



# **Température des cours d'eau : analyse des données et modélisation : application au bassin de la Loire**

**Rapport final**

**Université François-Rabelais de Tours,  
Laboratoire GÉHCO – GéoHydrosystèmes  
Continentaux – EA 6293**

**Mars 2015**

---



- **AUTEURS**

**Aurélien BEAUFORT**, docteur (Université François-Rabelais de Tours),  
[aurelien.beaufort@univ-tours.fr](mailto:aurelien.beaufort@univ-tours.fr)

- **CORRESPONDANTS**

**Onema : Bénédicte AUGÉARD, chargée de mission (ONEMA)** [benedicte.augeard@onema.fr](mailto:benedicte.augeard@onema.fr)

**Partenaire : Florentina MOATAR**, professeur (Université François-Rabelais de Tours),  
[florentina.moatar@univ-tours.fr](mailto:florentina.moatar@univ-tours.fr)

- **AUTRES CONTRIBUTEURS**

**Florentina MOATAR**, professeur (Université François-Rabelais de Tours),  
[florentina.moatar@univ-tours.fr](mailto:florentina.moatar@univ-tours.fr)

**Florence CURIE**, maître de conférences (Université François-Rabelais de Tours),  
[florence.curie@univ-tours.fr](mailto:florence.curie@univ-tours.fr)



- **RESUME**

La température de l'eau des rivières, par son rôle majeur sur les écosystèmes aquatiques et les activités socio-économiques et récréatives associées à l'eau, connaît un intérêt croissant ces dernières années tant pour les scientifiques que pour les gestionnaires des milieux aquatiques. Cependant malgré son importance dans la gestion de la ressource en eau, il y a peu d'information sur sa variabilité spatio-temporelle, tant à l'échelle régionale que nationale, par manque de suivis réguliers et en continu sur de longues chroniques. En conséquence le Réseau National Thermique mis en place par l'ONEMA en 2008 et sa pérennité sont d'une importance majeure pour la compréhension des évolutions temporelles et spatiales du régime thermique des cours d'eau et pour anticiper les impacts écologiques et socio-économiques potentiels du changement climatique.

Ce rapport présente les résultats de la convention mise en place entre l'Université François Rabelais et l'ONEMA sur l'analyse des observations de température issues du RNT (2008-2012) dans le bassin de la Loire (126 stations), le développement d'une chaîne de modélisation à base physique et une première simulation des impacts potentiels du changement climatique sur la température des cours d'eau.

Après une étape de critique et de validation des données, une méthodologie permettant de définir une typologie des stations en fonction de leurs principaux facteurs de contrôle (conditions météorologiques, alimentation par les eaux souterraines, végétation) a été établie. Elle combine 3 étapes successives : 1) une classification hiérarchique ascendante (CHA) sur la base de 4 métriques : la température mensuelle du mois le plus chaud (TwXM), la température mensuelle du mois le plus froid (TwNM), l'amplitude annuelle ( $DTwM = TwXM - TwNM$ ), les variations diurnes moyennes pendant le mois le plus chaud ( $DTw24H$ ) ; 2) une analyse des pentes et des ordonnées à l'origine des régressions entre températures de l'air et de l'eau ; 3) pour chaque groupe identifié à l'étape 2, des sous-groupes de stations sont établis en fonction de leur coefficient d'ombrage en distinguant 3 catégories : fort ombrage ( $SF > 70\%$ ), ombrage moyen ( $30\% < SF < 70\%$ ) et faible ombrage ( $SF < 30\%$ ).

Le modèle thermique T-NET basé sur le concept de température d'équilibre et la résolution du bilan énergétique à un pas de temps horaire a été développé à l'Université de Tours selon deux approches, discrétisées à l'échelle des tronçons de la BD Carthage (55 000 tronçons dans le bassin de la Loire) : une approche stationnelle, dans laquelle la température est simulée en fonction des conditions géomorphologiques, météorologiques et hydrologiques locales qui sont intégrées pour déterminer le bilan énergétique et les conditions hydrauliques ; une seconde approche dite « par propagation » permet de prendre en compte la propagation du signal thermique de l'amont vers l'aval des cours d'eau. La performance du modèle T-NET varie suivant l'ordre de Strahler et la distance depuis la source des cours d'eau. L'erreur quadratique moyenne (RMSE) est de 1,5°C pour les stations situées à plus de 100 km depuis la source (28 stations). Elle est plus variable pour les stations situées à moins de 100 km depuis la source (RMSE médiane = 1,9°C ; 80% des RMSE des stations comprises entre 1,2°C et 2,5°C)

Le modèle T-NET, sur la base de 13 projections climatiques désagrégées de scénarios A1B (4<sup>ème</sup> Rapport du Giec) et de 15 projections hydrologiques (modèle EROS, projet ICC-Hydroqual), simule une augmentation moyenne (Bassin de la Loire) de la température de l'eau de 2,9°C ( $\pm 0,7^\circ\text{C}$ ) à l'horizon 2100. L'augmentation de la température est en partie due à la diminution des débits et donc de la profondeur des cours d'eau ce qui va diminuer l'inertie thermique des cours d'eau et accentuer les températures maximales en été.

- **MOTS CLES (THEMATIQUE ET GEOGRAPHIQUE)**

Température des rivières, modélisation statistique, physique, bilan énergétique, influence des apports souterrains, climat, bassin de la Loire, changement climatique

	<p style="text-align: center;"><b>Température des cours d'eau : analyse des données et modélisation : application au bassin de la Loire</b></p> <p style="text-align: center;">Statut du document Beaufort A, Moatar F.</p>	
---	---	---

- **SYNTHESE POUR L'ACTION OPERATIONNELLE** [4 pages maximum]

### **Introduction**

La température de l'eau des rivières, par son rôle majeur sur les écosystèmes aquatiques et les activités socio-économiques et récréatives associées à l'eau, connaît un intérêt croissant ces dernières années à la fois pour les scientifiques, que pour les gestionnaires des milieux aquatiques. La température influence de façon directe la distribution des migrateurs, les interactions proie-prédateurs, la survie, les taux de croissance, le métabolisme des espèces aquatiques des rivières et fleuves. De façon indirecte, elle contrôle les processus de production primaire, la rétention de nutriments et donc la disponibilité de nourriture, la décomposition de la matière organique et les taux de saturation en oxygène dissous des milieux aquatiques, avec une influence sur les processus écologiques. La température de l'eau est aussi un paramètre important pour la production d'électricité, la production d'eau potable et la pêche (Hannah et Gardner, 2015).

La température des rivières est très sensible aux facteurs environnementaux et aux impacts des activités humaines. Cependant malgré son importance dans la gestion de la ressource en eau, il y a peu d'information sur sa variabilité spatio-temporelle, tant à l'échelle régionale que nationale, par manque de suivis réguliers et en continu sur de longues chroniques. En effet, la température est considérée comme un des paramètres de surveillance ponctuelle (lors des prises d'échantillons mensuelles pour le suivi de la qualité de l'eau), ne permettant pas d'établir des régimes saisonniers ou journaliers avec la précision et la distribution statistique requise dans le cadre du changement global qui affectera à la fois les températures et les débits.

En conséquence le Réseau National Thermique mis en place par l'ONEMA en 2008 et sa pérennité sont d'une importance majeure pour la compréhension des évolutions temporelles et spatiales du régime thermique des cours d'eau et pour anticiper les impacts écologiques et socio-économiques potentiels du changement climatique.

Ce rapport présente les résultats de la convention mise en place entre l'Université François Rabelais et l'ONEMA sur l'analyse des observations de température issues du RNT (2008-2012) dans le bassin de la Loire, le développement d'une chaîne de modélisation à base physique et une première simulation des impacts potentiels du changement climatique sur la température des cours d'eau.

### **Facteurs de contrôle de la température**

La température des cours d'eau est contrôlée par les flux énergétiques et hydrologiques aux interfaces eau-atmosphère et eau-lit du cours d'eau. Les changements d'occupation du sol (végétation, urbanisation) et la gestion de l'eau (barrages, rejets, régulation ...) modifient ensuite les caractéristiques thermiques des cours d'eau. En tête de réseau hydrographique, la température des rivières est issue d'un mélange de plusieurs types de contributions hydrologiques en fonction des caractéristiques des bassins (eau de surface/subsurface/eau souterraine/fonte de neige). Elle évolue ensuite en fonction de l'énergie gagnée ou perdue le long de son parcours. Ainsi la variabilité temporelle et spatiale des flux énergétiques et des processus hydrologiques créent des hétérogénéités dans la température des cours d'eau à différentes échelles.

Caissie et al, 2006, classifient les facteurs de contrôle de la température en quatre catégories : les conditions atmosphériques, l'hydrologie, les échanges à l'interface eau/sédiments et la géomorphologie.

## **Choix du bassin de la Loire et validation des données de température**

Le bassin de la Loire a été choisi pour ce travail de recherche pour deux raisons principales : i) la disponibilité des données du RNT. Malgré une extraction des données à l'échelle nationale, il s'est avéré que le bassin de la Loire présentait la couverture des stations la plus homogène. Sur les 147 stations reçues, et après une critique et validation de ces données (Moatar et al, 2001, méthode synthétisée dans ce rapport), nous avons exploité 128 stations ; ii) les caractéristiques contrastées du bassin de la Loire et sa taille importante qui fait 20% du territoire français. Le bassin versant de la Loire (117 000 km<sup>2</sup>) est caractérisé par une variabilité lithologique, climatique et hydrologique importante tout en ayant des pressions anthropiques plus faibles par comparaison à d'autres bassins fluviaux français (Rhône, Seine).

## **Variabilité spatio-temporelle de la température dans le bassin de la Loire**

Une méthodologie permettant de définir une typologie des stations en fonction de leurs principaux facteurs de contrôle (conditions météorologiques, alimentation par les eaux souterraines, végétation) a été établie. Elle combine 3 étapes successives :

- une classification hiérarchique ascendante (CHA) sur la base de 4 métriques : la température mensuelle du mois le plus chaud (TwXM), la température mensuelle du mois le plus froid (TwNM), l'amplitude annuelle (DTwM = TwXM - TwNM), les variations diurnes moyennes pendant le mois le plus chaud (DTw24H) ; cette première sélection permet de mettre en évidence les stations influencées par l'atmosphère (forte variabilité de la température) et celles qui bénéficient d'apports de nappe (amplitude de variation limitée)
- une analyse des pentes et des ordonnées à l'origine des régressions entre températures de l'air et de l'eau (O'Driscoll et DeWalle, 2006) pour consolider la sélection faite à l'étape précédente ;
- pour chaque groupe identifié à l'étape 2 (influence atmosphérique, influence des apports de nappe), des sous-groupes de stations sont établis en fonction de leur coefficient d'ombrage en distinguant 3 catégories : fort ombrage (SF > 70%), ombrage moyen (30% < SF < 70%) et faible ombrage (SF < 30%).

La répartition géographique de ces groupes de stations est illustrée dans la figure 1. On observe que :

- La température des grands cours d'eau est essentiellement contrôlée par les conditions atmosphériques ;
- La température des petits et moyens cours d'eau dépend des conditions géographiques et géomorphologiques de la station de mesure et du linéaire en amont de celle-ci ; en particulier, l'ombrage lié à la ripisylve et/ou les apports de nappe (pour les cours d'eau incisant un réservoir aquifère) peuvent contrôler la température de certains petits cours d'eau amont en jouant un rôle tampon par rapport aux variations de la température de l'air ; cet effet peut se propager d'amont en aval et doit être pris en compte pour comprendre la température de cours d'eau de taille moyenne ;

L'analyse de certains stations montre également que les aménagements anthropiques modifient le régime thermique des cours d'eau ; les seuils ou les étangs dont l'eau restituée provient de la surface induisent un réchauffement à l'aval du cours d'eau en été ; certains barrages dont l'eau restituée est captée en profondeur de la retenue ont un effet qui dépend de la saison et du mode de gestion (exemple d'effet observé sur la Loire : le refroidissement des eaux en été)

## **Modèle T-NET**

Un modèle thermique à base physique s'appuyant sur le concept de température d'équilibre et la résolution du bilan énergétique d'un cours d'eau a été développé selon deux approches :

- une approche stationnelle, dans laquelle la température est simulée en fonction des conditions géomorphologiques, météorologiques et hydrologiques locales qui sont intégrées pour déterminer le bilan énergétique et les conditions hydrauliques ;

- une seconde approche dite « par propagation », qui permet de prendre en compte la propagation du signal thermique de l'amont vers l'aval des cours d'eau. Un exemple de simulation (approche propagation) pour l'ensemble des tronçons de la BD Carthage du bassin de la Loire est présenté dans la figure 2.

La performance du modèle T-NET selon l'approche stationnelle varie suivant de l'ordre de Strahler et la distance depuis la source des cours d'eau. L'erreur quadratique moyenne (RMSE) est de 1,5°C pour les stations situées à plus de 100 km depuis la source (28 stations). La performance est plus variable pour les stations situées à moins de 100 km depuis la source (RMSE médiane = 1,9°C ; 80% des RMSE des stations comprises entre 1,2°C et 2,5°C) (Beaufort *et al.*, 2015). L'approche par propagation a permis de diminuer la RMSE moyenne de ces 11 stations de 1,2°C par rapport à l'approche stationnelle ne prenant en compte que les échanges énergétiques à l'interface eau-atmosphère.

La compréhension des régimes thermiques des cours d'eau en fonction de leurs facteurs de contrôle et la reconstitution de leurs descripteurs statistiques (moyennes mensuelles, températures maximales journalières sur plusieurs jours consécutifs, ...) par la modélisation permet d'apporter une nouvelle contribution aux nombreux travaux en écologie étudiant la répartition des aires géographiques des espèces aquatiques (Boisneau *et al.*, 2008 ; Buisson *et al.*, 2009). Une première application de ce travail montre que la simulation des aires de répartition des espèces d'anguilles, de vairons et de spirilins à l'état actuel (1994-2011) peut différer de manière importante suivant si la température de l'air ou de l'eau est utilisée en entrée des modèles de distribution des espèces (Buisson *et al.*, 2015). D'une manière plus générale, ces travaux peuvent mettre en évidence des zones de refuges thermiques, qui constituent des habitats privilégiés pour la faune écologique.

Le modèle T-NET, sur la base de 13 projections climatiques désagrégées de scénarios A1B (4<sup>ème</sup> Rapport du Giec) et de 15 projections hydrologiques (modèle EROS, projet ICC-Hydroqual, Etablissement Public Loire, FEDER), simule une augmentation moyenne (Bassin de la Loire) de la température de l'eau de 2,9°C ( $\pm 0,7^\circ\text{C}$ ) à l'horizon 2100. L'augmentation de la température est en partie due à la diminution des débits et donc de la profondeur des cours d'eau ce qui va diminuer l'inertie thermique des cours d'eau et accentuer les températures maximales en été (Beaufort *et al.*, 2013).

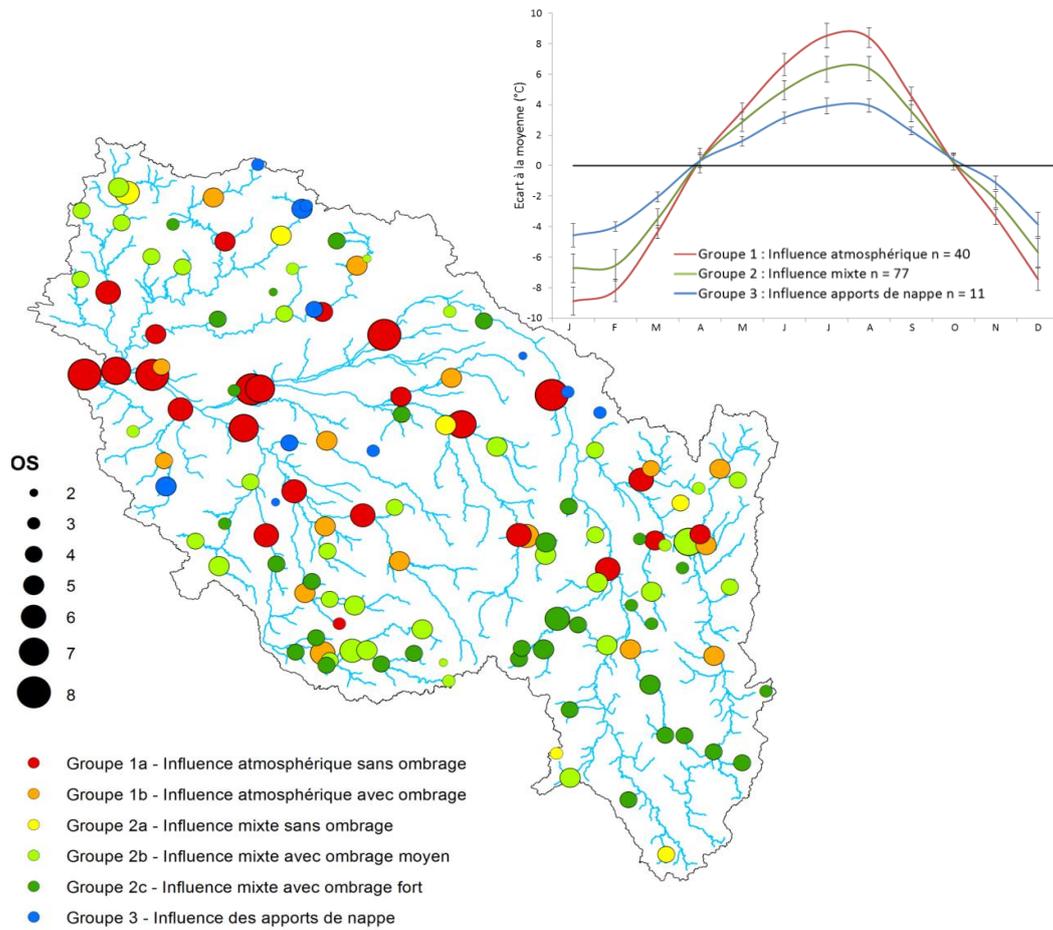


Figure 1. Représentation des stations en fonction de leur facteur de contrôle identifié et température de l'eau moyenne mensuelle normalisée par la moyenne sur les trois groupes de stations identifiés. OS signifie Ordre de Strahler

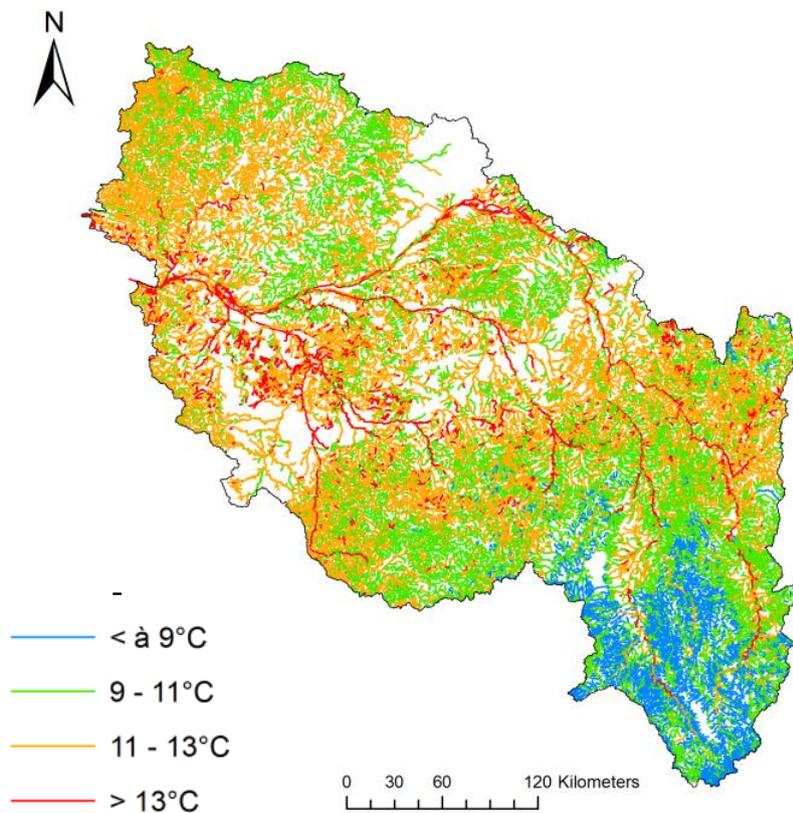


Figure 2. Températures de l'eau moyenne interannuelles 2008-2012 simulées selon l'approche par propagation

Pour deux bassins de montagne et de plaine plus particulièrement étudiés, la température moyenne annuelle est augmentée respectivement et de 2,8°C ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ ) et de 2,5°C ( $\pm 0,8^\circ\text{C}$ ) en fin de siècle. L'augmentation de la température suit la même tendance saisonnière sur les deux bassins versants où les anomalies, entre la température mensuelle moyenne actuelle et la température à l'horizon 2100, sont plus importantes au printemps et en automne ( $+3,0^\circ\text{C} \pm 0,9^\circ\text{C}$ ) qu'en été ( $+2,6^\circ\text{C} \pm 0,7^\circ\text{C}$ ). Cette augmentation de la température limitée en été, est expliquée par l'augmentation de la perte énergétique par évaporation et par le rayonnement ondes-longues réémis par la masse d'eau. Le réchauffement des cours d'eau simulé par le modèle thermique à l'horizon 2100 pourrait impliquer une modification de la répartition des espèces piscicoles et impacter la reproduction des poissons de la famille des cyprinidés, qui sont des poissons sédentaires, ont un seuil de reproduction de 16°C. En période actuelle (1971-2007), le dépassement de ce seuil a lieu au début du mois de juin dans le bassin de plaine et au milieu du mois de juin dans le bassin de montagne. A l'horizon 2100, ce dépassement de seuil aurait lieu 32 jours plutôt dans le bassin de plaine et 26 jours plutôt dans le bassin de montagne ce qui pourrait conduire à fortement perturber l'équilibre écologique actuel des cours d'eau. Dans cette application, le modèle n'avait pu être validé qu'en période estivale (Beaufort *et al.*, 2013).

Dans le but d'améliorer les simulations du modèle, il est très important de pouvoir disposer de longues séries de données afin d'étudier de manière fine sa performance dans plusieurs contextes (saisonniers, années contrastées, influences différentes, navales, eaux souterraines). La pérennisation des stations de suivi du RNT est donc d'une importance majeure. Ainsi le modèle devrait incorporer un module de fonte de neige et l'influence des barrages-réservoirs notamment pour la partie amont du bassin. Des études sur le barrage de Villerest ont déjà montré que cela avait des effets importants sur la température des cours d'eau. Ces zones spécifiques ne sont que très peu suivies et il paraît important de valider le modèle au niveau de ces sites contrastés afin d'améliorer les prédictions simulées en contexte de changement climatique et permettre d'analyser l'impact du changement climatique sur les grandes espèces migratrices et les aires de répartition de la faune piscicole du bassin de la Loire.

## Références

- Beaufort A, Bustillo V, Curie F, Moatar F, Ducharme A, Thiéry D 2013 : Water temperature sensitivity under climatic change: comparison between mountain and lowland rivers in the Loire basin. In B. Arheimer (ed.): Understanding Freshwater Quality Problems in a Changing World, p321-328, IAHS Publication 361, Wallingford, UK.
- Beaufort A, Moatar F, Curie F, Ducharme A, Bustillo V, Thiéry D 2015 : River temperature modelling by Strahler order at the regional scale in the Loire River basin, France. *River Research and Applications*, in press. DOI: 10.1002/rra.2888
- Beaufort A 2015 : Modélisation physique de la température des cours d'eau à l'échelle régionale : Application au bassin versant de la Loire. Thèse, Université François-Rabelais de Tours.
- Boisneau C, Moatar F, Bodin M, et al. (2008) Does global warming impact on migration patterns and recruitment of Allis shad (*Alosa alosa* L.) young of the year in the Loire River, France? *Hydrobiologia* 602: 179–186.
- Buisson L, Pontalier H, Beaufort A, Curie F, Moatar F 2015 : Do simulated water temperatures give more accurate predictions than air temperature when modelling stream fish distribution? *HydroEco conference Vienne, Austria*.
- Buisson L, Grenouillet G. 2009. Contrasted impacts of climate change on stream fish assemblages along an environmental gradient. *Diversity and Distributions* 15(4): 613-626.
- Bustillo V, Moatar F, Ducharme A, Thiéry D, Sauquet D, Vidal J-Ph, Bernard A. 2011 : Rapport scientifique du projet ICC-HYDROQUAL. Action 2 : Évolution du régime thermique de la Loire et de ses affluents sous changement climatique. (64 pages)
- Bustillo V, Moatar F, Ducharme A, Thiéry D, Poirel A. 2014 : A multimodel comparison for assessing water temperatures under changing climate conditions via the equilibrium temperature concept: case study of the Middle Loire River, France. *Hydrological Processes* 28: 1507-1524. DOI: 10.1002/hyp.9683.
- Caissie D. 2006 : The thermal regime of rivers: a review. *Freshwater Biology* 51: 1389-1406.
- Hannah DM, Garner G. 2015 : River water temperature in the United Kingdom: changes over the 20th century and possible changes over the 21st century. *Progress in Physical Geography*. DOI: DOI: 10.1177/03091333145506694
- Moatar F, Miquel J, Poirel A. 2001. A quality-control method for physical and chemical monitoring data. Application to dissolved oxygen levels in the River Loire (France). *Journal of Hydrology* 252: 25-36.
- Moatar F, Gailhard J. 2006 : Water temperature behaviour in the River Loire since 1976 and 1881. *C.R. Geosciences* 338: 319-328.
- Moatar F, Meybeck M, Poirel A. 2009 : Variabilité journalière de la qualité des rivières et son incidence sur la surveillance à long terme : exemple de la Loire moyenne. Daily variability and its implication on long term river water quality surveys: the Middle Loire example. *La Houille Blanche* 4: 91-99.
- Moatar F, Ducharme A, Thiéry D, Bustillo V, Sauquet E, Vidal JP. 2010 : La Loire à l'épreuve du changement climatique. *Géosciences* 12: 78-87. <http://www.brgm.fr/dcenewsFile?ID=1306>

# Température des cours d'eau : analyse des données et modélisation : application au bassin de la Loire

## SOMMAIRE

<b>1. Introduction .....</b>	<b>12</b>
<b>2. Etat de l'art sur la variabilité de la température et ses facteurs de contrôle 13</b>	
<b>2.1. Facteurs de contrôle.....</b>	<b>13</b>
2.1.1. Les conditions atmosphériques .....	13
2.1.2. Le débit et les conditions hydrauliques .....	14
2.1.3. Les échanges énergétiques à l'interface eau/sédiments .....	14
2.1.4. Topographie et végétation .....	15
<b>2.2. Variabilité spatio-temporelle .....</b>	<b>15</b>
2.2.1. Variabilité spatiale.....	15
<b>2.2.1.1. Gradients longitudinaux.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.1.2. Hétérogénéités locales.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.1.3. Stratification thermique.....</b>	<b>15</b>
2.2.2. Variabilité temporelle .....	15
<b>2.2.2.1. Cycles saisonniers .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2.2.2. Variations journalières et diurnes .....</b>	<b>16</b>
<b>3. Présentation des données et du site d'étude .....</b>	<b>16</b>
<b>3.1. Présentation du bassin de la Loire .....</b>	<b>17</b>
<b>3.2. Présentation des chroniques de température disponibles .....</b>	<b>19</b>
3.2.1. Critique des données et validation .....	21
3.2.2. Jeu de données « stations période estivale 2000-2006 » .....	22
3.2.3. Jeu de données RNT « stations période annuelle 2008-2012 » .....	22
<b>4. Classification des stations par facteur de contrôle .....</b>	<b>23</b>
<b>4.1. Variabilité spatio-temporelle dans le bassin de la Loire .....</b>	<b>23</b>
4.1.1. Moyennes annuelles et saisonnières .....	23
4.1.2. Différences de températures saisonnières eau - air.....	25
4.1.3. Amplitudes annuelles.....	26
4.1.4. Valeurs maximales sur 7 jours.....	27
4.1.5. Variations diurnes .....	28
4.1.6. Evolution longitudinale des valeurs maximales sur 7 jours .....	28
<b>4.2. Sélection des stations par facteur de contrôle .....</b>	<b>29</b>
4.2.1. Identification des stations par classification hiérarchique.....	30
4.2.2. Identification des stations sur la base des relations Teau - Tair .....	31
4.2.3. Résultats de la sélection par les deux méthodes .....	32
4.2.4. Identification des stations influencées par l'ombrage.....	34
<b>4.2.4.1. Ombrage des stations influencées par les conditions atmosphériques</b>	<b>35</b>
<b>4.2.4.2. Ombrage des stations d'influences mixtes .....</b>	<b>36</b>
<b>4.2.4.1. Ombrage des stations influencées par les nappes.....</b>	<b>36</b>
<b>4.3. Caractéristiques hydromorphologiques des groupes de stations.....</b>	<b>37</b>
<b>4.4. Effets anthropiques observés sur la température de l'eau .....</b>	<b>39</b>
<b>5. Vers une estimation de l'impact du changement climatique par modélisation41</b>	
<b>5.1. Modèle T-Net .....</b>	<b>41</b>

5.1.1.	Présentation du modèle .....	41
5.1.2.	Approche stationnelle .....	44
5.1.3.	T-Net – approche par propagation .....	44
5.1.4.	Performance comparée des approches de modélisation .....	45
<b>5.2.</b>	<b>Une approche simple de modélisation pour les grands cours d'eau : estimation de l'impact du changement climatique .....</b>	<b>47</b>
<b>5.3.</b>	<b>Apport de la prise en compte de l'eau souterraines et de l'ombrage pour les cours d'eau moyens .....</b>	<b>49</b>
<b>5.4.</b>	<b>Pertinence de l'approche par propagation.....</b>	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>6.</b>	<b>Implications pour la gestion et perspectives.....</b>	<b>50</b>
<b>7.</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>52</b>
<b>1.</b>	<b>Glossaire.....</b>	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>2.</b>	<b>Sigles &amp; Abréviations .....</b>	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>3.</b>	<b>Bibliographie .....</b>	<b>54</b>
<b>4.</b>	<b>Table des illustrations .....</b>	<b>56</b>
<b>5.</b>	<b>Annexe 1 : Carte de situation du bassin versant de la Loire.....</b>	<b>58</b>
<b>6.</b>	<b>Remerciements .....</b>	<b>65</b>

# Température des cours d'eau : analyse des données et modélisation : application au bassin de la Loire

## 1. Introduction

La température de l'eau, par son rôle majeur au niveau des écosystèmes aquatiques et des activités socio-économiques et récréatives, connaît un intérêt croissant ces dernières années à la fois pour les scientifiques, que pour les gestionnaires des milieux aquatiques. La température influence de façon directe la distribution des migrateurs, les interactions proie-prédateurs, la survie, les taux de croissance, le métabolisme des espèces aquatiques des rivières et fleuves. De façon indirecte, elle contrôle les processus de production primaire, la rétention de nutriments et donc la disponibilité de nourriture, la décomposition de la matière organique et les taux de saturation en oxygène dissous des milieux aquatiques, avec une influence sur les processus écologiques. La température de l'eau est aussi un paramètre important pour la production d'électricité, la production d'eau potable et la pêche (Hannah et Gardner, 2015).

La température des rivières est très sensible aux facteurs environnementaux et aux impacts des activités humaines. Cependant malgré son importance dans la gestion de la ressource en eau, il n'y a pas d'information sur sa variabilité spatio-temporelle, tant à l'échelle régionale que nationale, par manque de suivis réguliers et en continu sur de longues chroniques. En effet, la température est considérée comme un des paramètres de surveillance ponctuelle (lors des prises d'échantillons mensuelles pour le suivi de la qualité de l'eau), ne permettant pas d'établir des régimes saisonniers ou journaliers avec la précision et la distribution statistique requise dans le cadre du changement global qui affectera à la fois les températures et les débits.

En conséquence le Réseau National Thermique (RNT) mis en place par l'ONEMA en 2008 et sa pérennité sont d'une importance majeure pour la compréhension des évolutions temporelles et spatiales du régime thermique des cours d'eau et pour anticiper les impacts écologiques et socio-économiques potentiels du changement climatique.

Ce rapport présente les résultats de la convention mise en place entre l'Université François Rabelais et l'ONEMA sur l'analyse des observations de température issues du RNT (2008-2012) dans le bassin de la Loire et une première simulation des impacts potentiels du changement climatique sur la température des cours d'eau à l'aide d'un modèle physique développé à l'Université de Tours.

Les objectifs du travail ont été les suivants :

- Récupérer et mettre en forme les données issues du Réseau National Thermique de l'ONEMA,
- Faire une critique de la cohérence des données,
- Analyser la variabilité spatiale de quelques métriques de température afin de classer les stations en fonction de leurs principaux facteurs de contrôle : apports d'eau souterraine, conditions atmosphériques, ombrage rivulaire
- Développer un modèle à base physique à l'échelle régionale en intégrant diverses paramétrisations permettant de prendre en compte les facteurs de contrôle mentionnés ci-avant.
- Valider ce modèle sur un ensemble de stations et sur les profils longitudinaux de la Loire Moyenne et Aval et de la Vienne aval
- Effectuer des premières simulations de l'impact du changement climatique sur la température des cours d'eau du bassin de la Loire (2045-2065 et 2080-2100)

Ce rapport est organisé de la manière suivante :

- Une analyse bibliographique des facteurs de contrôle de la température des cours d'eau ainsi que de sa variabilité temporelle (chapitre 1)
- La présentation du site d'étude et des données horaires ONEMA (chapitre 2)
- La classification des stations d'après leurs facteurs de contrôle (conditions atmosphériques, apports des eaux souterraines, ombrage par la végétation rivulaire). Cette partie présentera également la variabilité spatiale des métriques de température (moyennes mensuelles, moyennes hebdomadaires glissantes, moyennes des variations diurnes) ainsi que quelques exemples d'effets anthropiques observés sur la température de l'eau (chapitre 3)
- Enfin, la dernière partie présentera le modèle T-Net développé à l'Université de Tours, sa performance ainsi qu'une application sur l'impact du changement climatique.

## 2. Etat de l'art sur la variabilité de la température et ses facteurs de contrôle

### 2.1. Facteurs de contrôle

La température des cours d'eau est contrôlée par les flux énergétiques et hydrologiques aux interfaces eau-atmosphère et eau-lit du cours d'eau. Les changements d'occupation du sol (végétation, urbanisation) et la gestion de l'eau (barrages, rejets, régulation ...) modifient ensuite les caractéristiques thermiques des cours d'eau. En tête de réseau hydrographique, la température des rivières est issue d'un mélange de plusieurs types de contributions hydrologiques en fonction des caractéristiques des bassins (eau de surface/subsurface/eau souterraine/fonte de neige). Elle évolue ensuite en fonction de l'énergie gagnée ou perdue le long de son parcours. Ainsi la variabilité temporelle et spatiale des flux énergétiques et des processus hydrologiques créent des hétérogénéités dans la température des cours d'eau à différentes échelles.

Caissie *et al*, 2006, classifient les facteurs de contrôle de la température en quatre catégories : les conditions atmosphériques, l'hydrologie, les échanges à l'interface eau/sédiments et la géomorphologie (Figure 1).

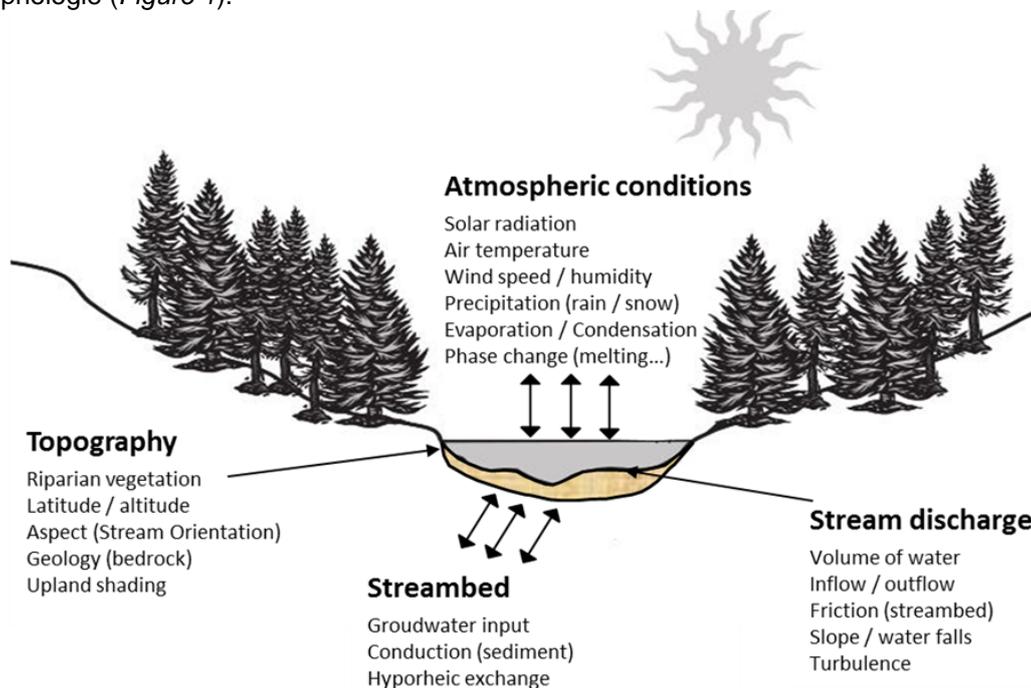


Figure 1 : Facteurs de contrôle de la température de l'eau (schéma modifié issu de Caissie *et al*, 2006)

#### 2.1.1. Les conditions atmosphériques

Les conditions atmosphériques représentent la catégorie de forçage ayant le plus d'influence sur le régime thermique des cours d'eau : la température de l'air, le rayonnement solaire par ondes-courtes

et le rayonnement atmosphérique par ondes-longues (Webb et Walsh 2004). Plusieurs études montrent qu'il existe une relation linéaire entre la température de l'eau et de l'air (Mohseni et Stefan, 1999 ; Kinouchi *et al.*, 2007), particulièrement forte ( $R^2 > 0,9$ ) sur les grands cours d'eau ayant une aire de drainage importante ( $> 10^3 \text{ km}^2$ ) et où le substrat est le moins perméable (Garner *et al.*, 2013). A l'inverse cette relation devient moins bien définie pour les cours d'eau ayant un bassin versant de taille plus faible et drainant un substrat très perméable (O'Driscoll et DeWalle, 2006 ; Garner *et al.*, 2013). La corrélation entre la température de l'eau et de l'air devient aussi plus faible en cas de températures extrêmes chaudes (perte énergétique par évaporation) ou froides (apport de chaleur par les nappes ou approche de  $0^\circ\text{C}$  pour les rivières des régions nordiques) (Mohseni et Stefan, 1999).

Le rayonnement par ondes-courtes, correspond à l'énergie émise par les rayonnements incidents du soleil. Il représente la source principale des apports énergétiques reçus par la masse d'eau (Webb et Zhang, 2004). Son influence sur le réchauffement de la masse d'eau est variable selon la longueur des ondes solaires reçues par le cours d'eau, de la latitude, de la saison, de la couverture nuageuse et de l'albédo de surface (Zhang *et al.*, 2000). Le rayonnement net ondes-longues représente la différence entre les radiations issues de l'atmosphère et de la ripisylve et celles réfléchies par la surface de l'eau. Ce rayonnement net représente la principale source de pertes énergétiques dans la masse d'eau (Webb et Zhang, 2004). Les flux convectifs entre l'atmosphère et la masse d'eau dépendent de la vitesse du vent et du gradient thermique entre l'eau et l'air. Ils peuvent influencer la température de l'eau en atténuant les valeurs extrêmes (Caissie *et al.*, 2006). L'évaporation et la condensation sont respectivement à l'origine d'une perte ou d'un gain de chaleur par les effets de la chaleur latente de ces changements de phase. Ces facteurs sont fonction de la vitesse du vent et des gradients de pression de vapeur d'eau dépendant de la température de l'air et de l'humidité relative (Ouellet *et al.*, 2014). En moyenne sur l'année, ces flux issus des processus d'évaporation/condensation engendrent des pertes énergétiques. Toutefois d'après Caissie *et al.* (2006) l'impact de ces trois derniers facteurs (flux de chaleur sensible, évaporation/condensation) est minime face aux variations de température de l'air et aux flux radiatifs.

### 2.1.2. Le débit et les conditions hydrauliques

Le débit et les conditions hydrauliques (vitesse du courant, pente du lit, turbulence) jouent un rôle prépondérant dans l'inertie thermique. Ainsi les cours d'eau de faible profondeur sont plus sensibles aux variations des forçages externes. D'un point de vue général, lorsque les débits sont importants (période de crue), la colonne d'eau se réchauffe peu (pas de stagnation d'eau). A la différence, en période d'étiage, la vitesse de l'eau étant plus faible, le temps de réchauffement de la masse d'eau est plus important. De plus des phénomènes de frictions entre la masse d'eau et le lit et les berges du chenal peuvent apporter de l'énergie. Pour les cours d'eau ayant un régime hydrologique nival ou pluvio-nival, la fonte des neiges provoque un refroidissement du cours d'eau (Leach et Moore, 2011).

### 2.1.3. Les échanges énergétiques à l'interface eau/sédiments

Les échanges énergétiques à l'interface eau/sédiments résultent d'une combinaison de deux phénomènes de transport de chaleur : la convection provenant des résurgences des eaux souterraines dans la rivière et des échanges hyporhéiques et la conduction thermique à travers les sédiments et l'eau. Les eaux souterraines subissent peu de variations de températures au cours du temps mais gardent un cycle saisonnier similaire à celui de la température de l'eau (Hannah *et al.*, 2009). En période estivale, les cours d'eau alimentés par les apports de nappes sont refroidis alors qu'en hiver ces apports vont amener une température plus chaude et contribuent à augmenter la température de l'eau. Story *et al.* (2003) ont montré que les apports de nappe sur un petit cours d'eau pouvaient être responsables de 40% du refroidissement de  $3^\circ\text{C}$  de la température maximum journalière. Les eaux hyporhéiques contribuent à la mise en réserve d'eaux de surface qui intègrent les influences climatiques de périodes pluri-journalière et peuvent montrer des décalages temporels et des amplitudes plus faibles (Arrigoni *et al.*, 2008). La réémergence des eaux hyporhéiques dans les cours d'eau va donc avoir un impact sur la température de surface. La composition géologique du substrat (Karst) et la géométrie du cours d'eau (surface d'échange nappe/ri vière) peuvent affecter la quantité des apports d'eau souterraine dans la rivière et modifier les apports ou pertes énergétiques (O'Driscoll et DeWalle, 2006).

## 2.1.4. Topographie et végétation

L'augmentation de l'indice foliaire pendant la période estivale limite les apports d'énergie provenant du rayonnement solaire ce qui conduit à réduire la température de l'eau au cours de la journée (Hannah *et al.*, 2008). L'influence de l'ombrage est dépendante de la largeur et de l'orientation du chenal, de la position du soleil et du type d'espèces arborées présentes (Li *et al.*, 2012). La présence de ripisylve permet également de réduire la vitesse du vent ce qui limite les échanges de chaleur sensible et latente (Story *et al.*, 2003). Les précipitations influencent la température de l'eau localement même si les échanges observés sont assez faibles (Ouellet *et al.*, 2014). En période estivale, le sol emmagasine de la chaleur durant la journée. Lors des précipitations, la pluie capte l'énergie thermique du sol avant d'arriver dans le cours d'eau ce qui provoque un réchauffement de la masse d'eau.

## 2.2. Variabilité spatio-temporelle

### 2.2.1. Variabilité spatiale

#### 2.2.1.1. Gradients longitudinaux

A l'échelle régionale, on distingue des gradients longitudinaux de la température moyenne des cours d'eau qui augmente vers l'aval. La dynamique thermique des cours d'eau situés à l'amont des bassins est généralement semblable à celle des eaux souterraines car ils sont situés près des sources et l'eau a eu un temps d'exposition insuffisant pour s'équilibrer avec l'atmosphère (Edinger *et al.*, 1968; Kelleher *et al.*, 2012). Avec l'augmentation de la distance depuis la source, le régime thermique du cours d'eau est moins contrôlé par les conditions aux limites amont et s'équilibre avec les conditions atmosphériques (Mohseni *et al.*, 1999). Les variations du régime thermique sont ainsi principalement contrôlées par la latitude, l'altitude et la région climatique (Webb et Walling, 1997). Le gradient thermique longitudinal est de l'ordre de 0,1°C/km pour les grands cours d'eau de plaine (Torgersen *et al.*, 2001) et peut atteindre 0,6°C/km pour les petits cours d'eau (Zwieniecki et Newton, 1999).

#### 2.2.1.2. Hétérogénéités locales

A une échelle spatiale plus fine, des variations latérales de la température peuvent être observées au niveau des zones de confluences (Ebersole *et al.*, 2003) ou au niveau des zones préférentielles d'infiltration ou d'exfiltration de la nappe (Tonina et Buffington, 2009). Clark *et al.* (1999) observent des différences de 7°C entre la température au milieu du chenal et celle du bord. Les échanges entre la masse d'eau et la nappe ont lieu à plusieurs échelles spatiales (de quelques centimètres à plusieurs kilomètres) et varient en fonction de la taille du cours d'eau (Tonina et Buffington, 2009). La morphologie du chenal est aussi un facteur de contrôle. Ainsi de très fortes températures peuvent être observées sur les grands cours d'eau en tresses du fait de leur faible profondeur et de leur largeur importante (Mosley, 1983).

#### 2.2.1.3. Stratification thermique

Des variations thermiques verticales peuvent être observées dans des zones de faible turbulence où la profondeur est importante et les vitesses d'écoulement sont faibles (Ebersole *et al.*, 2003) ce qui donne lieu à une stratification thermique. Les hétérogénéités thermiques observées dans la colonne d'eau de petits cours d'eau peuvent être dues à l'influence simultanée de plusieurs facteurs tels que l'ombre projetée par la végétation rivulaire, les apports de nappe ou les échanges avec la zone hyporhéique (Moore *et al.*, 2005b).

### 2.2.2. Variabilité temporelle

#### 2.2.2.1. Cycles saisonniers

**A une échelle saisonnière**, le régime thermique des cours d'eau peut être décrit par une fonction sinusoïdale (Mohseni *et al.*, 1999). En milieu tempéré, les températures maximales sont observées en juillet et août et les valeurs minimales en janvier. Dans les zones plus froides, les rivières peuvent être gelées durant l'hiver et leur cycle thermique annuel ne s'étend qu'entre le printemps et l'automne

(Caissie *et al.*, 1998). L'amplitude de ce cycle annuel peut fortement varier (Hannah *et al.*, 2008). Ainsi des températures très élevées peuvent être observées en période estivale, sur des cours d'eau influencés par les conditions atmosphériques, alors que la température est plus modérée sur les cours d'eau dont le régime thermique est contrôlé par les apports de nappe ou par l'ombrage issu de la végétation rivulaire.

### 2.2.2.2. Variations journalières et diurnes

Les fluctuations journalières, hebdomadaires et mensuelles dépendent des conditions climatiques, débits, apports des affluents, d'eau souterraine et activité anthropique, alors que les fluctuations diurnes sont plutôt gouvernées par l'énergie solaire (Johnson *et al.*, 2014).

Caissie *et al.* (2006) expliquent que la température maximale de la journée est généralement observée en fin d'après-midi alors que la température minimale est observée à l'aube (Moatar *et al.*, 2008). L'amplitude diurne est généralement faible en tête de réseaux hydrographiques, sous influence des apports de nappe. Elle a tendance à augmenter en direction de l'aval en atteignant un maximum estimé lorsque le cours d'eau a une largeur supérieure à 50 mètres et une profondeur inférieure à 1,5 mètre (Caissie *et al.*, 2006 ; Figure 2). Sur les plus grands cours d'eau, une profondeur plus importante implique une augmentation de l'inertie thermique ce qui limite les variations diurnes. L'hydrologie a également une influence sur le cycle diurne de la température. Ainsi, une baisse de l'amplitude journalière est observée lors d'épisode de crues (Moatar *et al.*, 2009). Plusieurs études ont montré que la présence de ripisylve pouvait diminuer l'amplitude du cycle diurne ainsi que la température maximale et moyenne journalière (Imholt *et al.*, 2012 ; Garner *et al.*, 2014).

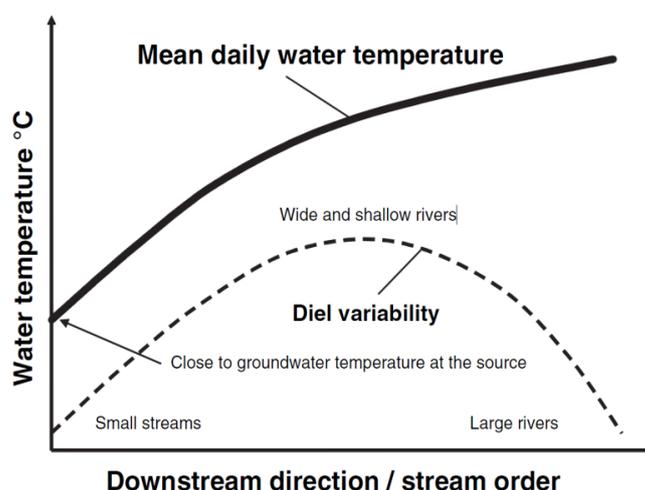


Figure 2. Schématisation de la variabilité de la température moyenne journalière et de l'amplitude diurne en fonction de la direction à l'aval/l'ordre de Strahler (Caissie *et al.*, 2006)

## 3. Présentation des données et du site d'étude

Le bassin de la Loire a été choisi pour ce travail de recherche pour deux raisons principales :

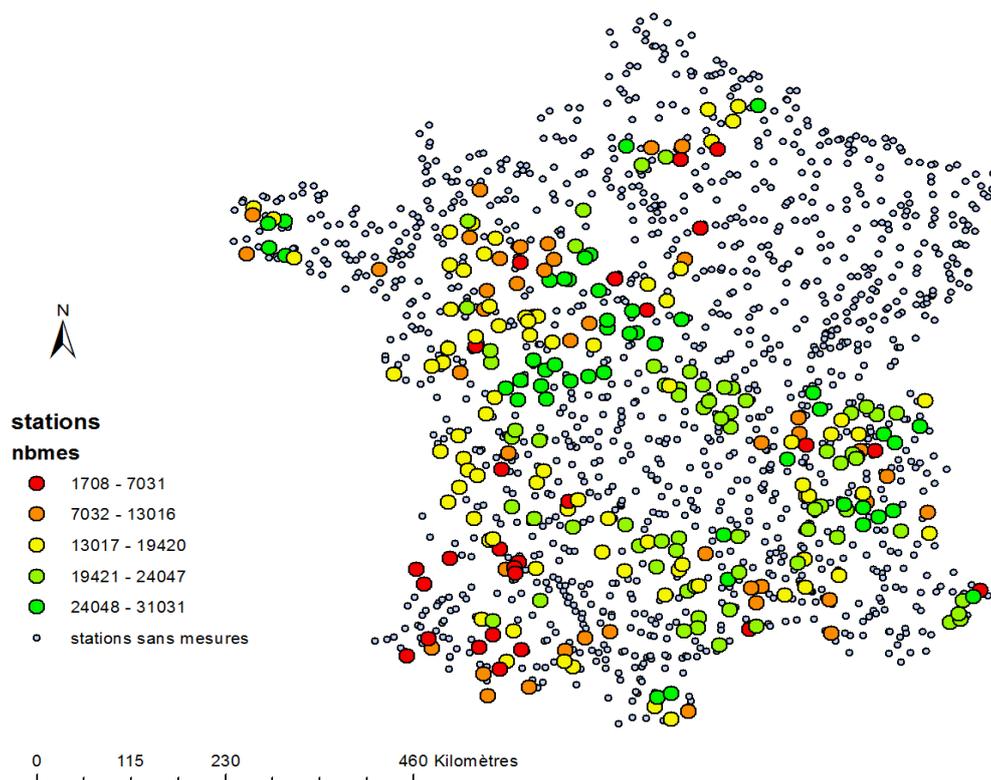
- ▶ La disponibilité des données du RNT
- ▶ Les caractéristiques contrastées du bassin de la Loire et sa taille importante qui fait 20% du territoire français.

Une première extraction des données de température de l'eau avait été réalisée par l'ONEMA le 24/10/2013. Cette extraction a permis de récupérer 263 stations à l'échelle de la France, avec une répartition spatiale assez hétérogène (Figure 3). Parmi les quatre bassins fluviaux, seul le bassin de la Loire disposait d'un nombre de stations assez bien réparties. Sur l'ensemble de stations récupérées, suivant les stations, les chroniques horaires présentaient entre 72 jours et 3 ans et demi (entre 16/06/2008 et 4/10/2011).

Une deuxième extraction des données (période 01/11/2010-01/08/2013) n'a pas permis d'augmenter de manière significative le nombre de stations situées dans le massif central (25 stations en plus). Elle a surtout permis d'actualiser la période de suivi pour l'ensemble des stations.

Compte tenu de ces extractions, nous avons limité donc l'étude au bassin de la Loire et avons sollicité en juin 2014 les délégations régionales de l'ONEMA à Dijon et Clermont-Ferrand pour compléter certaines données dans le Massif Central. Nous avons obtenu ainsi 147 stations dans le bassin de la Loire.

Compte tenu de ces extractions incomplètes et tardives et de la disponibilité d'une base de données supplémentaire dans le bassin de la Loire (67 stations avec données horaires pendant la période estivale 2000-2006, hydrologie issue du projet de recherche ICC-HYDROQUAL, lien vers le site de l'établissement public Loire), nous avons restreint le travail au bassin de la Loire.

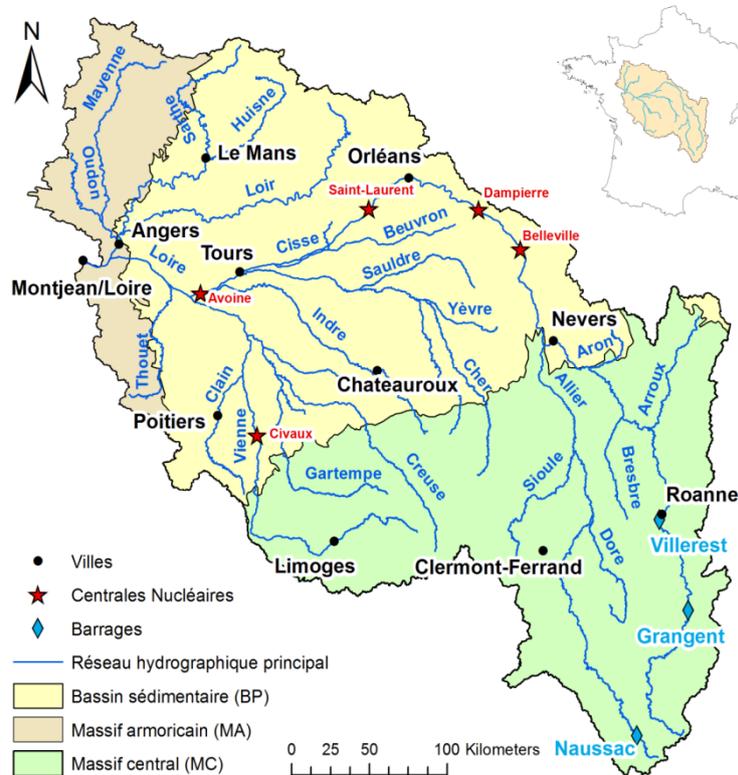


**Figure 3. Nombre de mesures horaires de température du RNT, récupérées lors de l'extraction faite par l'ONEMA le 24/10/2013)**

### 3.1. Présentation du bassin de la Loire

Le bassin versant de la Loire (117 000 km<sup>2</sup>) est caractérisé par une variabilité lithologique, climatique et hydrologique importante tout en ayant des pressions anthropiques plus faibles par comparaison à d'autres bassins fluviaux français (Rhône, Seine). Le Massif central, en amont du bassin, bénéficie d'un climat de transition entre régime océanique et continental et les cours d'eau situés en altitude peuvent avoir des influences nivales. La partie située plus en aval, dans le bassin sédimentaire, bénéficie d'un climat d'influence océanique. Les cours d'eau situés dans la plaine sédimentaire, sont marqués par des comportements thermiques et hydrologiques contrastés. Par exemple, alors que les eaux de la Loire dépassaient 30°C à Montjean-sur-Loire (49) début août 2003 (Maine-et-Loire), les températures maximales observées sur certains petits cours d'eau (e.g., la Creuse à Saint-Gaultier, dans l'Indre) n'ont pas excédé 20°C (Moatar *et al.*, 2010). Sur une grande partie de la plaine sédimentaire, les rivières sont en relation avec des systèmes aquifères. Ces apports ou pertes souterrains contribuent ainsi à leur débit mais modifient également leur comportement thermique. Ainsi, le régime thermique de la Loire Moyenne entre Orléans et Blois est sensiblement modifié par les apports d'eaux souterraines provenant de l'aquifère des calcaires de Beauce (-1 à 2°C pendant l'étiage en aout ; Moatar et Gailhard, 2006).

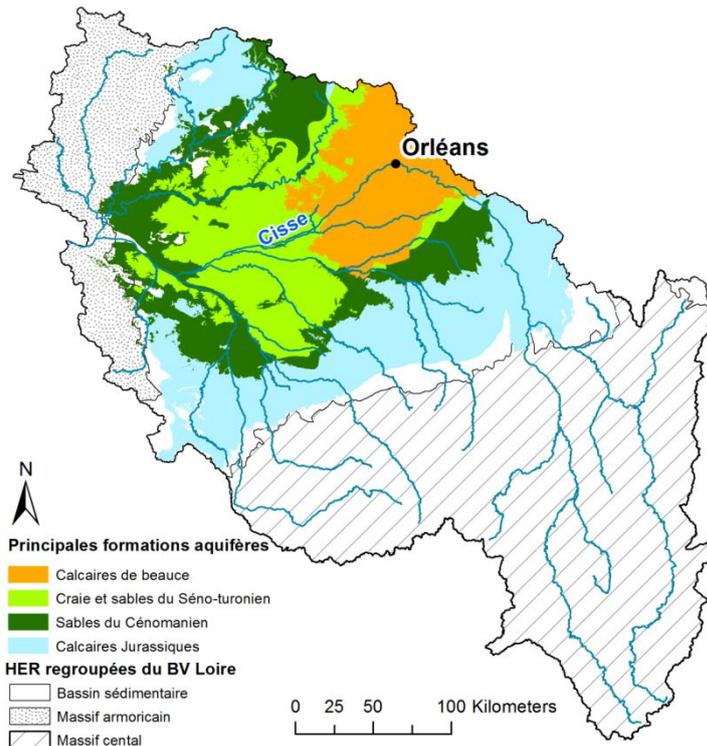
La température atmosphérique moyenne annuelle issue des données de ré-analyse SAFRAN (1985-2012 ; Météofrance) du bassin de la Loire est de 10,8°C. Le Massif central est marqué par une température médiane de 10,2°C alors que le Massif armoricain et le bassin sédimentaire bénéficient d'une température médiane plus chaude et de 11,5°C.



**Figure 4. Bassin versant de la Loire avec ses 3 grands ensembles. Représentation du réseau hydrographique principal et localisation des villes, des barrages et des centrales nucléaires.**

Les principaux aquifères se retrouvent dans les formations sédimentaires du bassin parisien (BP) correspondant à la Loire moyenne (Figure 4). Ainsi on retrouve les formations de Beauce composées de nombreux aquifères semi-perméables qui couvrent une surface de 12 700 km<sup>2</sup> (Martin *et al.*, 1999) ayant de nombreuses résurgences au Nord de la Loire et en aval d'Orléans. Cet aquifère est drainé par différents cours d'eau tels que la Loire ou le Loir (BRGM, 2012). Certaines rivières, comme la Conie sont essentiellement alimentées par cet aquifère et leur débit dépend du niveau de la nappe de Beauce (BRGM, 2012). La série du Sénonien et du Turonien est représentée par une puissante assise de craie qui affleure très largement sur tout le pourtour Sud et Ouest du bassin sédimentaire. L'aquifère du Sénonien au Turonien (30 000 km<sup>2</sup>) peut avoir une activité importante aux affleurements dans les grandes vallées de Touraine. Dans certains secteurs il peut y avoir de véritables réseaux karstiques, comme près de la Cisse (BRGM, 2010).

Les sables du Cénomaniens s'étendent sur une large partie du bassin au sud-ouest d'Orléans. Ils affleurent en un arc fin en limite occidentale du bassin sédimentaire et au Sud. Partout ailleurs, elle est recouverte par la formation de la Craie séno-turonienne. L'épaisseur de ces sables est de plus de 30 m aux affleurements à l'Ouest. La nappe du Cénomaniens s'étend sur une superficie d'environ 29 000 km<sup>2</sup> et constitue une réserve stratégique pour l'alimentation en eau potable dans le bassin Loire-Bretagne. Enfin les calcaires du Jurassique constituent un autre aquifère affleurant dans le bassin de la Loire. Ces formations du Jurassique affleurent au sud du bassin parisien, s'appuyant sur le socle du Massif Central et formant une série d'arcs (18 000 km<sup>2</sup>). Ces formations plongent vers le nord ou le nord-ouest (Martin, 2005). Une partie de ces formations constitue des réservoirs aquifères.



**Figure 5. Principales formations aquifères du bassin de la Loire (source BD LISA – BRGM)**

Le débit de la Loire est partiellement régulé par deux principaux barrages : le barrage de Villerest (capacité de 253 Mm<sup>3</sup>) sur la Loire et le barrage de Naussac (capacité de 190 Mm<sup>3</sup>) sur l'Allier (Figure 4). Le barrage de Naussac a pour but principal d'assurer un débit minimal de l'Allier à Vieille Brioude (6 m<sup>3</sup>/s) et à Vic le comte (15 m<sup>3</sup>/s). Ces deux barrages contribuent à soutenir le débit d'étiage de la Loire à Gien (point kilométrique amont = 562 km) à 60 m<sup>3</sup>/s. Le barrage de Villerest a également pour vocation d'écrêter des crues entrant dans la retenue à partir de 1 000 m<sup>3</sup>/s sur la Loire. Par ailleurs, d'autres retenues sont présentes dans le bassin de la Loire, notamment pour la production d'électricité et gérées par EDF (Grangent en Loire Amont).

Quatre centrales nucléaires ont été implantées en Loire moyenne au niveau des communes de Belleville (point kilométrique amont : 533 km), Dampierre-en-Burly (pk amont : 572 km), Saint-Laurent-Nouan (pk amont : 670 km) et, juste à l'aval de la confluence avec l'Indre et en amont de la Vienne, à Avoine (pk amont : 800 km). Une cinquième centrale est présente sur la Vienne, au niveau de la commune de Civaux. Ces centrales nucléaires sont à l'origine de rejets thermiques après refroidissement par passage dans des aéroréfrigérants permettant une évacuation partielle des calories dans l'atmosphère. Les rejets thermiques des centrales nucléaires sur la Loire conduisent à une élévation de la température entre l'amont et l'aval du rejet relativement faible : par exemple, 90% du temps, l'augmentation de la température journalière après le CNPE de Dampierre est inférieure à 0,3°C (médiane 0,1°C). Cette augmentation est ainsi de seconde importance devant les tendances de réchauffement liées à la l'augmentation de la température de l'air et à la diminution des débits d'étiage, période 1980-2003 (Moatar, Gailhard, 2006).

### **3.2. Présentation des chroniques de température disponibles**

Deux jeux de données de température horaires ont été utilisés après avoir été validés et critiqués. Le premier comprend 67 stations qui couvrent la période estivale entre 2000 et 2006. Il sera nommé par la suite « stations période estivale, 2000-2006 ». Le second comprend 128 stations issues du Réseau National de Température (RNT) entre 2008 et 2012. Il sera nommé par la suite « stations période annuelle, 2008-2012 » car les données sont complètes sur plusieurs années hydrologiques. La Figure 6 présente ces deux groupes de stations. Il y a 38 « stations période annuelle » qui coïncident avec les « stations période estivale ».

Pour les stations RNT, nous avons affecté un code à chaque station. Ce code est composé du numéro de département dans lequel est situé la station, de 3 lettres pour le nom du cours d'eau et d'un numéro d'ordre lorsque plusieurs stations sont disponibles pour un même cours d'eau. Par exemple pour la station de la Vienne à Saint-Sétiers en Corrèze (19) qui est située la plus en amont sur ce cours d'eau, le code sera « 19VIE01 ». La station de la Vienne à l'île Bouchard située juste en mont de la confluence avec la Loire (6<sup>ème</sup> station disponible sur la Vienne) aura le code 37VIE06. La localisation (Figure 6) ainsi que les caractéristiques de chaque station et leurs périodes de suivi sont présentées dans l'Annexe 1.

La répartition géographique des stations ayant des mesures en période estivale (2000-2006) n'est pas homogène car seulement 7 stations sont localisées dans l'hydro-écorégion du Massif Central (1 station/6500 km<sup>2</sup>) et 9 (1 station/1200 km<sup>2</sup>) dans le Massif armoricain contre 40 stations réparties dans le bassin sédimentaire (1 station/1300 km<sup>2</sup>). Les stations RNT ayant des mesures en période annuelle sont mieux réparties sur l'ensemble du bassin de la Loire avec 63 stations dans le Massif central (1 station/730 km<sup>2</sup>), 53 stations dans le bassin sédimentaire (1 station/1000 km<sup>2</sup>) et 12 stations dans le massif armoricain (1 station/930 km<sup>2</sup>).



**Figure 6. Localisation des stations de mesures de la température de l'eau et de leur répartition géographique pour les trois grands ensembles.**

### 3.2.1. Critique des données et validation

Les enregistrements des températures provenant de ces deux jeux de données présentent certaines anomalies. Trois défauts majeurs ont pu être détectés suite à l'analyse des chroniques :

- Des défauts d'enregistrement
- Des défauts dus à l'exondement d'une sonde ou affleurement à l'interface air-eau
- Des défauts dus à un enfouissement de la sonde

Le développement d'un système automatisé permettant d'identifier l'ensemble de ces défauts reste complexe à mettre en œuvre du fait de la forte variabilité des facteurs entrant en jeu (Moatar *et al.*, 2001). La détection de ces défauts a donc été réalisée ici manuellement en comparant les chroniques de température de l'eau de stations proches géographiquement situées sur des cours d'eau de taille similaire ou en comparant la chronique de température de l'eau d'une station avec la température de l'air provenant de la base SAFRAN.

Les **défauts d'enregistrement** provoquent des erreurs lors de la pose de la sonde ou durant le suivi des températures. Les pics de débuts d'enregistrement sont récurrents sur l'ensemble des stations et le début de la chronique peut ainsi être corrigé sur plusieurs jours à cause du temps de calibration de la sonde. De plus, des erreurs commises lors de la saisie initiale ont provoqué une duplication des données qui indique alors pour une même heure deux températures (Figure 7). On observe également des températures enregistrées qui semblent aberrantes car supérieures à plus de 35°C au printemps avec une amplitude journalière bien supérieure à celle de l'air (Figure 7).

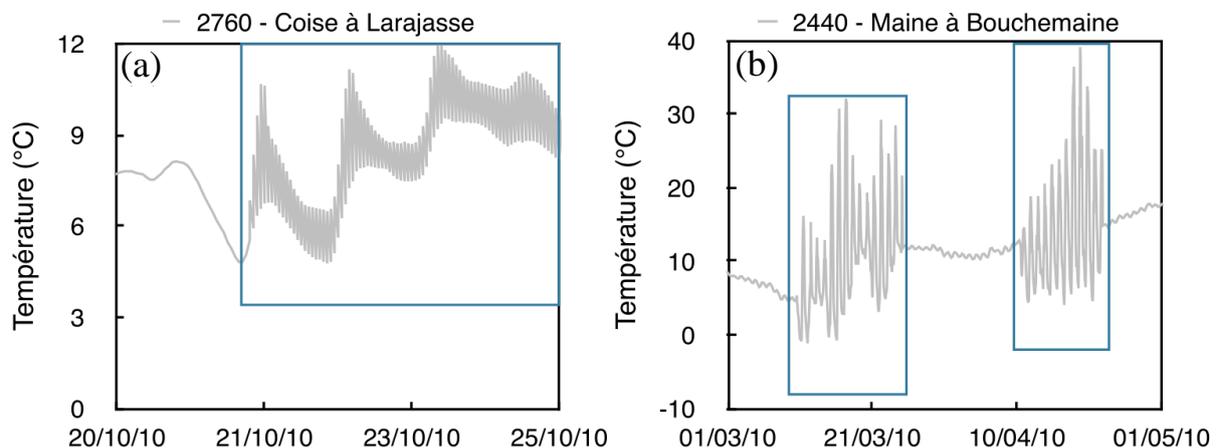


Figure 7. Mise en évidence de défauts d'enregistrement sur les chroniques de température : (a) dédoublement horaire des valeurs, 69COI01 – (b) enregistrement de valeurs aberrantes, 49MAI01

L'**exondement d'une sonde** se repère par une augmentation très rapide des amplitudes journalières pouvant excéder 7°C. Afin de valider l'hypothèse d'un exondement, la chronique de température de l'eau est comparée avec celle de la température de l'air. La sonde peut être exondée sur une période de plusieurs jours où l'on observe une superposition des deux chroniques (eau et air) (Figure 8). Les exondements de sonde peuvent provenir d'un abaissement du niveau de l'eau (période de gel ou d'étiage) (Figure 8), mais aussi parfois d'un acte humain, par un relèvement volontaire ou non de la sonde.

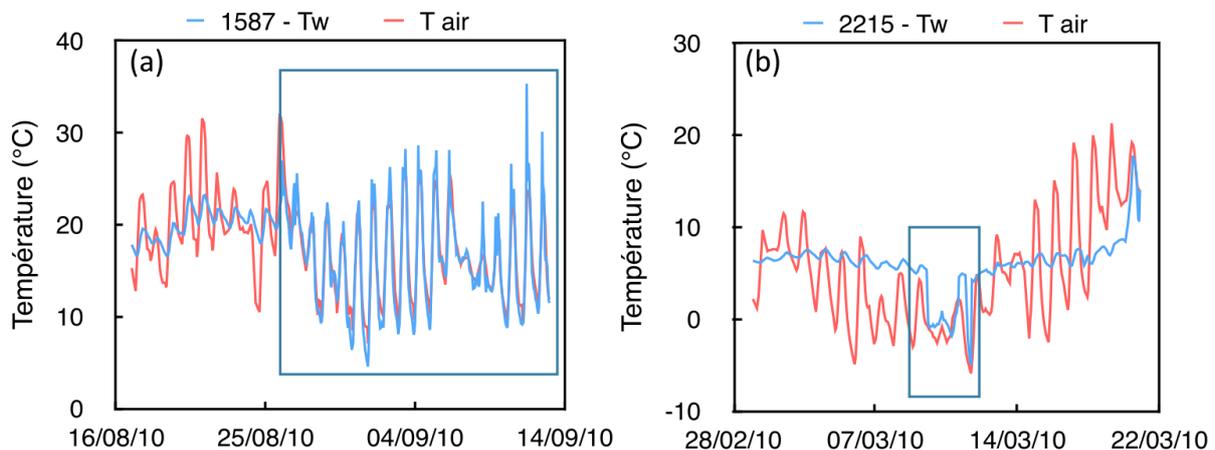


Figure 8. Mise en évidence d'exondement : (a) Besbre à Dompierre sur la période estivale – (b) Creuse à Rivarennes durant une période froide

Le dernier type de défaut correspond à un **enfouissement de la sonde**. Il est caractérisé par un enregistrement de signaux très peu variables. Celui-ci est plus difficile à discerner et moins fréquent.

La critique des données des stations issues du jeu de données « période estivale » avait été effectuée au cours du projet ICC-HYDROQUAL (Bustillo *et al*, 2011). Il y avait alors 27% de valeurs qui avaient été éliminées pour les 67 stations entre 2000 et 2006 (environ 1 300 000 données horaires).

La base de données initiale du jeu de données « période annuelle » contenait 3,310 millions de valeurs de température pour l'ensemble des stations, sur la période 2008 - 2012. Sur cette base de données, 100 000 valeurs ont été éliminées car considérées comme aberrantes. Cela représente environ 2,3% des données initiales ce qui reste faible en comparaison au pourcentage de valeurs éliminées sur le jeu de données « période annuelle ». Cela peut s'expliquer par une meilleure gestion du réseau (identification des périodes de relèves automatiques, sondes plus performantes). Les principales erreurs proviennent avant tout des défauts d'enregistrement (>75% des corrections). Les exondements représentent environs 20 à 25% des corrections tandis que les enfouissements sont très peu présents (<1%). La disparité des corrections entre les stations est cependant élevée et le taux de correction peut être très important (>10%) sur certaines stations (Tableau 1). Il s'agit ici de stations touchées avant tout par des défauts d'enregistrement ce qui provoque le retrait de plusieurs jours voir de mois de mesures sur l'ensemble d'une chronique. Cependant le taux de valeurs éliminées moyen par région reste inférieur à 4 % permettant ainsi d'avoir un jeu de données conséquent et représentatif de l'ensemble du bassin de la Loire.

Région	Nombre de stations	% de stations sans erreur	% erreur moyen	% erreur max
Auvergne	35	42.9	3.5	56.0
Limousin	26	69.2	3.6	43.7
Centre	32	18.8	2.5	24.0
Poitou-Charentes	12	8.3	2.1	11.1
Bourgogne	16	93.8	0.0	0.4
Pays de la Loire	26	0.0	3.2	14.0

**Tableau 1. Présentation des pourcentages de valeurs éliminées sur les stations en fonction des régions dans lesquelles elles sont situées.**

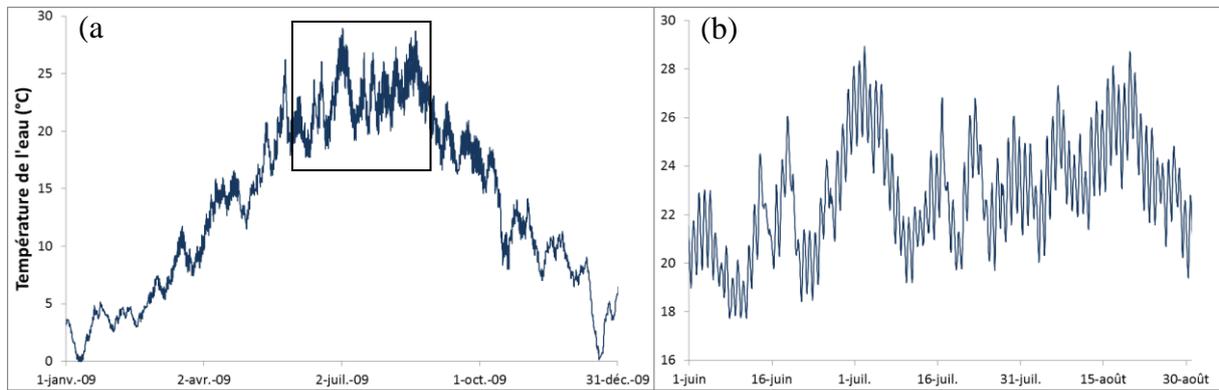
### 3.2.2. Jeu de données « stations période estivale 2000-2006 »

Ce jeu de données fournit des températures au pas de temps horaire pour 67 stations pendant la période estivale (juin à septembre) et provient des fédérations de pêche (59 stations) et de la DREAL Auvergne (8 stations). Les données couvrent une période de suivi comprise entre 2000 à 2006.

L'aire de drainage au niveau des stations varie entre 18 km<sup>2</sup> et 110 000 km<sup>2</sup> (valeur médiane de 197 km<sup>2</sup>). Cependant, la majorité des stations (63%, 42 stations) couvre des aires de drainage entre 50 et 2 000 km<sup>2</sup> et des ordres de Strahler 3, 4 et 5, représentant respectivement 13%, 42% et 19% des stations. Les petits cours d'eau (aire de drainage < à 50 km<sup>2</sup>) sont très peu représentés avec seulement trois stations sur des ordres 2 et deux stations sur des ordres 1 alors que ces ordres représentent plus de 70% des cours du bassin de la Loire. 13 stations concernent la Loire et ses principaux affluents : la Loire Moyenne et Aval (4 stations), le Cher (2 stations), l'Indre (2 stations), la Vienne (2 stations) et la Mayenne (1 station). Cependant ces stations sont disposées dans les secteurs aval de ces cours d'eau et la température des secteurs amont reste assez peu présente dans cette base de données.

### 3.2.3. Jeu de données RNT « stations période annuelle 2008-2012 »

La base de données du RNT du bassin de la Loire comportait initialement 147 stations. Après l'étape de critique et validation des chroniques, **128 stations** ont été conservées, 19 stations étant écartées car plus de 15% des valeurs étaient manquantes au cours d'une même année hydrologique. Ces chroniques horaires couvrent la période 2008-2012.



**Figure 9. Chronique horaire de la température de l'eau mesurée au niveau de la Loire à Saint-Satur au cours de l'année 2009 : (a) chronique annuelle et (b) chronique estivale**

Les cours d'eau suivis ont des aires de drainage comprises entre 6 km<sup>2</sup> et 110 000 km<sup>2</sup> avec une médiane à 290 km<sup>2</sup>. Ces stations sont réparties essentiellement sur des cours d'eau moyens avec 89 stations ayant une surface de drainage comprise entre 50 et 2 000 km<sup>2</sup> et dont les ordres de Strahler sont compris entre 3 et 5, représentant 80% des cours d'eau suivis. Les cours d'eau en tête de bassin ne sont que peu représentés avec seulement 3 stations ayant une aire de drainage inférieure à 20 km<sup>2</sup> et aucune station située sur un cours d'eau d'ordre 1. La pente médiane des cours d'eau au niveau de la station est de 2 m/km (min= 0,01, max = 30 m/km). Les altitudes au niveau des stations sont comprises entre 10 et 1120 mètres avec une médiane de 176 m. 70% des stations ont une altitude inférieure à 300 m ce qui est représentatif des cours d'eau situés dans la plaine du bassin sédimentaire. En effet seulement 32 stations ont une altitude supérieure à 300 m ce qui implique un suivi moins représentatif des cours d'eau situés en amont du Massif central.

Concernant la Loire et ses grands affluents, ce jeu de données couvrent 21 stations : la Loire Moyenne et Aval (6 stations), le Cher (3 stations), l'Indre (1 stations), la Vienne (6 stations), le Loir (3 stations) et la Mayenne (2 station). La Loire et la Vienne sont donc les cours d'eau les plus suivis avec 6 stations localisées sur les 890 km et 400 km de linéaire respectif depuis leur source. Le secteur amont de la Vienne est mieux assuré avec une station située à 8 km depuis sa source. Le secteur de la Loire amont reste peu suivi avec une première station située à 343 km de sa source. L'Allier est le seul affluent majeur de la Loire dont le suivi n'est pas assuré par le réseau RNT.

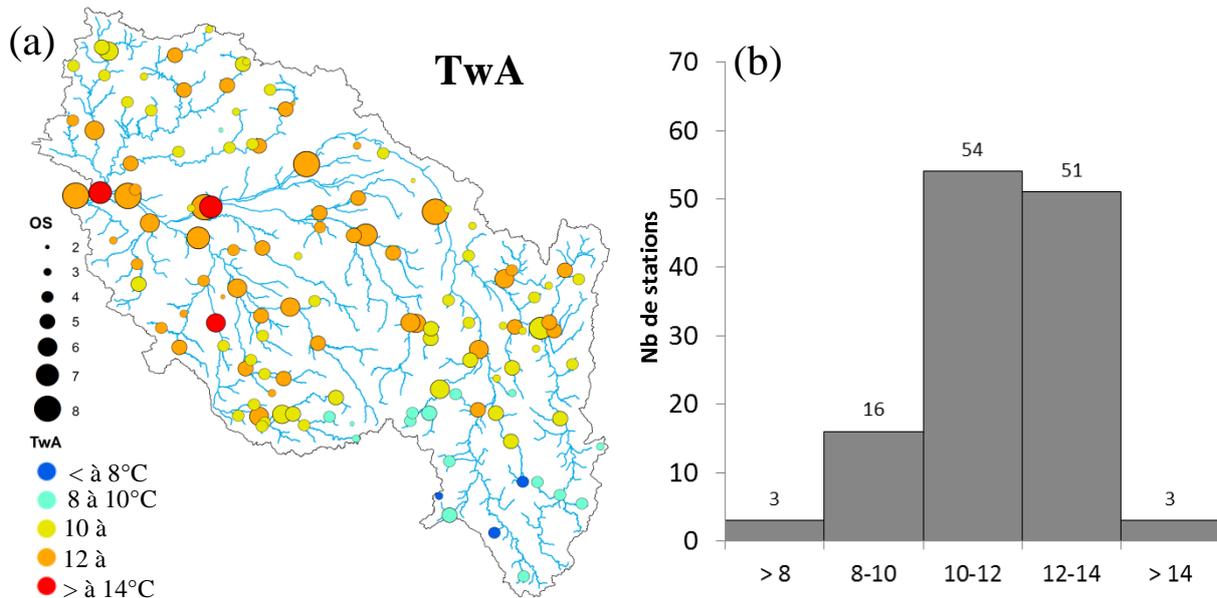
## 4. Classification des stations par facteur de contrôle

### 4.1. Variabilité spatio-temporelle dans le bassin de la Loire

L'analyse de la variabilité spatio-temporelle de la température de l'eau est effectuée à partir des 128 stations issues du réseau RNT et de plusieurs métriques calculées sur 4 années hydrologiques au mieux (période entre 1/10/2008 et 31/09/2012).

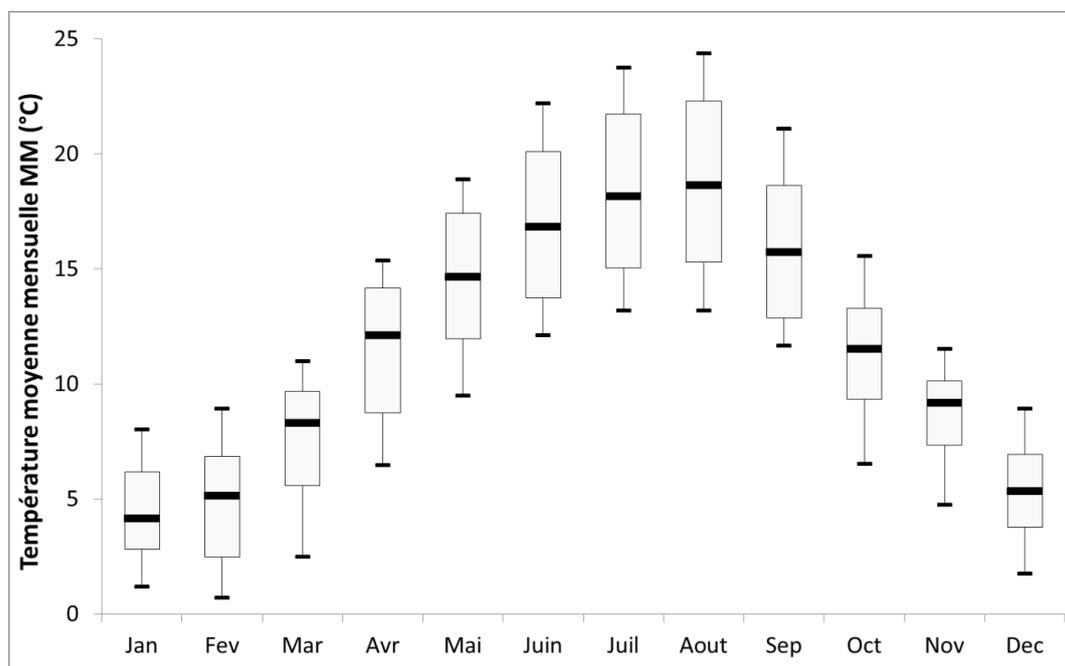
#### 4.1.1. Moyennes annuelles et saisonnières

La moyenne annuelle (TwA) des températures de l'eau (2008-2012) est comprise entre 10°C et 14°C pour 80% des stations du bassin de la Loire (médiane = 11,7°C ; min = 7,8°C (15ALL01) ; max = 14,4°C (86VIE05)). Les cours d'eau situés à l'amont du bassin, dans le Massif-central ont une TwA inférieure à 10°C (Figure 10) tandis que dans le bassin sédimentaire, la TwA dépasse 14°C sur les grands cours d'eau (Ordre de Strahler > 6). C'est dans le bassin sédimentaire que l'on retrouve une majorité des stations ayant une TwA supérieure à 12°C.



**Figure 10. Représentation spatiale des températures moyennes annuelles de l'eau (TWA) sur le bassin de la Loire (a) et histogramme de distribution (b).**

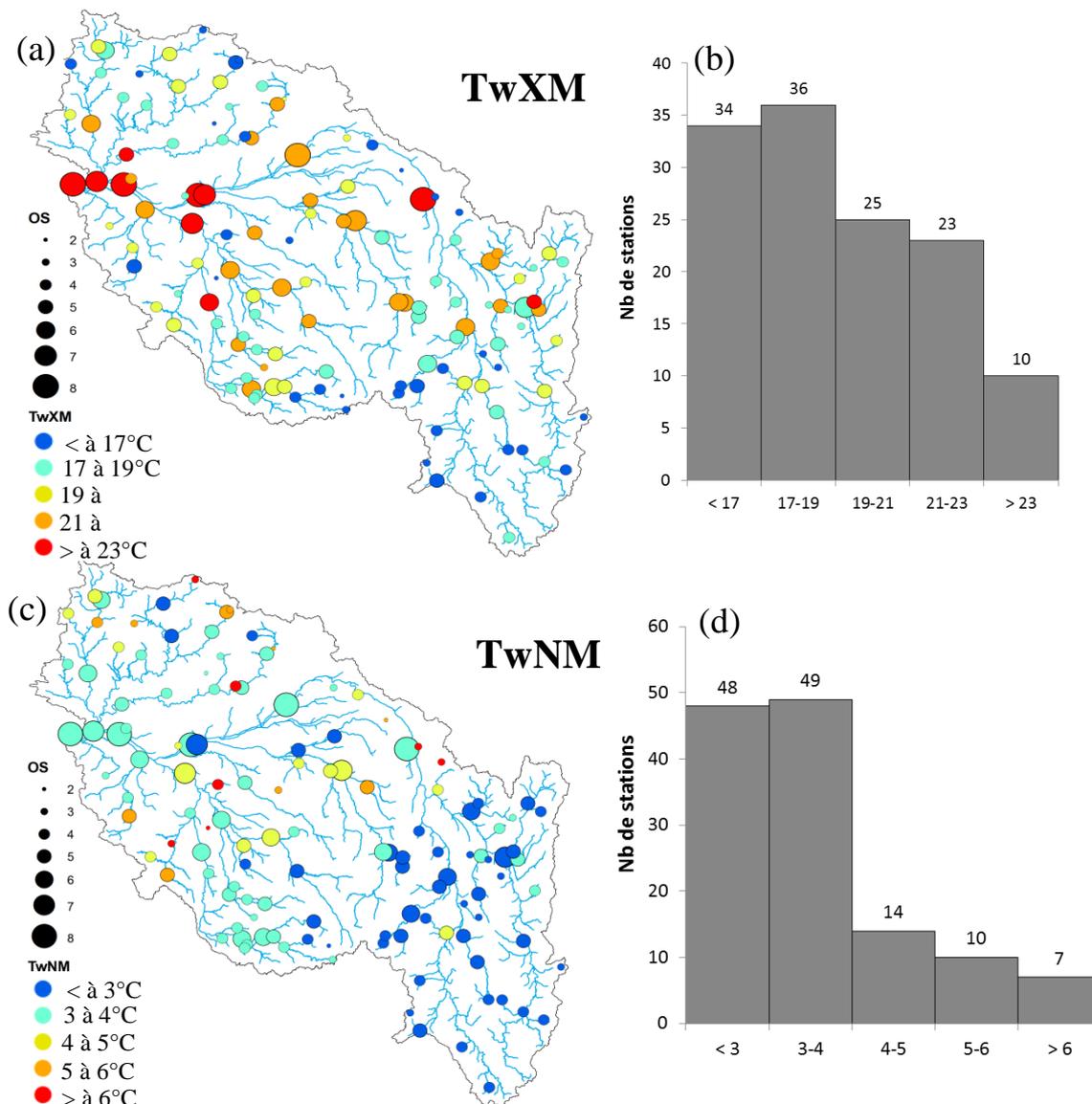
L'évolution de la température moyenne mensuelle (TwM) sur les 128 stations, suit un cycle saisonnier avec les plus fortes températures observées en juillet (35% de stations) ou août (65% de stations) et les plus froides observées en janvier (56% de stations) et février (33% de stations) (Figure 11). La variabilité de TwM inter-station est plus importante en période estivale où l'on constate des différences de TwM entre les stations pouvant être supérieures à 11°C en Août alors que la variabilité de TwM inter-station est plus réduite en janvier et les différences entre stations n'excèdent pas 6.8°C.



**Figure 11. Evolution des températures moyennes mensuelles au cours de l'année sur la période 2008-2012**

Les plus fortes températures mensuelles du mois le plus chaud (TwXM) sont principalement observées pour la Loire moyenne et aval et ses principaux affluents situés dans le bassin sédimentaire avec des valeurs dépassant 23°C (Figure 12). Les TwXM les plus faibles sont observées sur les petits et moyens cours d'eau (ordre < 4) répartis sur l'ensemble du bassin. La valeur médiane de TwXM est de 18,9°C (Figure 123). Des contrastes importants sont observés entre des stations avec une TwXM comprise entre 14°C (19VIE01) et 24,4°C (37CHE06).

Les valeurs les plus basses des températures mensuelles au mois le plus froid (TwNM) se situent principalement en amont du bassin de la Loire (ordre de Strahler compris entre 1 et 5 ; Figure 12). A l'inverse des TwXM, toutes les TwNM supérieures à 6°C sont mesurées sur des cours d'eau d'ordre de Strahler compris entre 2 et 4 et localisés dans le bassin sédimentaire, probablement sous influence des eaux souterraines. Les TwNM sont plus homogènes avec une valeur médiane de 3.4°C et 75% des valeurs inférieures à 4°C. Cependant des différences inter-stations de TwNM sont bien marquées et comprises entre 0,1°C (63DOR01) et 7,5°C (37ESV01).

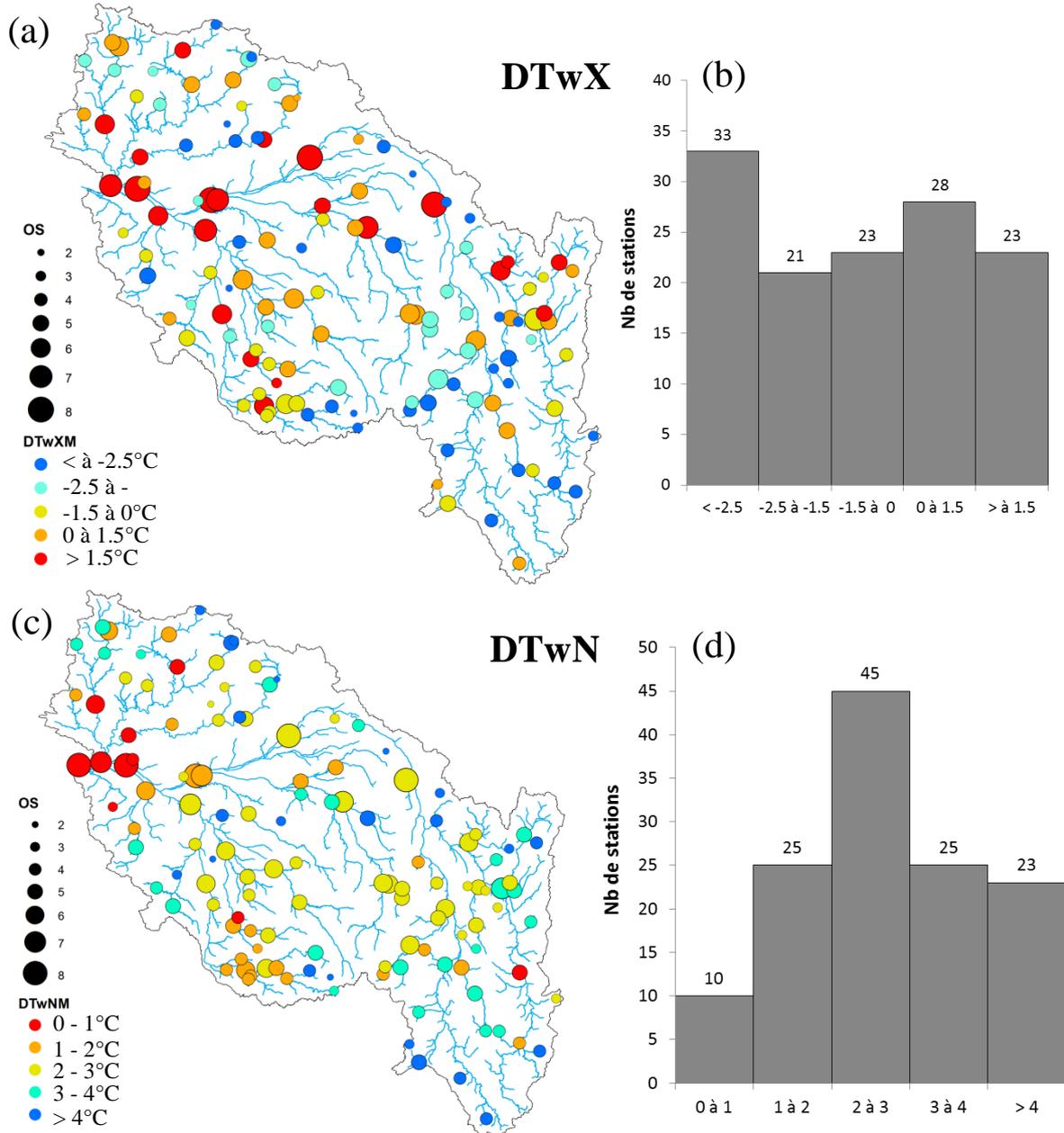


**Figure 12. Représentation spatiale des températures de l'eau mensuelles au mois le plus chaud (TwXM) et au mois le plus froid (TwNM) sur le bassin de la Loire (a et c) et histogramme de distribution associé à ces deux métriques (b et d).**

#### 4.1.2. Différences de températures saisonnières eau - air

Au mois le plus chaud, la différence de température entre l'eau et l'air est très variable entre les stations avec une température de l'eau supérieure à celle de l'air pour 51 stations alors que 77 stations ont une TwXM supérieure à celle de l'air (valeur médiane = -0,9°C, min = -5,6°C, max = 4,1°C) (Figure 13b). Les stations où la TwXM de l'eau est supérieure à plus de 1,5°C de celle de l'air sont localisées en majorité sur les grands cours d'eau du bassin sédimentaire qui ont une forte inertie thermique (Figure 13b). A l'inverse les stations où la TwXM de l'eau est inférieure à plus de 2,5°C à celle de l'air sont localisées sur de petits et moyens cours d'eau (ordre de Strahler < 4) et sont à la fois réparties dans le Massif central et dans le bassin parisien traduisant potentiellement une influence des apports d'eaux souterraines pour ces dernières. La TwNM de l'eau est supérieures à celle de l'air sur l'ensemble des stations (valeur médiane = 2,6°C, min = 0,3°C, max = 6,8°C) (Figure

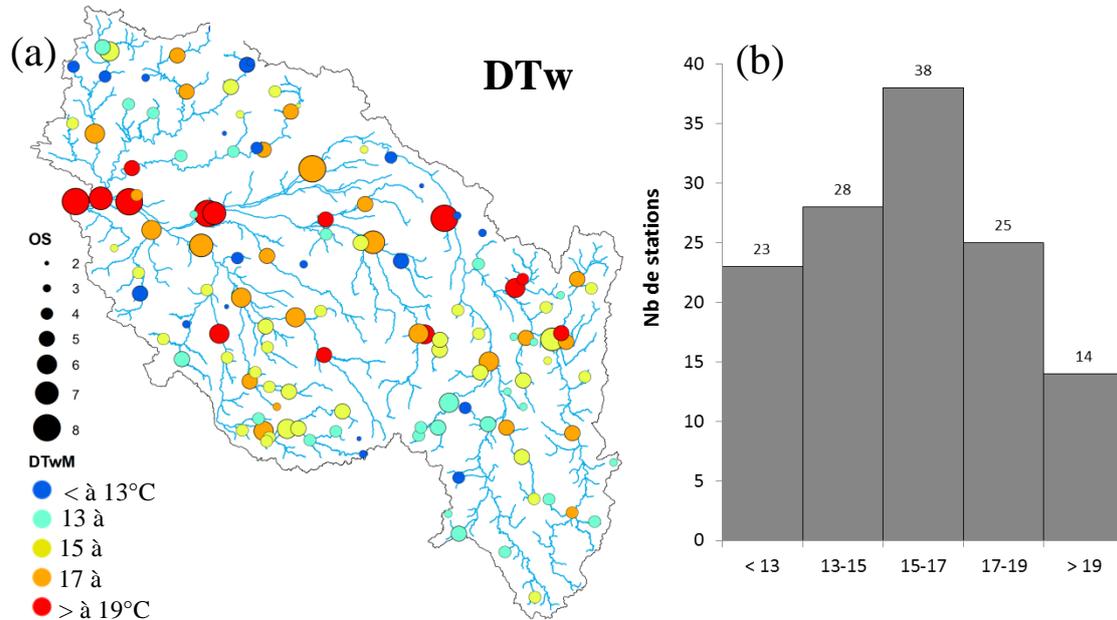
13d). Les stations où les écarts sont les plus importants, sont situées dans la zone amont du Massif central où l'altitude est la plus élevée ( $TwNM$  de l'air < 0), ou dans le bassin parisien pouvant s'expliquer par de probables apports d'eau souterraines (Figure 13c).



**Figure 13. Représentation spatiale des différences de températures entre l'eau et l'air mensuelles au mois le plus chaud ( $DTwXM = TwXM_{eau} - TwXM_{air}$ ) et au mois le plus froid ( $DTwNM = TwNM_{eau} - TwNM_{air}$ ) sur le bassin de la Loire (a et c) et histogramme de distribution associé à ces deux métriques (b et d).**

#### 4.1.3. Amplitudes annuelles

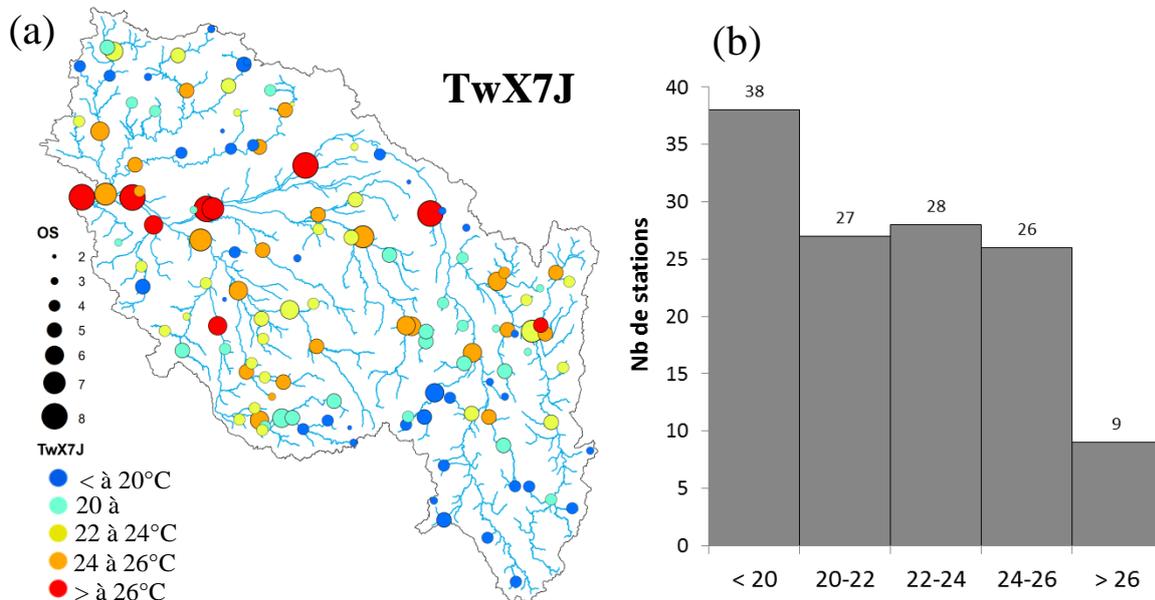
L'amplitude annuelle des températures entre le mois le plus chaud et le mois le plus froid ( $DTwM$ ) est assez contrastée et comprise entre 13 et 19°C pour 70% des stations (valeur médiane = 15.6°C, min = 8.4°C, max = 21.4°C). Les  $DTwM$  les plus élevées sont localisées sur les grands cours d'eau, d'ordre supérieur à 6, où l'amplitude annuelle de la température de l'eau a tendance à se rapprocher de celle de la température de l'air (Figure 14a). Les  $DTwM$  les plus faibles sont observées sur des petits et moyens cours d'eau répartis sur l'ensemble du bassin.



**Figure 14. Représentation spatiale l'amplitude annuelle de la température de l'eau entre le mois le plus froid et le mois le plus chaud (DT<sub>w</sub>) sur le bassin de la Loire (a) et histogramme de distribution (b).**

#### 4.1.4. Valeurs maximales sur 7 jours

Le maximum de la moyenne glissante sur 7 jours (TwX7J) constitue un bon indicateur des pics de chaleur. Les valeurs maximales de TwX7J se retrouvent en période estivale sur les grands cours d'eau situés dans le bassin sédimentaire (Figure 15a). Il existe une grande disparité entre les stations où TwX7J est comprises entre 15,1°C (61COR01) et 27°C (37CHE06). Les valeurs les plus faibles sont observées sur des petits et moyens cours d'eau qui sont réparties sur l'ensemble du bassin. La médiane de ces valeurs extrêmes est de 22°C (Figure 15b).



**Figure 15. Représentation spatiale des températures moyennes maximales sur 7 jours (TwX7J) sur le bassin de la Loire (a) et histogramme de distribution (b).**

#### 4.1.5. Variations diurnes

Les variations diurnes moyennes pendant le mois le plus chaud (DTw24H) sont comprises entre 1 et 3°C pour 80% des stations (médiane = 2,2°C) (Figure 16b). Les plus faibles DTw24H (< à 1°C) sont situées dans le bassin sédimentaire et concernent des cours d'eau de tailles différentes probablement influencés par les apports d'eaux souterraines ou par l'ombrage (Figure 16a). Des disparités importantes de DTw24H sont observées entre les stations avec des valeurs comprises entre 0,6°C (86CLA01) et 8,3°C (15ALL01).

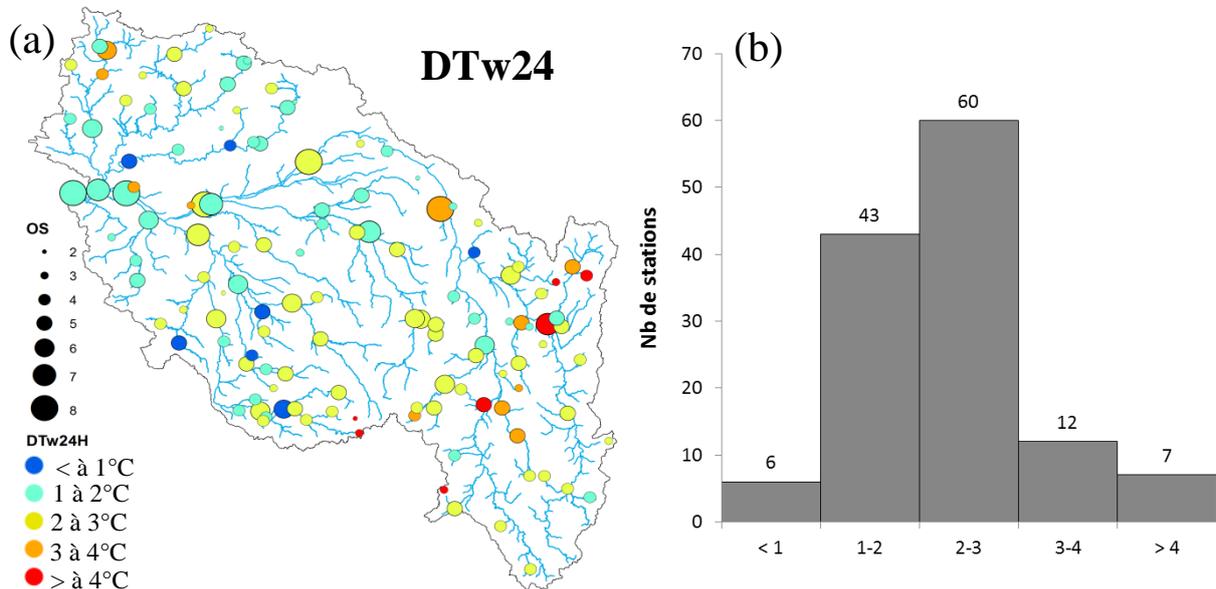


Figure 16. Représentation spatiale des variations diurnes moyennes pendant le mois le plus chaud (DTw24H) sur le bassin de la Loire (a) et histogramme de distribution (b).

#### 4.1.6. Evolution longitudinale des valeurs maximales sur 7 jours

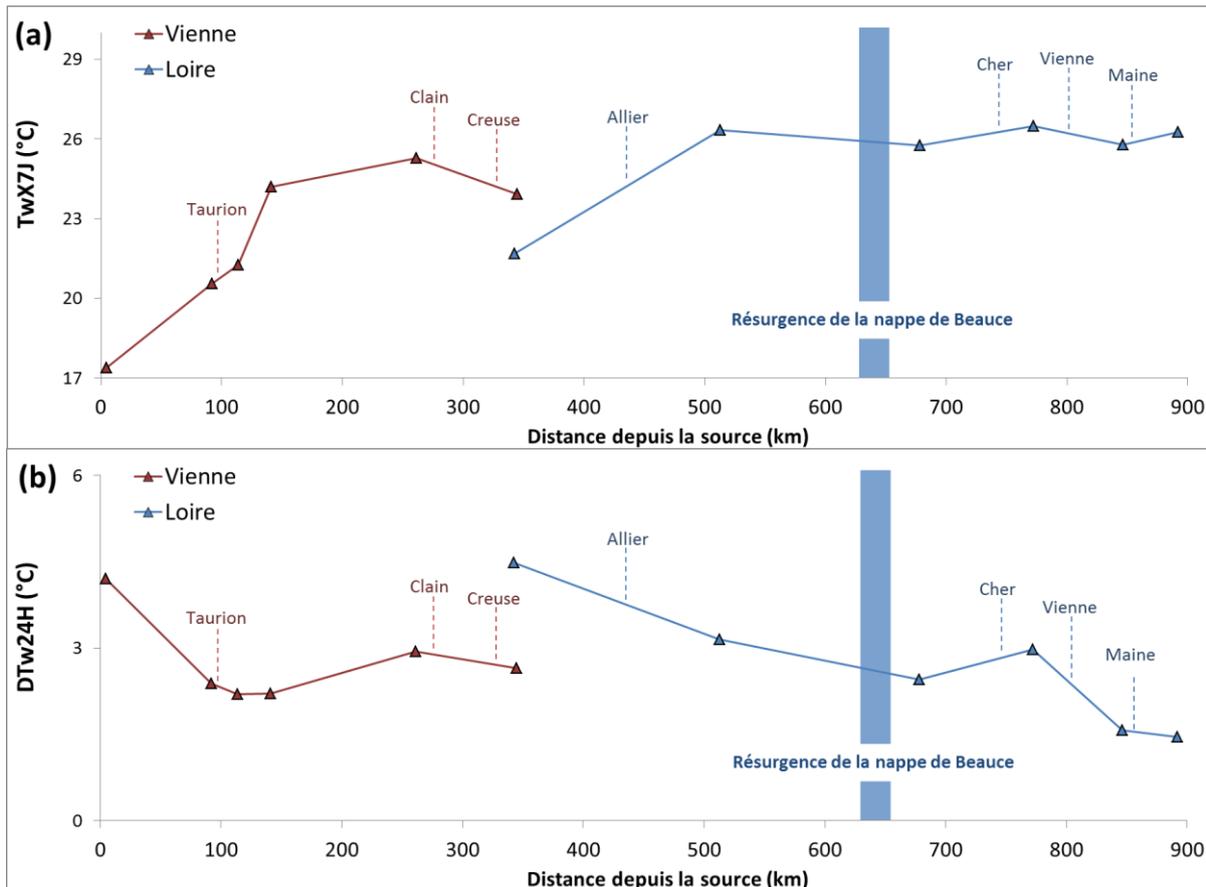
L'évolution de la température hebdomadaire maximale (TwX7J) a pu être étudiée sur la Loire et la Vienne où 6 stations sont disponibles avec suffisamment de données (Figure 17). Cette métrique a été choisie car elle présente un gradient longitudinal important. La température maximale a tendance à augmenter avec la distance à la source. Ceci peut s'expliquer par le fait que le contrôle du régime thermique par les conditions amont diminue quand on s'éloigne de la source. Plus cette distance augmente et plus la température est influencée par les conditions atmosphériques.

Pour la Vienne, la TwX7J est de 17,4°C à 6 km de sa source alors qu'il est de 24,2°C après 140 km soit 6,8°C de plus (Figure 17a). Caissie *et al.* (2006) expliquent que les amplitudes diurnes sont généralement faibles à proximité des sources amont. Ce n'est pas le cas sur la Vienne où l'amplitude diurne moyenne au mois le plus chaud (DTw24H) est élevée à la station la plus proche de sa source (point kilométrique amont = 4,7 km). On peut supposer qu'en période estivale la profondeur d'eau est faible et une distance de 4,7 km serait suffisante pour que l'eau s'équilibre avec les conditions atmosphériques (Figure 17b). On constate que le DTw24H amorce une décroissance après une distance depuis la source supérieure à 290 km et la confluence avec le Clain et la Creuse.

Sur la Loire on observe une augmentation de la TwX7J de 21,7°C à 340 km de sa source à 26,3°C à 500 km après le bec d'Allier. Cette augmentation pourrait être due à l'influence d'un mélange des eaux avec l'Allier suite à leur confluence (460 km depuis la source) mais la Loire amont et l'Allier traversent des bassins versants ayant des caractéristiques similaires. La morphologie de la Loire change après sa confluence avec l'Allier (Latapie, 2011) ce qui pourrait également expliquer l'augmentation de la TwX7J. On constate une augmentation de la TwX7J de 25,8°C à 26,5°C après le bec du Cher, suivi d'un refroidissement suite à la confluence avec la Vienne à 25,8°C. Enfin, suite à la confluence avec la Maine, la TwX7J augmente à 26,3°C. Sur la Vienne, les TwX7J augmentent jusqu'à 25,3°C (distance depuis la source > 250 km) puis diminuent à 23,9°C suite à la confluence avec le Clain et la Creuse. On peut donc remarquer qu'après une distance importante depuis la source, les TwX7J semblent très influencées par les apports des affluents. Cependant la température diminue de 26,3°C à 25,8°C entre 500 et 680 km depuis sa source où il n'y a aucune confluence avec un affluent majeur. Cette zone correspond au passage du fleuve dans les calcaires de la Beauce et

cette diminution pourrait ainsi être due aux apports des eaux souterraines provenant de la nappe de Beauce mis en évidence au point kilométrique 635 km d'après l'imagerie infrarouge thermique satellite Landsat (Moatar et Gaillard, 2006 ; Binet *et al.*, 2011; Lalot *et al.*, submitted). En parallèle, on constate que le DTw24H décroît entre le point kilométrique amont 340 et 680 km depuis la source. Il y a une légère augmentation après la confluence avec le Cher au pk amont 770 km. Sur l'ensemble du profil, on observe une diminution de DTw24H qui passe de 4.5°C (pk amont = 340 km) à 1.5°C (pk amont = 890 km). Caissie *et al.* (2006) ont montré que l'amplitude diurne est maximale pour des ordres 3 ou 4 puis elle diminue sur des rivières de plus grande taille car la profondeur est plus importante ce qui augmente leur inertie thermique.

Les variations d'amplitude journalière au mois le plus chaud sont plus importantes sur la Loire que sur la Vienne lors de leur confluence. L'ombrage issu de la ripisylve ou les apports d'eaux souterraines plus importants sur la Vienne peuvent expliquer ces écarts de DTw24H.



**Figure 17. Evolution longitudinale de la température hebdomadaire maximale au mois le plus chaud  $T_{wX7J}$  (a) et de l'amplitude journalière au mois le plus chaud  $DT_{w24H}$  (b) sur la Vienne et sur la Loire avec précision des confluences avec leurs principaux affluents et de la zone de résurgence de la nappe de Beauce (Lalot *et al.*, submitted).**

## 4.2. Sélection des stations par facteur de contrôle

Une méthodologie permettant de définir une typologie des stations en fonction de leurs principaux facteurs de contrôle (conditions météorologiques, alimentation par les eaux souterraines, végétation) a été établie.

Elle combine 3 étapes successives qui sont détaillées dans les paragraphes suivants :

1. une classification hiérarchique ascendante (CHA) sur la base de 4 métriques : la température mensuelle du mois le plus chaud ( $T_{wXM}$ ), la température mensuelle du mois le plus froid ( $T_{wNM}$ ), l'amplitude annuelle ( $DT_{wM} = T_{wXM} - T_{wNM}$ ), les variations diurnes moyennes pendant le mois le plus chaud ( $DT_{w24H}$ ). Cette analyse a permis de classer les stations en 3 groupes (influence atmosphérique, influence eaux souterraines, influence mixte)\*
2. une analyse des pentes et des ordonnées à l'origine des régressions entre températures de l'air et de l'eau (O'Driscoll et DeWalle, 2006) pour consolider la sélection faite à l'étape 1, et en particulier pour mieux caractériser l'influence des eaux souterraines. Les valeurs horaires

des températures  $T_w$  et  $T_a$  au niveau des 128 stations RNT sont moyennées sur 7 jours, puis une régression linéaire est effectuée :  $T_w7j = a \cdot T_a7j + b$ . Les cours d'eau à forte influence de nappe sont caractérisés par une faible pente ( $a$ ) et une ordonnée à l'origine élevée ( $b$ ). Une nouvelle régression linéaire est effectuée sur les couples ( $a$ ,  $b$ ) des 128 stations. L'ordonnée à l'origine définit la température de la nappe et donc d'un cours d'eau qui serait alimenté à 100% par les apports souterrains. A l'opposé, la station la plus contrôlée par les conditions météorologiques est définie comme étant la station ayant la plus petite ordonnée à l'origine et sa proportion d'apport de nappe est fixée à 0%. Un modèle de mélange est ensuite effectué afin de simuler la réponse des relations entre  $T_a7j$  et  $T_w7j$  en fonction de l'augmentation de la proportion des apports de nappe. Les stations définies comme étant fortement alimentées par les apports de nappe (avec une contribution au débit du cours d'eau supérieure à 30%), sont comparées à celles identifiées avec les métriques temporelles de magnitude et de rapidité de changement (étape 1). De la même manière, les stations identifiées comme étant faiblement alimentées par les nappes (contribution au débit < 15%) sont comparées à celles dont le régime thermique a été identifié comme contrôlé par les conditions atmosphériques à l'étape 1. La mise en commun des résultats de ces deux méthodes de classification conduit à établir 3 groupes de stations : un groupe d'influence atmosphérique, un groupe d'influence mixte et un groupe influencé par les apports d'eaux souterraines.

- Enfin, pour chaque groupe identifié à l'étape 2, des sous-groupes de stations sont établis en fonction de leur coefficient d'ombrage en distinguant 3 catégories : fort ombrage ( $SF > 70\%$ ), ombrage moyen ( $30\% < SF < 70\%$ ) et faible ombrage ( $SF < 30\%$ ).

#### 4.2.1. Identification des stations par classification hiérarchique

La classification ascendante hiérarchique (CAH) basée sur la distance euclidienne selon la méthode de Ward, a pu mettre en évidence trois groupes de stations. La distance intra-classe (30% de la variance) calculée est bien inférieure à la distance inter-classes représentant 70% de la variance.

Classe	Nombre de stations	$T_wXM$	$DTw24H$	$T_wNM$	$DTwM$
1	40	22.0	2.1	3.2	18.7
2	71	18.1	2.6	3.1	14.9
3	17	15.6	1.8	5.3	10.3

**Tableau 2. Barycentres des métriques calculées pour chaque classe de stations définie par CAH**

Le premier groupe de 40 stations est caractérisé par une amplitude thermique annuelle élevée ( $DTwM = 18,7^\circ C$ ) et par la température mensuelle en juillet ou août la plus forte ( $T_wXM = 22^\circ C$ ) indiquant probablement des stations sous contrôle météorologique (Tableau 2). La température mensuelle en janvier ou février est la plus faible ( $T_wNM = 3,2^\circ C$ ). Les stations représentées dans ce groupe sont localisées sur des cours d'eau importants avec 80% des stations localisées sur des rivières d'ordre supérieurs à 4 ce qui peut expliquer la plus faible amplitude diurne pendant le mois le plus chaud ( $DTw24H = 2,1^\circ C$ ).

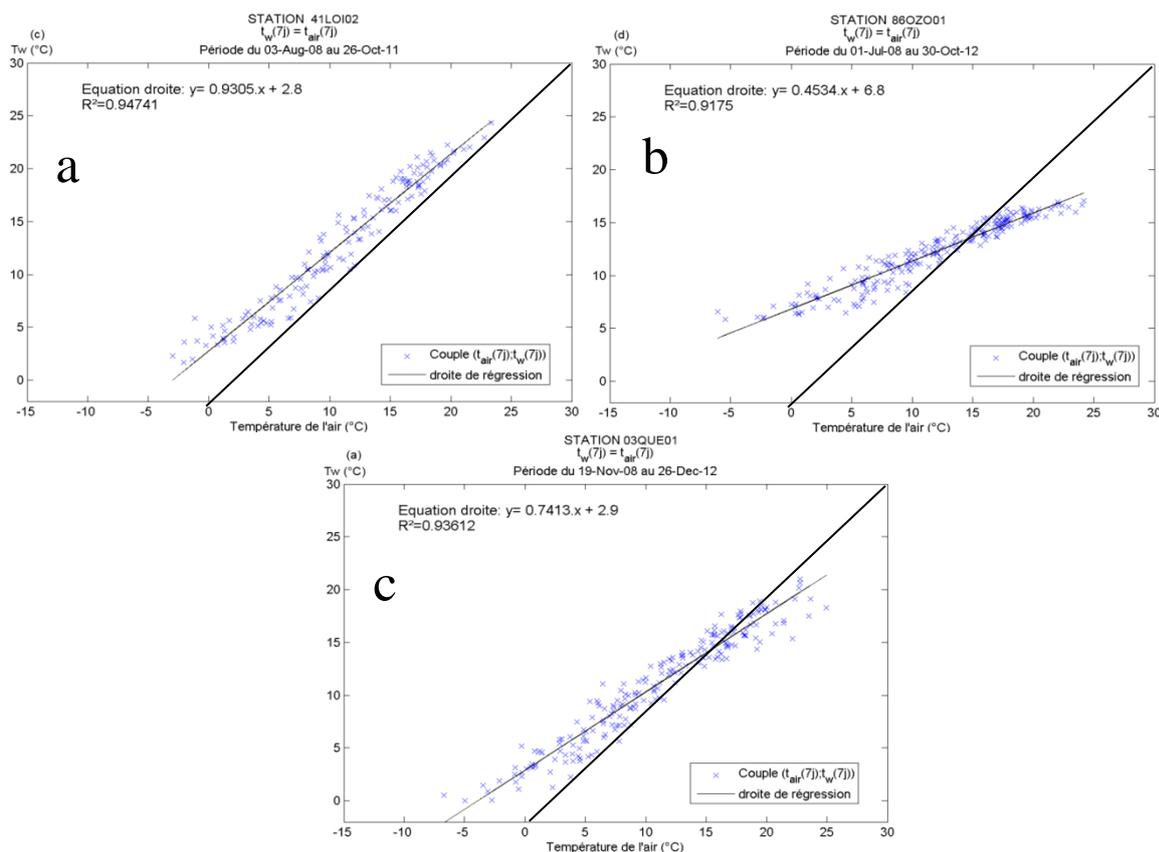
Le troisième groupe de 17 stations est caractérisé par les amplitudes thermiques annuelles et les températures mensuelles estivales les plus faibles ( $DTwM = 10,3^\circ C$  ;  $T_wXM = 15,6^\circ C$ ) (Tableau 2). Par rapport aux cours d'eau des groupes 1 et 2, la  $T_wNM$  est beaucoup plus chaude ( $5,3^\circ C$ ). Les régimes thermiques des cours d'eau avec une faible  $DTwM$  sont caractéristiques des régimes contrôlés par les apports de nappes. En effet, les apports de nappe ont une température peu variable au cours de l'année et proche de la température annuelle de l'air (Todd, 1980). Ces apports refroidissent les cours d'eau en été et les réchauffent en hiver. L'amplitude diurne légèrement plus faible des cours d'eau semble confirmer cette hypothèse ( $DTw24H = 1,8^\circ C$ ). Généralement les variations diurnes sont faibles à proximité des sources où les régimes thermiques sont contrôlés par les apports de nappes (Caissie *et al.*, 2006).

Le deuxième groupe est constitué de 71 stations ayant une  $DTwM$  intermédiaire de  $14,9^\circ C$  et avec une  $T_wNM$  égale à  $3,1^\circ C$  et une  $T_wXM$  de  $18,1^\circ C$  (Tableau 2). La  $DTwM$  et la  $T_wXM$  sont bien inférieures à celles du groupe 1, cependant la  $T_wNM$  ( $=3,3^\circ C$ ) reste similaire. Les températures plus froides en été peuvent s'expliquer en partie par le fait que les cours d'eau constituant ce groupe sont de plus petites tailles avec 70% des stations ayant un ordre de Strahler inférieur à 5, ce qui explique également une  $DTw24H$  légèrement plus élevée que pour le groupe précédent ( $MD24h=2,3^\circ C$ ). Cependant l'ombrage ou une alimentation par les eaux souterraines pourraient également expliquer

une baisse de la température de l'eau pendant le mois le plus chaud. On peut également faire l'hypothèse que les régimes thermiques de ces stations n'ont pas un seul facteur de contrôle prépondérant mais ils sont la résultante de plusieurs facteurs pouvant intervenir à différentes époques de l'année. Avec ces seules métriques il n'est pas possible d'identifier un facteur de contrôle prépondérant pour l'ensemble des stations classées dans ce groupe et c'est pourquoi les régimes thermiques seront qualifiés d'influences mixtes.

#### 4.2.2. Identification des stations sur la base des relations Teau - Tair

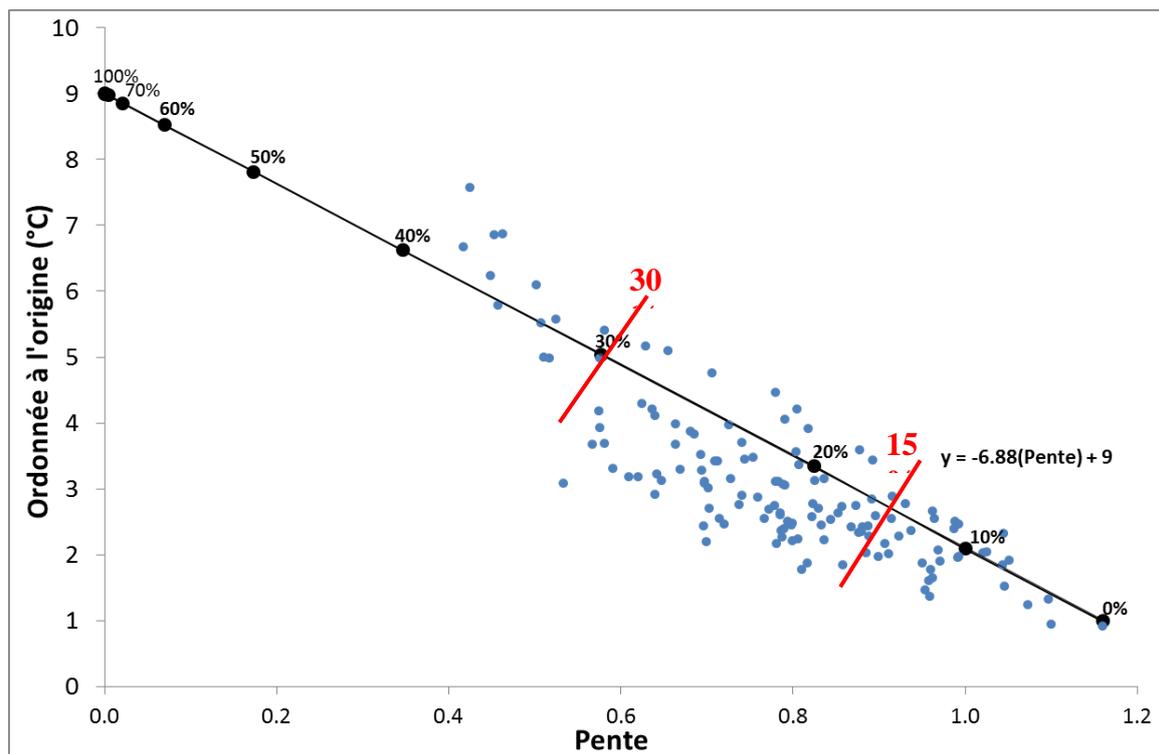
Les températures de l'air ( $T_{a7j}$ ) et de l'eau ( $T_{w7j}$ ) mesurées au niveau des stations ont été moyennées sur 7 jours puis une régression linéaire est réalisée entre ces deux variables. Le coefficient de détermination ( $R^2$ ) est supérieur 0,93 pour 90% des stations et le plus faible  $R^2$  est de 0,8. Les premiers résultats mettent en évidence trois types de stations. Dans le premier cas (Figure 18a), la pente de la droite de régression est proche de 1 et l'ordonnée à l'origine est faible, ce qui montre que les températures de l'eau suivent globalement les mêmes tendances que celles de l'air. Dans les cas 2 (Figure 18c), la pente des droites sont de l'ordre de 0,7 à 0,8 et la température maximale est sensiblement plus faible que celle de l'air. Ce comportement laisse notamment supposer une alimentation des cours d'eau par les eaux souterraines accentuée en période estivale ou un fonctionnement lié à l'ombre projetée par la végétation rivulaire. Enfin, dans le troisième cas, le coefficient directeur de la droite est faible et inférieur à 0,6 (Figure 18b) et une ordonnée à l'origine de 6,8. Ces valeurs sont très proches de celles calculées par O'Driscoll et DeWalle (2006) et indiquent un régime thermique fortement influencé par les apports d'eaux souterraines. En effet, les fortes températures relatives observées en hiver (faibles  $T_{a7j}$  pour de « fortes »  $T_{w7j}$ ), et le comportement inverse observé en été sont caractéristiques d'un régime thermique impacté par les apports de nappes.



**Figure 18. Températures hebdomadaires de l'eau représentées en fonction des températures hebdomadaires de l'air avec les régressions linéaires associées présentant : (a) coefficient directeur "fort", (b) un coefficient directeur "faible" et (c) un coefficient directeur "faible".**

Dans le but d'estimer la contribution des débits provenant des nappes pour l'ensemble des stations, la méthode de O'Driscoll et DeWalle (2006) prévoit de définir la station la moins influencée par les apports de nappe, c'est-à-dire celle qui est située à l'extrémité du coin inférieur droit (Figure 19). Cette station a été définie comme étant la Loire aval à Saint-Mathurin (49LOE05) et on considère que les apports provenant des eaux souterraines est de 0%. Un modèle de mélange a ensuite été

appliqué sur cette station en réappliquant une équation de mélange et en faisant varier les apports de nappe entre 0 et 100% avec un incrément de 10%. Une nouvelle droite de régression a ainsi pu être reportée sur le graphique ce qui permet d'avoir une estimation de la proportion des apports de nappe sur les autres stations.



**Figure 19. Représentation des paramètres des régressions linéaires (ordonnées à l'origine et pentes) entre Tw7J et Ta7J des 128 stations et de la droite théorique calculée à partir du modèle de mélange appliqué à la station de la Loire aval à Saint-Mathurin.**

L'analyse des deux paramètres (pentés et ordonnées à l'origine) des régressions Tw7J- Ta7J permet de mettre en évidence les stations dont le régime thermique est majoritairement influencé par les eaux souterraines. Il s'agit des stations caractérisées par des pentés faibles et une ordonnée à l'origine élevée. Ainsi, on distingue 14 stations où les bornes placées sur la droite de régression indiquent des apports en débits de nappes compris entre 30% et 40%.

Dans le coin inférieur droit on observe des stations dont la température de l'eau est la plus proche de celle de l'air dont les paramètres de régression sont caractérisés par de fortes pentés et une ordonnée à l'origine faible (Figure 19). Ces stations sont potentiellement les moins alimentées par les apports de nappe et donc les températures de l'eau sont les plus proches de la température de l'air. On distingue notamment 20 stations ayant des apports de nappe contribuant à moins de 15% au débit total à la station.

#### 4.2.3. Résultats de la sélection par les deux méthodes

Les trois groupes de stations identifiés par classification ascendante hiérarchique ont été reportés sur les résultats des relations Tw-Ta détaillées dans la section précédente.

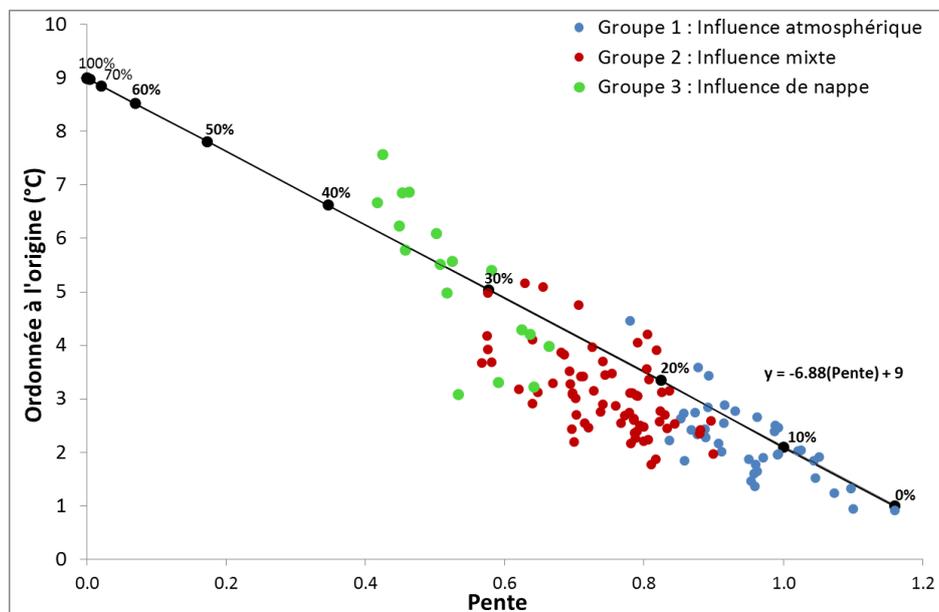


Figure 20. Représentation des résultats obtenus par régressions linéaires effectuées sur 128 stations sur les relations entre les températures de l'air et de l'eau hebdomadaires.

La méthode d'Odriscoll et DeWalle (2006) a permis de mettre en évidence d'une part 14 stations dont la contribution des apports de nappe au débit du cours d'eau est estimée comme supérieure à 30%. On peut voir que 11 de ces stations avaient été identifiées comme étant d'influence de nappe (groupe 3) suite à la CAH (Figure 22). Les régimes thermiques de ces stations ont été identifiés selon ces deux méthodes comme étant fortement contrôlés par les apports d'eaux souterraines. Ces 11 stations constituent donc le premier groupe de station identifiée dont le régime thermique est contrôlé par les apports d'eaux souterraines. Le Tableau 3 regroupe les principales caractéristiques de ces stations.

Localisation	Code Station	Pente	Tw7J	R <sup>2</sup>	TwXM	DTw7J	TwNM	DTwM
BP	41BOU01	0.4	6.7	0.96	15.0	1.7	7.0	8.0
BP	37ESV01	0.4	7.6	0.97	16.0	2.3	7.5	8.4
BP	61SAR01	0.4	6.2	0.98	14.4	2.4	6.0	8.4
BP	86OZO01	0.5	6.8	0.96	16.0	2.1	6.9	9.1
BP	61COR01	0.5	5.8	0.95	14.2	1.3	5.5	8.7
BP	58NOH01	0.5	6.9	0.99	16.5	1.6	7.2	9.3
BP	58NIE01	0.5	6.1	0.99	16.0	2.3	6.1	9.9
BP	36NAH01	0.5	5.5	0.98	15.7	1.3	5.1	10.6
BP	79THO01	0.5	5.0	0.97	15.4	1.8	5.3	10.0
BP	45NOT01	0.5	5.6	0.98	15.7	1.5	5.2	10.5
BP	61HUI01	0.6	5.4	0.95	16.9	1.1	5.4	11.4

Tableau 3. Métriques calculées sur les stations identifiées avec le régime thermique le plus influencé par les apports d'eaux souterraines (BP = bassin parisien).

La CAH avait permis de classer dans le groupe 1, 40 stations qui avaient une forte TwXM et une DTwM importante. Les stations de ce groupe sont placées dans le coin inférieur droit. Le régime thermique de ces stations peut donc être identifié comme étant sous l'influence des conditions atmosphériques. Les régimes thermiques de ces stations sont caractérisés par des températures fortes en été, faibles en hiver et proches de la température de l'air. La proportion de débit provenant des nappes serait inférieure à 15% environ.

Le groupe 2 est caractérisé par des pentes de régression moyennes et des ordonnées à l'origine intermédiaires. Les apports de nappe contribueraient entre 15 et 30% aux débits de ces cours d'eau. Cependant lors de la CAH, la TwNM est similaire entre le groupe 2 et le groupe 1 ce qui signifie qu'en hiver les influences de nappes ne permettent pas d'augmenter significativement la température de ces stations. D'autres facteurs de contrôle, tels que l'ombre projetée par la végétation rivulaire, peuvent influencer ces stations et contribuer à diminuer les TwXM en juillet et août et l'amplitude annuelle

(DTwM). Les régimes thermiques des stations de ce groupe sont donc considérés comme résultant d'influences mixtes que nous tenterons d'identifier dans la section suivante.

D'autre part, l'écart moyen des températures mensuelles à la moyenne de chacun de ces trois groupes est représenté sur la figure 21. On peut distinguer des amplitudes annuelles sensiblement différentes suivant le facteur de contrôle majeur du régime thermique des stations. On note une amplitude entre le mois le plus chaud et le mois le plus froid de plus de 18°C pour le groupe influencé par les conditions atmosphérique. A l'inverse l'amplitude est très faible et d'environ 10°C pour le groupe de stations influencées par les échanges nappes/rivières. En effet la température de la nappe ne variant que très peu au cours de l'année, celle-ci va avoir tendance à réchauffer l'eau en période hivernale et la refroidir en période estivale.

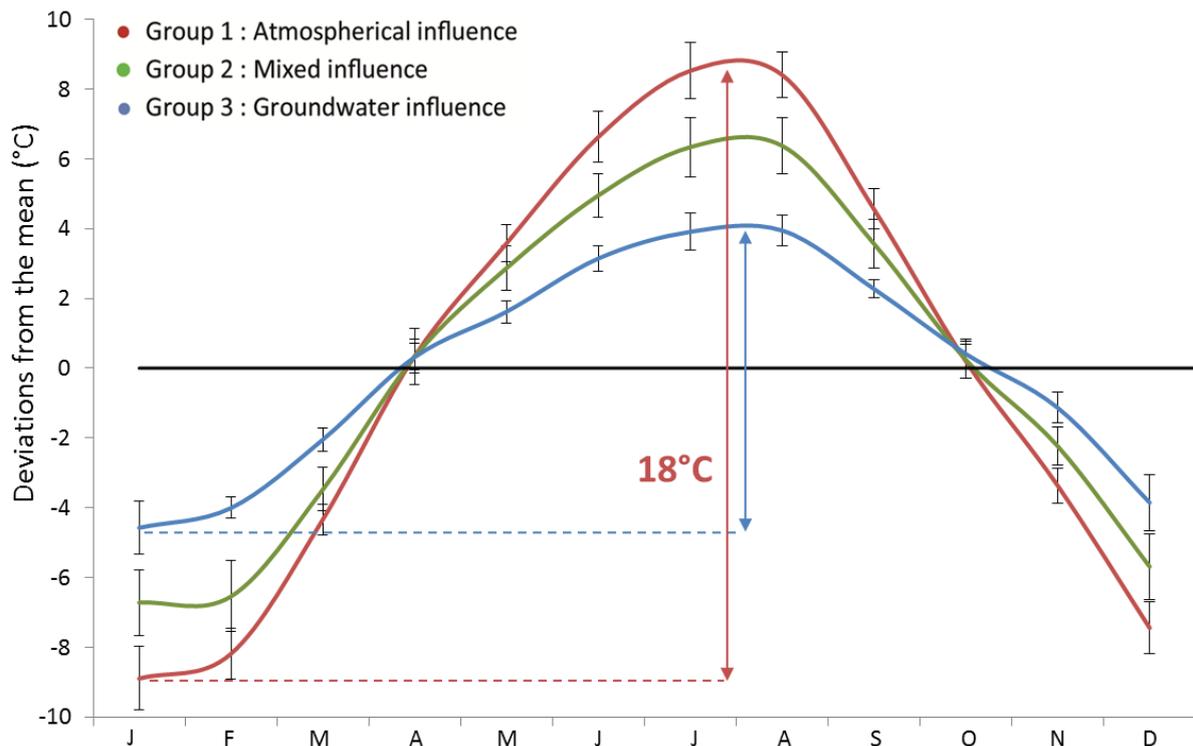


Figure 21. Température de l'eau moyenne mensuelle normalisée par la moyenne sur les trois groupes de stations identifiés. Les barres d'erreur représentent 1 fois l'écart-type de chaque série.

#### 4.2.4. Identification des stations influencées par l'ombrage

Afin d'identifier les stations influencées par l'ombrage issu de la végétation rivulaire, nous avons caractérisé ici un coefficient d'ombrage (SF) calculé au pas de temps horaire qui est fonction de plusieurs facteurs : la hauteur et le taux de recouvrement de la végétation rivulaire, l'orientation du tronçon dans le plan horizontal, et la position relative du soleil et la surface du tronçon. Le taux de recouvrement (rive gauche et rive droite) de la végétation rivulaire est issu de la numérisation des orthophotographies sur un linéaire de 5 km en amont de chaque station. Dans le but de comparer l'ombrage entre les différentes stations, nous avons moyenné le coefficient d'ombrage horaire entre 7h et 21h entre juin et août. Le coefficient d'ombrage déterminé est important sur les cours d'eau d'ordre 2 à 4 puis il diminue pour les grands cours d'eau ( $SF < 30\%$  ; Figure 22). Cela s'explique notamment par la largeur des cours d'eau. En effet, malgré la présence importante de ripisylve sur leurs berges, ces cours d'eau étant très larges, la surface d'ombre projetée sur la rivière devient négligeable par rapport à la surface totale. De ce fait l'ombrage n'aura qu'un effet très limité sur le régime thermique des cours d'eau d'ordre supérieur à 6.

Afin d'identifier les cours d'eau dont la température est spécifiquement influencée par l'ombrage issu de la végétation rivulaire, nous avons étudié le coefficient d'ombrage (SF) des stations de chaque groupe établi préalablement (Figure 22).

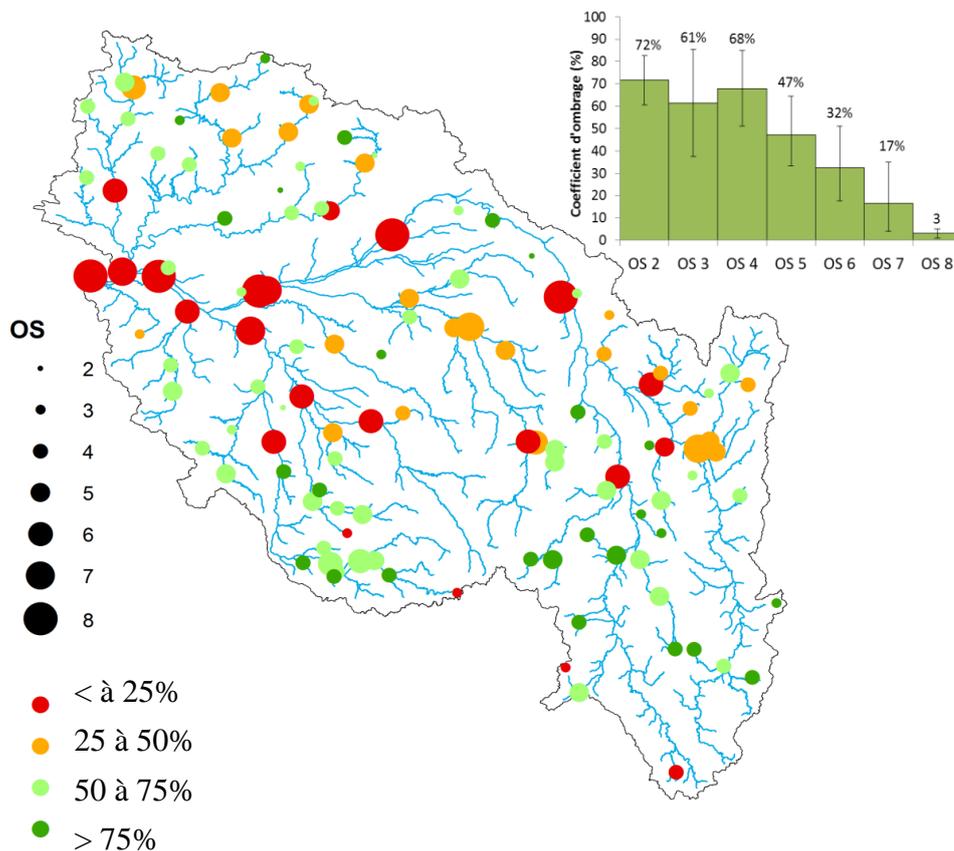


Figure 22. Coefficients d'ombrage moyennés en été entre 7h et 21h sur l'ensemble des tronçons situés jusqu'à 5 km en amont de chaque station RNT représentation de l'ombrage moyen par ordre de Strahler.

#### 4.2.4.1. Ombrage des stations influencées par les conditions atmosphériques

Le régime thermique des 40 stations du groupe 1 avait été identifié comme étant influencé par les conditions atmosphériques. Dans ce groupe, 24 stations ont un coefficient d'ombrage inférieur à 30% alors que seulement 3 stations ont un coefficient d'ombrage supérieur à 70% (Tableau 4). On peut voir que la TwXM est plus importante pour les stations dont le coefficient d'ombrage est inférieur à 30% (22,6°C) que pour les stations plus ombrées (21°C). En revanche la TwNM est similaire pour tout type d'ombrage ce qui reste cohérent car l'indice foliaire est maximum en été ce qui implique une influence maximale en période estivale. Les températures maximales des moyennes sur 7 jours (TwX7J) sont bien supérieures pour les cours d'eau moins ombragés (TwX7J = 25,8°C) que sur ceux avec davantage d'ombrage (24,2 et 24,4°C). On peut noter que le DTw24H est le plus faible (2°C) sur les cours d'eau moins ombragés alors que les variations diurnes sont habituellement plus réduites sur les cours d'eau ayant un fort ombrage. Cela peut s'expliquer par le fait que les cours d'eau sans ombrage de ce groupe sont formés par des grands cours d'eau ayant un ordre de Strahler supérieur à 6 et, du fait de leur profondeur plus importante, cela conduit à réduire le DTw24H.

Les 24 stations ayant un coefficient d'ombrage inférieur à 30% sont donc regroupées dans **sous-groupe 1a** correspondant aux régimes thermiques **influencés uniquement par les conditions atmosphériques**. On remarque que les métriques des cours ayant un fort coefficient d'ombrage (SF > 70%) ou un coefficient moyen (30% < SF < 70%) sont très similaires. C'est pourquoi nous avons classé ces 16 stations dans deuxième **sous-groupe 1b** dont la température est **influencée par les conditions atmosphérique et par l'ombrage**.

SF	Nb de stations	TwXM	TwNM	DTwM	TwX7J	DTw24H	Groupe
< 30%	24	22.6	3.4	19.2	25.8	2.0	1a
30 à 70%	13	21.1	3.0	18.2	24.4	2.3	1b
> 70%	3	21.0	3.2	17.8	24.2	2.4	

Tableau 4. Métriques de températures moyennées sur les stations du groupe 1 influencées par les conditions atmosphériques et regroupés en fonction de leur coefficient d'ombrage (SF)

#### 4.2.4.2. Ombrage des stations d'influences mixtes

Ce groupe est désormais composé de 76 stations dont on a pu estimer une alimentation par les eaux souterraines comprises entre 15 et 30%. 6 stations contenues dans ce groupe ont un coefficient d'ombrage inférieur à 30%, 37 stations ont un ombrage compris entre 30 et 70% et 34 stations ont un ombrage supérieur à 70% (Tableau 5). La TwXM (=18,7°C) et la TwX7J (=21,5°C) sont supérieures sur les stations dont le coefficient d'ombrage est inférieur à 30%. De plus on peut voir sur ces stations un DTw24H particulièrement élevé (=3,4°C) alors qu'il est de l'ordre de 2,5°C sur les stations ayant un coefficient d'ombrage compris entre 30% et 70%. Un premier **sous-groupe 2a** peut ainsi être constitué avec ces 6 stations (SF<30%) dont la température **d'influence mixte et peu ombragée**.

Un second sous-groupe 2b, constitué des 36 stations ayant un ombrage moyen (30% < SF < 70%), est formé. La DTw24H (= 2,5°C) est inférieure d'un degré à celle du groupe 2a et la TwNM est supérieure d'un demi degré (=3,6°C). Il n'y a pas de facteurs de contrôle prépondérants identifiables mais il semble que la température de ces stations est influencée à la fois par les conditions météorologiques, les apports de nappe et/ou la végétation rivulaire qui jouent dans des proportions assez similaires. Ce **sous-groupe 2b** est donc qualifié **d'influence mixte et moyennement ombragé**.

Un troisième sous-groupe 2c est formé avec les 34 stations fortement ombragées (SF>70%). Ces stations ont globalement les plus faibles températures tout au long de l'année et les plus faibles variations comparées aux groupes 2a et 2b (TwXM=17,1°C, TwNM=2,8°C, TwX7J=19,9°C et DTw24H=2,2°C). Le régime thermique de ces stations suit un cycle annuel avec une température mensuelle au mois le plus froid assez faible ce qui indique qu'il n'y a pas ou peu d'alimentation par les nappes en période hivernale. La température est donc davantage contrôlée par les conditions atmosphériques en hiver. En été la TwXM, la TwX7J et la DTw24H est bien plus faible que pour les groupes 2a et 2b ce qui peut être expliqué par l'influence du fort coefficient ombrage combiné avec un apport de nappe moyen. Le régime thermique de ce **sous-groupe 2c** de stations est donc défini comme étant **d'influence mixte et fortement ombragé**.

SF	Nb de stations	TwXM	TwNM	DTwM	TwX7J	DTw24H	Groupe
< 30%	6	18.7	3.0	15.7	21.5	3.4	<b>2a</b>
30 à 70%	37	18.5	3.6	15.0	21.4	2.5	<b>2b</b>
> 70%	34	17.1	2.8	14.3	19.9	2.2	<b>2c</b>

*Tableau 5. Métriques de températures moyennées sur l'ensemble des stations du groupe 2 regroupées en fonction de leur coefficient d'ombrage (SF)*

#### 4.2.4.1. Ombrage des stations influencées par les nappes

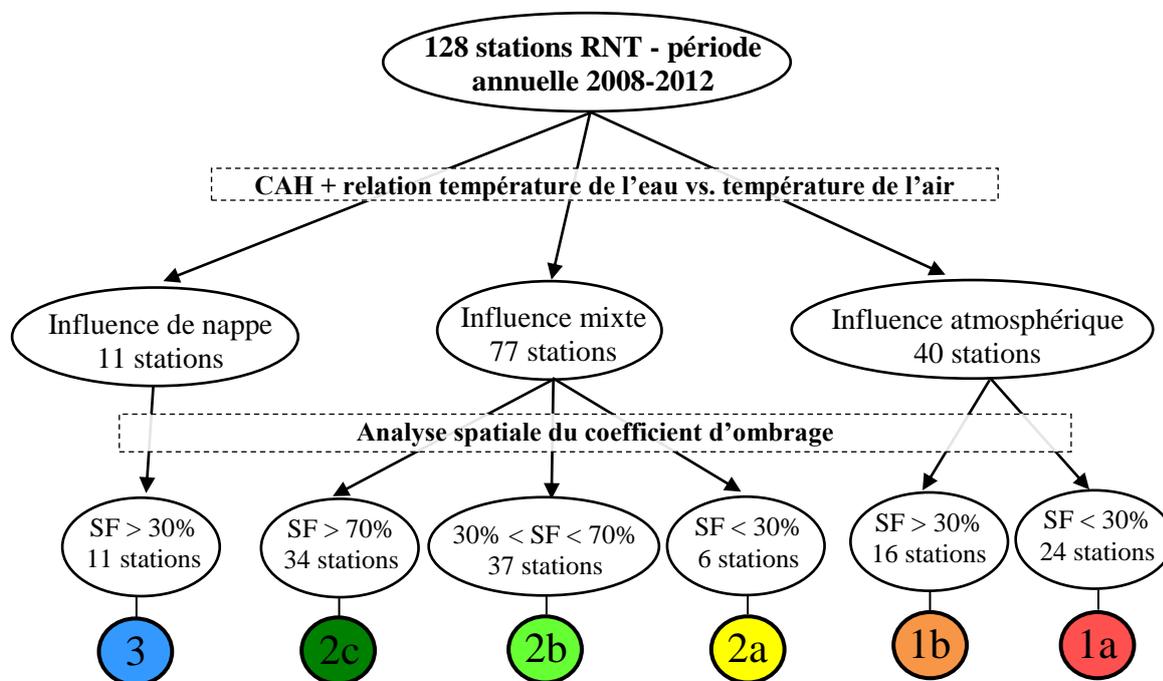
Dans la section 3.2, 11 stations ont pu être identifiées comme ayant un régime thermique fortement influencé par les apports d'eaux souterraines. Parmi ces stations, aucune n'a un coefficient d'ombrage inférieur à 30%, 7 stations ont un coefficient ombrage intermédiaire compris entre 30 et 70% et 4 stations ont un coefficient d'ombrage supérieur à 70% (Tableau 6). Les métriques des stations ayant un coefficient d'ombrage moyen ou fort sont très proches et il n'y a pas de différence majeure. On peut noter que la TwXM et la TwX7J sont légèrement supérieures sur les stations moyennement ombragées. Cependant on peut estimer que la température de ces stations est très influencée par les apports de nappe et l'ombrage n'a qu'une faible influence au vu des métriques similaires. Le groupe 3 est donc conservé avec les 11 stations dont le régime thermique est identifié comme fortement influencé par les apports de nappe tout au long de l'année.

SF	Nb de stations	TwXM	TwNM	DTwM	TwX7J	DTw24H	Groupe
< 30%	0	-	-	-	-	-	-
30 à 70%	7	15.7	6.3	9.4	17.5	1.7	<b>3</b>
> 70%	4	15.5	5.8	9.6	17.1	1.8	

*Tableau 6. Métriques de températures moyennées sur l'ensemble de stations du groupe 3 regroupées en fonction de leur coefficient d'ombrage (SF)*

### 4.3. Caractéristiques hydromorphologiques des groupes de stations

Les principales caractéristiques morphologiques, hydrologiques et météorologiques sont présentées ici pour les 6 groupes de stations préalablement identifiés en fonction du facteur de contrôle ayant le plus d'influence sur leur régime thermique (Figure 23).



**Figure 23. Schéma récapitulatif de la classification des stations effectuée en fonction de leur facteur de contrôle principal : 1a « influence atmosphérique sans ombrage », 1b « influence atmosphérique avec ombrage », 2a « influence mixte sans ombrage », 2b « influence mixte avec ombrage moyen », 2c « influence mixte avec ombrage fort » et 3 « influence des apports de nappe ».**

Le **groupe 1a « influence atmosphérique sans ombrage »** est composé de 24 stations situées sur une majorité de grands cours d'eau avec une aire de drainage médiane de 4000 km<sup>2</sup> (Figure 24a) et supérieures à 2000 km<sup>2</sup> pour 80% des stations. Les pentes aux stations sont faibles avec une médiane à 0,1 m/km et 85% des stations ayant une pente inférieure à 0,1 m/km (Figure 24b). Le débit spécifique médian est de 8.9 l/s ce qui est assez faible et caractérise un faible apport par les précipitations et/ou une évapotranspiration importante. La température de l'air (2008-2012) à la station est comprise entre 10 et 12°C (35% de stations) (Figure 24d). La plupart de ces stations sont situées sur des grands cours d'eau (ordre de Strahler > 6) dans la plaine sédimentaire (Figure 25).

Le **groupe 1b « influence atmosphérique avec ombrage »** est composé de 16 stations (aire de drainage : médiane = 1000 km<sup>2</sup> ; 85% des stations comprises entre 50 et 2000 km<sup>2</sup>, ordre de Strahler de 3 à 5) réparties sur l'ensemble du bassin (Figure 25). Les pentes aux stations sont faibles (médiane = 0,8 m/km) même si elles sont légèrement plus élevées que pour le groupe 1a. Le débit spécifique médian est de 11 l/s. La température annuelle de l'air médiane est de 11,4°C et dépasse 10°C sur 75% des stations (Figure 24d).

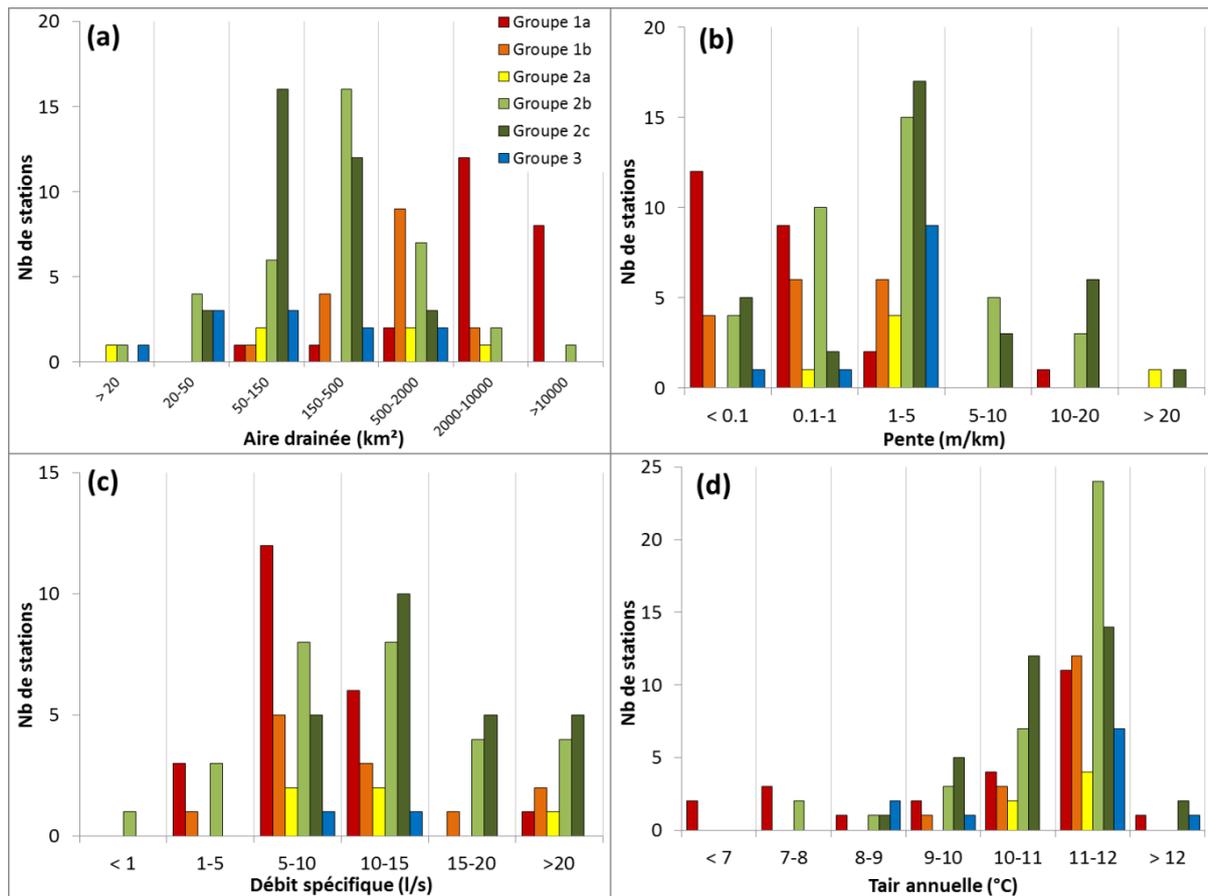
Les stations composant le **groupe 2a « influence mixte sans ombrage »** (6 stations) ont des aires de drainage assez hétérogènes et comprises entre 20 et 10000 km<sup>2</sup> (Figure 24a) ainsi que des pentes (5 stations < 5 m/km et 1 station > 20 m/km) et des débits spécifiques contrastés (compris entre 11,2 l/s et 20 l/s). La température de l'air est supérieure à 11°C sur toutes les stations qui sont réparties dans les trois grands ensembles du bassin de la Loire (Figure 25).

Les stations du **groupe 2b « influence mixte avec ombrage moyen »** (37 stations), ont une superficie médiane de 277 km<sup>2</sup> (comprises entre 50 et 2000 km<sup>2</sup> pour 80% des stations) et ont une répartition relativement homogène dans le bassin de la Loire (Figure 25). Les pentes sont globalement plus élevées (médiane = 2 m/km) et le débit spécifique est assez hétérogène (médiane = 10 l/s, min = 4 l/s, max = 22 l/s) (Figure 24b, c). La température interannuelle de l'air a une valeur médiane

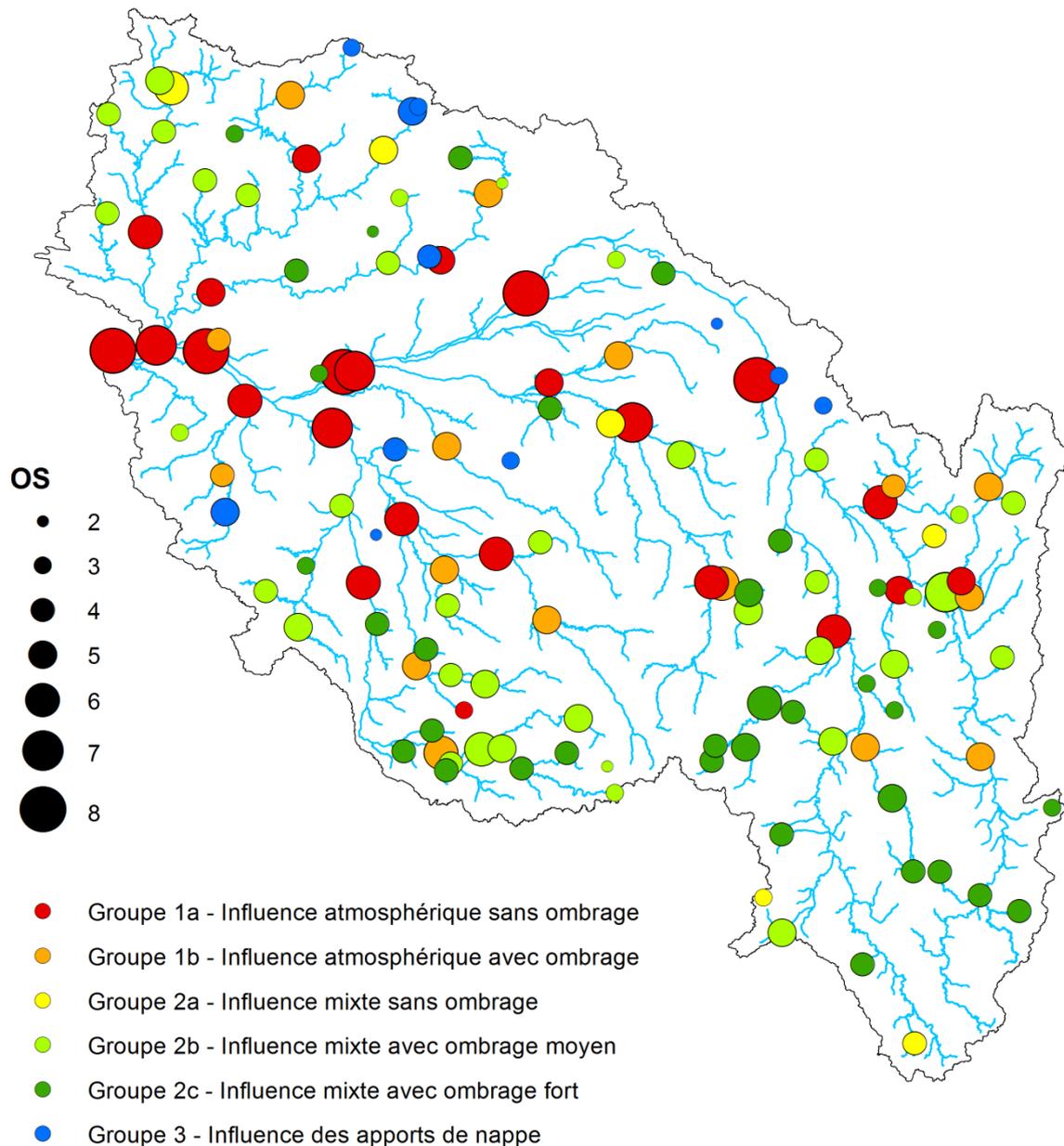
de 11,2°C et est supérieure à 11°C sur 85% des stations. Les cours d'eau de ce groupe sont répartis sur l'ensemble du bassin et sur des ordres de Strahler moyen compris entre 3 et 6.

Le **groupe 2c « influence mixte avec ombrage fort »** (34 stations dont 90% avec une aire de drainage > 500 km<sup>2</sup>) est celui où l'on retrouve les stations avec les pentes (médiane = 3,5 m/km) et les débits spécifiques (médiane = 13,4 l/s) les plus élevés (80% des stations > 10 l/s) (Figure 24b, c) et principalement situées dans la partie amont du bassin (Figure 25). Les forts débits spécifiques du bassin amont sont expliqués par les fortes précipitations et l'évapotranspiration plus faible. La température interannuelle de l'air est globalement similaire aux autres groupes avec une valeur médiane de 11°C.

Enfin les stations du **groupe 3 « influence apports de nappe »** (11 stations) sont situées sur des petits cours d'eau (ordre de Strahler < 4) avec une aire de drainage médiane de 110 km<sup>2</sup> (Figure 24a). La pente est comprise entre 1 et 5 m/km sur 80% des stations. Le débit spécifique est assez faible (médiane = 9,6 l/s) et la température interannuelle de l'air est supérieure à 11°C sur 80% des stations. Les stations composants ce groupe, sont toutes situées dans le bassin sédimentaire sur des cours d'eau d'ordre de Strahler inférieur à 4 (Figure 25).



**Figure 24. Distribution des principales caractéristiques des stations suivant leur facteur de contrôle principal : aire de drainage (km<sup>2</sup>), pente (m/km), débit spécifique moyen entre 2008 et 2012 (l/s) et la température de l'air moyenne entre 2008 et 2012 (°C).**

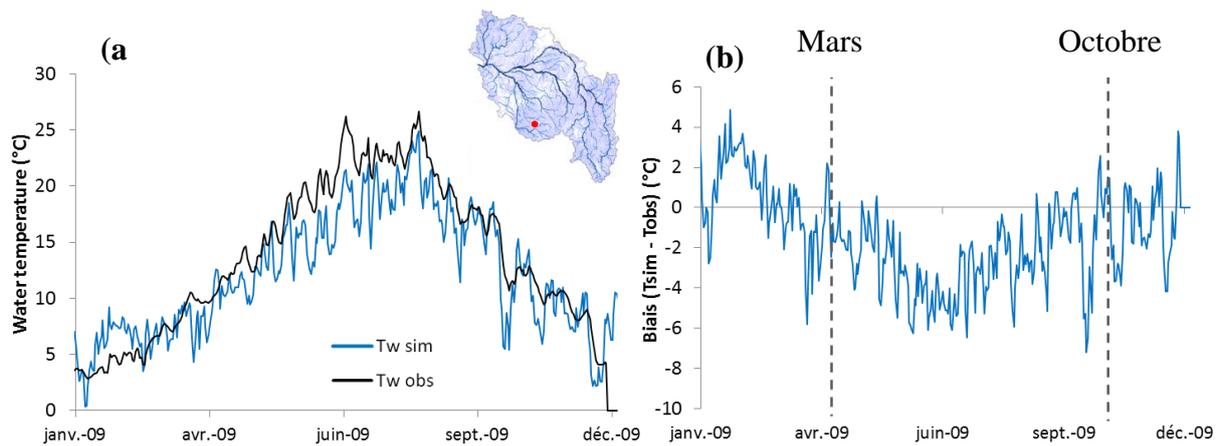


**Figure 25. Représentation des stations en fonction de leur facteur de contrôle identifié**

#### 4.4. Effets anthropiques observés sur la température de l'eau

##### Effets dus aux étangs et seuils

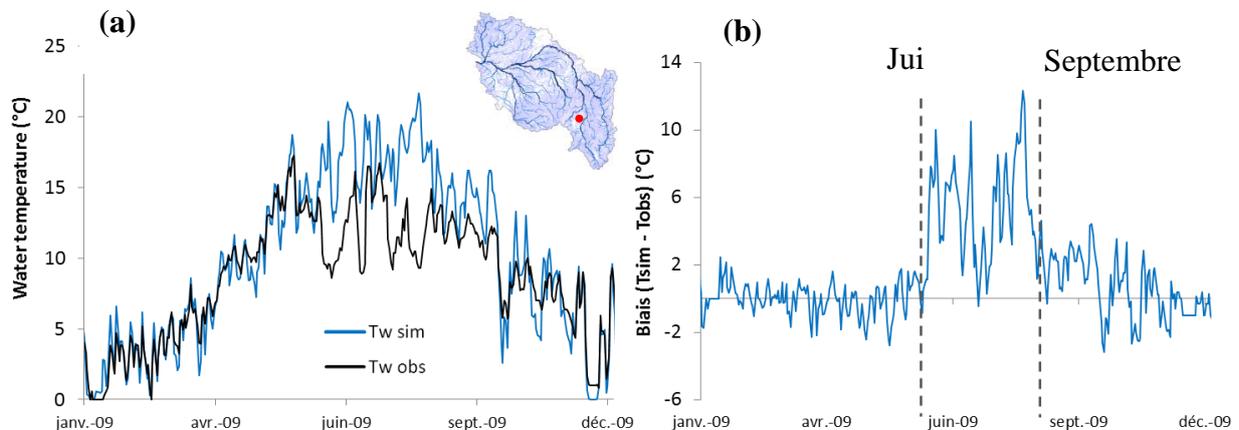
La présence d'étangs ou de zones d'élargissement situés le long d'un cours d'eau provoque un réchauffement important de l'eau en période estivale car la couche superficielle de l'étang offre une surface de contact avec l'atmosphère beaucoup plus importante qu'au niveau de la rivière. Il existe des étangs en série situés sur certains cours d'eau ce qui accroît l'augmentation de la température de ces cours d'eau. Les effets de ces étangs sont visibles sur certaines stations RNT notamment à la station du Vincou à Thouron (87VIN01). On constate que la chronique de température mesurée à cette station est bien supérieure à la température simulée par le modèle thermique (décrit dans le chapitre 5) et dépasse 25°C pendant l'été 2009 (Fig. 28a). Les biais (Tsim-Tobs) à cette station montrent que le modèle, qui ne prend pas en compte les effets provenant des étangs, sous-estime d'environ 4°C la température en période estivale (Fig. 28b). Les étangs ont pour effet d'augmenter l'inertie thermique de la rivière en aval, ainsi les variations diurnes de la température en aval d'un étang est plus faible qu'en amont.



**Figure 26. Températures mesurées et simulées à la station du Vincou à Thouron (87VIN01) (a) et biais ( $T_{sim}-T_{obs}$ ) associés (b).**

### Effets dus aux rejets des barrages réservoirs

Les barrages réservoirs peuvent avoir un effet important sur la température des cours d'eau notamment lorsqu'ils sont munis d'une sortie hypolimnique (venant de la partie profonde de la retenue). En période estivale, ceci va avoir pour effet de réduire la température du cours d'eau situé en aval du fait d'un phénomène de stratification-destratification au niveau de la retenue d'eau. Ces effets ont pu être mesurés à la station de la Morge à Montcel (63MOR01) qui est un cours d'eau influencé par le barrage de la SEP (Hauteur = 41m ; volume = 4 700 000 m<sup>3</sup>). L'eau rejetée en aval de ce barrage provient du fond de la retenue ce qui provoque une diminution brusque de la température de plusieurs degrés en période estivale en 2009 (Fig. 29a). Le modèle thermique (voir chapitre 5) ne prend pas en compte les effets des lâchés de barrages et surestime la température de plus de 10°C en aout 2009 (Fig. 29b). On constate que les effets sur ce cours d'eau se rencontrent entre juin et septembre.



**Figure 27. Températures mesurées et simulées à la station du Vincou à Thouron (87VIN01) (a) et biais ( $T_{sim}-T_{obs}$ ) associés (b).**

Le débit de la Loire est partiellement régulé par deux principaux barrages : le barrage de Villerest (capacité de 253 Mm<sup>3</sup>) sur la Loire et le barrage de Naussac (capacité de 190 Mm<sup>3</sup>) sur l'Allier (Fig. 2.1). Le barrage de Naussac a pour but principal d'assurer un débit minimal de l'Allier à Vieille Brioude (6 m<sup>3</sup>/s) et à Vic le comte (15 m<sup>3</sup>/s). Ces deux barrages contribuent à soutenir le débit d'étiage de la Loire à Gien (point kilométrique amont = 562 km) à 60 m<sup>3</sup>/s. Ces deux ouvrages relâchent donc des volumes d'eau importants en période estivale qui peuvent avoir une forte influence sur la température de la Loire et de l'Allier. Cependant, il n'y a pas de stations de mesures situées à proximité en aval de ces ouvrages et les effets sur ces cours d'eau restent difficilement quantifiables.

## 5. Vers une estimation de l'impact du changement climatique par modélisation

### 5.1. Modèle T-Net

#### 5.1.1. Présentation du modèle

Un modèle thermique basé sur le concept de température d'équilibre et la résolution du bilan énergétique d'un cours d'eau a été développé afin de simuler l'impact d'une hausse des températures de l'air liée au changement climatique sur la température de l'eau. Deux approches de complexité croissante ont été suivies : une approche stationnelle et une autre par propagation (Figure 28). Dans **l'approche stationnelle**, la température est simulée en fonction des conditions géomorphologiques, météorologiques et hydrologiques locales qui sont intégrés pour déterminer le bilan énergétique et les conditions hydrauliques. La température est ensuite simulée à l'état stationnel ce qui signifie qu'elle ne dépend que des conditions de forçage locales. **L'approche par propagation** repose sur deux étapes principales : la première prend en compte l'évolution de la température de l'amont vers l'aval d'un tronçon au pas de temps horaire en intégrant les variations spatiales et temporelles du bilan énergétique de la masse d'eau ainsi que les conditions hydrauliques ; la seconde étape consiste à mélanger les flux thermiques au niveau des confluences entre deux tronçons en tenant compte du débit respectif des deux masses d'eau. La combinaison de ces deux étapes permet de simuler la propagation du signal thermique de l'amont vers l'aval des cours d'eau et de calculer l'écart entre la température de l'eau et la température d'équilibre à chaque nœud du réseau. L'approche par propagation est basée sur une topologie de réseau correspondant au réseau hydrographique du bassin de la Loire issu de la BD CARTHAGE®, corrigé pour supprimer tous les cours d'eau non connectés ainsi que toutes les diffluences (Figure 29). Un tronçon est ainsi défini comme étant un segment de rivière compris entre deux confluences. Il en existe plus de 52 200 sur l'ensemble du bassin et leur longueur moyenne est de 1,7 km. Chaque tronçon est identifié par un nœud amont (Jaune ; Figure 29) et un nœud aval (Rouge). Chaque tronçon a été hiérarchisé selon la classification de Strahler sachant que tout tronçon n'ayant pas d'affluent se voit attribuer la valeur de 1. L'ordre de Strahler de la Loire à l'exutoire du bassin versant est de 8.

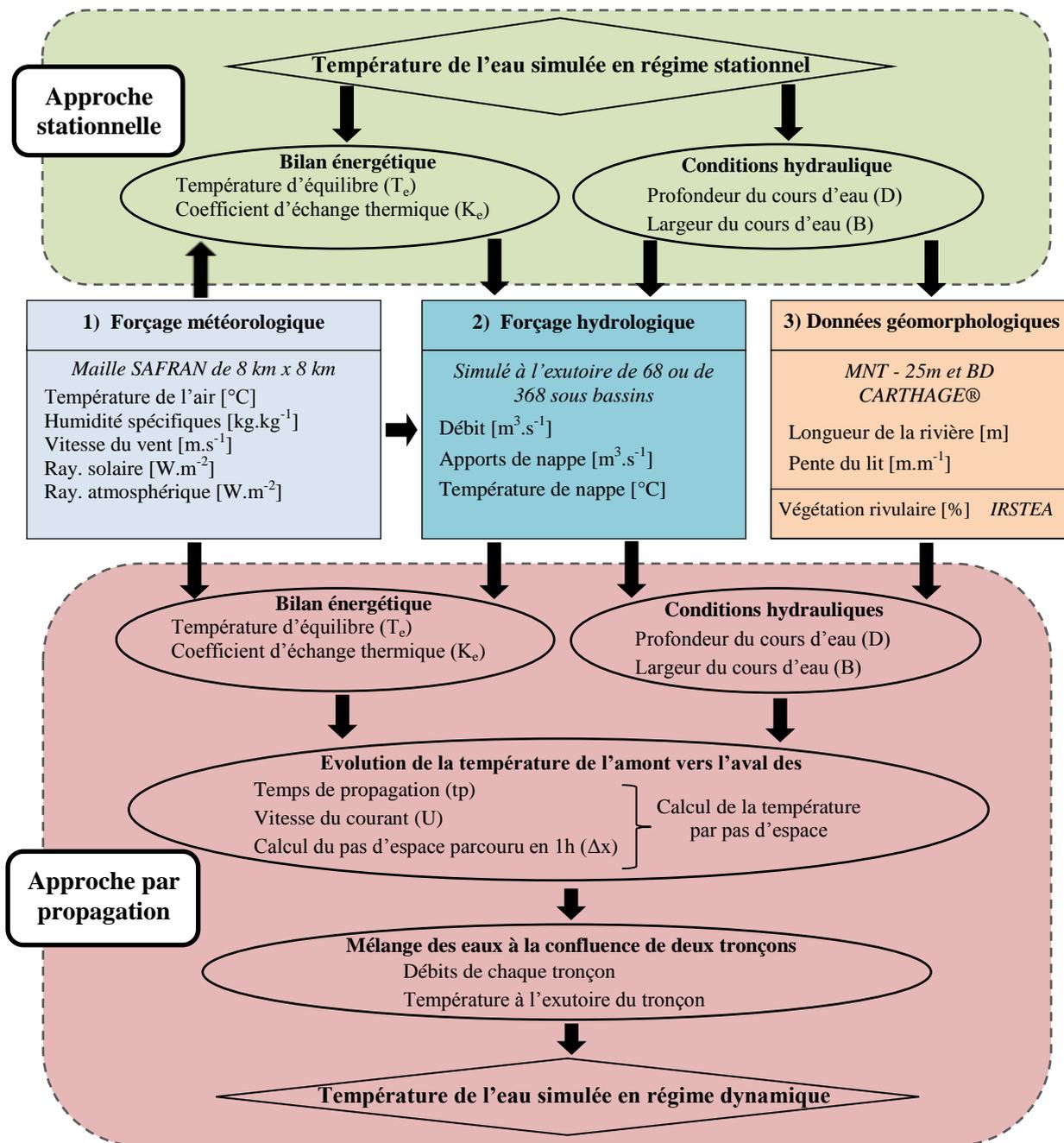
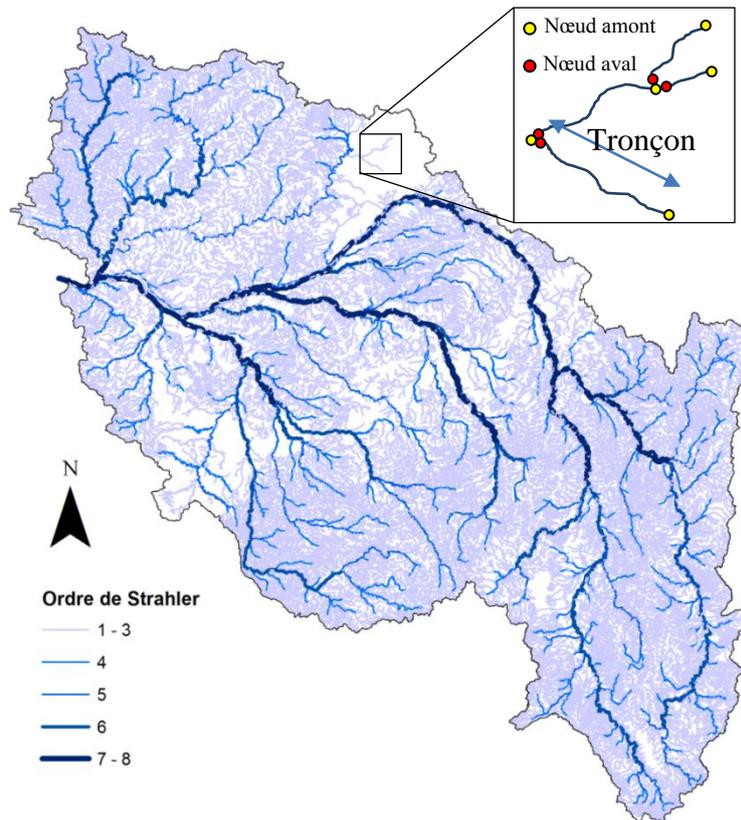


Figure 28. Principe du modèle thermique de la température des cours d'eau selon l'approche stationnelle et l'approche par propagation



**Figure 29. Cartographie du réseau hydrographique (BD CARTHAGE®) sur le bassin de la Loire.**

La résolution du bilan énergétique à l'interface eau/atmosphère (Eq. 1) comporte 5 flux énergétiques: le rayonnement solaire ondes courtes ( $H_{ns}$ ), le rayonnement atmosphérique ondes longues ( $H_{la}$ ), rayonnement émis par la masse d'eau ondes longues ( $H_{lw}$ ), la convection ( $H_c$ ), l'évaporation/condensation ( $H_e$ ).

$$\sum_i H_i = H_{ns} + H_{la} - H_{lw} + H_c - H_e \quad (\text{Équation 1})$$

A l'interface eau/sédiment, un sixième flux énergétique associé aux échanges nappe/rivière ( $H_g$ ) peut être inclus dans le bilan énergétique (Eq. 2). Compte tenu de la difficulté à estimer les flux de chaleur résultant de la conduction entre les sédiments et l'eau ainsi que des échanges entre les eaux de surface et les eaux hyporhéiques à une échelle régionale, ces termes ont été négligés dans les deux approches de modélisation.

$$\sum_i H_i = H_{ns} + H_{la} - H_{lw} + H_c - H_e + H_g \quad (\text{Équation 2})$$

Les équations et l'ensemble des paramètres nécessaires pour le calcul des 6 flux énergétiques sont détaillés dans le tableau 7. Leurs formulations sont issues des travaux de Bustillo *et al.* (2014) pour les échanges à l'interface eau/atmosphère et des travaux de Herb et Stefan (2011) pour les apports énergétiques provenant des nappes.

Flux énergétiques (W.m <sup>-2</sup> )	Formulations	Paramètres	Hypothèses
Ray. ondes courtes (H <sub>ns</sub> )	$H_{ns} = (-Alb) \cdot Rg \cdot (-SF)$	Alb : Albédo de la surface de l'eau Rg : Ray. global [W.m <sup>-2</sup> ] SF : Coefficient d'ombrage	Alb = 0.06
Ray. ondes longues (H <sub>la</sub> )	$H_{la} = \epsilon_a \cdot \sigma \cdot (T_a + 273.15)^4 \times (+0.22 \cdot Cld^{2.75})$	$\epsilon_a$ : Emissivité de l'atmosphère $\sigma$ : Constante de Boltzmann T <sub>a</sub> : Température de l'air [°C] Cld : Fraction de couverture nuageuse	$\epsilon_a = \text{constant}$ $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$
Ray. ondes longues réémis (H <sub>lw</sub> )	$H_{lw} = \epsilon_w \cdot \sigma \cdot (T_w + 273.15)^4$	$\epsilon_w$ : Emissivité de l'eau T <sub>w</sub> : Température de l'eau [°C]	$\epsilon_w = 0.97$ $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$
Convection (H <sub>c</sub> )	$H_c = B \cdot f(w) \cdot (T_a - T_w)$	B : Coefficient de Bowen f(w) = aw + b : fonction de vent w : vitesse du vent à 2 m [m.s <sup>-1</sup> ]	a = 4 ; b = 7.4 [W.m <sup>-2</sup> .mb <sup>-1</sup> ] B = 0.62 mb.K <sup>-1</sup>
Evaporation (H <sub>e</sub> )	$H_e = f(w) \cdot (e_s - e_a)$	e <sub>a</sub> : Pression de vapeur d'eau dans l'air [mb] e <sub>s</sub> : Pression de vapeur saturante pour T <sub>w</sub> [mb]	Approximation de Magnus-Teten: $e_s = 6.11 \cdot \exp\left(\frac{17.27 \cdot T_w}{273.3 + T_w}\right)$
Apports des nappes (H <sub>g</sub> )	$H_g = \rho_w C_p \frac{Q_G}{A} (T_g - T_w)$	T <sub>g</sub> : Température de nappe [°C] $\rho_w$ : Densité de l'eau [kg.m <sup>-3</sup> ] C <sub>p</sub> : Capacité thermique de l'eau [J.kg <sup>-1</sup> .°K <sup>-1</sup> ] Q <sub>G</sub> : Débit de nappe [m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ] A : Aire d'échange entre la nappe et la rivière [m <sup>2</sup> ]	

**Tableau 7. Formulations et paramètres utilisés pour calculer les flux énergétiques intervenant aux interfaces eau/atmosphère et nappe/rivière**

Le concept de température d'équilibre repose sur deux variables centrales : la température d'équilibre (T<sub>e</sub>) et le coefficient d'échange thermique (K<sub>e</sub>) et suppose que le bilan énergétique est proportionnel à la différence entre la température de l'eau et la température d'équilibre. La température d'équilibre est définie comme étant la température de l'eau qui serait atteinte en régime stationnaire c'est-à-dire lorsque la somme des échanges entre les flux énergétiques intervenant aux limites de la masse d'eau est nulle ( $\sum H_i = 0$ ). Ce flux net peut être linéarisé en établissant que le taux d'échanges énergétiques est proportionnel à l'écart entre la température de l'eau et la température d'équilibre :

$$\sum_i H_i = K_e (T_e - T_w) \quad (\text{Équation 3})$$

Le coefficient d'échange thermique correspond à la vitesse à laquelle la température de l'eau va répondre aux différents processus d'échanges thermiques ; il est exprimé en [W/m<sup>2</sup>/K]. D'après les travaux de Poulin (1980) et de Bustillo *et al.* (2014), il peut être déterminé à partir d'une formule théorique correspondant à la somme des dérivés partielles des flux énergétiques (H<sub>i</sub>) par rapport à la température d'équilibre (T<sub>e</sub>) soit :

$$K_e = - \sum_i \frac{\partial H_i}{\partial T_e} \quad (\text{Équation 4})$$

On peut alors calculer la température en fonction du temps selon l'équation 5 :

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = \frac{K_e}{\rho_w C_p D} \times (T_e - T_w) \quad (\text{Équation 5})$$

### 5.1.2. Approche stationnelle

L'approche stationnelle simule la température au pas de temps journalier ou horaire à partir de l'équation 6. Le détail du calcul du K<sub>e</sub> ainsi que le développement complet de cette approche de modélisation est présentée dans Beaufort *et al.*, 2015.

$$T_w(t) = T_e(t) + [T_w(t - \Delta t) - T_e(t)] \cdot \exp\left[\frac{-K_e(t)}{\rho_w C_p D(t)} \Delta t\right] \quad (\text{Équation 6})$$

### 5.1.3. T-Net – approche par propagation

La première étape de cette approche consiste à calculer l'évolution de la température lors de son parcours sur un tronçon unitaire entre le nœud amont et le nœud aval. La seconde étape est

effectuée au niveau des confluences entre deux tronçons et consiste à mélanger les flux thermiques calculés à l'exutoire des deux tronçons « père » (sur le nœud aval) en tenant compte du débit respectif des deux masses d'eau. Ce mélange permet de déterminer la température sur le nœud amont du tronçon « fils » formé par la confluence des deux tronçons « père ». En combinant ces deux étapes, la température de l'eau est calculée au pas de temps horaire en parcourant l'arborescence du réseau hydrographique d'amont en aval sur chaque nœud de l'ensemble des tronçons jusqu'à l'exutoire final.

L'évolution longitudinale de la température de l'eau est résolue via l'équation suivante :

$$T_{aval}(x) = T_e + [T_{amont} - T_e] \cdot \exp\left[\frac{-B \cdot K_e}{\rho_w C_p Q} \Delta x\right] \quad (\text{Équation 7})$$

Avec  $t$  : temps en heure,  $\sum Hi$  : somme des flux énergétiques,  $Q$  : débit du cours d'eau ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ),  $B$  : Largeur (m) et  $\Delta x$  : pas d'espace (m). Il est nécessaire que toutes les variables en entrée du modèle (météorologie, hydrologie, géomorphologie et végétation) soient constantes pour permettre le calcul de l'évolution de la température via l'équation 7.

Pour calculer la température au nœud aval ( $T_{aval}$ ) d'un tronçon à un instant ( $t$ ), le temps nécessaire à la masse d'eau pour effectuer le trajet du nœud aval au nœud amont est déterminé en tenant compte de la vitesse du courant ( $U$ ) et de la longueur du tronçon ( $L$ ). De ce fait, si le temps ( $tp$ ) nécessaire pour parcourir un tronçon  $j$  est **inférieur à une heure** alors les forçages météorologiques et hydrologiques (vitesse et profondeur) sont constants. On peut donc appliquer l'équation 7 pour calculer  $T_{aval}$ . Dans ce cas de figure, le pas d'espace ( $\Delta x$ ) est égal à la longueur du tronçon.

Dans le cas de figure où le temps ( $tp$ ) nécessaire pour parcourir le tronçon  $j$  est **supérieur à une heure** alors le signal thermique de  $T_{amont}$  va évoluer toutes les heures lors de son trajet en fonction des conditions météorologiques. Un pas d'espace ( $\Delta x$ ) est donc déterminé en tenant compte du temps de parcours ( $tp$ ) et de la longueur du tronçon ( $L$ ) et correspond à la distance parcourue par l'eau transitant dans le tronçon en une heure, ce qui correspond à la résolution temporelle des données météorologique issues du forçage SAFRAN.

$$tp = \frac{L}{U} \quad (\text{Équation 8})$$

Avec  $L$  : longueur du tronçon [m],  $U$  : vitesse du courant [ $m \cdot s^{-1}$ ] et  $tp$  : temps de parcours en nombre entier [h]. On définit donc un nombre d'incrément d'espace ( $n_{max}$ ) pendant lequel le temps de parcours sera d'une heure pour que les données météo soient constantes dans chaque pas d'espace :

$$n_{max} = tp.$$

Ceci permet de calculer l'évolution de la température toutes les heures par une succession de simulations « court-terme » où les caractéristiques météorologiques et hydrologiques sont constantes. Pour calculer l'évolution de la température du nœud amont prise à l'instant  $t=tp$ , il faudra procéder à une suite de simulations indépendantes jusqu'au  $n^{ième}$  incrément d'espace selon l'équation suivante :

$$T_w(x) = T_e(x) + [T_{amont}(x - \Delta x) - T_e(x)] \cdot \exp\left[\frac{-B \cdot K_e}{\rho_w C_p Q} \Delta x\right] \quad (\text{Équation 9})$$

Le bilan énergétique est recalculé lors de chaque incrément d'espace selon l'équation 10. Une fois que tous les incréments d'espaces sont parcourus on obtient la température du nœud amont prise à l'instant  $t=tp$  qui a évolué lors du trajet le long du tronçon jusqu'à l'incrément d'espace  $n_{max}$  correspondant au nœud aval :

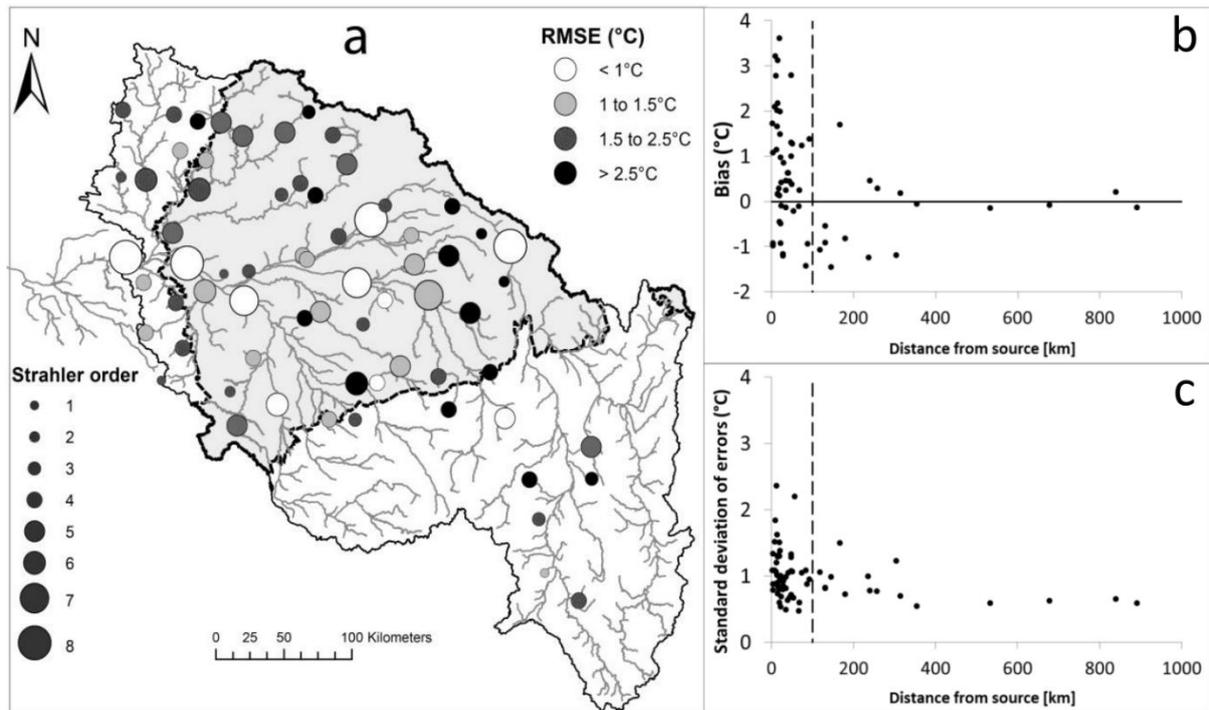
$$T_{aval} = T_w(n_{max}) \quad (\text{Équation 10})$$

Le détail de ce modèle est présenté dans Beaufort *et al*, (2015).

#### 5.1.4. Performance comparée des approches de modélisation

La performance du modèle a été évaluée sur les deux jeux de données disponibles. En période estivale (67 stations, 2000-2006), l'approche T-NET stationnelle permet de simuler les températures journalières avec une erreur quadratique moyenne (RMSE) entre 0,7 et 4°C (médiane = 1,9°C,  $n=67$  stations). Cette approche stationnelle permet de bien simuler la température de l'eau au niveau des stations situées à plus de 100 km de leur source en période estivale (RMSE moyenne < 1,5°C, Figure 30a). Les écarts des erreurs à ces stations de 0,8°C en moyenne et les biais sont nuls (Figure 30b et 32c). Cependant, les performances sur les cours d'eau de taille inférieure ( $Pk$  amont < 100 km) sont plus contrastées avec des températures sous-estimées en période

hivernale et surestimées en période estivale. Au niveau de ces petits cours d'eau, les RMSE moyennes sont de 2,4°C et les biais moyens de 1,4°C. Les températures sont donc surestimées par le modèle sur pour une majeure partie des stations. Ces mauvaises simulations locales peuvent être en partie expliquées par l'incapacité du modèle à prendre en compte la variabilité géomorphologique, des échanges nappe-rivières ou de la végétation rivulaire sur des tronçons de même ordre de Strahler et situés dans un même sous-bassin de calculs. L'approche stationnelle n'est pas adaptée pour la simulation de profils longitudinaux de la température. Des changements brusques de température apparaissent à la transition de certains tronçons ce qui peut être expliqué par des changements de géomorphologie ou de l'ombrage (Figure 36).



**Figure 30. Performances du modèle T-NET selon l'approche stationnelle aux 67 stations de mesures en période estivale entre 2000 et 2006. Distribution spatiale des RMSEs (a), des biais ( $T_{sim} - T_{obs}$ ) (b) et des écarts-types des erreurs (c) (Beaufort et al., 2015).**

La seconde approche de modélisation dite « par propagation » a été développée dans le but d'intégrer la propagation du signal thermique de l'amont vers l'aval tout en restant basée sur le concept de température d'équilibre. Ce type d'approche n'avait encore jamais été appliqué à une échelle régionale Elle permet de prendre en compte l'influence des conditions aux limites amont, très importantes car la température affectée aux points sources du réseau peut avoir un impact qui peut varier sur la Loire de plus de 1,5°C après 100 km depuis la source et de 0,6°C après 900 km.

L'approche par propagation permet d'obtenir la meilleure performance avec une RMSE moyenne de 1.6°C contre 1.9°C avec l'approche stationnelle sur les 128 stations de validation (2008-2012) et conduit à améliorer la simulation de 105 stations avec une diminution du RMSE de 0.4°C en moyenne (Tableau 8).

Pour les petits cours d'eau, l'approche par propagation est globalement plus performante que l'approche stationnelle et les RMSE de certaines stations peuvent être réduites de plus de 1°C. La RMSE annuelle est supérieure à 2°C pour 38 stations avec l'approche stationnelle contre seulement 20 avec l'approche par propagation qui permet de réduire les biais notamment en hiver (-0.8°C) et en été (-0.6°C). Pour les grands cours d'eau, la performance obtenue est similaire avec les deux approches avec une RMSE annuelle de 1.1°C. En effet lorsque la distance depuis la source augmente, le signal thermique provenant de l'amont devient négligeable et la météorologie devient le facteur de contrôle principal de la température des cours d'eau (Beaufort et al., 2015) ce qui explique les bonnes performances de l'approche stationnelle. Pour les stations proches des sources, l'effet de la météorologie faible et les conditions aux limites (apport de nappe, fonte des neiges, pluie) contrôle la température des cours d'eau. L'approche par propagation permet de prendre en compte l'influence du signal thermique amont et c'est pourquoi cette approche permet d'améliorer notamment la simulation de la température pour les cours d'eau situés à proximité des sources (distance depuis la source < 100 km ; Tableau 8). De plus l'approche par propagation conduit à mieux restituer les profils thermiques longitudinaux en comparaison avec l'approche stationnelle.

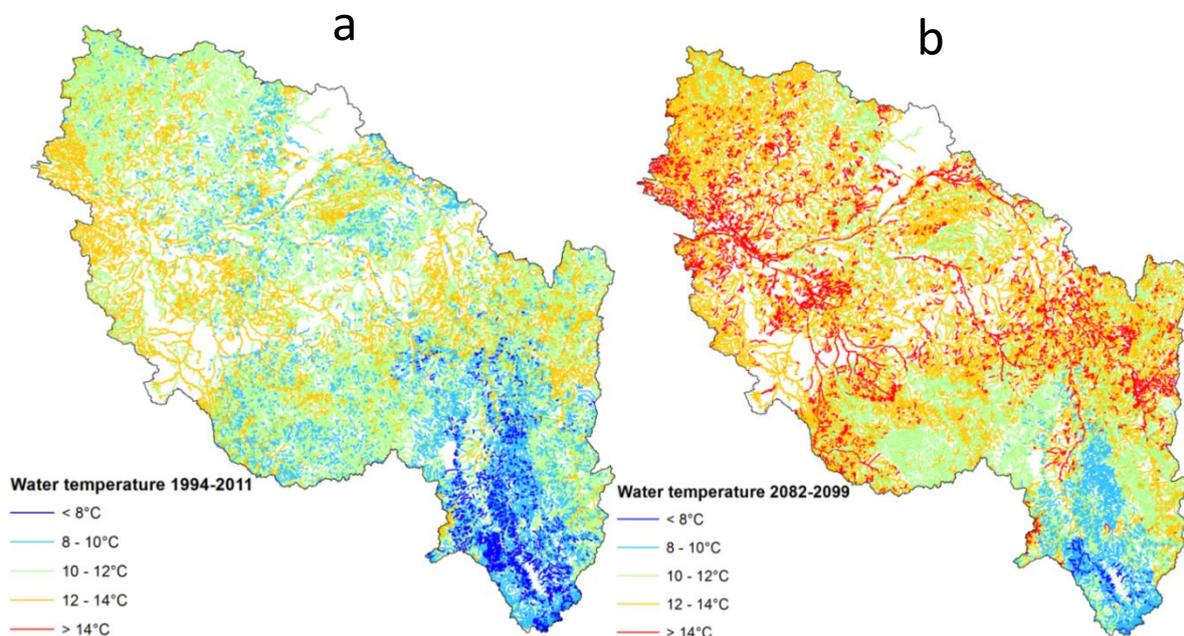
	RMSE			
	128 Stations	46 stations < 30 km	54 stations 30 - 100 km	28 stations > 100 km
<b>Approche stationnelle</b>				
Tronçons – $\Delta t$ : journalier	1.9	2.1	1.9	1.2
<b>Approche par propagation</b>				
$\Delta t$ : journalier	1.6	1.7	1.6	1.0

**Tableau 8. RMSE moyennes calculées avec les différentes approches de modélisation et les discrétisations pour les 128 stations issues du RNT en période annuelle 2008-2012.**

## 5.2. Une approche simple de modélisation pour les grands cours d'eau : estimation de l'impact du changement climatique

L'approche stationnelle a été utilisée dans le but d'étudier l'impact du changement climatique sur les régimes thermiques des cours d'eau à échéance milieu de siècle (2046-2066) et fin de siècle (2080-2100) sous forçage de 13 modèles climatiques globaux de scénario d'émission A1B (IPCC, 2007). Il ressort que l'augmentation des températures de l'eau (moyennes annuelles et moyennes mensuelles maximales) est robuste, puisque l'ensemble des scénarios testés montre une anomalie positive, du même ordre de grandeur (2°C en milieu de siècle ; 3°C en fin de siècle). La figure 33 présente à titre d'exemple les températures moyennes interannuelles en période actuelle (1994-2011) et en fin de siècle (2082-2099).

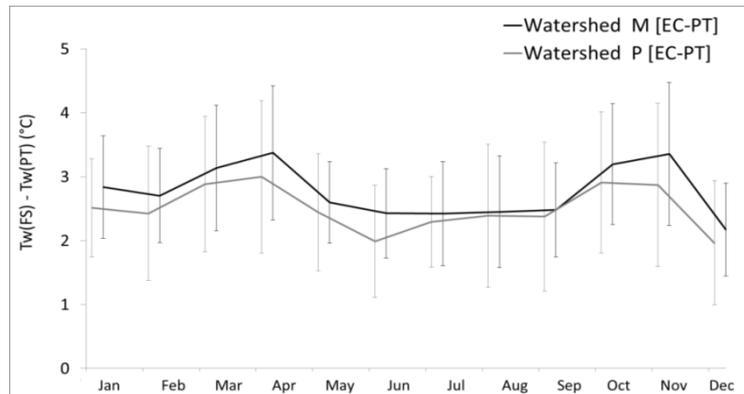
La réponse thermique des cours d'eau est contrastée. La température augmente particulièrement dans la partie aval du bassin et dans le Morvan avec une augmentation moyenne de 3,1°C ( $\pm 0,6^\circ\text{C}$ ) en fin de siècle. Il est à noter que certains cours d'eau situés en amont du bassin semblent moins affectés par le changement climatique et leur température augmente plus modérément de 1,5°C ( $\pm 0,8^\circ\text{C}$ ). Cette approche simplifiée montre que le réchauffement des cours d'eau peut être atténué pour les cours d'eau influencés par les apports de nappe ou l'ombrage.



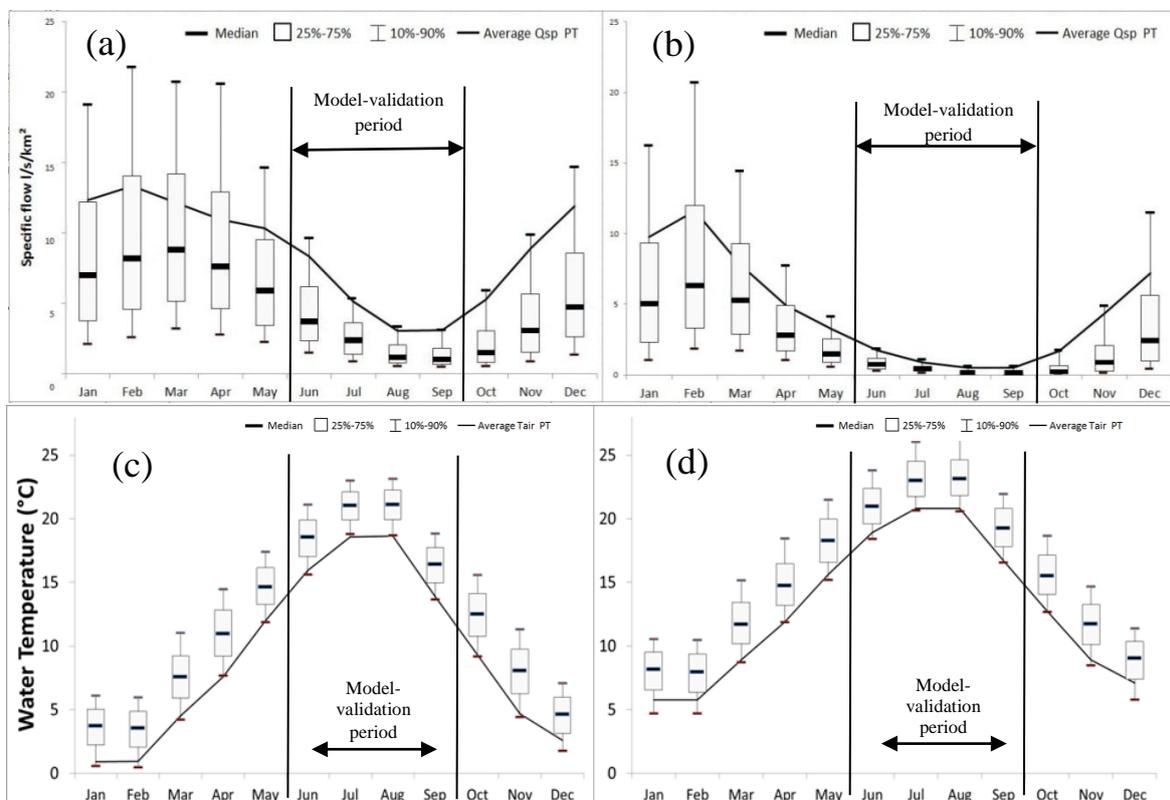
**Figure 31. Température moyenne interannuelle simulée avec le modèle T-NET selon l'approche stationnelle en (a) période actuelle (1994-2011) et (b) à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle (2082-2099) selon 13 projections climatiques de scénario A1B (IPCC, 2007).**

L'impact du changement climatique a été plus particulièrement étudié sur deux bassins versant contrastés. Le premier bassin versant (250 km<sup>2</sup>) est situé dans le Massif central à une altitude moyenne de 500 mètres. Le second bassin (150 km<sup>2</sup>) est localisé en plaine au pied du Massif armoricain à une altitude moyenne de 50 mètres. Les premiers résultats montrent une diminution du débit annuel d'environ -20%  $\pm$  10% en milieu de siècle et de -35% ( $\pm 15\%$ ) en fin de siècle sur les deux bassins étudiés (Figure 35a et 35b). Cette diminution est particulièrement accentuée en période estivale entre juin et septembre où les débits sont réduits de -45% ( $\pm 13\%$ ) à l'horizon 2100. A l'échelle

du bassin de la Loire, le modèle thermique simule une augmentation de la température de 2,2°C ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ ) en milieu de siècle et de 2,9°C ( $\pm 0,7^\circ\text{C}$ ) en fin de siècle. Pour les bassins de montagne et de plaine, la température moyenne annuelle est augmentée respectivement de 2°C ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ ) et de 1,8°C ( $\pm 0,8^\circ\text{C}$ ) en milieu de siècle, et de 2,8°C ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ ) et de 2,5°C ( $\pm 0,8^\circ\text{C}$ ) en fin de siècle (Figure 35c et 35d). L'augmentation de la température est en partie due à la diminution des débits et donc de la profondeur des cours d'eau ce qui va diminuer l'inertie thermique des cours d'eau et accentuer les températures maximales en été. L'augmentation de la température suit la même tendance saisonnière sur les deux bassins versants où les anomalies, entre la température mensuelle moyenne actuelle et la température à l'horizon 2100, sont plus importantes au printemps et en automne (+3,0°C  $\pm 0,9^\circ\text{C}$ ) qu'en été (+2,6°C  $\pm 0,7^\circ\text{C}$ ) (Figure 34). Cette augmentation de la température limitée en été, est expliquée par l'augmentation de la perte énergétique par l'évaporation et par le rayonnement ondes-longues émis par la masse d'eau.



**Figure 32. Anomalies de température de l'eau simulées (différence entre les moyennes mensuelles simulées en fin de siècle – période actuelle). La barre d'erreur correspond à une fois l'écart type des anomalies des températures simulées avec les 13 GCMs basés sur un scénario d'émission A1B.**



**Figure 33. Débits spécifiques et températures moyennes mensuelles simulées sur les bassins versants de montagne (a, c) et de plaine (b, d) à la fin du 21ème siècle (boîtes à moustache) comparées à la période actuelle (trait plein).**

Des activités anthropiques peuvent également contribuer à réguler la température des cours d'eau notamment via les eaux rejetées par les barrages réservoirs qui viennent refroidir les cours d'eau

située en aval. De plus, les annexes hydrauliques, les petits tributaires d'eau froide et les apports localisés de nappes déterminent des refuges thermiques pour les espèces de poissons d'eaux froides lors des périodes de canicule. La prise en compte de ces différents facteurs pourrait permettre de mieux identifier et restituer la dynamique thermique de ces zones spécifiques. Dans un contexte de réchauffement global, la description de l'évolution de ces refuges thermiques associés à des hétérogénéités latérales de température, revêt une importance primordiale.

Après validation et développements futurs, l'approche par propagation pourrait être utilisée pour reconstituer les régimes saisonniers actuels à une échelle régionale puis pour étudier l'évolution du régime thermique des cours d'eau en fonction de projections climatiques et hydrologiques basées sur plusieurs scénarios du 5<sup>ème</sup> rapport du GIEC (IPCC, 2013). Les conséquences sur les grands migrateurs et les aires de répartition de la faune piscicole du bassin de la Loire pourraient ainsi être estimées.

### **5.3. Apport de la prise en compte de l'eau souterraines et de l'ombrage pour les cours d'eau moyens**

En approche stationnelle, la prise en compte du 6<sup>ème</sup> flux énergétique améliore modestement les performances du modèle au niveau des 11 stations influencées par les échanges nappe-rivière en réduisant la RMSE moyenne à 2.9°C (Figure 36). Cette faible amélioration peut être expliquée par une sous-estimation des apports de nappe par le modèle hydrologique ou par une mauvaise intégration spatiale de ceux-ci. En revanche la prise en compte des conditions amont et la propagation du signal thermique permet d'améliorer significativement la simulation des stations influencées par les nappes. Le calcul de la température de nappe intégrée en condition aux limites permet d'obtenir les meilleures performances avec une RMSE moyenne de 2.2°C. Cette dernière approche a permis de diminuer la RMSE moyenne de ces 11 stations de 1.2°C par rapport à l'approche stationnelle ne prenant en compte que les échanges énergétiques à l'interface eau-atmosphère.

Les débits de nappe sont actuellement estimés via le modèle hydrologique EROS et sont supposés alimenter un tronçon hydrographique (BD Carthage) donné de manière homogène à l'intérieur d'un sous bassin de calcul (taille médiane de 190m<sup>2</sup>). La modélisation hydrogéologique de la contribution des principaux aquifères du bassin de la Loire (90 000 km<sup>2</sup> simulés à l'aval de Cours-les-Barres) a été réalisée avec EauDyssée (Monteil, 2010 ; Saleh *et al.*, 2011 ; Baratelli *et al.*, 2014) et fournit, au pas de temps journalier, la part relative des apports surfaciques et souterrains au réseau hydrographique sur une partie du bassin de la Loire. Ces résultats, qui sont en cours d'amélioration dans le cadre du projet Régulation Thermique (EPLoire, FEDER) pourraient permettre de mieux contraindre le modèle et ainsi améliorer la prise en compte des échanges nappe-rivière. Les zones d'échanges préférentielles pourraient être localisées plus précisément sur le réseau ce qui permettrait de mieux simuler les zones de refuges thermiques potentielles.

L'intégration d'un coefficient d'ombrage constant moyenné sur les 5 km en amont des stations permet d'améliorer légèrement les performances des 16 stations influencées par l'ombrage (biais moyen = 1,6°C. Le calcul de ce coefficient d'ombrage a ensuite été complexifié ce qui a permis d'intégrer un coefficient d'ombrage variable au pas de temps horaire dans le modèle. Cette complexification du coefficient d'ombrage permet de bien mieux restituer la dynamique temporelle de la température en période estivale, notamment en améliorant la simulation des variations diurnes. La digitalisation du recouvrement de la végétation, qui permet de différencier l'ombrage provenant de la rive gauche et de la rive droite, conduit à légèrement mieux simuler la température de ces stations avec une RMSE moyenne de 1,3°C ce qui conduit à diminuer la RMSE moyenne de 0,6°C.

### **5.4. Perspectives d'amélioration du modèle**

Une première perspective dans le développement du modèle consisterait à améliorer la manière de prendre en compte la propagation dans le modèle. En effet, avec l'approche actuelle, l'ensemble de la masse d'eau est transférée à la même vitesse entre le point amont et le point aval d'un tronçon. Ceci est une hypothèse, et sur les grands cours d'eau comme la Loire, il existe de nombreux refuges thermiques (chenaux secondaires, bras morts, embâcles) qui vont provoquer un ralentissement d'une partie de la masse d'eau et ainsi favoriser la mise à l'équilibre de la température de la rivière avec les conditions atmosphériques. On peut supposer que le fait de négliger ce phénomène conduit à surestimer l'influence du signal thermique provenant de l'amont dans le calcul de la température aval. Une première méthode consisterait à faire évoluer une partie de la masse d'eau indépendamment dans chaque tronçon via un système multi-agents par exemple. Cela pourrait permettre d'améliorer les simulations pour les grands cours d'eau notamment.

Les conditions thermiques aux limites amont ont une influence importante sur le calcul de la température des cours d'eau situés plus en aval. Les données de températures au niveau des sources restent manquantes ou peu accessibles. La mise en place de sondes ou d'une fibre optique dans ces zones pourraient permettre de comprendre la dynamique thermique de ces zones spécifiques et de mieux contraindre le modèle. Une seconde approche pourrait consister à utiliser des données de températures de nappes observées, disponibles dans la base de données ADES, comme conditions aux limites.

Une meilleure prise en compte de la morphologie des cours d'eau et notamment des discontinuités hydromorphologiques (étangs retenues, seuils) via la base ROE de l'ONEMA (2011) permettrait de localiser les secteurs au niveau desquels les transitions de température (entre l'amont et l'aval) peuvent être très rapides et de mieux prendre en compte leur influence. Sur des secteurs plus ciblés et avec une morphologie contrastée, la capacité du modèle à restituer des profils longitudinaux pourrait être testée à travers la mesure de la température haute résolution spatiale avec une fibre optique d'un kilomètre de long que le laboratoire a acquis cette année.

## 6. Implications pour la gestion et perspectives

### 6.1. Importance du contexte géographique et géomorphologique des stations de mesure pour l'analyse des données de température

Le suivi horaire de ces 147 stations réparties sur l'ensemble du bassin de la Loire constitue une source de données très précieuse pour comprendre le fonctionnement thermique des cours d'eau à une échelle régionale. Cependant des erreurs de mesures peuvent exister et il est nécessaire de procéder à une validation des données observées. La détection des erreurs a été réalisée manuellement et a montré qu'il était très important de tenir compte du contexte géographique et géomorphologique de chaque station. En effet nous avons pu constater que plusieurs stations pouvaient être influencées par des phénomènes naturels (étangs, élargissement du lit, fonte des neiges) ou anthropiques (barrages-réservoirs, seuils). Certains de ces facteurs peuvent provoquer des changements brusques de températures qui peuvent être confondus avec d'éventuelles erreurs de mesures par les sondes. C'est en ce sens qu'une description détaillée de ce contexte lors de l'implantation des sondes sur les sites pourrait permettre d'améliorer la détection des erreurs.

### 6.2. Les stations influencées par les conditions atmosphériques les plus vulnérables au changement climatique

Sur la base de ces observations, une classification des stations en fonction des facteurs de contrôle de leur régime thermique a été établie et a permis de différencier notamment les stations influencées par les conditions atmosphériques, par les échanges nappe-rivières et par l'ombrage provenant de la ripisylve.

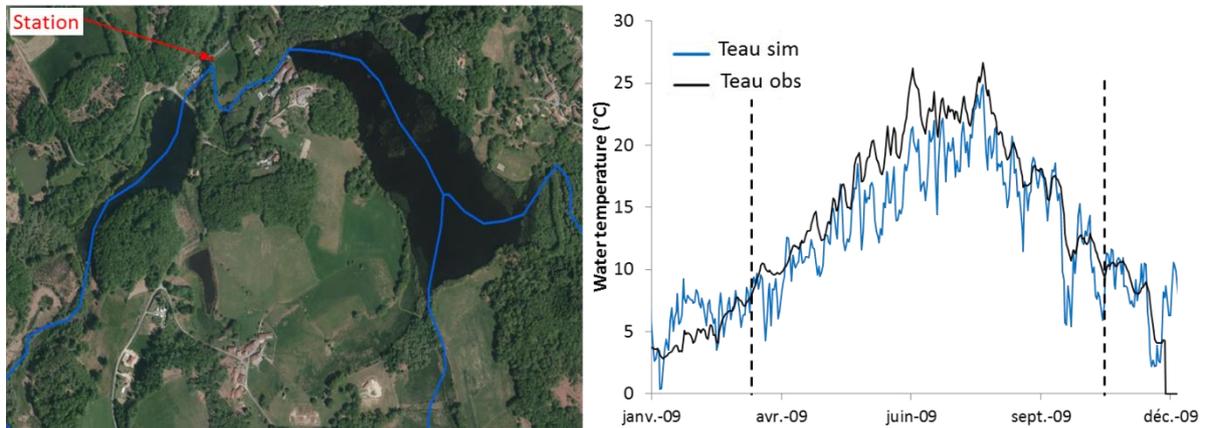
Les températures mesurées sur ces différentes stations ont une dynamique différente et on a pu constater que les cours d'eau dont la température est principalement **influencée par les conditions atmosphériques**, étaient les plus vulnérables à l'impact du changement climatique. En effet ces cours d'eau sont caractérisés par une amplitude annuelle de la température de l'eau élevée et la température de l'eau est proche de la température de l'air à la fois en été et en hiver. Une majorité des scénarios provenant du 5<sup>ème</sup> rapport du GIEC (IPCC, 2013) montrent que la température de l'air pourrait augmenter entre 2°C et 5°C à l'horizon 2100. Les cours d'eau les plus influencés par les conditions météorologiques sont ainsi les plus exposés aux effets du changement climatique et les premières prédictions simulées par le modèle thermique stationnel montrent que la température de ces cours d'eau pourrait augmenter de plus de 3°C à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle (Scénario d'émission A1B, IPCC, 2007).

### 6.3. Facteurs d'atténuation de l'impact du changement climatique sur la thermie des cours d'eau

#### 6.3.1. Préservation de la ripisylve et la limitation du nombre de plans d'eau ou de seuils

Le réchauffement de ces cours d'eau apparaît inéluctable mais certaines stratégies d'adaptation pourraient permettre de limiter cette augmentation. Par exemple, plusieurs études ont montrées que la

ripisylve arborée jouait un rôle très important sur la température de l'eau notamment en période estivale (Garner *et al.*, 2014). En effet la canopée capte une partie du rayonnement solaire ce qui diminue les apports énergétiques dans la masse d'eau et limite ainsi le réchauffement du cours d'eau. Il est donc très important d'assurer le maintien ou la mise en place d'une ripisylve arborée sur ce type de cours d'eau afin d'atténuer les effets du changement climatique en limitant le réchauffement de l'eau. La présence d'étangs (zone d'élargissement) ou de seuils en série sur les rivières conduisent à ralentir l'écoulement et à augmenter la surface d'échange entre la surface de la rivière et l'atmosphère. Ceci conduit à augmenter la mise à l'équilibre de la température de l'eau avec les conditions atmosphériques et augmente la température de l'eau (Figure 34). Il paraît donc important de limiter, déconnecter ou araser ces ouvrages afin de limiter l'augmentation de la température.



**Figure 34. Températures mesurées sur le vincou à Thouron (87VIN01) influencées par les étangs situées en amont de la station.**

### 6.3.2. Préservation des zones refuge et maintien des apports des eaux de nappe au cours d'eau

Les régimes thermiques des stations influencés par les échanges nappe-rivière sont caractérisés par une amplitude annuelle de la température de l'eau faible et notamment des faibles températures en période estivale. La température des eaux souterraines reste peu variable au cours de l'année et les apports de nappe conduisent à refroidir la température des cours d'eau en période estivale. Ces cours d'eau influencés par les apports de nappe pourraient constituer des zones refuge pour les espèces de poissons les plus sensibles au réchauffement climatique. Le maintien de ces apports de nappe apparaît primordial dans le but de limiter le réchauffement des cours d'eau en contexte de changement climatique. Ceci passe par une maîtrise des prélèvements (industriels, agricoles, AEP...) dans les cours d'eau permettant de maintenir un débit suffisant dans les cours d'eau. En effet une baisse trop importante du débit conduirait réduire à la profondeur du cours d'eau et ainsi limiter l'inertie thermique du système ce qui conduirait à augmenter la température de l'eau. Il est également nécessaire de limiter les prélèvements dans les nappes de surfaces afin de garder un niveau piézométrique assez haut permettant aux échanges nappe-rivières de perdurer.

Enfin il apparaît important de maîtriser les rejets d'effluent chaud dans les cours d'eau. Les stations issues du RNT ne semblent pas être impactées par ce type de rejet. Cependant certaines études ont montré que les activités anthropiques du bassin de la Loire pouvaient avoir un impact sur la température des cours d'eau ponctuellement et à proximité des zones de rejets. Il convient alors de continuer à encadrer ces rejets provenant des circuits de refroidissement des centrales nucléaires, des rejets industriels ou urbains ou de retenues en période estivale.

## 7. Conclusion

L'objectif de ce travail était d'analyser les données de mesures de température de l'eau issues du Réseau National Thermique et de développer plusieurs approches de modélisation à base physique dans le but de simuler la température des cours d'eau sur le bassin versant de la Loire.

La caractérisation des évolutions spatio-temporelles de la température de l'eau a montré qu'il était possible de distinguer plusieurs facteurs de contrôle de cette variable suivant la position dans le bassin et le contexte du cours d'eau :

- La température des grands cours d'eau est essentiellement contrôlée par les conditions atmosphériques ;
- La température des petits et moyens cours d'eau dépend des conditions géographiques et géomorphologiques au niveau de la station de mesure et en amont de celle-ci ; en particulier, l'ombrage lié à la ripisylve et/ou les apports de nappe peuvent contrôler la température de certains petits cours d'eau amont en jouant un rôle tampon par rapport aux variations de la température de l'air ; cet effet peut se propager d'amont en aval et doit être pris en compte pour comprendre la température de cours d'eau de taille moyenne ;
- Certains aménagements anthropiques modifient le régime thermique des cours d'eau ; les seuils ou les étangs dont l'eau restituée provient de la surface induisent un réchauffement à l'aval du cours d'eau en été ; certains barrages dont l'eau restituée est captée en profondeur de la retenue ont un effet qui dépend de la saison et du mode de gestion (exemple d'effet observé sur la Loire : le refroidissement des eaux en été)

L'approche de modélisation stationnelle utilisée dans un premier temps a montré de très bonnes capacités à simuler le régime thermique des grands cours d'eau (distance depuis la source > 100 km, RMSE moyenne des stations testées de 1,9°C ; Tab. 8) car leur température est essentiellement influencée par les conditions atmosphériques. Le modèle permet de restituer leur dynamique temporelle à une échelle horaire ou journalière aussi bien en période estivale (2000-2006) qu'en période annuelle (2008-2012). Cette approche simule la température sur chaque tronçon de la BD Carthage (52 200 tronçons, longueur moyenne de 1,7 km) en fonction de leurs caractéristiques spécifiques (longueur, largeur, pente longitudinale, végétation rivulaire). Elle a ainsi pu montrer tout son intérêt pour l'étude de la sensibilité de la température de l'eau sous changement climatique. Cependant, cette première approche montre des limites pour la simulation de la température des petits et moyens cours d'eau (distance depuis la source < 100 km ; en période annuelle, la RMSE moyenne aux stations testées est de 2,4°C ; Tab. 8). Elle montre également des difficultés importantes à reproduire la dynamique longitudinale de la température pour les grands cours d'eau. En effet, les changements brusques de géomorphologie ou d'ombrage peuvent provoquer des écarts de température importants entre deux tronçons successifs.

La seconde approche de modélisation dite « par propagation » intègre l'influence des apports thermiques de chaque affluent et des apports énergétiques provenant des eaux souterraines. Cette approche permet d'améliorer les simulations des stations situées sur des cours d'eau localisés à moins de 100 km depuis leur source en comparaison avec l'approche stationnelle (RMSE = 1,7°C ; Tab. 8). L'approche par propagation conduit à mieux restituer les profils thermiques longitudinaux des grands cours d'eau en intégrant une mémoire thermique des conditions amont ce qui permet d'éviter les changements brusques de températures entre de deux tronçons contrairement à l'approche stationnelle.

Plusieurs perspectives à donner à ce travail concernent l'amélioration de la définition des données utilisées en entrée du modèle.

- Une meilleure prise en compte des apports énergétiques provenant des eaux souterraines, pourrait permettre au modèle de mieux restituer l'effet tampon lié à ces échanges. Les débits de nappe sont actuellement estimés via le modèle EROS et sont supposés alimenter un tronçon hydrographique donné de manière homogène. La modélisation de la contribution des principaux aquifères du bassin de la Loire (90 000 km<sup>2</sup> simulés à l'aval de Cours-les-Barres) a été réalisée avec EauDyssée (Monteil, 2010 ; Flipo *et al.*, 2012) et fournit, au pas de temps journalier, la part relative des apports surfaciques et souterrains au réseau hydrographique sur une partie du bassin de la Loire. Ces résultats, qui sont en cours d'amélioration dans le

cadre du projet Régulation Thermique (EPLoire, FEDER) pourraient permettre de mieux contraindre le modèle et ainsi améliorer la prise en compte des échanges nappe-rivière.

- Une autre étape consisterait à améliorer le calcul de l'ombrage issu de la ripisylve. Il est actuellement estimé à un pas de temps journalier en tenant compte de la position relative du soleil, de l'orientation du cours d'eau et du taux de recouvrement de végétation rivulaire. Procéder à une cartographie de bordures de cours d'eau, en s'appuyant sur des images télédéteectées (LIDAR), conduirait à mieux définir le taux de recouvrement de la ripisylve en différenciant la rive droite de la rive gauche. De plus, l'orientation est calculée en moyenne sur chaque tronçon individuellement sans tenir compte des éventuels changements d'orientation du tronçon. Les arbres sont définis en tant que feuillus sur l'ensemble du bassin alors que des forêts de conifères sont présentes sur la partie amont du bassin amont. L'application d'une sénescence foliaire à l'ensemble de la végétation présente sur le bassin peut provoquer une sous-estimation de l'effet de l'ombrage en période hivernale sur les cours d'eau situés à proximité de conifères. Une redéfinition de l'orientation du tronçon à une échelle spatiale plus fine (~100 m) ainsi qu'une spatialisation des essences d'arbres présentes sur les cours d'eau du bassin de la Loire permettrait de mieux estimer l'ombrage issu de la végétation rivulaire avec le modèle et ainsi améliorer les simulations de la température. Le modèle actuel ne prend pas en compte les apports énergétiques provenant de la fonte des neiges qui peuvent avoir un impact important dans la zone amont du bassin. Le modèle n'a pas pu être testé pour des bassins versants de montagne, par manque de données (seulement 2 stations situées à plus de 1000 mètres d'altitude). Le développement d'un module intégrant la fonte de neige pourrait permettre d'améliorer les simulations thermiques pour les rivières de montagne.
- Enfin, le modèle ne considère pas l'influence des rejets des barrages-réservoirs qui peuvent perturber le signal thermique en aval. Une étape d'amélioration viserait donc à intégrer leurs effets en prenant en compte les débits rejetés par ces ouvrages qui peuvent refroidir de plusieurs degrés la température des cours d'eau aval.

La caractérisation des évolutions spatio-temporelles des régimes thermiques par le biais de la compréhension de leurs facteurs de contrôle à une échelle régionale apportent des informations clés pour de nombreux travaux en écologie étudiant la répartition des aires géographiques des espèces aquatiques. Une première application de ce travail montre que la simulation des aires de répartition des espèces d'anguilles, de vairons et de spirilins à l'état actuel (1994-2011) peut différer de manière importante suivant si la température de l'air ou de l'eau est utilisée en entrée des modèles de distribution des espèces (Buisson *et al.*, 2015). D'une manière plus générale, ces travaux peuvent mettre en évidence des zones de refuges thermiques, qui constituent des habitats privilégiés pour la faune écologique.

De plus, en l'absence de données observées sur le long-terme, la modélisation peut aussi apporter des éléments sur les évolutions actuelles des régimes thermiques, comme état de référence pour des études d'impact suite aux changements climatiques et hydrologiques annoncés au cours du XXIème siècle. Ce travail a été fait avec la modélisation stationnelle et après validation et développements futurs, le modèle par propagation pourrait être utilisé pour reconstituer les régimes saisonniers actuels à une échelle régionale. Il permettrait aussi d'étudier l'impact du changement climatique à échéance milieu du siècle (2046-2066) et fin du siècle (2080-2100) en fonction de projections climatiques et hydrologiques basées sur plusieurs scénarios du 5<sup>ème</sup> rapport du GIEC (IPCC, 2013). Les conséquences sur les grands migrateurs et les aires de répartition de la faune piscicole du bassin de la Loire pourraient ainsi être estimées.

## Bibliographie

- Arrigoni AS, Poole GC, Mertes LAK, O'Daniel SJ, Woessner WW, Thomas SA. 2008** : Buffered, lagged, or cooled? Disentangling hyporheic influences on temperature cycles in stream channels. *Water Resources Research* 44: W09418. DOI:10.1029/2007WR006480.
- Beaufort A, Curie F, Moatar F, Melin E, Thiéry D 2015** : T-NET, a dynamic model for simulating hourly stream temperature at the regional scale based on a network topology. Submitted in *Hydrological Processes*.
- Beaufort A, Moatar F, Curie F, Ducharne A, Bustillo V, Thiéry D 2015** : River temperature modelling by Strahler order at the regional scale in the Loire River basin, France. *River Research and Applications*, in press. DOI: 10.1002/rra.2888
- Beaufort A, Bustillo V, Curie F, Moatar F, Ducharne A, Thiéry D 2013** : Water temperature sensitivity under climatic change: comparison between mountain and lowland rivers in the Loire basin. In B. Arheimer (ed.): *Understanding Freshwater Quality Problems in a Changing World*, p321-328, IAHS Publication 361, Wallingford, UK.
- Binet S, Auterives C, Charlier JB. 2011** : Construction d'un modèle hydrogéologique d'étiage sur le val d'Orléans. ICERE, rapport final.
- Bustillo V, Moatar F, Ducharne A, Thiéry D, Sauquet D, Vidal J-Ph, Bernard A. 2011** : Rapport scientifique du projet ICC-HYDROQUAL. Action 2 : Évolution du régime thermique de la Loire et de ses affluents sous changement climatique. (64 pages)
- Bustillo V, Moatar F, Ducharne A, Thiéry D, Poirel A. 2014** : A multimodel comparison for assessing water temperatures under changing climate conditions via the equilibrium temperature concept: case study of the Middle Loire River, France. *Hydrological Processes* 28: 1507-1524. DOI: 10.1002/hyp.9683.
- Caissie D, El-Jabi N, St-Hilaire A. 1998** : Stochastic modelling of water temperatures in a small stream using air to water relations. *Canadian Journal of Civil Engineering* 25: 250–260.
- Caissie D. 2006** : The thermal regime of rivers: a review. *Freshwater Biology* 51: 1389-1406.
- Edinger JE, Duttweiler D, Geyer J. 1968** : The response of water temperatures to meteorological conditions. *Water Resources Research* 4: 1137-1143.
- Ebersole JL, Liss WJ, Frissell CA. 2003** : Cold water patches in warm streams: physicochemical characteristics and the influence of shading. *Journal of the American Water Resources Association* 39: 355–368. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2003.tb04390.x
- Garner G, Hannah DM, Sadler JP, Orr HG. 2013** : River temperature regimes of England and Wales: spatial patterns, inter-annual variability and climatic sensitivity. *Hydrological Processes* 28: 5583–5598. DOI: 10.1002/hyp.9992
- Garner G, Malcolm IA, Sadler JP, Millar CP, Hannah D M. 2014** : Inter-annual variability in the effects of riparian woodland on micro-climate, energy exchanges and water temperature of an upland Scottish stream, *Hydrological Processes* DOI:10.1002/hyp.10223, in press.
- Hannah DM, Malcolm IA, Soulsby C, Youngson AF. 2008** : A comparison of forest and moorland stream microclimate, heat exchanges and thermal dynamics. *Hydrological Processes* 22: 919-940.
- Hannah DM, Malcolm IA, Bradley C. 2009** : Seasonal hyporheic temperature dynamics over riffle bedforms. *Hydrological Processes* 23: 2178-2194.
- Hannah DM, Garner G. 2015** : River water temperature in the United Kingdom: changes over the 20th century and possible changes over the 21st century. *Progress in Physical Geography*. DOI: DOI: 10.1177/03091333145506694
- Herb WR, Stefan HG. 2011** : Modified equilibrium temperature models for cold-water streams. *Water Resources Research* 47: W06519. DOI: 10.1029/2010WR009586
- Imholt C, Soulsby C, Malcolm IA, Gibbins CN. 2012** : Influence of contrasting riparian forest cover on stream temperature dynamics in salmonid spawning and nursery streams. *Ecohydrology* 6: 380–392. DOI:10.1002/eco.1291
- Kelleher C, Wagener T, Gooseff M, McGlynn B, McGuire K, Marshall L. 2012** : Investigating controls on the thermal sensitivity of Pennsylvania streams. *Hydrological Processes* 26: 771–785. DOI: 10.1002/hyp.8186
- Kinouchi T, Yagi H, Miyamoto M. 2007** : Increase in stream temperature related to anthropogenic heat input from urban wastewater. *Journal of Hydrology* 335: 78–88. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2006.11.002 Mackey

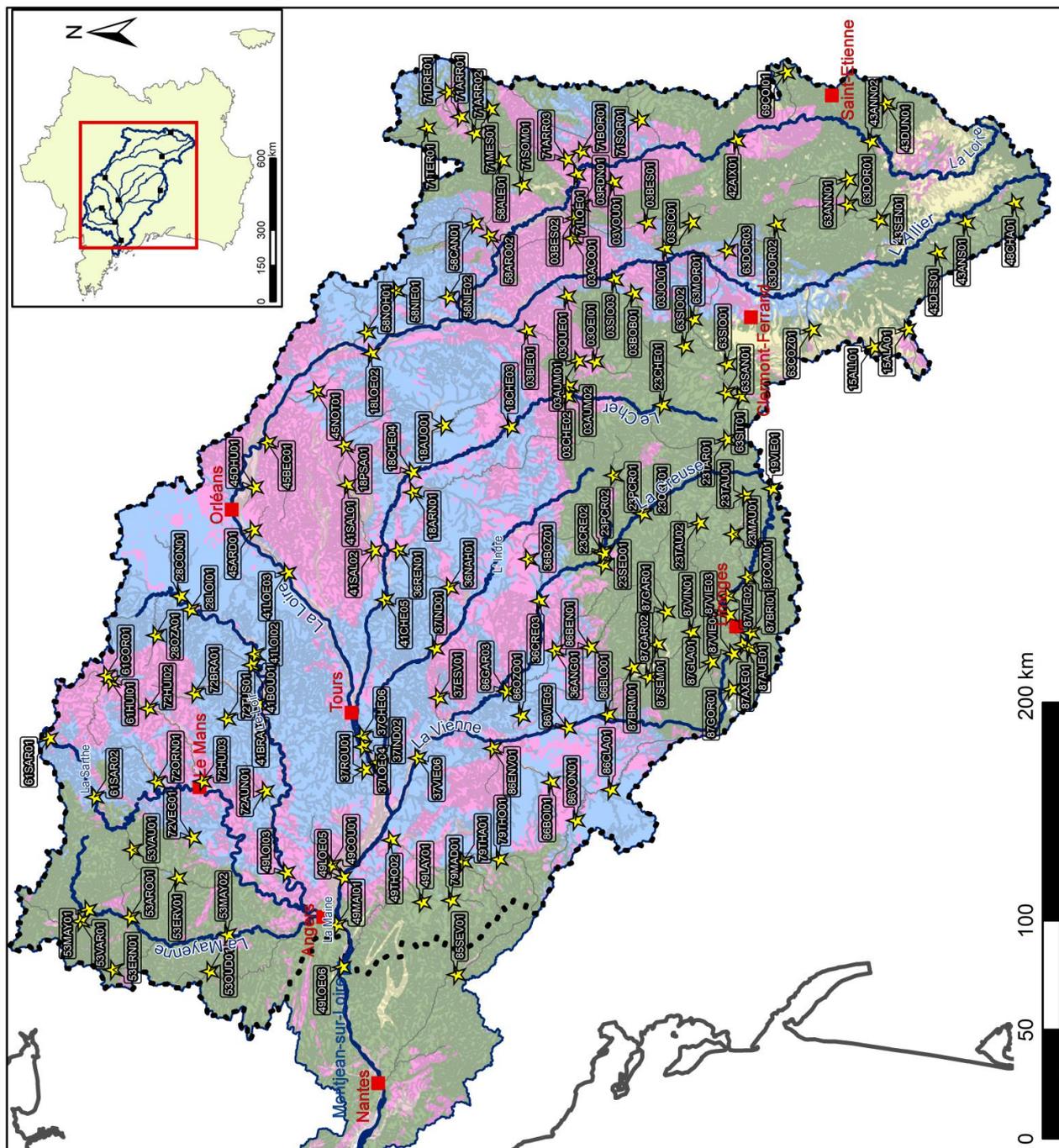
- Lalot E, Curie F, Wawrzyniak V, Schomburgk S, Piégay H, Moatar F. 2014** : Using satellite infrared thermal images to characterize and quantify the groundwater discharge from the Beauce aquifer to the middle Loire River. HESS Submitted
- Leach JA, Moore RD. 2014** : Winter stream temperature in the rain-on-snow zone of the Pacific Northwest: influences of hillslope runoff and transient snow cover. *Hydrology and Earth Systems Science* 18: 819-838
- Li GY, Jackson CR, Krasinski KA. 2012** : Modeled riparian stream shading: agreement with field measurements and sensitivity to riparian conditions. *Journal of Hydrology* 428: 142–151 DOI:10.1016/j.jhydrol.2012.01.032
- Martin JC. 1999** : Piézométrie de la nappe de Beauce. Bilan du réseau piézométrique. Etat corrigé de hautes eaux 1986. Rap. BRGM R 40379, 89p. 32 fig., 6 tabl., 1 pl., 3 ann.
- Moatar F, Gailhard J. 2006** : Water temperature behaviour in the River Loire since 1976 and 1881. *C.R. Geosciences* 338: 319-328.
- Moatar F, Meybeck M, Poirol A. 2009** : Variabilité journalière de la qualité des rivières et son incidence sur la surveillance à long terme : exemple de la Loire moyenne. Daily variability and its implication on long term river water quality surveys: the Middle Loire example. *La Houille Blanche* 4: 91-99.
- Moatar F, Ducharne A, Thiéry D, Bustillo V, Sauquet E, Vidal JP. 2010** : La Loire à l'épreuve du changement climatique. *Géosciences* 12: 78-87. <http://www.brgm.fr/dcenewsFile?ID=1306>
- Mohseni O, Stefan HG. 1999** : Stream temperature/air temperature relationship: a physical interpretation. *Journal of Hydrology* 218: 128–141.
- Monteil C. 2011** : Estimation de la contribution des principaux aquifères du bassin versant de la Loire au fonctionnement hydrologique du fleuve à l'étiage. Thèse, Mines Paris Tech.
- Moore RD, Sutherland P, Gomi T, Dhakal A. 2005** : Thermal regime of a headwater stream within a clear-cut, coastal British Columbia, Canada. *Hydrological Processes* 19: 2591-2608.
- Mosley MP. 1982** : New Zealand River Temperature Regimes, Water and Soil Miscellaneous Publication No. 36 . Water and Soil Division Ministry of Works and Development for the National Water and Soil Conservation Organisation: Christchurch.
- O'Driscoll MA, DeWalle DR. 2006** : Stream-air temperature relations to classify stream-ground water interactions in a karst setting, central Pennsylvania, USA. *Journal of Hydrology* 329: 140–153.
- Ouellet V, Secretan Y, St-Hilaire A, Morin J. 2014b** : Water temperature modelling in a controlled environment: comparative study of heat budget equations. *Hydrological Processes* 28: 279–292. DOI: 10.1002/hyp.9571
- Poulin M. 1980** : Modélisation du comportement thermique des cours d'eau, application au Rhin, Thèse de Docteur-Ingénieur, Université Pierre et Marie Curie et Ecole des Mines de Paris, Paris, 144 pp + annexes.
- Saleh F, Ducharne A, Oudin L, Flipo N, Ledoux E 2013** : Impact of river bed morphology on discharge and water levels simulated by a 1D Saint-Venant hydraulic model. *Journal of Hydrology*, 476, 169-177
- Story A, Moore RD, Macdonald JS. 2003** : Stream temperatures in two shaded reaches below cut blocks and logging roads: downstream cooling linked to subsurface hydrology. *Canadian Journal of Forest Research* 33: 1383–1396.
- Tonina D, Buffington JM. 2009** : Hyporheic exchange in mountain rivers I: Mechanics and environmental effects. *Geography Compass* 3(3): 1063-1086.
- Torgersen CE, Faux RN, McIntosh BA, Poage NJ, Norton DJ. 2001** : Airborne thermal remote sensing for water temperature assessment in rivers and streams. *Remote Sensing of Environment* 76: 386–398.
- Webb BW, Zhang Y. 1997** : Spatial and seasonal variability in the components of the river heat budget. *Hydrological Processes* 11: 79–101.
- Webb BW, Walsh AJ. 2004** : Changing UK river temperatures and their impact on fish populations. In *Hydrology: Science and Practice for the 21st Century*, Vol. II, (Proceedings of the British Hydrological Society International Conference, Imperial College, London, July 2004), Webb B, Acreman M, Maksimovic C, Smithers H, Kirby C (eds). British Hydrological Society London, UK; 177–191.
- Webb BW, Zhang Y. 2004** : Inter-annual variability in the non-advective heat energy budget of Devon streams and rivers. *Hydrological Processes* 18: 2117–2146.
- Zhang CL, Zou XY, Gong JR., Liu LY, Liu YZ. 2004** : Aerodynamic roughness of cultivated soil and its influences on soil erosion by wind in a wind tunnel. *Soil and Tillage Research* 75: 53–59
- Zwieniecki MA, Newton M. 1999** : Influence of streamside cover and stream features on temperature trends in forested streams of Western Oregon. *Western Journal of Applied Forestry* 14: 106–113.

## Table des illustrations

Figure 1 : Facteurs de contrôle de la température de l'eau (schéma modifié issu de Caissie et al, 2006).....	13
Figure 2. Schématisation de la variabilité de la température moyenne journalière et de l'amplitude diurne en fonction de la direction à l'aval/l'ordre de Strahler (Caissie et al., 2006) .....	16
Figure 3. Nombre de mesures horaires de température du RNT, récupérées lors de l'extraction faite par l'ONEMA le 24/10/2013) .....	17
Figure 4. Bassin versant de la Loire avec ses 3 grands ensembles. Représentation du réseau hydrographique principal et localisation des villes, des barrages et des centrales nucléaires. ....	18
Figure 5. Principales formations aquifères du bassin de la Loire (source BD LISA – BRGM) .....	19
Figure 6. Localisation des stations de mesures de la température de l'eau et de leur répartition géographique pour les trois grands ensembles. ....	20
Figure 7. Mise en évidence de défauts d'enregistrement sur les chroniques de température : (a) dédoublement horaire des valeurs, 69COI01 – (b) enregistrement de valeurs aberrantes, 49MAI01 .	21
Figure 8. Mise en évidence d'exondement : (a) Besbre à Dompierre sur la période estivale – (b) Creuse à Rivarennes durant une période froide .....	21
Figure 9. Chronique horaire de la température de l'eau mesurée au niveau de la Loire à Saint-Satur au cours de l'année 2009 : (a) chronique annuelle et (b) chronique estivale .....	23
Figure 10. Représentation spatiale des températures moyennes annuelles de l'eau (TwA) sur le bassin de la Loire (a) et histogramme de distribution (b). ....	24
Figure 11. Evolution des températures moyennes mensuelles au cours de l'année sur la période 2008-2012 .....	24
Figure 12. Représentation spatiale des températures de l'eau mensuelles au mois le plus chaud (TwXM) et au mois le plus froid (TwNM) sur le bassin de la Loire (a et c) et histogramme de distribution associé à ces deux métriques (b et d). ....	25
Figure 13. Représentation spatiale des différences de températures entre l'eau et l'air mensuelles au mois le plus chaud ( $DTwXM = TwXM_{eau} - TwXM_{air}$ ) et au mois le plus froid ( $DTwNM = TwNM_{eau} - TwNM_{air}$ ) sur le bassin de la Loire (a et c) et histogramme de distribution associé à ces deux métriques (b et d). ....	26
Figure 14. Représentation spatiale l'amplitude annuelle de la température de l'eau entre le mois le plus froid et le mois le plus chaud ( $DTwM$ ) sur le bassin de la Loire (a) et histogramme de distribution (b). ....	27
Figure 15. Représentation spatiale des températures moyennes maximales sur 7 jours (TwX7J) sur le bassin de la Loire (a) et histogramme de distribution (b). ....	27
Figure 16. Représentation spatiale des variations diurnes moyennes pendant le mois le plus chaud ( $DTw24H$ ) sur le bassin de la Loire (a) et histogramme de distribution (b). ....	28
Figure 17. Evolution longitudinale de la température hebdomadaire maximale au mois le plus chaud TwX7J (a) et de l'amplitude journalière au mois le plus chaud DTw24H (b) sur la Vienne et sur la Loire avec précision des confluences avec leurs principaux affluents et de la zone de résurgence de la nappe de Beauce (Lalot et al., submitted).....	29
Figure 18. Températures hebdomadaires de l'eau représentées en fonction des températures hebdomadaires de l'air avec les régressions linéaires associées présentant : (a) coefficient directeur "fort", (b) un coefficient directeur "faible" et (c) un coefficient directeur "faible". ....	31
Figure 19. Représentation des paramètres des régressions linéaires (ordonnées à l'origine et pentes) entre Tw7J et Ta7J des 128 stations et de la droite théorique calculée à partir du modèle de mélange appliqué à la station de la Loire aval à Saint-Mathurin. ....	32
Figure 20. Représentation des résultats obtenus par régressions linéaires effectuées sur 128 stations sur les relations entre les températures de l'air et de l'eau hebdomadaires. ....	33
Figure 21. Température de l'eau moyenne mensuelle normalisée par la moyenne sur les trois groupes de stations identifiés. Les barres d'erreur représentent 1 fois l'écart-type de chaque série...	34
Figure 22. Coefficients d'ombrage moyennés en été entre 7h et 21h sur l'ensemble des tronçons situés jusqu'à 5 km en amont de chaque station RNT représentation de l'ombrage moyen par ordre de Strahler. ....	35
Figure 23. Schéma récapitulatif de la classification des stations effectuée en fonction de leur facteur de contrôle principal : 1a « influence atmosphérique sans ombrage », 1b « influence atmosphérique avec ombrage », 2a « influence mixte sans ombrage », 2b « influence mixte avec ombrage moyen », 2c « influence mixte avec ombrage fort » et 3 « influence des apports de nappe». ....	37
Figure 24. Distribution des principales caractéristiques des stations suivant leur facteur de contrôle principal : aire de drainage (km <sup>2</sup> ), pente (m/km), débit spécifique moyen entre 2008 et 2012 (l/s) et la température de l'air moyenne entre 2008 et 2012 (°C). ....	38

Figure 25. Représentation des stations en fonction de leur facteur de contrôle identifié .....	39
Figure 26. Températures mesurées et simulées à la station du Vincou à Thouron (87VIN01) (a) et biais (Tsim-Tobs) associés (b). .....	40
Figure 27. Températures mesurées et simulées à la station du Vincou à Thouron (87VIN01) (a) et biais (Tsim-Tobs) associés (b). .....	40
Figure 28. Principe du modèle thermique de la température des cours d'eau selon l'approche stationnelle et l'approche par propagation .....	42
Figure 29. Cartographie du réseau hydrographique (BD CARTHAGE®) sur le bassin de la Loire. ....	43
Figure 30. Performances du modèle T-NET selon l'approche stationnelle aux 67 stations de mesures en période estivale entre 2000 et 2006. Distribution spatiale des RMSEs (a), des biais (Tsim – Tobs) (b) et des écarts-types des erreurs (c) (Beaufort et al., 2015). .....	46
Figure 31. Température moyenne interannuelle simulée avec le modèle T-NET selon l'approche stationnelle en (a) période actuelle (1994-2011) et (b) à la fin du 21 <sup>ème</sup> siècle (2082-2099) selon 13 projections climatiques de scénario A1B (IPCC, 2007). .....	47
Figure 32. Anomalies de température de l'eau simulées (différence entre les moyennes mensuelles simulées en fin de siècle –période actuelle). La barre d'erreur correspond à une fois l'écart type des anomalies des températures simulées avec les 13 GCMs basés sur un scénario d'émission A1B. ....	48
Figure 33. Débits spécifiques et températures moyennes mensuelles simulées sur les bassins versants de montagne (a, c) et de plaine (b, d) à la fin du 21ème siècle (boîtes à moustache) comparées à la période actuelle (trait plein). .....	48
Figure 34. Températures mesurées sur le vincou à Thouron (87VIN01) influencées par les étangs situées en amont de la station.....	51
Tableau 1. Présentation des pourcentages de valeurs éliminées sur les stations en fonction des régions dans lesquelles elles sont situées. ....	22
Tableau 2. Barycentres des métriques calculées pour chaque classe de stations définie par CAH ...	30
Tableau 3. Métriques calculées sur les stations identifiées avec le régime thermique le plus influencé par les apports d'eaux souterraines (BP = bassin parisien).....	33
Tableau 4. Métriques de températures moyennées sur les stations du groupe 1 influencées par les conditions atmosphériques et regroupés en fonction de leur coefficient d'ombrage (SF) .....	35
Tableau 5. Métriques de températures moyennées sur l'ensemble des stations du groupe 2 regroupées en fonction de leur coefficient d'ombrage (SF) .....	36
Tableau 6. Métriques de températures moyennées sur l'ensemble de stations du groupe 3 regroupées en fonction de leur coefficient d'ombrage (SF) .....	36
Tableau 7. Formulations et paramètres utilisés pour calculer les flux énergétiques intervenant aux interfaces eau/atmosphère et nappe/rivière .....	44
Tableau 8. RMSE moyennes calculées avec les différentes approches de modélisation et les discrétisations pour les 128 stations issues du RNT en période annuelle 2008-2012. ....	47

## Annexe 1 : Carte de situation du bassin versant de la Loire



### Légende

- ★ Stations RNT
  - Villes majeures
  - Exutoire du BV étudié
  - Principaux cours d'eau
  - ⋯ BV étudié
  - ⊂ Limite du BV de la Loire
  - Cours d'eau avec station
  - Réseau hydrographique
- ### Lithologie
- Alluvions fluviales
  - Roches non carbonatées
  - Roches carbonatées
  - Roches plutoniques
  - Roches volcaniques

## Annexe 2 : Période de suivi de la température de l'eau des stations RNT entre 2008 et 2012

Code station	ID	Localisation	2008	2009	2010	2011	2012	% valeurs éliminées
03AC001	1588	ACOLIN à THIEL-SUR-ACOLIN	11-12	1-12	1-12	1-12	1-12	0
42AIX01	2333	AIX à SAINT-GEORGES-DE-BAROILLE	10-12	1-10				3
15ALA01	1803	ALAGNON à JOURSAC	9-12	1-12	1-12	1-12	1-12	0
58ALE01	2580	ALENE à LUZY	11-12	1-12	1-12	1-12	1 / 3-12	31
15ALL01	1802	ALLANCHE ou COURBIERES + PRADIERS	9-12	1-12	1-12	1-10		4
36ANG01	2218	ANGLIN à MAUVIERES	8-12	1-12	1-12	1-8		0
63ANN01	2653	ANCE DU NORD à SAUVESSENGES	11-12	3-12	3-11	2-12	3-12	1
43ANN02	2344	ANCE-DU-NORD à BEAUZAC		10-12	1-8	5-12	1-8	2
43ANS01	2347	ANCE-DU-SUD à SAINT-PREJET-D'ALLIER		10-12	3-7	5-12	1-6	14
45ARD01	2373	ARDOUX à CLERY-SAINT-ANDRE	9-12	1-4				1
18ARN01	1862	ARNON à MEREAU	7-12	1-12	1-12	1-10	7-12	0
53ARO01	2499	ARON à MOULAY		5-12	1-12	1-8		0
58ARO02	2582	ARON à VERNEUIL		4-12	1-12	1-12	1 / 3-12	0
71ARR01	2800	ARROUX à AUTUN	12	2-3				1
71ARR02	2801	ARROUX à LAIZY	12	2-12	1-3 / 11-12	1-12	1 / 3-12	1
71ARR03	2804	ARROUX à RIGNY-SUR-ARROUX		2-12	1-12	1-12	1-9	0
87AUE01	3027	AURENCE à AIXE-SUR-VIENNE	10-12	1-11	8-12			0
03AUM01	1600	AUMANCE à COSNE-D'ALLIER	10-12	1-12	1-12	1-12	1-12	0
03AUM02	1602	AUMANCE à HERISSON	10-12	1-12	1-6	7-12	1-12	2
72AUN01	2811	AUNE à PONTVALLAIN	7-12	1-10				5
18AUO01	1856	AURON à BOURGES	7-12	1-12	1-12	1-10	7-12	2
87AXE01	3028	AIXETTE à AIXE-SUR-VIENNE		7-11	8-12	1-12	1	0
45BEC01	2366	BEC D'ABLE à SULLY-SUR-LOIRE	7-12	1-12	1-12	1-11		0
63BED01	2661	BEDAT à SAINT-LAURE	11-12	1-12	1-12	1-12	1 / 3-6 / 12	1
86BEN01	3013	BENAIZE à THOLLET				9-12	1-10	0
03BES01	1586	BESBRE à SAINT-PRIX	11-12	1-12	1-12	1-12	1-12	0
03BES02	1587	BESBRE à DOMPIERRE-SUR-BESBRE	11-12	1-12	1-12	1-12	1-12	0
03BIE01	1597	BIEUDRE à POUZY-MESANGY	11-12	1-12	1-12	1-12	1-12	0
86BLO01	3001	PETITE BLOURDE à PERSAC	6-12	1-12	1-12	1-12	1-10	0
03BOB01	1592	BOUBLE à CHAREIL-CINTRAT	10-12	1-12	1-12	1-12	1-12	0
86BOI01	3006	BOIVRE à POITIERS	6-12	1-12	1-12	1-12	1-10	11
71BOR01	2803	BOURBINCE à VITRY-EN-CHAROLLAIS		1-4 / 12	1-12	1-12	1-6	0
41BOU01	2321	BOULON à MAZANGE	7-12	1-12	1-5 / 11-12	1-12	1-5	5
36BOZ01	2214	BOUZANNE à VELLES	8-12	1-4 / 7-12	1-12	1-8	4-11	2
72BRA01	2808	BRAYE à VIBRAYE	7-12	1-9				0
41BRA02	2322	BRAYE à SOUGE	7-12	1-12	1-5 / 11-12	1-5 / 10		2
87BRI01	3026	BRIANCE à CONDAT-SUR-VIENNE		1 / 6-8				2
87BRM01	3036	BRAME à ORADOUR-SAINT-GENEST	11-12	2-11	8-12	1-12	1	3
58CAN01	2581	CANNE à SAINT-GRATIEN-SAVIGNY		2-12	1-2 / 5-12	1-12	1 / 3-12	0
48CHA01	2426	CHAPEAUROUX à PIERREFICHE	10-12	1-7 / 9-12	1-12	1-12	1-8	0
23CHE01	1934	CHER à CHAMBONCHARD				3-9		1
03CHE02	1599	CHER à VALLON-EN-SULLY	10-12	1-12	1-12	1-12	1-12	0
18CHE03	1852	CHER à BRUERE-ALLICHAMPS	7-12	1-12	1-12	7-12	1-12	1
18CHE04	1853	CHER à FOECY	7-12	1-12	1-12	1-10	7-12	5
41CHE05	2319	CHER à SAINT-AIGNAN	7-12	1-6				2
37CHE06	2222	CHER à SAVONNIERES	7-12	1-12	1-6			0
86CLA01	3003	CLAIN à ANCHE	6-12	1-12	1-12	1-12	1-6	3
69COI01	2760	COISE à LARAJASSE	9-12	1-12	1-12	4-5		0
87COM01	3020	COMBADE à SAINT-DENIS-DES-MURS	10-12	1-11	8-12			0
28CON01	2028	CONIE à DONNEMAIN-SAINT-MAMES	9-12	1-12	1-12	1-8	11-12	0
61COR01	2632	CORBIONNE à BRETONCELLES		5-12	1-12	1-12	1-10	5
49COU01	2432	COUASNON à GEE	7-12	1-12	1-7			2
63COZ01	2656	COUZE PAVIN à SAINT-DIERY	11-12	1-12	1 / 3-12	1-5 / 7 / 11-12	1 / 12	4
23CRE01	1941	CREUSE à GLENIC				9-12	1-8	1
23CRE02	1942	CREUSE à FRESSELINES				8-12	1-9	0
36CRE03	2215	CREUSE à RIVARENNES	8-12	1-12	1-12	1-8		3
43DES01	2348	DESGES à DESGES		10-12	1-7	5-12	1-7	3
45DHU01	2370	DHUY à SANDILLON			4-12	1-11		0
63DOR01	2662	DORE à DORE-L'EGLISE		2-12	1-7	8-12	1-12	4
63DOR02	2665	DORE à OLLIERGUES		4-12	1 / 3-12	1-12	1-12	1
63DOR03	2666	DORE à DORAT	11-12	1-12	1-8 / 10-12	1-4 / 7-12	1-5 / 11-12	5

Code station	ID	Localisation	2008	2009	2010	2011	2012	% valeurs éliminées
71DRE01	2799	DREE à SAINT-LEGER-DU-BOIS	12	2-8				1
43DUN01	2342	DUNIERES à DUNIERES		10-12	1 / 3-8	5-12	1-8	3
86ENV01	3011	ENVIGNE à CHATELLERAULT-THURE	6-12	1-12	1-12	1-12	1-10	0
53ERN01	2500	ERNEE à LARCHAMP	7-12	1-12	1-12	1-8		0
53ERV01	2494	ERVE à CHAMMES	7-12	1-12	1-12	1-8		2
37ESV01	2230	ESVES à LIGUEIL	7-12	1-12	1-6			3
87GAR01	3032	GARTEMPE à BESSINES-SUR-GARTEMPE	11-12	1-5	8-12	1-12	1	2
87GAR02	3035	GARTEMPE à SAINT-BONNET-DE-BELLAC	11-12	2-11	8-12	1-12	1	1
86GAR03	3015	GARTEMPE à LA ROCHE POSAY	6-12	1-12	1-12	1-12	1-10	2
87GLA01	3030	GLANE à ORADOUR-SUR-GLANE		7-11	8-12	1-12	1	5
87GOR01	3031	GORRE à ROCHECHOUART			8-12	1-12	1	4
61HUI01	2631	HUISNE à CONDEAU		5-12	1-12	1-10		0
72HUI02	2818	HUISNE à AVEZE	7-12	1-11				0
72HUI03	2819	HUISNE à LE MANS	7-12	1-5				0
37IND01	2224	INDRE à SAINT-HIPPOLYTE	7-12	1-10				8
37IND02	2226	INDRE à LIGNIERES-DE-TOURAIN	7-12	1-7 / 10-12	1-6			2
03JOL01	1590	JOLAN à CUSSET	10-12	1-12	1-12	1-12	10-12	0
49LAY01	2441	LAYON à CLERE-SUR-LAYON	7-12	1-12	1-7			18
71LOE01	2805	LOIRE à LA MOTTE-SAINT-JEAN	12	1-12	1-12	1-2 / 5-12	1-9	0
18LOE02	1849	LOIRE à SAINT-SATUR	7-12	1-12	1-12	1-10	7-12	0
41LOE03	2307	LOIRE à MUIDES-SUR-LOIRE	7-12	1-12	1-7 / 10-12	1-12	1-7	3
37LOE04	2221	LOIRE à VILLANDRY	7-12	1-12	1-7			0
49LOE05	2430	LOIRE à SAINT-MATHURIN-SUR-LOIRE	7-12	1-9				1
49LOE06	2444	LOIRE à MONTJEAN-SUR-LOIRE	7-12	1-9				29
28LOI01	2029	LOIR à ST DENIS LES PONTS - Aval CHATEAUDUN	9-12	1-12	1-12	1-8	9-12	56
41LOI02	2320	LOIR à NAVEIL	7-12	1-12	1-5 / 11-12	1-10		2
49LOI03	2434	LOIR à LEZIGNE	7-12	1-9				2
79MAD01	2895	MADOIRE à SANZAY			11-12	1-6		0
49MAI01	2440	MAINE à BOUCHEMAINE	7-12	1-12	1-10			0
23MAU01	1937	MAULDE à SAINT-MARTIN-CHATEAU				8-12	1-9	0
53MAY01	2495	MAYENNE à AMBRIERES-LES-VALLEES	7-12	1-12	1-12	1-8		7
53MAY02	2503	MAYENNE à LOIGNE-SUR-MAYENNE	7-12	1-9	3-7			0
71MES01	2802	MESVRIN à SAINT-SYMPHORIEN-DE-MARMAGNE	12	1-12	1-12	1-2 / 5-12	1-9	1
63MOR01	2660	MORGE à MONTCEL	11-12	2-5 / 7-12	1-12	1-12	1 / 9-12	0
36NAH01	2207	NAHON à SELLES-SUR-NAHON	8-12	1-12	1-10			4
58NIE01	2584	NIEVRE à DOMPIERRE-SUR-NIEVRE	11-12	1-12	1-12	1-12	1-8 / 10-12	44
58NIE02	2585	NIEVRE à COULANGES-LES-NEVERS	11-12	1-12	1-12	1-12	1-3 / 5-12	1
58NOH01	2588	NOHAIN à SAINT-MARTIN-SUR-NOHAIN	11-12	1-12	1-12	1-12	1-8	0
45NOT01	2365	NOTREURE à CERNOY-EN-BERRY	7-12	1-12	1-12	1-11		3
03OEI01	1601	OEIL à VILLEFRANCHE-D'ALLIER	10-12	1-12	1-12	1-12	1-12	0
72ORN01	2815	ORNE SAOSNOISE à BALLON	7-12	1-9				0
53OUD01	2504	OUDON à COSSE-LE-VIVIEN	7-12	1-12	1-7			18
28OZA01	2027	OZANNE à DAMPIERRE-SOUS-BROU	12	1-12	1-12	1-12	1-2 / 11-12	1
86OZO01	3010	OZON DE CHENEVELLES à ARCHIGNY	6-12	1-12	1-12	1-12	1-10	0
23PCR01	1943	PETITE CREUSE à MALLERET-BOUSSAC					7-9	1
23PCR02	1945	PETITE CREUSE à FRESSELINES					7-9	0
18PSA01	1865	PETITE SAULDRE à MENETREOL-SUR-SAUDRE				7-10		1
03QUE01	1595	QUEUNE à SOUVIGNY	11-12	1-12	1-12	1-12	1-12	0
03RDN01	1585	ROUDON à SALIGNY-SUR-ROUDON	12	1-11	7-12	12	1-11	0
36REN01	2206	RENON à PARPECAY	8-12	1-12	1-12	1-8	8-12	2
37ROU01	2223	ROUMER à LANGEAIS	7-12	1-12	1-6			0
41SAL01	2316	SAULDRE à SALBRIS	7-12	1-12	1-6 / 10-12	1-12	1-7	14
41SAL02	2318	SAULDRE à PRUNIER-SUR-SOLOGNE	7-12	1-12	1-7 / 10-12	1-12	1-7	3
63SAN01	2671	SAUNADE à LANDOGNE	11-12	1-12	1-12	1-12	1 / 3-5	1
61SAR01	2628	SARTHE à MOULINS-LA-MARCHE		5-12	1-12	1-12	1-10	2
61SAR02	2629	SARTHE à ALENCON		5-12	1-12	1-12	1-10	12
23SED01	1946	SEDELLE à CROZANT				8-10		0
87SEM01	3033	SEMME à DROUX	11-12	1-11	8-12	1-12	1-2	0
43SEN01	2350	SENOUIRE à SAINT-PAL-DE-SENOUIRE		10-12	1-7	5-12	1 / 3-6	0
03SIC01	1589	SICHON à FERRIERES-SUR-SICHON	10-12	1-12	1-12	1-12	1-12	0
63SIO01	2668	SIOULE à MONTFERMY	11-12	2-12	1 / 3-12	1-12	1 / 3-12	3
63SIO02	2672	SIOULE à LISSEUIL	11-12	1-11				23
03SIO03	1593	SIOULE à CONTIGNY	10-12	1-12	1-12	1-12	1-12	0
63SIT01	2669	SIOULET à COMBRAILLES	11-12	2-11				2

Code station	ID	Localisation	2008	2009	2010	2011	2012	% valeurs éliminées
71SOM01	2807	SOMME à CRESSY-SUR-SOMME		1-12	1-12	1-12	1-9	0
71SOR01	2797	SORNIN à SAINT-MAURICE-LES-CHATEAUNEUF		1-12	1-12	1-12	1-9	11
23TAR01	1935	TARDES à SAINT-ORADOUX-PRES-CROCQ				8-12	1-9	1
23TAU01	1938	TAURION à GENTIOUX-PIGEROLLES				8-12	1-9	0
23TAU02	1939	TAURION à SAINT-HILAIRE-LE-CHATEAU				8-12	1-9	0
71TER01	2798	TERNIN à CHISSEY-EN-MORVAN	12	2-3				1
79THA01	2891	THOUARET à LUZAY	6-12	1-12	1-10			0
79THO01	2890	THOUET à SAINT-LOUP-LAMAIRE	6-12	1-12	1-10			0
49THO02	2429	THOUET à CHACE	7-12	1-12	1-7			2
72TUS01	2809	TUSSON à EVAILLE	7-12	1-10				0
53VAR01	2496	VARENNE à SOUCE	7-12	1-3 / 6-12	1-12	1-8		10
53VAU01	2493	VAUELLE à SAINT-GERMAIN-DE-COULAMER	7-12	1-12	1-12	1-8		7
72VEG01	2821	VEGRE à EPINEU-LE-CHEVREUIL	7-12	1-10				0
19VIE01	1892	VIENNE à SAINT-SETIERS	9-12	1-12	1-12	1-12	1-6	0
87VIE02	3021	VIENNE à ROYERES	10-12	1-11	8-12	1-12	1-2	0
87VIE03	3023	VIENNE à LE PALAIS-SUR-VIENNE	11-12	1-11	8-12	1-12	1-12	0
87VIE04	3029	VIENNE à SAINT-PRIEST-SOUS-AIXE	10-12	1-11	8-12	2-12	1-2	0
86VIE05	3002	VIENNE à VALDIVIENNE	6-12	1-12	1-12	1-12	1-10	0
37VIE06	2231	VIENNE à L'ILE-BOUCHARD	7-12	1-12	1-6			1
87VIN01	3034	VINCOU à THOURON	11-12	1-11	8-12	1-12	1-2	
86VON01	3004	VONNE à JAZENEUIL	6-12	1-12	1-12	1-12	1-10	0
03VOU01	1584	VOUZANCE à NEUILLY-EN-DONJON	11-12	1-12	1-12	1-12	1 / 3-12	9

## Annexe 3 : Synthèse des informations morphologiques associées à chaque station

Code station	ID	Localisation	Ordre de Strahler	Surface du BV(km <sup>2</sup> )	Altitude (m IGN69)	Distance à la source (km)	Pente du tronçon principal (‰)
03ACO01	1588	ACOLIN à THIEL-SUR-ACOLIN	3	68	240	11,6	0,1
42AIX01	2333	AIX à SAINT-GEORGES-DE-BAROILLE	5	347	323	54,6	0,1
15ALA01	1803	ALAGNON à JOURSAC	5	300	734	31,0	8,2
58ALE01	2580	ALENE à LUZY	3	22	282	7,9	10,2
15ALL01	1802	ALLANCHE ou COURBIERES + PRADIERS	3	13	1120	7,1	29,7
36ANG01	2218	ANGLIN à MAUVIERES	5	64	85	72,1	0,9
63ANN01	2653	ANCE DU NORD à SAUVESSENGES	4	175	783	37,1	4,4
43ANN02	2344	ANCE-DU-NORD à BEAUZAC	4	510	448	76,4	2,3
43ANS01	2347	ANCE-DU-SUD à SAINT-PREJET-D'ALLIER	4	116	845	30,5	7,8
45ARD01	2373	ARDOUX à CLERY-SAINT-ANDRE	3	128	90	25,3	1,8
18ARN01	1862	ARNON à MEREAU	5	2167	101	143,0	1,4
53ARO01	2499	ARON à MOULAY	4	179	83	34,6	6,4
58ARO02	2582	ARON à VERNEUIL	6	1471	194	89,2	0,1
71ARR01	2800	ARROUX à AUTUN	5	677	288	50,2	1,0
71ARR02	2801	ARROUX à LAIZY	5	1306	276	63,9	0,8
71ARR03	2804	ARROUX à RIGNY-SUR-ARROUX	5	2222	233	122,5	0,1
87AUE01	3027	AURENCE à AIXE-SUR-VIENNE	4	91	201	27,4	7,2
03AUM01	1600	AUMANCE à COSNE-D'ALLIER	5	401	223	32,2	0,1
03AUM02	1602	AUMANCE à HERISSON	6	915	180	62,6	1,2
72AUN01	2811	AUNE à PONTVALLAIN	4	156	41	20,2	1,4
18AUO01	1856	AURON à BOURGES	5	466	130	69,8	0,8
87AXE01	3028	AIXETTE à AIXE-SUR-VIENNE	4	159	209	23,6	5,1
45BEC01	2366	BEC D'ABLE à SULLY-SUR-LOIRE	4	140	113	14,2	1,5
63BED01	2661	BEDAT à SAINT-LAURE	5	340	299	34,9	0,4
86BEN01	3013	BENAIZE à THOLLET	4	32	120	49,9	4,0
03BES01	1586	BESBRE à SAINT-PIRIX	5	373	298	46,4	0,1
03BES02	1587	BESBRE à DOMPIERRE-SUR-BESBRE	5	877	221	97,0	0,1
03BIE01	1597	BIEUDRE à POUZY-MESANGY	4	156	192	32,6	2,0
86BLO01	3001	PETITE BLOURDE à PERSAC	4	99	78	24,9	2,9
03BOB01	1592	BOUBLE à CHAREIL-CINTRAT	5	634	244	59,3	2,6
86BOI01	3006	BOIVRE à POITIERS	3	163	70	42,9	1,7
71BOR01	2803	BOURBINCE à VITRY-EN-CHAROLLAIS	5	834	236	73,1	0,1
41BOU01	2321	BOULON à MAZANGE	4	74	73	23,4	0,1
36BOZ01	2214	BOUZANNE à VELLES	4	442	128	58,0	0,9
72BRA01	2808	BRAYE à VIBRAYE	3	64	109	28,3	1,9
41BRA02	2322	BRAYE à SOUGE	4	351	58	70,7	0,6
87BRI01	3026	BRIANCE à CONDAT-SUR-VIENNE	5	545	207	55,9	1,5
87BRM01	3036	BRAME à ORADOUR-SAINT-GENEST	4	235	165	52,6	3,0
58CAN01	2581	CANNE à SAINT-GRATIEN-SAVIGNY	4	180	204	45,2	0,6
48CHA01	2426	CHAPEAUROUX à PIERREFICHE	4	132	1067	28,7	3,3
23CHE01	1934	CHER à CHAMBONCHARD	4	332	356	33,9	8,7
03CHE02	1599	CHER à VALLON-EN-SULLY	6	2202	172	125,5	0,9
18CHE03	1852	CHER à BRUERE-ALLICHAMPS	7	4141	146	171,2	0,1
18CHE04	1853	CHER à FOECY	7	4509	100	233,5	0,6
41CHE05	2319	CHER à SAINT-AIGNAN	7	12759	65	318,0	1,4
37CHE06	2222	CHER à SAVONNIERES	7	13715	40	390,2	0,2
86CLA01	3003	CLAIN à ANCHE	5	553	99	70,0	0,9
69COI01	2760	COISE à LARAJASSE	3	41	549	10,7	11,6
87COM01	3020	COMBADE à SAINT-DENIS-DES-MURS	4	150	295	40,7	0,1
28CON01	2028	CONIE à DONNEMAIN-SAINT-MAMES	2	3589	110	40,2	0,3
61COR01	2632	CORBIONNE à BRETONCELLES	3	138	120	21,7	3,1
49COU01	2432	COUASON à GEE	4	199	20	31,9	1,3
63COZ01	2656	COUZE PAVIN à SAINT-DIERY	4	81	636	20,9	4,9
23CRE01	1941	CREUSE à GLENIC	5	948	307	84,3	2,3
23CRE02	1942	CREUSE à FRESSELINES	5	1190	205	118,1	1,6
36CRE03	2215	CREUSE à RIVARENNES	6	3306	90	168,5	0,2
43DES01	2348	DESGES à DESGES	4	94	700	17,5	16,2
45DHU01	2370	DHUY à SANDILLON	3	174	98	23,6	0,9
63DOR01	2662	DORE à DORE-L'EGLISE	4	98	593	25,7	4,9
63DOR02	2665	DORE à OLLIERGUES	5	782	420	81,3	10,4

Code station	ID	Localisation	Ordre de Strahler	Surface du BV(km <sup>2</sup> )	Altitude (m IGN69)	Distance à la source (km)	Pente du tronçon principal (%)
63DOR03	2666	DORE à DORAT	5	1513	280	119,9	2,1
71DRE01	2799	DREE à SAINT-LEGER-DU-BOIS	4	179	308	27,1	1,8
43DUN01	2342	DUNIERES à DUNIERES	4	147	739	21,7	3,6
86ENV01	3011	ENVIGNE à CHATELLERAULT-THURE	4	481	49	28,7	1,9
53ERN01	2500	ERNEE à LARCHAMP	4	59	129	14,4	2,9
53ERV01	2494	ERVE à CHAMMES	4	78	81	24,4	3,8
37ESV01	2230	ESVES à LIGUEIL	4	110	65	20,4	1,3
87GAR01	3032	GARTEMPE à BESSINES-SUR-GARTEMPE	5	592	250	77,8	2,0
87GAR02	3035	GARTEMPE à SAINT-BONNET-DE-BELLAC	5	1379	150	120,0	2,0
86GAR03	3015	GARTEMPE à LA ROCHE POSAY	6	2041	58	201,8	0,1
87GLA01	3030	GLANE à ORADOUR-SUR-GLANE	4	154	246	23,7	0,1
87GOR01	3031	GORRE à ROCHECHOUART	4	209	192	29,0	3,3
61HUI01	2631	HUISNE à CONDEAU	5	512	113	55,5	0,8
72HUI02	2818	HUISNE à AVEZE	5	1170	88	90,0	0,8
72HUI03	2819	HUISNE à LE MANS	5	2381	46	157,6	1,1
37IND01	2224	INDRE à SAINT-HIPPOLYTE	5	1797	79	172,5	0,1
37IND02	2226	INDRE à LIGNIERES-DE-TOURAINNE	6	3233	38	262,0	0,2
03JOL01	1590	JOLAN à CUSSET	3	55	313	22,0	15,8
49LAY01	2441	LAYON à CLERE-SUR-LAYON	3	25	83	8,0	4,4
71LOE01	2805	LOIRE à LA MOTTE-SAINT-JEAN	7	12563	225	342,6	0,1
18LOE02	1849	LOIRE à SAINT-SATUR	8	34296	146	513,0	0,1
41LOE03	2307	LOIRE à MUIDES-SUR-LOIRE	8	38315	74	678,4	0,5
37LOE04	2221	LOIRE à VILLANDRY	8	42668	40	772,4	0,1
49LOE05	2430	LOIRE à SAINT-MATHURIN-SUR-LOIRE	8	84812	20	846,2	0,5
49LOE06	2444	LOIRE à MONTJEAN-SUR-LOIRE	8	110171	10	891,9	0,1
28LOI01	2029	LOIR à ST DENIS LES PONTS - Aval CHATEAUDUN	5	4545	104	15,2	0,5
41LOI02	2320	LOIR à NAVEIL	5	5233	77	130,3	0,4
49LOI03	2434	LOIR à LEZIGNE	5	7986	20	283,2	1,7
79MAD01	2895	MADOIRE à SANZAY	3	84	82	20,3	5,4
49MAI01	2440	MAINE à BOUCHEMAINE	7	22307	16	335,8	0,1
23MAU01	1937	MAULDE à SAINT-MARTIN-CHATEAU	4	118	427	30,5	16,3
53MAY01	2495	MAYENNE à AMBRIERES-LES-VALLEES	6	771	100	61,6	2,3
53MAY02	2503	MAYENNE à LOIGNE-SUR-MAYENNE	6	3837	30	148,7	0,1
71MES01	2802	MESVRIN à SAINT-SYMPHORIEN-DE-MARMAGNE	4	80	295	23,1	3,0
63MOR01	2660	MORGE à MONTCEL	4	122	371	28,0	9,1
36NAH01	2207	NAHON à SELLES-SUR-NAHON	3	36	124	7,8	1,0
58NIE01	2584	NIEVRE à DOMPIERRE-SUR-NIEVRE	3	93	231	13,7	2,8
58NIE02	2585	NIEVRE à COULANGES-LES-NEVERS	4	523	183	48,3	0,1
58NOH01	2588	NOHAIN à SAINT-MARTIN-SUR-NOHAIN	3	257	153	38,1	1,4
45NOT01	2365	NOTREURE à CERNOY-EN-BERRY	2	45	159	16,0	2,8
03OEI01	1601	OEIL à VILLEFRANCHE-D'ALLIER	5	277	233	36,6	1,2
72ORN01	2815	ORNE SAOSNOISE à BALLON	5	361	55	44,1	0,1
53OUD01	2504	OUDON à COSSE-LE-VIVIEN	4	159	56	27,2	2,4
28OZA01	2027	OZANNE à DAMPIERRE-SOUS-BROU	4	139	150	20,0	1,6
86OZO01	3010	OZON DE CHENEVELLES à ARCHIGNY	2	28	100	7,0	3,8
23PCR01	1943	PETITE CREUSE à MALLERET-BOUSSAC	4	258	305	30,7	3,6
23PCR02	1945	PETITE CREUSE à FRESSELINES	5	932	206	94,2	5,9
18PSA01	1865	PETITE SAULDRE à MENETREOL-SUR-SAULDRE	5	315	140	46,9	1,6
03QUE01	1595	QUEUNE à SOUVIGNY	4	102	229	17,9	1,1
03RDN01	1585	ROUDON à SALIGNY-SUR-ROUDON	3	77	230	22,0	2,4
36REN01	2206	RENON à PARPECAY	4	282	85	31,1	1,3
37ROU01	2223	ROUMER à LANGEAIS	3	77	52	20,2	0,1
41SAL01	2316	SAULDRE à SALBRIS	5	1097	101	115,2	0,7
41SAL02	2318	SAULDRE à PRUNIERES-EN-SOLOGNE	5	2144	80	165,6	0,5
63SAN01	2671	SAUNADE à LANDOGNE	4	71	581	18,8	10,1
61SAR01	2628	SARTHE à MOULINS-LA-MARCHE	3	19	179	5,3	3,0
61SAR02	2629	SARTHE à ALENCON	5	748	132	62,2	0,9
23SED01	1946	SEDELLE à CROZANT	5	244	198	35,4	14,7
87SEM01	3033	SEMME à DROUX	4	181	190	47,5	4,8
43SEN01	2350	SENOUIRE à SAINT-PAL-DE-SENOUIRE	4	67	828	24,2	14,1
03SIC01	1589	SICHON à FERRIERES-SUR-SICHON	3	29	536	11,5	26,1
63SIO01	2668	SIOULE à MONTFERMY	5	449	553	49,6	4,4
63SIO02	2672	SIOULE à LISSEUIL	6	1328	367	95,2	0,6
03SIO03	1593	SIOULE à CONTIGNY	6	2533	225	164,9	1,4

Code station	ID	Localisation	Ordre de Strahler	Surface du BV(km <sup>2</sup> )	Altitude (m IGN69)	Distance à la source (km)	Pente du tronçon principal (‰)
63SIT01	2669	SIOULET à COMBRAILLES	4	175	613	21,8	4,0
71SOM01	2807	SOMME à CRESSY-SUR-SOMME	4	104	250	22,1	3,8
71SOR01	2797	SORNIN à SAINT-MAURICE-LES-CHATEAUNEUF	4	164	292	30,8	6,7
23TAR01	1935	TARDES à SAINT-ORADOUX-PRES-CROCQ	3	25	637	7,1	3,8
23TAU01	1938	TAURION à GENTIOUX-PIGEROLLES	2	6	739	2,6	8,9
23TAU02	1939	TAURION à SAINT-HILAIRE-LE-CHATEAU	5	339	440	42,8	4,1
71TER01	2798	TERNIN à CHISSEY-EN-MORVAN	4	182	351	25,9	4,6
79THA01	2891	THOUARET à LUZAY	4	367	59	46,4	2,4
79THO01	2890	THOUET à SAINT-LOUP-LAMAIRE	5	527	81	52,4	2,4
49THO02	2429	THOUET à CHACE	6	3281	30	133,4	0,1
72TUS01	2809	TUSSON à EVAILLE	2	8	119	8,4	3,8
53VAR01	2496	VARENNE à SOUCE	5	593	103	50,6	1,0
53VAU01	2493	VAUELLE à SAINT-GERMAIN-DE-COULAMER	3	51	130	15,9	7,6
72VEG01	2821	VEGRE à EPINEU-LE-CHEVREUIL	4	202	73	35,1	0,5
19VIE01	1892	VIENNE à SAINT-SETIERS	3	22	755	4,7	13,9
87VIE02	3021	VIENNE à ROYERES	5	1148	250	92,1	12,6
87VIE03	3023	VIENNE à LE PALAIS-SUR-VIENNE	6	2300	226	113,8	0,1
87VIE04	3029	VIENNE à SAINT-PRIEST-SOUS-AIXE	6	3279	186	140,9	0,1
86VIE05	3002	VIENNE à VALDIVIENNE	6	5896	65	261,2	0,3
37VIE06	2231	VIENNE à L'ILE-BOUCHARD	7	20295	35	345	0,1
87VIN01	3034	VINCOU à THOURON	3	80	311	17,3	12,4
86VON01	3004	VONNE à JAZENEUIL	4	479	105	42,9	0,9
03VOU01	1584	VOUZANCE à NEUILLY-EN-DONJON	3	60	269	15,3	0,9

## Remerciements

Les auteurs remercient METEO France pour la mise à disposition dans le cadre du projet Explore 2070 des réanalyses climatiques SAFRAN (bassin Loire) sur la période 1985-2012 et IRSTEA Lyon - UR Milieux Aquatiques, Ecologie et Pollutions, Laboratoire d'Hydroécologie Quantitative pour les données sur la végétation des rypisilves (buffer 10 m) à l'échelle du bassin de la Loire.

Onema

Hall C – Le Nadar  
5, square Félix Nadar  
94300 Vincennes

01 45 14 36 00

[www.onema.fr](http://www.onema.fr)

Université François-Rabelais de  
Tours

UFR Sciences et Techniques  
Laboratoire EA 6293 GéHCO  
Parc de Grandmont  
37 200 Tours

[www.geosciences.univ-tours.fr](http://www.geosciences.univ-tours.fr)

02 47 36 73 16

Site web partenaire