

**Université Pierre et Marie Curie, École des Mines de Paris  
& École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts**

---

**Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie  
Parcours Hydrologie-Hydrogéologie**

**Influence de la climatisation par l'eau sur la température de la Seine :  
conditions actuelles et évolution sous changement climatique**

**Alice Boutinot**

**Directrices de recherche :**

**Agnès Ducharne, UMR Sisyphe, UPMC**

**Michèle Merchat, Climespace**



**Climespace**

**185 Rue de Bercy- 75012 PARIS**

**20 Septembre 2011**



## Abstract

Climespace is a company that produces cooling water for several buildings in Paris. To cool down the icing-water, some centrals use the Seine's water. It therefore supplies warmer water in the Seine. The question is then: what is the impact of Climespace? What are the links between the water temperature and the weather? What is the influence of Climespace on the environment?

To answer these questions, a determinist model gathering meteorological and external parameters has been created.

Running with Climespace own measures of temperatures and discharges and SAFRAN's weather parameters, the model's calculations are based on the heat transfer equation. Several calibrations have been made for the model to fit reality the best.

As a first run, the comparison between the observed temperatures  $T_0$  just before the warm water supply and the simulated temperatures without taking into account Climespace is done. It gives us the information that without the influence of Climespace, the Seine temperature would decrease downstream. Then, to validate the model with the action of Climespace, we have compared the measured values of temperature taken at a precise point along the Seine and the calculated values at the same distance of the Canada central. According to the data used, there is a more or less important difference between the temperatures during summer. However, the model works really well during winter.

The model was thus used to calculate the real impact of Climespace. When the "with-Climespace" and "without-Climespace" simulated temperatures are compared; it appears that the impact of Climespace on the Seine's temperature is higher during summer time when the air temperature is the highest. The difference between those temperatures can then be more than  $1^{\circ}\text{C}$  after a simulation of 10km.

To go further in the understanding of the evolution of the Seine's, the comparison of the evaporation rate according to the humidity of the air is made. Taking constant weather parameters (summer 2003) but a high and a low specific humidity rate, two fictional summers are created: a warm and dry one on one hand and a warm and moist one on the other hand. The model is run to see the differences between these two. As one could expect, the plume of high temperatures due to Climespace decreases faster with a dry weather than a moist one.

As a conclusion, one can say that this model is a good tool to foresee the impact that Climespace can have on the Seine temperature, especially in a context of climate change. The fact that we can draw and quantify this impact helps for the future of the company but also for its present and the rules it has to deal with.

## Table des matières

Abstract .....	2
Introduction.....	5
I. Présentation du système.....	6
A. Le fonctionnement de Climespace.....	6
B. Description du système .....	6
1. Règlementation concernant la Seine .....	8
2. Etudes pré-existantes.....	9
C. La problématique soulevée .....	11
II. Les processus physiques mis en jeu .....	12
A. Rayonnement solaire net .....	13
B. Rayonnement par ondes longues.....	13
C. Convectif.....	13
D. Evaporation .....	15
E. Rejets Climespace.....	15
F. Les flux négligés.....	16
III. Données disponibles .....	18
A. Données sur la météo .....	18
B. Données de Climespace .....	19
C. Déterminer la vitesse U de la Seine dans Paris .....	20
1. Les différentes formules.....	21
2. Exemple : Définir la vitesse U à la centrale de Bercy .....	21
D. Calcul de la pression de vapeur saturante .....	26
IV. La mise en place du code .....	27
A. Comment discrétiser l'équation de la chaleur .....	27
B. Construction des boucles spatio-temporelles.....	29
1. Mise en place de la boucle temporelle par fréquence.....	29
2. Mise en place de la boucle spatiale.....	30
V. Les résultats obtenus.....	31
A. Evaluation du modèle.....	31
1. Test qualitatif.....	31
2. Tests avec Climespace .....	32
B. Impact thermique de Climespace.....	34
C. Influence de la météo sur l'impact des rejets thermiques de Climespace .....	37

VI.	Les limites du modèle .....	39
VII.	Conclusion et perspectives.....	40
VIII.	Bibliographie.....	41
	Annexe 1 : Liste des variables et constantes.....	43
	Annexe 2 : Largeur du panache.....	46
	Annexe 3 : Calculs des vitesses pour les centrales Canada et Tokyo.....	47
	Annexe 4 : Distances entre chaque site .....	49

## Introduction

La température est une donnée essentielle de la qualité des eaux. Ce paramètre joue un rôle majeur dans de nombreux processus physiques et chimiques. Il est donc important de veiller à garder une température adéquate pour la survie des espèces vivant dans les rivières.

L'entreprise de climatisation Climespace pompe dans la Seine pour évacuer la chaleur du réseau de froid urbain et y rejette donc par la suite de l'eau plus chaude. Elle souhaite connaître l'influence de ses installations sur la Seine et répondre aux questions suivantes : au bout de combien de temps la Seine réchauffée retrouve un état d'équilibre ? Climespace contribue-t-elle au réchauffement global de la Seine ?

Pour ce faire, un modèle a été réalisé. Le but du modèle est de tenter de comprendre comment les échanges entre les températures de l'air et de l'eau influencent le comportement du rejet thermique en Seine. Il s'agit donc de faire un programme qui permet de voir l'évolution de la température de la Seine en fonction de la distance au point de rejet au fil du temps et des forçages climatiques et industriels qui s'exercent sur ces températures.

Pour cela on utilisera un modèle déterministe qui considère l'évolution de la température en fonction des flux de chaleur entrant et sortants. Pour cela, on prendra la méthode des différences finies.

Une fois le modèle numérique mis en place, il sera soumis à plusieurs tests : qualitatif, numérique et de validation. Suite à cela, il sera utilisé avec les données de Climespace et de forçage météo fournies par SAFRAN pour calculer sur chaque pas d'espace et de temps des températures d'eau de Seine.

Les résultats seront par la suite analysés et comparés les uns aux autres pour en tirer les conclusions répondant aux problématiques.

## I. Présentation du système

### A. Le fonctionnement de Climespace

Climespace est une entreprise qui produit de l'eau glacée par le biais de différents sites et la distribue à travers un réseau de froid urbain. Les bâtiments tertiaires parisiens raccordés utilisent ce réseau pour évacuer la chaleur interne générée.

Le réseau de Climespace est composé de 7 centrales (dont 3 sites Eau de Seine) et de 3 centres de stockages (Figure 1).

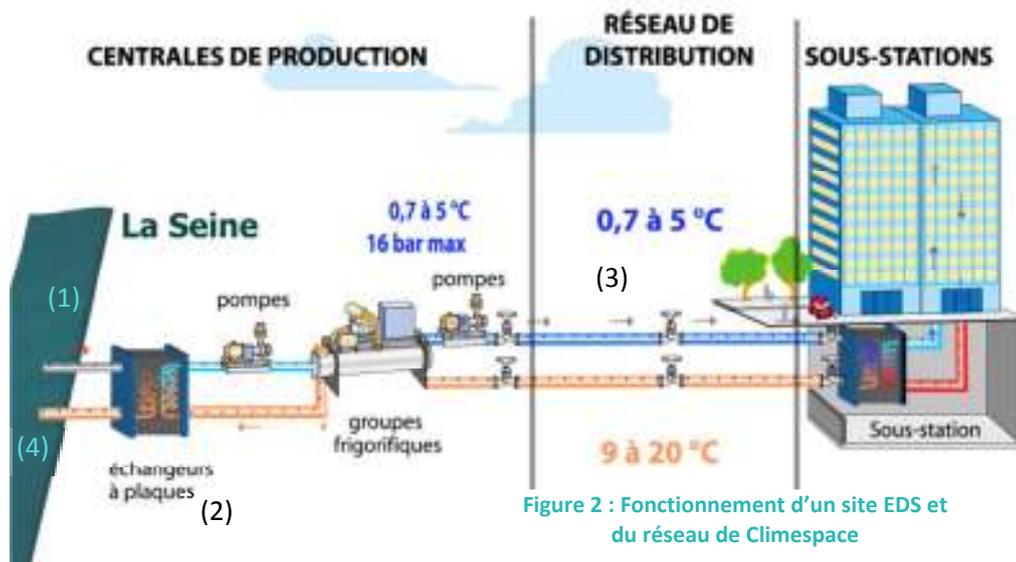


Figure 1 : Réseau de Climespace dans Paris. Les 3 centrales de production Eau de Seine sont Bercy, Canada et Palais de Tokyo

Seuls les 3 sites EDS (Bercy, Canada et Tokyo), qui produisent 90% de la puissance, sont concernés par cette étude.

### B. Description du système

Les sites EDS Seine fonctionnent selon le principe qui est exposé sur la **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** L'eau de la Seine est pompée à une température  $T_0$  (1) (Figure 2), vers un échangeur à plaques (2), au travers duquel elle prend la chaleur de l'eau du réseau qu'elle refroidit. Ainsi l'eau de seine prélevée est rejetée en aval avec quelques degrés de plus.



La distance entre ces points de pompage et de rejet est différente pour chaque site. A l'aide de l'outil ArcGIS (Figure 3) on a pu définir précisément cette distance (Tableau 1).

Site	Bercy	Canada	Tokyo
Distance Prise/rejet (m)	14,7	14,4	39,4

Tableau 1 : Récapitulatif des distances entre les points de prélèvement d'eau de Seine d'un site et les points de rejet

Les centrales n'ayant pas été mises en place en même temps, chaque ouvrage a ses particularités. Bercy est la plus vieille centrale (1993) mais elle a été rénovée récemment. Elle partage son tuyau de rejet avec la CPCU (Compagnie Parisienne de Chaleur Urbaine). De plus elle alimente seule le réseau situé dans l'est de Paris.

Tokyo (2007) et Bercy ont des bassins de décantations pour stocker l'eau de Seine entrante et des filtres, alors que la centrale de Canada (2002) mise sur une optimisation de l'espace car sa surface est très faible et l'eau est seulement filtrée. Ces différentes dates de mise en service expliquent des réglementations différentes.

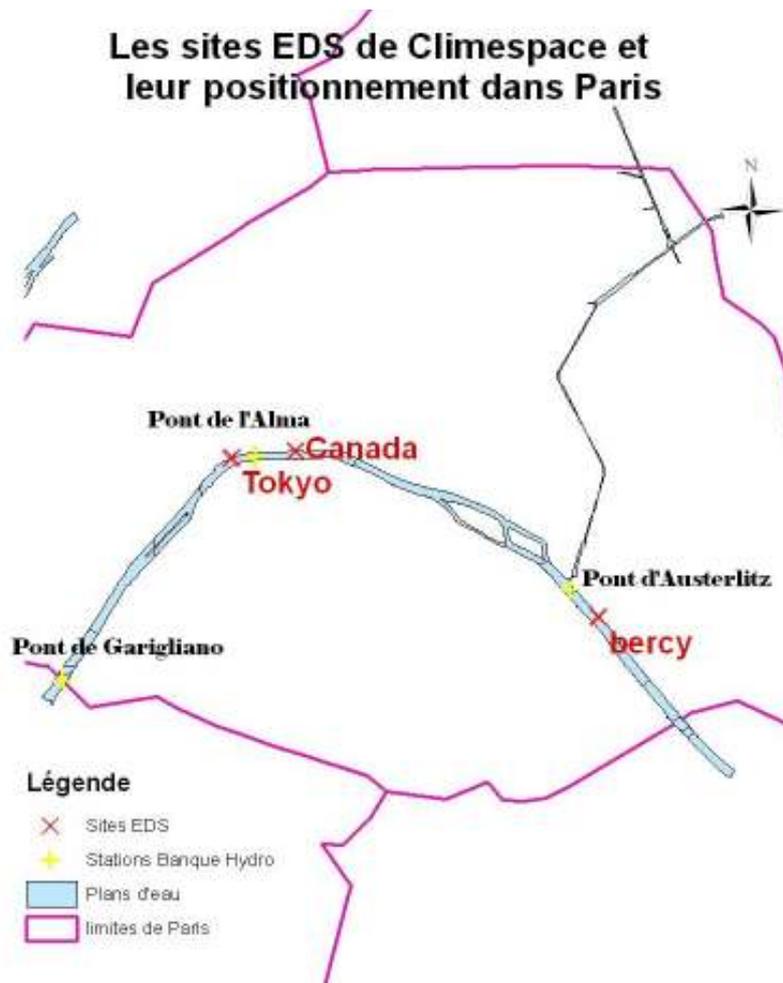


Figure 3 : Carte de Paris indiquant les différents points utilisés pour ce travail. Les centrales EDS sont représentées en rouge et les stations de la Banque Hydro permettant les validations de température du modèle en jaune

## 1. Règlementation concernant la Seine

Les prescriptions sont fixées par des arrêtés de la préfecture de Paris, ils sont spécifiques de chaque site.

Le site de Bercy, ayant une mise en service plus ancienne, peut rejeter de l'eau ayant une température allant jusqu'à 30°C et ce quelle que soit la température de la Seine et la période de l'année.<sup>1</sup>

A l'inverse, la centrale Canada est la plus limitée. En effet, la température de ses rejets thermiques ne doit jamais dépasser une différence de 5°C<sup>2</sup> avec la température de la Seine dans la limite d'un rejet à 30°C.

La centrale de Tokyo quant à elle, peut rejeter l'eau dans la Seine avec une différence de température de 10°C en hiver et 5°C en été dans la limite d'une température de 30°C pour le rejet<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Loi-cadre sur l'eau (1998)

<sup>2</sup> Arrêté d'exploitation

<sup>3</sup> Arrêté d'exploitation et annexe à l'arrêté d'autorisation du 31 janvier 2005

## 2. Etudes pré-existantes

Avant la mise en service d'un site, l'étude d'impact sur l'environnement prévoit la réalisation d'une étude de dispersion du panache. L'objectif est alors uniquement de démontrer que la plume thermique ne traverse pas l'intégralité de la Seine et que la vitesse d'aspiration est inférieure ou égale à  $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  (afin d'éviter une influence sur les péniches à proximité).

En 2008, Climespace a souhaité estimer l'influence sur le fleuve des plumes thermiques issues des 2 sites refroidis par la Seine les plus proches l'un de l'autre, à savoir Tokyo et Canda. Sur la Figure 4, on peut voir le résultat d'une campagne de mesures de températures de la Seine (IXSURVEY, 22 octobre 2008) pour ces centrales.

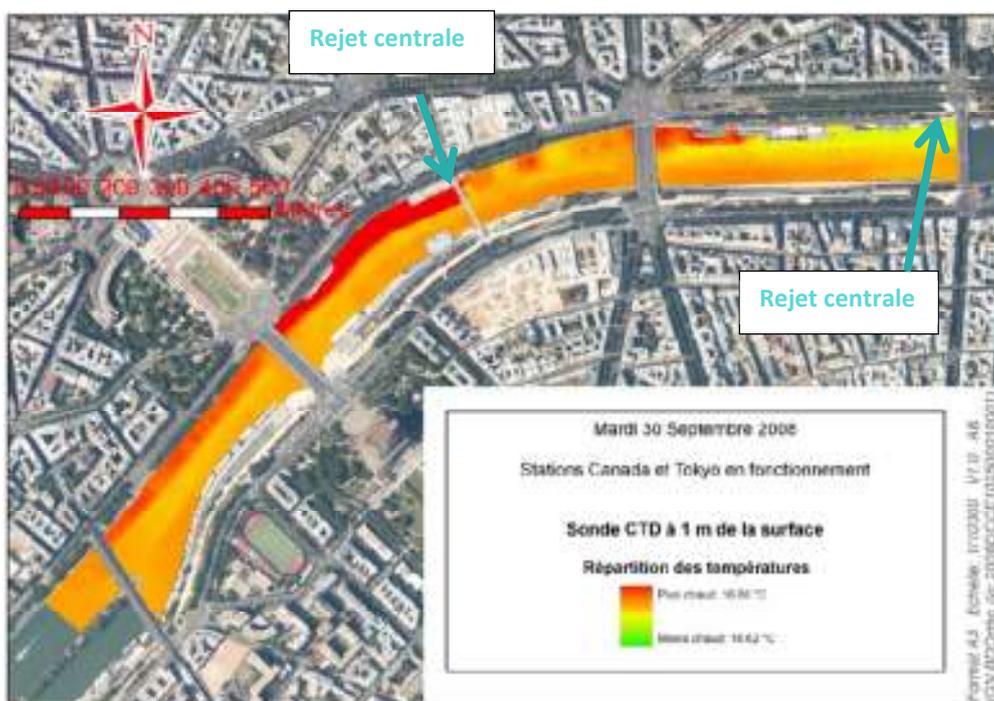


Figure 4 : Représentation des plumes thermiques des centrales de Canada et de Tokyo existant dans la Seine le 30 septembre 2008 (IXSURVEY, 22 octobre 2008) . Les températures les plus élevées sont figurées en rouge. On peut observer d'autres points de chaleur sur la Seine qui sont dus à des rejets d'égoût.

Comme on peut le voir sur cette figure, la plume thermique due à Climespace s'étend pour chaque station sur plusieurs centaines de mètres. Comme exigé par la réglementation, cette plume n'est localisée que d'un côté de la Seine et ne dépasse pas la moitié de la largeur  $W$  de la Seine. De plus, quand on observe les données permettant la création d'une telle carte, on peut lire que l'épaisseur maximale de la Seine impactée est de 3m. On peut donc estimer que la pollution thermique de Climespace se déplace dans un « tube » d'une largeur  $W/2$  propre à chaque site (Tableau 2 : Récapitulatif des largeurs  $W$  de la Seine et des largeurs de panache  $W/2$  selon le site et Annexe 2).

Site Eau de Seine	Largeur Seine, $W$ (m)	Largeur rejet, $W/2$ (m)
Bercy	140	31,25
Canada	117	26,78
Tokyo	110	35,71

Tableau 2 : Récapitulatif des largeurs  $W$  de la Seine et des largeurs de panache  $W_2$  selon le site EDS de Climespace suite à une interprétation du rapport de IXSurvey (22/10/2008) et par rapport aux puissances annuelles dégagées par ces centrales.

Cette campagne de mesure est toutefois partielle car ponctuelle et uniquement sur 2 sites. Il faut donc un outil permettant de la compléter.

Pour avoir un meilleur aperçu des différences de température entre  $T_0$  et  $T_{clim}$ , la différence entre ces deux valeurs pour l'année 2010 au site de Tokyo a été faite (Figure 5). On peut ainsi voir que les températures et  $\Delta T$  varient au cours de l'année (et donc selon les besoins et demandes des clients en énergie froid).

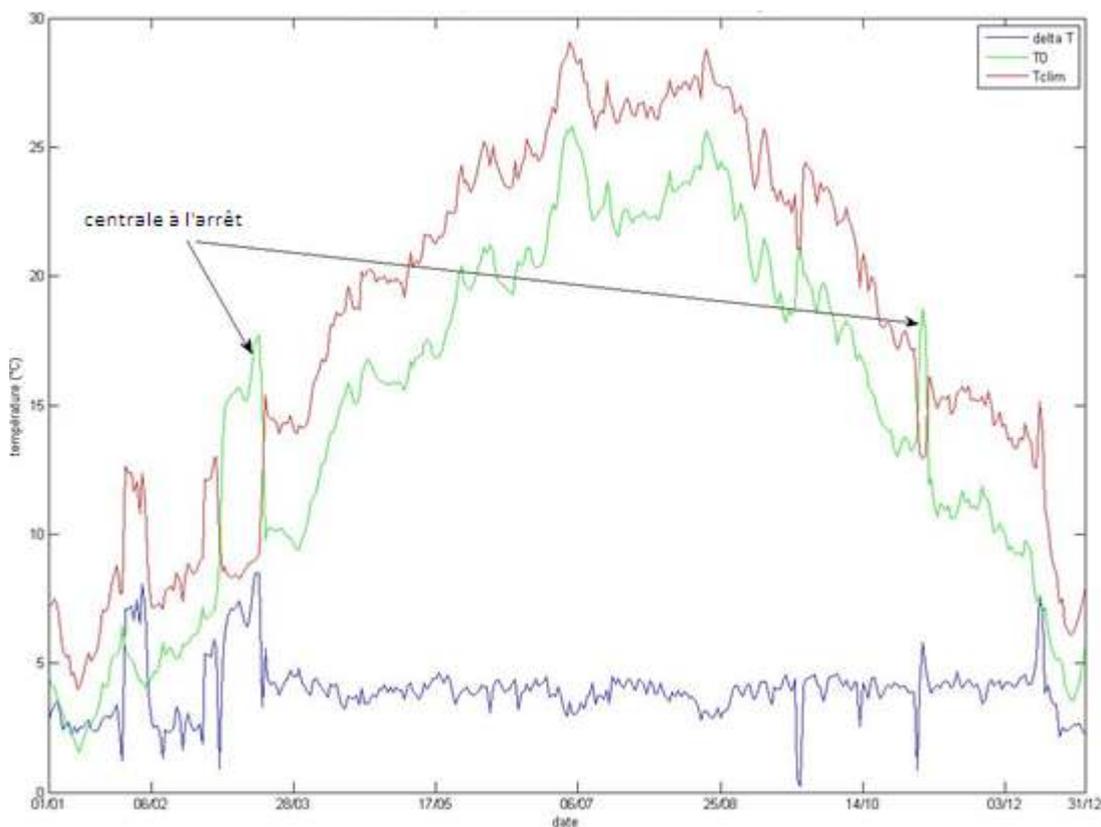


Figure 5 : Variation du delta de température entre la température de l'eau de Seine  $T_0$  et du rejet de Climespace  $T_{clim}$  pendant l'année 2010 sur le site de Tokyo. Lorsque la centrale est à l'arrêt  $T_0$  reflète la température du bâtiment et augmente.

La courbe bleue représente la différence de température entre la prise et le rejet. Pour la période de l'année 2010 dite « chaude » (28 mars- 21 sept, bien que l'été ait été caractérisé comme en dessous des normales saisonnières), le  $\Delta T$  a une moyenne de  $3,82^\circ\text{C}$  par opposition à  $3,39^\circ\text{C}$  en période « froide » (22 sept- 10mars).

Ces moyennes ont été faites sans prendre en compte les températures mesurées quand la centrale de Tokyo était à l'arrêt. En effet, ces valeurs sont faussées car pour la centrale de Tokyo, les  $T_0$  sont mesurées dans les bassins en entrée de site. Quand l'eau n'est pas renouvelée pendant un certain temps, elle prend la température du bâtiment et sa température sera supérieure à celle de la Seine et plus du tout représentative de celle de l'eau.

Au vue de ces résultats, on peut donc s'attendre à un faible impact thermique de Climespace pendant les périodes plus froides de l'année.

Comme on pouvait s'y attendre, la limite de l'arrêté préfectoral de 10°C n'est jamais dépassée et la tendance de la courbe de  $T_{\text{clim}}$  suit celle de  $T_0$  (Figure 5). De plus, la distance étant très faible entre  $T_0$  et  $T_{\text{clim}}$ , le  $\Delta T$  est forcément due à Climespace.

### C. La problématique soulevée

Climespace utilise préférentiellement les sites refroidis par eau de Seine, parce qu'ils sont beaucoup plus performants que les sites à tours de refroidissement et réduisent considérablement l'impact sur l'environnement (réduction des consommations électriques, des consommations d'eau, de produits chimiques, de la pollution visuelle). Or, plus la puissance évacuée est importante, plus la quantité d'eau de Seine réchauffée augmente.

Il est naturel de se questionner quant à l'influence de ces rejets sur le réchauffement global de la Seine.

Est-ce que les échanges entre l'eau et l'air permettent à la Seine de rapidement retrouver son équilibre initial ? Et d'ailleurs, est-ce que les conditions climatiques (en particulier l'hygrométrie de l'air) influencent les échanges air-eau au point d'affecter l'impact de la plume thermique ?

Ainsi, après avoir réalisé des recherches sur les différents phénomènes qui permettent les échanges de chaleur entre les rivières et l'air et récupéré les différents paramètres utiles, un modèle de calcul numérique simulant l'évolution des températures en Seine a été créé.

Ce modèle appliqué aux données de Climespace permet d'estimer la température du fleuve soumis à l'influence des rejets des sites de production de froid.

## II. Les processus physiques mis en jeu

Les variations de la température de l'eau résultent de celles du bilan d'énergie et de masse (Mosheni, et al., 1999). La température de l'eau varie en fonction de plusieurs facteurs autres que les apports industriels. De fait, l'eau échange de la chaleur avec l'atmosphère par des rayonnements d'ondes courtes et longues, par de la convection et de l'évaporation à travers la surface du plan d'eau (Bogan, et al., 2003). Ces échanges sont représentés sur la Figure 6.

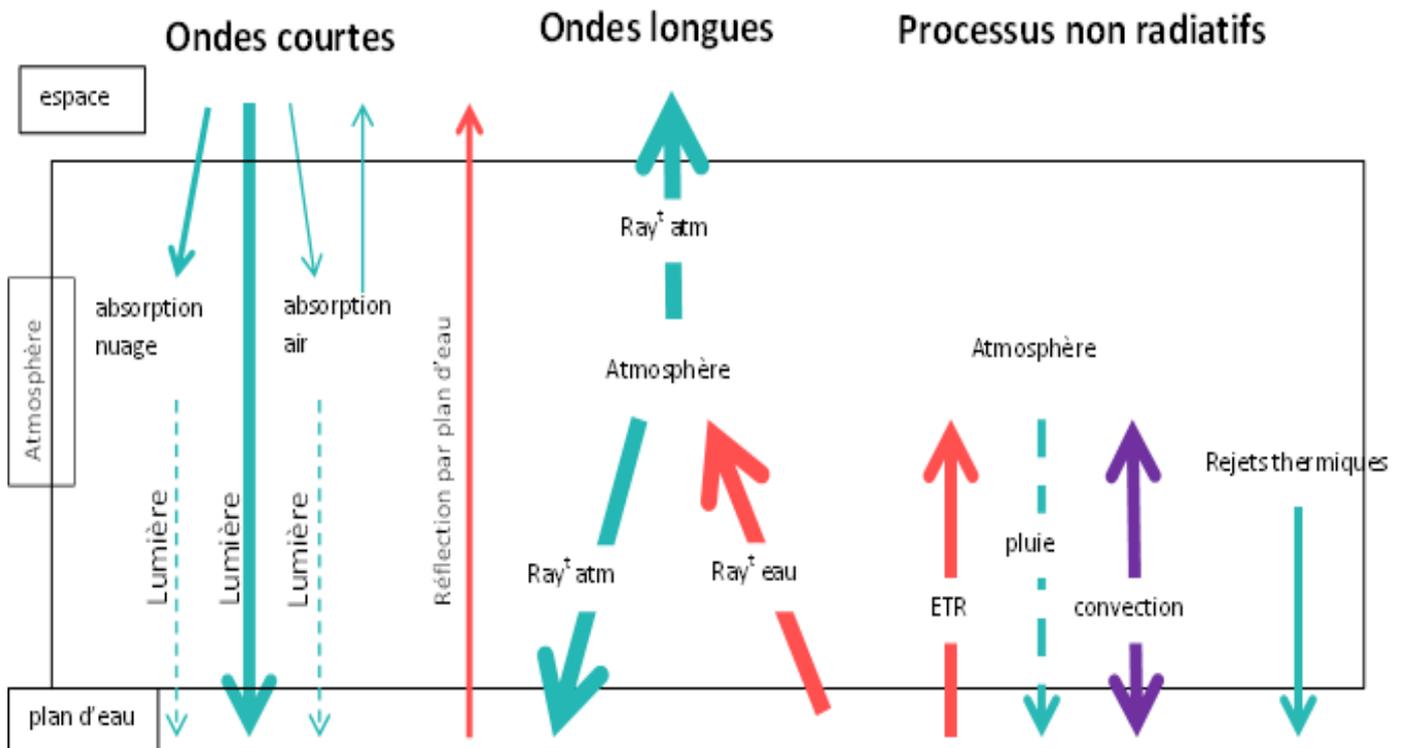


Figure 6 : Bilan des flux de chaleur

- : flux de chaleur reçus par l'eau
- : flux de chaleur émis par l'eau
- ↔ : flux à double sens.

Afin de pouvoir quantifier la diffusion de la chaleur, on utilisera donc l'équation de la chaleur (Eq.1) (Sinokrot, et al., 1993):

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} - D_l \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{S}{\rho c_w dd}$$

T : température de l'eau (K)

t : temps (s)

x : distance (m)

U : vitesse de la Seine (m.s<sup>-1</sup>)

D<sub>l</sub> : paramètre de dispersion

S : flux total de chaleur

ρ : masse volumique de l'eau 1000 kg/m<sup>3</sup>

c<sub>w</sub> : capacité calorifique de l'eau (4186 J/kg/K)

dd : épaisseur de la Seine impactée par le panache thermique

Dans cette équation,  $S$  correspond au flux total de chaleur à la surface de la rivière qui est la somme de tous les différents flux (Caissie, et al., 2005). On aura donc comme bilan ( $S$ ) des échanges de chaleur:

$$\text{Bilan} = \text{radiation solaire nette} + \text{rayonnement infrarouge} + \text{flux convectif} \\ + \text{flux évaporatif} + \text{rejet de Climespace}$$

$$S = H_{ns} + H_l + H_c + H_e + H_{clim}$$

Afin de mieux comprendre les phénomènes physiques jouant un rôle dans ces échanges, chaque flux de chaleur sera détaillé avec les paramètres rentrant en compte.

### A. Rayonnement solaire net

Le rayonnement solaire net est la principale source d'énergie. Ce flux est fonction du rayonnement solaire incident ( $R_g$ ) mais également de l'albédo de la surface ( $\alpha$ ) qui reçoit ce rayonnement. Dans l'équation de Bogan, et al. (2003), l'ombrage est également pris en compte. L'ombrage sur les berges de Seine au niveau des sites est faible. Le terme ( $1 - \text{ombrage}$ ) est donc négligeable.

On prendra donc comme formule cette équation :

$$H_{ns} = R_g(1 - \alpha)$$

$R_g$  : rayonnement global ( $\text{W.m}^{-2}$ )

$\alpha$  : albédo

### B. Rayonnement par ondes longues

Ce rayonnement inclut les rayonnements émis à la fois par l'atmosphère et l'eau et peut être calculé comme la différence entre les rayonnements reçus et ceux émis à la surface de l'eau (Caissie, et al., 2005).

La formule utilisée est celle de Bogan, et al. (2003) :

$$H_l = R_{atm} - (\varepsilon_w \times \sigma \times T^4)$$

$R_{atm}$  : rayonnement atmosphérique ( $\text{W.m}^{-2}$ )

$\varepsilon_w$ : émissivité de l'eau (0,94)

$\sigma$  : constante de Stefan-Boltzmann

### C. Convectif

Le flux de chaleur convective correspond à la chaleur sensible. Il représente la chaleur cédée en fonction du gradient vertical de la température de l'air. Quand l'eau est plus chaude que l'air, des cellules de convection se mettent en place dans l'air et entretiennent le renouvellement de l'air et donc les échanges de chaleur. Ce flux de chaleur dépend principalement de la différence de température entre l'eau et l'air ainsi que de la vitesse du

vent (Caissie, et al., 2005). La surface de l'eau cède plus facilement de la chaleur par convection qu'elle n'en gagne par conduction<sup>4</sup>.

Pour le calculer, on prend la formule définie dans Caissie, et al. (2005):

$$H_c = 0,042 \times v \times \frac{Pa}{1000} \times (Ta - T)$$

$H_c$  en  $MJ.m^{-2}.j^{-1}$

$P_a$  : pression atmosphérique (mmHg)

0,042 : coefficient de la chaleur convective

T : température de l'air et de l'eau(°C)

v : vitesse du vent (km.h<sup>-1</sup>)

Cette équation n'est pas en unités du système international. Il faut donc convertir chaque paramètre en unité SI :

- Pour la pression atmosphérique on aura :  $1mmHg = YhPa$ , d'où  $Pa(mmHg) = YPa(hPa)$
- Pour le vent, on aura :  $v(km. h^{-1}) = Xv(m. s^{-1})$
- Pour les températures, comme il s'agit d'une différence, l'unité n'est pas importante.
- Pour le flux lui-même,  $H_c(MJ. m^{-2}.j^{-1}) = ZH_c(W. m^{-2})$ .

On aura donc :  $H_c = \frac{1}{Z} \times Y \times X \times 0,042 \times \frac{Pa}{100} \times (Ta - T)$ .

$$Y = \frac{1013}{760} \text{ car } 760 \text{ mmHg} = 1013hPa ;$$

$$X = \frac{1}{3,6} \text{ car } 1km. h^{-1} = 1000m/3600sec ;$$

$$Z = \frac{100}{8,64} \text{ car } 10^6J/m^2.j = 10^6J/m^2.(3600 * 24)s = 100/8,64 W. m^{-2}$$

Cela donne donc comme équation finale pour le flux convectif avec tous les paramètres en unités SI:

$$H_c = \frac{8,64}{100} \times 0,042 \times \frac{1013}{760} \times \frac{1}{3,6} \times v \times \frac{Pa}{1000} \times (Ta - T)$$

$$H_c = 1,34^{-6} \times v \times P_a \times (Ta - T)$$

$H_c$  en  $W.m^{-2}$

$P_a$  : pression atmosphérique (hPa)

v : vent (m.s<sup>-1</sup>)

Comme on considère  $P_a$  constante sur Paris, on fixe sa valeur à 1011,61hPa. Cette valeur est obtenue en faisant le calcul suivant :

$$P_{alti} = P_0 \times \left( \frac{T_{moy_{paris}} - 0,0065 \times altitude_{paris}}{T_{moy_{paris}}} \right)$$

$P_0$  : pression atmosphérique de moyenne au niveau de la mer

$T_{moy_{paris}}$  : température moyenne à Paris (284,85 K soit 11,7°C)

$altitude_{paris}$  : altitude moyenne de Paris (60m)

<sup>4</sup> Transmission de chaleur de proche en proche sans déplacement global de matière.

## D. Evaporation

L'évaporation est une perte d'eau liquide à partir de la surface du plan d'eau par sa transformation plus ou moins lente en vapeur. L'évaporation de l'eau se fait naturellement, soit par la seule action de l'air, soit par la chaleur du soleil (définition de l'académie française). C'est la première cause de refroidissement des plans d'eau (Bogan, et al., 2003).

L'équation du flux évaporatif ( $W.m^2$ ) est prise dans (Caissie, et al., 2005) et mise en unités SI, d'où :

$$H_e = \frac{8,64}{100} \times 0,07 \times \frac{1013}{760} \times \frac{1}{3,6} \times v \times (e_s - e_a)$$

$$H_e = 0,002239 \times v \times (e_s - e_a)$$

$H_e$  en  $W.m^2$   
 $e_s$  et  $e_a$  en hPa

## E. Rejets Climespace

Le domaine régit par Climespace (D1) est celui qui comprend la prise d'eau de Seine et le rejet. Ce domaine mesure, dans tous les cas moins de 40m. Il est donc négligeable par rapport à la longueur d'analyse considérée en D2 (10 000m) (Figure 7). D1 est ainsi représenté par un point et sera défini pour  $x=1$ .

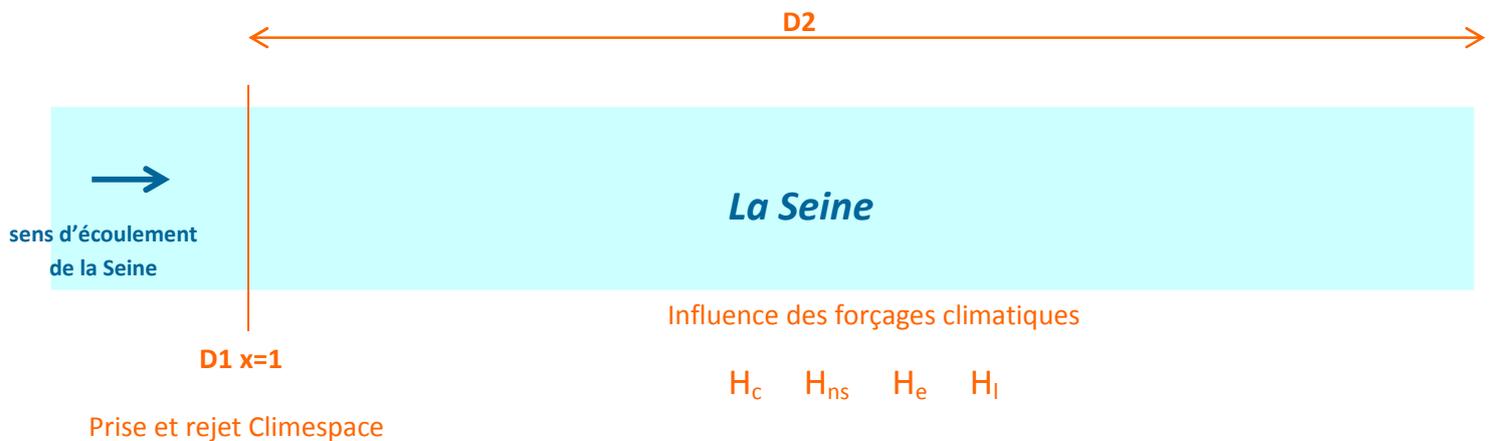


Figure 7 : Domaine de modélisation du panache thermique introduit dans la Seine par Climespace. Il est découpé en D1 et D2 chacun régit par des forçages internes à Climespace ou météo

Un mélange de chaleur est caractérisé par :

$$m_1 C p_1 T_1 + m_2 C p_2 T_2 = m_3 C p_3 T_3$$

$m$  : masse du fluide concerné (kg)

$Cp$  : capacité calorifique (kJ/kg.K)

$T$  : température du fluide concerné (K)

Le fluide concerné est, dans notre cas, l'eau. La capacité calorifique est donc toujours la même, on peut donc simplifier par ce terme.

De même, on peut pondérer par les débits correspondants aux masses d'eau. En effet, à un instant  $t$ , la masse d'eau correspond à un débit. ( $1m^3=1000kg$ ).

Dans le rapport (IXSURVEY, 22 octobre 2008), le panache thermique de Climespace a été l'objet de mesures à plusieurs profondeurs. On peut mesurer l'extension transversale de la plume (Annexe 2 et Tableau 2).

Si on pondère le débit de la Seine  $Q(t)$ , par le ratio entre l'aire du panache thermique ( $A_{panache}$ ) et l'aire totale de la section ( $aire$ ), on peut alors obtenir le débit de la Seine juste sur le section où Climespace rejette l'eau :

$$\frac{A_{panache}}{aire} \times Q(t) = Q_{panache}(t)$$

Pour le mélange de chaleur par les rejets de Climespace on a donc :

$$T_{seine}(t) = \frac{Q_{clim}(t)T_{clim}(t) + Q_{panache}(t)T_0(t)}{Q_{clim}(t) + Q_{panache}(t)}$$

$T_0$  : température (K) à l'entrée du système

$T_{clim}$  : température du rejet (K)

## F. Les flux négligés

### *Les précipitations*

Les précipitations sur la Seine ne sont pas assez importantes pour avoir un impact quantifiable sur les changements de température du fleuve.

L'impact de la pluie peut être fort sur une petite rivière mais sur toute la largeur de la Seine, la pluie a un très faible impact et uniquement sur les premiers centimètres de la lame d'eau.

### *Les échanges avec les sédiments*

Bogan (2003) souligne l'impact possible des eaux souterraines sur la température des rivières : la température de l'eau diminuerait en été et augmenterait en hiver à cause de l'apport souterrain. Le lit de la Seine a été depuis longtemps canalisé et bétonné ce qui limite énormément les phénomènes d'échanges avec les sédiments sous-jacents. Les échanges entre les sédiments et la Seine ont été quantifiés à  $0,6\text{m}^3.\text{an}^{-1}$  (Colin, 1986). Quand on compare au débit moyen de la Seine (environ  $300\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ ) cette quantité est négligeable.

### *Les autres rejets thermiques*

Dans Paris, la Seine est alimentée par le canal Saint-Martin (confluence avant l'île de la Cité) et plusieurs rejets à l'égout appartenant à la mairie de Paris.

Sur le site du Ministère du Développement Durable, on dispose d'un inventaire des rejets situés sur les axes fluviaux (DRIEE IF, 2010). Les points de rejets thermiques sur la Seine sont, outre Climespace et la CPCU, principalement des eaux pluviales urbaines strictes et des déversoirs d'orage.

Le canal de l'Ourcq rejoint Paris par la Villette. Les eaux de l'Ourcq alimentent le canal Saint-Martin mais également le Canal Saint-Denis. Le débit du canal Saint-Martin qui se jette dans

la Seine ne peut donc pas être évalué facilement et ne dépend pas linéairement du canal de l'Ourcq.

Pour connaître l'influence du débit du canal Saint-Martin sur le débit de la Seine, la question a été posée à M. Chardon, chef du Service des Canaux de Paris (Mairie de Paris). Selon le service des Canaux de Paris, le débit du canal Saint-Martin est quasi-nul tout le temps car l'eau du canal de l'Ourcq est principalement dirigée vers le canal Saint-Denis.

Par contre, quand le canal Saint-Denis n'assure plus ces fonctions correctement (en période de chômage notamment), le débit du canal Saint Martin est de  $3\text{m}^3/\text{s}$ .

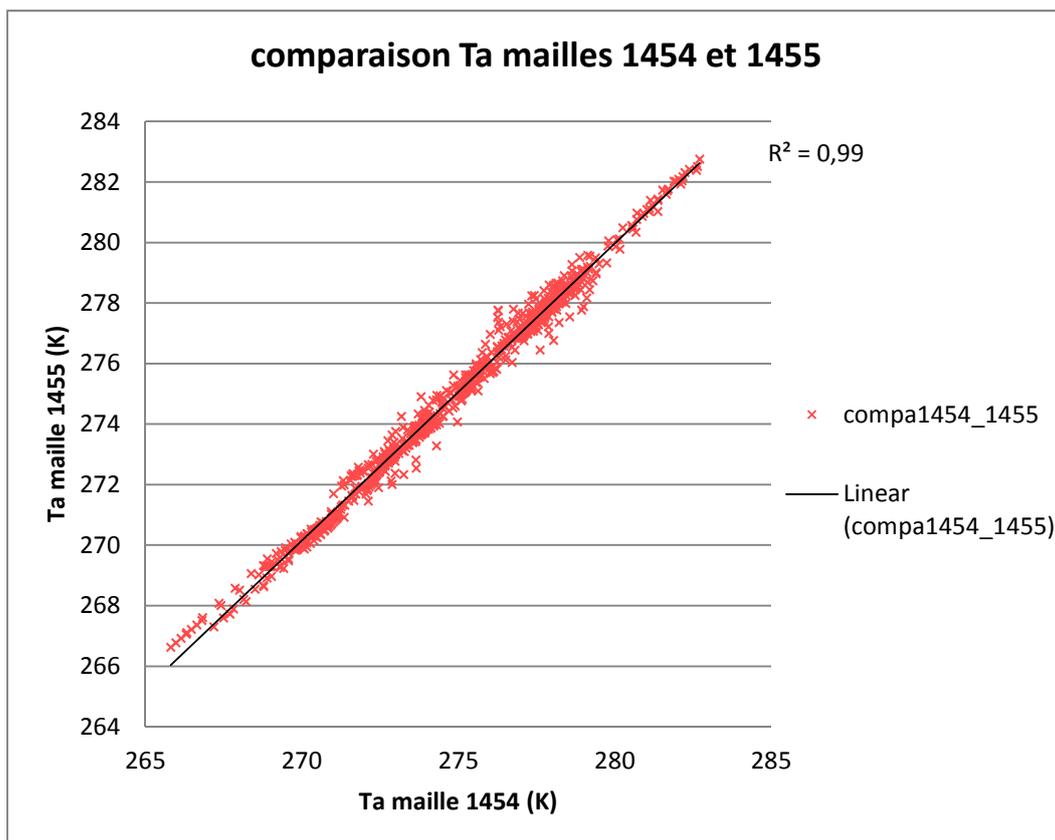
Ce débit maximal du canal représente à peine 10% du débit moyen de la Seine dans Paris. Il ne sera donc pas pris en compte dans les calculs.

### III. Données disponibles

#### A. Données sur la météo

Nous avons choisis d'utiliser les données SAFRAN<sup>5</sup> (Quintana-Seguí, 2008) (Vidal J.-P., 2003) pour les forçages météo. Les données renseignent les variables suivantes au pas de temps horaire et sur des mailles de 64km<sup>2</sup> : la température de l'air (Ta), le rayonnement atmosphérique (Ratm), le rayonnement global (Rg), la vitesse du vent à 10m de haut (vent) et la pression de vapeur atmosphérique (ea) à un pas de temps horaire.

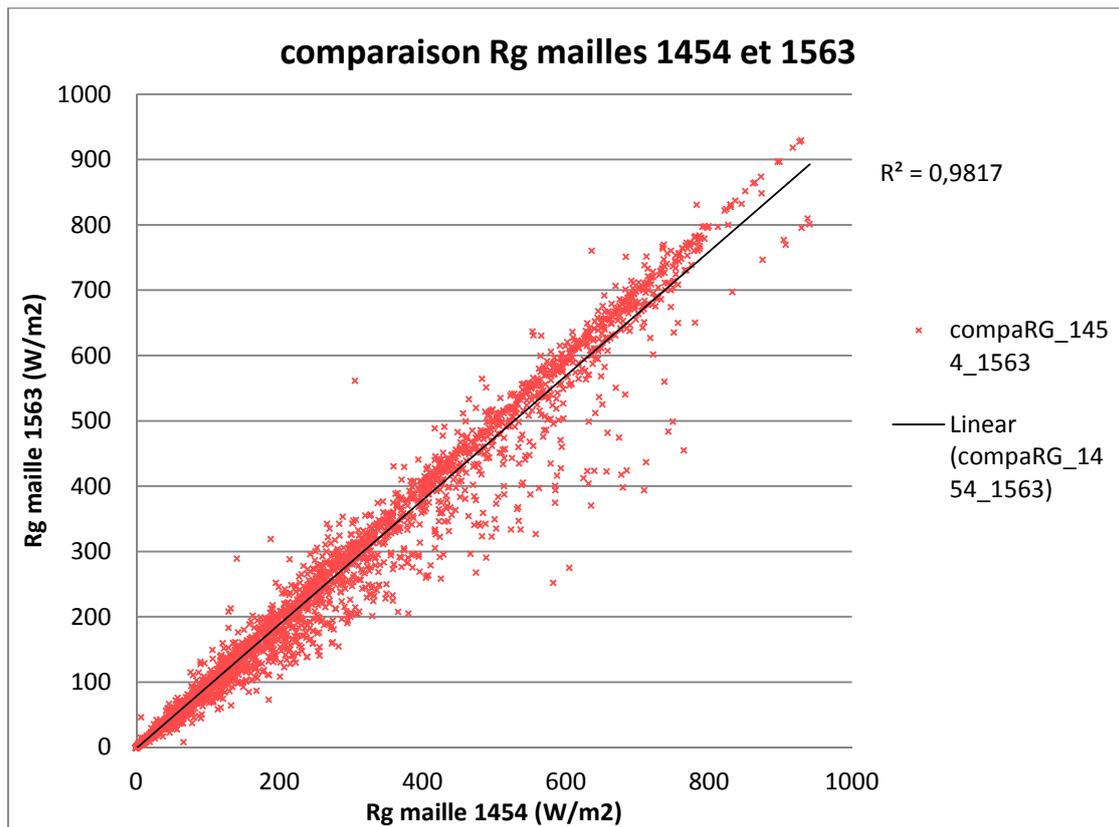
Les 3 sites EDS sont répartis sur 4 mailles SAFRAN. Il faut donc comparer les valeurs des différents paramètres de chaque maille. Sur les graphiques suivants, on peut voir une comparaison simple avec régression linéaire de 2 paramètres renseignés dans les fichiers SAFRAN. Le Graphique 1 montre la comparaison entre les mailles 1454 et 1455 pour la température de l'air pour l'année 2010. On peut voir, de par leur disposition, que ces données sont très proches ce qui est confirmé par un coefficient de régression très proche de 1.



Graphique 1 : Comparaison de la température de l'air (K) des mailles SAFRAN 1454 et 1455 pour l'année 2010

Sur le Graphique 2, c'est la variable « rayonnement global » qui est testée. Cette fois-ci, les mailles 1454 et 1563 sont comparées. On peut voir que même si les valeurs sont parfois écartées de la courbe de régression linéaire, le coefficient R<sup>2</sup> est de 0,98 ce qui montre que les valeurs sont très proches.

<sup>5</sup> Les données SAFRAN de Météo France sont obtenues via le programme PIREN-Seine.



Graphique 2 : Comparaison du rayonnement global des mailles SAFRAN 1454 et 1563 pour l'année 2009

En regardant les variations pour les autres paramètres utilisés, on se rend compte que toutes les variables SAFRAN sont similaires (voire identiques) d'une maille à l'autre. Il est donc acceptable de faire la moyenne des 4 mailles pour obtenir la valeur de chaque variable et utiliser cette valeur moyenne dans les calculs des différents flux.

Le pas de temps utilisé pour la modélisation est de 24 heures (Cf. IV.B.1). La météo étant considérée constante sur toute cette durée, une moyenne journalière des données de 4 mailles réunies est faite.

## B. Données de Climespace

Pour les températures initiales de la Seine et celles de rejets ainsi que les volumes pris par Climespace, les données sont enregistrées en permanence par des outils situés dans les stations.

Comme on peut le voir sur la Figure 8, les thermomètres de température de rejet sont situés sur les tuyaux de sortie avant que l'eau ne soit rejetée dans la Seine. Donc les températures peuvent être parfois faussées.



Figure 8 : Photo des thermomètres dans les tuyaux de sortie eau de Seine à la centrale canada

Effectivement, si le tuyau n'est pas plein lors de l'évacuation de l'eau, la sonde ne plonge pas dans l'eau et la température mesurée n'est pas exactement celle de sortie. Ainsi on a pu mesurer des  $T_{\text{clim}}$  de 45°C en juillet 2006. Une température de rejet aussi élevée sur une si longue période ne peut pas être due à la production de froid des machines. Il y a donc eu dysfonctionnement des appareils de mesures. Ces appareils ont depuis lors été remplacés et déplacés.

Il en est de même pour les températures d'entrée. Les sondes de températures étaient positionnées dans les tuyaux d'entrée de l'eau de Seine et pouvaient présenter les mêmes problèmes. Parfois, les relevés de température se font dans les bassins de décantation et on peut imaginer que cette température est légèrement différente de celle de la Seine.

Pour le traitement des données, un soin tout particulier est apporté à l'observation des températures de Climespace pour vérifier leur cohérence avec les valeurs des jours précédents et suivants. Quand elles sont repérables, elles ne sont pas prises en compte dans les calculs.

### C. Déterminer la vitesse U de la Seine dans Paris

Déterminer la vitesse de la Seine présente plusieurs intérêts. Outre son utilité pour les calculs des différents flux, il est important de la connaître afin de pouvoir vérifier le pas de d'espace.

En effet,  $U = x/t$  ( $x$  : distance(m) et  $t$  : temps (s)). On sait donc combien de temps est nécessaire à une masse d'eau pour parcourir une certaine distance et poser le pas de temps le plus adapté pour le dimensionnement du modèle.

## 1. Les différentes formules

La première formule découle naturellement de la valeur du débit par la formule (Eq.2) :

$$U = Q/\text{aire}$$

La seconde formule est celle prenant en compte les facteurs de rugosité et de pente du lit de la rivière étudiée. Elle est plus communément appelée formule de Manning-Strickler (Eq.3) :

$$U = \left( \frac{\text{aire}}{\text{perimetre}} \right)^{2/3} \times \frac{\sqrt{S}}{n}$$

$n$  : coefficient de Manning

$S$  : coefficient de pente

Pour utiliser ces équations de calcul de vitesse d'eau, l'aire, le périmètre mouillé et  $\sqrt{S}/n$  doivent pouvoir être mesurés à tout moment  $J$ . On a donc besoin de connaître la cote moyenne du fond du lit.

## 2. Exemple : Définir la vitesse $U$ à la centrale de Bercy

Avec le document de SAFEGE (2008), on peut lire les profondeurs de la Seine sur une longueur de 200m et une largeur de 70m au niveau du site EDS Bercy au 30/03/2008 (Tableau 3).

Partant du principe que le lit de la Seine est symétrique dans Paris (largeur de la Seine au site de Bercy : 140m), on peut modéliser le lit de la Seine à Bercy en partant de la rive droite.

Pour un instant donné, la section de la Figure 9 peut-être approximée par un rectangle de largeur  $W$  et de profondeur moyenne.

Afin de calculer cette profondeur moyenne au droit du site de Bercy en tout point, à tout instant  $J$ , la cote de la surface de l'eau doit être connue au moment  $J$ .

éloignement à la berge	profondeur
quai rive droite	-4,29
10m	-5,01
20m	-5,45
30m	-5,62
40m	-6,13
50m	-6,23
60m	-6,57
70m	-6,76
80m	-6,57
90m	-6,23
100m	-6,13
110m	-5,62
120m	-5,45
130m	-5,01
quai rive gauche (140m)	-4,29

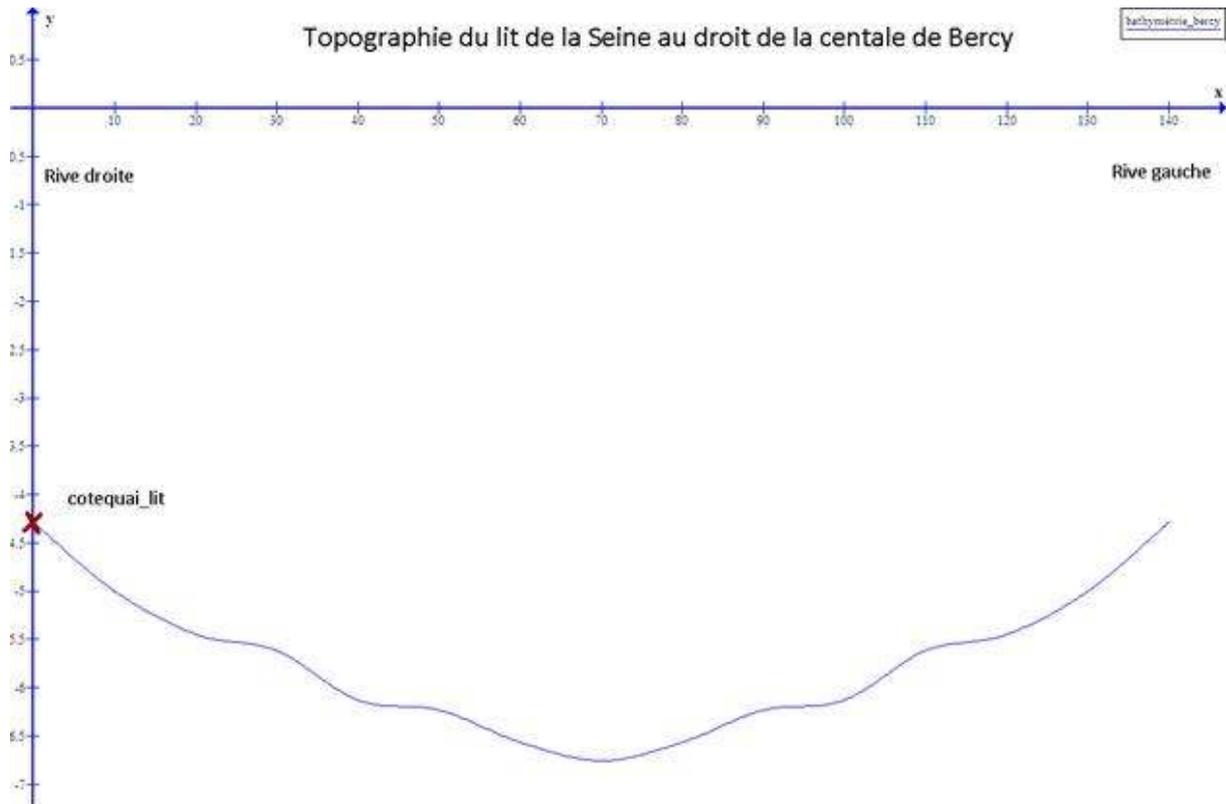


Tableau 3 et Figure 9: Topographie du fond de la Seine à Bercy et les valeurs de profondeurs associées au 30/03/2008

### a) Définition de la cote hydraulique

On utilise les chroniques de débits ( $Q$ ) et de hauteurs d'eau mesurées à la station hydro d'Austerlitz<sup>6</sup>. Pour ce faire, on émet l'hypothèse suivante : la pente de la Seine est faible dans Paris et donc la cote mesurée à la station Austerlitz est la même que celle au site de Bercy située 490m en amont (Figure 3).

On sait que ces hauteurs d'eau sont mesurées à partir du point d'altitude 25,92m NGF (le 0 de l'échelle limnimétrique).

Pour avoir les cotes de la surface de l'eau à tout instant  $J$ , il faut donc faire le calcul suivant :

$$cote_{obs} = hauteurs\ d'eau_{obs} + 25,92$$

Mais la Banque Hydro ne renseigne pas une valeur par jour. Or, à chaque hauteur correspond un débit précis. Une altitude est attribuée à la surface de l'eau quelque soit la date ou le débit du fleuve avec la fonction suivante :

$$cote_{sim} = 9,35847 \cdot 10^{-7} Q^2 + 1,518548 \cdot 10^{-3} Q + 26,93933107$$

Les cotes simulées seront celles utilisées par la suite pour les autres calculs.

<sup>6</sup> Données Banque Hydro

### b) L'aire

L'**aire(J)** de la section de la Seine au droit de Bercy est calculée par la moyenne journalière des profondeurs du lit multipliée à la largeur  $W$ . Pour ce faire, le calcul suivant est effectué:

$$aire = -((moyenne (prof)) \times W)$$

$prof$  est donnée par une fonction polynomiale de degré 2 qui modélise la topographie du fond de la Seine pour chaque site de Climespace. Pour Bercy, cette fonction est :

$$prof(x) = 0,00045229476x^2 - 0,063321267x - profquai$$

$x$  : distance à la rive droite,  $[0 ; 140]$ m  
 $R^2$  : 0,9775

Le paramètre  $profquai$  est relié à la cote par le fait que sa cote est constante (définie grâce au document SAFEGE et égale à 23,2587mNGF pour le site de Bercy).

Chaque jour, après chaque calcul de la  $cote\_sim$ , on peut donc déduire l'épaisseur de la lame d'eau existante en faisant :

$$profquai(jour) = cote\_sim(jour) - 23,2587$$

La topographie du site étant modélisée par la fonction  $prof(x)$ , on a chaque jour la représentation exacte du site EDS en fonction des variations de débit.

### c) Le périmètre mouillé

Pour le calcul du périmètre, 2 options étaient possibles : considérer la section comme un rectangle de largeur  $profquai$  et de longueur  $W$  ou suivre la même méthode que pour l'aire.

Après de nombreuses comparaisons, il s'est avéré que les changements étaient si minimes que l'option rectangle a été retenue.

Le **périmètre mouillé** de la section est calculé par :

$$perimetre = W + 2 \times (profquai)$$

$cotequai\_lit_{be}$  (Figure 8) : 23,542 m NGF pour Bercy (SAFEGE)

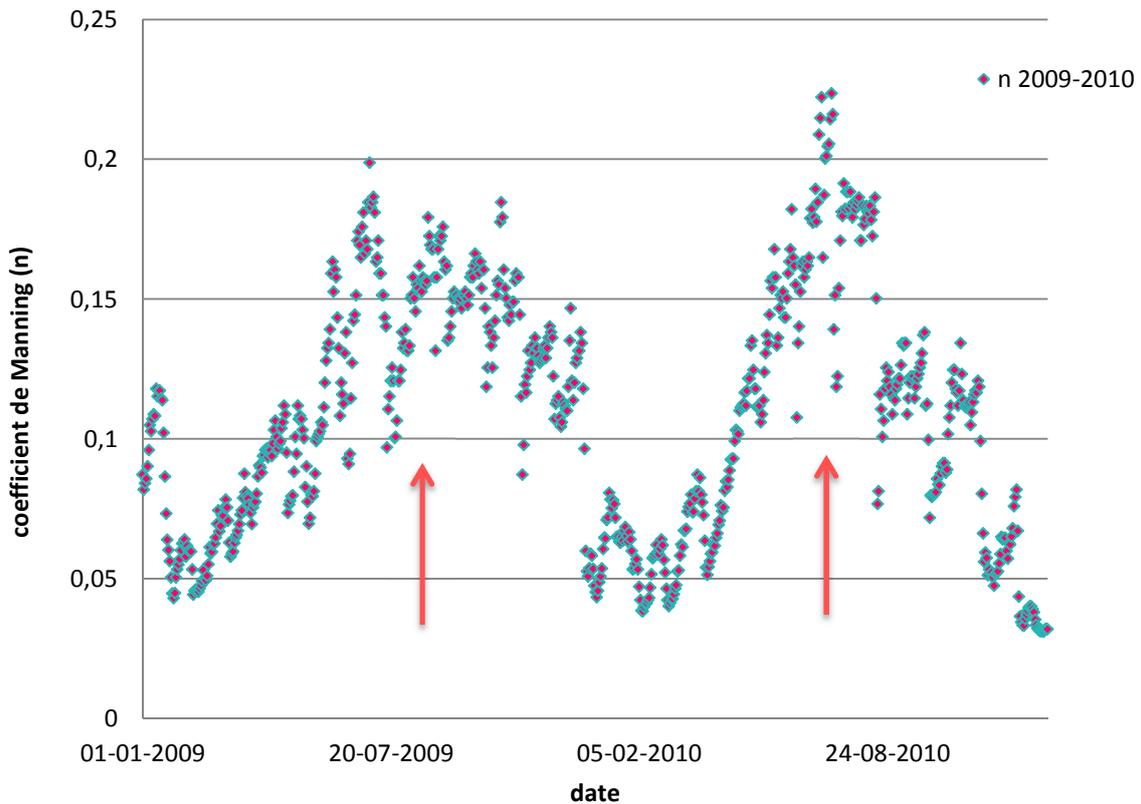
### d) Rugosité

En combinant les Eq.2 et 3, le paramètre  $\sqrt{S}/n$  peut être exprimé par :

$$\frac{\sqrt{S}}{n} = \frac{Q}{aire} \times \left( \frac{perimetre}{aire} \right)^{2/3}$$

En fonction de la série de débit, on obtiendra donc une valeur différente pour ce paramètre ce qui fait rentrer en compte le coefficient de Manning.

### Variation coefficient de rugosité 2009-2010



Graphique 3 : Représentation du coefficient de Manning en fonction de la période de l'année au niveau du site de Bercy pendant les années 2009 et 2010

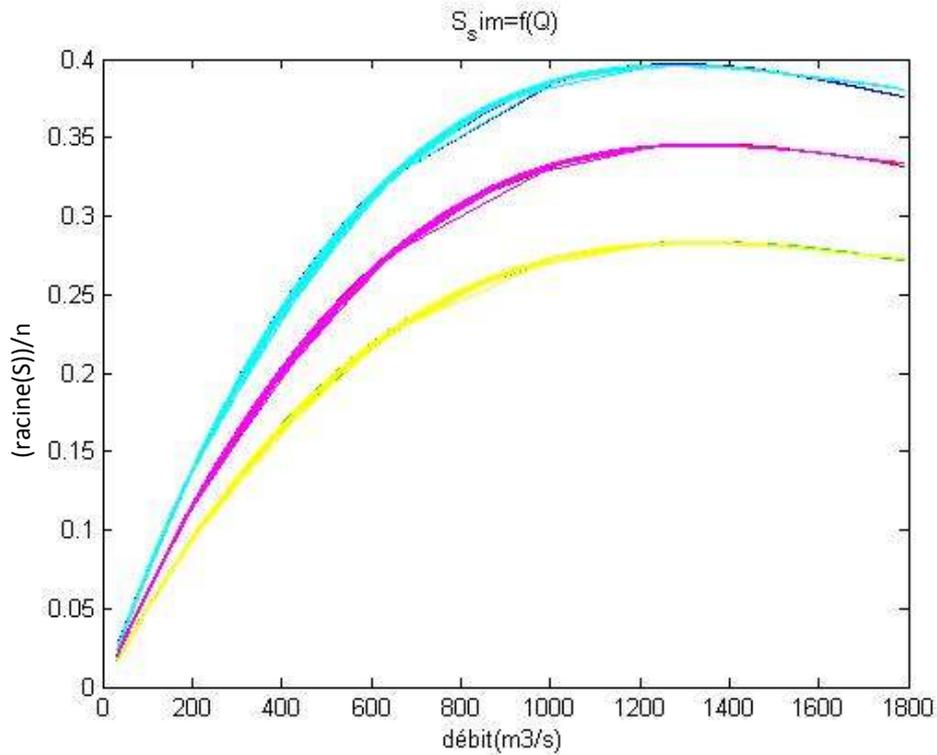
Le Graphique 3 est une représentation graphique des variations de  $n$  sur une année. On remarque qu'en période de basses eaux (flèches rouges) le coefficient de Manning est plus élevé qu'en période de hautes eaux (hiver).

Ces variations sont en accord avec les études menées sur le coefficient de rugosité. En effet, la valeur de  $n$  augmente lorsqu'il y a une diminution de la profondeur d'eau.

Dans l'aide-mémoire d'hydraulique à surface libre (Degoutte, 2010), il est écrit que le coefficient de rugosité du lit d'une rivière varie en fonction du débit pour 3 raisons :

- La rugosité n'est pas la même sur le fond ou sur les berges (différents matériaux, végétation ou protection)
- Les lits majeur et mineur n'ont pas la même rugosité
- La rugosité varie selon si le fond est plat ou comporte des dunes.

Comme on peut le voir sur le Graphique 4, le terme  $\sqrt{S}/n$  est lié au débit  $Q$ . Au cours de l'année 2006, pour le site Canada, il varie globalement entre 0,05 et 0,34. Les coefficients pour cette relation sont donc définis afin de ne pas avoir à recalculer ce paramètre à chaque fois et pour que ça soit valide dans n'importe quelle situation.



Graphique 4 : terme  $\sqrt{S}/n$  observé et simulé en fonction du débit. Les 2 courbes se superposent. Elles sont représentées en bleu et bleu pointillé pour le site de Bercy, rose et rouge pour le site de Canada et jaune et vert pour le site de Tokyo. Pour le site de Bercy la fonction est la suivante :

$$\sqrt{S}/n = 6,356^{-11}Q^3 - 3,30297^{-07}Q^2 + 0,00054Q - 0,000984$$

Les données observées décroissent et donc entraînent une fonction qui décroît pour les grandes valeurs de  $Q$ .

Avec ces coefficients déterminés à partir des valeurs exactes de profondeur à Bercy, on peut grâce à la formule de Manning-Strickler déterminer la vitesse  $U$  qui tient compte de la difficulté à l'écoulement de l'eau à travers la section considérée. Pour cela, le calcul suivant est effectué :

$$U = \left( \frac{\text{aire}}{\text{perimetre}} \right)^{2/3} \times \frac{\sqrt{S}}{n}$$

On obtient ainsi la vitesse de la Seine au droit de la centrale de Bercy à tout instant  $J$ .

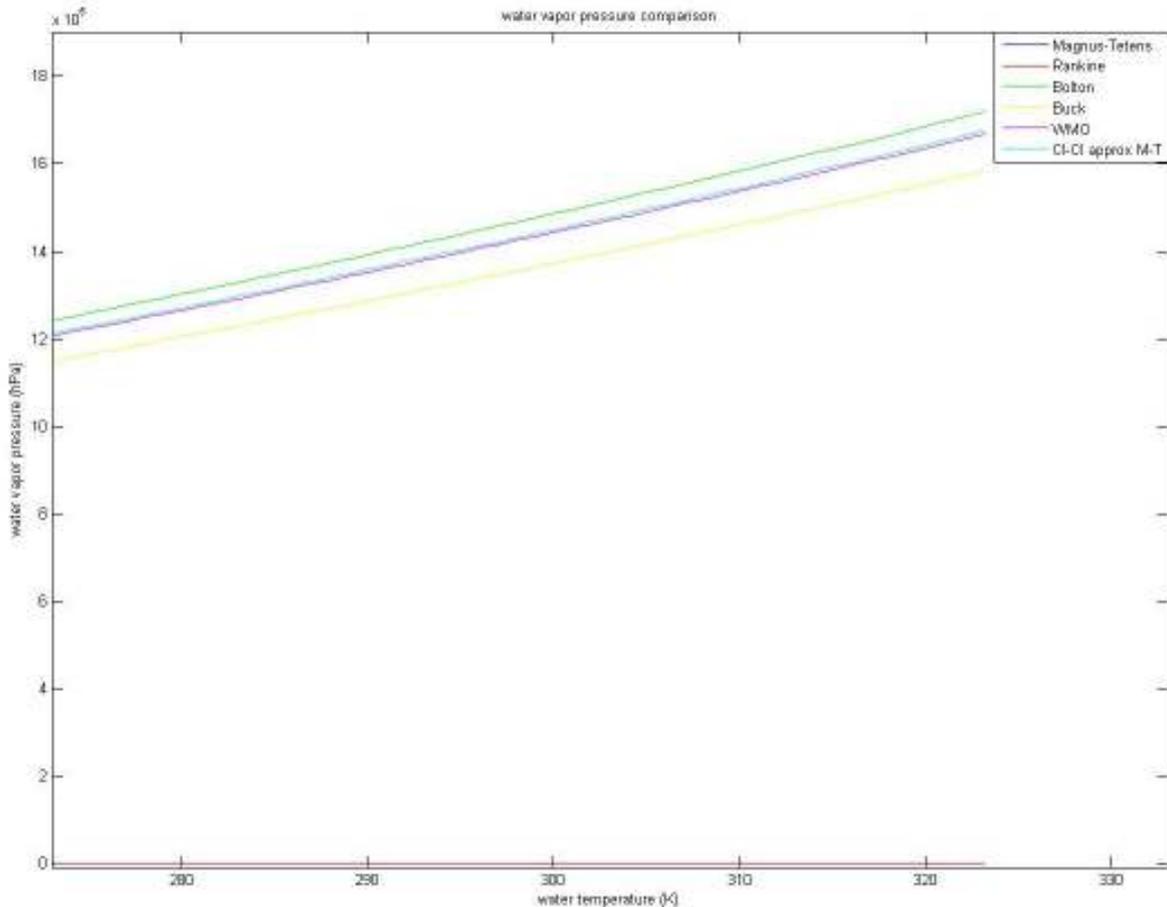
Pour les centrales Canada et Tokyo, les mêmes calculs sont effectués à ceci près que les cotes sont d'abord estimées par rapport au dénivelé de la Seine et de l'éloignement du site de Bercy (Annexe 3).

Pour Bercy, les débits sont donc plus précis et sûrs. Les calculs de vitesse pour les autres sites sont basés sur des hypothèses plus nombreuses.

## D. Calcul de la pression de vapeur saturante

Pour calculer la valeur de  $e_s$ , les valeurs obtenues pour une plage de températures avec différentes formules trouvées dans la littérature Caissie, et al. (2005), Mosheni, et al. (1999) ou sur internet (Vömel) sont comparées.

Ainsi, on obtient le Graphique 5 pour des températures d'eau comprises entre 0 et 50°C:



Graphique 5 : Pression saturante de l'eau en fonction de la température de l'eau et de différentes formules

Les 4 dernières courbes sont proches. Toutefois, les résultats les plus proches sont ceux donnés par les formules du WMO et de Clausius-Clapeyron approximée par Magnus-Tetens. Pour calculer la valeur de  $e_s$ , on prendra par la suite la formule du WMO qui est elle-même une approximation de la formule de Clausius-Clapeyron.

$$e_s = 6,112 * e^{17,62 \times \left( \frac{T+273,16}{243,12+(T+271,16)} \right)}$$

## IV. La mise en place du code

### A. Comment discrétiser l'équation de la chaleur

A partir de l'Eq.1, on fait ici l'hypothèse que la dispersion est négligeable. On obtient donc l'équation 1D de la chaleur dans un cours d'eau (Eq.4):

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{S}{\rho c_p dd}$$

De plus on suppose *aire*, *W*, *U* et *dd* constantes selon *x* et donc indépendantes de *x*. Dans l'Eq.4, on a :

- *T* qui dépend de *x* et de *t* ;
- *U* qui dépend uniquement de *t* ;
- $\rho$  et  $c_p$  qui sont des constantes ;
- *S* dépend de *T* et *t* mais on suppose que les forçages météo qui influencent *S* ne dépendent pas de *x* sur la longueur des panaches (Cf.la similarité des données SAFRAN dans Paris III.A).

Comme précisé dans le paragraphe II.E, le forçage Climespace est modélisé par un mélange de chaleur en D1. Le domaine sur lequel on fait entrer en jeu les forçages météo est appelé D2 sur la Figure 7. Ces forçages dépendent de la température de l'eau issue des modèles précédents ou de la mesure directe. Ils dépendent donc également du temps. On peut donc écrire :

$$S(T, t) = H_e + H_s + H_c + H_{ns}$$

L'Eq.4 devient alors : (Eq.5)

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{S(T, t)}{\rho c_p dd}$$

Afin de résoudre cette équation, on utilise l'hypothèse de *U* constante selon *x* pour se ramener à une équation différentielle du temps seulement.

Les résolutions temporelles sont lors décrites de deux manières différentes selon l'échelle de temps considérée :

- Sur le court-terme, elles sont contraintes par l'équation de la chaleur et liées aux variations spatiales. Ceci suppose que les forçages (*Q* donc *U* et *dd* ; météo ;  $T_0$ ,  $T_{clim}$  et  $Q_{clim}$ ) soient constants pour chaque simulation de court-terme, i.e sur toute la longueur du panache simulé.
- Les évolutions à plus long-terme sont contraintes par les variations de  $T_0$ ,  $T_{clim}$ ,  $Q_{clim}$ , *Q* et des paramètres météo et décrites par une succession de simulations « court-terme » indépendantes.

L'évolution de la température à court-terme est décrite par l'Eq.6 :

$$\frac{1}{U} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{S(T)}{U \rho c_p dd}$$

Dans ce cadre, les paramètres  $t$  et  $x$  sont liés par la vitesse. Si l'on connaît  $(x_1, t_0)$ , on cherche  $T(x_1 + dx, t_0 + dt)$  et  $dx$  et  $dt$  sont liés car l'eau parcourt la distance  $dx$  en  $dt$ .

$$\frac{dx}{dt} = U \quad d'o\grave{u} \quad dx = U \cdot dt$$

On peut donc écrire (Eq.7) :  $T(x_1 + dx, t_0 + dt) = T(x_1 + dx, t_0 + dx/U)$

Si on pose  $x_1 = 0$  et  $dx = x$ , l'Eq.7 se transforme. Cela nous permet de se ramener à une fonction d'une seule variable (Eq.8).

$$G(x) = T(x, t_0 + x/U)$$

Les évolutions de  $G(x)$  résultent des échanges avec l'atmosphère d'où (Eq.9):

$$\frac{d}{dx}(G(x)) = \frac{S(G(x))}{\rho c_p dd}$$

Vérification :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx}(G(x)) &= \frac{d}{dx}(T(x, t_0 + x/U)) = \frac{d}{dx}(T(x(x) + t(x))) = \frac{\partial T}{\partial t} \cdot t'(x) + \frac{\partial T}{\partial x} \cdot x'(x) \\ &= \frac{\partial T}{\partial t} \cdot \frac{1}{U} + \frac{\partial T}{\partial x} \end{aligned}$$

D'après l'Eq.8 et toujours avec l'hypothèse que les forçages de  $S$  sont indépendants du temps pendant la période simulée on obtient (Eq.10) :

$$\left\{ \begin{array}{l} G = T \\ \frac{dT}{dx} = \frac{S(T)}{U \rho c_p dd} \end{array} \right.$$

Une équation différentielle ordinaire du 1<sup>er</sup> ordre comme l'Eq.10 a une solution unique et complètement contrainte par elle-même et une valeur initiale (ici,  $T(x = 0) = T_0$ ).

Pour la résoudre, nous avons utilisé la méthode des différences finies explicites du 1<sup>er</sup> ordre (Euler).

Comme :

$$\frac{T(dx) - T_0}{dx} = \frac{S(T_0)}{U \rho c_p dd} \text{ donne } T(dx) = T_0 + \frac{S(T_0)}{U \rho c_p dd} dx$$

Alors, au temps suivant on a :

$$\frac{T(2dx) - T(dx)}{dx} = \frac{S(T(dx))}{U \rho c_p dd} \text{ donne } T(2dx) = T(dx) + \frac{S(T(dx))}{U \rho c_p dd} dx$$

Et ainsi de suite jusqu'au n<sup>ième</sup> incrément d'espace. On aura donc :

$$T(ndx) = T((n-1).dx) + \frac{S(T(n-1).dx).dx}{U \times \rho \times c_w \times dd}$$

$$T(n) = T(n-1) + \frac{((H_{ns} + H_l + H_c + H_e)(T(n-1))).dx}{U \times \rho \times c_w \times dd}$$

Cette équation sera donc celle utilisée pour les calculs des températures de l'eau lors de la modélisation.

## B. Construction des boucles spatio-temporelles

Comme on l'a vu lors de la résolution de cette équation, il y a donc 2 dimensions à couvrir pour rendre compte des variations dans le temps d'une part, et par rapport à la distance au rejet de Climespace d'autre part.

La première boucle du programme correspond au déplacement dans le temps à « long-terme ». Pendant ce déplacement dans le temps, il y a une variation des forçages. Une deuxième boucle prend en compte les variations spatiales dans la direction de l'écoulement de la Seine et rend également les variations temporelles associées à court-terme.

### 1. Mise en place de la boucle temporelle par fréquence

La boucle temporelle dépend du nombre de jours pendant lesquels on cherche à calculer la variation de température.

Afin de pouvoir lire entièrement la chronique des débits et voir l'évolution de la température de la Seine sur plusieurs jours, on définit un deltat (en heure) qui définit la fréquence des simulations de court-terme.

Le deltat ne doit pas être inférieur au temps que met la Seine à retrouver un état d'équilibre car dans ce cas, les températures simulées ( $T_{sim}$ ) seront tronquées. D'un autre côté, il ne doit pas être trop grand car la vitesse de la Seine ( $U_{seine}$ ) et la hauteur sont supposées constantes pendant cette période, et cette hypothèse peut ne pas être vérifiée si la période est trop longue. Cette fréquence, deltat, est fixée arbitrairement à 24h après vérification de plusieurs valeurs.

Un test mettant en jeu la distance au rejet, la vitesse de l'eau et le temps écoulé est mis en place pour ne pas poursuivre la simulation au-delà de deltat si la vitesse est trop lente.

## 2. Mise en place de la boucle spatiale

Pour simuler des températures selon la distance  $x$  au rejet  $T_{clim}$ , nous avons défini arbitrairement une distance  $x_{max}$  au bout de laquelle on arrête la simulation, avant de passer au jour suivant dans la boucle temporelle.

La détermination de  $x_{max}$  ne se fait pas au hasard. En effet, l'extension du domaine d'échange entre l'air et l'eau est basée sur le rapport du bureau d'étude (IXSURVEY, 22 octobre 2008) qui permet une double analyse des plumes thermiques des sites Canada et Tokyo (Figure 4). Ce rapport donne à la fois une analyse d'extension de la plume (largeur, longueur, épaisseur) et une analyse thermique (car elle donne des valeurs de température qui servent à la validation des  $T_{sim}$  par le modèle).

Pour tous les sites,  $x_{max}$  vaut 10 000m afin d'avoir une évolution complète et de pouvoir englober toute l'extension longitudinale de la pollution thermique. Ainsi, pour  $U_{min}$  2006 au droit du site EDS Canada ( $0,1424m.s^{-1}$ ), on parcourra une distance de 10 000m en 20h et pour  $U_{max}$  ( $1,1746m/s$ ), cette même distance sera parcourue en un peu plus de 2heures. Mais comme mentionné au paragraphe précédent, si  $U$  est suffisamment faible pour que  $x_{max}$  ne soit pas parcouru en  $\Delta t$ , alors la simulation de court-terme s'arrête pour ne pas violer les hypothèses de constance des forçages.

Afin de pouvoir également suivre l'évolution de la température le long de la Seine, les résultats pour la distance 500m, 2 500m, 3 500m au rejet sont également comparés.

Les calculs des échanges avec les forçages météo sont effectués sur des petits intervalles de distance  $dx$ . Plus le  $dx$  sera petit, plus il y aura d'intervalles pour atteindre la distance maximale du domaine. Deux valeurs de  $dx$  ont été testées,  $dx=10$  m et  $dx=100$ m. Pour la suite des calculs, on a gardé  $dx=100$ m.

La Figure 10 résume la situation d'un point de vue plus pratique car elle représente l'extension de la plume sur le lit de la Seine et comment les intervalles sont espacés sur le tronçon de Seine étudié.

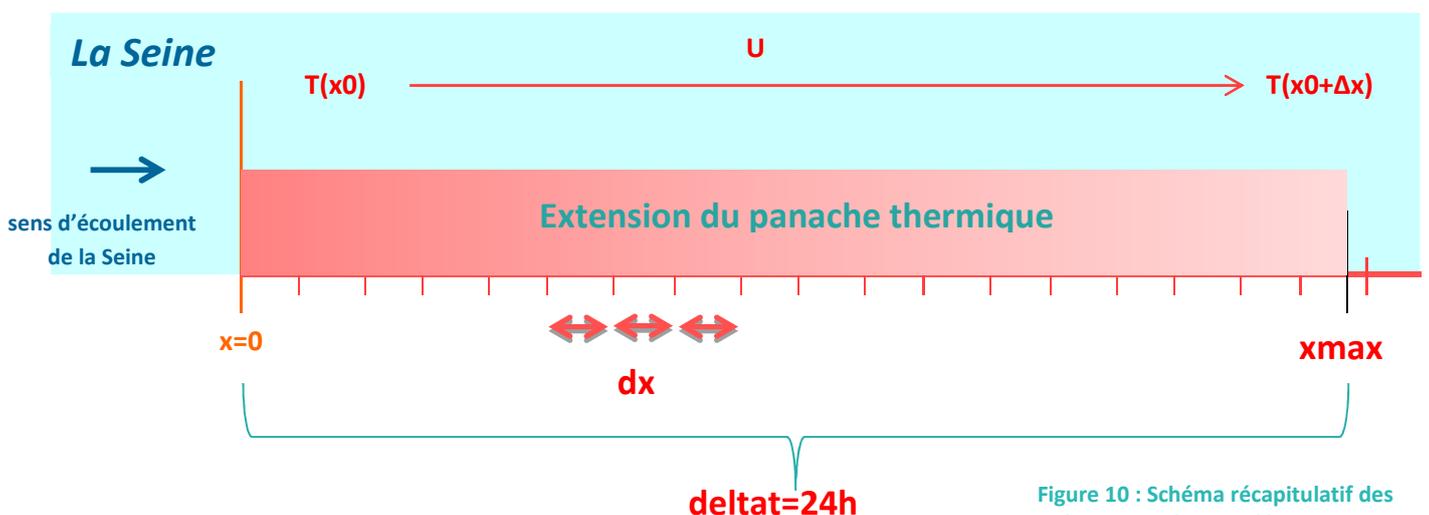


Figure 10 : Schéma récapitulatif des paramètres utilisés pour l'évolution spatio-temporelle sur le domaine d'étude de la Seine

## V. Les résultats obtenus

### A. Evaluation du modèle

#### 1. Test qualitatif

Ce test a pour but de voir si, seulement sous l'influence des forçages météo (donc sans prendre en compte le rejet thermique de Climespace), on n'observe pas de brusques augmentations de la température de la Seine.

Les températures  $T_0$  de Climespace sont utilisées comme température initiale de la Seine. En effet, ces températures sont relevées en amont des rejets et ne sont donc pas impactées par la plume thermique.

Le modèle calcule donc pour une distance  $x_{max}$  de 10 000m et sur toute l'année 2006 les températures de la Seine sans la plume Climespace. La courbe rouge de la Figure 11 correspond aux températures simulées par le modèle à 2 500m et la courbe bleue, la température initiale prise pour la Seine.

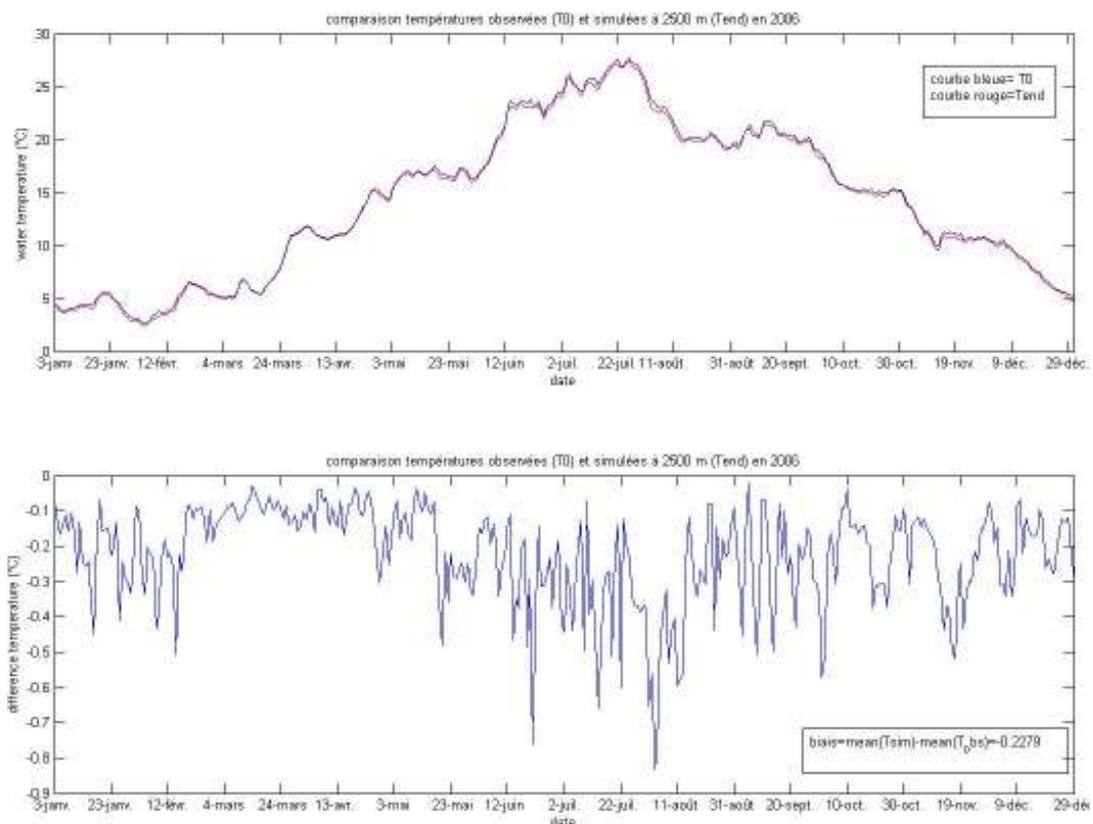


Figure 11 : Comparaison des températures de la Seine sans Climespace  $T_0$  et des températures simulées en négligeant le rejet thermique de Climespace pour l'année 2006 pour le site EDS Canada

Sur le 2<sup>ème</sup> graphique, la différence étant négative entre les 2 sets de valeurs, on peut conclure que les  $T_{sim}$  sont plus froides. Cela démontre qu'en l'absence des rejets thermiques de Climespace, et si le modèle est juste, la température de la Seine décroît vers l'aval sous l'effet des échanges avec les paramètres météo.

## 2. Tests avec Climespace

Les valeurs observées ont permis de valider ce modèle. Pour la station Canada, les températures de validation sont celles de la Banque Hydro au Pont de l'Alma situé à 500 m du rejet et celles de T0 du site Tokyo situé à 950 m du rejet du site de Canada (Cf. Annexe 4 et Tableau 6).

Comme on peut le voir sur la Figure 12, à la même distance du rejet on obtient des températures similaires en période froide. Toutefois, la période estivale présente une forte différence entre les valeurs de températures simulées (en rouge) et observées (en bleu). Pendant cette période, la différence entre le modèle et les observations peut aller jusqu'à plusieurs degrés. Le calcul Tobs-Tsim présenté sur le 2ème graphique, reflète ce biais fort en été.

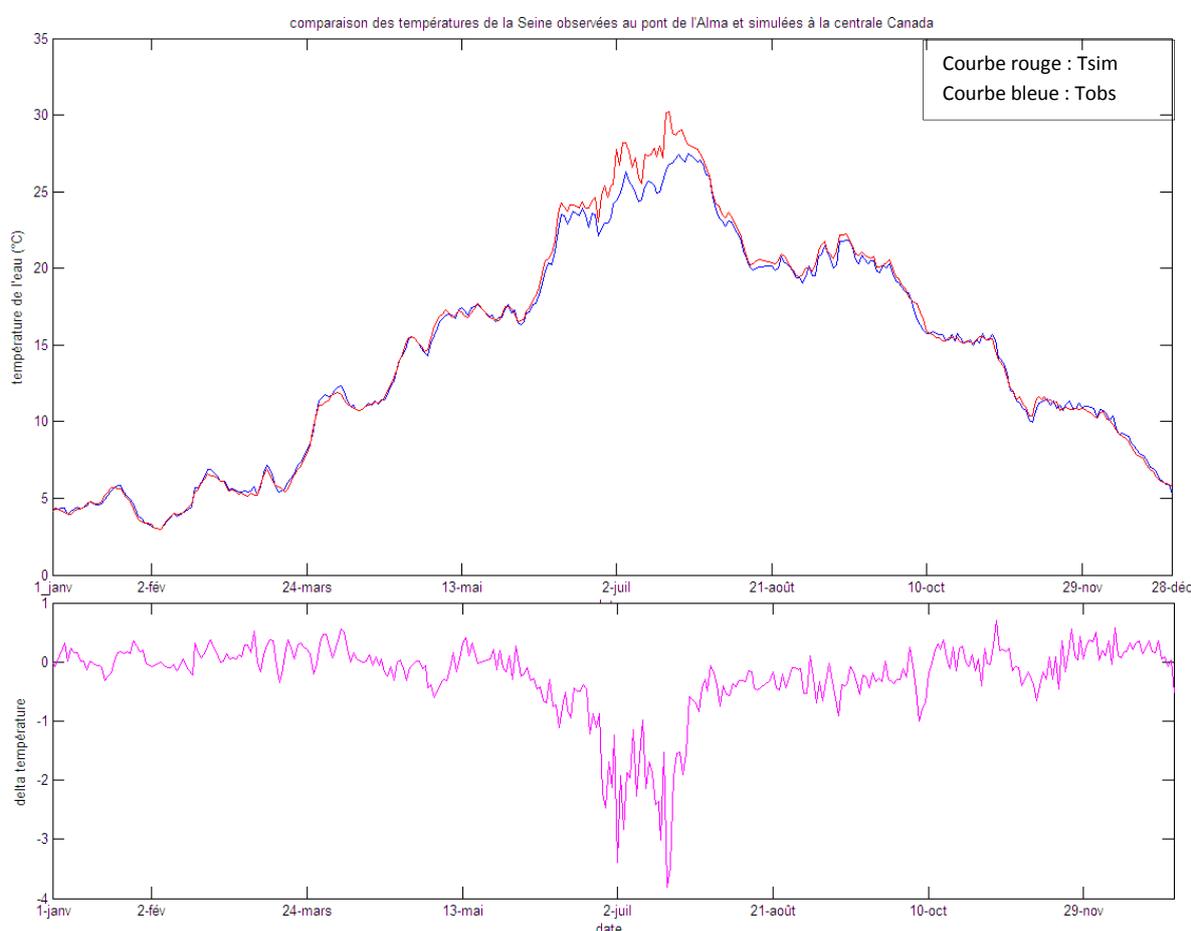


Figure 12 : Comparaison des valeurs simulées (à 500 m du rejet) et observées au pont de l'Alma (500 m du rejet) pour la centrale Canada pendant l'année 2006

Une si grande différence peut être expliquée par plusieurs paramètres.

- Durant l'été 2006, les thermomètres en ligne de la centrale Canada, mal positionnés, indiquaient des températures totalement improbables. Ces mesures erronées peuvent se répercuter sur les calculs des flux de chaleur.

- L'étalonnage des appareils entre la centrale Canada et la station du pont de l'Alma sont peut-être très différents.
- Enfin, le modèle peut avoir des difficultés à simuler des températures d'eau quand la température de l'air augmente.

Malgré cela, il ressort de la Figure 12 que lorsque la demande en froid est plus faible (période de l'année qui sera plus froide) et donc quand la puissance de Climespace est moindre, le modèle se comporte bien.

Quand on compare les données simulées à 950 m aux données T0 relevées à la centrale Tokyo (Figure 13) en 2008, l'écart en été disparaît et les données sont quasiment identiques. On remarque certains artefacts de mesure de températures au sein des 2 centrales (les thermomètres ont été changés cette année-là). Le modèle simule donc des températures collant quasi-parfaitement à la réalité. Ceci est appuyé par la différence entre Tsim et T0 Tokyo, toujours proche de 0, qui est de 0.1185°C en moyenne en 2008 (sans enlever les valeurs absurdes).

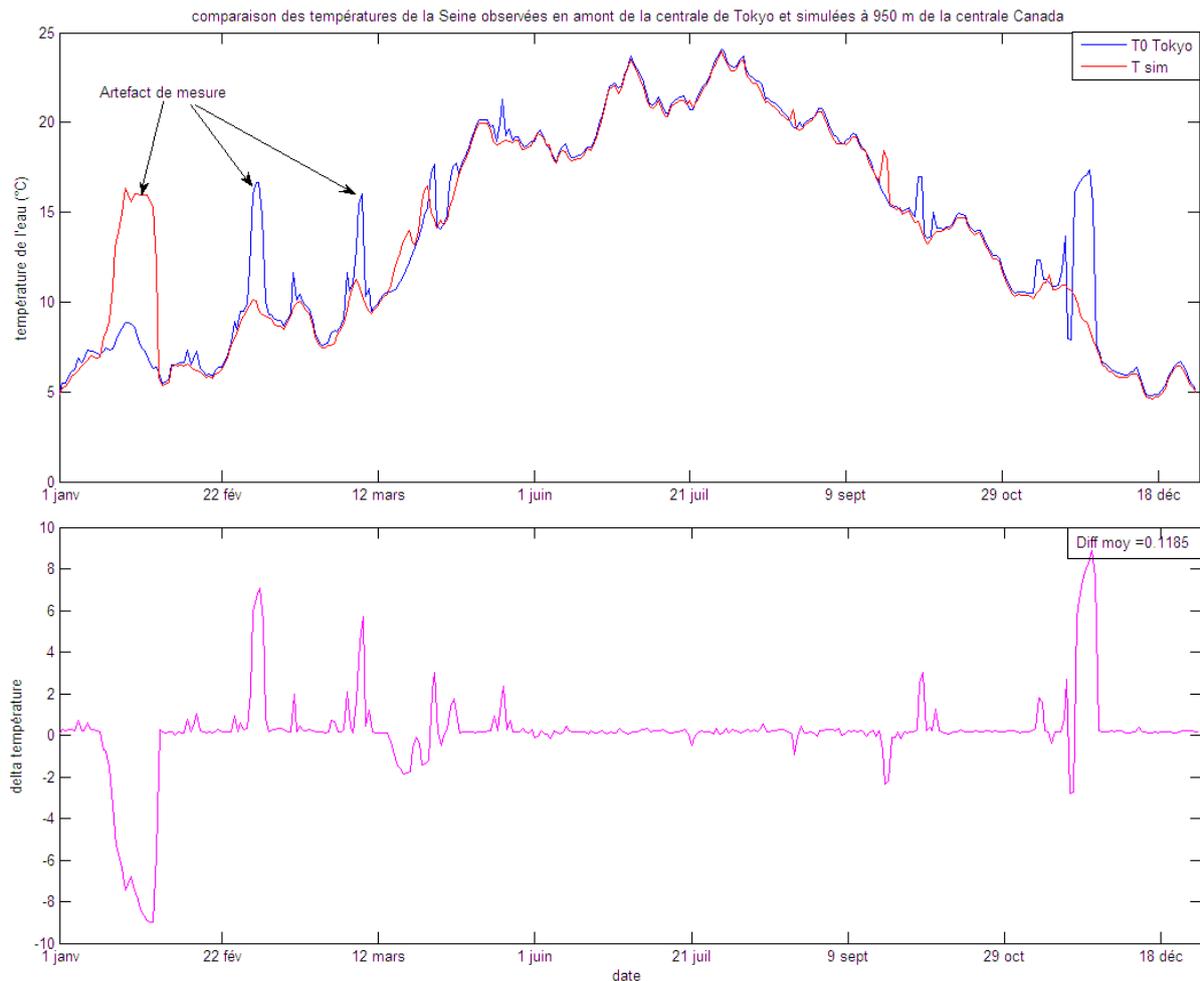


Figure 13 : Comparaison des températures simulées à 950 m du rejet du site EDS de Canada et observées (T0) juste en amont du site EDS de Tokyo (950m de distance) en 2008. Les pics sont dus à des problèmes de mesure.

Même s'il est à noter que les années 2006 et 2008 n'ont pas eu la même météo estivale (été un peu plus froid en 2008), cette concordance des valeurs fait pencher la balance vers une différence d'étalonnage entre les thermomètres de la Banque Hydro et ceux de Climespace.

Les autres sites EDS n'ont pas de données de validation aussi complètes que celles disponibles pour le site de Canada. C'est donc ce site qui a servi à la validation du modèle.

On remarque également, en observant les résultats que, quelque soit le pas d'espace choisi, le résultat de température simulé sera le même à une même distance. Par exemple, si il est défini tel que  $dx=10m$  ou  $dx=100m$ , la température simulée obtenue à 2500m sera la même. Ceci est un indicateur du bon fonctionnement numérique du modèle.

## B. Impact thermique de Climespace

Les Figure 14 et Figure 15 représentent toutes les 2 une simulation de température de la Seine avec le panache thermique créé par Climespace comparée à la température de la Seine sans l'intervention de Climespace. Le choix de l'année 2006 n'est pas fait au hasard. En effet, même si elle a été moindre que celle de 2003, il y a eu une canicule cette année-là.

La différence réside dans le fait que la Figure 14 représente les Tsim obtenues à 500m du rejet de Climespace et la Figure 15 les Tsim obtenues à 10000m au même jour.

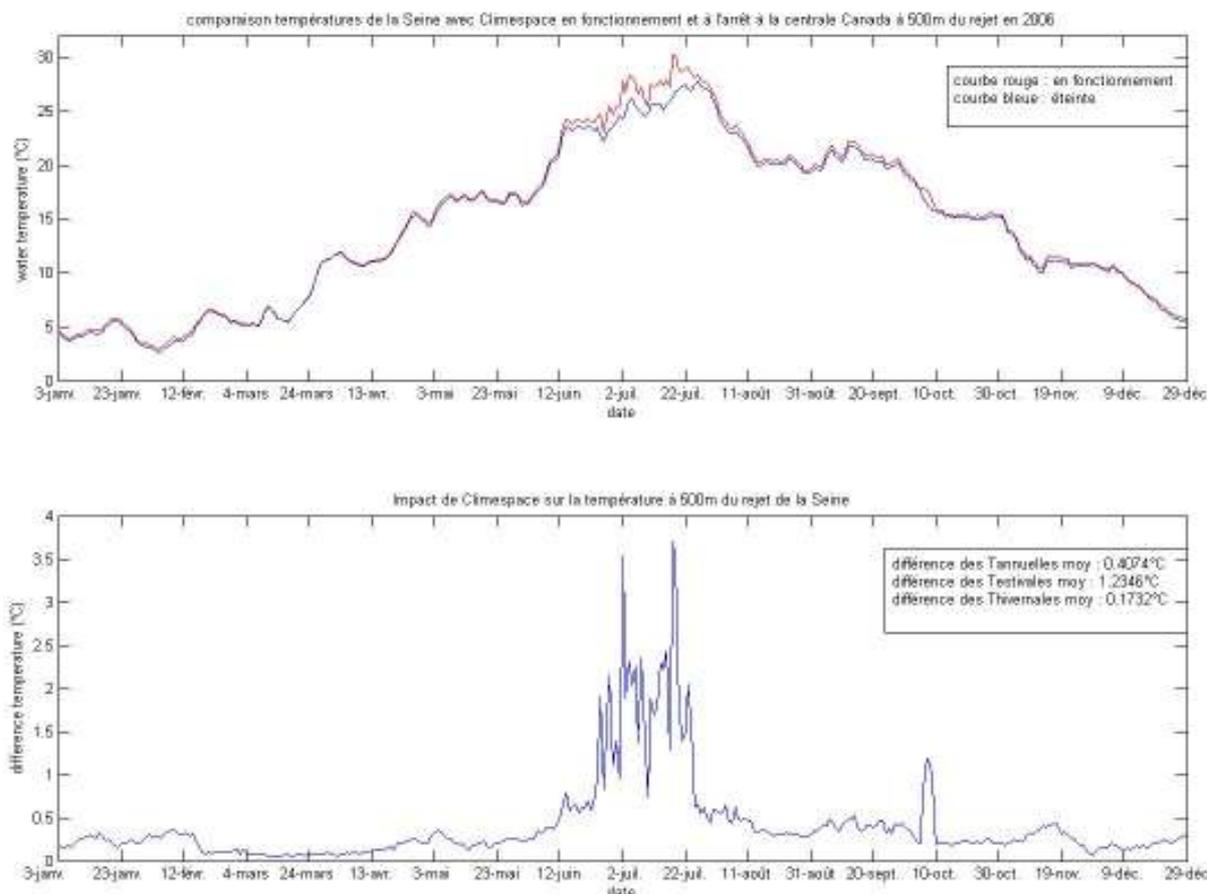
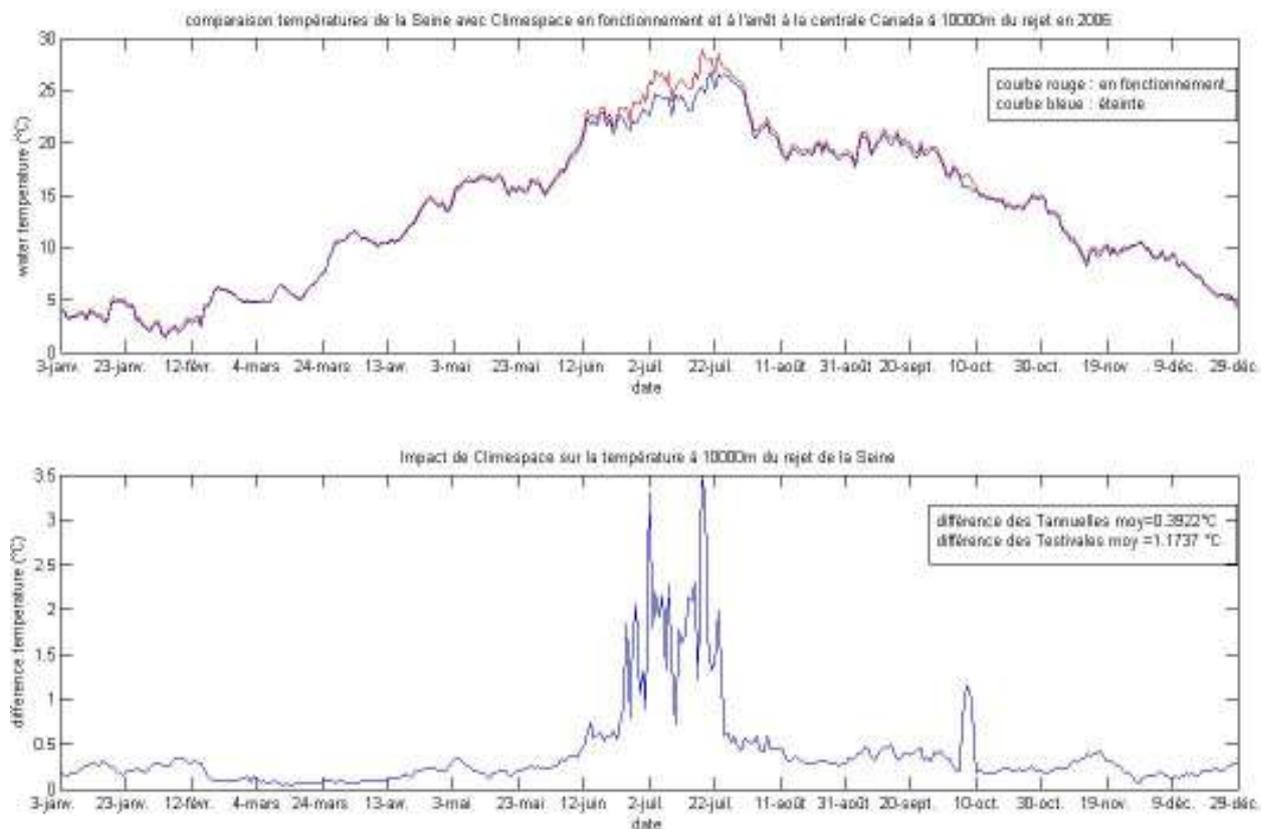


Figure 14 : Impact de Climespace en 2006 à 500m du rejet du site EDS Canada. En bleu sont représentées les températures simulées pour la Seine si la centrale était éteinte, en rouge celles simulées avec l'influence du panache thermique de Climespace.

Sur l'année, l'impact de Climespace est saisonnier. Etant quasi-nul en hiver, il est plus important pendant l'été. On remarque effectivement que les courbes bleue et rouge, même si elles suivent la même tendance pendant le 3 mois d'été présentent un décalage. Durant ces périodes chaudes, quand la température de l'air ainsi que l'eau de la Seine en amont des sites sont déjà chaudes, l'impact des rejets thermiques sur la Seine est visible.

En effet, on remarque une différence entre les Tsim et les T sans rejet de 1,23°C en moyenne estivale à 500m et de 1,17°C à 10000m.

Après étude de ces 2 figures, il est donc visible que la température de l'eau diminue au cours du déplacement de la masse d'eau selon x.



L'évolution de la température le long de la Seine est similaire le 21 juin 2006 et le 21 mars 2006 comme le montre la comparaison des deux profils sur les Figure 16 et Figure 17. Toutefois, les pentes sont très différentes selon les saisons. En effet, les différences de température au rejet et au bout du domaine D2 ne sont pas les mêmes. Cet écart est bien plus important en juin (autour de 0,69°C) qu'en mars (environ 0,75°C).

Toutefois, l'écart de température entre celle de la Seine telle qu'elle serait sans le rejet de Climespace et celle de la Seine avec la plume thermique de Climespace se réduit lentement au fur et à mesure de l'éloignement de la source de chaleur. On observe une diminution quasi-linéaire qui montre que l'impact de Climespace ne se résorbe pas facilement.

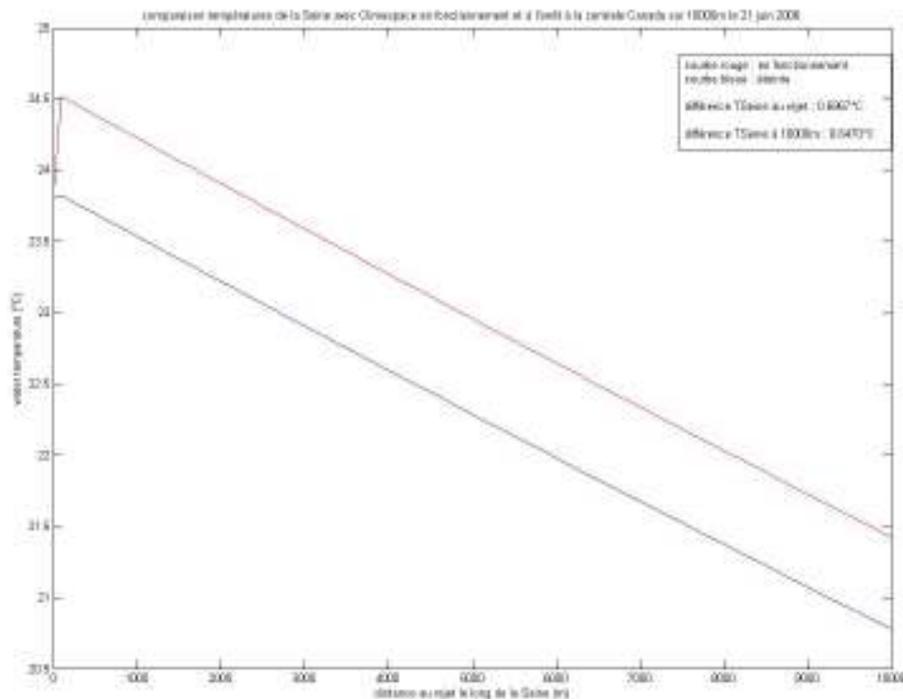


Figure 16 : Evolution de la température de la Seine le 21 juin 2006 au site Canada. En bleu est représentée la température de la Seine telle qu'elle aurait été dans le rejet thermique de Climespace et en rouge la température avec la centrale de Canada en fonctionnement

En effet, sur la Figure 16, la différence de température est de 0,69°C au niveau du rejet et de 0,64°C après 10 000 m parcourus.

La faible influence de Climespace en hiver ressort par le biais de la Figure 17. En effet, en mars, la différence de 0,075°C au rejet est bien plus faible que celle du mois de juin.

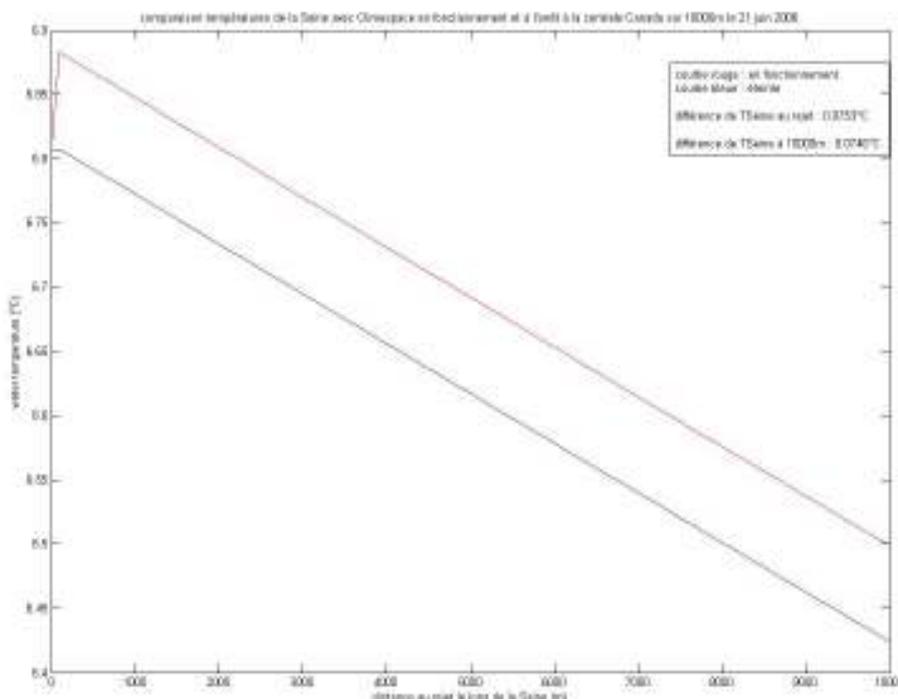
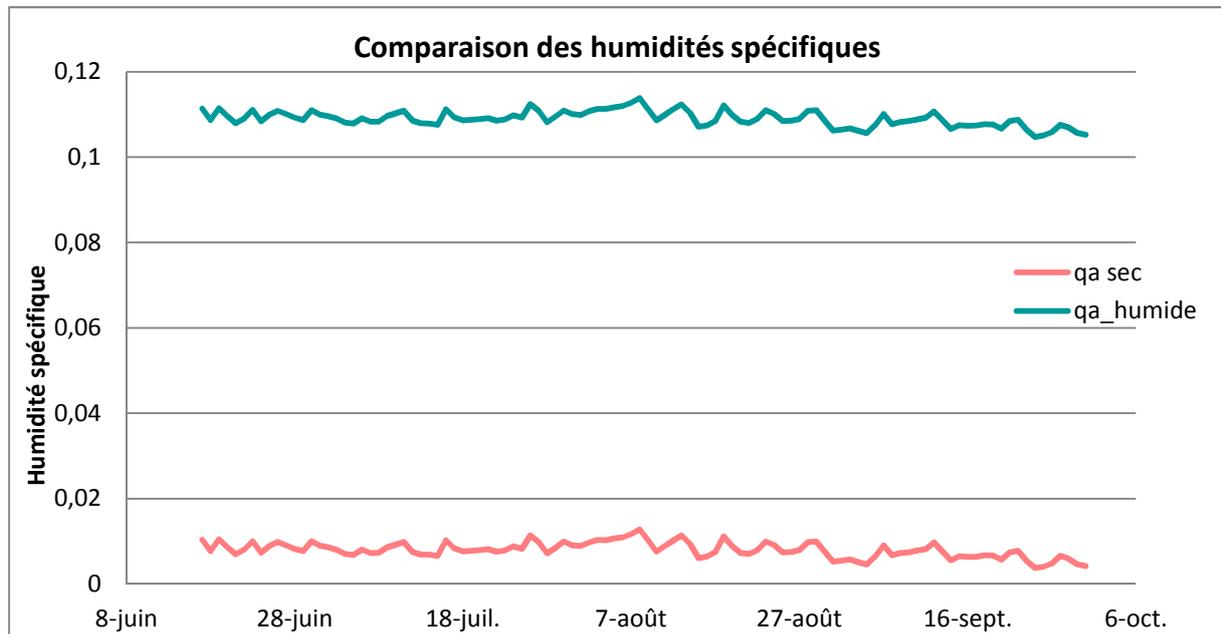


Figure 17 : Evolution de la température de la Seine le 21 mars 2006 au site Canada. En bleu est représentée la température de la Seine telle qu'elle aurait été dans le rejet thermique de Climespace et en rouge la température avec la centrale de Canada en fonctionnement

### C. Influence de la météo sur l'impact des rejets thermiques de Climespace

Pour approfondir la compréhension des échanges entre l'air et l'eau, une comparaison de l'influence de Climespace pendant 2 étés fictifs a été faite. Pour ces 2 étés, on garde tous les paramètres météo fixes et identiques (données SAFRAN du 21 juin au 21 septembre 2003) sauf l'humidité spécifique qui a été changée. La température de l'air de l'été 2003 correspond à celui de la canicule (Figure 18, a).

Pour forcer le trait, les  $qa$  de 2003 sont fortement diminués et augmentés afin que leur différence soit significative (Graphique 6) et que l'on obtienne un été chaud et sec et un été chaud et humide à comparer.



Graphique 6 : Humidités spécifiques choisies pour les 2 tests sur la météo. Elles sont définies arbitrairement à partir de celle de l'année 2003.

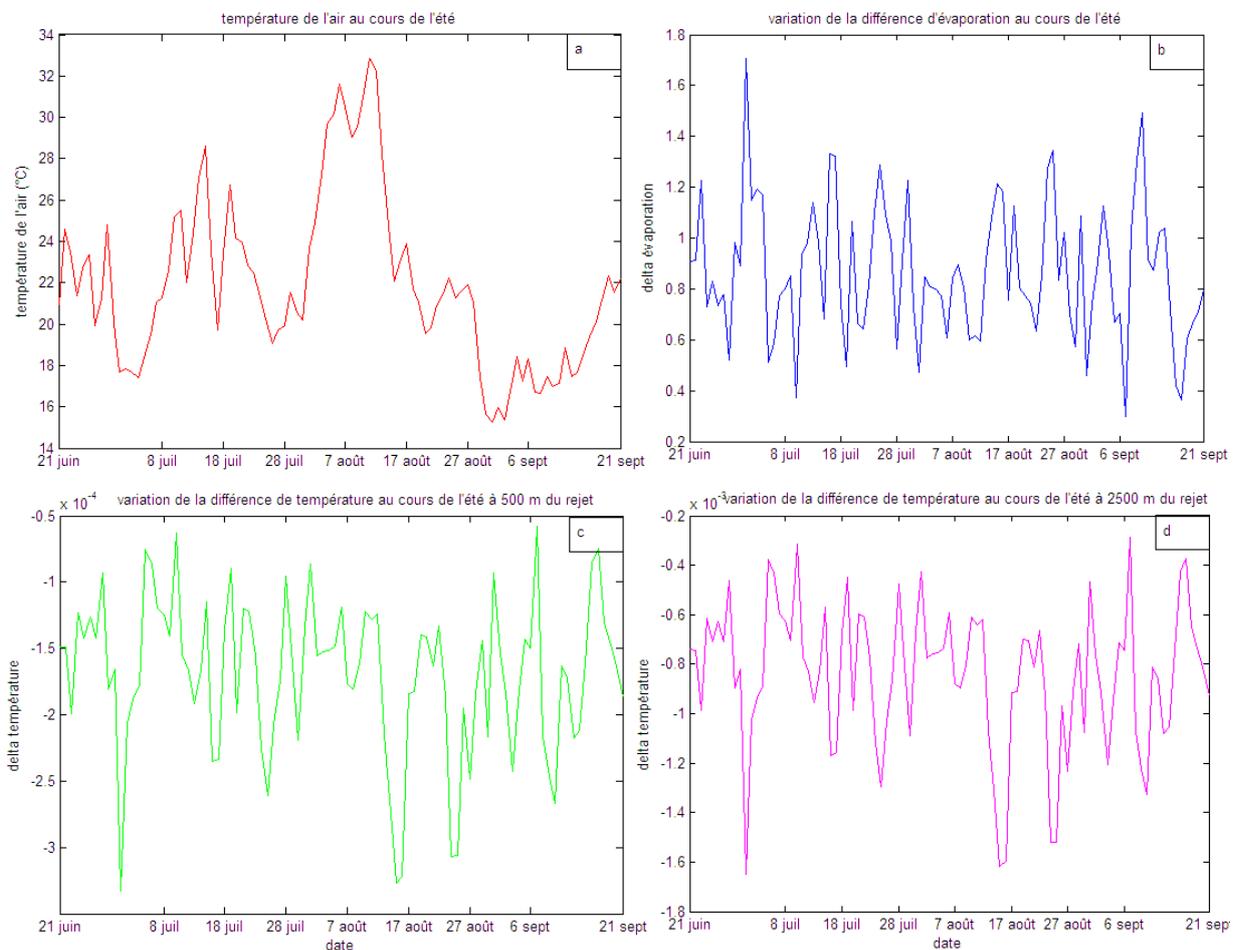
Les résultats des simulations sont présentés sur la Figure 18. Chaque graphique représente un paramètre testé pour illustrer l'impact des rejets thermiques de Climespace en fonction des conditions météorologiques.

Pour cette simulation, une température extérieure ( $T_a$ ) est donc gardée identique pour les 2 tests (graph a.). Le graphique b. présente la différence du taux d'évaporation entre l'été humide et l'été sec.

Les graphiques c. et d. sont la représentation des différences de température de l'eau à 500m et à 2 500m du rejet. Le choix de représenter la différence qui existe entre toutes ces valeurs, *valeurs de l'été sec – valeurs de l'été humide*, est plus judicieux que de présenter les 2 courbes car elles se superposaient presque.

Il ressort de la Figure 18 que le  $\Delta$ évaporation varie énormément au cours de l'été sans particulièrement suivre la courbe des  $T_a$ . Cette différence est toutefois toujours positive et démontre qu'on évapore plus sous climat sec qu'humide. Ceci corrèle la théorie qui veut

qu'il soit plus facile d'évaporer de l'eau sous un climat sec que sous un climat humide car l'air est déjà saturé en d'eau. Ainsi il apparait logique que l'évaporation par temps sec soit supérieure à celle par temps humide.



**Figure 18 : Résultats et comparaison des simulations de températures faites par rapport à la météo. Ta est représentée en a., la différence des taux d'évaporations entre l'été sec et l'été humide est dessinée sur le graphique b., la différence (Tsim\_sec-Tsim\_humide) est représentées sur les graphiques c et d. Ces graphiques représentent 2 distances au rejet du site EDS Canada de Climespace, c. à 50 m et d. à 2500 m.**

D'autre part, on remarque que les températures de l'eau à 500m et à 2500m ont une différence négative. Les températures de la Seine sont donc plus élevées pour un été humide que pour un été sec. Le creusement de l'écart est effectivement dû à une facilité de la Seine à perdre de la chaleur pendant l'été sec.

Comme l'évaporation de l'eau permet l'évacuation de chaleur et la perte de degrés celsius dans la masse d'eau, l'eau sera refroidie plus vite par temps sec qu'humide.

On peut donc conclure de ce test sur les conditions météo que plus le temps sera humide et chaud, moins il y aura évaporation de la masse d'eau, donc la température de l'eau diminuera moins vite et plus l'impact de Climespace se fera sentir dans la Seine aussi bien dans le temps que dans l'espace.

## VI. Les limites du modèle

De nombreuses hypothèses sont faites en particulier pour la mise en place de l'équation de la chaleur. De façon ponctuelle, il faut voir que les paramètres définis comme constants ne le sont peut-être pas tout le temps.

Les barrages en amont de la Seine et leur ouverture n'ont été pris en compte. Pourtant, ce relargage peut faire fortement varier le débit de la Seine au cours d'une même journée. De plus, ces barrages sont utilisés quand la Seine atteint son débit d'étiage qui correspond généralement aux périodes les plus chaudes de l'année et donc aux périodes de plus forte production pour Climespace.

Ces variations des paramètres notés constants peuvent amener des incertitudes fortes sur les températures simulées, il faut donc impérativement connaître les dates d'éventuelles perturbations et leur cause pour réagir en fonction.

La dispersion a été négligée. Or il est possible que cela permette une sous-estimation de la température de l'eau. Pour pallier à ce manque, il faudrait que le panache soit plus fin. En effet, une sous-estimation du modèle peut être due au fait que le rejet thermique pris en compte est « noyé » dans plus d'eau que nécessaire. Réduire la largeur  $W2$ , améliorerait peut-être le retour à la normale de la température de l'eau sur les grandes distances et rapprocherait ainsi le modèle de la réalité pour les grandes distances.

Le modèle créé est un modèle simple qui doit refléter la réalité, d'où certains calages sur les paramètres. Des tests ont été faits sur les paramètres  $W2$  et  $dd$ . Ainsi, une augmentation de  $W2$  sur toute l'étendue longitudinale, ou une diminution, entraîne des températures simulées très éloignées de la réalité.

L'épaisseur d'eau de Seine impactée quant à elle n'a pas une influence majeure sur les résultats car les variations qui peuvent être faites dessus sont, en valeur maximale, de l'ordre du mètre et ne changent pas le résultat du volume du « tube » de façon visible. Avoir une épaisseur impactée à 3,5m permet de prévoir une plus grande zone d'influence pour une meilleure gestion des écosystèmes environnants.

Les meilleurs résultats étant obtenus avec les paramètres de départ, ils ont été gardés.

## VII. Conclusion et perspectives

Climespace, par le biais de ses sites EDS, rejette une pollution thermique dans la Seine. Le modèle créé pour répondre aux problématiques engendrées par cette plume thermique est basé sur une approche déterministe de l'équation de chaleur. Il modélise les échanges de chaleur qu'il existe entre l'air et l'eau par le biais des flux de chaleur.

Ce modèle donne de bonnes corrélations avec les données de validation à la centrale Canada mais révèle toutefois un point faible quand la température de l'air est très élevée.

Ainsi, les températures simulées par ce modèle sont correctes et reflètent la réalité et peuvent être utilisées pour quantifier l'impact de Climespace sur la Seine. Plusieurs tests et runs effectués avec ce modèle montrent un impact de Climespace au site EDS de Canada qui peut être ponctuellement supérieur à 3,5°C à l'été 2006 à 500m du rejet du site de Canada et tout juste inférieur à 3,5°C à 10 000m de ce même rejet. Cette différence d'impact montre une diminution progressive de la température lors du déplacement longitudinal. Cette baisse de la température est due aux échanges avec l'atmosphère.

Mais, ces résultats doivent être nuancés par le biais en période chaude observé sur le modèle lors de la validation aux températures de la Banque Hydro.

Un test sur 2 étés fictifs a également démontré que lorsque l'humidité spécifique augmente, la température de la Seine diminue moins vite car l'évaporation se fait avec plus de difficulté. Ce paramètre est à prendre en compte pour le futur en cas de changement climatique.

Toutefois, à la question sur le réchauffement global de la Seine, le modèle créé ne peut répondre que partiellement. Effectivement, il faudrait pouvoir l'appliquer sur toutes les installations posées le long de la Seine et quantifier leurs rejets pour avoir une véritable idée de qui a le plus fort impact et ainsi déterminer quelle est réellement l'action de Climespace.

L'application d'un tel modèle à la Seine pour une activité industrielle permet à l'avenir une gestion améliorée de la consommation d'eau de Seine et une meilleure régulation de la température de rejet et de la puissance. La consommation d'eau de Seine pourra être prévue avec plusieurs jours d'avance selon la météo et l'impact de Climespace pourra donc être réduit.

### Remerciements :

A mes tutrices de stage pour leur aide.

Je tiens également à remercier le personnel de Climespace pour son accueil chaleureux et sa coopération, le personnel de l'UPMC qui m'a aidé lors de mon utilisation de MATLAB et d'ArcGIS et toutes les personnes qui m'ont soutenue au cours du stage.

Remerciements Météo France pour les données SAFRAN.

## VIII. Bibliographie

**agroparistech.fr** agroparistech.fr [En ligne] //

<http://www.agroparistech.fr/coursenligne/hydraulique/degoutte1.pdf>. - 2010. - Avril 2011.

**Bogan Travis, Mosheni Omid et Stefan Heinz G.** Stream temperature-equilibrium temperature relationship [Article] // *Water Resources Research*. - 16 September 2003. - 9 : Vol. 39. - p. 1245.

**Caissie Daniel, El-Jabi Nassir et Satish Mysore G.** Modelling of maximum daily temperatures in a small stream using air temperatures [Article] // *Journal of hydrology* / éd. Elsevier. - 23 April 2001. - 251. - pp. 14-28.

**Caissie Daniel, Satish Mysore G. et El-Jabi Nassir** Predicting river water temperatures using the equilibrium temperature concept with application on Miramichi River catchments (New Brunswick, Canada) [Article] // *Hydrological Processes* / éd. Sons John Wiley &. - 14 march 2005. - Vol. 19. - pp. 2137-2159.

**Colin Pierre Louis** Evolution des nappes peu profondes à Paris depuis un siècle [Ouvrage]. - 1986.

**DRIEE IF** [http://cartelie.application.developpement-](http://cartelie.application.developpement-durable.gouv.fr/cartelie/voir.do?carte=Rejets_Inventaire_SNS&service=DRIEE_IF)

[durable.gouv.fr/cartelie/voir.do?carte=Rejets\\_Inventaire\\_SNS&service=DRIEE\\_IF](http://cartelie.application.developpement-durable.gouv.fr/cartelie/voir.do?carte=Rejets_Inventaire_SNS&service=DRIEE_IF) [En ligne] //

Ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement. - octobre 2010.

**Edinger John E.** The response of water temperatures to meteorological conditions [Article] // *Water Resources Research*. - October 1968. - 5 : Vol. 4. - pp. 1137-1143.

**IXSURVEY** Mesures de températures au niveau de stations Tokyo et Canada [Rapport] : Rapport d'étude / IXSURVEY. - 46 quai François Mitterrand 13600 La Ciotat : [s.n.], 22 octobre 2008. - p. 25. - rédigé par Aurore Barbero; relu par Christine Pinatel.

**Latu Marilyse** Vers une modélisation des relations entre température de l'eau en rivière et température de l'air dans la bassin de la Seine [Rapport] : Mémoire de Maîtrise / Université Pierre et Marie Curie UMR 7619 Sisyphe. - Mai 2003.

**Marcotte N. et Duong V.-L.** Le calcul de la température de l'eau des rivières [Article] // *Journal of Hydrology* / éd. Company North-Holland Publishing. - 1973. - Vol. 18. - pp. 273-287.

**Mosheni O. et Stefan H.G.** Stream temperature/air temperature relationship : a physical interpretation [Article] // *Journal of Hydrology* / éd. Elsevier. - 19 february 1999. - Vol. 218. - pp. 128-141.

**Penman H.L.** Natural evaporation from open water, bare soil and grass [Article] // *Mathematical and Physical Sciences*. - 22 april 1948. - 1032 : Vol. 193. - pp. 120-145.

**Poulin M.** Modélisation numérique des échanges hydrauliques et thermiques entre rivière et nape alluviale [Article] // *Revue des Sciences de l'eau*. - 1988. - 1-2. - pp. 107-128.

**Quintana-Seguí P., P. Le Moigne, Y. Durand, E. Martin, F. Habets, M. Baillon, C. Canellas, L. Franchisteguy, S. Morel** Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables: Validation of the SAFRAN Analysis over France [Article] // *Appl. Meteor. Climatol.* - 2008. - 47. - pp. 92-107.

**Sinokrot Bashar A. et Stefan Heinz G.** Stream Temperature Dynamics : Measurements and Modeling [Article] // Water Resources Research. - July 1993. - 7 : Vol. 29. - pp. 2299-2312.

**Vidal J.-P. Martin E., Franchistéguy L., Baillon M. et Soubeyrou J.-M.** A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with Safran system [Article] // International Journal of Climatology. - 2003. - p. DOI: 10.1002/joc..

**Vömel Holger** Water vapor pressure formulations [En ligne] // cires.colorado.edu. - 08 april 2011. - <http://cires.colorado.edu/~voemel/vp.html>.

## Annexe 1 : Liste des variables et constantes

$\alpha$  : L'**albédo** est le rapport entre le rayonnement solaire incident et le rayonnement solaire réfléchi par une surface vers l'espace. Sa valeur varie entre zéro (corps noir qui absorbe totalement le rayonnement) et 1 dans le cas d'un miroir parfait. L'albédo de la glace est de 0,3 et celui de la neige peut dépasser 0,8. Dans le cas d'un fleuve, le rayonnement est absorbé car la masse d'eau est sombre, on fixera  $\alpha$  à 0,05.

*aire* : **aire de la section** de Seine étudiée (m<sup>2</sup>).

$A_{\text{panache}}$  : **aire de la section** de Seine impactée par la plume thermique (m<sup>2</sup>).

$c_w$  : La **capacité calorifique de l'eau** est de 4186 J/kg/K. Elle permet de quantifier la possibilité qu'a un corps à absorber ou restituer de l'énergie par l'échange thermique pendant une période pendant laquelle la température varie.

*dd* : **Étendue verticale de la plume** thermique dans la Seine évaluée grâce au rapport (IXSURVEY, 22 octobre 2008)(m).

*deltat* : le **pas de temps** pour les simulations temporelles (h).

*dx* : le **pas d'espace** (m). Il est défini de façon arbitraire.

$e_a$  et  $e_s$  : Les **pressions de vapeur atmosphérique et saturante** à  $T_a$  et  $T$  exprimées en hPa. Ce sont les pressions auxquelles les phases gazeuses sont en équilibre avec la phase liquide. La valeur de la pression de vapeur atmosphérique est obtenue par calcul. Dans le fichier SAFRAN, l'humidité spécifique<sup>7</sup>,  $q_a$  (kg/kg) est renseignée.

Or  $q_a = \left( 0,622e_a/P_a - 0,378e_a \right)$ . Comme  $e_a \ll P_a$ , on obtient  $e_a = \left( q_a \times P_a / 0,622 \right)$ .

Sa précision peut être discutée car c'est une variable difficile à mesurer.

La pression de vapeur saturante  $e_s$  est quant à elle calculée par une approximation de la formule de Clausius-Clapeyron par le guide to meteorological instruments and methods of observation (WMO) pour les températures de l'eau supérieures à 0°C.

$\varepsilon_w$  : L'**émissivité de la surface de l'eau** est la mesure de capacité de l'eau à absorber et ré-émettre l'énergie rayonnée. Dans le cas d'un corps noir, qui absorbe toute l'énergie sans ré-émettre, l'émissivité est égale à 1. Pour la Seine, elle est fixée à 0,94 ( (Poulin, 1988), intervalle [0,917 ; 0,966]).

$P_a$  : La **pression atmosphérique** moyenne à Paris qui vaut 1011,61 hPa (température moyenne de 11,7°C, soit 284,85 K, une perte de 0,0065°C par mètre d'altitude, une altitude

---

<sup>7</sup> Humidité spécifique : rapport de la masse d'eau dans l'air sur la masse d'air humide.

moyenne de Paris de 60m et la pression atmosphérique moyenne à l'altitude 0 de 1013,15 hPa.)<sup>8</sup>

perimetre : **périmètre mouillé** de la section. Il sera égal à  $2 \times d + W$  (m).

$Q$  : Le **débit de la Seine** pendant la période considérée ( $m^3/s$ ). Données Banque Hydro.

$Q_{clim}$  : Le **débit des rejets thermiques** de Climespace dans la Seine ( $m^3/s$ ). Ces données sont fournies par Climespace.

$Q_{panache}$  : Le **débit de la Seine dans le « tube »** formé par la plume thermique ( $m^3/s$ )

$R_{atm}$  : **Radiation atmosphérique ondes longues** qui dépend de la constante de Stefan-Boltzmann, de l'émissivité de l'atmosphère et de la température de l'air ( $W/m^2$ ). L'émissivité de l'atmosphère est approximée par une loi empirique qui est fonction de la température de l'air, de la couverture nuageuse et du type de nuages. (Donnée SAFRAN)

$R_g$  : Le **rayonnement solaire incident rayonnement global** ( $W/m^2$ ). Somme du rayonnement direct et du rayonnement diffu sur une surface de réception horizontale. (Donnée SAFRAN)

$\rho_w$  : La **masse volumique de l'eau** qui est de  $1000 \text{ kg/m}^3$ .

$\sigma$  : La **constante de Stefan-Boltzmann** =  $5,6704 \times 10^{-8} W/m^2/K^4$ . Cette constante permet d'exprimer la relation entre la température et l'énergie rayonnée par un corps noir.

$T$  : La **température de l'eau** qui évolue en fonction des forçages et que l'on cherche à quantifier pour différentes périodes (K). (Elle sera appelée  $T_{sim}$  dans les codes de réchauffement des différentes stations.)

$T_0$  : La **température de la rivière en amont du rejet** thermique qui correspond à la valeur initiale de température. Elle est exprimée en K et provient des données de Climespace.

$T_a$  : La **température de l'air à Paris** pour la période donnée mesurée en K, provient des fichiers SAFRAN.

$T_{clim}$  : La **température du rejet thermique** de Climespace dans la Seine (K), donnée Climespace.

$U$  : La **vitesse de la Seine** dépend de  $Q$  mais également du coefficient de Manning qui fait état de la rugosité du lit du fleuve, (en m/s).

$v$  : La **vitesse du vent** mesurée à 10m (m/s, donnée SAFRAN).

---

<sup>8</sup> [http://fr.wikipedia.org/wiki/Atmosph%C3%A8re\\_normalis%C3%A9e](http://fr.wikipedia.org/wiki/Atmosph%C3%A8re_normalis%C3%A9e), Atmosphère normalisée.

$W$  : La **largeur du tronçon de Seine**, pris en fonction du site et du domaine observé. La largeur de la Seine est de 140m au droit de la centrale de Bercy, 117m sur le site de Canada et 110m pour la Seine à Tokyo.

$W_2$  : La **largeur du rejet thermique de Climespace** (m). A Bercy,  $W_2$  est évalué à 31,25m ; 26,78m à la centrale Canada et 31,71m pour le site de Tokyo.

## Annexe 2 : Largeur du panache

Pour chaque site EDS, on peut considérer que la largeur de la Seine sera fixe et qu'elle correspond à la largeur effective de la Seine au point de prise du site (comme exprimée dans le Tableau 2 : Récapitulatif des largeurs W de la Seine et des largeurs de panache W2 selon le site).

La largeur du rejet correspond à la largeur du panache thermique dans la Seine. Les valeurs pour les sites de Canada et de Tokyo sont connues grâce au rapport d'étude du bureau IXSurvey. La largeur de la pollution thermique pour la centrale Tokyo a été mesurée le 1<sup>er</sup> octobre 2008 alors que la centrale Canada (en amont) était éteinte. Pour le site Canada, la mesure est faite le 2 octobre 2008 en fonctionnement seule.

Il n'y a pas eu d'étude sur la pollution thermique effective du site de Bercy, il faut donc la déduire. La largeur du panache peut être comparée à la puissance de la centrale.

La centrale EDS a une puissance frigorifique plus faible que les 2 autres et un débit maximal prise/rejet de 9000m<sup>3</sup>/h (en opposition à 11250 m<sup>3</sup>/h pour les 2 autres). Pour cela, le panache devrait être réduit par rapport à ceux des autres centrales.

Mais le débit instantané maximal de même que le volume maximal sur 24h sont égaux à ceux de la centrale de Tokyo.

Pour la régulation de la température des rejets, tous les sites EDS ne sont pas au même régime et ne suivent pas les mêmes arrêtés. Comme la centrale de Bercy peut rejeter jusqu'à 30°C dans la Seine, le panache peut donc être plus chaud que les 2 autres et donc avoir une « auréole métamorphique » plus importante (surtout en hiver).

Pour toutes ces raisons, j'ai émis l'hypothèse que prendre la valeur moyenne de largeur des 2 autres rejets pour le site de Bercy était un bon compromis.

### Annexe 3 : Calculs des vitesses pour les centrales Canada et Tokyo

Comme les hauteurs d'eau de la Seine ne sont mesurées qu'à la station hydro d'Austerlitz, il faut normaliser les altitudes NGF des centrales de Canada et de Tokyo en fonction des altitudes NGF à Bercy (Zbercy(J)) auxquelles on suppose qu'elles sont reliées.

#### Altitude de la surface de l'eau à Tokyo

On estime  $\Delta Z$  entre Bercy et Tokyo pour un jour donné.

Dans les levés faits par l'ETPS (Etudes et Travaux Public Sous-marins) fin avril début mai 2004, la surface de l'eau à Tokyo est à 26,81m NGF (Passerelle Debilly 2.dwg, coupe 0m en aval pour le rejet de Tokyo).

Du 25 avril au 5 mai 2004, la surface de l'eau à Bercy est en moyenne à 27,29m NGF (Zbercy(ponct)).  $\Delta Z$  est égal à 0,48m. Pour avoir la cote de l'eau au site de Tokyo à tout instant J, il faut donc retirer 0,48cm à la cote mesurée à la station d'Austerlitz. (cote NGF Tokyo, dans le document hauteurs\_deau.xls).

De plus, les 2 centrales sont à une distance de 6353m l'une de l'autre. Je peux donc calculer la pente de la Seine:

$$pente = \frac{Z_{bercy(ponct)} - Z_{tokyo(ponct)}}{distance} = \frac{27,29 - 26,81}{6353} = 7,55549 \cdot 10^{-5}$$

#### Altitude de la surface de l'eau à Canada

Avec une pente de  $7,55549 \cdot 10^{-5}$ , et en sachant que la distance entre Bercy et Canada est de 5420m, on peut déduire l'altitude NGF de la surface de l'eau à Canada et donc la valeur à soustraire aux cotes d'Austerlitz pour avoir la cote à Canada à tout moment J (cote NGF Canada, colonne N dans le document hauteurs\_deau.xls).

Avec ces 2 manipulations, on peut calculer de la même façon que pour la centrale de Bercy tous les autres paramètres.

Ainsi, on peut également tracer la topographie du lit de la Seine au droit des sites Tokyo et Canada (respectivement Tableau 4 et Tableau 5).

éloignement à la berge	profondeur
<b>quai rive droite</b>	3,621
<b>15,7143 m</b>	4,706
<b>31,4286 m</b>	5,444
<b>47,1428 m</b>	6,044
<b>62,8571 m</b>	5,509
<b>78,5714 m</b>	4,894
<b>94,2857 m</b>	4,245
<b>quai rive gauche (110m)</b>	3,636

Pour le site Tokyo, la cotequai\_lit est de 23,21m NGF. (Passerelle Debilly 2.dwg, coupe 0m en aval, (cotequai\_lit = 26,81 - 3,6).

La fonction de modélisation de la topographie est :

$$f(x) = -0,050954266x - 3,7529462$$

Pour  $x = [0 ; 47,1428]$   $R^2=0,9814$

$$g(x) = 0,03870157x - 7,9064426$$

Pour  $x = [47,1428; 110]$   $R^2=0,999$

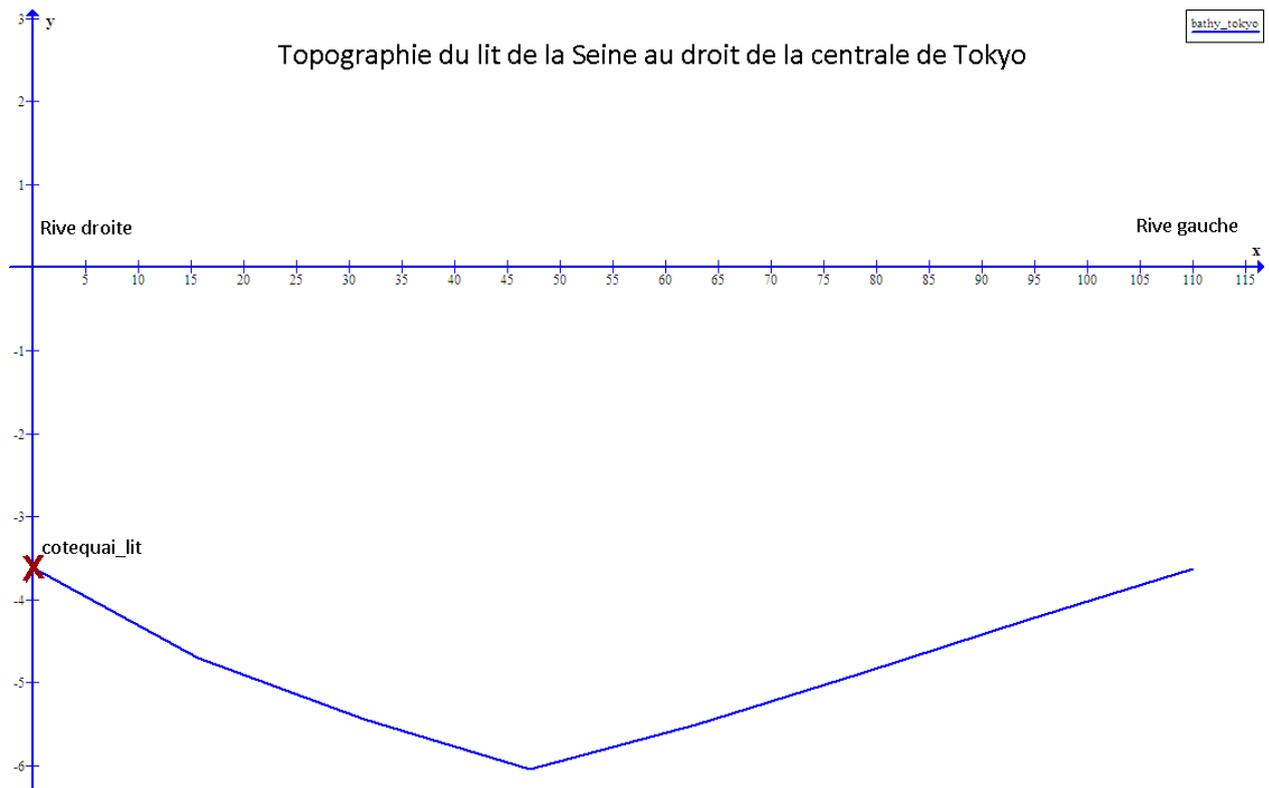


Tableau 4 et Figure 19 : Topographie du fond de la Seine à Tokyo et les valeurs de profondeurs associées au 01/10/2001

J'ai fait l'hypothèse que l'altitude du lit au niveau du quai au droit de la centrale Canada est beaucoup plus proche de celle de la centrale Tokyo que de celle de Bercy. J'ai donc fait le calcul suivant en pondérant par l'inverse des distances à la centrale Canada. Utiliser l'inverse des distances me permet de mettre un poids plus important sur la valeur de la centrale de Tokyo. Je fais donc le calcul suivant :

$$cotequai\_lit\_CA = \frac{\left( cotequai\_lit\_TO \times \frac{1}{dist\_TO\_CA} + cotequai\_lit\_BE \times \frac{1}{dist\_BE\_CA} \right)}{\left( \frac{1}{dist\_BE\_CA} + \frac{1}{dist\_TO\_CA} \right)}$$

Cela donne une valeur égale à 23,26m NGF.

La fonction de modélisation de la topographie est :

$$f(x) = 0,00065977372x^2 - 0,078099768x - 3,2085171$$

avec x : largeur de la Seine

$$\text{Pour } x = [0 ; 117] \quad R^2=0,9807$$

éloignement à la berge	profondeur
quai rive droite	3,303
14m	4,08
28m	4,755
42 m	5,452
56 m	5,524
70 m	5,311
84 m	5,331
98 m	4,435
quai rive gauche (117 m)	3,302

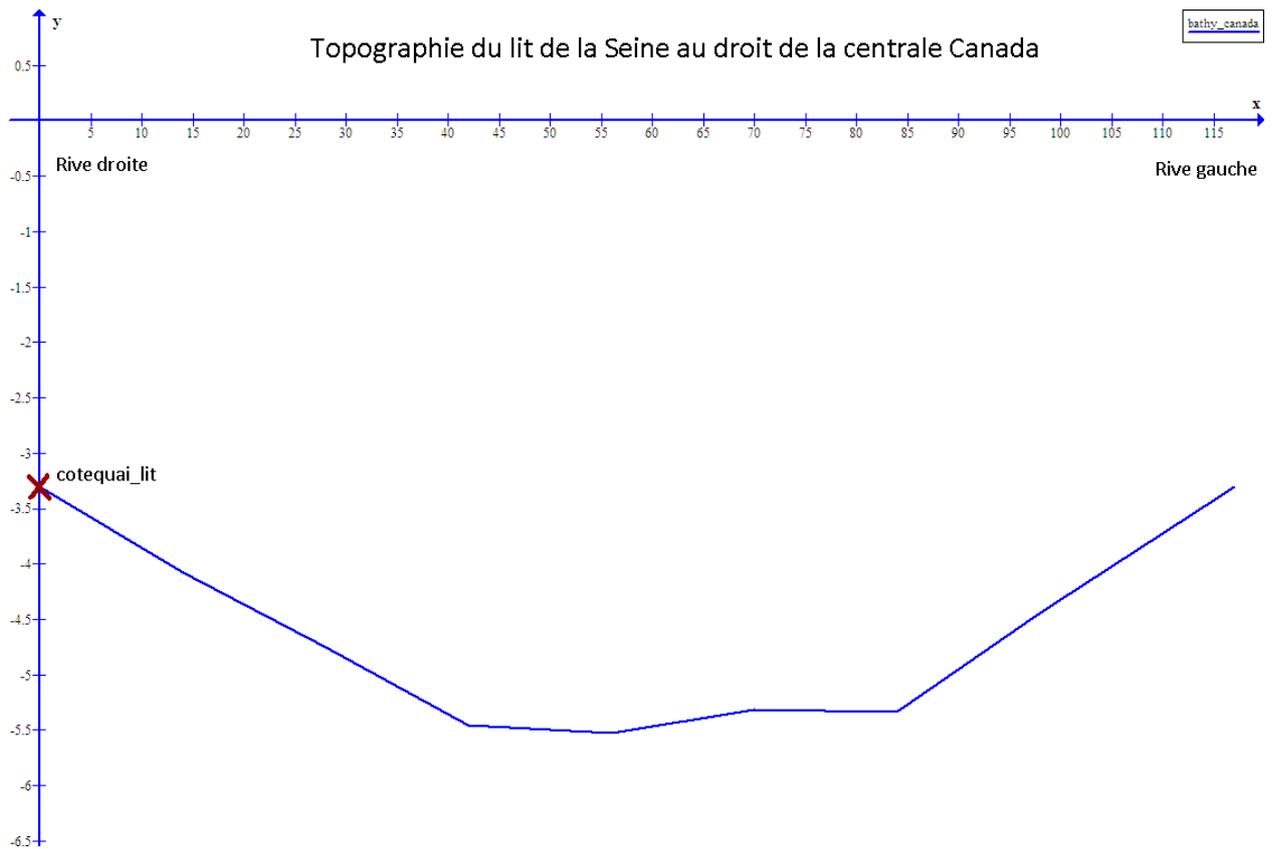


Tableau 5 et Figure 20 : Topographie du fond de la Seine à Canada et les valeurs de profondeurs associées au 01/10/2001

Comment déterminer les autres paramètres. La vitesse de la Seine est déterminée par rapport à la formule de Manning qui permet de faire entrer en compte le facteur de rugosité.

#### Annexe 4 : Distances entre chaque site

Distance(m)	Bercy	Canada	Tokyo	Alma	Garigliano
<b>Bercy</b>	-	5400	6350	6100	9590
<b>Canada</b>	5400	-	950	500	4190
<b>Tokyo</b>	6350	950	-	450	3240
<b>Alma</b>	6100	500	450	-	2790
<b>Garigliano</b>	9590	4190	3240	2790	-

Tableau 6 : Tableau récapitulatif des distances existant entre les sites Climespace mentionnés et les stations de la Banque hydro

## Résumé

Climespace est une entreprise de Climatisation qui dessert de nombreux bâtiments du tertiaire dans Paris. Pour refroidir le liquide frigorigène, certains sites utilisent l'eau de la Seine. Ceci entraîne un apport d'eau chaude dans le fleuve. La problématique posée est donc : quelle est l'influence de Climespace? Quels sont les liens entre la température de l'air et la météo ? Quel impact Climespace a-t-elle sur l'environnement?

Pour répondre à ces questions, un modèle numérique déterministe regroupant les paramètres météorologiques et externes a été créé.

Les calculs de ce modèle sont basés sur l'équation du transfert de chaleur. Ces calculs sont faits grâce aux données de température et de débit de Climespace ainsi que les données météo SAFRAN. Plusieurs calages ont été faits afin que le modèle colle le plus possible à la réalité.

Dans un premier temps, un test qualitatif entre les valeurs observées de température de la Seine en amont du rejet thermique de Climespace et les valeurs simulées sans prendre en compte la plume thermique est fait. On en tire l'information que sans la présence de Climespace, la température de la Seine aurait tendance à diminuer vers l'aval. Pour valider le modèle, les données de température de la Seine observées à des distances précises du rejet du site EDS de Canada ont été comparées aux données de température simulées à cette même distance. Selon les sets de données, il y a un écart de température plus ou moins important observé pendant la période estivale. Malgré ce léger biais en été, le modèle fonctionne très bien en saison hivernale.

Le modèle a donc été utilisé pour calculer l'impact réel de Climespace. Quand on simule les valeurs de température avec et sans Climespace et qu'on compare les différences, il apparaît que l'impact de Climespace est plus important durant l'été et qu'il peut s'élever à plus de 3°C à une distance de 10km du rejet de la centrale Canada comme ce fut le cas en 2006.

Pour aller plus loin dans la compréhension de l'évolution de la température de la Seine, la comparaison du taux d'évaporation et ses conséquences sur la diminution de la température a été faite. En prenant les mêmes conditions météorologiques (été 2003) mais en modifiant les humidités spécifiques on crée deux étés fictifs, un chaud et sec l'autre chaud et humide. Il s'en dégage que l'influence de Climespace se fera sentir plus longtemps dans la Seine sous un climat humide que sous un climat sec.

En conclusion, ce modèle est un bon outil pour prévoir l'impact que Climespace a sur la température de la Seine, surtout dans un contexte de changement climatique. Le fait que l'on puisse quantifier cet impact aidera l'entreprise pour ses développements futurs mais également maintenant concernant les arrêtés préfectoraux auxquels elle est soumise.