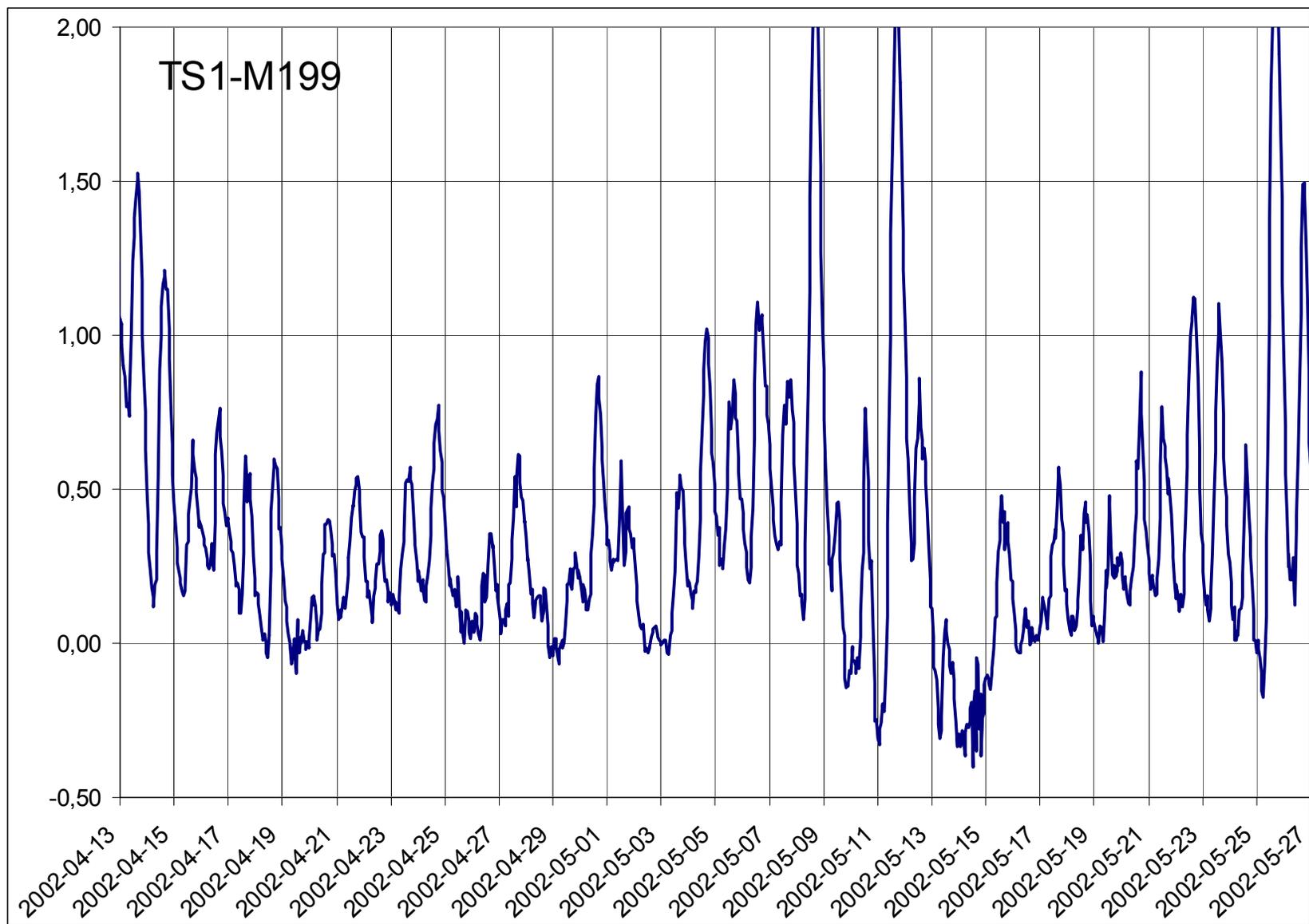


Figure 37 : Différence entre les signaux au thermistor TS1 et au thermistor M199 (signal d'entrée)