



ZiE
Fondation ZiE

Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
International Institute for Water and Environmental Engineering

ANALYSE EN ONDELETTES DES SERIES DE TEMPÉRATURE DE L'EAU DE LA RIVIÈRE DES ANGLAIS (CANADA)

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT OPTION : EAU

Présenté et soutenu publiquement le 16 Juin 2010 par :

Bernadette NKA NNOMO

Ingénieur des Travaux du Génie Rural

Élève en Master II d'Ingénierie de l'eau et de l'environnement

Option - Eau –

Travaux dirigés par : **François ANCTIL** *Ingénieur. Ph.D.*
Professeur titulaire
Chaire de recherche EDS en prévisions et actions hydrologiques
Département de génie civil et génie des eaux, Université Laval.

Angelbert BIAOU *Dr. Ingénieur.*
Professeur d'Hydraulique
Chercheur en Hydrologie UTER GVEA
ZiE, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr. Angelbert BIAOU.

Membres et correcteurs : Dr. Niang DIAL.

Dr. Harouna KARAMBIRI.

Promotion 2009/2010

« Tenter d'imposer d'une manière exclusive une certaine conception de la recherche limitera l'aptitude de la science à s'adapter à un avenir que personne n'est en mesure de prévoir ».

- Pierre Joliot - *De la recherche passionnément*

A Ma Famille.....

REMERCIEMENTS

Ce stage a été possible grâce au Programme canadien de bourses du COMMONWEALTH auquel l'Institut d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) participe afin d'élargir la collaboration avec les écoles étrangères ; je tiens donc à remercier ces deux structures, pour l'organisation administrative et la possibilité offerte pour cet échange culturel.

L'élaboration de ce document n'aurait été possible sans la participation de plusieurs personnes qui ont su me soutenir pendant mon stage. J'exprime donc mes profonds remerciements Bureau International de l'Université LAVAL par son représentant M. Marc Antoine DESY pour son aide dans les démarches administratives ; M. François ANCTIL, Professeur hydrologue, et qui était également mon encadreur au cours de ce stage. Ses conseils ont su m'orienter dans mes recherches ; à M. Angelbert BIAOU principal lien avec mon école d'origine.

Mon séjour en terre canadienne a été agréable par la contribution de M. Vincent Sosthène FOUDA ESSOMBA, grand ami de qui j'ai reçu les encouragements nécessaires, mes collègues et Jérôme et Slim KOUKI qui ont partagé leur espace de travail et leurs connaissances avec moi, Mme Annie-Claude PARENT, dont l'aide et les conseils ont été indispensables à la compréhension des outils auxquels je devais me familiariser. A tous ceux là, je tiens à exprimer ma gratitude et mes profonds remerciements.

Qu'il me soit également permis de remercier , M. Joseph WETHE, qui a été d'un grand soutien avant, pendant et après le déroulement de mon stage ; ce document est l'heureux aboutissement de ses encouragements.

Au terme de ce parcours, permettez-moi pour une fois et peut être la meilleure de dire merci à ma famille, à mes frères et sœurs, mais le plus grand mérite revient à mon père et ma mère, NNOMA METOUGA Célestin et ABENE Marie-louise NNOMA qui m'ont apportés amour et soutien financier dont j'avais besoin pour arriver au terme de mes études. Trouvez ici mon éternelle reconnaissance.

RESUME

Le présent rapport porte sur l'analyse continue en ondelette appliquée aux températures de l'eau, de l'air et de débit prélevées sur les Stations de trois rivières appartenant au bassin versant expérimental de la Rivière des Anglais. Ce travail avait pour but de déterminer les tendances non stationnaires majeures de ces paramètres avec une attention particulière portée sur les cycles journaliers. Une analyse des corrélations et des phases nous a permis ainsi de pouvoir comparer les deux tendances et d'identifier *in fine* les similitudes entre les deux séries.

Les résultats de cette analyse révèlent un lien étroit entre les températures de l'eau et celles de l'air. L'influence du cycle journalier est perceptible entre le printemps et l'automne lorsqu'on utilise des données horaires, plutôt que les données journalières. Les petites rivières sont plus sensibles aux variations horaires des températures de l'air, les grandes par contre prennent les plus grandes valeurs de température. De façon contradictoire, il n'y a pas beaucoup de lien entre les températures de l'eau et les débits de ces cours d'eau. On observe une bonne corrélation à l'échelle annuelle, et un déphasage constant entre les deux séries.

Ces résultats montrent que la température de l'air est un indicateur principal et très certain de la température de l'eau, mais mettent aussi en exergue l'influence des paramètres géophysiques des rivières, tels que leur taille et la masse d'eau qu'elles transportent. Ceci est d'une importance capitale dans le contexte actuel de changement climatique, car les changements de températures de l'air affectent de façon très significative les températures de l'eau, et par extension les caractéristiques physico-chimiques des rivières et la vie des populations aquatiques.

Mots Clés :

1 - Analyse continue en ondelette

2 - Débit

3 - Températures de l'eau

4 - Température de l'air

5 - Rivières et petits cours d'eau

ABSTRACT

A wavelet continuous analysis has been applied on water/air temperatures and flows levied on the stations of three rivers belonging to the catchment basin of the experimental English river to determine the major non-stationary trends of these parameters, with special attention on daily cycles. An analysis of correlations and phases allows to compare the two trends and to identify the similarities between the two series.

The results of this analysis reveal a great link between the temperatures of the water and those of the air. The influence of daily cycle is perceptible between the spring and the fall when hourly data are used, rather than the daily data. The small rivers are more sensitive to changes schedules of air temperatures, the large by against shall take the greatest values of temperature. In contradictory, there is not a lot of link between the temperatures of the water and the flows of these courses. There is a good correlation to the annual scale, and a constant disparity between the two series. These results show that the temperature of the air is a key indicator and very sure of the temperature of the water, but also put highlight the influence of geophysical parameters of rivers, such as their size and the mase water which they carried. This is of paramount importance in the current context of climate change, because the changes in the temperatures of the air affect significantly the temperatures of the water, and by extension physico –chemical characteristics of rivers and the lives of people aquatic.

Key words :

- 1 – Wavelet continuous analysis*
- 2 – Debit*
- 3 – Water temperature Air temperature*
- 4 – Air temperature*
- 5 – Rivers and Small water courses*

LISTE DES FIGURES

| | | |
|------------------|---|----|
| Figure 1: | Présentation des stations de jaugeage de la rivière des Anglais. | 8 |
| Figure 2: | Représentation Temps - Observation des séries de température de l'eau et de l'air des stations | 11 |
| Figure 3: | Spectre de Puissance Local Standardisé de la série de température de la station St_20 et représentation de l'ondelette mère de Morlet | 16 |
| Figure 4: | Représentation de la cohérence entre la série de la station St_20 et la série de température de l'air..... | 17 |
| Figure 5: | Spectres de puissance local Standardisés des températures. | 20 |
| Figure 6: | Spectres de puissance local standardisés des débits | 21 |
| Figure 7: | Croisement des séries de température de l'eau avec celles de l'air des stations St_20 et St_21 | 23 |
| Figure 8: | Croisement des séries de débit avec les séries de températures des stations St_20 et St_21..... | 24 |
| Figure 9: | Spectres de puissance local Standardisé des Températures..... | 27 |

LISTE DES TABLEAUX

| | | |
|--------------------|---|--|
| Tableau 1 : | Stations expérimentales des Rivières des Anglais..... | |
| Tableau 2 : | Caractéristiques des stations retenues pour l'analyse..... | |
| Tableau 3 : | Contributions des variances des différentes périodes à la variance totale série de températures journalières..... | |
| Tableau 4 : | Contributions des variances des différentes périodes à la variance totale séries de températures horaires..... | |

SOMMAIRE

| | |
|---|-----------|
| II. INTRODUCTION | 3 |
| A. Importance des températures de l'eau des rivières | 3 |
| B. Modelisation de la température de l'eau | 3 |
| 1. Les méthodes déterministes | 3 |
| 2. Les méthodes stochastiques | 4 |
| C. Liens entre les températures de l'eau et de l'air | 4 |
| D. Objectifs du projet | 6 |
| III. HYPOTHÈSE DE TRAVAIL | 7 |
| A. Présentation du bassin versant de la rivière des Anglais | 7 |
| B. Sélection des données | 8 |
| 1. Données de température de l'eau | 8 |
| 2. Données de température de l'air | 9 |
| 3. Données de débit | 10 |
| C. Analyse des séries temporelles | 10 |
| IV. MATÉRIELS ET MÉTHODES | 12 |
| A. Les données d'étude | 12 |
| 1. Utilisation des données | 12 |
| 2. Traitement des données | 12 |
| B. Une brève explication de l'analyse par transformée continue en ondelettes | 13 |
| 1. Pourquoi l'analyse spectrale ? | 13 |
| 2. La Transformée de Fourier, point de départ | 13 |
| 3. Qu'est ce qu'une ondelette ? | 14 |
| 4. Comment se fait l'utilisation des ondelettes ? | 15 |
| V. RÉSULTATS | 18 |
| A. Applications sur les séries journalières de température et de débit | 18 |
| 1. Les températures | 18 |
| 2. Les débits | 21 |
| B. Croisement Des Séries De Temporelles Journalières | 22 |
| 1. Croisement des séries de température | 22 |
| 2. Croisement des séries de température avec les séries de débit | 23 |
| C. Analyse En Ondelette Des Séries Horaires | 24 |
| D. Croisement Des Séries Horaires | 28 |
| VI. DISCUSSION ET ANALYSES | 29 |

| | |
|---|-----------|
| VII. CONCLUSIONS..... | 33 |
| VIII. RECOMMANDATIONS - PERSPECTIVES | 35 |
| IX. BIBLIOGRAPHIE | 36 |
| ANNEXES | 38 |
| Annexe I: Bassin versant de la rivière aux anglais | 39 |
| Annexe II: Séries de débits des rivières | 40 |
| Annexe III: Cohérence entre séries de température de l'eau | 41 |
| Annexe IV: Observations des températures horaires de l'eau et de l'air | 42 |
| Annexe V: Cohérence entre séries horaires de température de l'eau et de l'air | 44 |

II. INTRODUCTION

A. IMPORTANCE DES TEMPERATURES DE L'EAU DES RIVIERES

L'influence marquée de la température de l'eau des rivières sur les êtres aquatiques a poussé les hydrologues et géologues à s'intéresser à l'évolution de cette variable dans le temps, afin notamment de prévenir des changements préjudiciables à la faune aquatique. Par exemple, la température de l'eau influence la répartition spatiale des espèces aquatiques, leur reproduction, leur comportement et même leur état sanitaire. Elle est également un facteur physico-chimique très important dans la détermination de la qualité des eaux, car elle dicte le taux maximal de dissolution de l'oxygène dans l'eau qui est inversement proportionnel à la température (Secondat 1952). Au CANADA par exemple, les concentrations minimales d'oxygène dissout surviennent en général l'été : la période la plus chaude de l'année (Morrill 2005).

La maîtrise des températures des cours d'eau est donc un enjeu de première importance, particulièrement dans contexte de changement climatique.

La caractérisation à long terme de la température des cours d'eau est un exercice utile permettant d'identifier les paramètres les plus influents sur le devenir de la température d'un cours d'eau, et même de prévenir des dépassements brusques pouvant influencer les caractéristiques normales des eaux, nécessaires à la survie des populations aquatiques.

B. MODELISATION DE LA TEMPERATURE DE L'EAU

Les données de températures de l'eau des rivières ne sont pas très répandues ; elles sont peu nombreuses et pour les séries qui existent, ces données sont presque toutes incomplètes. Des méthodes d'estimation de cette température ont été mises en exergue par plusieurs chercheurs (Marcotte et Duon 1973; Erickson et Stefan 2000; L'Heureux 2002; Belanger et al. 2005; Caissie et al. 2005; Morrill et al. 2005). Deux approches se distinguent : les *méthodes déterministes* et les *méthodes stochastiques*.

1. Les méthodes déterministes

Les méthodes déterministes permettent d'obtenir la température de l'eau à partir du calcul de transfert chaleur entre le cours d'eau et le milieu ambiant (Raphael 1962; Edinger 1968; Gras 1969;

Weeks 1971; Marcotte 1973...). Elles utilisent des variables telles que, les rayonnements solaires, l'humidité relative, la vitesse du vent, les dimensions de surface libre de la rivière, la profondeur, et le débit. Bien que l'approche déterministe nécessite que le calcul du flux total de chaleur sur une surface d'eau soit valide, il reste que la détermination des paramètres de calcul n'est pas si évidente, car celle-ci nécessite de vastes connaissances hydrologiques et la maîtrise du cours d'eau à l'étude.

2. Les méthodes stochastiques

Les méthodes stochastiques sont considérées plus simples car elles sont basées sur des corrélations entre la température de l'eau et celle de l'air. Elles ont l'avantage d'être facile à mettre en œuvre et de nécessiter peu de variables explicatives, bien qu'elles exigent de longues séries d'observation. De tels modèles reposent sur la structure des séries temporelles de l'eau et de l'air (Johnson, 1971; Cluis 1971; Kohtandaraman 1971).

C. LIENS ENTRE LES TEMPERATURES DE L'EAU ET DE L'AIR

Mohseni et Stefan (1998) ont confronté plusieurs méthodes d'estimation de la température hebdomadaire des cours d'eau, et précisent que la plus simple exploite l'existence d'une relation linéaire simple entre les températures de l'eau et de l'air. Selon eux, la température de l'eau est d'avantage corrélée à la température de l'air lorsqu'on recourt à observations hebdomadaires et mensuelles plus tôt qu'à des données journalières ou horaires. Toutefois, cette relation fait parfois défaut, notamment lors des événements extrêmes (L'Heureux 2005). En effet, les températures de l'eau et de l'air suivent toutes un cycle annuel bien stable et continu. Cependant, bien que le cycle annuel soit prépondérant, les fluctuations les plus fortes de la température de l'eau se produisent pendant la saison estivale (incluant le printemps et l'automne), avec des variations journalières proches de celles de l'air. Pendant l'hiver au Canada, la surface libre des rivières se solidifie et se couvre de neige. Les effets du gel viennent alors réduire, voire annuler les échanges de chaleur entre l'eau et l'air, invalidant la corrélation observée en période d'eau libre (L'Heureux 2002; Morrill 2005). Aussi selon ces auteurs, des modèles de prédiction de la température de l'eau à partir de la température de l'air sont donc inefficaces en période de gel. Par ailleurs, pour des températures de l'air élevées (au-delà de 30°C), à mesure que celle-ci augmente, la capacité de rétention d'humidité de l'atmosphère augmente exponentiellement (loi de Clausius-Clapeyron), ce qui favorise l'évaporation dont l'action a pour effet de refroidir la masse d'eau. Dans ce cas, la température de

l'eau ne croît plus linéairement avec celle de l'air, elle tend plutôt vers une asymptote (L'Heureux 2002).

Le rayonnement solaire contribue également au réchauffement des cours d'eau. La relation stochastique de Cassie (2005) décrit les variations de la température de l'eau comme un facteur du flux de chaleur échangé entre l'eau et l'atmosphère.

$$\frac{\partial T_W}{\partial t} = \frac{W}{\theta \rho A} H_t \quad (1).$$

Où : T_W = Température de l'eau (°C) ;
 t = Temps (jours) ;
 W = Largeur du cours d'eau (m) ;
 θ = Chaleur spécifique de l'eau ($4,19 \times 10^3$ MJ/kg/°C) ;
 ρ = Masse volumique de l'eau (1000 kg/m³) ;
 A = Aire de la section (m²) ;
 H_t = Flux total de chaleur au dessus de la surface de l'eau (MJ. m⁻². Jours⁻¹).

D'après cette relation, le taux de changement de la température de l'eau est inversement proportionnel à l'aire de la surface libre de l'eau soumise au rayonnement, mais proportionnel au flux total de chaleur au-dessus de cette surface. Ainsi, l'ombrage et la végétation dont est constituée la ripisylve peuvent limiter les rayonnements sur la surface et jouer un rôle indirect dans le processus de transfert d'énergie. Par ailleurs, il découle de cette formule que la durée du jour et l'ensoleillement qui varie avec le passage des saisons influencent également la température de l'eau.

Le débit hydrologique joue également un grand rôle pendant les saisons estivales, particulièrement en période d'étiage, lorsque les faibles débits causent une diminution de la profondeur d'eau et une réduction de la vitesse de transfert de la masse d'eau, la température de l'eau augmente. Un phénomène dommageable pour certaines espèces de poisson (Malavoi et Souchon 1992). Bélanger (2005) propose une méthode de détermination de la température de l'eau à partir de la combinaison de système de neurones et de régressions linéaires multiples. Pour cette analyse, il considère que les deux paramètres qui influencent le plus la température de l'eau sont la température de l'air et le débit. Cette recherche donne des résultats satisfaisants sur plusieurs années, avec un taux d'erreur assez faible et un bon niveau de performance.

Quelle que soit la méthode d'analyse utilisée, constat est fait que la température de l'eau est grandement influencée par la température de l'air premier indicateur facilement mesurable. La relation entre ces deux paramètres est dépendante de plusieurs facteurs dont les plus importants ont été cités plus haut. Cependant, d'autres facteurs tels que l'importance du réseau hydrographique et

les apports des aquifères sous jacents jouent également un rôle et ne peuvent donc pas être négligés lorsqu'on procède à une analyse ou une détermination des températures de façon horaire et quotidienne (Stefan 1992; Erickson 2000).

D. OBJECTIFS DU PROJET

L'objectif de ce projet est de comparer la structure fréquentielle de séries de températures de trois rivières sises sur le bassin versant des Anglais au Canada à celles de la température de l'air de cette région à l'aide d'une analyse continue en ondelettes : une méthode récente d'analyse fréquentielle des séries temporelles. Cette analyse mènera à une description détaillée de la structure fréquentielle des températures de l'eau, de son évolution au cours du temps, et des similitudes avec les températures de l'air, en portant un accent particulier sur les séries horaires. Nous analyserons également l'influence du débit sur les températures des ces rivières. Une estimation de la corrélation et du déphasage entre les deux types de températures nous permettra d'identifier les liens en fonction des périodes. Nous analyserons également l'évolution de ce déphasage en fonction de la surface du bassin versant, les rivières drainant des superficies de tailles différentes.

Les résultats obtenus permettront notamment de caractériser les températures de la Rivière des Anglais. A cet effet, le travail présenté dans ce document est condensé en six grandes parties. Cette première partie fait un résumé des études pertinentes déjà réalisées sur la température de l'eau des rivières. La seconde partie intitulée «Hypothèses et objectifs» donne les hypothèses de bases de l'analyse et les objectifs spécifiques à atteindre. La troisième partie, «Matériel et méthodes » explique les principes de traitement des données et les bases de l'analyse en ondelettes qui est la méthode principale utilisée pour ce travail de recherche, et explique son importance et ses avantages par rapport aux autres méthodes d'analyses. La quatrième partie donne les résultats obtenus de l'analyse réalisée, la cinquième ouvre une discussion détaillée sur les résultats obtenus, la sixième conclue et la dernière partie est constituée des recommandations et les perspectives d'un tel axe de recherche pour la prévision hydrologique.

III. DONNEES DE L'ETUDE

A. PRESENTATION DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE DES ANGLAIS

Le bassin de la rivière Châteauguay situé sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent, au sud-ouest de la région métropolitaine de Montréal couvre une superficie de 2543 km², dont environ 62 %, soient 1444 km² sont dans la province de Québec au Canada. Le reste du territoire du bassin versant se trouve dans l'État de New-York, aux États-Unis. Les six principaux tributaires drainent à eux seuls 64% de la portion québécoise du bassin versant. Ce sont, par ordre d'importance de superficie drainée, les rivières des Anglais (28 %), Trout (17 %), aux Outardes (9 %), de l'Esturgeon (4 %), Hinchinbrooke (4 %) et des Fèves (2 %).

La rivière des Anglais (Figure 1) est un affluent de la rivière Châteauguay qui draine un sous-bassin versant de l'ordre de 700 km² dont le territoire est largement dominé par les activités agricoles dans sa partie canadienne. Une particularité de ce bassin est la présence abondante de terres à haute teneur en matière organique, surtout du côté du ruisseau Norton.

En plus de la station de jaugeage construite près de l'exutoire par le Centre d'expertise hydrique du Québec, le bassin compte sept sites expérimentaux équipés pour la mesure des débits et dans certains cas de la température de l'eau (Tableau 1)

Tableau 1 : Stations expérimentales des Rivières des Anglais.

| <i>Cours d'eau</i> | <i>Stations</i> | <i>Superficie (km²)</i> |
|----------------------------|----------------------|------------------------------------|
| Rivière des Anglais | Saint-Chrysostome | 250 - 275 |
| Rivière des Anglais | Chemin Jackson | 150 |
| Ruisseau Norton | Chemin Hurley | 40 - 50 |
| Rivière Noire | L'Artifice | 30 - 35 |
| Ruisseau Cranberry | Rang 4 | 25 - 30 |
| Ruisseau Guibeault-Delisle | Montée du Grand Rang | 12 - 15 |

B. SELECTION DES DONNEES

1. Données de température de l'eau

Les données chronologiques de température (en °C) de l'eau du bassin versant de la rivière des Anglais sont fournies par le CEHQ (Centre d'Expertise Hydraulique du Québec) sous forme de séries horaires non traitées.

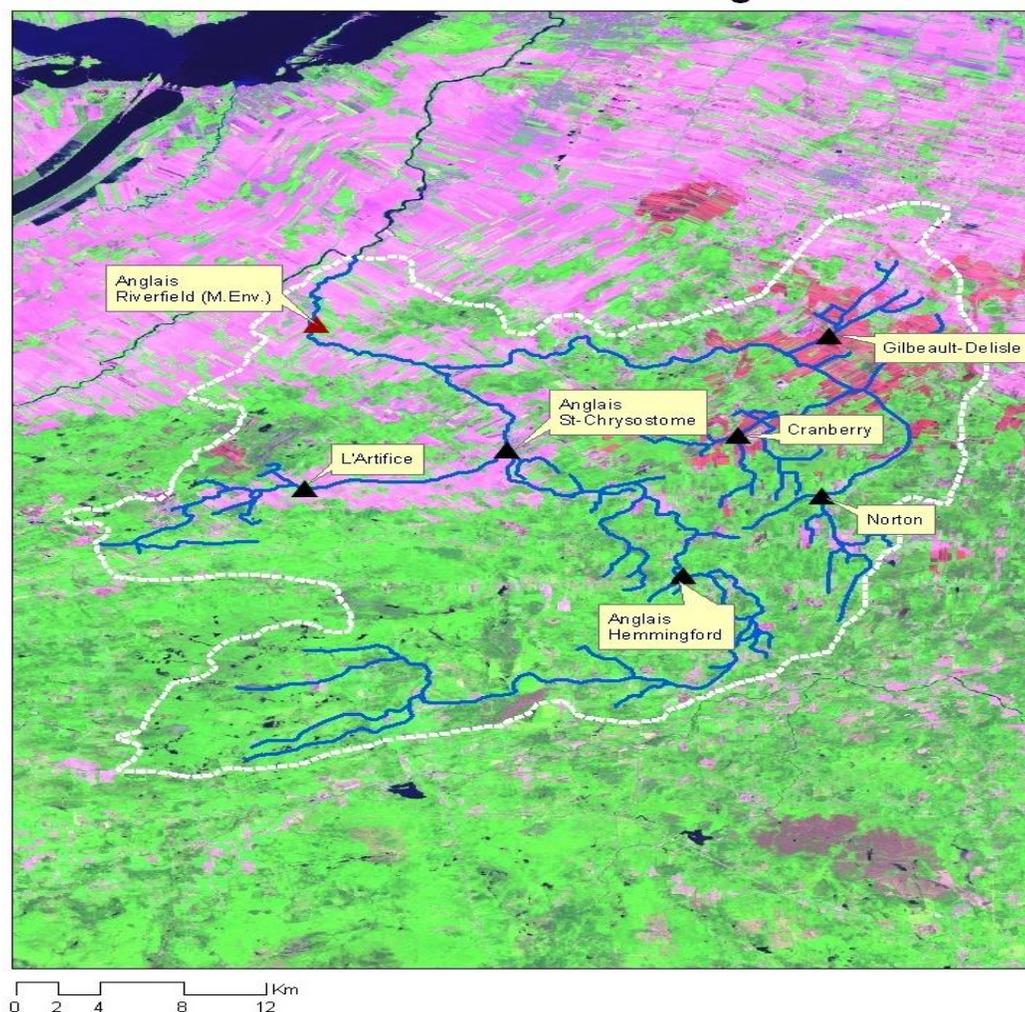


Figure 1: Présentation des stations de jaugeage de la rivière des Anglais.

Le choix des rivières à étudier s'est basé sur le nombre de données prélevées, notre objectif étant d'analyser des données récentes. Nous avons procédé au recensement des données des températures de l'eau sur quatre années comprises entre janvier 2006 et février 2010, sans interruption. Sur la base de ce critère, seules trois des sept stations existantes ont été retenues pour l'étude ; ces stations sont identifiées par des numéros et représentent la rivière où elles sont

implantées. Nous utiliserons ces numéros afin d'alléger les textes dans la suite du document. Le Tableau 2 donne les caractéristiques de chacune des stations retenues pour l'étude, respectivement sur la rivière Noire, la rivière des Anglais et le ruisseau Norton.

Tableau 2 : Caractéristiques des stations retenues pour l'analyse.

| N° Station | St_20 | St_21 | St_23 |
|-------------------------------|----------------|---------------------|-----------------|
| Nom de la Rivière | Rivière Noire | Rivière des Anglais | Ruisseau Norton |
| Nom de la station | L'Artifice | St-Chrysostome | Norton |
| Latitude | 45°04'35.954" | 45°06'0.232" | 45°04'20.08" |
| Longitude | -73°50'59.938" | -73°45'45.686" | -73°37'36.666" |
| Superficie (km ²) | 37.70 | 249.0 | 36.10 |
| Valeur Moyenne (°C) | 9.27 | 9.84 | 9.21 |
| Valeur maximale (°C) | 25.43 | 27.81 | 24.75 |
| Valeur minimale (°C) | -0.01 | 0.03 | -0.14 |

La station St_23 qui représente les températures du ruisseau Norton est utilisée dans une partie de l'analyse pour démontrer l'influence de la surface de la rivière sur les températures de l'eau. Signalons en addition à l'information donnée par le tableau que les trois rivières ont des surfaces de bassin versant très différents : le Norton est un ruisseau et a par conséquent un réseau hydrographique moins dense que la rivière Noire, qui elle-même est plus petite que la rivière des Anglais. La différence de surface est un élément d'analyse de ce projet, qui nous permettra de voir son influence sur les échanges de chaleur entre l'eau et l'air ambiant.

2. Données de température de l'air

En ce qui concerne les températures de l'air, une seule série a été utilisée. Cette série a été prélevée dans les *Archives Nationales de données et d'Information Climatiques* d'Environnement Canada (Canada, 2010). Il s'agit des données de la station météorologique Sainte-Clotilde, qui couvre le bassin versant de la rivière des Anglais. Ses caractéristiques sont: Latitude: 45°10'00.000N, Longitude: 73°41'00.000W, Altitude: 56,40 m. Les données disponibles ont été téléchargées sous forme de mesures horaires et de moyennes journalières. Ces données sont traitées et validées avant diffusion pour une utilisation publique. Aucun traitement n'a donc été nécessaire.

3. Données de débit

Les données des débits des rivières sus mentionnées proviennent des mesures effectuées par le CEHQ sur les mêmes stations que celles utilisées pour la mesure des températures de l'eau. Il s'agit de données journalières traitées et validées.

C. ANALYSE DES SERIES TEMPORELLES

Il est attendu que les températures de l'air et de l'eau présentent un cycle annuel marqué. Il en est de même pour les séries disponibles à l'étude : minimum l'hiver en décembre et janvier notamment, et maximum typiquement au mois de juillet. Les deux types de températures se distinguent particulièrement pendant l'hiver ; où l'eau protégée par une couverture de glace reste légèrement au-dessus de point de congélation, ce qui n'est bien sûr pas le cas pour l'air. Une seconde différence se situe au niveau des fluctuations journalières qui sont plus marquées pour l'air que pour l'eau (figure 2).

NB : *La station St_23 n'est pas représentée ici car nous ne disposons dans ce cas que d'une année de données. Nous y revenons dans la suite de l'analyse.*

Les séries de débits des rivières présentent des valeurs qui reflètent la superficie du bassin versant que draine chaque rivière (voir l'annexe II). En effet, on remarque que la station St_21 enregistre des valeurs du débit plus élevées que les autres stations qui drainent des bassins versants plus petits.

Analyse en ondelettes des séries de température de l'eau de la rivière des Anglais
Année 2009 / 2010

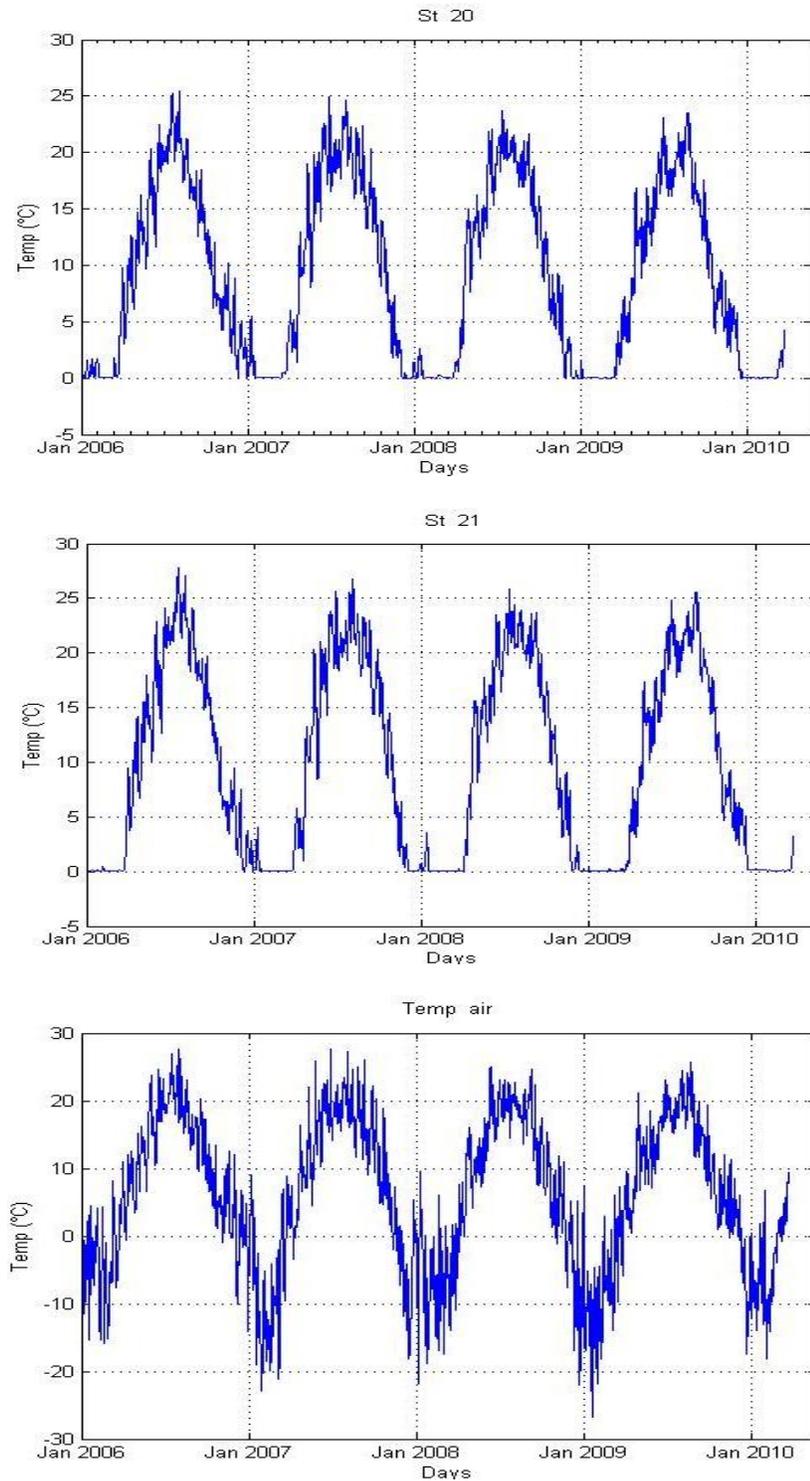


Figure 2: Représentation Temps (Jours) - Amplitude (°C) des séries de température de l'eau et de l'air des stations

IV. MATÉRIELS ET MÉTHODES

A. LES DONNEES D'ETUDE

1. Utilisation des données

L'analyse réalisée dans cette étude concerne les données journalières et les données horaires. Les données journalières nous permettent d'étudier les tendances annuelles, les séries s'étendant sur quatre années, de Janvier 2006 à Janvier 2010.

Les données horaires nous permettent une analyse fine des variations internes à chaque jour de l'année, ce que ne permettent pas les données journalières. A cet effet, la longueur des séries pour cette analyse a été réduite à un an, afin notamment d'intégrer dans l'analyse la station St_23. Un échantillon des données a donc été prélevé sur une saison, entre Janvier 2006 et Février 2007. Les données de températures de l'eau ont cette fois été conservées en mesures horaires et les données horaires de température de l'air ont été prélevées de la base de données d'Environnement Canada.

Quant à l'analyse en ondelettes, elle est possible avec le logiciel **MATLAB**. Toutes les fonctions d'ondelettes ont déjà été établies, il s'agit des programmes couramment utilisées par l'équipe de recherche de M. Anctil pour l'analyse de séries environnementales, dont les principales fonctions ont été rendues disponibles par Torrence et Compo (1998). Ces programmes ont cependant été adaptés au présent sujet pour une meilleure interprétation des résultats.

2. Traitement des données

Les données sujettes au traitement sont les données de température de l'eau, car celles-ci étaient des données non validées et présentaient des lacunes. Ce traitement s'est effectué en deux principales étapes.

a) Dans Excel : Quelques lacunes ont été identifiées et comblées par interpolation linéaire. Notons que la limite de données manquantes acceptée pour une série était de huit heures dans une même journée, dans le cas contraire, la journée aurait été éliminée. Ceci dit, nous n'avons rencontré aucun cas de données manquantes sur plus de huit heures.

b) Dans MATLAB : Les moyennes journalières ont été calculées pour les besoins de la première analyse. Cette opération est possible en utilisant un programme faisant les moyennes. Les valeurs ainsi obtenues sont enregistrées comme fichier MATLAB et prêtes pour utilisation.

NB : Les données de température de l'air et de débit n'ont pas subi de traitement proprement dit, car ces données avaient déjà été validées et ne présentaient pas d'erreur.

B. UNE BREVE EXPLICATION DE L'ANALYSE PAR TRANSFORMEE CONTINUE EN ONDELETTES

1. Pourquoi l'analyse spectrale ?

Les séries temporelles encore appelées séries chronologiques occupent une place très importante dans l'observation ou la collection des données. Le mot « séries » est employé ici pour caractériser le fait que les données (grandeurs physiques) sont colligées dans un certain ordre (temps en termes de secondes, de minutes, d'heures, de jours, de mois ou d'années) et suivant un rythme constant. Ces séries peuvent être représentées graphiquement, avec en abscisse les marques de temps et en ordonnée les valeurs relevées aux instants correspondants, ce qui nous donnerait une représentation observations - temps. Parallèlement à cet aspect temporel, il est souvent intéressant d'utiliser une représentation en fonction de la fréquence (représentation spectrale ou spectre de fréquence). L'analyse spectrale demande donc la conversion des données du domaine temporel au domaine fréquentiel, le but étant de déterminer les tendances dominante de la série temporelle afin d'en déduire ses caractéristiques cycliques. L'une des méthodes les plus récentes dans cette technique d'analyse est *la transformation continue en ondelettes*.

2. La Transformée de Fourier, point de départ

La transformée de Fourier est une opération par laquelle les données temporelles $x(t)$ sont converties en données fréquentielles $X(f)$, grâce à la fonction :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{i2\pi ft} dt \quad (2).$$

En effet, lorsqu'on cherche la valeur de $X(f)$ pour une fréquence précise, cela veut dire qu'on veut déterminer dans toute l'histoire de $x(t)$ ce qui correspond à cette fréquence; chaque fréquence étant reliée à une fonction sinusoïdale (dépendante du temps). Ceci nous donne une information sur la régularité globale du signal. Cependant, avec la transformée de Fourier il n'est pas possible d'obtenir directement une information localisée dans le temps. Qui plus est, on ne peut pas étudier des signaux dont l'amplitude pour une fréquence donnée varie au cours du temps.

Le besoin suivant a été de représenter un signal en fonction des deux paramètres que sont le temps et la fréquence ; Les fonctions sinusoïdales qui servent à décomposer le signal sont conséquemment dépendantes à la fois du temps et de la fréquence. On parle alors de *Transformées*

de Fourier à fenêtre glissante, l'idée de base consiste à découper le signal en plages temporelles. On réalise sur chaque plage une analyse de Fourier, ce qui fait que cette analyse est dépendante de la localisation de la plage. Le principal inconvénient de cette technique est que la longueur de la plage (l'échelle) est fixe. Cela peut s'avérer très embarrassant si on fait l'analyse de signaux qui correspondent à des phénomènes avec des échelles de temps très différents. C'est par exemple le cas lors de l'analyse de données hydrologiques ou météorologiques, quand on doit analyser des séries non stationnaires (séries dont la variance n'est pas stable dans le temps). Il est alors difficile de délimiter les différentes fréquences avec une analyse de Fourier.

Il faut donc pouvoir conserver la représentation temps-fréquence et réaliser une analyse multi-échelle ou multi résolution. C'est ce que permet le traitement du signal par ondelettes en tenant compte de la régularité locale. En jouant sur le facteur d'échelle, on fait une sorte de zoom avant/arrière sur une portion du signal.

3. Qu'est ce qu'une ondelette ?

Une ondelette peut être définie comme une fonction oscillante courte et bien localisée en temps et en fréquence. Supposons une série de données temporelles x_n , $n = 0; \dots; N - 1$ relevées à des intervalles de temps égaux δt , et une fonction d'ondelette $\psi_0(\eta)$ dépendant d'un paramètre adimensionnel η . Pour que cette fonction soit considérée comme une *ondelette*, il faut qu'elle satisfasse les deux conditions d'admissibilité qui veulent:

- qu'elle soit localisée en fréquence et en temps ;
- que sa moyenne soit nulle. (Torrence et Compo 1998)

Le principe est que la transformée continue en ondelettes W_n d'une série discrète d'observations x_n s'obtient de la convolution de x_n avec une ondelette $\psi(\cdot)$ définie en temps et échelle :

$$W_n(s) = \sum_{n'=0}^{N-1} x_{n'} \psi^* \left[\frac{(n'-n)\delta t}{s} \right] \quad (3).$$

s est l'échelle de l'ondelette ;

n est un indice temporel propre à l'ondelette (localisé) ;

δt est le rythme ou intervalle d'échantillonnage de la série x_n ;

N est la longueur de la série temporelle ;

* identifie l'opération complexe conjuguée.

En variant l'échelle et en faisant une translation le long de la série pour un indice de temps n , il est possible de construire une figure représentant les amplitudes de chaque ligne d'échelle, ainsi

que les variations de ces amplitudes en fonction du temps. Cette formule permet donc de faire une approximation de la transformée en ondelettes. Une explication plus détaillée de l'utilisation des ondelettes dans l'analyse des séries temporelles est faite dans l'article « *A practical guide to wavelet analysis* » de Torrence et Compo (1998).

4. Comment se fait l'utilisation des ondelettes ?

L'analyse par ondelettes a été introduite au début des années 1980, dans un contexte d'analyse du signal dans un contexte d'exploration pétrolière. Dès lors, l'utilisation des ondelettes dans le domaine scientifique n'a cessé de se développer, et a permis de déterminer de nouveaux champs d'application de cet outil. De nos jours, les ondelettes constituent une grande puissance d'analyse, puisqu'ils sont utilisés dans plusieurs domaines. En hydrologie, l'analyse en ondelettes est de plus en plus utilisée pour décrire le comportement des séries chronologiques de paramètres hydrologiques tels que le débit, la pluviométrie des cours d'eau l'humidité des sols (Lauzon et call 2004; Anctil et Coulibaly 2004; Anctil et al. 2008; Tremblay 2009). Dans ce cas l'analyse en ondelettes permet de voir l'évolution de la variance d'un phénomène afin d'en dégager les tendances non stationnaires dominantes en fonction du temps.

Il existe plusieurs types d'ondelettes parmi lesquelles on peut citer l'ondelette de Morlet, et le Mexican Hat. Chaque ondelette possède des propriétés spécifiques. Et cette différence est perceptible sur les informations qu'elles donnent de la série entre les domaines fréquentiel et temporel. Bien que le résultat de l'analyse soit affecté par le choix de l'une ou l'autre des ondelettes, l'interprétation de ce résultat devrait invariablement rester la même. Le choix de l'utilisation d'un type d'ondelettes est cependant dépendant de l'objectif à atteindre, et du confort de l'utilisateur (Torrence et Compo 1998). Dans le cadre de notre étude, seule une ondelette a été utilisée : l'ondelette de **Morlet**. C'est une ondelette qui a fait ses preuves dans l'étude des séries hydrologiques menées par plusieurs auteurs. Elle a une bonne définition dans le domaine fréquentiel, et sa forme s'adapte bien aux données environnementales.

Nous limiterons les explications données ici sur les procédés de l'analyse par ondelettes aux besoins exigées par l'étude en cours. Ceci dit, plusieurs documents sont proposés en page bibliographique afin d'apporter une ample compréhension à l'utilisation des ondelettes dans l'analyse des séries temporelles non stationnaires (Torrence et Compo 1998; Torrence et Webster 1999; Labat 2005).

a) Le Spectre de Puissance Local standardisé des séries Temporelles

La figure 3 représente le Spectre de Puissance Local standardisé d'une des séries de température de l'eau (station St_20), obtenu en utilisant l'ondelette non orthogonale complexe de Morlet qui est la composition d'une onde plane (fonction sinusoidale) modulée par une fonction gaussienne. Son expression est la suivante :

$$\psi_o(\eta) = \pi^{-0.25} e^{iw_0\eta} e^{-0.5\eta^2} \quad (4).$$

Où w_0 est la fréquence adimensionnelle. Pour satisfaire la condition d'admissibilité, on prend $w_0 = 6$, ainsi l'échelle utilisée par l'ondelette est égale à la période de Fourier correspondante (Torrence Christopher, 1998)

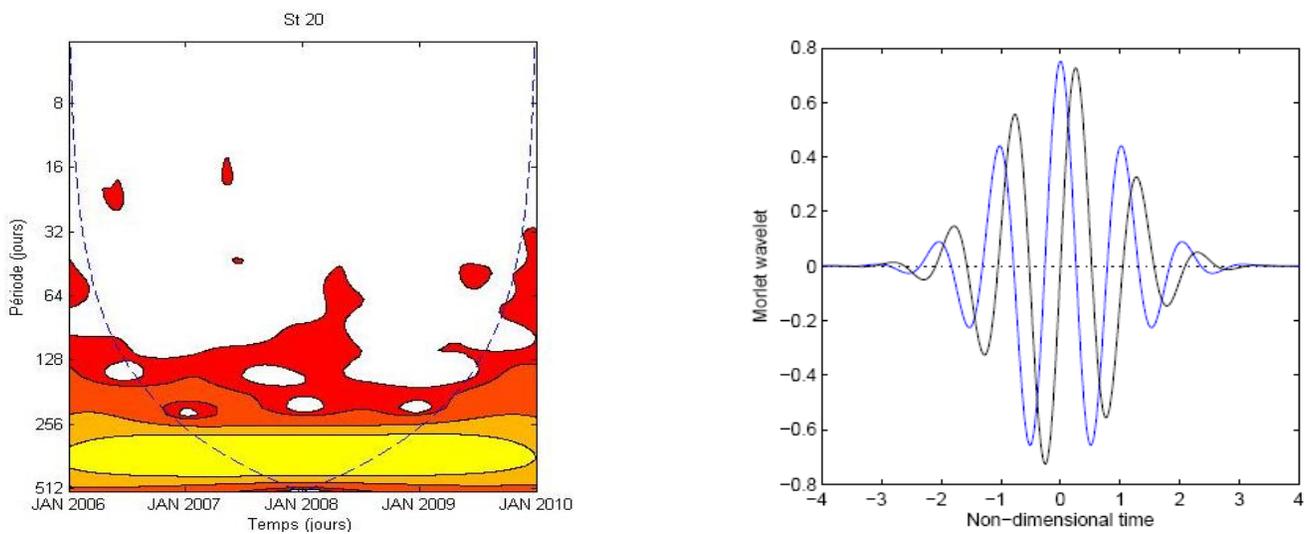


Figure 3: A gauche, le Spectre de Puissance Local Normalisé de la série de température de la station St_20; A droite représentation de l'ondelette avec partie réelle en bleu et partie imaginaire en Noir.

Sur l'axe gauche de la figure sont portées les périodes de Fourier correspondantes de l'analyse, qu'on considère également comme échelles de l'ondelette. L'axe du bas représente le temps, qui est la durée d'échantillonnage ou la durée de prélèvement. Le cône d'influence (en ligne pointillée) délimite les parties du spectre pour lesquelles les effets de bordure, induits par la technique du zéro-pad ding (consistant à prolonger la série de données de zéros) influence la variance représentée. Notre attention doit donc strictement se porter sur les variances standardisées sises à l'intérieur du cône d'influence.

En effet, afin de simplifier la représentation, toutes les variances ont d'abord été standardisées en les divisant par la variance naturelle de la série, ce qui nous permet de porter notre attention sur

les couples temps-périodes les plus actifs: ceux dont la variance standardisée est supérieure à l'unité. Le spectre de puissance illustre donc bien la variance standardisée, représentée par les différents tons de couleurs qui correspondent par bande à des valeurs plus grandes que 1, 16, 32 et 128 pour les séries de températures journalières. L'intensité du ton diminue inversement avec la variance normalisée. La puissance de la variance standardisée traduit une forte fréquence d'apparition du phénomène à la période identifiée, ce qui induit la présence d'un cycle pour cette même période. Les conclusions à tirer dépendent donc des observations et études déjà réalisées sur le phénomène. Dans le cas présent, la principale information que nous pouvons tirer du spectre représenté est qu'il traduit l'existence d'un cycle annuel dominant (entre 256 à 512 jours).

b) L'analyse croisée de séries temporelles

L'autre but de notre étude est de comparer deux séries temporelles afin de voir les similitudes entre elles et d'identifier le degré de corrélation entre deux séries temporelles à travers un spectre croisé. Cet exercice porte le nom d'analyse croisée entre deux séries temporelles. Si $W_{X,Y,n}(s) = W_{X,n}(s) W_{Y,n}^*(s)$ est le spectre croisé de deux séries temporelles X et Y , alors, la valeur de leur cohérence $C_{X,Y,n}$ est :

$$C_{X,Y,n} = \frac{|W_{X,Y,n}(s)|^2}{|W_{X,n}(s)|^2 |W_{Y,n}(s)|^2} \quad (5).$$

La cohérence reflète la corrélation maximale, quelque soit le déphasage entre les deux séries. La cohérence maximale pouvant être atteinte à toutes les fréquences est l'unité (1), et indique une cohérence parfaite entre X et Y . Les phases vont de $-\pi$ à π (voir Figure 4 ci-dessous). Si la différence de phase entre deux paramètres à une période donnée est de $\pi/2$ radians, alors la seconde série est en avance sur la première d'un quart de cycle.

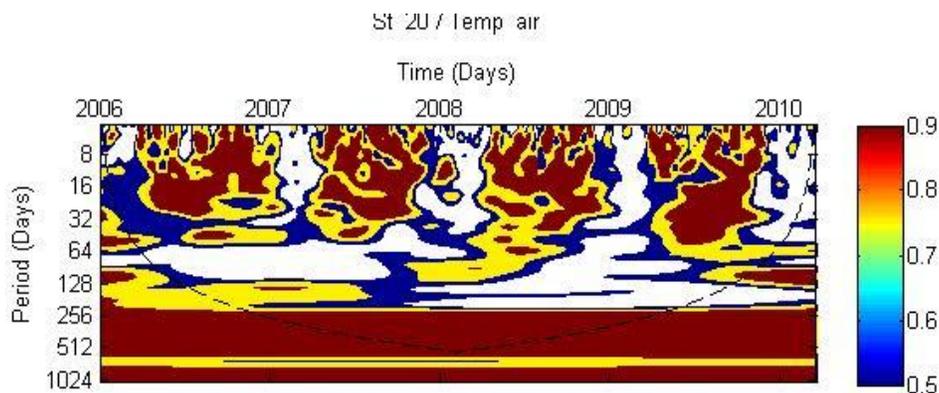


Figure 4: Représentation de la cohérence entre la série de la station St_20 et la série de température de l'air.

V. RÉSULTATS

A. APPLICATIONS SUR LES SERIES JOURNALIERES DE TEMPERATURE ET DE DEBIT

1. Les températures

Les spectres de puissance (variance) des séries journalières de la température de l'eau aux stations St_20 et St_21 et de la température de l'air à la station Sainte-Clotilde sont tracés à la figure 5 sous forme de graphiques temps-période tel qu'à la figure 3. Rappelons que ces graphiques proposent la variance standardisée ; c'est-à-dire la variance locale divisée par la variance naturelle de la série. Ainsi, ainsi toute valeur supérieure à 1 indique que localement, en termes de temps et de période, la variance est supérieure à la variance naturelle de la série. L'objet de ce travail étant d'identifier les composantes fréquentielles dominantes de chaque série. Nos analyses porteront donc principalement sur les variances supérieures à l'unité. Ainsi, sur les graphiques temps-période de la figure 5, l'échelle des couleurs passant successivement de l'orange foncé au jaune décrit successivement les variances standardisées supérieures à 1, 16, 32, et 128.

- La remarque majeure est que les plus fortes variances sont concentrées entre 256 et 512 jours ; cette variance est très stable sur toute la durée du prélèvement. Ce qui implique un cycle annuel des températures, fait qui a été noté plus haut par observation des graphiques des séries temporelles. L'uniformité de la bande jaune sur les spectres de puissance des ondelettes montre que ce cycle annuel est tout à fait stable sur toute la durée de l'observation, aussi bien pour les séries de température de l'eau que pour celle de l'air. Toutes les séries présentent ce caractère stationnaire sur la période annuelle.

- On observe également sur les spectres une puissance de la variance entre 128 et 256 jours. Ce signal est plus fort sur le spectre des températures de l'air. La variance entre 128 et 256 jours n'est pas stable dans le temps, ce qui traduit le fait que le phénomène qui s'y produit n'est pas un phénomène récurrent, et donc varie dans le temps.

- En dessous de 128 jours, les spectres de puissance des séries de températures de l'eau donnent des variances faibles, qui vont en s'annulant au fur et à mesure que la période diminue. On se rend compte que pour des grandes fréquences, les températures journalières de l'eau ne présentent aucune tendance de variation.

- Par contre, les températures de l'air pour ces mêmes périodes donnent des variances significatives, bien que non stationnaires pour les périodes en dessous de 128 jours. La variance y est assez dispersée et a une puissance relativement faible, mais on peut voir que le phénomène est localisé à certains intervalles de temps dans l'année.

- Sur les spectres de puissances, nous avons représenté l'évolution de la variance moyenne en fonction de la période. Cette représentation donne la variance moyenne standardisée sur les abscisses et les périodes qui sont identiques aux périodes du spectre en ordonnées. Nous pouvons voir que la variance est presque nulle sur toute les périodes en dessous de 256 Jours ; et qu'à partir de là elle croit et atteint un pic aux alentours de 300 jours et redescend. La forme de cette courbe qui est identique pour toutes les séries traduit la forte tendance annuelle des températures de l'eau et de l'air.

- Cependant, le tableau 3 nous montre que les valeurs maximales des variances observées sur les différentes séries ne sont pas les mêmes; en l'occurrence ; la variance moyenne annuelle sur la série de température de l'air est plus faible que celles des températures de l'eau. Nous concluons donc que bien que les deux séries aient les mêmes tendances annuelles, leurs importance n'est pas la même.

- La méthode du 0-padding qui consiste à affecter la fin des séries de zéros amène des discontinuités aux points extrêmes. De plus, plus la période augmente, plus des zéros sont introduits dans l'analyse, ce qui augmente les effets de bords. Sur les séries de températures présentées ci-dessous, à l'échelle annuelle, le cône d'influence ne couvre que deux années de données sur quatre prises pour l'analyse. Il est donc difficile de savoir si la grande puissance de la variance à l'échelle annuelle est réellement stable sur les quatre années d'études. Ceci dit, il aurait été utile d'avoir plus de quatre années de données pour avoir une meilleure interprétation du phénomène sur quatre ans.

Tableau 3 : Contributions des variances des différentes périodes à la variance totale série de températures journalières.

| Stations | Variance mensuelle (26 – 32 Jrs) | Variance semestrielle (128 – 200 Jrs) | Variance annuelle (300 – 400 Jrs) | Variances totales |
|-----------|-------------------------------------|--|--------------------------------------|----------------------|
| St_20 | 0,26% | 1,52% | 52,30% | 64,20 |
| St_21 | 0,23% | 1,78% | 52,89% | 79,45 |
| Temp. Air | 0,46% | 1,94% | 46,90% | 127,32 |

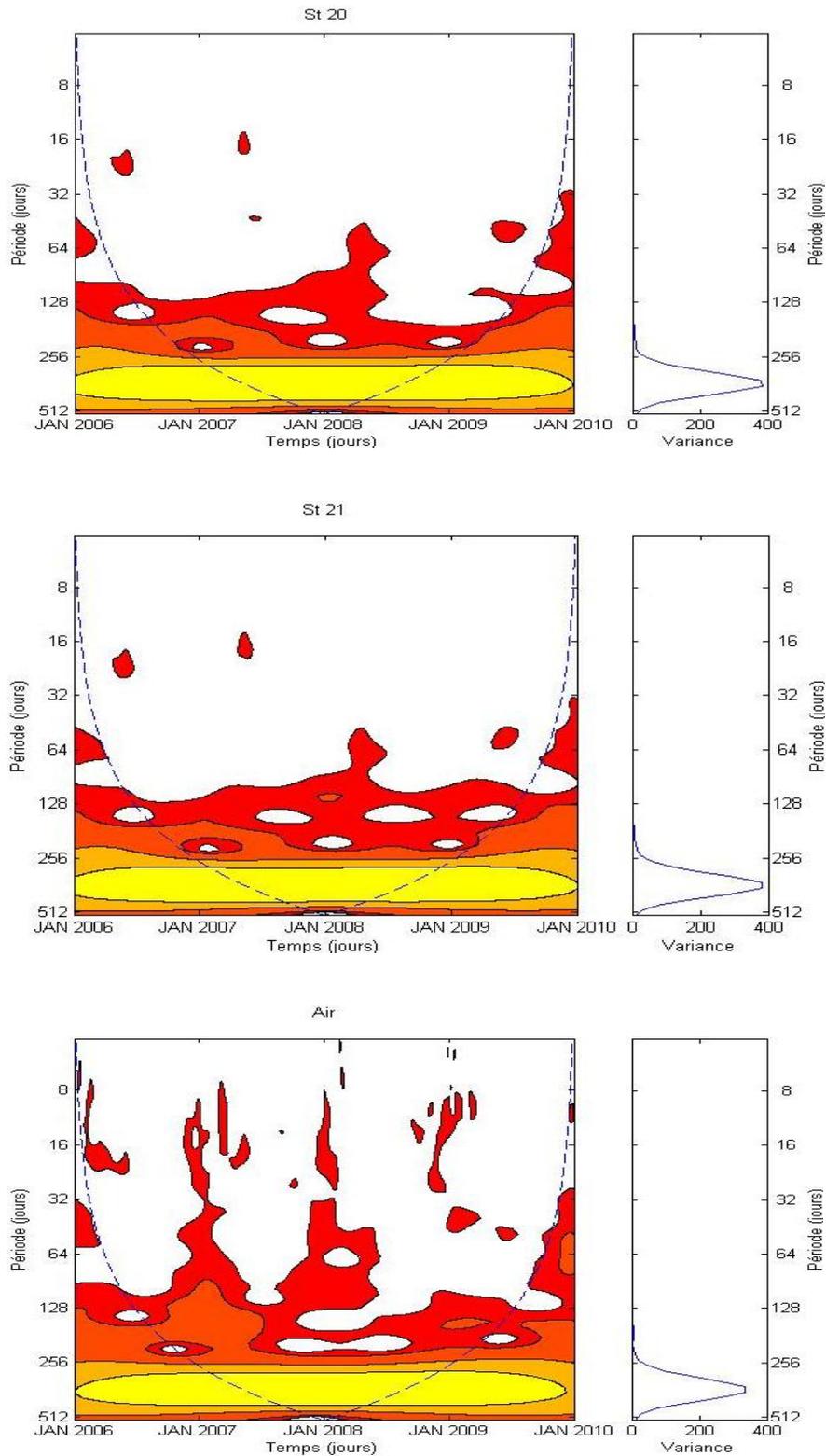


Figure 5: Rivières des Anglais; Spectres de puissance locale standardisée des températures en utilisant l'ondelette mère de Morlet; les bandes de couleurs représentent les variances standardisées de valeurs supérieures à 1, 4, 32, 128.

2. Les débits

L'analyse de ces séries chronologiques de débit (figure 6), comparativement aux séries de températures de l'eau fait ressortir les points suivants:

- Les spectres des séries de débits présentent quelques similitudes avec les spectres de températures de l'eau correspondantes, surtout à la période annuelle où on a une grande puissance de la variance et une bonne stabilité. Les débits ont également un cycle annuel bien stable.
- Par ailleurs, les spectres de débit présentent d'autres variations non stationnaires plus localisées en temps sur la bande de 16 à 256 jours.
- la station St_21 présente des variances plus fortes que la station St_20; nous pensons que cette différence de puissance a un lien avec les valeurs des fluctuations de débits.

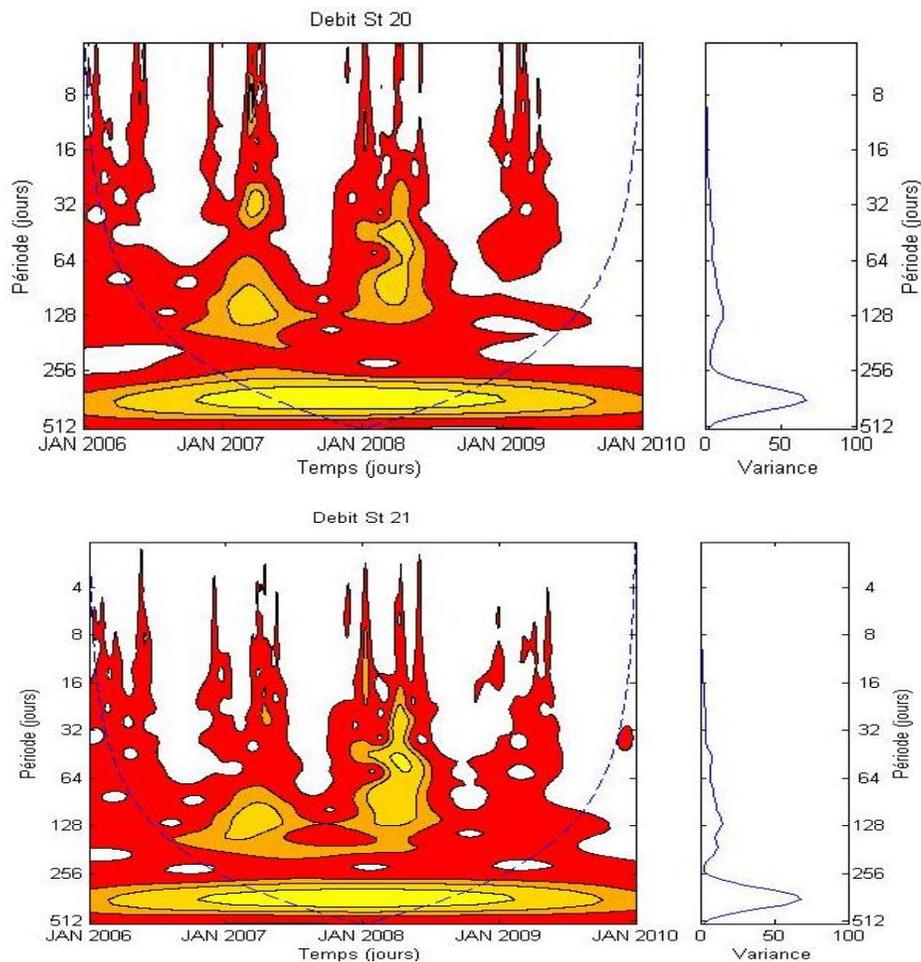


Figure 6 : Rivières des Anglais; Spectres de puissance locale standardisée des débits en utilisant l'ondelette mère de Morlet; les bandes de couleurs représentent les variances standardisées de valeurs supérieures à 1, 16, 32, 64.

B. CROISEMENT DES SERIES DE TEMPORELLES JOURNALIERES

1. Croisement des séries de température

NB : *Étant donné que notre étude porte sur les tendances fortes, nous ne nous intéressons qu'aux périodes présentant des fortes corrélations entre les deux paramètres, et les phases à ces périodes seront analysées.*

- Le croisement des séries de température de l'air et de l'eau (Figure 7) montre une parfaite corrélation à la période annuelle (entre 256 et 512 Jours) avec un coefficient de corrélation supérieure à 0,90 sur toutes les années de l'échantillon. Cette corrélation se produit à un déphasage presque nul, ce qui traduit un très grand lien entre les deux cycles annuels.

- Il existe également une forte corrélation entre les deux paramètres entre 8 et 32 jours, cette corrélation semble être plus forte pour la station St_20 que pour la station St_21. Il est intéressant de noter que cette corrélation est localisée entre le printemps et l'automne, tandis que la saison hivernale ne présente aucun lien entre les deux températures.

- L'échelle de couleur des cohérences indique que le déphasage entre les températures de l'eau et celles de l'air est très faible à l'échelle annuelle, et pour la bande entre 8 et 16 jours, les températures de l'eau prennent un retard sur les températures de l'air, retard proche du quart de cycle.

- Pour les périodes entre 32 et 256 jours, il n'y a pas de lien entre les deux séries. Les deux paramètres semblent ne plus être interdépendants.

- Ayant effectué le croisement entre températures de l'air et températures de l'eau pour les deux rivières, on constate que celles-ci se comportent pratiquement de la même manière. Cependant le fait que la corrélation entre les deux paramètres soit plus faible sur la seconde rivière nous amène à penser qu'il y'a un facteur qui influence l'échange de chaleur entre l'eau et l'air. Nous avons alors effectué une corrélation entre les deux séries de température de l'eau afin de voir si elles présentent des dissimilitudes qui pourraient expliquer ce phénomène.

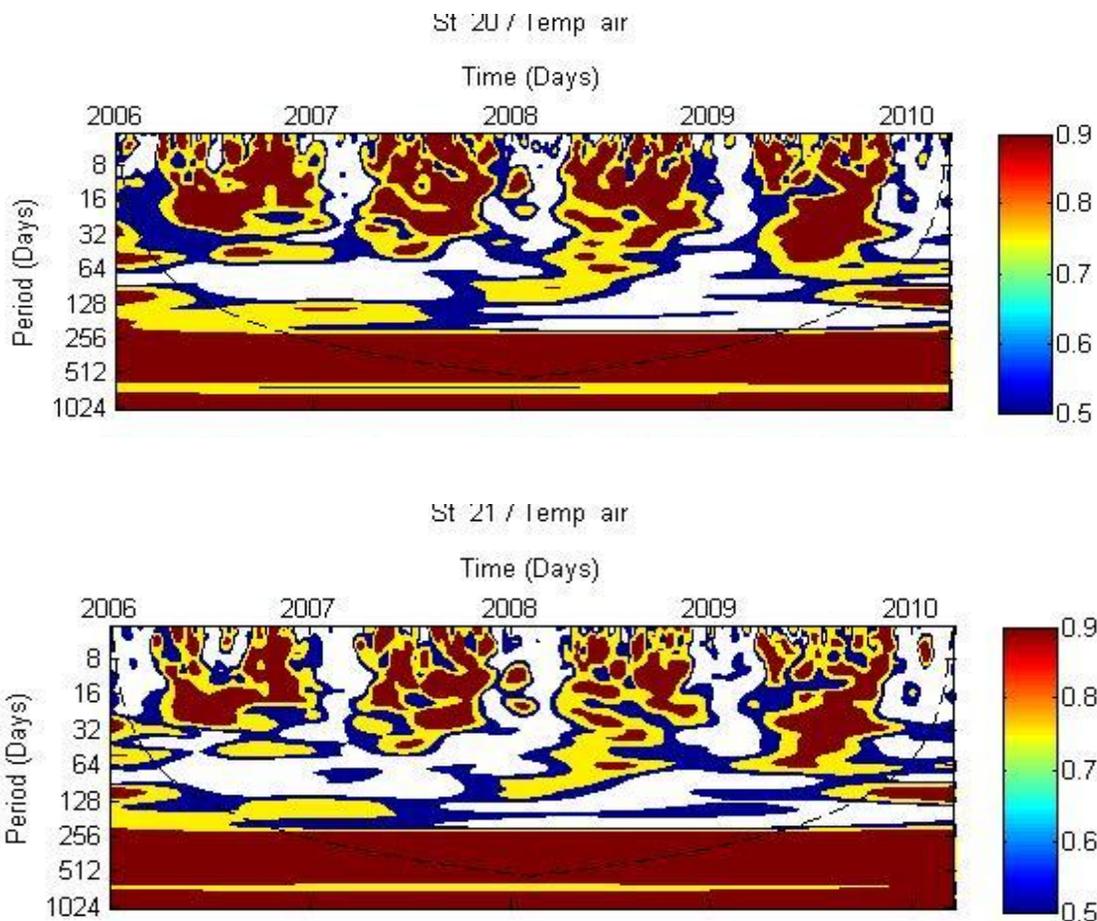


Figure 7: croisement des séries de température de l'eau et de l'air des stations St_20 et St_21

L'Annexe III présente le croisement entre les deux séries temporelles de l'eau et on peut y voir que les données des stations sont de très fortement liées les corrélations et les phases sont presque parfaites. Ces rivières ont donc le même comportement, mais on remarque tout de même qu'il existe des courtes périodes de vide sur le spectre, ce qui traduit une absence de lien entre les séries des deux rivières, et ces vides correspondent aux saisons hivernales, où la température de l'eau ne varie pas beaucoup.

On en déduit donc que pendant l'hiver, les températures des rivières ne sont pas seulement indépendantes des températures de l'air, mais sont également indépendantes entre elles à cause de l'absence de variations pendant la saison hivernale.

2. Croisement des séries de température avec les séries de débit

- Le croisement réalisé entre les débits et les températures de l'eau respectives de chaque rivière montre des résultats identiques (Figure 8). On remarque principalement une forte corrélation

à l'échelle annuelle (bande de 256 à 512 Jours). La corrélation s'annule pour des périodes en dessous de 256 Jours.

- La représentation des phases entre les deux paramètres indique qu' à l'échelle annuelle où la corrélation est la plus forte ; il n'y a aucun ordre d'intervention entre les températures de l'eau et les débits.

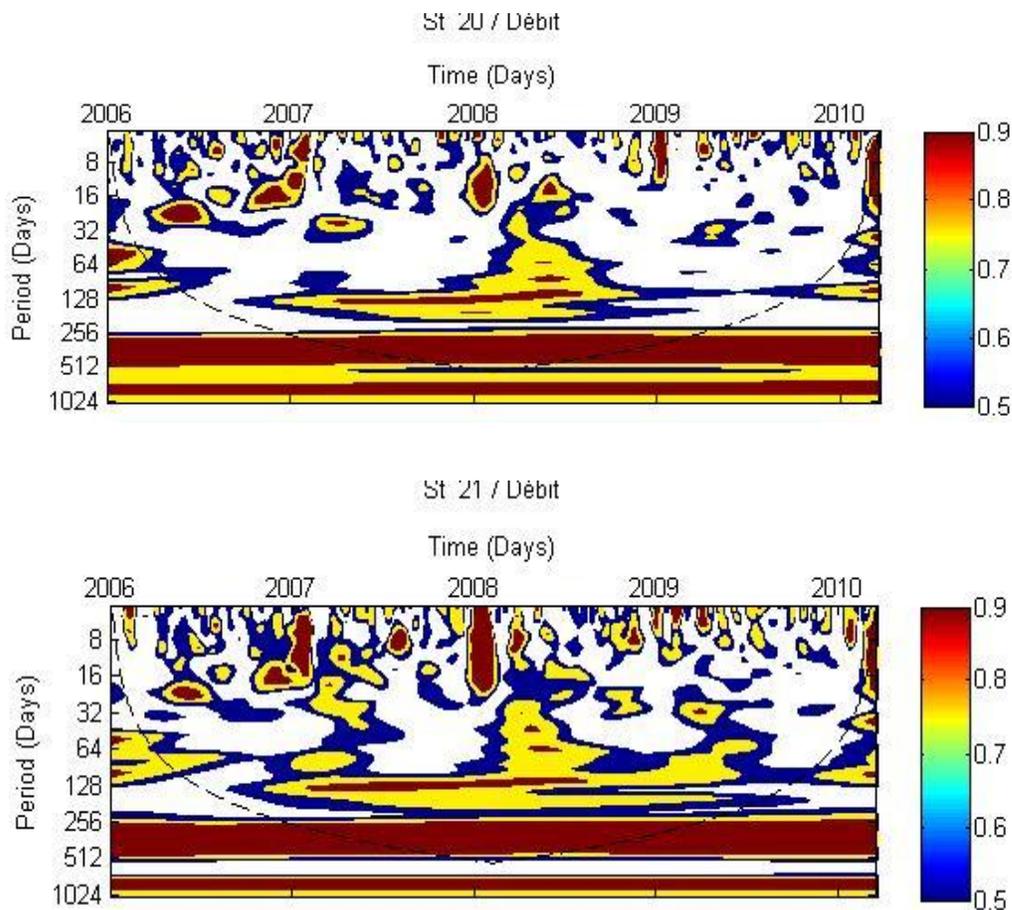


Figure 8: Croisement des séries de débit avec les séries de températures correspondantes à chaque station.

C. ANALYSE EN ONDELETTE DES SERIES HORAIRES

Nous avons repris l'analyse en ondelettes et le croisement des séries horaires sur une année (ANNEXE III) pour trois stations, en ajoutant la station St_23; un tableau des variances a également été dressé en comparaison avec les observations du tableau précédent.

- La représentation des séries temporelles horaires donne une meilleure illustration des fluctuations des températures. Les températures de l'air ont toujours des fluctuations plus fortes que

les températures de l'eau, Cependant, les températures de l'eau présentent des variations plus fortes que lors de l'utilisation des moyennes journalières.

- Un filtre sur la bande entre 16 et 32 heures nous a permis de voir avec plus de précision les variations journalières (annexe IV), et le résultat montre que les fluctuations de la variance sont bien plus fortes entre le printemps et l'été et s'atténuent pendant l'automne, alors que l'hiver, ces fluctuations sont plutôt très faibles, voire nulles.

- En ce qui concerne les températures de l'air elles présentent une puissance plus forte de la variance à cette période. Contrairement à la série de température de l'eau, la variance entre 16 et 32 heures n'est pas nulle pendant la saison hivernale pour les températures de l'air, même si cette variance n'a pas la même puissance qu'entre le printemps et l'automne.

- Les spectres de puissance des séries horaires des températures de l'eau prises sur l'année 2006 présentent une tendance journalière (entre 16 et 32 heures). Cette tendance est localisée entre le printemps et l'automne. La saison d'hiver est vide et n'indique pas de signe de fluctuation (Voir Figure 9).

- Pour les périodes supérieures à 32 heures, le spectre de puissance des ondelettes présente des caractéristiques non stationnaires avec une puissance relativement forte de la variance locale. On remarque que la variance augmente avec la période.

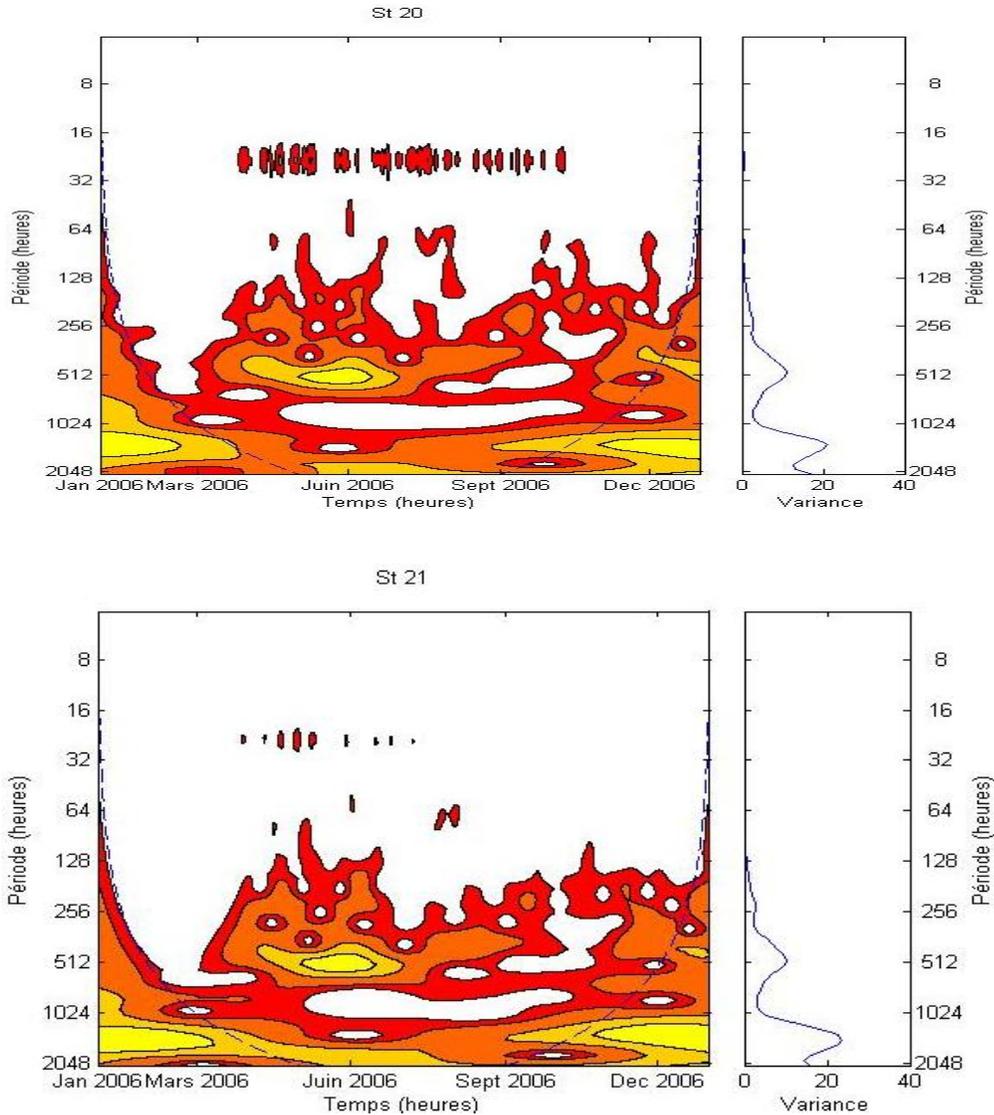
- Cependant ; les variances horaires sont plus faibles que les variances journalières ce qui traduit le fait que les fluctuations de températures sont plus fortes lorsqu'on utilise des séries journalières qu'en utilisant des séries horaires. Aussi, la courbe de variance ne représente pas bien la moyenne de variance journalière à cause de ce grand écart

- La comparaison des spectres dressés sur chaque rivière montre que la rivière St_21 dont le bassin versant est plus grand présente le moins de puissance de la variance sur la période journalière par rapport aux autres stations.

- D'après le tableau 4, la variance journalière participe à plus de 10% pour les plus petites stations, à 5% pour la plus grande rivière et en ce qui concerne les températures de l'air, cette variance atteint 30% de participation. Les fluctuations journalières sont donc moins bien reprises sur la rivière St_21 à cause de sa grande surface.

- En dessous de 16 heures, la variance standardisée sur tous les spectres est inférieure à 1, ce qui veut dire qu'il n'y a aucun phénomène important aux petites périodes.

- La forme de la courbe la variance en fonction de la période est tout à fait différente de celle obtenue en utilisant les données journalières. Dans ce cas, la variance augmente avec la période, ce qui est différent du pic annuel observé sur les températures journalières.



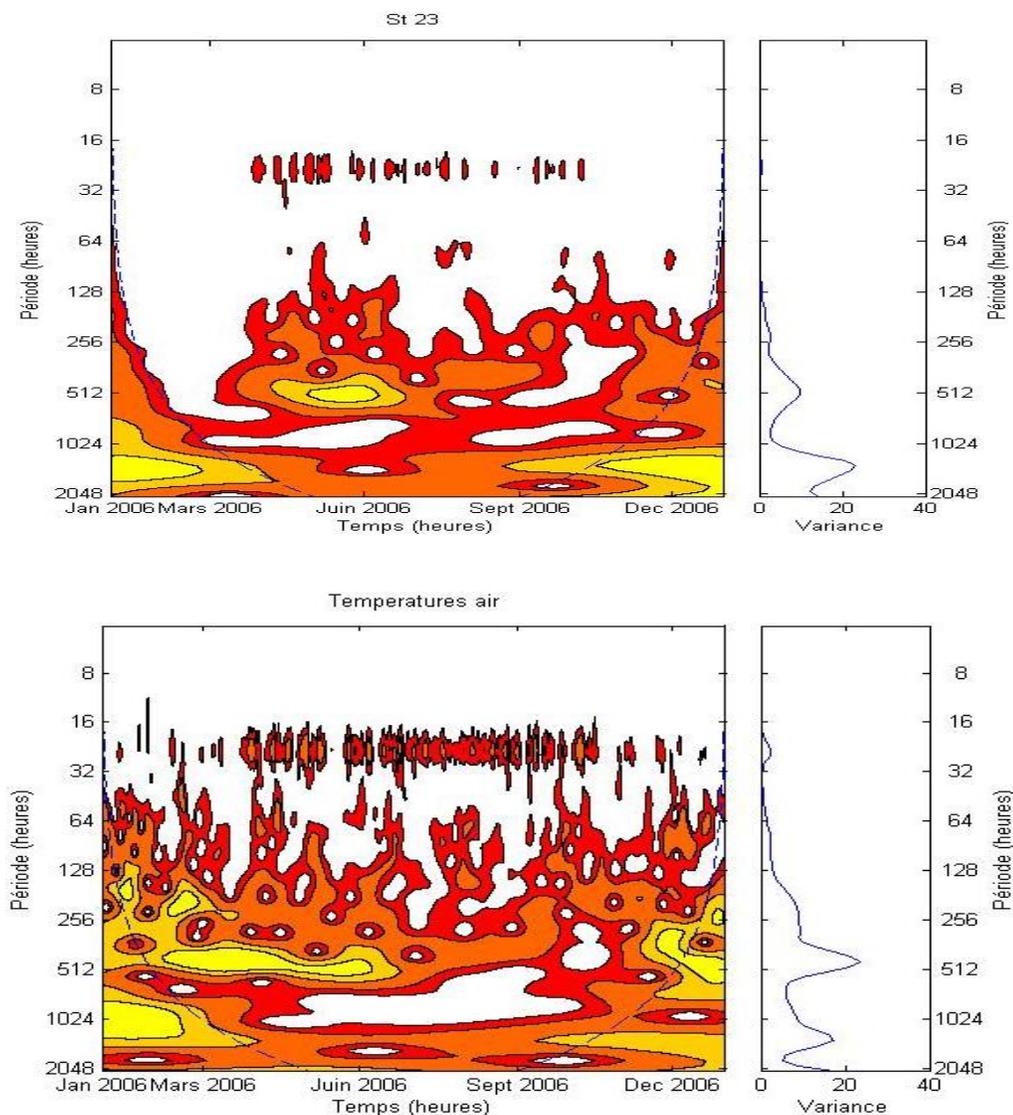


Figure 9: Rivières des Anglais; Spectres de puissance locale standardisée des Température; les bandes de couleurs représentent les variances standardisées de valeurs supérieures à 1, 4, 16, 32.

Tableau 4 : Contributions des variances des différentes périodes à la variance totale séries de températures horaires.

| Stations | Variance journalière (16 – 32 hres) | Variance hebdomadaire (130 – 200 hres) | Variances mensuelles (650 – 750 hres) | Variances totales |
|-----------|--|---|--|----------------------|
| St_20 | 13.92% | 2.29% | 0.63% | 16.59 |
| St_21 | 5.18% | 2.75% | 0.59% | 18.59 |
| St_23 | 11.54% | 3.13% | 0.63% | 13.43 |
| Temp. Air | 30.99% | 3.77% | 0.41% | 33.33 |

D. CROISEMENT DES SERIES HORAIRES

- La cohérence réalisée entre les températures de l'eau et de l'air présente une grande force de corrélation à la période journalière les températures de l'air et celles de l'eau sont très fortement liées dans la journée.

- On observe également un lien au-delà de 128 heures ; avec une grande force. Entre 32 et 128 heures, les corrélations sont faibles et encore plus localisées. Entre 256 et 512 heures (ce qui correspond presque à la période mensuelle), il y a une forte corrélation entre les deux températures.

- Les températures de l'eau et de l'air sont en constante phase en ce qui concerne les rivières St_20 et St_23. La rivière St_21 quant à elle a tendance à être légèrement en avance de phase sur les températures de l'air à la période journalière.

- A l'échelle mensuelle où les corrélations sont très fortes, les deux températures semblent être en phase. Comme noté plus haut, ces corrélations tout comme les variances sont localisées entre l'automne et le printemps, l'hiver étant marqué par une absence de lien entre les deux

VI. DISCUSSION ET ANALYSES

Les données journalières nous permettent de mettre en évidence le cycle annuel des températures de l'eau et de l'air. Nous avons vu que les spectres de puissance des températures de l'eau et de l'air étaient presque identiques, et que sur la bande de un an elles présentaient les mêmes caractéristiques. Le cycle annuel des températures de l'eau et de l'air n'est cependant pas une découverte, car ayant déjà été mis en évidence dans d'autres recherches (Cluis, 1972). Le tableau 3 établit à plus de 50% la contribution du cycle annuel, le reste étant réparti entre les autres périodes. Cependant, une contribution semi annuelle est visible, mais elle est dominée par le cycle annuel auquel elle semble se confondre. Cette variation semi annuelle a des caractéristiques non stationnaires, ce qui veut dire qu'elle varie en fonction du temps. Bien qu'aucune étude n'ait révélé cette information, nous avons spéculé sur l'existence d'une tendance de variation semi annuelle de la température de l'eau, en rapprochement aux saisons d'automne et de printemps, où les températures passent par des valeurs proches.

Une autre remarque venant du tableau de contribution des périodes à la variance est que la température de l'air a une variance plus grande que les températures de l'eau des deux rivières ; ceci étant dû au fait que les températures de l'eau pendant l'hiver ne varient pas beaucoup, et restent très proche de la température de congélation (0°C), tandis que les températures de l'air pendant cette saison continuent de fluctuer. Cette absence de variation expliquée par l'Heureux (2002), est à l'origine d'une perte de puissance de la variance des températures de l'eau. **Par ailleurs, la seconde rivière (St_21) qui est la plus grande a également une variance plus grande que la première rivière (St_20), d'où l'hypothèse selon laquelle les rivières de grande surface ont des variations plus grandes de leurs températures, en d'autres termes, ces rivières prennent des valeurs très fortes (plus chaudes) de températures de l'eau.**

Les corrélations réalisées entre les températures de l'air et les températures de l'eau montrent que les cycles annuels des deux séries sont très corrélés, avec un léger retard de phase des températures de l'eau sur les températures de l'air. On voit également sur la bande de 8 à 32 jours que les températures sont très corrélées, mais avec des interruptions sur les saisons d'hiver, et ceci pour les mêmes raisons qui ont été évoquées précédemment. Il est cependant important de noter que la corrélation annuelle est plus stable que la corrélation dans la bande de 8 à 32 jours ceci montre

l'influence de la période d'étude sur la relation linéaire qui existe entre température de l'air et température de l'eau. En effet, plus la période est grande, moins les effets du gel pendant l'hiver sont visibles. A contrario, pour des petits intervalles de temps tels que la semaine ou le mois, on voit très clairement les effets de ce phénomène.

D'autre part, les débits et les températures de l'eau présentent un cycle annuel semblable (ceci ne signifie pas que leurs origines soient les mêmes); ce cycle est stable sur tout l'intervalle d'étude. Cependant, cette forte corrélation ne veut pas dire que les températures de l'eau influencent les débits. Tout au contraire, certaines études ont présenté le débit comme étant l'un des facteurs principaux qui influencent la capacité calorifique de l'eau (Bashar et Gulliver, 2000; Bélanger et al. 2005). En effet, la grande influence du débit sur les températures de l'eau se fait beaucoup plus sentir pendant les périodes d'étiages où les débits très faibles provoquent une réduction de la vitesse de transit de la masse d'eau, et augmentent de ce fait la température de la rivière (Malavoi et Souchon, 1992). On observe donc une forte corrélation pour la période annuelle (entre 256 et 512 jours), mais aucune information sur les phases n'est donnée entre les températures de l'eau et les débits sur le spectre de cohérence. Cependant,, il est su que les températures de l'eau diminuent lorsque les débits augmentent avec l'arrivée des pluies (Malavoi et Souchon, 1992).

Bien que le cycle annuel soit le plus prépondérant dans l'analyse de la température de l'eau des cours d'eau, Cluis (1972) affirmait déjà que la plus grande partie des variations de température de l'eau se fait à court terme avec des fluctuations journalières pendant l'été. L'utilisation des données horaires nous permet de le confirmer ici par l'identification des tendances journalières et mensuelles des températures de l'eau et de l'air qui ne sont localisées qu'entre l'automne et le printemps. Cette tendance est caractérisée par une variance assez forte et stable sur les saisons identifiées.

Le cycle journalier des températures de l'eau et de l'air est expliqué par le passage des températures diurnes aux températures nocturnes au sein d'une même journée. En effet, les températures diurnes sont plus chaudes dans la journée les températures de l'air sont plus chaudes avec l'influence du rayonnement solaire ; tandis que la nuit, l'air se refroidit et le processus de régulation thermique entre l'air et l'eau entraîne un refroidissement des surfaces liquides. Ces variations journalières et mensuelles des températures de l'eau suivent d'assez près celles de l'air avec une forte corrélation.

Les fluctuations journalières des températures de l'air sont reprises par les surfaces d'eau avec une atténuation de l'intensité. Bien que ne disposant pas de données sur la radiation effective

sur la zone, l'hypothèse de son influence est observé en comparant les fluctuations entre les mois d'avril à septembre et les mois d'octobre à décembre, car les journées étant plus longues le printemps et l'été, le rayonnement solaire y est plus intense qu'en automne, ce qui influence l'amplitude des fluctuations journalières. Le filtre effectué sur la bande de 16 à 32 jours nous montre en effet qu'entre octobre et janvier, les fluctuations journalières sont nettement plus faibles que toutes les fluctuations de la période hors hiver.

Une observation importante est que la force des cycles journaliers observés diminue également avec l'augmentation de la surface des rivières. En effet, la rivière St_21 qui a la plus grande surface a un cycle moins fort que les autres. Nous avons précédemment fait une corrélation entre rivière qui nous a montré que celles-ci avaient des liens très forts, et que les températures des eaux étaient plus chaudes pour les plus grandes que pour les petites. Cette nouvelle remarque vient nous donner une information sur la vitesse de réaction (déphasage) des températures de l'eau au transfert de chaleur. **En effet, la cohérence montre que le déphasage entre les températures de l'air et de l'eau est plus fort pour la rivière de grande surface, et que la corrélation avec la température de l'eau est plus faible pour cette même rivière, tandis que les plus petites sont beaucoup plus proches d'un déphasage nul et ont une très forte corrélation journalière avec la température de l'air.** Nous pensons donc qu'une influence des caractéristiques géophysiques, en occurrence la masse d'eau à réchauffer joue le rôle de ralentisseur dans le réchauffement et le refroidissement de l'eau. En effet, L'Heureux (2002) informait déjà sur l'influence qu'ont les ordres de Strälher sur la relation linéaire existant entre les températures de l'eau et celles de l'air ; l'équation déterministe de Caissie (2005) prouve l'influence de la surface de la rivière sur la relation entre ces deux températures. Force est de constater que dans notre cas la Station St_21 reçoit les eaux du sous-bassin versant le plus grand des trois sous-bassins versants choisis pour cette analyse, sa superficie qui est trois à quatre fois plus grande que les autres fait qu'il y a plus d'eau dans la rivière St_21. Etant dans les mêmes conditions atmosphériques, cette rivière subira donc avec plus de retard les effets d'un changement de température de l'air. Ce qui fait intervenir le facteur *intervalle de temps* considéré pour l'échange a une influence non négligeable, d'autant plus que la capacité calorifique de l'eau est supérieure à celle de l'air ; aussi, pour des intervalles de temps très courts, l'eau sera toujours en retard de phase sur l'air car leurs fluctuations ne se font pas à la même vitesse. Alors que pour des intervalles de temps plus grands, les effets de déphasage sont presque masqués (comparaison entre corrélations annuelles et corrélations journalières).

Remarque est donc faite que les cours d'eau prennent seulement un pourcentage des fluctuations des températures de l'air entre le printemps et l'automne. Pendant l'hiver, les variations des températures obéissent à d'autres lois qui sont en relation avec la formation du gel. Ceci dit, d'autres causes de déphasage des rivières peuvent être recensées dans l'étude de Stefan (2000) mais leur effet n'est pas identifié dans cette analyse. Cependant, en dehors du cycle journalier observé sur ces données horaires, d'autres puissances moins stables de la variance sont identifiées sur les spectres de puissance des ondelettes obtenus. La corrélation avec les températures de l'air montre que pour la bande de 64 à 512 heures par exemple, les deux paramètres sont fortement corrélés en dehors de la saison hivernale. Pour cette bande, les températures de l'eau et celles de l'air sont en phase.

L'utilisation des données horaires vient donc renforcer cette théorie selon laquelle les températures de l'eau suivent celles de l'air en portant les détails des liens existants entre ces paramètres à des intervalles de temps plus petits avec plus d'informations sur les variations. Cette analyse a cependant quelques points d'ombre ; nous avons pour des besoins de compréhension effectué une représentation des variances standardisées. La normalisation se fait par division de la variance locale par la variance naturelle afin d'avoir des puissances de la variance locale. Cette normalisation fait que les spectres de puissances ne soient pas directement comparables les uns aux autres par rapport à une valeur unique, mais plutôt par leurs variances naturelles respectives. Par ailleurs, les variances standardisées ont été représentées suivant des couleurs décrivant des puissances différentes en fonction des séries, c'est le cas entre les séries de températures journalières et horaires. C'est la raison pour laquelle ces séries ont été analysées séparément, car les séries horaires présentaient plus de détails que les séries journalières et présentaient par conséquent des puissances plus faibles.

VII. CONCLUSIONS

Les températures de l'eau des trois rivières prises pour cette étude varient suivant deux phases principales. La première phase survient entre l'automne et le printemps où elles subissent des fluctuations très fortes. La seconde se produit en hiver, avec des fluctuations faibles et des températures plus stables très proches de 0°C. L'analyse par ondelettes effectuée sur les températures des rivières prises sur le bassin versant de la rivière des Anglais montre que les températures de l'air et de l'eau présentent des fluctuations semblables. Les deux tendances principales ont été identifiées sur les séries de températures, il s'agit des tendances annuelles et journalières. La tendance annuelle qui est la plus stable s'étend tout le long de la période d'étude et correspond aux variations saisonnières de température de l'eau et de l'air. Le comportement journalier obtenu à partir de données horaires présente les fluctuations journalières des températures de l'eau. On y voit un cycle dominant de 24 heures, ayant une prééminence des fluctuations entre le printemps et l'automne, la période hivernale ayant une faible puissance de la variance du fait de la presque absence de variations des températures de l'eau.

Les corrélations effectuées sur ces cycles montrent qu'à ces périodes, les températures de l'eau et celles de l'air sont fortement liées, les températures de l'eau suivant de très près celles de l'air. Ce lien, bien que très fort pendant les saisons hors hiver va en s'annulant à mesure qu'on entre dans l'hiver. L'influence du gel est donc très importante dans cette relation car isolant les surfaces d'eau de l'atmosphère. La période la plus contraignante pour les cours d'eau se trouve donc entre le printemps et l'automne, période où l'eau subit les variations de température de l'air. Cependant, nous avons distingué deux phases de fluctuation, influencée par le rayonnement solaire et le débit. Pendant le printemps et l'été, les journées sont plus longues et les précipitations vont en s'annulant, ce qui conduit à une baisse des débits et une augmentation de du temps de radiation des surfaces d'eau par le soleil ; tandis que l'automne le soleil se couche plus tôt et l'arrivée des pluies refroidissent les eaux de surface.

L'atténuation de température sur l'eau pendant l'échange thermique entre l'eau et l'air n'a pas véritablement été quantifié dans cette étude. Nous savons cependant que les cours d'eau étudiés ici prennent un pourcentage des amplitudes de température de l'air ; ce pourcentage est encaissé avec un décalage qui est influencé par la superficie des cours d'eau, ou masse d'eau en présence, et la densité des réseaux hydrographiques. Bien que les petites rivières étroites et peu profondes soient

plus rapides à répondre aux sollicitations des températures de l'air, elles se refroidissent également plus rapidement. Les grandes rivières plus larges et plus profondes conservent des températures plus chaudes suivent plus lentement les fluctuations des températures de l'air, car la vitesse de réchauffement des cours d'eau est également inversement proportionnelle à sa profondeur (Malavoi 1992).

Au vu de l'étude menée, il ressort que les conditions météorologiques extrêmes peuvent grandement influencer le système environnemental des petits cours d'eau et leurs habitants. Pour le cas particulier des cours d'eau de la rivière aux anglais, les espèces de poissons qui y vivent (truites, saumons, la morue...) sont adaptés à des eaux froides. Si les eaux de ces rivières venaient à se réchauffer de manière incontrôlée en raison des changements climatiques, cela mettrait en danger la survie de ces espèces et pourrait entraîner la migration de d'autres espèces de poissons adaptées aux eaux chaudes. Les températures de l'eau n'influencent donc pas seulement le milieu aquatique dans son fonctionnement. Ils influencent également le patrimoine écologique d'où l'importance du contrôle de ces températures.

VIII. RECOMMANDATIONS - PERSPECTIVES

Au terme de cette étude, il apparaît que l'utilisation des ondelettes pour l'analyse des séries hydrologiques est une nouvelle méthode d'analyse qui présente avec plus de détails les informations fréquence-temps des fluctuations. Le détail de méthode utilisée a permis de dégager des similitudes entre les séries de températures de l'eau en comparaison à celles de l'air. Cette étude présente ainsi des résultats tels que les spectres de puissance localisés des ondelettes et l'analyse croisée des séries de températures qui au demeurant nous ont permis de déterminer les tendances dominantes et les liens entre les séries temporelles mises en comparaison.

En plus donc des multiples applications déjà réalisées avec les ondelettes, il est à signaler que l'expérience sur les températures de l'eau effectuées ici donne des résultats assez encourageants d'où la nécessité d'envisager d'autres orientations de recherche pouvant nous conduire à une observation plus fine des comportements des petits cours d'eau face aux sollicitations de l'atmosphère.

Il serait par exemple souhaitable au regard des différents facteurs de changement climatique auquel nous faisons face de plus en plus, d'analyser l'influence des paramètres tels que la hauteur de mesure de la température de l'air, de la pluviométrie et du rayonnement solaire, car la maîtrise de cette influence sur la relation entre les températures de l'eau et de l'air pourrait alors favoriser la prévision hydrologiques.

IX. BIBLIOGRAPHIE

OUVRAGES ET ARTICLES

- Anctil F. (2010), Analyse fréquentielle: une brève introduction, Exposé de cours, Québec: CRPAH, Université Laval, 2010.
- Anctil F., Pratte A., Parent L. E., Bolinder M. A. (2008), Non-stationary temporal characterization of the temperature profile, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 409-416.
- Anctil F., Paulin C. (2004), Wavelet Analysis of the Interannual Variability in Southern Quebec Streamflow, *Journal of Climate*, 163 - 173
- Belanger M., El-Jabi N., Daniel C., Ashkar F., Ribí J-M. (2005), Estimation de la température de l'eau en rivière en utilisant les réseaux de neurones et la régression linéaire multiple, *Revue des Sciences de l'Eau*, 403 - 421.
- Boutin C., Albignat J. P., Isaka H. (1981), Sur l'utilisation de la température d'équilibre pour l'établissement du bilan thermique d'un plan d'eau, *Hydrological Sciences - Bulletin des Sciences Hydrologiques*, 159 - 170.
- Cluis D. A. (1972), Relationship between stream water temperature and ambient air temperature, *Nordic Hydrology*, 65-71.
- Daniel C., Mysore S. G., El-Jabi N. (2005), Predicting river water temperatures using the equilibrium temperature concept with application on Miramichi River catchments (New Brunswick, Canada), *Wiley Inter Science*, 2137 - 2159.
- Labat D. (2005), Recent advances in wavelet analyses (Part 1): A review of concepts, *Journal of Hydrology*, 275 - 288.
- L'Heureux J. (2002), Analyse des relations entre température des cours d'eau et température de l'air dans le Bassin de la Seine, Recherche, Paris: Université Pierre et Marie Curie.
- Lysandre T. (2009), Analyse de la variabilité interannuelle des séries temporelles des niveaux d'eau souterraine dans trois régions du CANADA, Mémoire de Maîtrise en Sciences de la terre, Montréal: Université du Québec à Montréal.
- Malavoi J. et Souchon Y. (1992), Hydrologie et dynamique hydroécologie des cours d'eau, *Revue*

des Sciences de l'Eau, 247 - 251.

- Marcotte N. et Duong V. L. (1973), Le calcul de la température de l'eau des rivières, *Journal of Hydrology*, 273 - 287.
- Morrill J. C., Bales R. C., Martha H. C. (2005), Estimating Stream Temperature from Air Temperature: Implications for future water quality, *Journal of Environmental Engineering*, 131- 146.
- Nicolas L., Anctil F., Juan P. (2004), Characterization of soil moisture conditions at temporal scales from a few days to annual, *Hydrological Processes*, 3235 – 3254.
- Secondat M. (1952), Les variations de la température et de la concentration en oxygène dissouts des eaux lacustres et des eaux courantes leur retentissement sur la distribution des poissons Knowledge and management of aquatic ecosystems, 52 - 59.
- Sinokrot B. A. et Gulliver J. S. (2000), Impact de l'écoulement amont sur la température de l'eau d'une rivière, *Journal of Hydraulic Research*, VOL. 38, NO. 5, 339 - 349.
- Stefan P., Troy E. R., Heinz G. S. (2000), Linear air/water temperature correlations for streams during open water periods, *Journal of Hydrologic Engineering*, 317 - 321.
- Torrence C. et Webster P. J. (1999), Interdecadal Changes in the ENSO–Monsoon System, *Journal of Climate*, 2679-2690 .
- Torrence C. et Compo G. P. (1998), A practical guide to wavelet analysis.» *Bulletin of the American Meteorological Society*, 61–78.
- Troy E. R. et Heinz G. S. (2000), Linear Air/Water temperature correlations for streams during open water period, *Journal of Hydrologic Engineering*, 317 - 321.

SITES INTERNET

Canada, Environnement. ENvironnement Canada. 18 03 2010.

http://climate.weatheroffice.gc.ca/advanceSearch/searchHistoricDataStations_f.html?searchType=stnName&timeframe=1&txtStationName=clothilde&searchMethod=contains&optLimit=yearRange&StartYear=1840&EndYear=2010&Month=3&Day=20&Year=2010&selRowPerPage=25&cmdSt (accès le 03 25, 2010).

ANNEXES

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE I : BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE AUX ANGLAIS (CANADA).

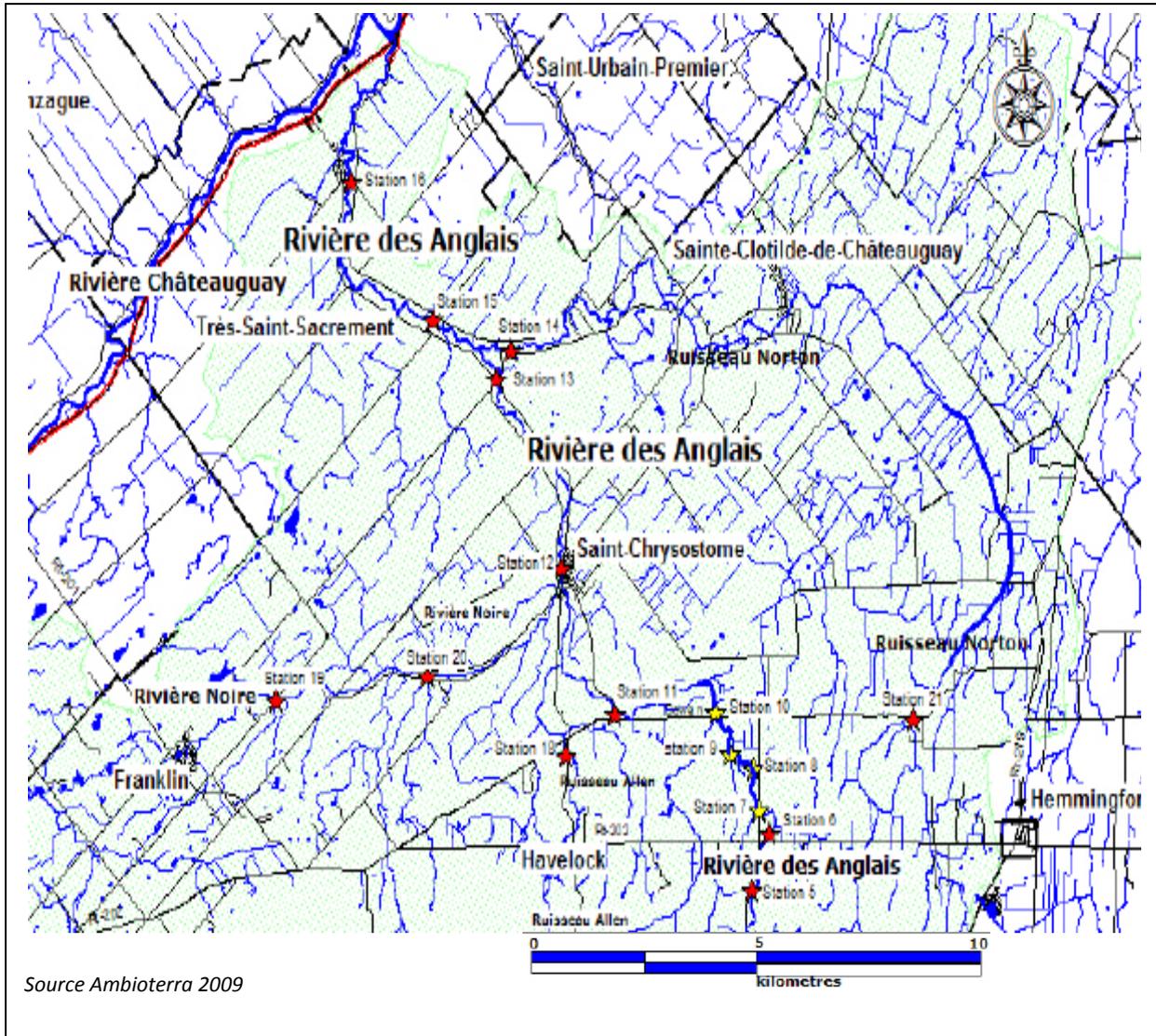
ANNEXE II : OBSERVATIONS DES DEBITS DES RIVIERES.

ANNEXE III : COHERENCES ENTRE LES SERIES DE TEMPERATURES DE L'EAU.

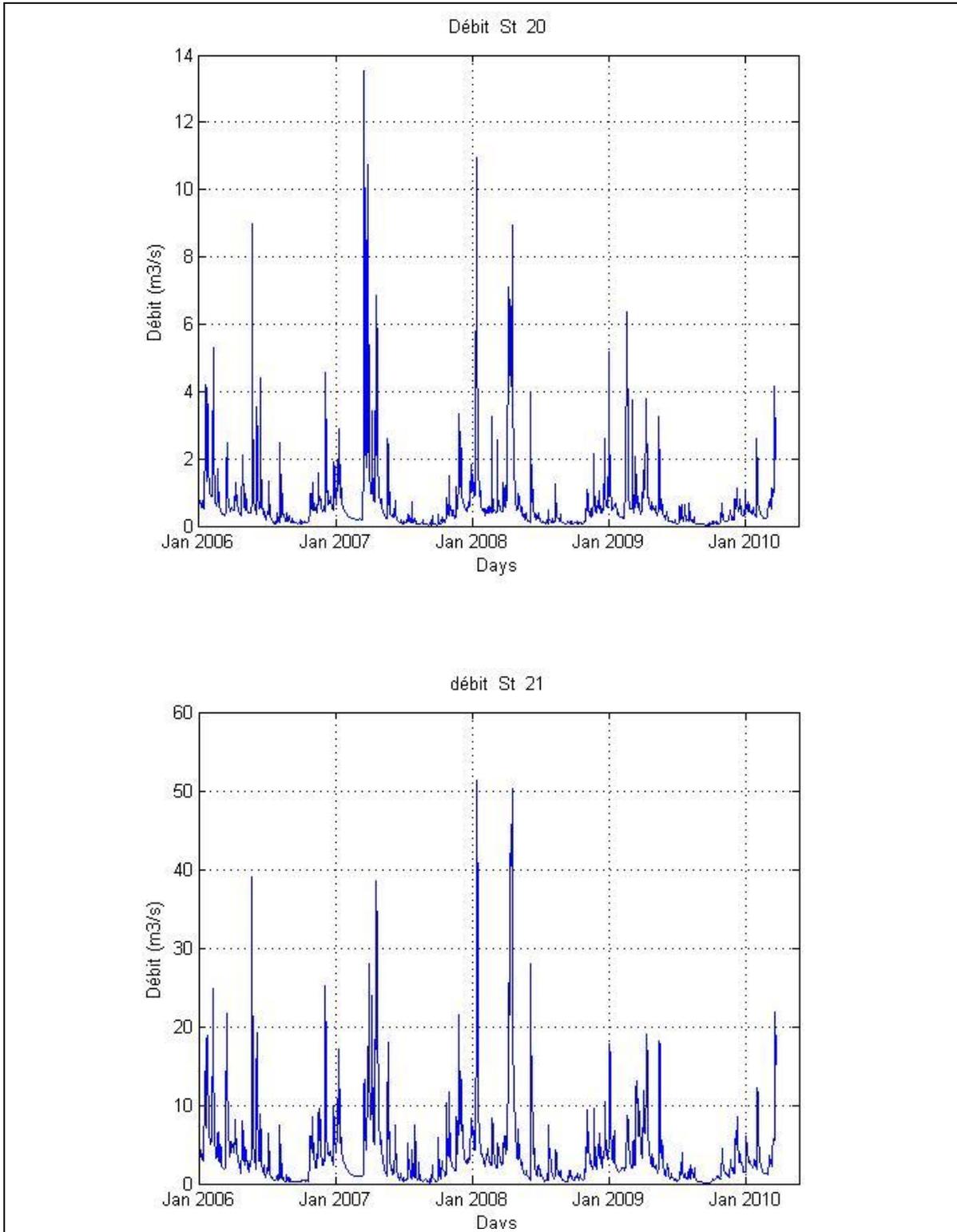
ANNEXE IV : OBSERVATIONS DES TEMPERATURES HORAIRES DE L'EAU ET DE
L'AIR.

ANNEXE V : COHERENCES ENTRE LES TEMPERATURES HORAIRES DE L'EAU ET DE
L'AIR.

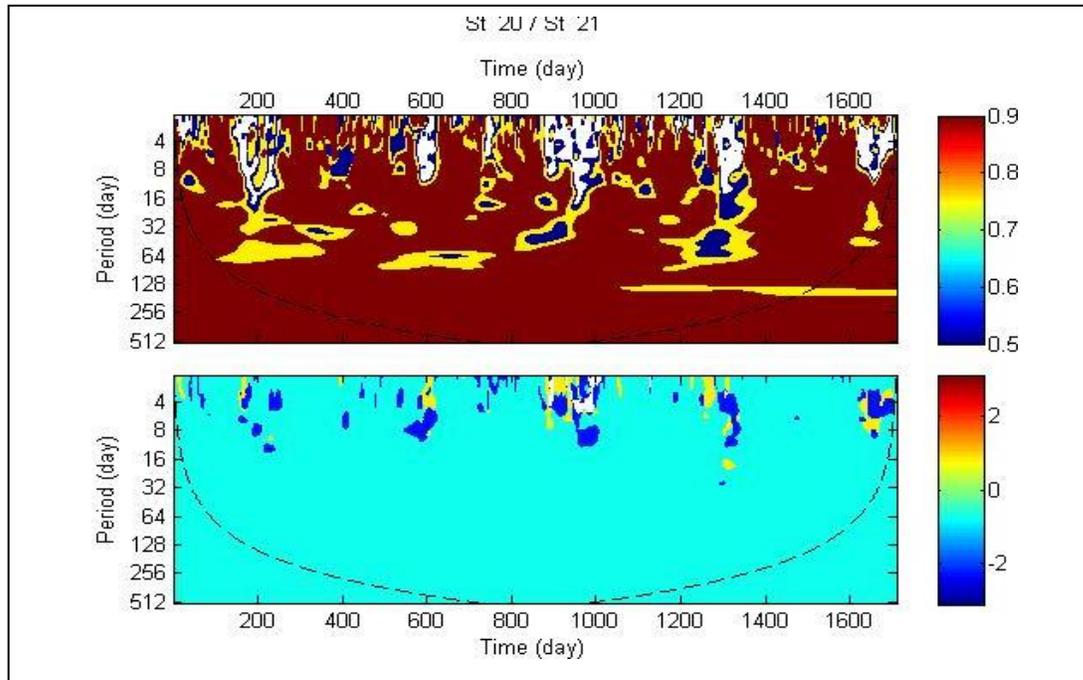
Annexe I: Bassin versant de la rivière aux anglais



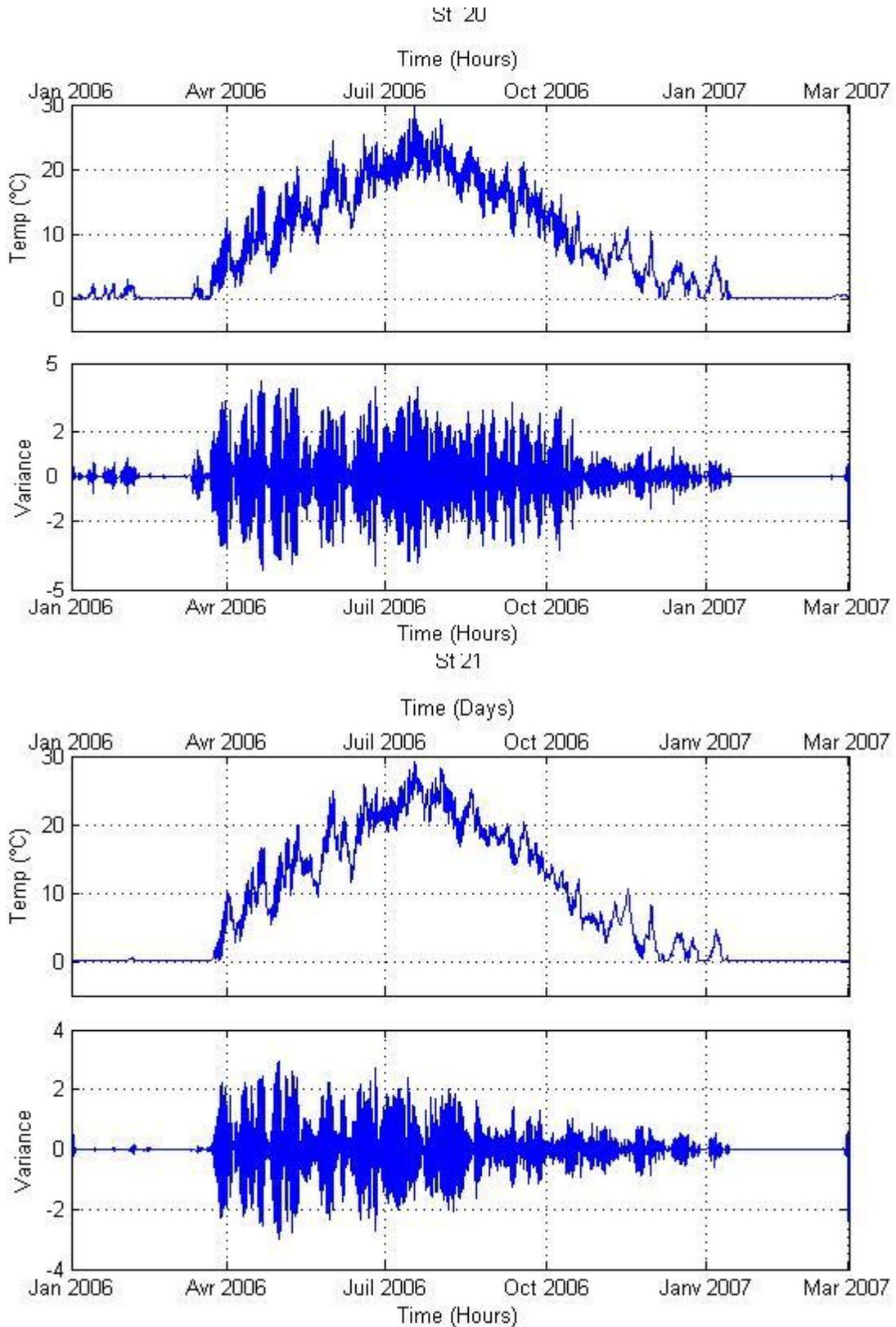
Annexe II: Séries de débits des rivières

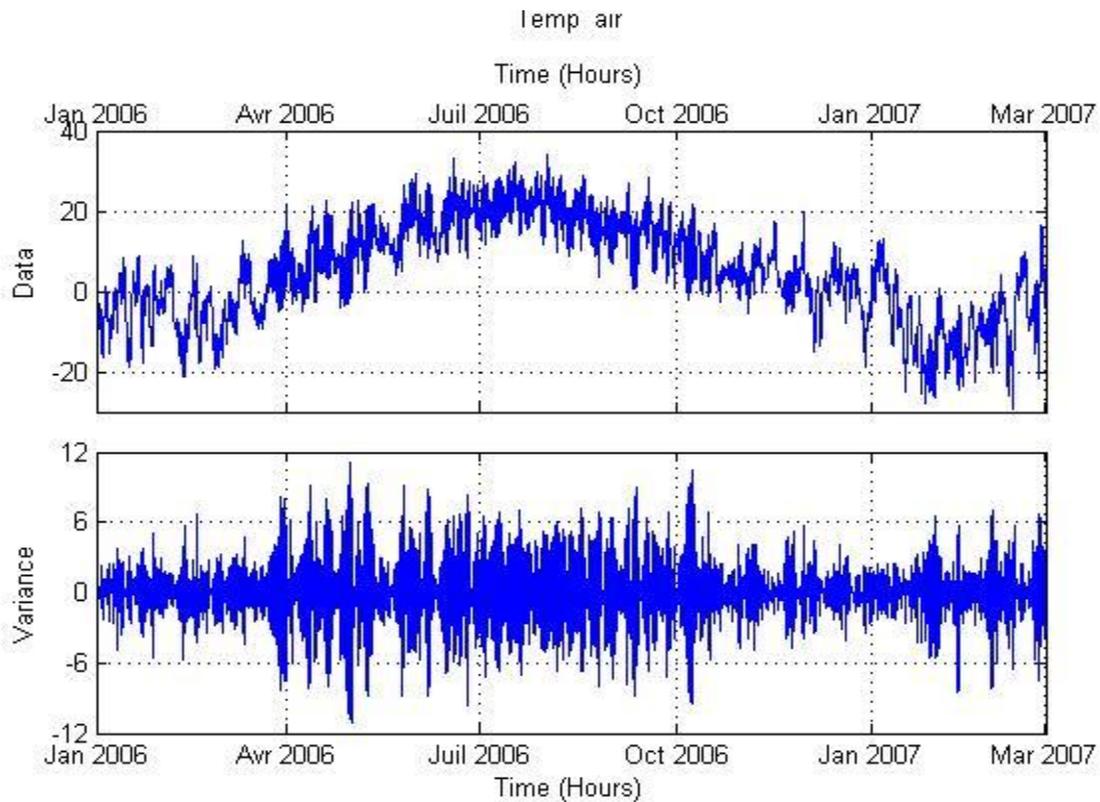
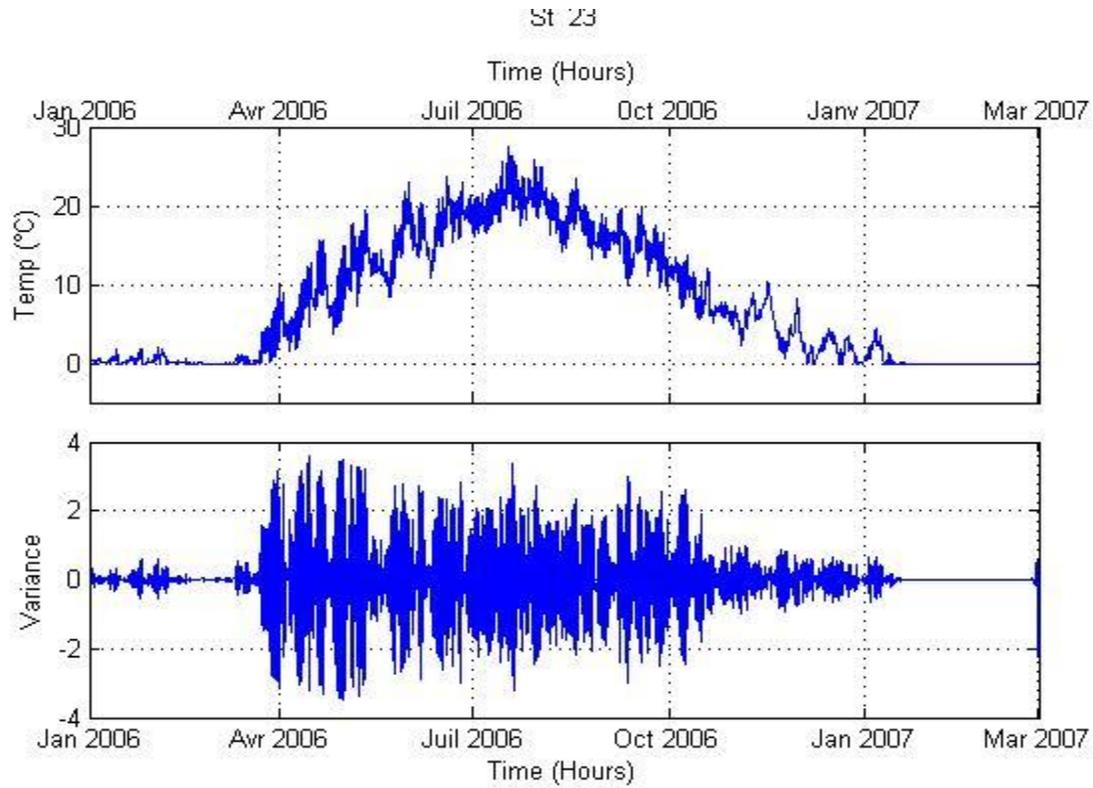


Annexe III: Cohérence entre séries de température de l'eau



Annexe IV: Observations des températures horaires de l'eau et de l'air





Annexe V: Cohérence entre séries horaires de température de l'eau et de l'air

