

Transport de chaleur par la Seine à la traversée de l'agglomération parisienne

Shuaitao Wang^{1*}, Nicolas Flipo², Aurélien Bordet², Jean Bernier³, Michele Merchat⁴, Vincent Rocher³

¹ UMR 7619 METIS, Sorbonne Université, CNRS, EPHE, Paris

² MINES ParisTech, PSL Université, Centre de Géosciences, Fontainebleau

³ Direction de l'innEAUvation, SIAAP

⁴ CLIMESPACE, Paris

* shuaitao.wang@sorbonne-universite.fr

Résumé

Ce rapport présente l'implémentation du transport de chaleur en rivière et du bilan d'énergie associé à l'interface air-eau dans le logiciel PROSE-PA. Pour le bilan d'énergie à la surface libre, une librairie libseb a été créée. Le transport de chaleur en rivière est quant à lui effectué via la librairie libttc. L'équation de transport de chaleur est d'abord validée par une simulation en condition contrôlée présentant une solution théorique. Ensuite, les températures de l'eau simulées en Seine sont comparées aux mesures à neuf stations (huit stations de mesure du SIAAP et une station de mesure de CLIMESPACE). Enfin, un bilan d'énergie pluriannuel (2008-2012) est établi pour la Seine depuis l'amont de l'agglomération parisienne (Choisy) jusqu'à l'estuaire de Poses. Afin d'exploiter les résultats, les bilans d'énergie pour deux années plus chaudes (2009 et 2010) sont également calculés. Les résultats montrent que la Seine a tendance à légèrement réchauffer l'atmosphère (+16 W/m² de surface libre). PROSE-PA est aujourd'hui opérationnel pour réaliser des études sur l'impact des activités humaines sur la température de l'eau en Seine ainsi que sur son métabolisme.

Points clés

- L'équation de transport de chaleur et le bilan d'énergie associé sont implémentés dans le logiciel PROSE-PA
- Les apports par les rivières et les rejets (station d'épuration, déversoirs d'orage) contrôlent le fonctionnement du système
- Les flux d'énergie apportés par les stations d'épuration et les déversoirs d'orage représentent cinq fois plus que les pertes par évaporation

Abstract

This report presents the implementation of heat transport in river and thermal energy balance at the air-water interface in the PROSE-PA software. For the thermal energy balance at free surface, a library *libseb* has been created. The heat transport in river is handled by the *libttc* library. The heat transport equation is first validated by a simulation in controlled conditions, which has a theoretical solution. Then, the simulated water temperatures in the Seine are compared with measurements at nine stations (eight stations of SIAAP and one station of CLIMESPACE). Finally, a multiannual thermal energy balance (2008-2012) has been established for the Seine from upstream of the Paris city (Choisy) to the estuary (Poses). Energy balances for two warmer years (2009, 2010) are also calculated. The results show that the Seine tends to slightly warm the atmosphere (+16 W/m² of free surface). PROSE-PA is operational to study the impact of human activities on the water temperature of the Seine river as well as on its metabolism.

Key points

- The heat transport equation and the thermal energy balance are implemented in the PROSE-PA software
- The inputs by rivers and discharges (Wastewater treatment plants, Combined sewer overflows) control the functioning of the system
- Energy flows from wastewater treatment plants and storm overflows are five times greater than evaporation losses

Introduction

S'il est maintenant extrêmement probable que le réchauffement climatique conduira dans la meilleure hypothèse à une augmentation de la température du globe d'au minimum 1,5°C à la fin du siècle, les conséquences d'un tel changement sur le fonctionnement des centres urbains largement dépendants des eaux de surface et de leur potentiel thermique sont incertaines et suscitent des interrogations de la part de plusieurs opérateurs, comme les fournisseurs de froid ou les producteurs d'énergie. En sus de ces interrogations sociétales se pose également la question de l'effet qu'aura ce réchauffement sur le fonctionnement biogéochimique des cours d'eau. Ces transformations sont susceptibles d'engendrer de nouveaux *blooms* algaux, pénalisant les filières de potabilisation de l'eau, ou encore de remettre en cause l'ensemble des mesures visant à rétablir la continuité écologique en menaçant certaines espèces de poissons peu à même de supporter des températures élevées.

La température de l'eau constitue également l'un des facteurs de contrôle de la dégradation de la matière organique et de l'intensité de l'activité des communautés vivantes dans les milieux aquatiques. Outre les activités des microorganismes, les activités humaines (rejets des stations d'épuration, refroidissement des réacteurs nucléaires, rafraîchissement urbain avec l'eau de la Seine) ont un impact sur le milieu récepteur à la traversée de l'agglomération parisienne.

Afin d'étudier ces différents enjeux, le transport de chaleur dans le réseau hydrographique a été développé dans le logiciel PROSE-PA en tenant compte du bilan d'énergie à la surface libre, *i.e.* à l'interface eau-air. Cela a nécessité deux actions majeures :

- la librairie *libseb* a été développée en C ANSI pour calculer le bilan d'énergie air-eau pour chaque maille de calcul de PROSE-PA
- la librairie *libttc* qui résout l'équation de transport (advection et dispersion) pour les espèces dissoutes a été adaptée aux spécificités des écoulements à surface libre en rivière au cours des travaux de thèse

de Wang (2019). L’un des intérêts majeurs de libttc, pensé dès l’origine de la création de cette librairie, est que l’équation de transport est résolue dans sa forme réduite, ce qui permet d’étudier à la fois le transport de soluté et le transport de chaleur.

Les objectifs de ce rapport, qui s’inscrit à la croisée des programmes de recherche CONSACRE (CONTinuité écologique de la Seine et intérêt des ACteurs pour sa REstauration) financé par le contrat de plan Etat-région Vallée de Seine (AESN, Région Normandie, Région Ile-de-France), PIREN- Seine, et MeSeine innEAUvation financé par le SIAAP, sont donc de :

- (a) présenter le calcul du bilan des échanges thermiques à la surface libre dans la librairie *libseb*
- (b) illustrer l’équation du transport de chaleur et le schéma numérique utilisé dans le logiciel PROSE-PA
- (c) montrer la performance de PROSE-PA pour simuler la température de l’eau en Seine au regard de chroniques haute fréquence
- (d) établir un bilan d’énergie pluri-annuel (2008-2012) à la traversée de l’agglomération parisienne

1 Implémentation du transport de chaleur dans le logiciel PROSE-PA

Le logiciel PROSE-PA est une version de PROSE (Even, 1995; Even et al., 1998, 2004; Flipo et al., 2004, 2007; Vilmin et al., 2015) le couplant à un filtre particulaire afin d’assimiler les concentrations en oxygène dissous observées dans le milieu récepteur (Wang et al., 2019; Wang, 2019). Au sein de PROSE-PA, trois librairies principales servent à effectuer les calculs hydraulique (*libhyd*), transport (*libttc*) et biogéochimique (*C-RIVE*). Afin de modéliser le bilan des échanges thermiques à l’interface air-eau, une nouvelle librairie, *libseb* (Surface Exchange Budget library), a été créée et couplée dans PROSE-PA.

Pour définir le bilan thermique complet sur une section de cours d’eau, l’équation de conservation de l’énergie est requise, sous la forme suivante (transport de la température) (Sinokrot and Stefan, 1993) :

$$\frac{\partial(T_w)}{\partial t} = -U \frac{\partial(T_w)}{\partial x} + D_L \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} + \frac{H_{tot}}{\rho \cdot c_p \cdot d} \quad (1)$$

où T_w désigne la température de l’eau (K), U la vitesse moyenne de l’écoulement dans la section ($m.s^{-1}$), D_L le coefficient de dispersion longitudinal ($m^2.s^{-1}$), ρ la densité de l’eau ($kg.m^{-3}$), c_p la capacité calorifique de l’eau ($J.K^{-1}.kg^{-1}$) et d la profondeur moyenne de la section (m). Le premier terme de la partie de droite représente le transport advectif et le second le transport diffusif. Quant au dernier terme de l’équation Eq. (1), comprenant H_{tot} , il correspond au flux énergétique total à l’interface air-eau, qu’il soit entrant ou sortant ($J.m^{-2}.s^{-1}$).

1.1 Bilan des échanges thermiques entre eau et atmosphère à l’aide de *libseb*

La librairie *libseb* rend, à partir des données météorologiques spatio-temporelles, un bilan global des échanges thermiques entre eau et atmosphère. C’est précisément ce flux (H_{tot}) que *libseb* calcule. Il se décompose en quatre termes :

$$H_{tot} = H_{sw} + H_{lw} + H_{lh} + H_{sh} \quad (2)$$

où H_{sw} (Boyd and Kasper, 2003) désigne le flux dû au rayonnement solaire (ondes courtes), H_{lw} (Benyahya et al., 2012) le flux dû aux rayonnement par ondes longues (atmosphère/environnement), H_{lh} (Dingman, 2008) le flux d’énergie par évapo-condensation (chaleur latente de transition de phase) et H_{sh} (Bowen, 1926) le flux de chaleur par convecto-conduction (chaleur sensible).

Les quatre flux du bilan d'énergie à l'interface air-eau sont détaillés ci-dessous.

1.1.1 Flux d'énergie dû au rayonnement par ondes courtes

$$H_{sw} = (1 - R_{sw}) \cdot H_{sun} \cdot vts \quad (3)$$

où R_{sw} est l'albédo moyen de l'eau (entre 5% et 10% en fonction de l'étude), H_{sun} le rayonnement solaire total ($W.m^{-2}$), qui est une donnée SAFRAN, et vts inversement proportionnel à la couverture végétale locale (*view to sky* de 0% à 100% quand il n'y a aucune végétation).

1.1.2 Flux d'énergie dû au rayonnement par ondes longues

$$H_{lw} = \underbrace{H_{atm} \cdot vts}_{\text{atmosphère}} + \underbrace{\varepsilon_v (1 - vts) \sigma \cdot T_a^4}_{\text{couv. végétale}} - \underbrace{\varepsilon_w \cdot \sigma \cdot T_w^4}_{\text{rivière}} \quad (4)$$

où H_{atm} est le rayonnement atmosphérique total ($W.m^{-2}$), qui est une donnée SAFRAN, ε_v l'émissivité des végétaux, σ la constante de Stefan-Boltzmann ($5,670367 \times 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$), T_a la température de l'air (K), ε_w l'émissivité de l'eau et T_w la température de l'eau (K).

1.1.3 Flux d'énergie par évapo-condensation

$$H_{lh} = \rho_w \cdot L_{l \leftrightarrow g} \cdot \bar{E} \quad (5)$$

tel que \bar{E} le taux d'évaporation de l'eau de rivière ($m.s^{-1}$) prend la forme suivante

$$\bar{E} = f_{wind} \cdot (e_a(T_a) - e_s(T_w))$$

où f_{wind} ($m.s^{-1}/Pa$) est une fonction dépendant de la vitesse du vent u_{wind} (prenant souvent la forme : $f_{wind} = a \cdot u_{wind} + b$, avec a et b des constantes empiriques), e_a est la pression de vapeur dans l'air et e_s la pression de vapeur au ras de l'eau (Pa). ρ_w correspond à la masse volumique de l'eau liquide ($kg.m^{-3}$) et $L_{l \leftrightarrow g}$ la chaleur latente de transition de phase liquide/gaz ($J.kg^{-1}$).

1.1.4 Flux d'énergie par conducto-convection

$$H_{sh} = C_B \cdot \underbrace{\frac{P_a}{P_{ref}} \cdot \frac{T_w - T_a}{e_a(T_a) - e_s(T_w)}}_{\text{terme de Bowen}} \cdot H_{lh} \quad (6)$$

où C_B correspond à une constante empirique déterminée par (Bowen, 1926) ($Pa.K^{-1}$), P_a à la pression moyenne de l'air au niveau de l'interface eau/air (Pa) et P_{ref} à la pression atmosphérique de référence (= 101325Pa).

1.2 Transport de chaleur dans le réseau hydrographique à l’aide de *libttc*

Le transport de chaleur dans le réseau hydrographique est calculé par la librairie *libttc*. L’équation (1) est implémentée dans *libttc* en remplaçant la vitesse moyenne U par le débit $Q (= A \times U)$, puisque l’équation (1) n’est valide que pour un champ de vitesses uniforme. A correspond à la surface mouillée au centre d’une section (m^2). Par ailleurs, la profondeur moyenne d de la section sera approximée par le ratio $d = \frac{A}{W}$, où W est la largeur au miroir de la section. L’équation de transport de chaleur formulée en débit et tenant compte des flux d’énergie latéraux (f_x) s’écrit ainsi,

$$\frac{\partial(AT_w)}{\partial t} = -\frac{\partial(QT_w)}{\partial x} + AD_L \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} + \frac{WH_{tot}}{\rho \cdot c_p} + f_x \quad (7)$$

1.2.1 Discrétisation numérique de l’équation de transport

On peut regrouper les flux latéraux (f_x) et les flux d’énergie à l’interface air-eau ($\frac{WH_{tot}}{\rho \cdot c_p}$) afin de faciliter l’écriture de la discrétisation numérique.

$$F_x = \frac{WH_{tot}}{\rho \cdot c_p} + f_x \quad (8)$$

La discrétisation se fait en temps et en espace de la même manière que pour les espèces dissoutes (Wang, 2019).

$$\begin{aligned} & \frac{A_i^n T_i^n - A_i^{n-1} T_i^{n-1}}{\Delta t} + \theta \frac{Q_{i+\frac{1}{2}}^n T_i^n - Q_{i-\frac{1}{2}}^n T_{i-1}^n}{\Delta x} + (1 - \theta) \frac{Q_{i+\frac{1}{2}}^{n-1} T_i^{n-1} - Q_{i-\frac{1}{2}}^{n-1} T_{i-1}^{n-1}}{\Delta x} \\ & = D_L (A_i^n \theta \frac{T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n}{\Delta x^2} + A_i^{n-1} (1 - \theta) \frac{T_{i+1}^{n-1} - 2T_i^{n-1} + T_{i-1}^{n-1}}{\Delta x^2}) + \theta F_x^n + (1 - \theta) F_x^{n-1} \end{aligned} \quad (9)$$

$i + \frac{1}{2}$ et $i - \frac{1}{2}$ représentent les indices des faces d’une section i . Les débits et les surfaces mouillées sont calculés par la librairie *libhyd* avec les équations de Saint-Venant. Dans l’implémentation actuelle de la librairie *libttc*, le schéma implicite ($\theta = 1$) est utilisé.

2 Validation

2.1 Domaine d’étude

Afin de valider l’équation de transport de chaleur implémentée dans ProSE-PA (Wang et al., 2019), un modèle depuis l’amont de l’agglomération parisienne (Choisy) jusqu’à l’estuaire (Poses) a été construit (Fig. 1). Dans ce domaine, neuf stations de mesure de la température de l’eau (huit stations de SIAAP et une station de CLIMESPACE) ont été sélectionnées.

Les températures associées aux rejets journaliers des stations d’épuration sont fournies par le SIAAP. Les températures associées aux déversoirs d’orage sont considérées comme la température de l’eau brute à la station d’épuration Seine Aval. Les températures pour la Seine, la Marne et l’Oise sont renseignées grâce à des stations de mesure du SEDIF.

L’équation de transport de chaleur implémentée dans ProSE-PA est validée par une simulation en condition contrôlée dans un premier temps (Section 2.2). Dans un deuxième temps, les températures de l’eau en Seine simulées sont comparées aux observations à neuf stations de mesure (Section 2.3).

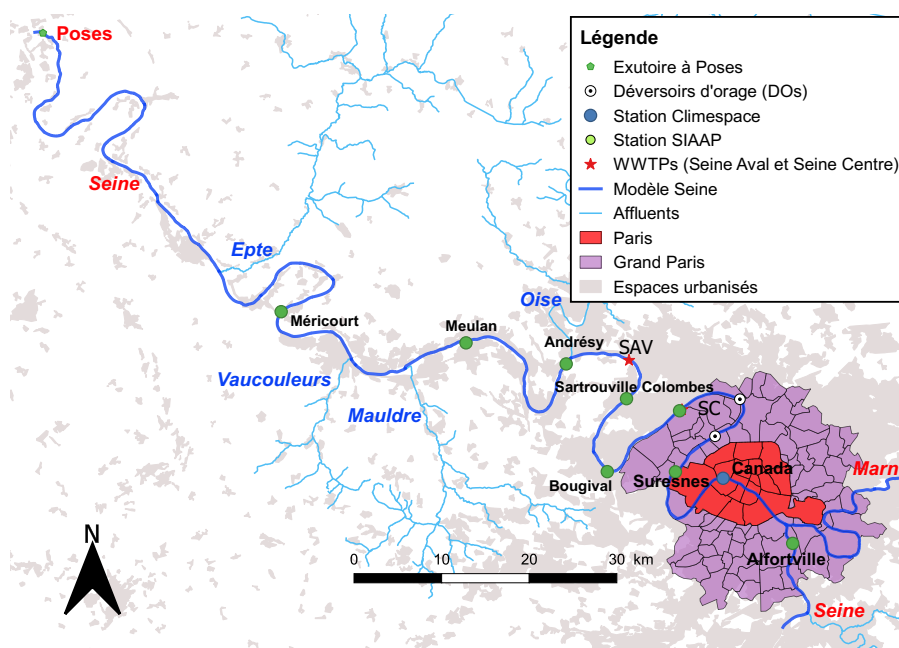


Figure 1. Domaine d'étude

2.2 Validation par une simulation en conditions contrôlées

Pour valider l’advection, les températures des affluents et des rejets des stations d’épuration, de temps sec et des déversoirs d’orage sont fixées à 25 °C (298.15 K). Les températures pour les rivières (Seine, Marne, Oise) sont également fixées à 25 °C (298.15 K).

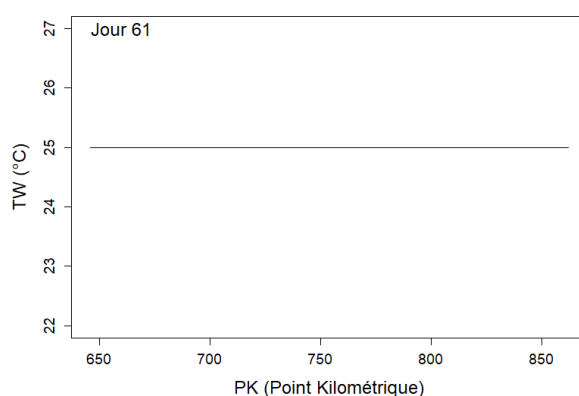


Figure 2. Températures simulées en Seine de Choisy (PK = 646.15) à Poses (PK = 862.00) pour le jour 61 (avec jour 0 = 2011-01-01)

Les débits sont variables en fonction du temps. Une simulation pour l’année 2011 (365 jours) a été réalisée sans tenir compte des échanges thermiques entre air et eau. Théoriquement, les températures dans l’ensemble du domaine simulé devraient être à 25 °C (298.15 K). Cette condition contrôlée donne donc une solution théorique de 25 °C, ce que représente parfaitement le logiciel PROSE-PA, comme illustré par un profil longitudinal en Seine (de Choisy (PK = 646.15) à Poses (PK = 862.00)) pour le jour 61 (Fig. 2).

2.3 Validation par comparaison aux mesures de terrain

Pour une validation complète du transport de chaleur dans PROSE-PA, une simulation de 2008 à 2012 a été réalisée à l’aide du modèle de Choisy à Poses forcé par des températures journalières observées dans les rejets (STEP, DO, temps sec) et les affluents (Fig. 1). Les variations temporelles des températures simulées au droit de neuf stations de mesure (SIAAP et CLIMESPACE) sont comparées aux observations haute fréquence.

2.3.1 Données du SIAAP

Les résultats montrent que les températures de l’eau sont globalement bien simulées avec PROSE-PA (Fig. 3 et 4). En revanche, les différences entre simulations et observations sont relativement importantes de juillet 2009 à janvier 2010 à la station d’Alfortville (Fig. 3). Il semble que la sonde de température ne soit pas bien positionnée, puisque les observations oscillent beaucoup pendant cette période. De plus, on peut également observer des écarts importants pour l’année 2011 en étiage, où l’eau en Seine simulée est plus fraîche que l’eau observée à partir de la station de Suresnes (Fig. 3). Cela peut s’expliquer par la non-intégration dans le modèle de rejets chauds à la traversée de Paris. Un travail sera prochainement mené pour corriger ce biais.

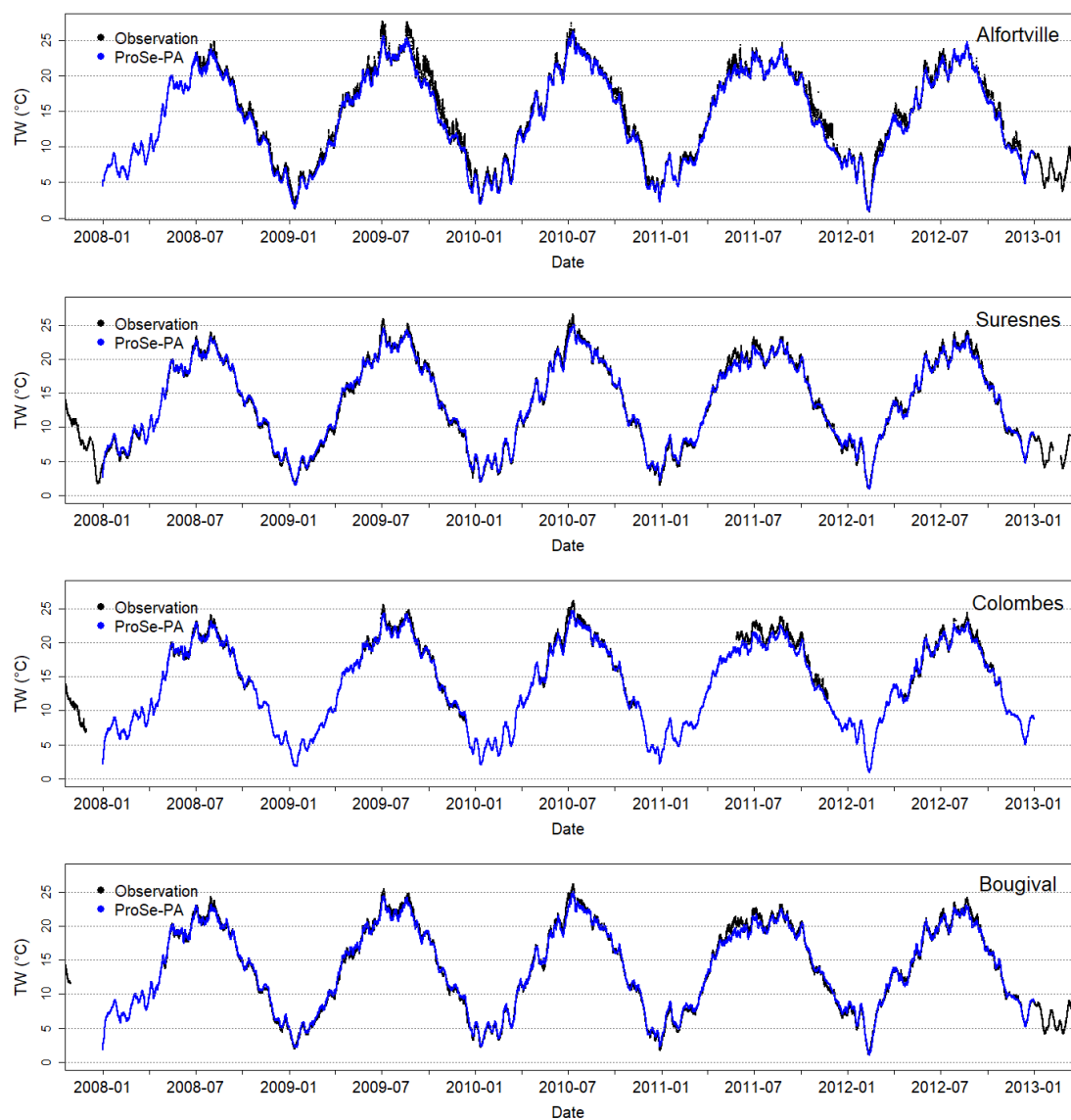


Figure 3. Températures simulées aux quatre stations de surveillance du SIAAP de 2008 à 2012

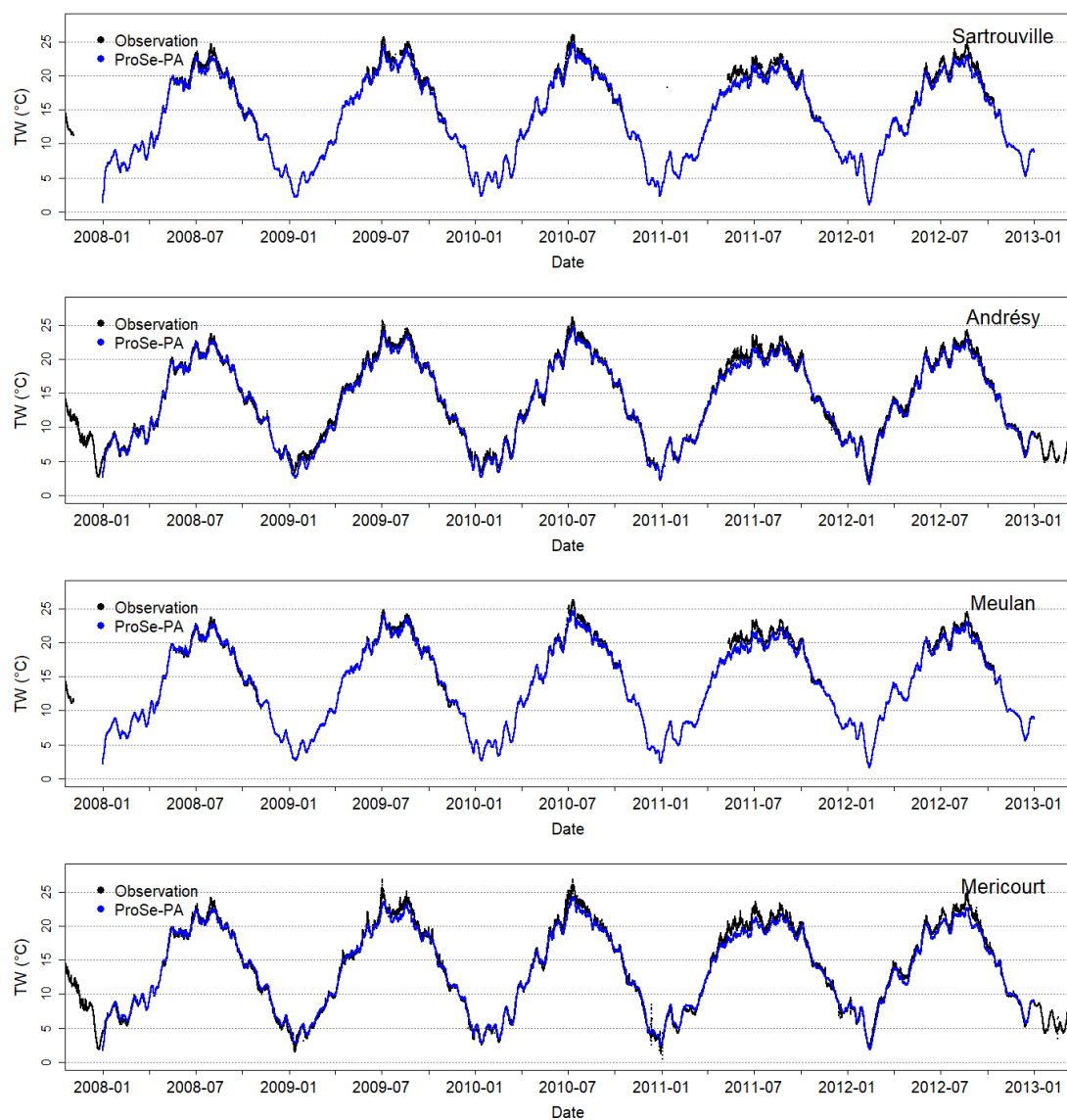


Figure 4. Températures simulées aux quatre stations de surveillance du SIAAP de 2008 à 2012

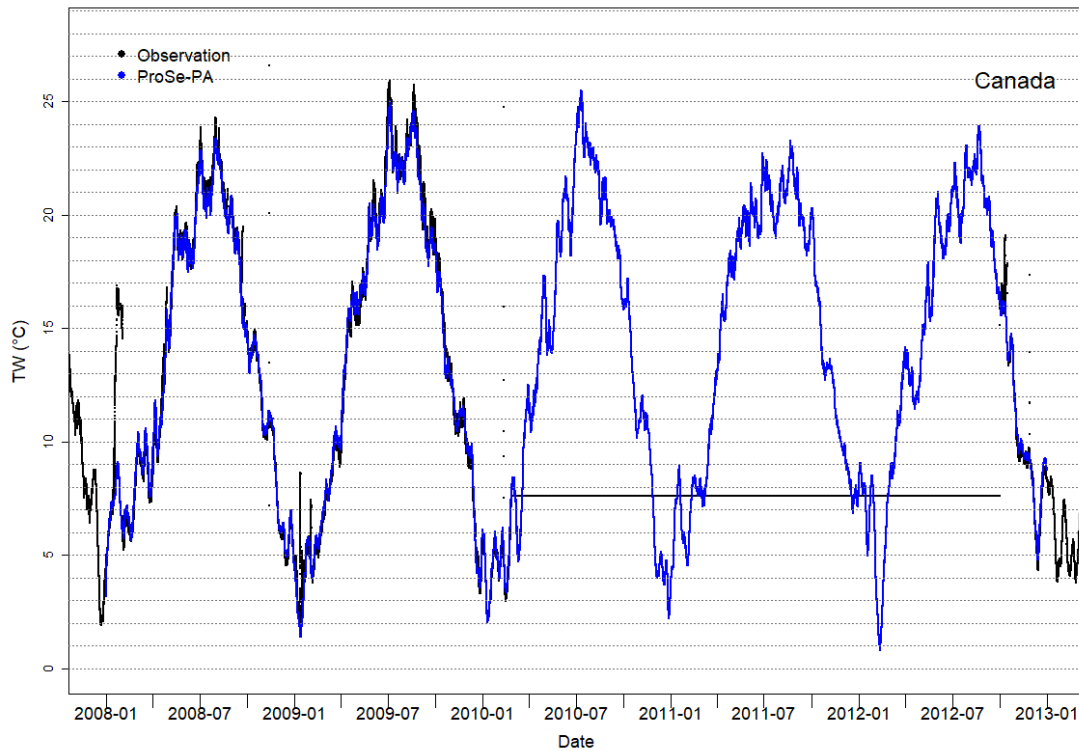


Figure 5. Températures simulées à la station de surveillance Canada du CLIMESPACE de 2008 à 2012

2.3.2 Données CLIMESPACE

Les températures de l’eau à la station de mesure Canada de CLIMESPACE sont également bien simulées (Fig. 5). On observe aussi que les observations à la station Canada ne sont pas représentatives pour certaines périodes (début 2008, entre janvier 2010 et septembre 2012).

3 Bilan d’énergie à la traversée de l’agglomération parisienne

Dans cette section, les bilans d’énergie à la traversée de l’agglomération parisienne sont établis. Pour exploiter les résultats, un bilan pluriannuel 2008-2012 est d’abord estimé sur l’ensemble du domaine d’étude. Les bilans sont ensuite estimés pour deux années plus chaudes (2009, 2010, Fig. 3 et 4).

Les erreurs associées au bilan d’énergie sont également calculées à chaque pas de temps (Eq. 10) afin de s’assurer que le modèle est bien conservatif.

$$erreur = J_{end} - J_{init} - (H_{tot} + F_{in} + F_{out} + F_{lat}) \times \Delta t \times S \quad (10)$$

Où J_{init} (J) est l’énergie au début du temps de calcul et J_{end} (J) l’énergie à la fin du pas de temps de calcul. F_{in} (W/m²) représente le flux d’énergie entrant à l’amont du domaine et F_{out} (W/m²) le flux d’énergie sortant à l’aval du domaine ; F_{lat} (W/m²) est le flux d’énergie latéral dû aux rejets et affluents. Δt (s) est le pas de temps de calcul et S (m²) la surface associée.

Une erreur relative est alors définie de la manière suivante (Eq. 11) :

$$Erreur_{relative} = 100 \times \frac{erreur}{J_{end} - J_{init}} \quad (11)$$

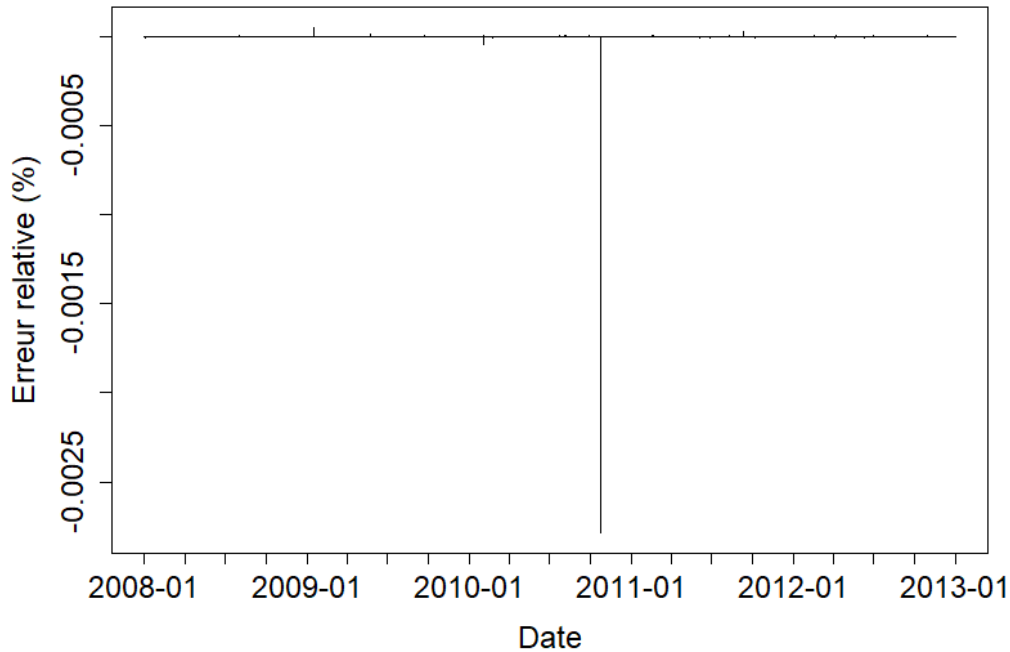


Figure 6. Erreurs relatives du bilan d'énergie thermique pour l'ensemble du domaine simulé

Les erreurs relatives calculées pour 2008-2012 sont très faibles (toujours inférieures à 0.003 % en valeur absolue, cf Fig. 6), ce qui montre que le bilan d'énergie thermique est bien conservatif et le calcul pertinent.

3.1 Bilan d'énergie pluriannuel 2008-2012

D'après les résultats obtenus, le flux d'énergie à l'interface air-eau est estimé à -16 W/m^2 . Le signe négatif représente un flux de chaleur de l'eau vers l'atmosphère, ce qui illustre qu'en moyenne l'air refroidit l'eau en Seine pour 2008-2012. Parmi les quatre termes (Eq. (2)), les flux les plus importants sont H_{sw} et H_{lh} . Le flux d'énergie dû au rayonnement par ondes courtes (H_{sw}) est estimé à 130 W/m^2 tandis que le flux d'énergie par l'évapo-condensation est de -98 W/m^2 (Fig. 7). De manière plus inattendue, le flux d'énergie relié au rayonnement par ondes longues est négatif (-46 W/m^2), et correspond ainsi à une perte d'énergie pour la rivière équivalente à la moitié de l'évaporation.

Cependant les échanges d'énergie à la surface libre sont négligeables face aux flux d'énergie provenant des rivières et des rejets, *i.e.* de l'ordre de 10 à 100 W/m^2 à mettre en regard de $10\,000 \text{ W/m}^2$. Les flux d'énergie provenant de la Marne et de l'Oise sont de 3017 W/m^2 et de 3490 W/m^2 . En moyenne, les flux d'énergie dus aux rejets anthropiques sont de 536 W/m^2 , ce qui représente un flux d'énergie apporté au système quatre fois plus important que celui apporté par le rayonnement par ondes courtes, et un flux cinq fois plus important que les pertes par évaporation. Du fait de ces apports, la Seine stocke de l'énergie à hauteur de 31 W/m^2 ($H_{tot} + F_{in} + F_{out} + F_{lat}$, Fig. 8).

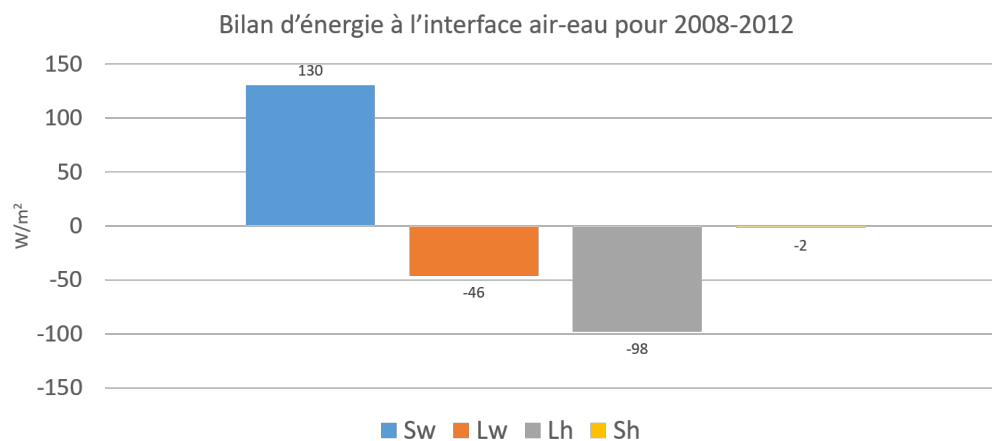


Figure 7. Bilan d'énergie entre air et eau pour 2008-2012. Sw : Flux d'énergie dû au rayonnement par ondes courtes ; Lw : Flux d'énergie dû au rayonnement par ondes longues ; Lh : Flux d'énergie par évapo-condensation (chaleur latente) ; Sh : Flux d'énergie par conducto-convection (chaleur sensible)

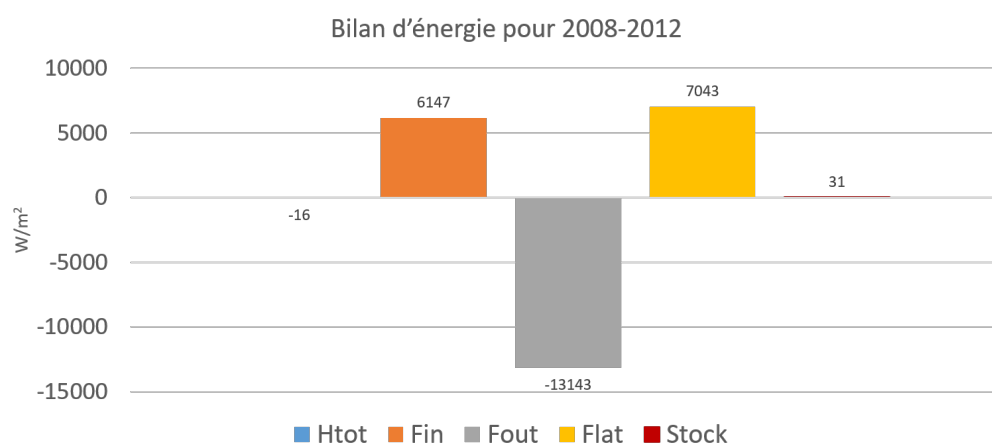


Figure 8. Bilan d'énergie pour 2008-2012. Htot : Flux d'énergie entre air et eau ; Fin : Flux d'énergie entrant à l'amont du domaine ; Fout : Flux d'énergie sortant à l'aval du domaine ; Flat : Flux d'énergie latéral dû aux rejets et affluents ; Stock : Stock d'énergie dans le système

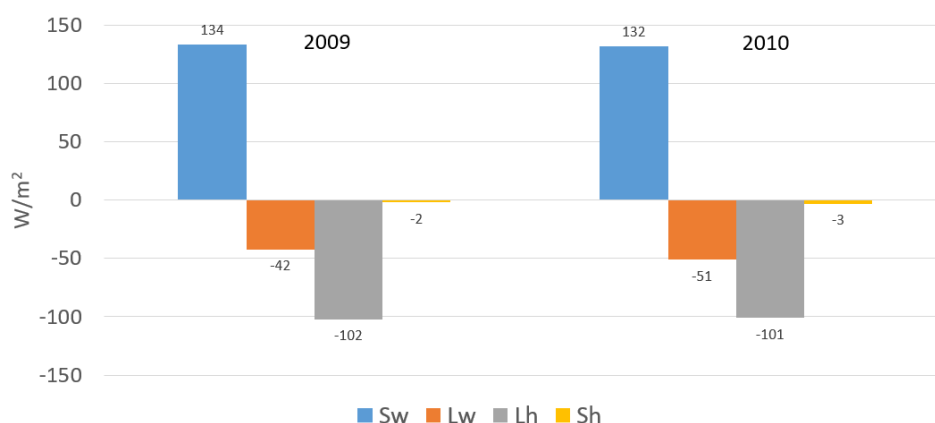


Figure 9. Bilan d'énergie entre air et eau pour 2009 et 2010. Sw : Flux d'énergie dû au rayonnement par ondes courtes; Lw : Flux d'énergie dû au rayonnement par ondes longues; Lh : Flux d'énergie par évapo-condensation (chaleur latente); Sh : Flux d'énergie par conducto-convection (chaleur sensible)

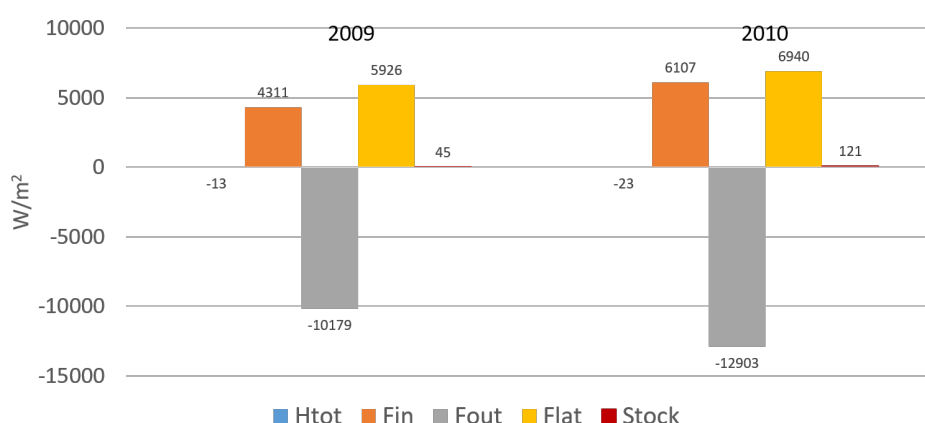


Figure 10. Bilan d'énergie pour 2009 et 2010. Htot : Flux d'énergie entre air et eau; Fin : Flux d'énergie entrant à l'amont du domaine; Fout : Flux d'énergie sortant à l'aval du domaine; Flat : Flux d'énergie latéral dû aux rejets et affluents; Stock : Stock d'énergie dans le système.

3.2 Bilan d'énergie pour les années 2009 et 2010

Les résultats pour 2009 et 2010 sont similaires (Fig. 9 et 10). Cependant, on observe que le flux d'énergie net à l'interface air-eau pour 2010 est quasiment deux fois plus important que celui de 2009 (-23 W/m^2 vs -13 W/m^2). Le flux d'énergie dû au rayonnement par ondes courtes est stable avec une valeur autour de 130 W/m^2 pour 2009, 2010 et 2008-2012 (Fig. 9). On observe pourtant entre ces deux années une plus forte variabilité du flux d'énergie par ondes longues (-42 et -51 W/m^2 respectivement pour 2009 et 2010). Le stock d'énergie pour 2010 est estimé à 120 W/m^2 et 48 W/m^2 pour 2009.

Conclusion

Dans le cadre du développement du logiciel PROSE-PA, le bilan des échanges thermiques à l'interface air-eau via la librairie *libseb* et le transport de chaleur en rivière via la librairie *libttc* ont été implémentés.

L’équation de transport de chaleur implémentée dans PROSE-PA a d’abord été validée par une simulation en conditions contrôlées. Les températures de l’eau simulées par PROSE-PA ont ensuite été comparées aux mesures de terrain.

D’après les résultats obtenus, PROSE-PA est capable de simuler correctement les températures de l’eau en Seine. En revanche, les résultats montrent une sous-estimation des températures de l’eau en étiage au cours de l’année 2011. Cette sous-estimation est certainement liée à des rejets non renseignés ou mal quantifiés en amont de la station de Suresnes.

Un bilan d’énergie préliminaire depuis l’amont de l’agglomération parisienne (Choisy) jusqu’à l’estuaire (Poses) a été établi de 2008 à 2012. Le résultat montre que l’eau en Seine a tendance à réchauffer l’air (en moyenne de 16 W/m^2). Le flux d’énergie dû au rayonnement par ondes courtes (H_{sw}) et la chaleur latente par évapo-condensation (H_{lh}) sont les deux composantes principales d’échange de chaleur à l’interface air-eau, cependant largement minoritaires face aux flux de chaleur transitant dans les rivières (de l’ordre de plusieurs milliers de W/m^2). En moyenne, les apports des STEP et des déversoirs d’orage directs en Seine représentent cinq fois les pertes par évaporation. Les bilans d’énergie ont également été établis pour les deux années plus chaudes, 2009 et 2010, indiquant des résultats similaires. PROSE-PA est donc opérationnel pour réaliser des études sur l’impact des activités humaines sur la température de l’eau de la Seine, notamment au travers des rejets dont on voit toute l’importance sur le bilan d’énergie. Les bilans d’énergie sur plusieurs secteurs de la Seine seront prochainement établis notamment pour la décennie 2010, qui a été la plus chaude jamais enregistrée par l’humanité.

Bibliographie

- Benyahya, L., D. Caissie, M. G. Satish, and N. El-Jabi (2012). Long-wave radiation and heat flux estimates within a small tributary in catamaran brook (new brunswick, canada). *Hydrological Processes* 26(4), 475–484.
- Bowen, I. S. (1926, Jun). The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Phys. Rev.* 27, 779–787.
- Boyd, M. and B. Kasper (2003). Analytical methods for dynamic open channel heat and mass transfer : Methodology for the heat source model version 7.0. Technical report, Oregon Department of Environmental Quality, Portland, OR.
- Dingman, S. (2008). *Physical Hydrology*. Waveland Press.
- Even, S. (1995). *Modélisation d’un écoulement fluvial : La Seine. Le modele ProSe*. Ph. D. thesis, PhD thesis, Ecole des mines de Paris.
- Even, S., M. Poulin, J. Garnier, G. Billen, P. Servais, A. Chesterikoff, and M. Coste (1998). River ecosystem modelling : Application of the PROSE model to the Seine river (France). *Hydrobiologia* 373, 27–37.
- Even, S., M. Poulin, J. M. Mouchel, M. Seidl, and P. Servais (2004). Modelling oxygen deficits in the Seine river downstream of combined sewer overflows. *Ecol. Model.* 173, 177–196.
- Flipo, N., S. Even, M. Poulin, M. H. Tusseau-Vuillemin, T. Améziane, and A. Dauta (2004). Biogeochemical modelling at the river scale : Plankton and periphyton dynamics - Grand Morin case study, France. *Ecol. Model.* 176, 333–347.
- Flipo, N., C. Rabouille, M. Poulin, S. Even, M. H. Tusseau-Vuillemin, and M. Lalande (2007). Primary production in headwater streams of the Seine basin : the Grand Morin case study. *Sciences of Total Environment* 375, 98–109.

- Sinokrot, B. A. and H. G. Stefan (1993). Stream temperature dynamics : Measurements and modeling. *Water Resources Research* 29(7), 2299–2312.
- Vilmin, L., N. Aissa-Grouz, J. Garnier, G. Billen, J. M. Mouchel, M. Poulin, and N. Flipo (2015). Impact of hydro-sedimentary processes on the dynamics of soluble reactive phosphorus in the Seine River. *Biogeochemistry* 122, 229–251.
- Wang, S. (2019). *Simulation du métabolisme de la Seine par assimilation de données en continu*. Ph. D. thesis, Université PSL, MINES ParisTech, France.
- Wang, S., N. Flipo, and T. Romary (2019). Oxygen data assimilation for estimating micro-organism communities’ parameters in river systems. *Water Research* 165, 115021.