



Hydrologie de surface

B4 – Etude de la thermie des cours d'eau

Octobre 2012

Le rapport final du lot Hydrologie de Surface du projet Explore 2070 comporte les documents suivants.

A - Synthèse des travaux

- A0 Note de synthèse de 4 pages
 - A1 Rapport de synthèse
 - A2 Graphiques et Cartes de présentation des résultats
-

B - Rapports thématiques détaillés

- B1 Rapport détaillé Climatologie Métropole
- B2a Rapport détaillé Hydrologie Métropole
- B2b Rapport détaillé Hydrologie Métropole - Zooms
- B3 Rapport détaillé DOM
- B4 Rapport Thermie**
- B5 Synthèse Bibliographique

Le présent document constitue le rapport surligné en gris.

Il présente les méthodes mises en œuvre pour les modélisations de températures de l'eau et les résultats en termes d'évolutions possibles de la température de l'eau à l'horizon 2046-2065.

B4 - RAPPORT THERMIE

1. RESUME DE SYNTHESE DE LA COMPOSANTE B4	1
2. INTRODUCTION	3
3. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	4
3.1. Facteurs déterminants et variabilités de la température des rivières	4
3.1.1. Facteurs déterminants	4
3.1.2. Variabilités spatiales et temporelles	5
3.1.2.1. Variations transversales	5
3.1.2.2. Variations longitudinales	6
3.1.2.3. Variabilités temporelles	6
3.1.3. Etudes statistiques sur les données passées	7
3.2. Modèles prédictifs	8
3.2.1. Modèles à bases physiques	8
3.2.2. Modèles à bases statistiques	9
3.2.2.1. Modèles de régressions linéaires	9
3.2.2.2. Modèles de régressions non linéaires	10
3.2.2.3. Variantes de modélisation	11
3.2.2.4. Modèles de régressions multiples	12
3.2.2.5. Modélisation des températures extrêmes	12
3.2.2.6. Limites des méthodes statistiques	12
3.2.3. Réseaux de neurones	13
3.3. Etudes sous conditions climatiques futures possibles	13
3.4. Conclusion	15
4. DONNEES	16
4.1. Températures de l'eau	16
4.1.1. Données des DREAL	16
4.1.2. Données de l'ONEMA	17
4.1.3. Données de la Direction Départementale des Territoires et de la Mer de Seine Maritime	17
4.1.4. Données de la Ville de Paris	17
4.2. Températures de l'air	17
4.3. Débits	19
5. PRETRAITEMENT DES DONNEES DE TEMPERATURE DE L'EAU ET CHOIX DES POINTS DE CALCULS.....	20
5.1. Filtres appliqués aux données	20
5.2. Calcul des températures moyennes journalières et hebdomadaires	20
5.3. Sélection des séries pour la modélisation	22

6. METHODOLOGIE RETENUE POUR APPROCHER L'EVOLUTION POSSIBLE DES TEMPERATURES DE L'EAU SOUS L'INFLUENCE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE	26
6.1. Choix du pas de temps	26
6.2. modélisation de la température de l'eau et choix des variables	26
6.2.1. Modèle à base physique et modèle empirique	26
6.2.2. Modèle linéaire et modèle non-linéaire	26
6.2.3. Choix des variables explicatives	28
6.3. Méthodologie d'ensemble	30
6.3.1. Schéma général	30
6.3.1.1. Calage, sur des données observées, de modèles simulant la température de l'eau	30
6.3.1.2. Comparaison d'une situation de référence et de situations futures possibles	30
6.3.2. Précisions sur le choix des variables d'entrée pour chacun des 31 points d'étude	31
6.3.3. Précisions sur la variable « débit » utilisée dans les modèles de températures développés dans la présente étude	33
6.3.3.1. Modèles débits observés – débits simulés	33
6.3.4. Précisions sur le calage des modèles thermiques	37
6.3.4.1. Moyennes hebdomadaires	37
6.3.4.2. Moyennes journalières	37
6.3.4.3. Choix des modèles de température de l'eau pour chaque point de calcul	39
7. PERFORMANCES DES MODELES	41
7.1. Performance des modèles de débiaisage	41
7.1.1. Débiaisage des Débits ISBA-MODCOU	41
7.1.2. Débiaisage des Débits GR4J	43
7.2. Analyse des coefficients des modèles thermiques	44
7.3. Performance des modèles thermiques	45
7.3.1. Exemples pour le modèle au pas de temps journalier	46
7.3.2. Exemples pour le modèle au pas de temps hebdomadaire	48
7.4. Performance des modèles combinés	50
8. RESULTATS DES SIMULATIONS	51
8.1. Augmentation moyenne annuelle de température de l'eau	51
8.2. Evolution de la température selon les saisons	53
8.3. Différences entre les différentes stations	56
9. COMMENTAIRES ET LIMITES	62
9.1. Hypothèses liées à la nature du modèle	62
9.2. Performances du modèle	62
9.3. Comparaison avec les résultats d'autres études	62
10. CONCLUSION	64
11. BIBLIOGRAPHIE	65

TABLE DES ILLUSTRATIONS

FIGURES :

Figure 1 : Transferts d'énergie autour d'une rivière (Caissie, 2006)	4
Figure 2 : Profil en travers de la Drôme (Poirel et al., 2009)	5
Figure 3 : Exemple de profils en long de température d'un ruisseau d'ordre de Strahler 1 (Westhoff et al., 2007)	6
Figure 4 : Exemple de profils en long de température du Colorado (Wright et al., 2008).....	6
Figure 5 : Evolution de la température de l'eau vers la température d'équilibre (Mohseni et Stefan, 1999).....	9
Figure 6 : Représentation schématique des paramètres de la fonction logistique (Mohseni et al., 1998).....	10
Figure 7 : Relations entre températures de l'eau et de l'air, ajustées avec différentes valeurs de α (Bogan et al., 2006).....	10
Figure 8 : Exemple de manifestation des phénomènes d'hystérésis sur des températures hebdomadaires (Mohseni et al., 1998).....	11
Figure 9 : Exemple de températures moyennes hebdomadaires observées et simulées (Mohseni et al., 1999).....	13
Figure 10 : Emplacement des stations de mesure de la température de l'eau retenues.....	25
Figure 11 : Ajustement d'une courbe sigmoïde linéaire pour les températures moyennes hebdomadaires	27
Figure 12 : Comparaison des débits observés et des débits ISBA-MODCOU (gauche), ainsi que de la variable IQ qui en dérive (droite) pour l'Ariège à Auterive.....	33
Figure 13 : Comparaison des débits observés de l'Austreberthe à Saint-Paer et des débits ISBA-MODCOU de l'Andelle à Vascoeuil (gauche), ainsi que de la variable IQ qui en dérive (droite).....	34
Figure 14 : Comparaison des débits observés et des débits GR4J (gauche), ainsi que de la variable IQ qui en dérive (droite) pour l'Ariège à Auterive	35
Figure 15 : Comparaison des débits observés de la Chère à Derval et des débits GR4J de l'Aron à Grand-Fougeray (gauche), ainsi que de la variable IQ qui en dérive (droite).....	36
Figure 16 : Exemple d'ajustement d'une fonction logistique entre températures de l'air et de l'eau moyennées par intervalles	38
Figure 17 : Suivant la valeur de la température de l'air, le biais va se transmettre différemment à la température de l'eau	39
Figure 18 : Simulation de la variable IQ de la Seine à Rouen à partir des débits ISBA-MODCOU de la Seine à Poses.....	41
Figure 19 : Simulation de la variable IQ de l'Oudon à Segré à partir des débits ISBA-MODCOU	42
Figure 20 : Simulation de la variable IQ de l'Austreberthe à Saint-Paer à partir des débits ISBA-MODCOU de l'Andelle à Vascoeuil	42
Figure 21 : Simulation de la variable IQ de la Loire à Montjean à partir des débits GR4J au même point.....	43
Figure 22 : Simulation de la variable IQ de la Morge à Montcel à partir des débits GR4J de la Morge à Maringues	43
Figure 23 : Simulation de la variable IQ du Jaur à Olargues à partir des débits GR4J de l'Orb à Vieussan	44
Figure 24 : Simulation de la température de l'eau de la Morge à Montcel (Puy-de-Dôme)	46
Figure 25 : Simulation de la température de l'eau de l'Austreberthe à Saint-Paer (Seine Maritime).....	47
Figure 26 : Simulation de la température de l'eau du Salat à Saint-Lizier (Ariège)	47
Figure 27 : Simulation de la température de l'eau du Salat à Saint-Lizier (Ariège), dégradée au pas de temps mensuel (erreur type : 0,48 °C)	48
Figure 28 : Simulation de la température de l'eau du Lez à Montferrier-sur-Lez (Hérault).....	48
Figure 29 : Simulation de la température de l'eau du Lez à Montferrier-sur-Lez, dégradée au pas de temps mensuel (erreur type : 0,80 °C)	49

Figure 30 : Histogramme de répartition des augmentations moyennes des températures de l'eau du Tableau 14	52
Figure 31 : Evolution des cycles annuels de température par les deux modèles thermiques	53
Figure 32 : Allure des températures observées et des simulations en moyenne sur l'ensemble des stations pour la période de référence	54
Figure 33 : Allure des températures observées et des simulations en moyenne sur l'ensemble des stations pour la période future	54
figure 34 : Echauffements moyens par saison en fonction de la combinaison modèle climatique - modèle pluie-débit (moyenne des mois de décembre, janvier et février (DJF), mars, avril et mai (MMA), juin, juillet et août (JJA), septembre, octobre et novembre (SON)).....	55
Figure 35 : Répartition des augmentations moyennes de température par station	56
Figure 36 : Variables corrélées significativement avec les échauffements.....	59
Figure 37 : Variables non-corrélées significativement avec les échauffements	60
Figure 38 : Comparaison des échauffements issus des modèles thermiques au pas de temps hebdomadaire (à gauche) et journalier (à droite) et reconstitués par régression linéaire.....	61

TABLEAUX

Tableau 1 : Augmentations des températures moyennes annuelles (°C) entre la période 1961-1990 et la période 2046-2065	2
Tableau 2 : Caractéristiques des données des DREAL	16
Tableau 3 : Modèles climatiques retenus pour le projet Explore 2070	18
Tableau 4 : Résultats de la correction des données	21
Tableau 5 : Caractéristiques des stations de mesure retenues. *Pas de temps hebdomadaire uniquement. **Ecoulement annuel moyen	23
Tableau 6 : Associations entre stations de mesure de la température de l'eau et points de simulation des modèles pluie/débit.....	32
Tableau 7 : Choix de modélisation par station	40
Tableau 8 : Poids des températures de l'air dans le modèle linéaire	44
Tableau 9 : Températures asymptotiques du modèle logistique	45
Tableau 10 : Performances du modèle linéaire au pas de temps hebdomadaire (en moyenne sur l'ensemble des stations).....	45
Tableau 11 : Performances du modèle logistique au pas de temps journalier (en moyenne sur l'ensemble des stations).....	46
Tableau 12 : Performances du modèle thermique au pas de temps hebdomadaire pour les débits Isba- Modcou	50
Tableau 13 : Performances du modèle thermique au pas de temps journalier pour les débits Isba- Modcou	50
Tableau 14 : Augmentations des températures moyennes annuelles (°C) entre la période 1961-1991 et la période 2046-2065	51
Tableau 15 : Comparaison des augmentations de température de l'air (pour 7 modèles climatiques) et de température de l'eau (pour 28 combinaisons de modèles).....	57
Tableau 16 : Comparaison des augmentations moyennes de température calculées par les modèles physiques et empiriques à partir de données issues des mêmes modèles climatiques.	63

LISTE DES SIGLES ET NOTATIONS

LISTE DES SIGLES

- ▶ CEMAGREF : Centre national du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts
- ▶ DDTM76 : Direction Départementale des Territoires et de la Mer de Seine-Maritime
- ▶ DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, des l'Aménagement et du Logement
- ▶ EDF : Electricité De France
- ▶ GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
- ▶ GR4J : Génie Rural à 4 paramètres Journaliers
- ▶ ISBA : Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère
- ▶ MEDDTL : Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement
- ▶ MODCOU : MODèle COUplé
- ▶ ONEMA : Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques
- ▶ SAFRAN : Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige
- ▶ SIM : Safran-Isba-Modcou

LISTE DES NOTATIONS

- ▶ j : indicateur des jours
- ▶ s : indicateur des semaines
- ▶ t : indicateur du temps
- ▶ ET : Erreur Type
- ▶ ETR : Erreur Type Relative
- ▶ IQ : Inverse du débit, translaté du dixième du module
- ▶ IQ_{sim} : Inverse de Q_{sim} , translaté du dixième du module
- ▶ T_{air} : Température de l'air à 2m du sol ?
- ▶ T_{eau} : Température de l'eau
- ▶ T_{sim} : Température de l'eau simulée par le modèle thermique
- ▶ Q : Débit
- ▶ Q_{obs} : Débit observé
- ▶ $Q_{pluie/débit}$: Débit issue d'un modèle pluie-débit
- ▶ Q_{sim} : Débit simulé à partir d'un débit issue de modèle pluie-débit
- ▶ TMH : Température Moyenne hebdomadaire
- ▶ TMJ : Température Moyenne Journalière.

1. RESUME DE SYNTHESE DE LA COMPOSANTE B4

Dans le cadre du projet Explore 2070, projet pluridisciplinaire couvrant plusieurs domaines scientifiques, ce travail avait pour objectif d'aider à la validation des modèles de répartition des espèces aquatiques en fournissant des données chiffrées sur l'évolution possible de la thermie des eaux. Cette étude consistait donc principalement en la modélisation de la température de l'eau de 31 points répartis en France métropolitaine, puis en sa simulation sous forçage climatique. Le contexte imposait des contraintes de modélisation particulières, limitant les variables d'entrée disponibles et demandant des modèles transposables aux conditions futures possibles.

ÉTAT DE L'ART

La température d'un cours d'eau résulte à la fois de la température initiale de l'eau, et des échanges thermiques avec l'environnement (rayonnements, chaleur sensible, énergie perdue par évaporation, etc.). L'homme agit sur la température de l'eau par l'intermédiaire du changement climatique, des rejets thermiques, de l'occupation des sols, etc. Son impact a été mis en évidence sur les grands fleuves français (Moatar et Gailhard, 2006 ; Khalanski et al., 2009).

Par le passé, la modélisation de la température des rivières a été réalisée suivant différents types de modèles. Les modèles à base physique demandent la connaissance de nombreux paramètres pour représenter les échanges de matière et d'énergie. Les modèles à base statistique se fondent sur des corrélations entre données. La plupart tente de mettre en relation la température de l'eau avec la température de l'air.

Des relations linéaires ou sigmoïdes peuvent être calées entre températures de l'eau et variables explicatives. Des variantes permettent ensuite d'améliorer sensiblement les performances des modèles par la prise en compte des phénomènes d'hystérésis, de l'inertie thermique des cours d'eau, ou des débits. Les erreurs types peuvent alors s'approcher de 1°C.

Certaines de ces modélisations ont été appliquées pour prévoir les modifications de température des rivières en fonction de différents scénarios et modèles climatiques. Les résultats variables suivant les scénarios d'émission de gaz à effet de serre, les modèles, et les horizons temporels, prévoient toujours des augmentations moyennes de la température de l'eau inférieures ou égales à celles de la température de l'air.

METHODE

Dans cette étude, la modélisation s'est faite en deux étapes. Les débits observés et simulés présentaient des caractéristiques différentes en raison des distances géographiques et de l'imperfection des modèles pluie-débit.

Dans un premier temps, un modèle simple a donc permis de transformer les débits issus des modèles pluie-débit pour leur donner une forme semblable aux débits observés.

Dans un second temps, dans la continuité de l'approche multi-modèles appliquée en amont du projet, deux modèles thermiques empiriques ont été mis au point.

Le premier est un modèle linéaire qui a été construit au pas de temps hebdomadaire. Ses entrées sont la température de l'air de la semaine en cours et de la semaine précédente, et une fonction inverse translatée du débit. Pour tenir compte des spécificités de chaque saison, il est calé indépendamment sur chacune. Ce modèle a conduit à une erreur type moyenne de 0,93 °C.

Le second est un modèle basé sur une relation sigmoïde qui a été ajusté au pas de temps journalier. Il explique la température de l'eau par la température de l'air du jour en cours et des 15 jours précédents, ainsi que, par la même fonction du débit, utilisée pour le modèle hebdomadaire. Il est calé sur l'année entière et conduit à une erreur type moyenne de 1,22 °C. Pour ces deux modèles, les biais sont de l'ordre de 0,3°C.

RESULTATS

Des simulations sous forçage climatique ont été effectuées pour 7 modèles climatiques, 2 modèles pluie-débit, et les deux modèles thermiques. Les diverses combinaisons de modèles ont calculé des augmentations moyennes de température comprises entre 1,09 et 2,16 °C, avec une moyenne de 1,64 °C entre la période de référence 1961-1990 et la période 2046-2065.

Tableau 1 : Augmentations des températures moyennes annuelles (°C) entre la période 1961-1990 et la période 2046-2065

Modèle pluie-débit	ISBA-MODCOU		GR4J	
	Journalier	Hebdomadaire	Journalier	Hebdomadaire
Moyenne des modèles climatiques	1,70	1,55	1,74	1,57
Minimum des modèles climatiques	1,22	1,09	1,28	1,13
Maximum des modèles climatiques	2,10	1,89	2,16	1,93
Médiane des modèles climatiques	1,72	1,57	1,71	1,55

La grande dispersion de ces valeurs vient essentiellement de l'incertitude sur les températures de l'air. Une grande incertitude apparaît aussi lorsque l'on cherche à déterminer lors de quelles saisons les échauffements seront les plus forts. Cette fois, les modèles thermiques contribuent à brouiller l'information déjà divergente des modèles climatiques, si bien qu'aucune réponse évidente ne peut être apportée.

Il est en revanche apparu que les modèles s'accordent généralement sur la hiérarchie des échauffements entre les points de simulation, avec un rapport 3 entre les échauffements minimaux et maximaux. Cette hiérarchie ne montre aucune relation significative avec la latitude et la longitude, mais elle est très corrélée (environ 90%) à l'amplitude du cycle annuel de température, et pourrait traduire les effets des eaux souterraines, dont la température est ici considérée comme invariante entre la période de référence et la période future. Cette hypothèse explique les différences, pour les petits cours d'eau, avec les résultats d'une étude similaire menée avec un modèle physique. En revanche, pour les cours d'eau peu influencés par les eaux souterraines, les résultats sont du même ordre de grandeur.

Il semble toutefois que les échauffements envisagés ne constituent qu'une borne inférieure des échauffements futurs réels, accrus par des évolutions dont la cause n'est pas directement le changement climatique.

2. INTRODUCTION

Un des effets prévisibles du changement climatique est une modification du régime thermique des milieux aquatiques. En effet, la température de l'eau dépend largement de paramètres météorologiques tels que le vent, le rayonnement, la température et l'humidité de l'air. Mais le climat a aussi un impact indirect en induisant des modifications de l'occupation du sol, des débits, des hauteurs et températures de nappes, etc.

Or, la température de l'eau est elle-même un critère déterminant de la qualité physique, chimique et biologique des rivières. Elle a donc à la fois des intérêts écologiques et économiques. Elle conditionne la croissance et la survie des organismes vivants, mais aussi le refroidissement des centrales thermiques et nucléaires. Ces deux enjeux peuvent parfois être difficiles à concilier.

L'objet de ce travail est de modéliser la température de l'eau d'une sélection de points du territoire, d'appliquer ces modèles avec des sorties de modèles climatiques en entrée, et d'exploiter les résultats obtenus. Ce rapport présentera dans un premier temps une synthèse bibliographique des études antérieures sur le régime thermique des cours d'eau. Ensuite, les données utilisées et la méthodologie seront décrites. Puis, les résultats seront présentés et l'incertitude sera estimée. Enfin, l'ensemble de la démarche sera critiquée et comparée à d'autres études, notamment à l'étude ICC-HYDROQUAL menée à l'Université François-Rabelais de Tours.

3. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Le besoin d'une meilleure connaissance des régimes thermiques est à l'origine de la publication des premières études avant 1970. Mais l'intérêt scientifique pour le thème de la température de l'eau des rivières s'est nettement accru à partir de 1990. Dès lors, l'incertitude liée à l'évolution du climat apparaît comme une motivation supplémentaire à l'amélioration des modèles. Dans les années 2000, les nombreuses publications du département « Recherche et Développement » de Electricité de France illustrent la nécessité de mieux connaître les évolutions futures possibles de la température de l'eau pour la production électrique.

Cette synthèse bibliographique a pour objectif de donner un aperçu des différentes méthodes utilisées pour modéliser la température de l'eau des rivières, leurs domaines d'application, leurs résultats et leurs limites, puis de résumer les études déjà entreprises pour évaluer les modifications de température de l'eau dans des conditions futures possibles. Elle est donc scindée en trois parties :

- ▶ Description des facteurs déterminant la température de l'eau et les variabilités spatiales et temporelles ;
- ▶ Modèles explicatifs : modèles physiques et modèles empiriques ;
- ▶ Résultats d'études dans des conditions de changement climatique.

3.1. FACTEURS DETERMINANTS ET VARIABILITES DE LA TEMPERATURE DES RIVIERES

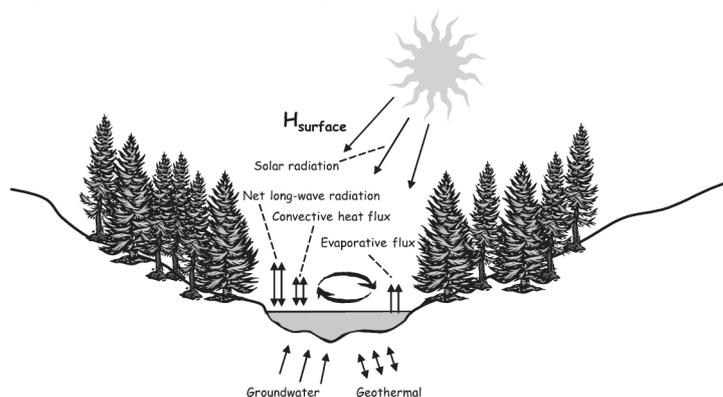
De façon à cerner les hypothèses choisies pour les différents modèles, il semble important de comprendre les facteurs qui déterminent la température des rivières, leurs poids respectifs, les variabilités qui en découlent, et les tendances d'évolution récentes.

3.1.1. Facteurs déterminants

L'évolution naturelle de la température d'un cours d'eau répond à un ensemble de phénomènes physiques, dont les principaux sont les transferts radiatifs reçus du soleil et de l'atmosphère, les transferts radiatifs émis par la surface du plan d'eau, le flux de chaleur perdu par évaporation, le flux de chaleur sensible à la surface entre eau et air, et la chaleur transmise par le lit du cours d'eau ou les eaux souterraines (Westhoff et al, 2007 ; Poulin et Hubert, 1982).

Il semble que les échanges radiatifs sont généralement prédominants dans ce bilan. Toutefois, il a été montré que l'énergie perdue par évaporation peut atteindre 40 % de l'énergie dissipée par le cours d'eau (Caissie, 2006). Enfin, il convient de prendre aussi en considération les éventuels apports de chaleur par les sources naturelles (précipitations, ruissellements, échanges avec la nappe, affluents etc.).

Figure 1 : Transferts d'énergie autour d'une rivière (Caissie, 2006)



L'homme peut avoir une influence considérable sur le régime thermique d'une rivière. Excepté le changement climatique, son impact le plus évident est le résultat des rejets des centrales thermiques ou nucléaires. Ainsi, par exemple, les échauffements dus aux rejets thermiques des centrales nucléaires dans le Rhône sont estimés à 1,4 °C sur certains tronçons.

Mais d'autres modifications anthropiques peuvent avoir des effets majeurs sur la température d'un cours d'eau. L'occupation des sols agit à plusieurs niveaux. La végétation rivulaire fait de l'ombre et réduit le rayonnement absorbé, mais elle réduit aussi la vitesse du vent et diminue ainsi l'énergie dissipée par évaporation. La suppression de la végétation et l'imperméabilisation des surfaces peuvent augmenter la température du sol, réduire l'évapotranspiration et accroître le ruissellement, générant ainsi des pics de température dans les petits cours d'eau lors d'orages (Nelson et Palmer, 2007).

Les retenues d'eau artificielles peuvent aussi modifier sensiblement les températures d'un cours d'eau. Leur température connaît généralement des variations intra-annuelles plus réduites (sauf l'épilimnion, la couche d'eau supérieure), si bien que le cours d'eau en aval est loin de sa température d'équilibre en été ou en hiver. Le retour à l'équilibre peut prendre plusieurs centaines de kilomètres (Wright et al., 2008).

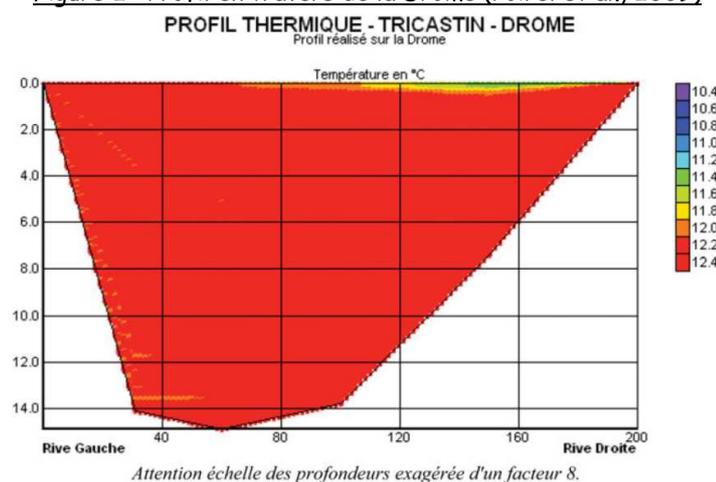
3.1.2. Variabilités spatiales et temporelles

Il résulte de ces facteurs que la température d'un cours d'eau varie à la fois dans le temps et dans l'espace, transversalement et longitudinalement.

3.1.2.1. Variations transversales

Des échanges avec la nappe peuvent aussi créer des gradients thermiques près du fond (Khalanski et al., 2009). Une stratification thermique sur toute la hauteur du cours d'eau ne semble toutefois se produire que pour des profondeurs supérieures à 4-5 mètres (Caissie, 2006). Les gradients suivant la largeur d'une rivière apparaissent principalement suite à la confluence de deux masses d'eau de températures différentes. Dans le cours principal et à une profondeur intermédiaire, il semble donc que la température soit généralement assez homogène pour mesurer des températures représentatives (Caissie, 2006).

Figure 2 : Profil en travers de la Drôme (Poirel et al., 2009)



3.1.2.2. Variations longitudinales

Longitudinalement, les variations dépendent beaucoup des affluents et des autres sources de chaleur. Il semble toutefois que, sur un tronçon homogène d'un cours d'eau suffisamment mélangé, l'effet des conditions amont s'atténuent lors du déplacement des masses d'eau vers l'aval, si bien que la rivière tend vers une température d'équilibre (Mohseni et Stefan, 1999), souvent supérieure à la température amont (Caissie, 2006) (Figure 3). Ce ne saurait être un cas général, en particulier pour les petits cours d'eau, où le maintien de mouilles, d'espaces ombragés, et d'autres plus dépendants d'approvisionnement par des eaux souterraines fraîches, constituent autant d'hétérogénéités thermiques d'importance pour la faune et la flore.

Figure 3 : Exemple de profils en long de température d'un ruisseau d'ordre de Strahler 1 (Westhoff et al., 2007)

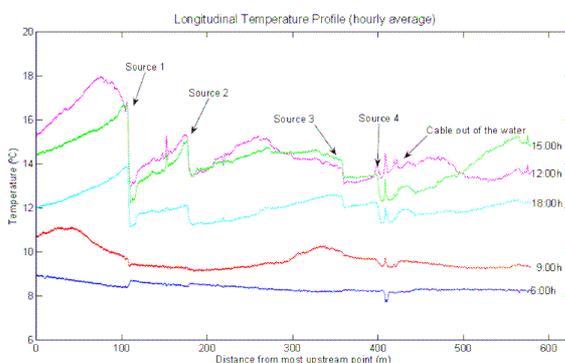
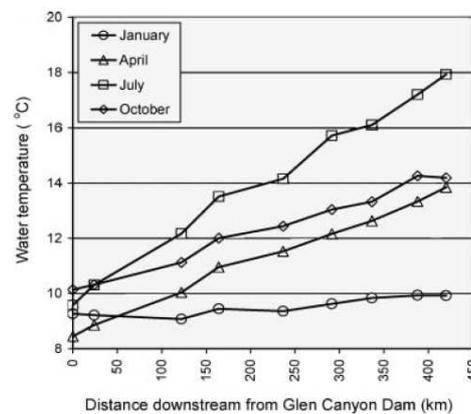


Figure 4 : Exemple de profils en long de température du Colorado (Wright et al., 2008)



3.1.2.3. Variabilités temporelles

Les variations temporelles suivent les composantes périodiques annuelles et quotidiennes (Stefan et Preud'homme, 1993 ; Smith, 1981 ; Caissie et al., 1998). Les rivières d'ordre de Strahler¹ petit sont peu sujettes aux variations quotidiennes car leur température est très dépendante des eaux souterraines, alors que les rivières de débit important ont une grande inertie thermique qui ralentit les changements de températures. L'amplitude maximale est donc atteinte pour des cours d'eau de taille intermédiaire (ordre 4 environ) (Caissie, 2006).

La composante annuelle peut être représentée par une fonction sinusoïdale qui atteint son maximum à la fin du mois de juillet ou au début du mois d'août en France métropolitaine (Cluis, 1972 ; Smith, 1981). Elle explique généralement plus de 90 % de la variance annuelle des températures journalières moyennes (Smith, 1981).

¹ Dans la classification de Strahler, tout drain qui n'a pas d'affluent se voit attribuer la valeur 1. Puis, le calcul de la valeur de chaque drain se fait selon la méthode suivante : un drain d'ordre n+1 est issu de la confluence de deux drains d'ordre n. L'ordre de Strahler d'un bassin versant est l'ordre du drain principal à l'exutoire.

3.1.3. Etudes statistiques sur les données passées

Avant de réfléchir aux effets futurs possibles du réchauffement climatique, l'étude des tendances observées peut permettre de percevoir les effets des différents facteurs influençant les températures de l'eau. En effet, le réchauffement climatique connu en France ces dernières décennies (entre 0,6 et 1,2 °C en moyenne sur la période 1901-2000, Moissel in et al., 2002) n'explique pas totalement les variations de température des rivières.

La température du Rhône et de ses affluents est mesurée au pas de temps horaire depuis 1977 par EDF en 20 points. Entre 1977 et 2004, la température moyenne a augmenté d'environ 1,5 °C sur le Haut-Rhône (Bugey) et 3 °C sur le Bas-Rhône (Aramon). Cette augmentation est particulièrement marquée au printemps et en été (Khalanski et al., 2009 ; Poirel et al., 2009). De 1991 à 2003, les échauffements moyens résiduels liés aux rejets thermiques sont estimés à environ 1,4 °C sur le Bas-Rhône (Khalanski et al., 2009). La période d'étude utilisée pour ces deux tendances limite toutefois la comparaison entre les chiffres.

Sur la Loire moyenne, la température de l'eau aurait augmenté de près de 1,5 à 2 °C en moyenne sur la période 1976-2003. Ce réchauffement aurait atteint 3 °C en certains points en été mais est inexistant en automne. En outre, les tendances sont les mêmes en amont de la première centrale nucléaire (Belleville) qu'aux autres points de mesure. Les rejets thermiques ne jouent donc qu'un rôle secondaire dans l'élévation de la température (Moatar et Gailhard, 2006). Un modèle à base physique, CALNAT, a été utilisé avec les données recueillies à Dampierre-en-Burly et a permis d'estimer l'importance de différents facteurs dans l'augmentation interannuelle de température de l'eau en été. Le poids de la variation de température de l'air est estimé à 46 %, celui de la vitesse du vent à 28 %, celui de la pression de vapeur d'eau à 18 %, et enfin la nébulosité du ciel n'intervient que pour 8 % (Gosse et al., 2009). L'effet des échanges thermiques avec la nappe de Beauce entre Orléans et Saint-Laurent des Eaux semblent avoir un effet sensible de réduction de l'amplitude du cycle annuel de température de l'eau (Moatar et Gailhard, 2006).

D'autres études ont été réalisées à l'étranger pour évaluer les changements dans les régimes thermiques de rivières (Ferrari et al., 2007 ; Webb et Nobilis, 2007). En utilisant des moyennes mensuelles de températures sur trois rivières autrichiennes, Webb et Nobilis (2007) ont par exemple montré l'existence d'une tendance marquée à la hausse à partir de 1970. La moyenne annuelle aurait augmenté de 1,4 à 1,7 °C au XXème siècle, avec des différences saisonnières importantes. Ferrari et al. (2007) ont aussi calculé une augmentation moyenne de 0,12 °C par décennie à la fin du XXème siècle, en été à l'embouchure du Fraser (Colombie Britannique, Canada).

La température de l'eau des rivières est donc influencée par de nombreux paramètres, de natures diverses, sur lesquels l'impact anthropique est souvent sensible. Les variabilités spatiales et temporelles montrent l'importance d'un protocole de mesure de la température précis pour assurer la cohérence entre les données recueillies.

3.2. MODELES PREDICTIFS

On distingue deux grandes catégories de modèles :

- ▶ Les modèles à bases physiques. Ils se basent sur la théorie pour expliquer la température de l'eau ;
- ▶ Les modèles à bases statistiques. Ils font intervenir des relations empiriques entre les données. Ils peuvent toutefois utiliser des concepts physiques pour établir certaines relations.

3.2.1. Modèles à bases physiques

Les modèles à bases physiques prennent en compte l'ensemble des flux d'énergie autour de la masse d'eau. Ils peuvent être utilisés pour prévoir les conséquences de modifications anthropiques sur les cours d'eau, tels que la construction d'un barrage ou de centrales électriques (Poulin et Hubert, 1982) ou encore pour évaluer l'importance de différents facteurs pour la température de l'eau (Westhoff et al., 2007 ; Gosse et al., 2009). Ces modèles se basent sur des fonctions d'échange de la forme (Poulin et Hubert, 1982) :

$$F(T, t) = R_S + R_A - R_E - C_E - C_V + R$$

où R_S est le rayonnement solaire, R_A est le rayonnement atmosphérique, R_E est l'émission du plan d'eau, C_E est le flux de chaleur dû à l'évaporation à la surface du plan d'eau, C_V est le flux de chaleur sensible à la surface du plan d'eau et R décrit les apports de chaleur par des sources naturelles ou artificielles.

On peut éventuellement ajouter à cette fonction d'échange les termes représentant les flux thermiques avec le lit de la rivière (Caissie et al., 2005), ou les flux liés aux précipitations (Mohseni et Stefan, 1999).

La température suit donc une loi d'évolution du type (Poulin et Hubert, 1982 ; Mohseni et Stefan, 1999) :

$$\frac{dT}{dt} = \frac{F(T, t)}{\rho C H}$$

Où $\frac{dT}{dt}$ est la dérivée particulière de la température, ρ est la masse volumique de l'eau, C est la chaleur massique de l'eau et H la profondeur moyenne.

Il est aussi possible d'ajouter un terme de diffusion thermique à cette équation (Caissie et al., 2005).

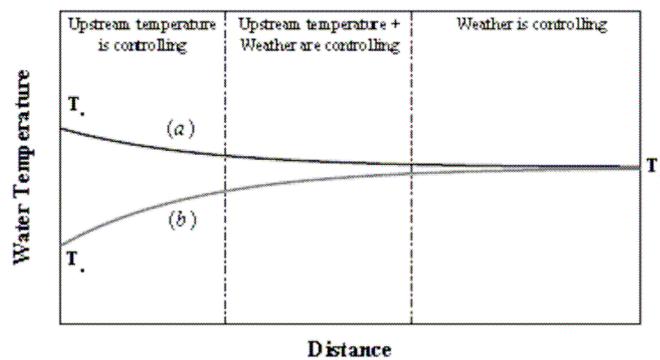
Le concept de température d'équilibre (T_e) permet ensuite de simplifier les équations. Cette température est atteinte à l'équilibre entre la masse d'eau et son environnement. Son maximum journalier a lieu dans l'après-midi et son minimum journalier dans la nuit. Pour des températures de l'eau proche de cet équilibre, les termes de l'équation 1 peuvent se linéariser (à l'exception des apports de chaleur par des sources), et l'équation d'évolution de la température (équation 2) se simplifie sous la forme (Mohseni et Stefan, 1999) :

$$\frac{dT}{dt} = \alpha (T_e - T)$$

Où α caractérise la vitesse d'évolution de la masse d'eau vers sa température d'équilibre.

La solution prend alors la forme d'une exponentielle convergeant vers la température d'équilibre (Poulin et Hubert, 1982 ; Mohseni et Stefan, 1999). Ce modèle, bien que très simplifié, s'adapte bien qualitativement aux profils en long de température généralement observés entre deux apports ponctuels d'énergie (confluence, rejets thermiques, échanges avec une nappe souterraine, etc.) (cf. figure 5).

Figure 5 : Evolution de la température de l'eau vers la température d'équilibre (Mohseni et Stefan, 1999)



3.2.2. Modèles à bases statistiques

Les modèles physiques demandent généralement un grand nombre de données pour être utilisés. Dans de nombreuses situations, seuls quelques paramètres météorologiques sont disponibles. Il est donc particulièrement intéressant de développer des modèles à partir de méthodes statistiques pour établir des relations empiriques entre les données disponibles et la température de l'eau.

La température de l'air semble être une variable adaptée pour ce type de modèles. C'est une donnée facilement disponible, dont les mesures sont suffisamment fréquentes dans le temps et dans l'espace pour être exploitable. Dans le cadre d'études sur les conséquences du changement climatique, les températures de l'air sont parmi les données les moins incertaines simulées par les modèles de circulation générale (Mohseni et Stefan, 1999). Mais la température de l'air a surtout l'avantage d'être une très bonne variable explicative de la température de l'eau. En dehors de situations particulières (fonte des neiges, réservoirs, rejets thermiques, etc.) une relation linéaire entre températures de l'eau et de l'air mensuelles a permis d'expliquer plus de 90 % de la variance de la température de l'eau en 4 points de mesure au Royaume-Uni (Smith, 1981).

Les études passées ont souvent utilisé des modèles à bases statistiques pour lier température de l'air et de l'eau. Quelques variantes ont toutefois été utilisées en fonction du pas de temps souhaité, de la nature des cours d'eau (glace en hiver, effets de l'évaporation ou de la fonte des neiges).

3.2.2.1. Modèles de régressions linéaires

La relation possible la plus simple entre température de l'air et de l'eau est de type affine :

$$T_{\text{eau}} = aT_{\text{air}} + b$$

Cette relation a été testée avec des pas de temps mensuels pour 7 rivières britanniques modélisées indépendamment avec des erreurs types entre valeurs calculées et simulées compris entre 0,69 °C et 2,22 °C (Smith, 1981). Sur 11 rivières aux caractéristiques variées du bassin du Mississippi, une relation commune entre les valeurs hebdomadaires et journalières a été testée avec des erreurs types de 2,1 et 2,7 °C respectivement (Stefan et Preud'homme, 1993). Une relation linéaire n'est toutefois valable que dans une plage de température de l'air limitée. En deçà de 0 °C, les précipitations se font principalement sous forme de neige et la température d'un cours d'eau est principalement dépendante des eaux souterraines. La pente de la relation $T_{\text{eau}} / T_{\text{air}}$ est alors plus faible. Pour des températures de l'air élevées, en revanche, l'évaporation intervient sensiblement dans le bilan d'énergie et contribue à limiter la hausse de température. Là encore, la pente $T_{\text{eau}} / T_{\text{air}}$ est réduite (Mohseni et Stefan, 1999).

3.2.2.2. Modèles de régressions non linéaires

Une régression non-linéaire dérivée de la fonction sigmoïde, ou logistique, (Figure 6) peut permettre un meilleur ajustement entre température de l'eau et température de l'air pour les valeurs extrêmes. Une fonction à 4 paramètres est généralement utilisée (Mohseni et al., 1998 ; Mohseni et al., 1999 ; L'Heureux, 2002 ; Morrill et al., 2005 ; Bogan et al., 2006) :

$$T_{eau} = \mu + \frac{\alpha - \mu}{1 + e^{\gamma(\beta - T_{air})}}$$

Sur un échantillon de 43 rivières dans 13 pays, l'erreur type est en moyenne plus basse sur les températures de l'eau journalières avec cette relation qu'avec une relation linéaire (Morrill et al., 2005). Ce modèle a été largement utilisé pour des données hebdomadaires, mais assez peu pour des données mensuelles. La prise en compte de l'évaporation à ce pas de temps est moins bénéfique, si bien que les régressions linéaires sont préférées (Caissie, 2006).

En raison du lissage qui résulte du calcul des moyennes, les erreurs associées à ces méthodes de régression décroissent généralement lorsque le pas de temps augmente d'un niveau horaire à un niveau hebdomadaire (Webb et al., 2003 ; Morrill et al., 2005).

Figure 6 : Représentation schématique des paramètres de la fonction logistique (Mohseni et al., 1998)

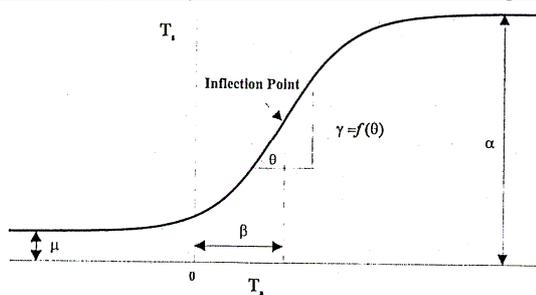


Figure 7 : Relations entre températures de l'eau et de l'air, ajustées avec différentes valeurs de alpha (Bogan et al., 2006)

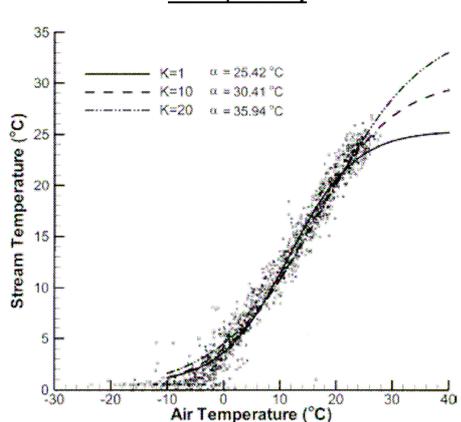
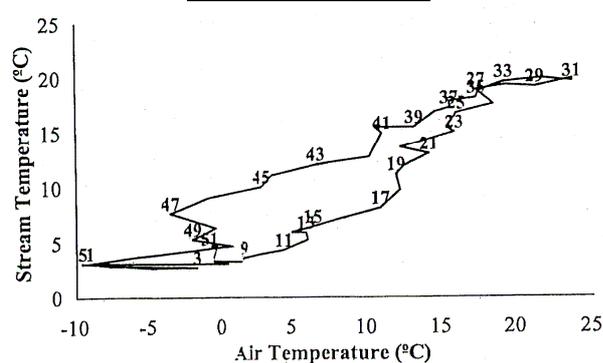


Figure 8 : Exemple de manifestation des phénomènes d'hystérésis sur des températures hebdomadaires (Mohseni et al., 1998)



3.2.2.3. Variantes de modélisation

3.2.2.3.1. Hystérésis

Des variantes des modèles précédents prennent en compte les phénomènes d'hystérésis (Mohseni et al., 1998 ; Morrill et al., 2005 ; van Vliet, 2011). Ces effets d'hystérésis sont visibles aussi bien à l'échelle de l'année sous l'effet de l'inertie thermique des réservoirs ou de la fonte des neiges (Mohseni et al., 2008), qu'à l'échelle de la journée (Webb et al., 2003). Ils se traduisent par une relation différente entre température de l'eau et température de l'air, entre la phase d'échauffement et la phase de refroidissement. Les paramètres de la fonction logistique peuvent donc être adaptés à chaque phase pour mieux représenter le régime thermique des cours d'eau. L'application de ce modèle à 584 stations de mesure de l'United States Geological Survey (USGS) a permis d'estimer les températures moyennes hebdomadaires avec une erreur type de 1,64 °C (Mohseni et al., 1998).

3.2.2.3.2. Ajustement de la température maximale

D'autres méthodes ont préféré ajuster indépendamment le paramètre α , égal à la température asymptotique de l'eau, c'est-à-dire à la température maximale atteignable. Ce paramètre a en effet une faible influence sur la forme de la courbe dans les domaines de température modérées, mais il est déterminant pour les hautes températures, et donc pour estimer les effets d'un réchauffement climatique.

Le choix a été fait de chercher une température maximale sous la forme $T_{max} = \bar{T} + sK_E$ où \bar{T} est la température moyenne d'une série de maximums de la température de l'eau (par exemple les deux températures hebdomadaires maximales par année), s est l'écart type de la même série, et K_E est le paramètre à ajuster (Othmer et al., 2001 ; Mohseni et al., 1999 ; Morrill et al., 2005 ; Bogan et al., 2006). Un paramètre K_E commun à l'ensemble des cours d'eau a été recherché et des valeurs de 4,88 à plus de 7 ont été proposées (Mohseni et al., 1999 ; Bogan et al., 2006).

3.2.2.3.3. Adaptation aux pas de temps courts

Pour des pas de temps courts (donnée horaires à journalières), il apparaît particulièrement important de ne pas prendre uniquement en considération les températures de l'air mesurées simultanément à celles de l'eau. Il a été montré que les températures de l'eau étaient mieux corrélées avec les températures de l'air mesurées quelques heures avant (Smith, 1981 ; Stefan et Preud'homme, 1993 ; Webb et al., 2003). Des modèles de régression ont aussi montré de bons résultats en utilisant des moyennes glissantes de température de l'air, jusqu'aux 15 jours précédant la date de mesure de température de l'eau (Latu, 2003). De façon plus précise, une régression multiple peut permettre d'attribuer des pondérations différentes aux températures de l'air des jours précédents (Caissie et al., 1998).

A l'inverse, les températures de l'eau peuvent être approchées en prenant en compte les températures de l'eau des jours précédents (Cluis, 1972). Un modèle basé sur un processus de Markov d'ordre deux s'est montré relativement efficace et facile à mettre en œuvre, comparé à une régression multiple sur les températures de l'air (Caissie et al., 1998).

3.2.2.3.4. Cycles annuels

Notons enfin que certains auteurs préfèrent extraire la composante annuelle des températures, par des séries de Fourier ou l'ajustement d'une sinusoïde, pour travailler sur les résidus (El-Jabi et al., 1995 ; Cassie et al., 1998).

3.2.2.4. Modèles de régressions multiples

Des modèles de régressions multiples incluent généralement le débit en plus de la température de l'air pour expliquer les températures de l'eau. Les gains associés à cette nouvelle variable explicative diffèrent selon les études. Dans le bassin de l'Exe, au Royaume-Uni, la prise en compte des débits conduit à des progrès modestes des estimations. Il est toutefois démontré que ces progrès sont plus importants dans les grands bassins versants et pour de petits pas de temps (valeurs horaires ou journalières) (Webb et al., 2003). Sur la Loire, une relation linéaire entre températures mensuelles de l'eau, de l'air et débits a conduit à estimer à 40 % les effets du débit sur l'augmentation de température du fleuve entre 1976 et 1989. Le coefficient calculé correspond à une diminution de température de 0,5 °C pour une augmentation de débit de 100 m³/s (Moatar et Gailhard, 2006).

Un modèle non linéaire utilisé sur 157 rivières à différents pas de temps a montré qu'une diminution des débits de 40 % pourrait augmenter la température de l'eau de près d'1 °C. Mais l'importance du débit dépend du régime hydrologique. Pour les fleuves présentant des maximums de débit dans la période de hautes températures, sa prise en compte n'apportait pas d'amélioration évidente (van Vliet et al., 2011).

L'utilisation d'une régression linéaire multiple incluant température de l'air, température de l'air des jours précédents, débit et fonction trigonométriques du temps, a conduit à une erreur type très satisfaisante de 1,15 °C sur le ruisseau Catamaran (Nouveau-Brunswick, Canada, bassin versant de 51 km²) (Bélanger et al., 2005).

3.2.2.5. Modélisation des températures extrêmes

Les modèles peinent parfois à simuler les extrêmes avec la même précision que les valeurs courantes de température. Pourtant ces valeurs sont cruciales pour estimer les impacts du changement climatique sur les espèces aquatiques. Une méthode basée sur la théorie des valeurs extrêmes consiste en l'ajustement d'une loi de valeurs extrêmes généralisées (GEV) sur des valeurs extrêmes de température relevées en été. Les tendances d'évolution de cette loi GEV indiquent quels pourraient être les futurs événements extrêmes en fonction des périodes de retour (Huguet et al., 2008).

3.2.2.6. Limites des méthodes statistiques

Les méthodes utilisées pour prévoir la température s'adaptent à différents types de cours d'eau et présentent des complexités variables. On remarque toutefois que la précision est assez stable, puisque les erreurs types sont généralement comprises entre 1 et 2 °C. Toutefois, la précision est limitée par plusieurs éléments indépendants de la modélisation, parmi lesquels :

- ▶ La précision des appareils de mesure de la température de l'eau, souvent comprise entre 0,2 et 0,5 °C (Cluis, 1972 ; Caissie et al., 2005 ; Morrill et al., 2005).
- ▶ La distance entre les points de mesure de températures de l'air et de l'eau.

Notons enfin que plusieurs études mentionnent que les modèles statistiques sont calés pour des conditions climatiques et hydromorphologiques données. Ils ne sont transposables dans des conditions différentes qu'au prix d'un nouveau calage des paramètres (par exemple Latu, 2003 ; Bélanger et al, 2005 ; van Vliet, 2011). **Le changement climatique pourrait en particulier affecter le cycle hydrologique, les rayonnements, l'humidité de l'air, etc. et ainsi modifier les relations entre température de l'eau et variables explicatives.**

3.2.3. Réseaux de neurones

Les résultats obtenus à partir de réseaux de neurones artificiels multicouches avec une seule couche cachée sont légèrement supérieurs à ceux d'une régression linéaire multiple. L'erreur type peut être abaissée de 10 % environ (par exemple de 1,15 °C à 1,06 °C : Bélanger et al., 2005). Toutefois, comme avec une régression linéaire multiple, ce type de modèle commet des erreurs importantes lors des années présentant des conditions météorologiques très différentes de celles utilisées pour l'entraînement.

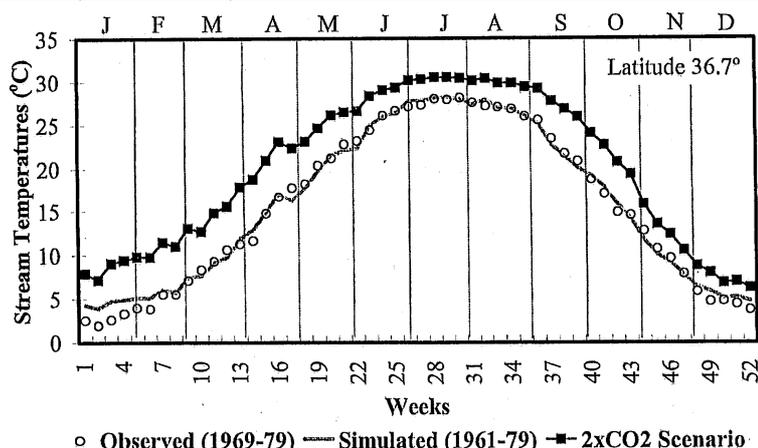
3.3. ETUDES SOUS CONDITIONS CLIMATIQUES FUTURES POSSIBLES

Plusieurs études ont déjà cherché quelles pourraient être les conséquences d'un changement climatique sur les températures de l'eau. Elles se sont principalement focalisées sur des cours d'eau aux enjeux importants (écosystèmes à préserver, centrales électriques).

A L'ETRANGER

- Mohseni et al. (1999) ont modélisé les conséquences d'un scénario de doublement de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone sur 764 cours d'eau des Etats-Unis à partir d'une relation non linéaire entre températures moyennes hebdomadaires de l'air et de l'eau. Les paramètres de la sigmoïde sont choisis invariants entre le climat de référence et le climat modifié. Des **augmentations de températures moyennes de l'eau de 2 à 5 °C** sont calculées. Pour la plupart des cours d'eau, ces échauffements sont particulièrement marqués lors des mois de mars à juin. Dans les régions froides ils peuvent être maximaux en janvier. Quelques rivières, enfin, présentent des échauffements plus forts en automne.

Figure 9 : Exemple de températures moyennes hebdomadaires observées et simulées (Mohseni et al., 1999)



- Morrill et al. (2005) ont utilisé des températures de l'air simulées pour le scénario B2 du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC, 2007) sur l'intervalle 2095-2099. 43 séries de températures de l'eau ont été utilisées dans 13 pays pour ajuster des modèles linéaire ou non (sigmoïde). L'étude montre des différences importantes d'échauffements calculés suivant le choix du modèle, en particulier pour les températures élevées. Mais les évolutions de la température de l'eau obtenues pour le XXIème siècle ne sont pas données dans l'article.

- ▶ Ferrari et al. (2007) ont calculé que les températures estivales moyennes de la rivière Fraser (Colombie Britannique, Canada) devraient augmenter durant le XXI^{ème} siècle. Le réchauffement maximal serait atteint en août, avec en moyenne **0,14 °C supplémentaires par décennie sur la période 2000-2100**.
- ▶ van Vliet et al. (2011) ont modélisé le régime thermique de 157 rivières sur 5 continents, dont le Ganges, le Mississippi, le Danube ou encore l'Elbe. Des scénarios d'augmentation de température de l'air et de diminution des débits ont été testés sur chacune d'elles. Les résultats montrent qu'une **augmentation de température de l'air de 4 °C devrait conduire à une augmentation moyenne des températures de l'eau de 2,6 °C**, comprise entre 1 et 4 °C dans environ 90 % des cas. Une **réduction de débit de 40 % conduirait à une température supérieure de 0,8 °C** en moyenne. La conjonction de ces deux évolutions induirait une hausse supérieure à 4 °C dans 30 % des cas.

Les auteurs mentionnent en outre que les effets des variations de débit sont plus importants en périodes sèches et chaudes. La température de l'eau pourrait donc connaître des augmentations plus élevées durant certaines saisons. Ainsi, par exemple, le Rhin pourrait connaître **104 jours de températures supérieures à 23 °C** en cas d'augmentation de température de l'air de 4 °C et de réduction du débit de 40 %, contre 16 jours dans la situation de référence.

Les évolutions de températures et de débits choisies dans l'étude de van Vliet et al. sont arbitraires mais plausibles. En effet, Hendrickx (2001) a étudié les débits du Rhône plus en détail. Il s'est basé sur trois scénarios climatiques et a montré que les débits pourraient varier de +50 % à -50 % suivant la saison par rapport à la situation actuelle.

EN FRANCE

- ▶ Huguet et al. (2008) ont étudié les valeurs extrêmes atteintes par les températures de l'eau en 12 points de mesure du territoire français, dont quatre sur le Rhône et quatre sur la Loire. Basée sur des données de la période 1977-2003, l'étude compare un scénario sans évolution de la distribution des valeurs extrêmes, et un scénario avec modification de distribution des valeurs extrêmes. Le scénario non-stationnaire montre une augmentation des températures de retour : **+1,8 °C pour une période de retour de 10 ans, et +3,5 °C pour une période de retour de 30 ans**.
- ▶ Ducharne (2008) utilise un modèle climatique avec le scénario de changement climatique A2 pour déterminer des températures de l'air possibles sur la période 2070-2099. Une relation linéaire (avec décalages) entre températures de l'eau et de l'air est ensuite ajustée pour différents cours d'eau du bassin de la Seine. Le coefficient directeur de la relation, proche de 1 pour des ordres de Strahler grands (6 ou 7), conduit à une augmentations de la température de l'eau du même ordre que celle de la température de l'air, soit une moyenne de **3,3 °C au-dessus des températures de la période 1986-1990**.

D'autres études ont été conduites en France, notamment par le département Recherche et Développement d'EDF. Les résultats figurent souvent dans des notes internes qui ne sont pas diffusées (Dupeyrat et Bertier, 2006 ; Hendrickx, 2008).

3.4. CONCLUSION

L'étude de la température des rivières est importante pour parvenir à concilier enjeux économiques et environnementaux, en particulier en situation de changement climatique. Le régime thermique des rivières est toutefois soumis à des variations naturelles, qui rendent sa mesure difficile, et à des influences anthropiques, qui rendent sa modélisation délicate.

L'utilisation de modèles à bases physiques est donc limitée par la disponibilité des données. Des modèles à bases statistiques, utilisant un nombre limité de variables explicatives, leur sont souvent préférés. En particulier, la température de l'eau est très corrélée avec la température de l'air et permet l'utilisation de régressions, linéaires ou non. Dans ces modèles, le bon ajustement des paramètres, la prise en compte d'effets d'hystérésis, de décalages temporels ou des débits, permet d'obtenir des résultats à la précision semblable à des modèles plus évolués, tels que les réseaux de neurones artificiels.

Ces méthodes ont été appliquées pour divers scénarios et à diverses échelles pour prévoir les effets du changement climatique. Les résultats sont assez différents les uns des autres, mais indiquent généralement une augmentation de température de l'eau comprise entre 60 % et 100 % de l'augmentation de la température de l'air en zone tempérée. Cet intervalle large, et l'amplitude possible de cette augmentation – potentiellement de plusieurs degrés, donc à fort impact sur la biologie – montre l'importance d'une bonne compréhension des mécanismes physiques en jeu pour extrapoler des modèles établis sous climat présent à des climats futurs possibles.

4. DONNEES

Les données utilisées pour cette étude viennent en partie des organismes partenaires du projet Explore 2070, et en partie des organismes publics disposant de stations de mesure de températures de l'eau et de débits.

4.1. TEMPERATURES DE L'EAU

Une base de données des températures des eaux de surface est en cours de réalisation par l'ONEMA. Cette base de donnée n'était cependant ni achevée ni disponible au moment de la présente démarche, qui s'est donc appuyée sur sa propre collecte de données de températures de cours d'eau.

Divers organismes ont été consultés :

- ▶ Les DREAL,
- ▶ L'ONEMA
- ▶ DDTM76
- ▶ La Ville de Paris

4.1.1. Données des DREAL

Les DREAL ont mis en place ces dernières années des réseaux de mesure au droit de stations hydrométriques. Les capteurs en place fournissent généralement des valeurs continues et les données fournies sont des données brutes ou des moyennes horaires, voire des moyennes journalières corrigées (Pays de la Loire).

Le tableau 1 donne un aperçu des données disponibles pour les DREAL recensées lors de la présente démarche.

Tableau 2 : Caractéristiques des données des DREAL

	Pas de temps de la mesure	Pas de temps de la donnée fournie	Validation	Précision	Nombre de stations	Période active
Auvergne	15min ou moins	Moyennes horaires	Non	Environ 0,1 °C	23	2004-2011
Franche Comté	Quelques minutes à quelques heures	Quelques minutes à quelques heures	Non	?	4	2007-2011
Haute Normandie	5min	Moyennes horaires	Non	?	1	2004-2010
Lorraine	6min	Moyennes horaires	Non	Environ 0,1 °C	1	2005-2011
Midi Pyrénées	Quelques minutes à 1h	Moyennes horaires	Non	Environ 0,1 °C	12	2002-2009
Rhône Alpes	Quelques minutes à quelques heures	Quelques minutes à quelques heures	Non	?	8	2005-2009
Pays de la Loire	Quelques minutes	Moyennes journalières si 3 mesures	Corrections effectuées mais possibles incohérences restantes	?	7	2004-2008

4.1.2. Données de l'ONEMA

L'ONEMA a fourni des données de températures de l'eau mesurées dans cinq stations de la région Languedoc-Roussillon. Ces données ont été fournies sous forme brute (pas de temps de quelques minutes à quelques heures) et sous forme de moyennes journalières. La plus longue série couvre la période 1996-2006.

4.1.3. Données de la Direction Départementale des Territoires et de la Mer de Seine Maritime

Des températures de la Seine à Rouen, enregistrées depuis 1967 et jusqu'en 2011, ont été fournies par la DDTM76. Il s'agit de températures moyennes journalières, avec une précision d'environ 1 °C pour les valeurs les plus anciennes.

4.1.4. Données de la Ville de Paris

La Ville de Paris nous a fourni des températures de la Seine mesurée en deux stations : ponts de l'Alma et d'Austerlitz. Il s'agit de valeurs moyennes horaires. Elles couvrent la période 2003-2011.

4.2. TEMPERATURES DE L'AIR

Les données utilisées sont celles utilisées dans les autres volets du Lot Hydrologie de Surface, à la fois pour les données historiques de climat et pour les données simulées de climats présent et futurs possibles.

DONNEES HISTORIQUES

Rappelons qu'il s'agit des résultats des réanalyses du modèle Safran de Météo France (Habets et al., 2008) disponibles, dans le cadre d'Explore 2070, de l'année hydrologique 1958-1959 à l'année hydrologique 2008-2009. Elles sont issues de retraitement à partir des données du modèle ECMWF (du centre Européen de Météorologie) (Uppala et al., 2005) et des observations de tous les postes disponibles du réseau climatique d'Etat.

Ces données font l'objet d'un exposé détaillé dans le rapport du Lot Hydrologie de Surface dédié à la climatologie. Il est à noter que, par exemple, les températures extrêmes Safran ne sont pas en accord avec les observations régionalisées (Vidal et al. IJC 2009). Il y a donc une variabilité locale dont Safran ne rend pas nécessairement bien compte. Ceci n'est pas sans conséquence sur la qualité de la mise en relation avec les observations de la température de l'eau.

Rappelons simplement ici qu'elles sont disponibles au pas de temps journalier et à un pas d'espace de 8 km x 8 km.

DONNEES SIMULEES POUR LE CLIMAT DE REFERENCE ET POUR LES CLIMATS FUTURS POSSIBLES

Comme détaillé dans le rapport du Lot Hydrologie de Surface sur la climatologie, le projet Explore 2070 a privilégié une approche multi-modèles à une approche multi-scénarios pour réaliser les simulations climatiques et en explorer des incertitudes :

- ▶ Un scénario unique de concentration de gaz à effet de serres a été retenu : le scénario A1B du GIEC (GIEC, 2007). Ce scénario suppose une croissance rapide et un équilibre entre les sources d'énergie, qui profitent toutes d'avancées techniques similaires.
- ▶ Les résultats de simulations climatiques, sous cette hypothèse A1B, de 7 modèles climatiques globaux ont été collectés pour la France métropolitaine. Pour chacun des 7 modèles, ont été récupérées les sorties de simulations permettant de dessiner un climat futur possible sur la période 2046-2065 et un climat de référence sur la période 1961-1990.

Tableau 3 : Modèles climatiques retenus pour le projet Explore 2070

Modèle	Centre climatique
ARPV3	Meteo France
CCCMA-CGCM3	Canadian Center for Climate Modelling and Analysis, Canada
ECHAM5-MPI	Max-Planck-Institut Für Meteorologie, Allemagne
GFDL-CM2.0	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA
GFDL-CM2.1	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA
GISS-MODEL-ER	Goddard Institute for Space Studies, USA
MRI-CGCM2.3.2	Meteorological Research Institute, Japon

Les résultats de ces modèles sont disponibles à l'échelle de mailles de plusieurs centaines de km de côté. Un travail de descente d'échelle est ensuite nécessaire pour parvenir à des résultats plus fins sur le territoire d'étude.

Pour les données mises à disposition dans le cadre d'Explore 2070, ce travail de descente d'échelle a été réalisé par une méthode statistique multivariée (logiciel DSCLIM du Centre européen de recherche et de formation avancée en calcul scientifique, Boé et al., 2006 ; Boé, 2007). Les résultats sont, au final, disponibles sur la même grille 8 km x 8 km que celle utilisée pour les données de climat historique.

Les dates des périodes de simulation sont les suivantes : période de référence du 01/08/1961 au 31/07/1991 (30 ans) et période future du 01/08/2046 au 31/07/2065 (19 ans).

4.3. DEBITS

Les données utilisées sont là-aussi celles utilisées ou calculées dans les autres volets du Lot Hydrologie de Surface, à la fois pour les données historiques de débits et pour les données de débits simulés de référence et futurs possibles.

DEBITS HISTORIQUES

Ces débits sont extraits de la banque HYDRO. La majorité des stations de mesure de la température de l'eau coïncide avec une des stations de cette banque de données.

DEBITS SIMULES EN CLIMAT DE REFERENCE ET FUTURS POSSIBLES SOUS HYPOTHESE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Ces débits sont extraits des simulations conduites dans le cadre d'Explore 2070 par le Lot Hydrologie de Surface, simulations dont la méthodologie et les résultats sont détaillés dans le rapport dédié à l'hydrologie en métropole.

Rappelons ici que, toujours dans un souci d'appréhender l'incertitude, l'approche a été conduite par l'utilisation de deux modèles hydrologiques. Un à base physique, le modèle ISBA-MODCOU de Météo France et un autre de type conceptuel, le modèle GR4J développé par le Cemagref.

Ces modèles permettent de simuler la transformation des signaux « précipitations » et « évapotranspiration » en un signal « écoulement ». Ils ont des paramètres qui sont soit estimés directement à partir de grandeurs physiques (cas pour ISBA-MODCOU), soit calés sur des périodes pour lesquelles on dispose de mesures de débit sur une période suffisamment longue (cas pour GR4J).

La mesure de l'impact du changement climatique se fait en comparant les sorties des modèles pour une période représentant le climat de référence (on injecte dans le modèle les précipitations et évapotranspirations de la période de référence) et une période de temps représentant un climat futur possible (on injecte dans le modèle les précipitations et évapotranspirations possibles de la période future).

Les données d'entrée de climats futurs possibles sont elles-mêmes issues de la désagrégation de résultats de modèles climatiques globaux indiquant des projections climatiques pour une hypothèse donnée de concentration de gaz à effet de serre, en l'occurrence ici l'hypothèse A1B (GIEC 2007) comme indiqué plus haut.

Les simulations sont conduites avec des données issues des 7 modèles climatiques globaux présentés plus haut pour les températures.

5. PRETRAITEMENT DES DONNEES DE TEMPERATURE DE L'EAU ET CHOIX DES POINTS DE CALCULS

A l'issue du recueil établi dans le cadre de la présente étude, 64 chroniques de température de l'eau sont disponibles. Toutefois, deux contraintes limitent leur utilisation :

- ▶ la disponibilité commune des données de température de l'eau et des températures de l'air issues des réanalyses SAFRAN ;
- ▶ la qualité des données nécessaire à une bonne exploitation.

5.1. FILTRES APPLIQUES AUX DONNEES

CHEVAUCHEMENT AVEC LES CHRONIQUES DE TEMPERATURES DE L'AIR

Pour répondre à la première contrainte, il a été choisi de ne conserver que les séries de températures dont la première mesure était antérieure de 2 ans au moins au 31 juillet 2008, date de la fin de la série des réanalyses SAFRAN. Ce critère a réduit le nombre de chroniques à 37.

SUPPRESSION DES DONNEES DOUTEUSES

Dans un premier temps, une recherche de valeurs aberrantes isolées a été réalisée par la détection des variations brutales de température. Le critère retenu est la recherche des températures ayant des variations de plus de 2 °C par rapport aux valeurs voisines, ou de plus de 1 °C sur une durée de moins de 2 heures. Ce critère a été choisi arbitrairement par l'observation des données.

Dans un second temps, les valeurs aberrantes répétées sont supprimées par un contrôle visuel et une correction manuelle sur les données brutes. Il s'agit des séries de valeurs présentant des températures inhabituelles, qui débutent et se terminent par une discontinuité nette, et qui sont facilement décelable par un observateur.

Associé au critère précédent, ce dernier a réduit le nombre de chroniques à 31.

5.2. CALCUL DES TEMPERATURES MOYENNES JOURNALIERES ET HEBDOMADAIRES

Les températures moyennes journalières ont été calculées sans contraintes sur le nombre de mesures ou sur leur répartition dans la journée. Dans la grande majorité des cas, lorsque les données ne sont pas déjà sous forme de moyennes journalières, les mesures sont suffisamment nombreuses et bien réparties pour que l'erreur commise soit très inférieure à la précision des mesures.

Les températures moyennes hebdomadaires sont calculées à condition qu'au moins trois températures moyennes journalières soient disponibles. Chaque année est découpée en 52 semaines. Les semaines durent 7 jours sauf la première qui dure 8 jours, et la dernière lors des années bissextiles.

Le Tableau 4 synthétise les effets des différentes corrections et indique le nombre de températures moyennes journalières pour les données des 31 stations qui seront finalement retenues (partie 5.3). La proportion de valeurs aberrantes isolées dans les données initiales est un bon indicateur de la qualité des données.

Le tableau indique aussi la numérotation des stations qui sera utilisée dans la suite du document.

Tableau 4 : Résultats de la correction des données

Station	cours d'eau	Lieu	Nombre de mesures	Nombre (proportion) de valeurs supprimées	Durée couverte (en jours)
1	Artière	Clermont Ferrand (domaine de Crouel)	33307	3 (0,1‰)	1394
2	Morge	Montcel	27185	148 (5‰)	1134
3	Saint Genest	Malauzat (Saint-Genès-l'Enfant)	26298	3 (0,1‰)	1097
4	Crédogne	Puy-Guillaume	27979	48 (2‰)	1166
5	Sichon	Ferrières-sur-Sichon	25653	73 (3‰)	1070
6	Seine	Rouen	14879	1 (0,1‰)	14878
7	Austreberthe	Saint-Paer	131124	3875 (30‰)	859
8	Ariège	Auterive	56320	12 (0,2‰)	1992
9	Salat	Roquefort	41105	2 (0,05‰)	1729
10	Salat	Saint Lizier	49641	123 (2‰)	2086
11	Garonne	Saint Gaudens (Valentine)	52921	22 (0,4‰)	2229
12	Garonne	Toulouse (Bazacle)	54084	231 (4‰)	2166
13	Aveyron	Montricoux (Bruniquel)	29586	15(0,5‰)	1245
14	Thoré	Labruguière	37787	19 (0,5‰)	1581
15	Hers Mort	Toulouse (Pont de Périole)	33195	5 (0,2‰)	1392
16	Agout	Saint-Lieux-lès-Lavaur	15020	7 (0,5‰)	641
17	Garonne	Verdun sur Garonne	28031	10 (0,3‰)	1184
18	Garonne	Chaum	36657	65 (2‰)	1537
19	Cèze	Bessèges	2949	0 (0)	2949
20	Chapeauroux	Saint jean la fouillouse	1067	0 (0)	1067
21	Jaur	Olargues	2738	0 (0)	2738
22	Lez	Monferrier-sur-Lez	3989	0 (0)	3989
23	Mayenne	Ambrières-les-Vallées	1638	0 (0)	1638
24	Chère	Derval	1673	0 (0)	1673
25	Vendée	Foussais-Payré	1629	0 (0)	1629
26	Loire	Montjean-sur-Loire	1064	0 (0)	1064
27	Oudon	Segré	1649	0 (0)	1649
28	Seine	Paris (Austerlitz)	31050	54 (2‰)	1304
29	Seine	Paris (Alma)	31366	8 (0,3‰)	1307
30	Hien	Saint-Victor de Cessieu	8936	20 (2‰)	746
31	Ardèche	Vogüe	21360	1886 (90‰)	746

5.3. SELECTION DES SERIES POUR LA MODELISATION

En fonction du pas de temps, deux critères ont été fixés pour définir les séries exploitables pour une modélisation.

Pour des températures moyennes hebdomadaires, ce critère a été de disposer pour chaque semaine de l'année, d'au moins deux années avec une température moyenne hebdomadaire disponible. De cette façon, pour chacune des 52 semaines, une température pourra être utilisée pour la validation des modèles, et une température au moins pour le calage. Toutefois, les périodes de validation et de calage ainsi définies peuvent consister en l'association de températures d'années différentes.

Un filtre similaire a été appliqué aux températures moyennes journalières. Toutefois, la recherche d'un minimum de deux températures moyennes pour chacun des 365 jours de l'année aurait été trop sélective, alors que les températures moyennes journalières fournissent beaucoup plus d'informations pour le calage que les moyennes hebdomadaires. L'année a donc été découpée en 73 périodes de 5 jours (éventuellement 6 jours pour la dernière) et seules ont été retenues les séries présentant, pour chacune de ses périodes, au moins 5 températures moyennes journalières. Ces cinq températures seront utilisées pour la validation, et il est fait l'hypothèse que les données restantes, même mal réparties dans l'année pourront permettre d'ajuster un modèle.

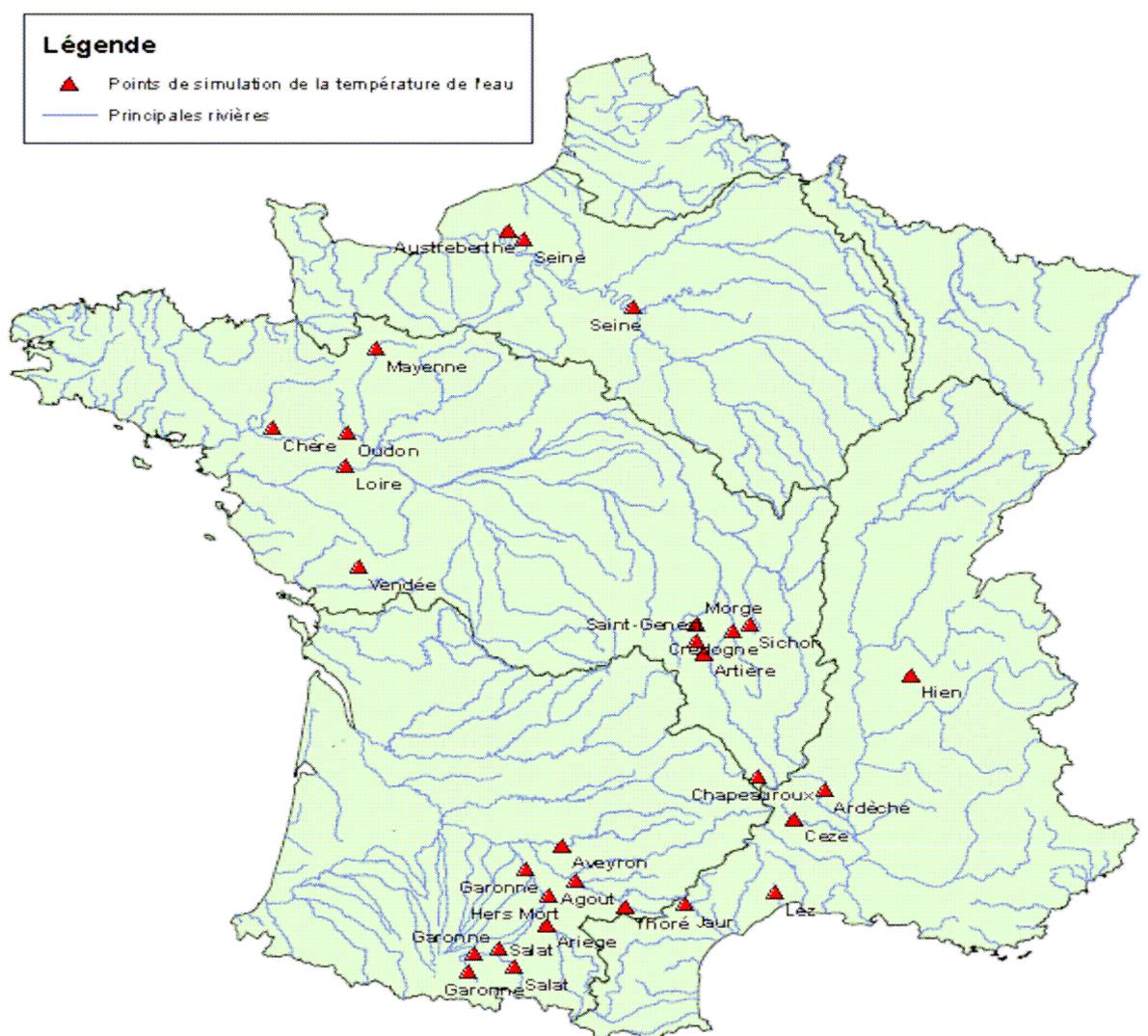
Ces critères ont conduit à la sélection de 26 points de mesures pour modéliser avec un pas de temps hebdomadaire et 31 avec un pas de temps journalier. Les caractéristiques principales de ces points sont présentées dans le Tableau 5. La Figure 1 Figure 10 montre leur répartition en métropole.

Tableau 5 : Caractéristiques des stations de mesure retenues. *Pas de temps hebdomadaire uniquement. **Ecoulement annuel moyen

N° station et cours d'eau	X (Lambert II étendu) (km)	Y (Lambert II étendu) (km)	Code de la station débitométrique la plus proche	date début	date fin	Influences (d'après banque HYDRO)	Modules interannuel** (m ³ /s) et débits moyens mensuels	
							Module interannuel** (m ³ /s)	Graphique des débits mensuels
1-Artière	662	2086	K2724210	2004	2011	pas ou faiblement	0,254	
2-Morge	655	2114	K2753010	2005	2011	fortement en étiage	1,04	
3-Saint Genest	656	2097	K2778010	2005	2011	pas ou faiblement	0,152	
4-Crédogne	688	2107	K2994010	2004	2008	pas ou faiblement	1,05	
5-Sichon	701	2114	K3053100	2005	2008	pas ou faiblement	0,585	
6-Seine	510	2494	H9900010	1967	2011	pas ou faiblement	574	
7-Austreberthe*	497	2503	H9923020	2004	2010	non renseigné	1,76	
8-Ariège	529	1818	O1712510	2002	2008	pas ou faiblement	59,5	
9-Salat	488	1795	O0592510	2003	2009	pas ou faiblement	42,4	
10-Salat	502	1777	O0502520	2002	2009	pas ou faiblement	35,2	
11-Garonne	467	1789	O0200020	2002	2009	pas ou faiblement	58	
12-Garonne	530	1847	O1900040	2002	2009	non renseigné	189	
13-Aveyron	542	1897	O5762510	2003	2009	pas ou faiblement	42,7	
14-Thoré	596	1836	O4394010	2003	2009	pas ou faiblement	15,9	
15-Hers Mort	530	1847	O2222510	2002	2008	pas ou faiblement	3,78	
16-Agout**	554	1862	O4802520	2004	2006	pas ou faiblement	41	
17-Garonne	511	1873	O2620010	2004	2008	pas ou faiblement	190	
18-Garonne	461	1772	O0050010	2003	2009	pas ou faiblement	30,9	
19-Cèze	740	1923	V5424010	1998	2006	Fortement	6,28	
20-Chapeauroux*	708	1964	K2123010	2000	2004	pas ou faiblement	1,61	
21-Jaur	646	1839	Y2545020	1999	2006	pas ou faiblement	3,89	
22-Lez	723	1851	Y3204010	1996	2006	pas ou faiblement	2,15	
23-Mayenne	383	2386	M3060910	2004	2008	pas ou faiblement	8,6	
24-Chère	296	2307	J7833020	2004	2008	pas ou faiblement	2,34	
25-Vendée	369	2171	N7101810	2004	2008	pas ou faiblement	1,61	
26-Loire	358	2270	M5300010	2005	2007	pas ou faiblement	846	
27-Oudon	360	2303	M3851810	2004	2008	pas ou faiblement	8,47	
28-Seine	602	2427	H5920010	2005	2011	Fortement	305	
29-Seine	602	2427	H5920030	2005	2011	Fortement	305	
30-Hien*	839	2065	V1725020	2006	2008	pas ou faiblement	0,618	
31-Ardèche*	764	1951	V5014010	2006	2009	Fortement	26,4	

J F M A M J J A S O N D

Figure 10 : Emplacement des stations de mesure de la température de l'eau retenues



Compte tenu de la répartition spatiale des points, il est évident que toutes les typologies de fonctionnement thermique des cours d'eau ne sont pas explorées, et que la validation partielle qui s'ensuivra sera valide essentiellement pour les zones géographiques où il y a de la donnée.

6. METHODOLOGIE RETENUE POUR APPROCHER L'EVOLUTION POSSIBLE DES TEMPERATURES DE L'EAU SOUS L'INFLUENCE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

6.1. CHOIX DU PAS DE TEMPS

Compte tenu de la courte durée des chroniques disponibles pour calibrer les modèles, un pas de temps mensuel était à exclure. Les paramètres des modèles auraient été trop sensibles à la moindre valeur exceptionnelle et auraient conduit à des simulations médiocres.

Des modèles aux pas de temps journalier et hebdomadaire ont donc été testés.

6.2. MODELISATION DE LA TEMPERATURE DE L'EAU ET CHOIX DES VARIABLES

6.2.1. Modèle à base physique et modèle empirique

Les modèles physiques se basent sur les lois de la mécanique des fluides, de la thermodynamique et sur les lois qui régissent les échanges d'énergie pour expliquer l'évolution des températures. Ils prennent donc de nombreuses variables en entrée, et permettent de déterminer l'importance de chaque facteur dans le modèle. De tels modèles seraient donc adaptés à une simulation dans des conditions de climat futur possible.

Mais, comme déjà explicité, ces modèles demandent la connaissance des rayonnements, du vent, de l'humidité de l'air, etc. La disponibilité des données ne permet pas d'utiliser ce type de modèle pour le projet Explore 2070. La mise en œuvre de modèles empiriques s'impose donc. Ces modèles ne s'appuient pas sur des lois physiques ou des relations de causes à effets, mais sur des relations statistiques entre variables. Ainsi, la température de l'air explique en grande partie la température de l'eau car elle est un facteur important impliqué dans les transferts de chaleur sensible à la surface des rivières, mais aussi parce qu'elle est déterminée par les rayonnements solaires, l'humidité de l'air, la température du sol, etc. qui sont impliqués dans d'autres processus d'échanges d'énergie avec les cours d'eau.

6.2.2. Modèle linéaire et modèle non-linéaire

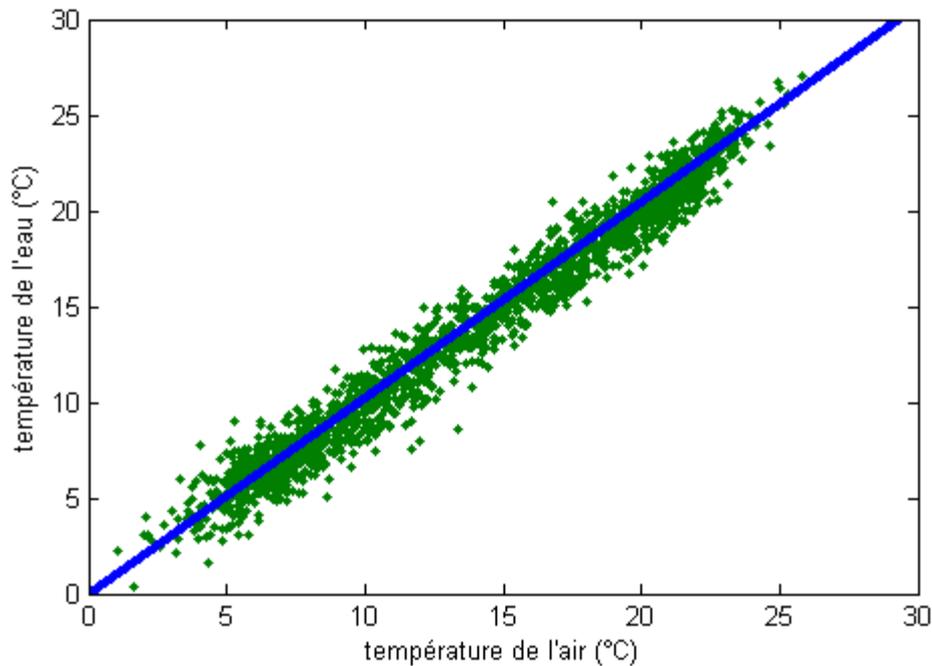
Les modélisations les plus simples relient température de l'eau et température de l'air par une fonction affine ou une fonction logistique :

$$T_{eau} = aT_{air} + b$$
$$T_{eau} = \mu + \frac{\alpha - \mu}{1 + e^{\gamma(\beta - T_{air})}}$$

Ces deux modèles aux erreurs types semblables ont montré qu'une relation linéaire suffit pour un pas de temps hebdomadaire. La « courbe en S » ajustée présente en effet des asymptotes dépourvues de sens physique. La température asymptotique basse est souvent imposée à une valeur négative, tandis que la température asymptotique haute dépasse régulièrement 50 °C.

Ces valeurs absurdes s'expliquent par le lissage important réalisé lorsque la température est dégradée à une échelle hebdomadaire. Les températures extrêmes sont assez rares pour les cours d'eau étudiés, et les effets responsables d'une pente $\frac{dT_{eau}}{dT_{air}}$ faible sont peu visibles à ce pas de temps. Une relation linéaire est donc plus efficace. L'ajustement des paramètres α et μ à des valeurs anormalement extrêmes équivaut d'ailleurs à une relation linéaire dans la zone de températures courantes.

Figure 11 : Ajustement d'une courbe sigmoïde linéaire pour les températures moyennes hebdomadaires



TEMPERATURE DE LA SEINE A ROUEN

Seuls des modèles linéaires ont donc été testés pour le pas de temps hebdomadaire.

A l'échelle journalière, en revanche, une fonction logistique entre T_{eau} et T_{air} peut être ajustée avec des paramètres ayant un sens physique. Les modèles obtenus par cette relation ont des performances comparables aux modèles linéaires.

Toutefois, avec l'objectif final d'effectuer des simulations dans des conditions où les températures de l'air seront supérieures de quelques degrés en moyenne, il semble préférable d'utiliser une relation non-linéaire pour mieux modéliser les températures hautes et éviter de trop fortes surestimations des températures de l'eau simulées en climat futur possible. **Le choix a donc été fait d'utiliser la fonction logistique dans le développement des modèles au pas de temps journalier.**

6.2.3. Choix des variables explicatives

En complément de la température de l'air, d'autres variables permettent une meilleure modélisation des températures de l'eau.

LA TEMPERATURE DE L'AIR DES JOURS PRECEDENTS

En premier lieu, et particulièrement pour les cours d'eau ayant une forte inertie thermique, c'est-à-dire une hauteur d'eau importante, **la température de l'air des jours précédents** contribue largement à expliquer la température de l'eau. Une prise en compte des températures de l'air jusqu'à 15 jours avant la mesure de la température de l'eau a permis d'améliorer des modèles appliqués à la Seine (Latu, 2003). Ce décalage joue particulièrement pour les cours d'eau de fort débit.

Au pas de temps hebdomadaire, la température de la semaine précédente a été prise en compte

$$\sum_{i=0}^1 a_i * T_{air}(s-i)$$

linéairement dans le modèle par le terme $\sum_{i=0}^1 a_i * T_{air}(s-i)$. Dans le cas des températures journalières, les températures de l'air des 15 jours précédents ont été incorporées linéairement dans l'argument de la fonction logistique, au même titre que la température de l'air du jour par le terme

$$\sum_{i=0}^{15} a_i * T_{air}(j-i)$$

DEBITS

D'autre part, diverses études ont montré l'importance de l'utilisation des **débites** (Webb et al., 2003 ; Moatar et Gailhard, 2006 ; van Vliet et al., 2011 ; Bélanger et al., 2005). Ceux-ci peuvent être intégrés sous forme linéaire, mais une relation inverse a aussi été appliquée pour mieux représenter l'augmentation de capacité calorifique et de la dilution des rejets thermiques anthropiques lors de forts débits (van Vliet et al., 2011). Cet argument a été retenu pour nos modèles.

Toutefois, compte-tenu de l'incertitude sur l'évolution des débits dans des conditions de changement climatique, la branche infinie de la fonction inverse peut poser problème et induire des températures

simulées démesurément hautes. Le débit a donc été pris en compte sous la forme $\frac{1}{p+Q}$, où p a été

choisi à la valeur $\frac{Q}{10}$, soit le dixième du module, pour obtenir les meilleures performances en moyenne sur l'ensemble des stations. Cette forme inverse du débit translaté est notée IQ dans la suite du document.

Le modèle au pas de temps hebdomadaire prend finalement la forme suivante :

$$T_{eau}(s) = \sum_{i=0}^1 a_i * T_{air}(s-i) + b * IQ + c$$

Au pas de temps journalier, il y avait la possibilité d'intégrer le débit dans l'argument de la sigmoïde ou comme fonction indépendante.

$$T_{eau}(j) = \text{sigm} \left(\sum_{i=0}^{15} a_i * T_{air}(j-i) + b * IQ + c \right)$$

$$T_{\text{eau}}(j) = \text{sigm} \left(\sum_{i=0}^{15} A_i * T_{\text{air}}(j - i) \right) + B * IQ + C$$

Dans le premier cas : $\lim_{T_{\text{air}} \rightarrow -\infty} T_{\text{eau}} = \alpha$ et $\lim_{T_{\text{air}} \rightarrow +\infty} T_{\text{eau}} = \mu$

Dans le second cas : $\lim_{T_{\text{air}} \rightarrow -\infty} T_{\text{eau}} = A * \alpha + B * IQ + C$ et $\lim_{T_{\text{air}} \rightarrow +\infty} T_{\text{eau}} = A * \mu + B * IQ + C$

La limite supérieure de la température de l'eau est caractérisée par un équilibre des flux d'énergie, notamment à la surface du cours d'eau (rayonnements, chaleur sensible, énergie dissipée par évaporation). Elle est donc indépendante de la capacité thermique du cours d'eau (à l'équilibre : $C(T) * \frac{dT}{dt} = 0$, donc la capacité thermique n'intervient plus²), donc du débit³. La température asymptotique basse est proche de 0 °C et correspond à la limite d'apparition de la glace. Elle ne dépend donc pas non plus du débit.

Le débit ne doit donc pas intervenir dans l'expression des températures de l'eau asymptotiques. Par conséquent, le choix a été fait d'utiliser le débit dans l'argument de la fonction logistique.

LE TEMPS

Il peut être nécessaire de signaler que la prise en compte du temps sous la forme $m * \cos(2 * \pi * t) + n * \sin(2 * \pi * t)$, où t s'exprime en année, permet d'améliorer sensiblement les modèles. Cette approche, déjà appliquée par Bélanger et al. (2005), revient à prendre en compte des cycles annuels de température de l'air et de l'eau. La sinusoïde présente donc une amplitude et un phasage liés aux autres variables explicatives, notamment à la température de l'air. Une partie du pouvoir explicatif de la température de l'air serait donc transmis à ces fonctions du temps. Or, on dispose de simulations de la température et des débits, mais pas de l'amplitude et du phasage de ces fonctions. Elles ne devaient donc pas être utilisées.

AUTRES VARIABLES

De même, il existe des paramètres qui sont peu liés aux températures de l'air et aux débits, alors qu'ils sont relativement importants pour anticiper les changements de températures à l'avenir. C'est le cas, par exemple, de la température du lit de la rivière, qui participe aux échanges thermiques, ou de la température des eaux souterraines qui alimentent les cours d'eau. D'une part ces données ne varient pas suffisamment vite pour qu'il soit possible de les intégrer à nos modèles avec seulement quelques années utilisées pour le calage, et d'autre part nous ne disposons pas d'informations sur leur évolution future possible. Ces éléments sont donc considérés comme inchangés entre les périodes de calage et de simulation.

Néanmoins, leurs effets possibles sont discutés dans la partie 9 du présent rapport intitulée « Commentaires et limites ».

² On peut affirmer ceci après plusieurs approximations au premier ordre : en particulier, on néglige ici l'influence de l'augmentation du débit sur la variation de la surface d'interface du lit du cours d'eau et de l'atmosphère.

³ Ceci étant vrai sous l'hypothèse suivante : On suppose que le gradient de température est faible, c'est à dire que l'énergie évacuée est faible par rapport aux échanges d'énergie (c'est à dire que (par exemple) la variation de température sur une distance de $D * v$ (où $D=1h$) est petite par rapport à la variation de température en un point donné pendant la durée D). Cette hypothèse se vérifie pour des cours d'eau de dimension suffisante, en dehors de période de très forts débits, et peut donc être utilisée dans l'étude présente (la période où l'on atteint la température asymptotique haute est l'été, période de faibles débits). Des difficultés peuvent apparaître pour les petits cours d'eau de montagne notamment.

6.3. METHODOLOGIE D'ENSEMBLE

6.3.1. Schéma général

6.3.1.1. Calage, sur des données observées, de modèles simulant la température de l'eau

Pour chacune des 31 stations retenues pour l'étude, un modèle de la température de l'eau au pas de temps hebdomadaire et/ou un modèle au pas de temps journalier est construit. Les variables d'entrées de ces modèles sont la température de l'air et éventuellement le débit du cours d'eau ou d'un cours d'eau proche. Le choix des variables retenues pour chacun des modèles est explicité plus bas.

Le calage de ces modèles est établi sur les données historiques de températures de l'eau, de températures de l'air (réanalyses Safran) et de débits observés. Ce point est détaillé plus bas.

6.3.1.2. Comparaison d'une situation de référence et de situations futures possibles

Les évolutions possibles des températures de l'eau au droit de chacun des points retenus sont ensuite établies par comparaison entre une situation de référence et des situations futures possibles. Toutes ces situations, référence et futures, correspondent à des résultats de simulation.

SITUATIONS DE REFERENCE

Les températures de l'eau de référence sont calculées en injectant dans les modèles calés à l'étape A les données suivantes :

Températures de l'air : résultats sur la période 1961-1990 de chacun des 7 modèles climatiques globaux (MCG) retenus dans le cadre d'Explore 2070.

Débits : débits calculés par un ou deux (selon la disponibilité de résultats au droit du point considéré) des modèles pluie-débit utilisés dans Explore 2070, GR4J et ISBA-MODCOU (avec en entrée les données climatiques issus de chacun des 7 MCG sur la période 1961-1990) et débiaisés par une méthode explicitée plus bas.

SITUATIONS FUTURES POSSIBLES

Les températures de l'eau futures possibles sont calculées en injectant dans les modèles calés à l'étape A les données suivantes :

Températures de l'air : résultats sur la période 2047-2065 de chacun des 7 modèles climatiques globaux (MCG) retenus dans le cadre d'Explore 2070.

Débits : débits calculés par un ou deux (selon la disponibilité de résultats au droit du point considéré) des modèles pluie-débit utilisés dans Explore 2070, GR4J et ISBA-MODCOU (avec en entrée les données climatiques issus de chacun des 7 MCG sur la période 2047-2065) et débiaisés par une méthode explicitée plus bas.

Les situations de référence et futures possibles sont ensuite comparées pour chacun des couples « modèle climatique x modèle pluie-débit », soit 7 à 14 couples selon les points de calcul et ceci pour chacun des deux types de modèles de températures de l'eau (journalier et hebdomadaire). Au final 14 à 28 simulations sont donc obtenues pour chacun des 31 points de mesure de la température.

6.3.2. Précisions sur le choix des variables d'entrée pour chacun des 31 points d'étude

Les températures de l'air utilisées en entrée pour le calage sont les températures issues des réanalyses SAFRAN de Météo France. Ce sont des interpolations spatiales, fonctions de l'altitude, de données observées aux stations climatiques. Elles sont donc proches des températures réelles aux points de mesure météorologiques, mais pas nécessairement en ceux de la température de l'eau. Elles sont disponibles pour les simulations sur les périodes futures et de référence. Leur utilisation comme variable d'entrée est donc sujette à caution.

Le choix du débit pour ajuster le modèle est plus délicat. Les débits issus des modèles pluie-débit ISBA-MODCOU et GR4J ne sont pas toujours disponibles au point de mesure de la température de l'eau. En outre, en tant que débits simulés, ils sont généralement de moins bonnes variables explicatives que les débits observés. L'obtention d'un bon modèle passe donc par l'utilisation des débits observés pour son calage.

Toutefois, lors des simulations de l'impact du changement climatique, les débits simulés seront les variables d'entrée. Il est donc nécessaire de préparer le modèle à leur utilisation. Par exemple, dans certains cas, les débits modélisés les plus adaptés pour un point de mesure de la température de l'eau sont situés en aval ou en amont, voire sur un cours d'eau voisin. Ces débits peuvent donc différer sensiblement des débits observés. S'ajoutent à ces erreurs liées aux distances spatiales, des erreurs liées au fonctionnement des modèles. Les débits issus des modèles présentent donc souvent des caractéristiques différentes des débits observés.

Cette difficulté a été contournée en ajustant un modèle thermique $T_{\text{eau}} = f(T_{\text{air}}, Q_{\text{obs}})$ et un modèle dit de « débiaisage » entre les débits simulés (par ISBA-MODCOU ou GR4J) et observés $Q_{\text{obs}} = g\left(\frac{Q_{\text{pluie}}}{\text{débit}}\right)$, pour ensuite obtenir les températures de l'eau simulées par la combinaison des deux modèles : $T_{\text{eau}} = f\left(T_{\text{air}}, g\left(\frac{Q_{\text{pluie}}}{\text{débit}}\right)\right)$.

Pour obtenir une approximation des débits observés satisfaisante $g\left(\frac{Q_{\text{pluie}}}{\text{débit}}\right)$, il a été nécessaire de choisir les meilleurs points de simulation. Ce choix s'est fait en suivant l'ordre de priorités suivant :

- ▶ Point de simulation identique au point de mesure de la température de l'eau
- ▶ Point de simulation sur le même cours d'eau que le point de mesure de la température de l'eau (à une distance raisonnable)
- ▶ Point de simulation proche et présentant un régime de débit similaire (même phasage, si possible bassin versant similaire)

14 stations de mesure de la température de l'eau étaient aussi des points de simulation ISBA-MODCOU. Parmi les 17 autres, 6 ont été associées à des points de simulations sur le même cours d'eau et 11 sur un cours d'eau voisin.

Seuls 10 points de calcul GR4J coïncidaient avec les stations de mesure de température de l'eau, 10 points de calcul ont été choisis en un autre endroit du même cours d'eau, et 11 sur un cours d'eau voisin. Le tableau 5 présente les couples choisis.

Tableau 6 : Associations entre stations de mesure de la température de l'eau et points de simulation des modèles pluie/débit

* station différente mais sur le même cours d'eau, ** station sur un cours d'eau différent

N°	Station	Point de calcul ISBA-MODCOU	Pont de calcul G R4J
1	Artière à Clermont	L'Allier à Vic-le-Comte**	L'Allier à Vic-le-Comte**
2	Morge à Montcel	La Morge à Maringues*	La Morge à Maringues*
3	Saint Genest à Malauzat	La Morge à Maringues**	La Morge à Maringues**
4	Crédogne à Puy-Guillaume	L'Allier à Limons**	L'Allier à Limons**
5	Sichon à Ferrières-sur-Sichon	L'Allier à St-Yorre**	L'Allier à Saint-Yorre**
6	Seine à Rouen	La Seine à Poses*	La Seine à Paris[Austerlitz] *
7	Austreberthe à Saint-Paer	L'Andelle à Vascoeuil**	L'Andelle à Vascoeuil**
8	Ariège à Auterive	L'Ariège à Auterive	L'Ariège à Auterive
9	Salat à Roquefort	Le Salat à Roquefort-sur-Garonne	Le Salat à Roquefort-sur-Garonne
10	Salat à Saint-Lizier	Le Salat à St-Girons (Aval)*	Le Salat à Saint-Lizier
11	Garonne à Saint-Gaudens	La Garonne (Partielle) à St-Gaudens	La Garonne à Arlos*
12	Garonne à Toulouse	La Garonne à Portet-sur-Garonne*	Garonne à Portet-sur-Garonne*
13	Aveyron à Montricoux	L'Aveyron à Montricoux	L'Aveyron à Laguépie*
14	Thoré à Labruguière	Le Thoré à Labruguière	Le Thore à Labruguière
15	Hers Mort à Toulouse	L' hers Mort à Toulouse	L'Hers Mort à Toulouse
16	Agout à Saint-Lieux-lès-Lavaur	L'Agout à Saint-Lieux-lès-Lavaur	L'Agout à Lavaur*
17	Garonne à Verdun-sur-Garonne	La Garonne à Verdun-sur-Garonne	La Garonne à Verdun-sur-Garonne
18	Garonne à Chaum	La Garonne à Chaum	La Garonne à Arlos*
19	Cèze à Bessèges	La Cèze à St-André-de-Roqueper*	La Cèze à Bessèges
20	Chapeauroux à Saint-Jean-la-Fouillouse	La Truyère au Malzieu-Ville**	Le Lot à Balsièges**
21	Jaur à Olargues	L'Orb à Vieussan**	L'Orb à Vieussan**
22	Lez à Montferrier-sur-Lez	L'Hérault à Puéchabon**	Le Vidourle à Marsillargues**
23	Mayenne à Ambrière-les-Vallées	La Mayenne à Ambrières-les-Vallées	La Mayenne à Saint-Fraimbault-de-Prières*
24	Chère à Derval	Lee Don à Guéméné-Penfao**	L'Aron à Grand-Fougeray**
25	Vendée à Foussais-Payré	La Sèvre Niortaise à Echire**	Le Louing à Chantonnay**
26	Loire à Montjean-sur-Loire	La Loire à Montjean-sur-Loire	La Loire à Montjean-sur-Loire
27	Oudon à Segré	L'Oudon à Segré	L'Oudon à Andigné*
28	Seine à Paris	La Seine à Paris (Pont d'Austerlitz)	La Seine à Paris [Austerlitz]
29	Seine à Paris	La Seine à Paris (Pont d'Austerlitz)*	La Seine à Paris [Austerlitz]*
30	Hien à Saint-Victor-de-Cessieu	Le Guiers à Romagnieu**	La Bourbre à Tignieu-Jamezyieu**
31	Ardèche à Vogüe	L'Ardèche à Vogüe	L'Ardèche à Vogüe

6.3.3. Précisions sur la variable « débit » utilisée dans les modèles de températures développés dans la présente étude

6.3.3.1. Modèles débits observés – débits simulés

Comme exposé au paragraphe 6.2.3, le débit est intégré dans les modèles thermiques sous la forme d'une fonction inverse translatée IQ. Les valeurs de cette variable utilisées pour le calage (issues d'observations) et les valeurs utilisées pour les simulations (issues de modèles pluie-débit) doivent être aussi semblables que possible. On cherche donc à optimiser un modèle de débiaisage de la forme :

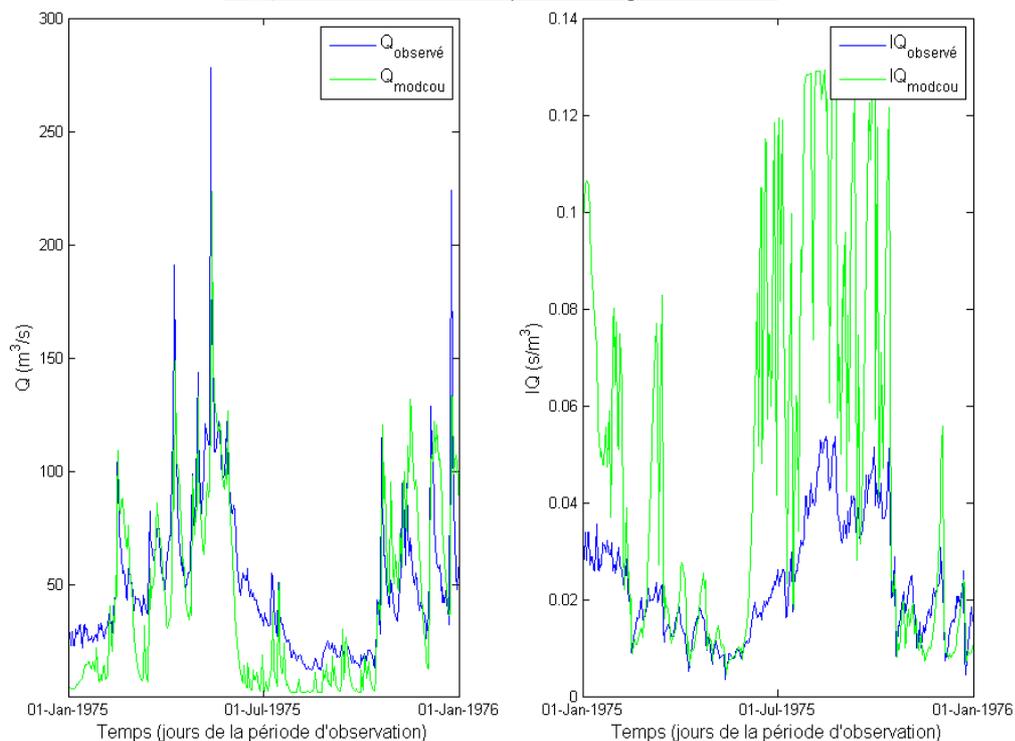
$$\frac{1}{p + Q_{obs}} = h \left(\frac{1}{p' + \frac{Q_{pluie}}{\text{débit}}} \right) \text{ où } p = \frac{Q_{obs}}{10} \text{ et } p' = \frac{Q_{pluie}}{10}$$

6.3.3.1.1. Débits ISBA-MODCOU

En tant que modèle pluie-débit global à base physique, les paramètres du modèle ISBA-MODCOU sont des valeurs physiques mais il n'y a pas de calage local. On observe donc parfois des débits ISBA-MODCOU assez différents des débits observés.

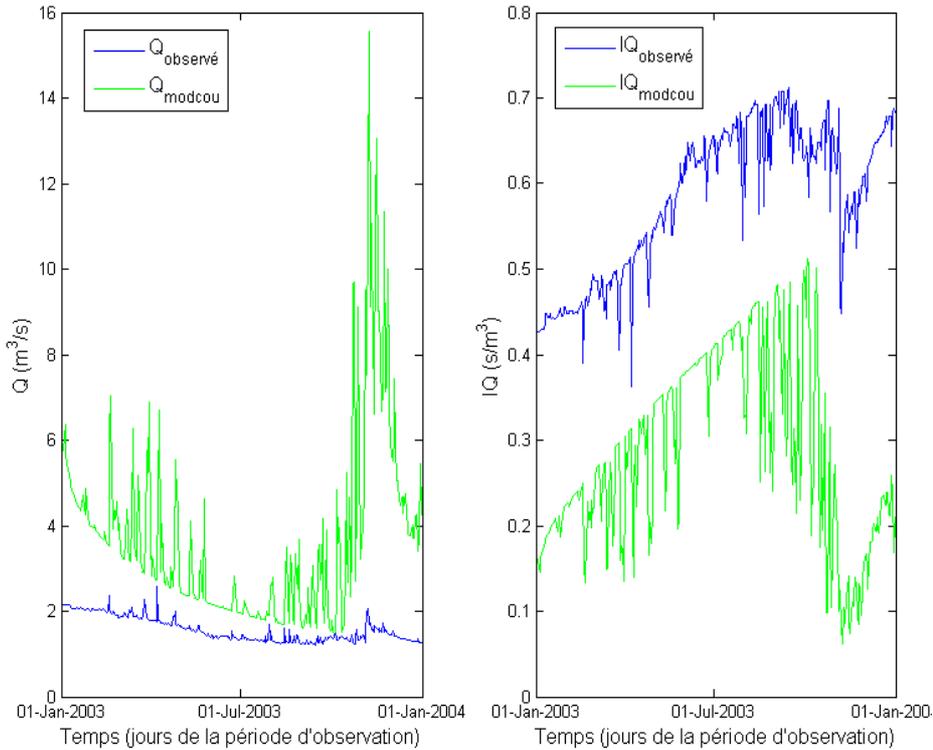
La Figure 12 et la figure 13 montrent qu'aucune relation évidente n'apparaît entre débits observés et débits ISBA-MODCOU, ni entre leurs fonctions inverses translatées. Or, puisque le modèle de débiaisage cherché doit être appliqué dans des conditions de climat simulé, il n'est pas envisageable d'y intégrer d'autres variables explicatives.

Figure 12 : Comparaison des débits observés et des débits ISBA-MODCOU (gauche), ainsi que de la variable IQ qui en dérive (droite) pour l'Ariège à Auterive



La Figure 13 montre les débits et leurs inverses translattés dans le cas de l'Austreberthe à Saint-Paer (débits observés) et de l'Andelle à Vascoeuil (débits modélisés). Malgré l'éloignement des deux stations (37 km), les signaux présentent la même allure, et semblent similaires à une transformation affine près.

Figure 13 : Comparaison des débits observés de l'Austreberthe à Saint-Paer et des débits ISBA-MODCOU de l'Andelle à Vascoeuil (gauche), ainsi que de la variable IQ qui en dérive (droite)



Diverses fonctions du débit ISBA-MODCOU du jour, des jours précédents, ou des jours suivants, ont été testées comme variables explicatives du débit observé. Des modèles de régression linéaire intégrant les variables les plus pertinentes ont ensuite été calées. Compte-tenu des grandes variabilités d'un débit, ils n'ont pas été évalués par leur erreur type pour ne pas donner trop de poids à certaines périodes, mais par leur erreur type relative (ETR) :

$$ETR = \sqrt{\sum_{\text{jours}} \left(\frac{IQ_{sim} - IQ_{obs}}{IQ_{obs}} \right)^2}$$

La comparaison montre que les débits des jours j, j-1 et j+1 suffisent à expliquer les débits observés, et que l'utilisation d'un terme linéaire et d'un terme en racine carrée de IQ_{sim} apporte les meilleurs résultats. Le modèle prend ainsi la forme suivante :

$$IQ_{sim}(j) = \sum_{i=-1}^1 (a_i * IQ_{MODCOU}(j+i) + b_i * \sqrt{IQ_{MODCOU}(j+i)}) + c$$

Ou encore :

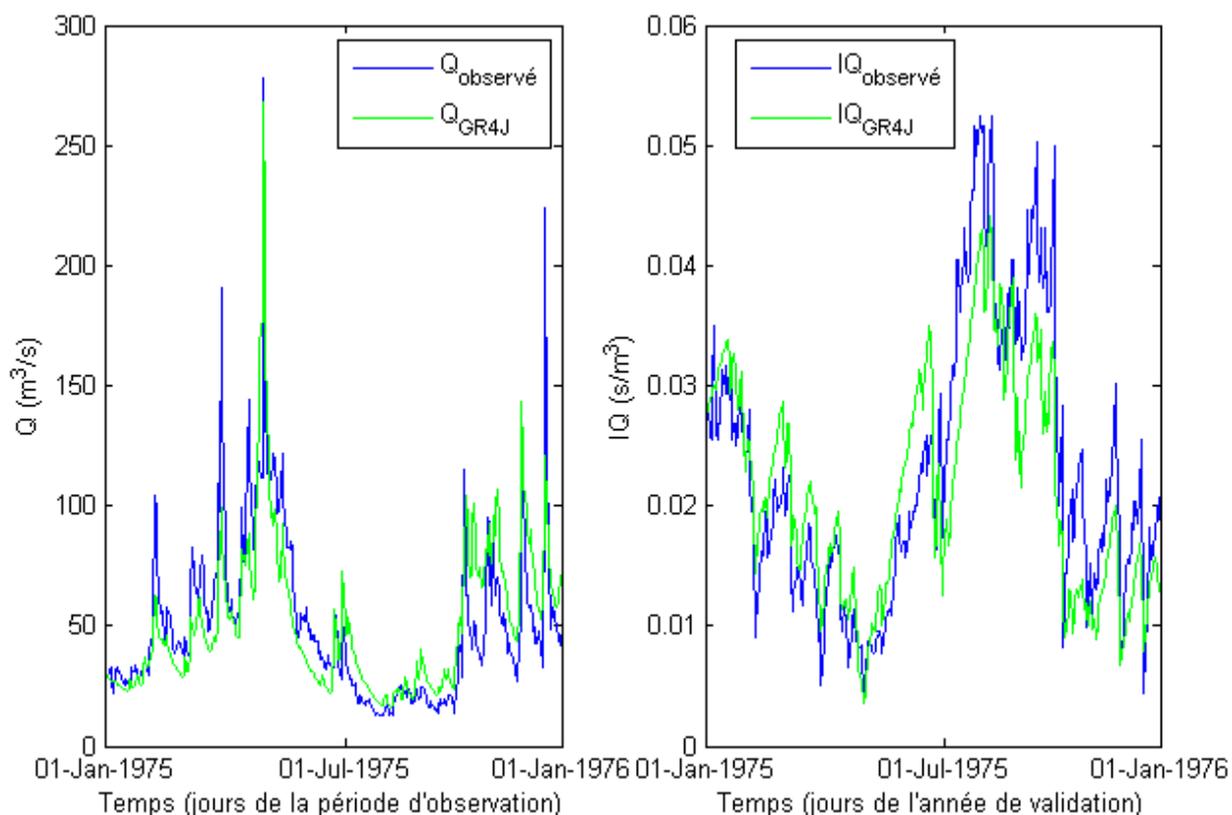
$$\frac{1}{p + Q_{sim}(j)} = \sum_{i=-1}^1 \left(a_i * \frac{1}{p' + Q_{MODCOU}(j+i)} + b_i * \sqrt{\frac{1}{p' + Q_{MODCOU}(j+i)}} \right) + c$$

où (a_i), (b_i) et c sont les coefficients à ajuster pour chaque site, $p = \frac{Q_{sim}}{10}$ et $p' = \frac{Q_{MODCOU}}{10}$

6.3.3.1.2. Débits GR4J

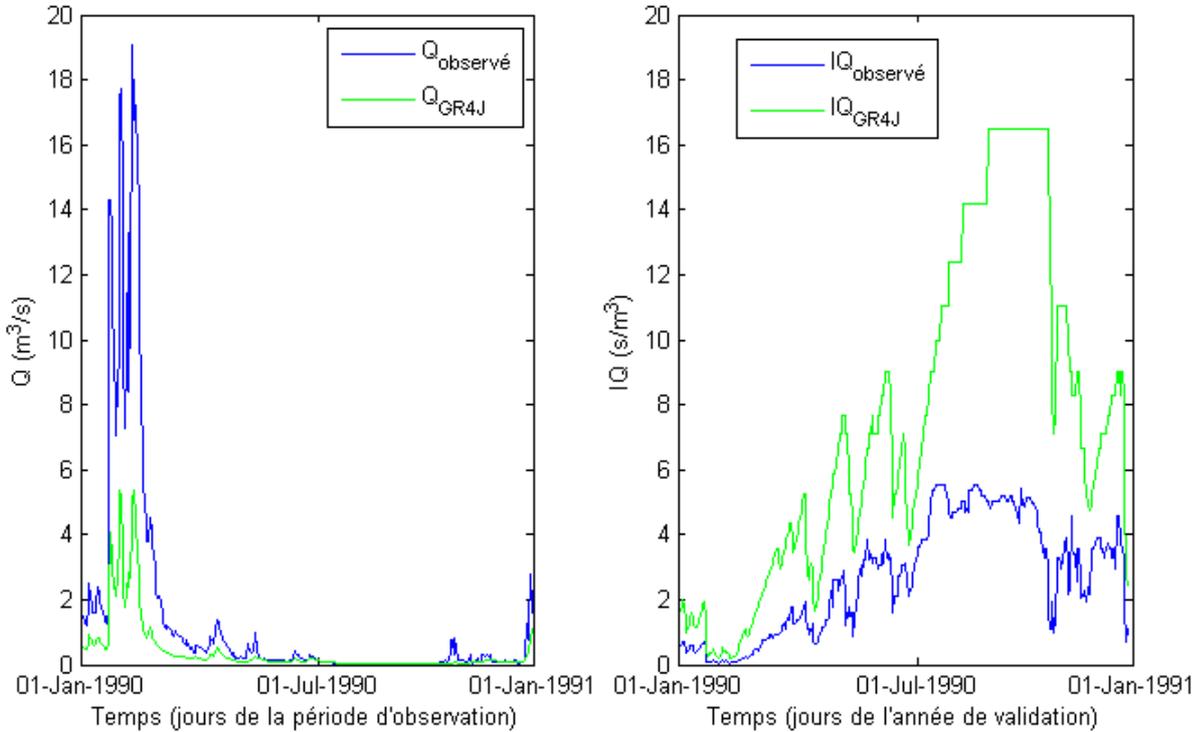
Au contraire des débits ISBA-MODCOU, les débits GR4J sont issus d'un modèle calé localement. La Figure 14 montre que les débits GR4J ont une allure plus proche des débits observés que les débits ISBA-MODCOU. Remarquons notamment que les pics de débits sont dans les mêmes ordres de grandeur, et que la vitesse de diminution du débit après ces pics est bien simulée. Un ajustement léger doit donc donner aux variables IQ les caractéristiques adaptées aux modèles de température de l'eau.

Figure 14 : Comparaison des débits observés et des débits GR4J (gauche), ainsi que de la variable IQ qui en dérive (droite) pour l'Ariège à Auterive



La figure suivante montre les débits et leurs inverses translattés dans le cas de la Chère à Derval et de l'Aron à Grand-Fougeray. Les débits ne sont pas du même ordre de grandeur, mais ils varient de la même façon dans le temps, et laissent penser qu'une relation peut être mise au point pour les relier.

Figure 15 : Comparaison des débits observés de la Chère à Derval et des débits GR4J de l'Aron à Grand-Fougeray (gauche), ainsi que de la variable IQ qui en dérive (droite)



Dans ce cas l'erreur type minimale a été obtenue par une régression linéaire incluant des fonctions linéaires, quadratiques, et en racine carré de $IQ_{\text{pluie/débit}}$. Il est apparu que l'intégration des données décalées de plus de 3 jours n'apportait aucune amélioration significative. Le modèle prend ainsi la forme suivante :

$$IQ_{sim}(j) = \sum_{i=-2}^2 \left(a_i * IQ_{GR4J}(j+i) + b_i * \sqrt{IQ_{GR4J}(j+i)} + c_i * IQ_{GR4J}(j+i)^2 \right) + d$$

Ou encore :

$$\frac{1}{p + Q_{sim}(j)} = \sum_{i=-2}^2 \left(a_i * \frac{1}{p' + Q_{GR4J}(j+i)} + b_i * \sqrt{\frac{1}{p' + Q_{GR4J}(j+i)}} + c_i * \left(\frac{1}{p' + Q_{GR4J}(j+i)} \right)^2 \right) + d$$

où (a_i) , (b_i) , (c_i) et d sont les coefficients à ajuster, $p = \frac{Q_{sim}}{10}$ et $p' = \frac{Q_{GR4J}}{10}$

6.3.4. Précisions sur le calage des modèles thermiques

PERIODES DE CALAGE ET DE VALIDATION

Le choix des périodes de calage et de validation a été fait en fonction de deux critères :

- ▶ avoir des périodes de validations comparables d'un modèle à l'autre, donc de même durée.
- ▶ avoir un maximum de données continues dans la période de validation pour pouvoir dégrader les résultats à un pas de temps mensuel et comparer les performances des modèles aux pas de temps journalier et hebdomadaire. Il a en effet été vérifié que les erreurs se compensent en partie lorsque les moyennes mensuelles sont calculées à partir de températures simulées de différentes années.

6.3.4.1. Moyennes hebdomadaires

Comme expliqué dans la partie 5.3, seules ont été conservées les stations pour lesquelles un minimum de deux températures moyennes hebdomadaires (TMH) sont disponibles pour chacune des 52 semaines de l'année.

La sélection d'une période de validation s'est faite en choisissant pour chaque semaine, la TMH la plus récente. Dans le cas de données continues, les données de validation seront donc les données de la dernière année de mesure. Lorsque cette dernière année n'est pas complète, la série est en revanche complétée par des TMH des années précédentes.

6.3.4.2. Moyennes journalières

De la même façon que pour les valeurs hebdomadaires, le choix a été fait de retenir, pour chacun des 73 intervalles de 5 jours de l'année, les cinq dernières températures moyennes journalières disponibles.

Mais contrairement aux valeurs hebdomadaires pour lesquelles chaque semaine de l'année est représentée dans la période de calage, l'hypothèse a été faite ici que les valeurs journalières restantes, après définition des données de validation, sont suffisamment nombreuses et bien réparties pour ajuster un modèle.

Le modèle linéaire utilisant les températures moyennes hebdomadaires est calé selon le critère des moindres carrés. Pour prendre en compte les saisons, un ajustement des paramètres est fait indépendamment sur chacune d'elles. Cette distinction des saisons répond principalement à deux problèmes. D'une part, puisqu'il est impossible de caler une courbe sigmoïde réaliste, il était nécessaire de prendre en compte l'effet variable de la température de l'air sur la température de l'eau suivant l'intervalle de température. D'autre part, la hauteur des nappes varie dans l'année, et la répartition des débits entre les différentes sources peut évoluer. La température des eaux souterraines peut donc jouer un rôle différent suivant la saison, si bien qu'il est parfois intéressant d'adapter la relation entre température de l'eau, température de l'air et débit

Puisque le modèle est linéaire, un biais sur une variable d'entrée se traduit par un biais de sortie invariant quelle que soit cette variable d'entrée. Le biais sera multiplié par un coefficient propre au modèle. En particulier, ce biais sera le même pour la période de référence et la période future. Ainsi, même en ajustant des paramètres différents pour chaque saison, les résultats resteront comparables après correction du biais lié à chaque jeu de paramètres.

Pour chaque station, un choix est ensuite fait entre les modèles faisant intervenir le débit ou non, et avec ajustement par saison ou non, en fonction de l'erreur type la plus basse.

Le modèle logistique utilisant les températures moyennes journalières est calé en deux temps. Dans une première étape, les paramètres d'une fonction logistique reliant les températures de l'eau et de l'air du jour sont déterminés.

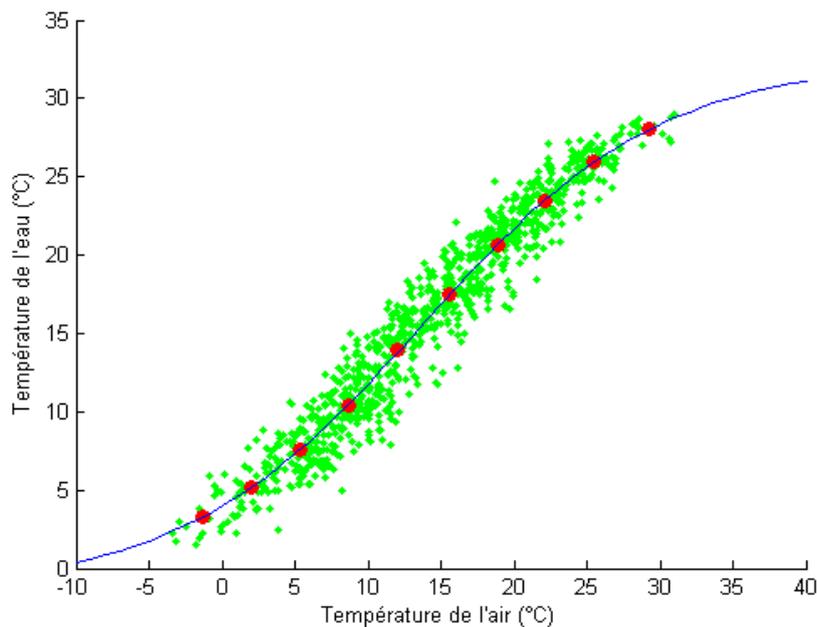
Ils sont calés selon le critère des moindres carrés sous les contraintes suivantes :

- ▶ $\mu < \min(\text{TMJ})$ (température asymptotique basse inférieure à la plus basse observée)
- ▶ $\alpha > \max(\text{TMJ})$ (température asymptotique haute supérieure à la plus haute observée)
- ▶ $\gamma > 0$ (courbe croissante)

La température asymptotique basse n'est pas fixée à 0 °C, température minimale de l'eau liquide, car cela réduirait la précision des modèles alors que cette valeur n'a pas d'importance particulière en conditions de climat futur, au contraire de la température asymptotique haute.

De façon à ne pas donner trop de poids aux nombreuses valeurs de températures intermédiaires, les températures de l'air sont moyennées sur 10 segments de mêmes longueurs, et les températures de l'eau moyennes y sont associées. L'ajustement des paramètres est réalisé sur ces 10 points (figure suivante).

Figure 16 : Exemple d'ajustement d'une fonction logistique entre températures de l'air et de l'eau moyennées par intervalles



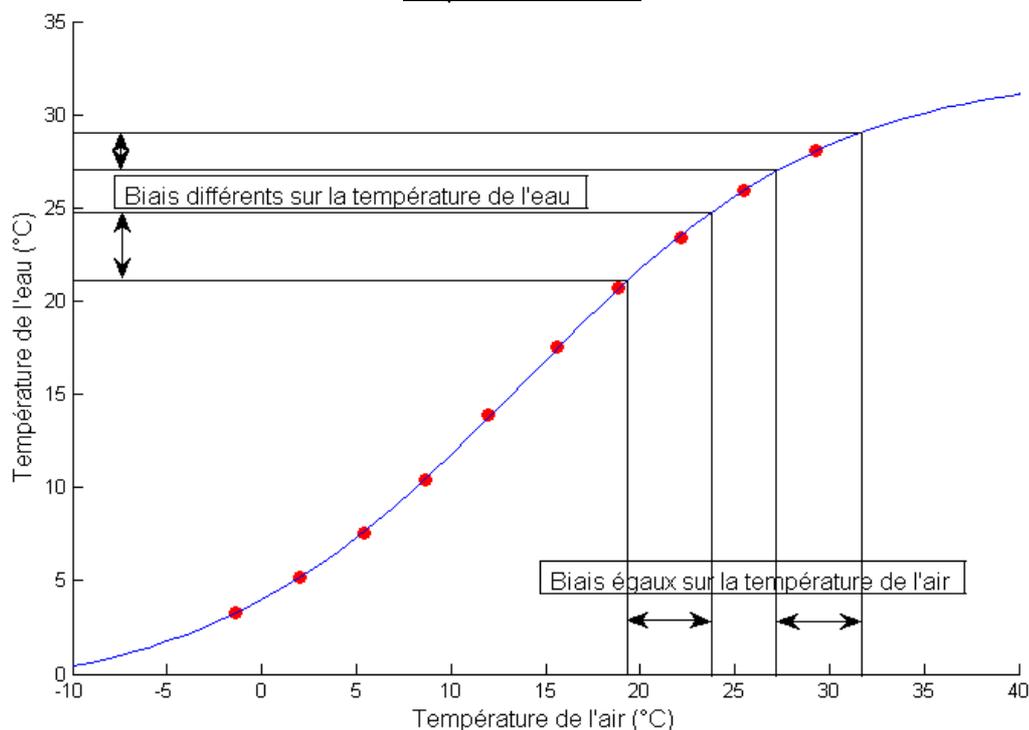
HERS MORT A TOULOUSE

Une fois cet ajustement réalisé, la seconde étape consiste en la modification de l'argument de la sigmoïde. Les températures asymptotiques sont fixées par la première étape, et les autres paramètres sont déterminés par une régression linéaire multiple après inversion de la fonction logistique :

$$\text{sigm}^{-1}(T_{\text{eau}}(t)) = \sum_{i=0}^{15} a_i * T_{\text{air}}(t - i) + b * IQ + c$$

Ici l'ajustement n'est pas réalisé indépendamment sur plusieurs périodes de l'année. La non-linéarité du modèle implique en effet un transfert variable du biais sur les variables d'entrée, si bien qu'il n'est plus possible de le corriger précisément. Les résultats des différentes périodes seraient alors dépourvus de cohérence.

Figure 17 : Suivant la valeur de la température de l'air, le biais va se transmettre différemment à la température de l'eau



6.3.4.3. *Choix des modèles de température de l'eau pour chaque point de calcul*

La courte période de validation choisie peut fausser l'erreur type et être la cause d'erreur de jugement. Un grand nombre de tirages aléatoires des périodes de validation et de calage ont donc été effectués pour obtenir des informations plus sûres sur les modèles les plus efficaces pour chaque station.

Pour une période de l'année donnée, les dernières données disponibles étaient retenues pour la validation. Pour ces nouveaux tirages, les données de validation sont choisies aléatoirement dans l'ensemble des données disponibles pour constituer une année de donnée. Les autres données sont conservées pour le calage.

Les données ainsi utilisées pour la validation des modèles proviennent d'années différentes. Des simulations dégradées au pas de temps mensuel n'auraient donc aucun sens. Ce sont donc les erreurs types au pas de temps de simulation, en moyenne sur l'ensemble des tirages avec les périodes de calage/validation aléatoires, qui sont utilisées pour sélectionner le modèle le plus adapté à chaque station.

Pour toutes les stations, la prise en compte des températures de l'air des périodes précédentes améliore les modèles. En revanche, les débits et l'ajustement des paramètres par saison ne réduisent pas toujours l'erreur type.

Les modèles choisis sont présentés dans le Tableau 7. Dans le cas hebdomadaire, on voit que l'ajustement en 4 saisons est profitable dans 22 cas sur 26, alors que seulement la moitié des températures de l'eau sont mieux expliquées en intégrant les débits aux modèles. Dans le cas journalier, ce sont en revanche 24 modèles sur les 31 qui sont améliorés par la prise en compte du débit.

Tableau 7 : Choix de modélisation par station

N° station	Rivière	Modèle hebdomadaire		Modèle journalier
		Utilisation des débits	Ajustement indépendant sur 4 saisons	Utilisation des débits
1	Artière	Oui	Oui	Oui
2	Morge	Non	Oui	Oui
3	Saint Genest	Non	Non	Non
4	Crédogne	Non	Oui	Oui
5	Sichon	Non	Oui	Oui
6	Seine	Oui	Oui	Oui
7	Austreberthe			Oui
8	Ariège	Non	Oui	Oui
9	Salat	Oui	Oui	Oui
10	Salat	Oui	Oui	Oui
11	Garonne	Oui	Non	Oui
12	Garonne	Oui	Oui	Oui
13	Aveyron	Non	Non	Non
14	Thoré	Non	Oui	Oui
15	Hers Mort	Non	Oui	Oui
16	Agout			Non
17	Garonne	Oui	Oui	Oui
18	Garonne	Oui	Oui	Oui
19	Cèze	Oui	Oui	Non
20	Chapeauroux			Oui
21	Jaur	Non	Oui	Oui
22	Lez	Oui	Oui	Non
23	Mayenne	Non	Oui	Oui
24	Chère	Non	Oui	Oui
25	Vendée	Oui	Non	Oui
26	Loire	Non	Oui	Oui
27	Oudon	Non	Oui	Non
28	Seine	Oui	Oui	Oui
29	Seine	Oui	Oui	Oui
30	Hien			Oui
31	Ardèche			Non

7. PERFORMANCES DES MODELES

7.1. PERFORMANCE DES MODELES DE DEBIAISAGE

7.1.1. Débiaisage des Débits ISBA-MODCOU

Les résultats sont très hétérogènes d'une station hydrométrique à une autre. L'erreur type relative est en moyenne de 0,70 mais varie de 0,15 (station 6, la Seine à Rouen/Poses) à 1,64 (station 27, l'Oudon à Segré). Pour les couples « point de simulation » – « station de mesure » identiques, cette erreur passe de 1,73 à 0,59 grâce au modèle. Malgré une précision qui reste faible, l'amélioration est donc importante par rapport aux débits ISBA-MODCOU. L'erreur type relative est de 0,69 pour les couples distants mais sur une même rivière et de 0,85 pour les couples sur des rivières distinctes. La différence de performance du modèle entre ces trois catégories est relativement faible au regard de l'écart entre les erreurs extrêmes.

Figure 18 : Simulation de la variable IQ de la Seine à Rouen à partir des débits ISBA-MODCOU de la Seine à Poses

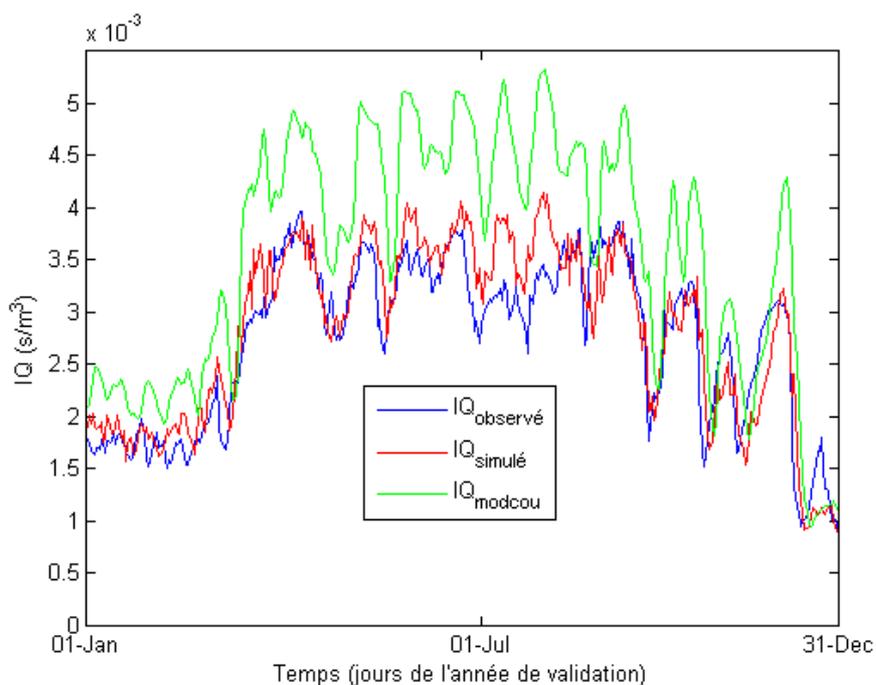
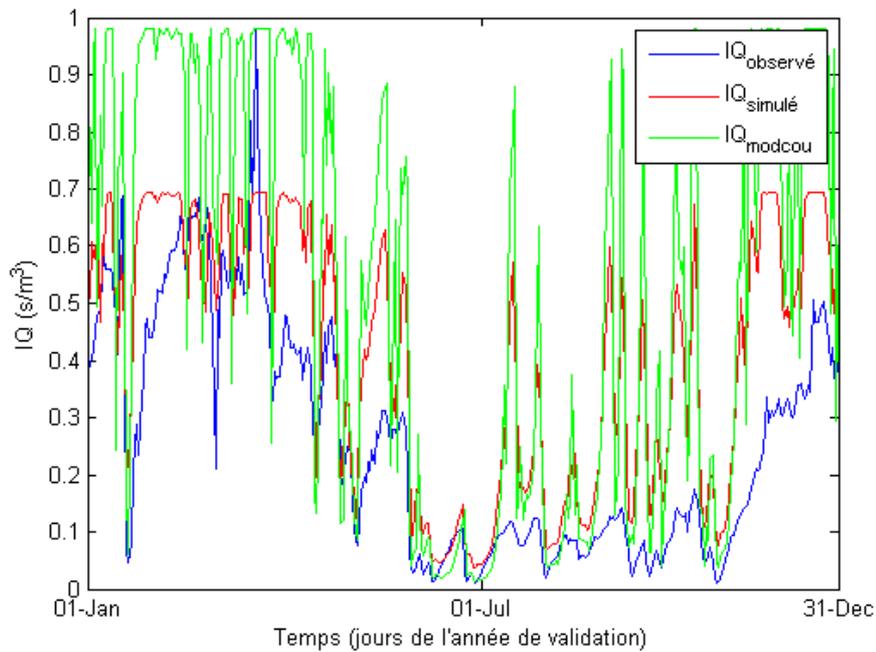
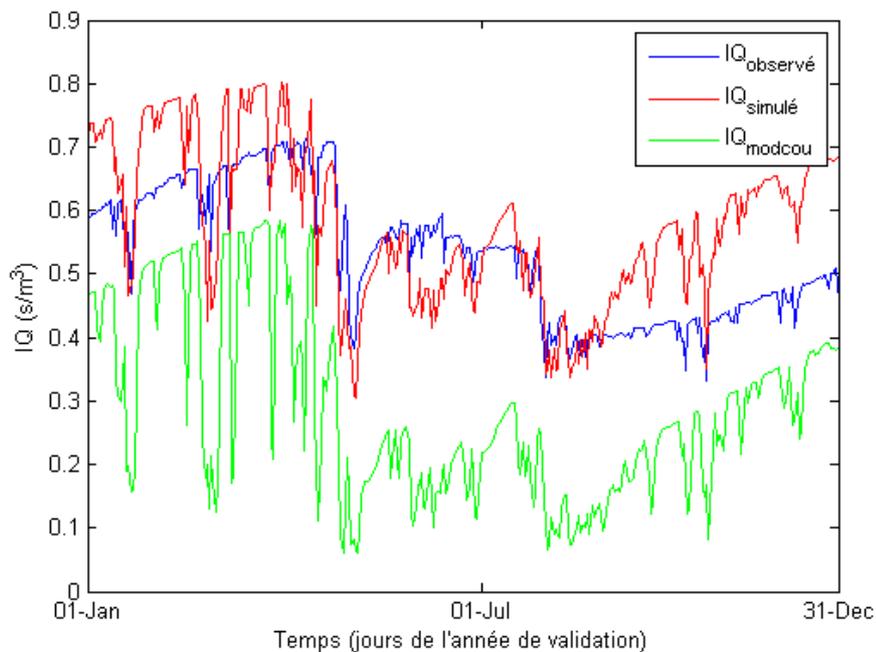


Figure 19 : Simulation de la variable IQ de l'Oudon à Segré à partir des débits ISBA-MODCOU



La Figure 20 représente un exemple de simulation pour deux stations situées sur deux rivières différentes. Bien que la variable IQ simulée approche bien la valeur observée pour certaines périodes, il reste des écarts importants, probablement dus aux différences de régime de débit entre les deux rivières.

Figure 20 : Simulation de la variable IQ de l'Austreberthe à Saint-Paer à partir des débits ISBA-MODCOU de l'Andelle à Vascoeuil



7.1.2. Débiaisage des Débits GR4J

Pour 10 stations, l'intersection entre la période de disponibilité des données GR4J et des données observées étaient insuffisantes pour caler un modèle. Sur les 21 stations restantes, les résultats sont nettement meilleurs que pour les débits ISBA-MODCOU. L'erreur type relative est en moyenne de 0,41 mais varie de 0,19 (station 26, la Loire à Montjean, Figure 21) à 1,06 (station 2, la Morge à Montcel/Maringues, Figure 22). Pour les couples « point de simulation » – « station de mesure » identiques, cette erreur passe de 0,40 à 0,37 grâce au modèle de débiaisage. Les gains sur les débits GR4J sont donc minimes. Le modèle est surtout nécessaire pour les couples distants. L'erreur type relative est de 0.44 pour les couples distants mais sur une même rivière et de 0,44 également pour les couples sur des rivières distinctes. Là encore, la différence de performance du modèle entre les trois catégories est relativement faible. La Figure 23 représente un exemple de simulation pour deux stations situées sur deux rivières différentes.

Figure 21 : Simulation de la variable IQ de la Loire à Montjean à partir des débits GR4J au même point

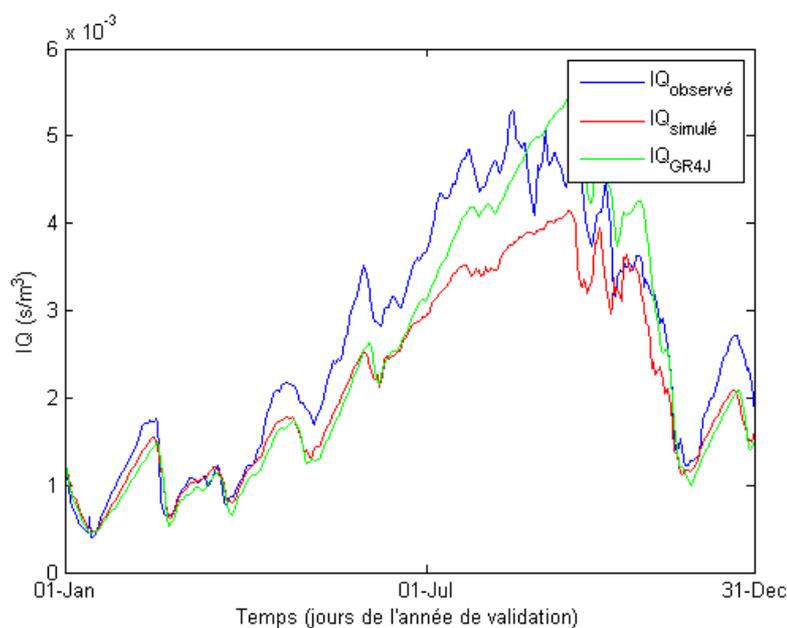


Figure 22 : Simulation de la variable IQ de la Morge à Montcel à partir des débits GR4J de la Morge à Maringues

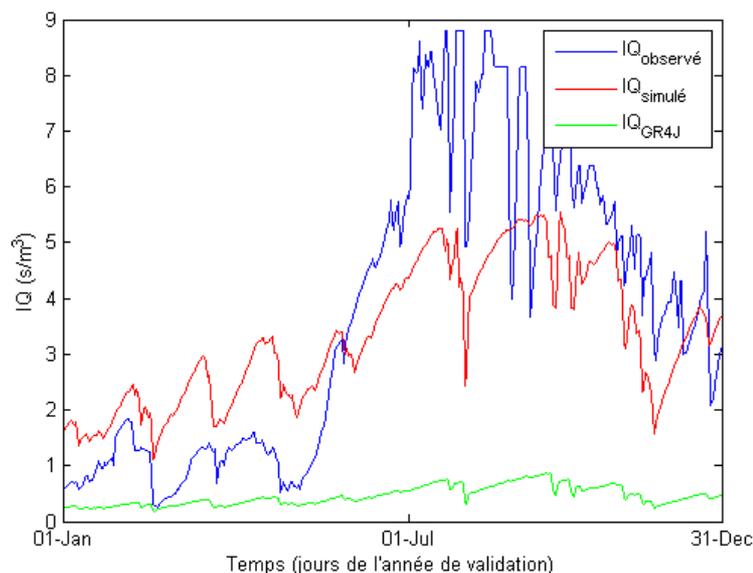
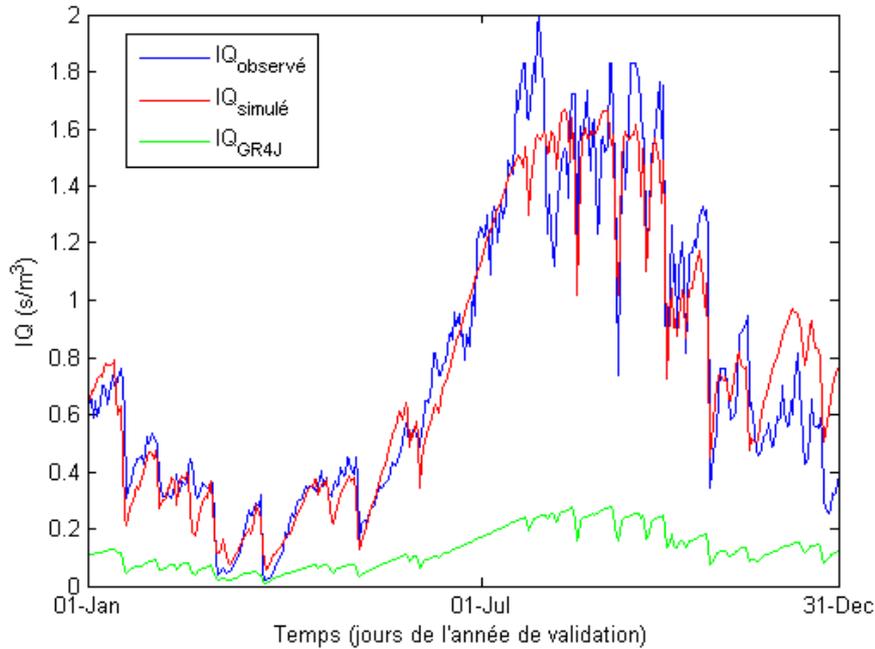


Figure 23 : Simulation de la variable IQ du Jaur à Olargues à partir des débits GR4J de l'Orb à Vieussan



7.2. ANALYSE DES COEFFICIENTS DES MODELES THERMIQUES

Pour le modèle linéaire, les paramètres sont calés pour une saison donnée, donc à partir d'un nombre de températures moyennes hebdomadaire limité. Pour le modèle logistique, les températures asymptotiques, déterminées par extrapolation, sont aussi incertaines. Ce paragraphe propose de discuter de la validité de ces ajustements.

Pour toutes les stations et les 4 saisons, le poids de la température de l'air dans la détermination de la température de l'eau a été calculé par la somme des deux coefficients multiplicatifs des températures de l'air dans le modèle linéaire ($a_0 + a_1$). Après exclusion de la station sur la Morge à Montcel où l'influence du barrage de la Sep est très forte, les coefficients moyens par saison sont présentés dans le Tableau 8.

Tableau 8 : Poids des températures de l'air dans le modèle linéaire

	Hiver	Printemps	été	Automne
Poids de la température de l'air	0,66	0,75	0,73	0,81

Comme attendu, la température de l'eau réagit plus fortement à la température de l'air au printemps et à l'automne, alors que les températures ont des valeurs intermédiaires. On retrouve aussi une possible influence des eaux souterraines avec un poids inférieur au printemps, lorsque les nappes ont été rechargées par les pluies hivernales, qu'en automne.

Les températures asymptotiques du modèle logistique présentent des valeurs acceptables à l'exception de la Morge, fortement influencée par un barrage, et de la Garonne à Saint-Gaudens, dont la température n'atteint pas de valeurs suffisamment fortes pour ajuster l'asymptote haute. Pour ces deux stations, les modèles se comportent comme des modèles linéaires. Pour les 29 autres stations, les valeurs de températures asymptotiques sont résumées dans le Tableau 9.

Tableau 9 : Températures asymptotiques du modèle logistique

	Moyenne	Minimum	Maximum
Températures asymptotiques basses	1,0 °C	-2,0 °C	6, 3 °C
Températures asymptotiques hautes	25,6 °C	16,0 °C	3 2,8 °C

Les températures asymptotiques basses sont assez proches de la valeur physiquement attendue de 0 °C. En revanche, les températures asymptotiques hautes sont beaucoup plus diffuses. Elles sont généralement plus faibles en tête de bassin (Auvergne par exemple). Ceci peut s'expliquer par l'ombre qui limite le chauffage par le rayonnement solaire. Les valeurs pour les cours d'eau larges et peu sujets à l'ombre de la végétation rivulaire semblent légèrement sous-estimées, puisqu'une approche physique prévoit, par exemple, une valeur de 35 °C environ sur la Loire (Moatar et al., 2010).

7.3. PERFORMANCE DES MODELES THERMIQUES

Les tableaux 10 et 11 présentent les indicateurs de performances, en moyenne sur l'ensemble des stations, pour les modèles au pas de temps hebdomadaire et journalier. Ces indicateurs sont :

- Erreur type (ET) journalière et hebdomadaire, au pas de temps de simulation :

$$ET = \frac{1}{N_{station}} \sum_{station} \sqrt{\frac{1}{D} \sum_t (T_{sim}(t) - T_{eau}(t))^2}$$

Valeur absolue du biais journalier et hebdomadaire, au pas de temps de simulation :

$$|Biais| = \frac{1}{N_{station}} \sum_{station} \left| \frac{1}{D} \sum_t (T_{sim}(t) - T_{eau}(t)) \right|$$

- Erreur type mensuelle : erreur type après calcul des moyennes mensuelles.

Où T_{sim} est la température simulée, T_{obs} est la température observée, $N_{station}$ est le nombre de station, D est la durée de la période de simulation (en jours ou semaines) et t est l'indicateur du temps (en jours ou semaines).

Tableau 10 : Performances du modèle linéaire au pas de temps hebdomadaire (en moyenne sur l'ensemble des stations)

Choix de modélisation : variables d'entrée + période de calage	ET hebdomadaire (°C)	Biais hebdomadaire (°C)	ET mensuelle (°C)
T_air(t) + année entière	1,53	0,31	1,07
T_air(t), T_air(t-i) + année entière	1,15	0,30	0,90
T_air(t), T_air(t-i) + saisons	1,02	0,30	0,80
T_air(t), T_air(t-i), Q(t) + année entière	1,09	0,30	0,85
T_air(t), T_air(t-i), Q(t) + saisons	0,93	0,29	0,71

Tableau 11 : Performances du modèle logistique au pas de temps journalier (en moyenne sur l'ensemble des stations)

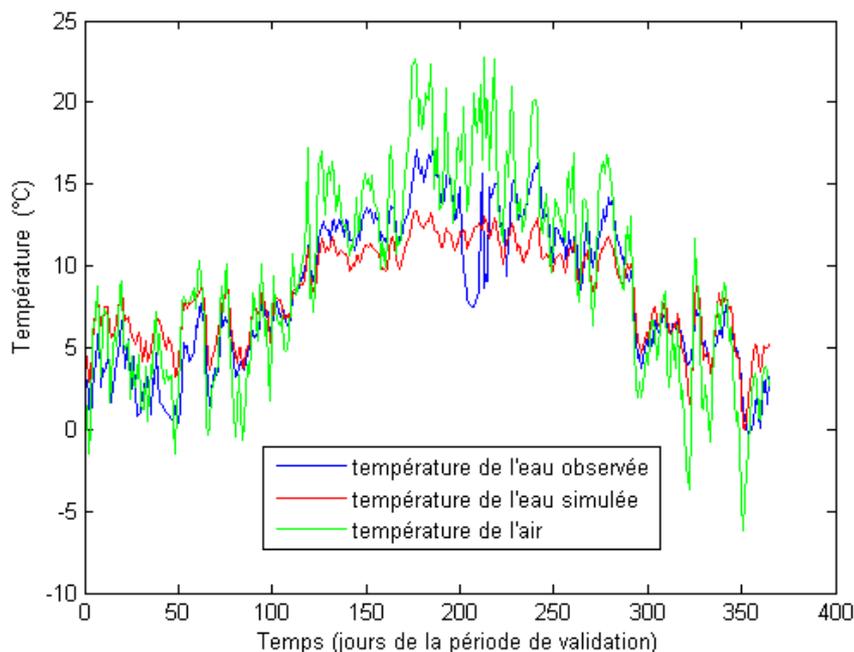
Choix de modélisation : variables d'entrée	ET journalière (°C)	Biais journalier (°C)	ET mensuelle (°C)
T _{air} (t)	2,00	0,32	1,16
T _{air} (t), T _{air} (t-i)	1,36	0,28	1,02
T _{air} (t), T _{air} (t-i), Q(t)	1,22	0,31	0,87

Avec les deux pas de temps, le biais varie peu avec les variables d'entrée. On a en revanche une nette amélioration de l'erreur type par la prise en compte successive de la température de l'air des jours précédents, du débit, et des saisons.

7.3.1. Exemples pour le modèle au pas de temps journalier

Les figures suivantes (Figure 24 à Figure 27) montrent la qualité de la meilleure simulation (Austreberthe à Saint-Paer), de la pire simulation (Morge à Montcel), et de la simulation de qualité moyenne pour un cours d'eau de plus fort débit (Salat à Saint-Lizier, module de 35 m³/s) au pas de temps journalier et dégradé au pas de temps mensuel.

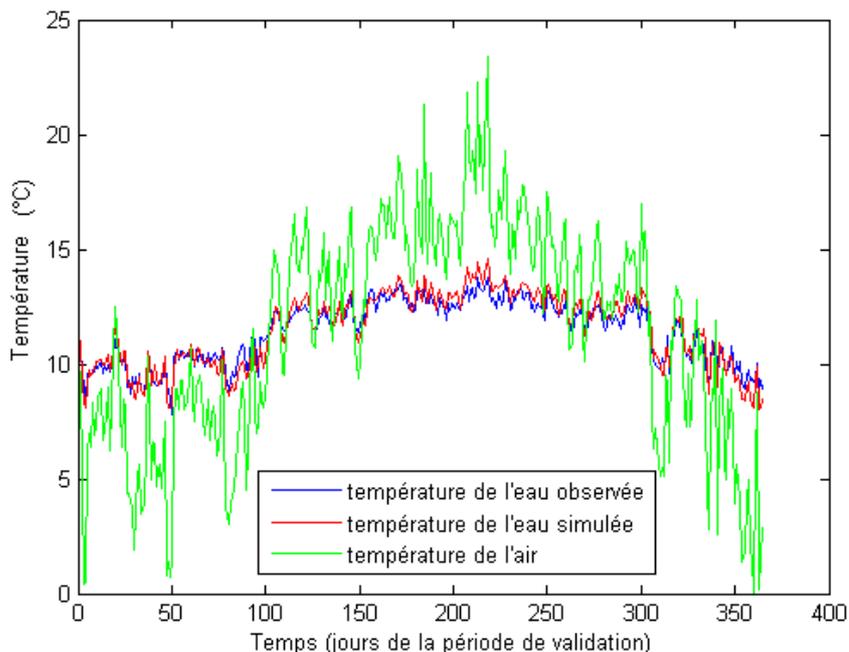
Figure 24 : Simulation de la température de l'eau de la Morge à Montcel (Puy-de-Dôme)



Pas de temps journalier, sigmoïde, prise en compte des débits et des températures de l'air des jours précédents (erreur type : 2,20 °C ; biais : 0,079 °C)

La Morge est fortement influencée à l'étiage par un barrage situé sur la Sep, un de ses affluents. Ceci explique les chutes de températures en dessous de 10 °C en été. Les paramètres du modèle sont affectés par ce régime perturbé, d'où l'erreur importante commise.

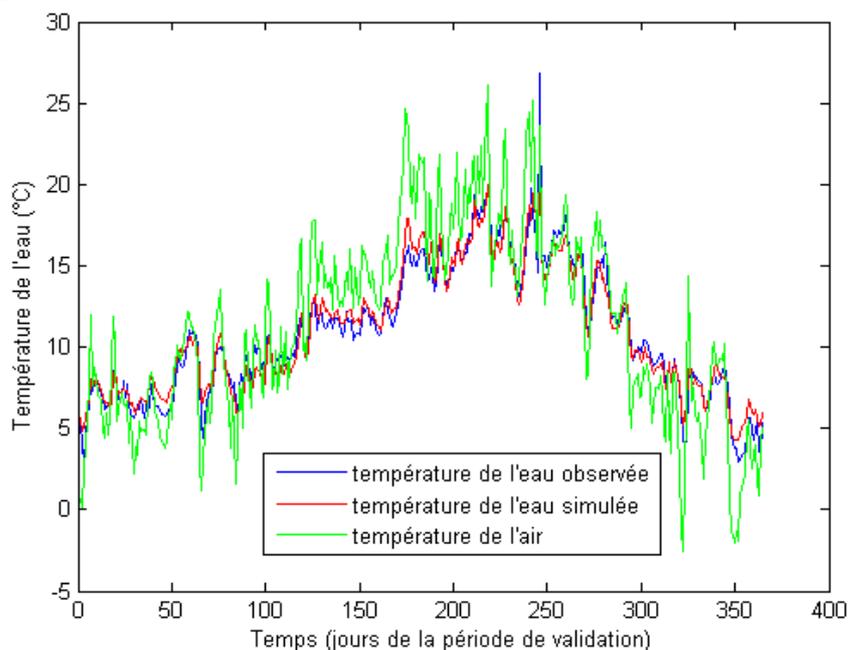
Figure 25 : Simulation de la température de l'eau de l'Austreberthe à Saint-Paer (Seine Maritime)



Pas de temps journalier, sigmoïde, prise en compte des débits et des températures de l'air des jours précédent (erreur type : 0,47 °C ; biais : 0,113 °C)

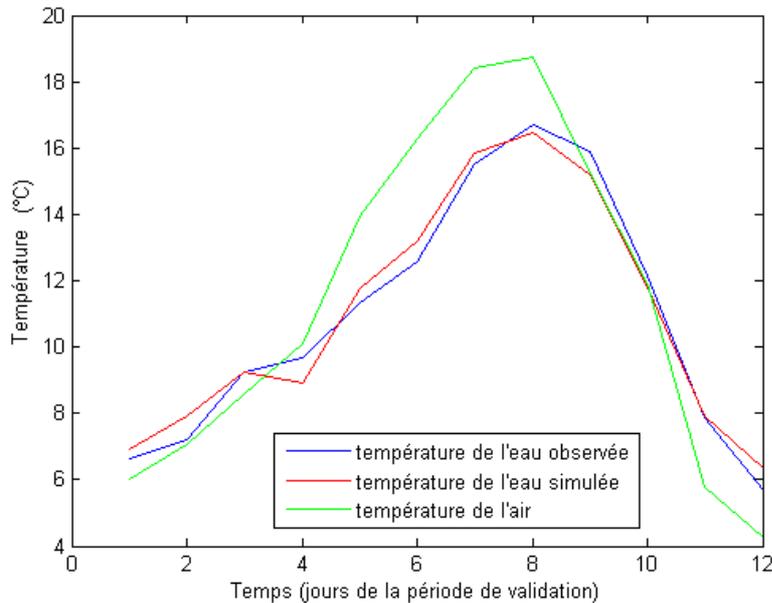
L'Austreberthe présente des variations annuelles de température très réduites, probablement en grande partie en raison d'échanges avec des eaux souterraines à température constante. Comparée à l'amplitude de ces variations, l'erreur est donc assez similaire à l'erreur moyenne sur l'ensemble des stations.

Figure 26 : Simulation de la température de l'eau du Salat à Saint-Lizier (Ariège)



Pas de temps journalier, sigmoïde, prise en compte des débits et des températures de l'air des jours précédent (erreur type : 0,85 °C ; biais : 0,081 °C)

Figure 27 : Simulation de la température de l'eau du Salat à Saint-Lizier (Ariège), dégradée au pas de temps mensuel (erreur type : 0,48 °C)

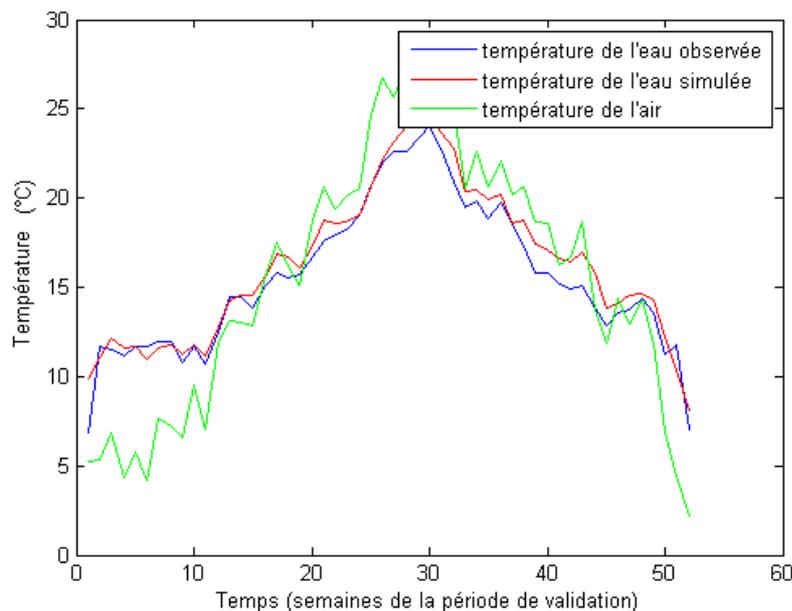


Le Salat, modélisé assez précisément, est référencé comme « peu ou pas influencé » et présente des débits assez importants. Dans ces simulations, des erreurs liées à la nature du modèle sont reproduites sur de longues périodes et apparaissent une fois la résolution dégradée au pas de temps mensuel. Une autre partie évolue d'un jour à l'autre du fait de phénomènes chaotiques et est donc très réduite par l'utilisation de moyennes mensuelles. L'erreur type est donc plus faible lorsque la résolution temporelle est dégradée.

7.3.2. Exemples pour le modèle au pas de temps hebdomadaire

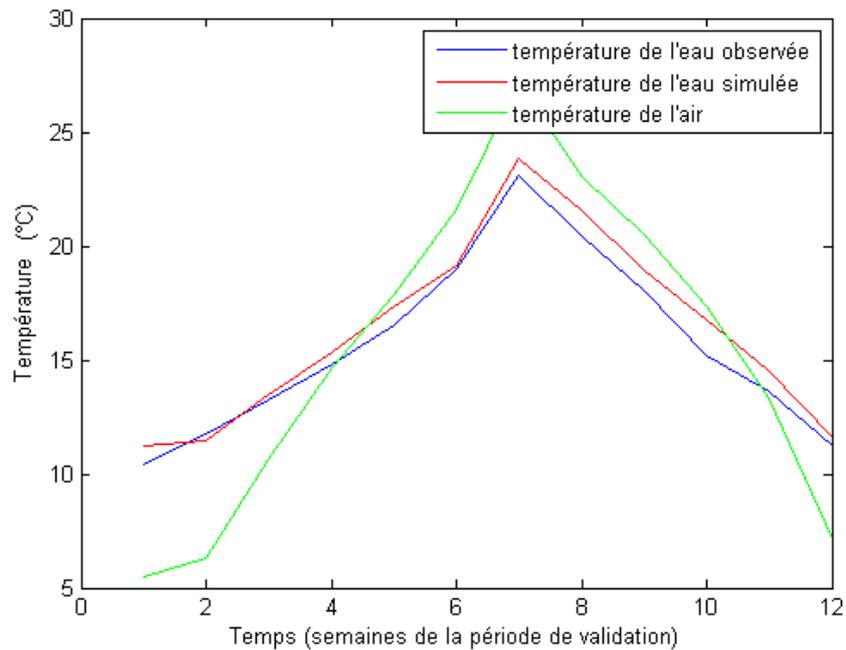
Les figures suivantes (Figure 28 et Figure 29) représentent les simulations sur la période de validation au pas de temps hebdomadaire pour le Lez à Montferrier-sur-Lez.

Figure 28 : Simulation de la température de l'eau du Lez à Montferrier-sur-Lez (Hérault)



Pas de temps hebdomadaire, linéaire, prise en compte des débits et des températures de l'air de la semaine précédente (erreur type : 1,00 °C ; biais : 0,66 °C)

Figure 29 : Simulation de la température de l'eau du Lez à Montferrier-sur-Lez, dégradée au pas de temps mensuel (erreur type : 0,80 °C)



Là encore, l'erreur type est réduite lors du passage à des moyennes mensuelles, mais dans une moindre mesure. Ceci s'explique par le fort biais, conservé à la résolution mensuelle. L'erreur commise pour cette station est supérieure à la moyenne sur l'ensemble des stations. Toutefois, l'écart entre températures observée et simulée ne dépasse 1 °C que pour deux mois (août et octobre). Ces performances sont comparées aux valeurs de la littérature dans la partie 9.2.

7.4. PERFORMANCE DES MODELES COMBINES

De façon à s'assurer de l'efficacité des modèles composés par l'enchaînement « modèles pluie-débit » – « modèles de débiaisage » – « modèles thermiques », leur efficacité a également été testée globalement. Pour les paramètres retenus, les indicateurs de performance obtenus avec les débits observés et avec les débits débiaisés (à partir des débits Isba-Modcou) sont comparés. Les résultats sont présentés dans les tableaux suivants : Tableau 12 : Performances du modèle thermique au pas de temps hebdomadaire pour les débits Isba-Modcou et le Tableau 13 (pas de temps journalier).

Tableau 12 : Performances du modèle thermique au pas de temps hebdomadaire pour les débits Isba-Modcou

	ET hebdomadaire (°C)	Biais hebdomadaire (°C)	ET mensuelle (°C)
Débits observés	0,88	0,24	0,66
Débits ISBA-MODCOU	0,91	0,22	0,68

Tableau 13 : Performances du modèle thermique au pas de temps journalier pour les débits Isba-Modcou

	ET journalière (°C)	Biais journalier (°C)	ET mensuelle (°C)
Débits observés	1,08	0,21	0,74
Débits ISBA-MODCOU	1,10	0,18	0,78

Remarquons en premier lieu que les erreurs sont inférieures à celle présentées dans les tableaux 10 et 11, obtenus pour une validation croisée à partir d'une partie des données. Les paramètres des modèles sont ici déterminés à partir de l'ensemble des données disponibles. Les modèles sont donc généralement plus précis.

Pour les deux modèles thermiques, l'erreur type augmente logiquement avec les débits débiaisés à partir des débits ISBA-MODCOU, alors que le biais diminue. Ces variations ne sont toutefois pas significatives, et restent nettement inférieures à celles liées à la prise en compte ou non du débit. Elles indiquent uniquement que les deux types de variables d'entrée ont un pouvoir explicatif similaire sur la température de l'eau. Malgré la difficulté de reconstituer les débits observés à partir des débits issus de modèles pluies/débits, la démarche est efficace et permet d'obtenir des simulations de qualité.

Cette vérification n'a pas pu être réalisée avec les débits GR4J débiaisés car ces données n'étaient pas disponibles pour les mêmes périodes que les observations de la température de l'eau. Toutefois, les débits GR4J approchent les débits observés plus efficacement que les débits ISBA-MODCOU. Les performances avec GR4J sont donc au moins au niveau de celle de ISBA-MODCOU.

8. RESULTATS DES SIMULATIONS

Chacun des deux modèles mis au point présente des particularités intéressantes. Le modèle linéaire permet de calculer des augmentations de températures indépendantes du biais sur les données d'entrée. En outre, il a une erreur type plus faible. Il reproduit également mieux les variations saisonnières de températures. Le modèle logistique permet de tenir compte des températures limites des cours d'eau, et est ainsi plus adapté à un contexte de réchauffement climatique.

Il est donc intéressant de comparer les résultats de simulation de chacun de ces deux modèles pour déterminer quels sont les résultats incertains, et ceux qui offrent le plus de garanties. Plus généralement, l'approche multi-modèles permettra dans chaque cas de chercher à déterminer l'incertitude des résultats présentés.

Puisqu'il faut prendre en compte des températures de l'air et des débits des jours précédents pour simuler une température de l'eau, les résultats n'ont pas été obtenus sur l'ensemble des périodes utilisées pour les simulations climatiques. Les premiers jours ou les premières semaines ont été tronqués, ainsi que les derniers, de façon à arriver à des périodes d'une durée entière (en année) :

- ▶ Pour les débits ISBA-MODCOU : mi-août 1961 à mi-août 1990 (29 ans) et mi-août 2046 à mi-août 2064 (18 ans).
- ▶ Pour les débits GR4J : mi-août 1962 à mi-août 1990 (28 ans) et mi-août 2047 à mi-août 2064 (17 ans).

8.1. AUGMENTATION MOYENNE ANNUELLE DE TEMPERATURE DE L'EAU

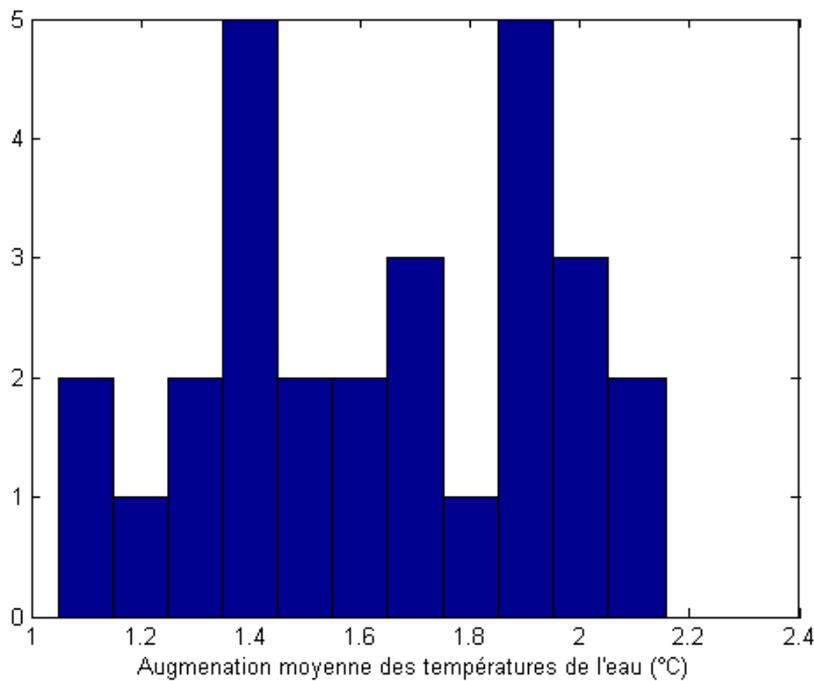
Le Tableau 14 présente les augmentations des températures moyennes annuelles entre la période de référence et la période future en fonction de la combinaison de modèles utilisée.

Tableau 14 : Augmentations des températures moyennes annuelles (°C) entre la période 1961-1991 et la période 2046-2065

Modèles climatiques	ISBA-MODCOU		GR4J		Moyenne
	Journalier	Hebdomadaire	Journalier	Hebdomadaire	
ARPV3	1,91	1,72	2,00	1,79	1,86
CCCMA-CGCM3	2,10	1,89	2,16	1,93	2,02
ECHAM5-MPI	1,72	1,57	1,71	1,55	1,64
GFDL-CM2.0	2,03	1,87	2,04	1,87	1,95
GFDL-CM2.1	1,44	1,36	1,45	1,36	1,40
GISS-MODEL-ER	1,22	1,09	1,28	1,13	1,18
MRI-CGCM2.3.2	1,48	1,32	1,56	1,36	1,43
Moyenne	1,70	1,55	1,74	1,57	1,64
Minimum	1,22	1,09	1,28	1,13	1,18
Maximum	2,10	1,89	2,16	1,93	2,02
Médiane	1,72	1,57	1,71	1,55	1,64

Sur la moyenne de l'ensemble des modèles et de l'ensemble des stations, l'augmentation de la moyenne annuelle de température atteint 1,64 °C. Suivant les combinaisons de modèles, cette augmentation de température varie du simple au double, de 1,09 °C à 2,16 °C, et la répartition des valeurs ne se révèle pas très resserrée.

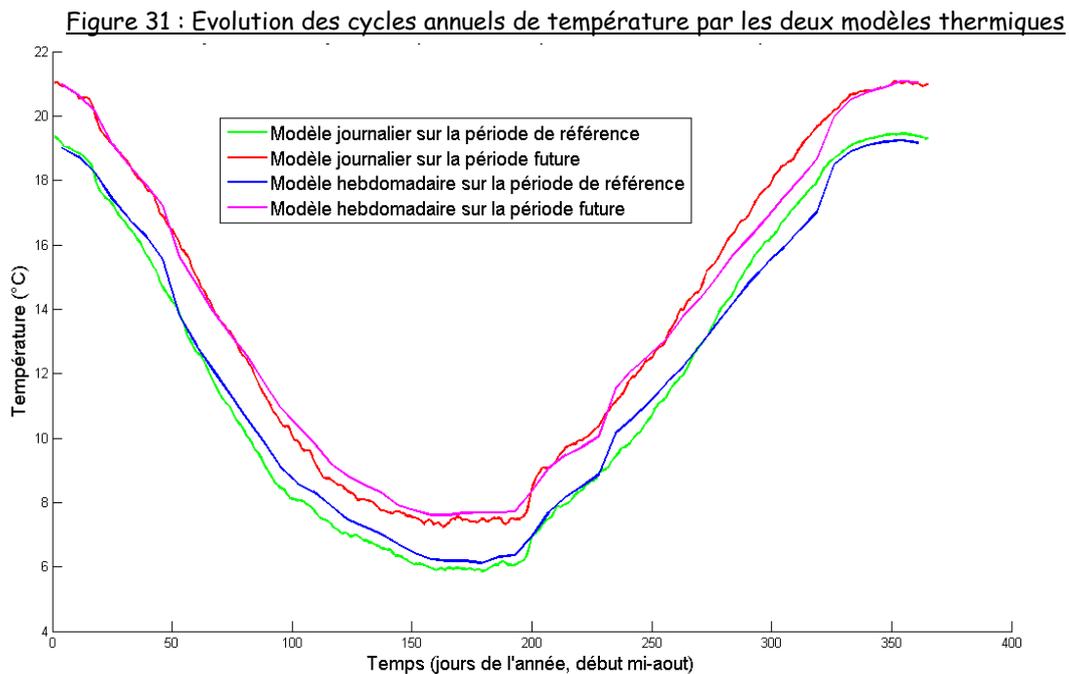
Figure 30 : Histogramme de répartition des augmentations moyennes des températures de l'eau du
Tableau 14



Cette dispersion vient majoritairement des différences entre les modèles climatiques, dont les échauffements s'échelonnent de 1,18 à 2,02 °C. A l'inverse, ces résultats évoluent peu d'un modèle pluie-débit à l'autre, puisque la différence n'atteint jamais plus de 0,09 °C. Ils sont également relativement peu sensibles au modèle thermique, puisque la différence n'est que de 0,16 °C en moyenne et atteint 0,23 °C au maximum. Cette différence ne peut toutefois pas être imputée aux stations supplémentaires considérées avec le modèle au pas de temps journalier. Les augmentations moyennes de température passent en effet de 1,74 à 1,78 et de 1,70 à 1,73 en se limitant au 26 stations communes pour ce modèle. Il est difficile de dire si ces constatations tiendraient avec une meilleure couverture spatiale du réseau expérimental.

8.2. EVOLUTION DE LA TEMPERATURE SELON LES SAISONS

La Figure 31 représente les cycles annuels de température moyens sur la période de référence et la période future, pour le modèle journalier et le modèle hebdomadaire. Ce cycle est obtenu par le calcul d'une moyenne sur l'ensemble des stations, l'ensemble des modèles climatiques, les deux modèles pluie-débit, et les années de chaque période.



On y retrouve les discontinuités résultant de l'ajustement indépendant sur les 4 saisons pour le modèle journalier. Ces « sauts » sont particulièrement visibles après 45 jours (fin septembre), 225 jours (fin mars), et 320 jours (fin juin) environ. Toutefois, leur présence commune sur les simulations de la période de référence et la période future permet de calculer une différence de température fiable entre les deux périodes.

La Figure 32 représente les températures moyennes mensuelles des 28 simulations sur la période de référence et les compare aux températures observées, généralement dans les années 2000. La Figure 33 montre la même comparaison avec les simulations sur la période future.

Figure 32 : Allure des températures observées et des simulations en moyenne sur l'ensemble des stations pour la période de référence

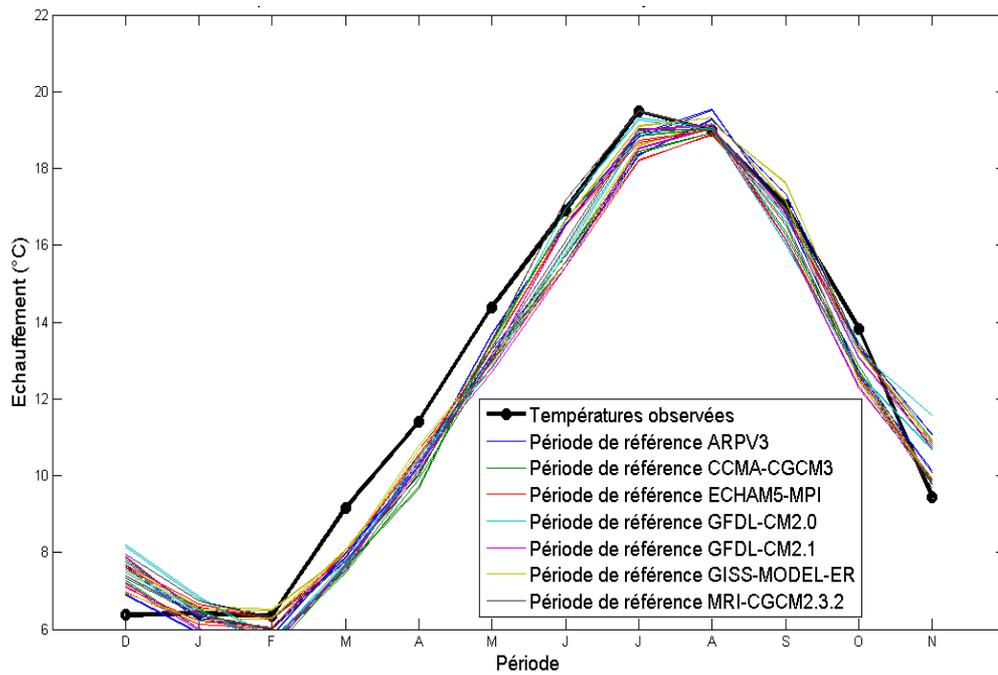
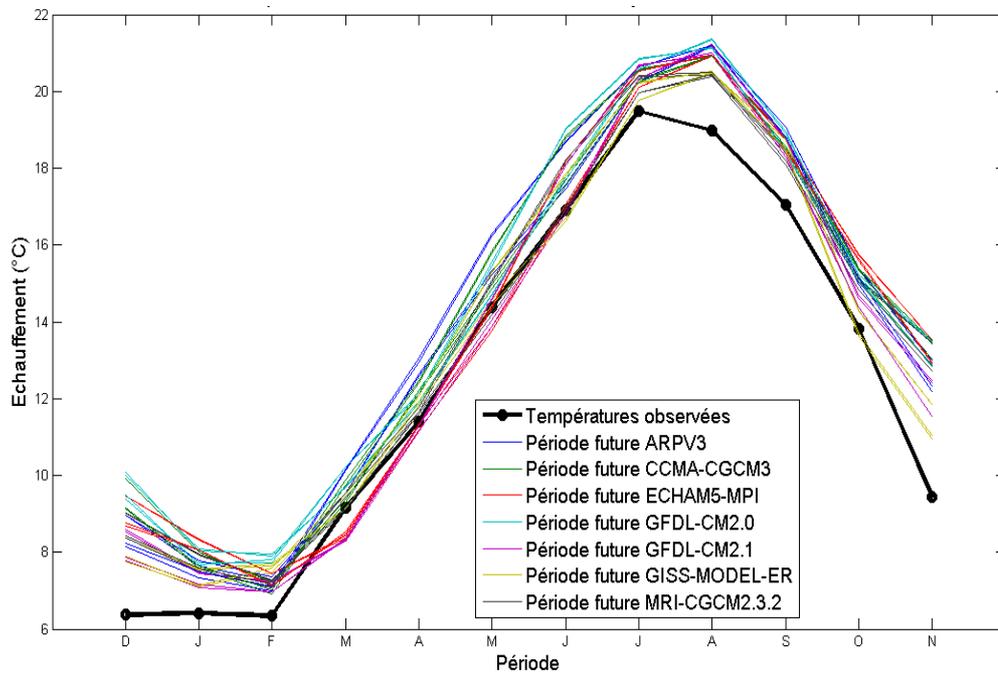
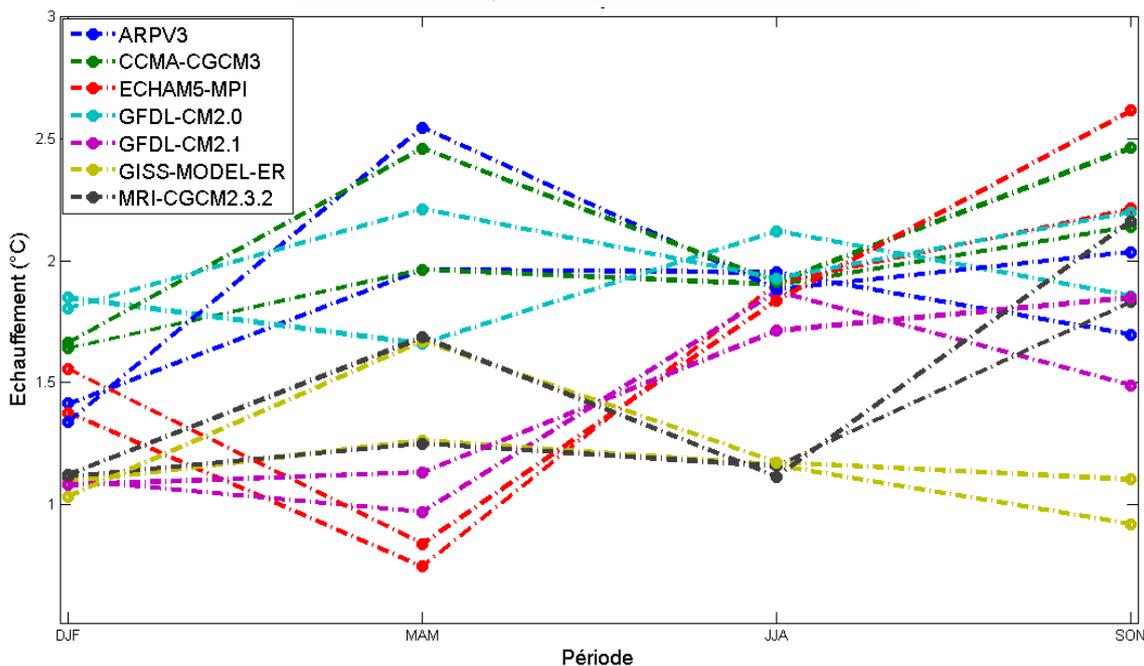


Figure 33 : Allure des températures observées et des simulations en moyenne sur l'ensemble des stations pour la période future



La Figure 32 et la Figure 33 montrent qu'il existe vraisemblablement un fort biais négatif au printemps, même si le climat de la période des observations est déjà différent de celui de référence, ainsi qu'un biais positif en hiver. Les simulations y apparaissent très différentes d'un modèle à l'autre, avec des écarts qui atteignent régulièrement 2 °C, en particulier sur la période future. Les courbes montrent aussi que les modèles pluie-débit ont un impact très faible sur les différences de comportement d'une saison à l'autre. La figure 34 représente donc uniquement les échauffements moyens par saison pour les différents couples modèle climatique / modèle thermique. Il s'agit d'une moyenne sur l'ensemble des 31 stations, et les deux modèles pluie-débit.

figure 34 : Echauffements moyens par saison en fonction de la combinaison modèle climatique - modèle pluie-débit (moyenne des mois de décembre, janvier et février (DJF), mars, avril et mai (MAM), juin, juillet et août (JJA), septembre, octobre et novembre (SON))



Il n'apparaît aucune tendance commune à l'ensemble des simulations de l'un ou de l'autre des modèles climatiques. Les différences saisonnières d'échauffement de la température de l'air prévues par les modèles climatiques gardent une forte influence mais elles sont affectées différemment par chaque modèle climatique. Le modèle hebdomadaire linéaire tend à conserver la hiérarchie entre les saisons (à débit constant), alors que le modèle journalier logistique atténue les échauffements en hiver et été, et prévoit ainsi souvent des échauffements relativement forts lors des saisons intermédiaires.

On observe aussi que les modèles ont des prévisions plus proches dans les saisons extrêmes (juin à août et décembre à février) que dans les saisons intermédiaires où on peut trouver un rapport 3 entre prévisions, en grande partie à cause des modèles climatiques. Cela peut surprendre, puisque les deux modèles thermiques diffèrent principalement par leur comportement à haute ou basse température. Il semble en fait que la pente maximale de la courbe ajustée pour le modèle logistique est généralement supérieure à la pente de la droite du modèle linéaire. Ainsi, dans une gamme de température intermédiaire, une augmentation de la température de l'air génère une augmentation de la température de l'eau plus forte avec le modèle logistique qu'avec le modèle linéaire.

Face à la diversité des comportements observés, il semble sage de ne rien conclure quant aux saisons qui pourraient voir leurs températures de l'eau augmenter le plus fortement.

8.3. DIFFERENCES ENTRE LES DIFFERENTES STATIONS

Les augmentations de températures moyennes des rivières à chaque station, et pour l'ensemble des combinaisons de modèles, sont représentées sur la Figure 35. Le diagramme en boîte montre dans chaque cas la valeur médiane et les deux quartiles (la « boîte »), ainsi que les valeurs extrêmes (la « moustache ») de la série des 28 simulations. Le Tableau 15 montre comment l'incertitude sur la température de l'air aux différents points se répercute sur les simulations de température de l'eau.

Figure 35 : Répartition des augmentations moyennes de température par station

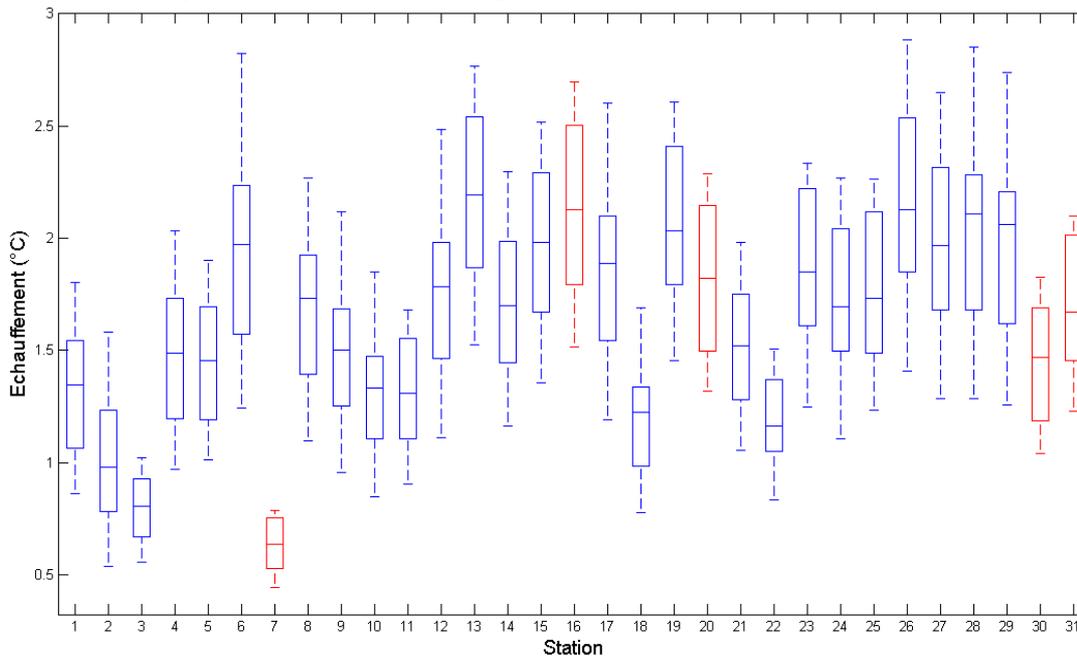


Tableau 15 : Comparaison des augmentations de température de l'air (pour 7 modèles climatiques) et de température de l'eau (pour 28 combinaisons de modèles)

N°station	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Température de l'air 1961-1990	10,9	9,7	11,0	10,0	9,2	10,3	10,1	12,8	11,6	11,6	11,5	13,1	13,0	12,0	13,1
Delta (futur-présent) min	1,7	1,7	1,7	1,7	1,8	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,5
Delta (futur-présent) med	2,4	2,4	2,4	2,3	2,4	2,1	2,0	2,2	2,0	2,0	2,0	2,2	2,2	2,2	2,2
Delta (futur-présent) max	2,8	2,8	2,8	2,8	2,9	2,7	2,5	2,6	2,5	2,5	2,5	2,6	2,6	2,7	2,6
Température de l'eau 1961-1990	11,0	8,4	10,2	9,8	8,9	13,4	11,0	11,9	11,5	10,5	10,9	12,4	14,3	13,5	15,2
Delta (futur-présent) min	0,9	0,5	0,6	1,0	1,0	1,2	0,5	1,1	1,0	0,9	0,9	1,1	1,5	1,2	1,4
Delta (futur-présent) med	1,3	1,0	0,8	1,5	1,5	2,0	0,6	1,7	1,5	1,3	1,3	1,8	2,2	1,7	2,0
Delta (futur-présent) max	1,8	1,6	1,0	2,0	1,9	2,8	0,8	2,3	2,1	1,9	1,7	2,5	2,8	2,3	2,5

N°station	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Température de l'air 1961-1990	12,8	13,0	9,6	12,7	6,4	10,8	14,4	10,6	11,6	12,0	11,6	11,7	12,2	12,2	10,6	12,7
Delta (futur-présnt) min	1,6	1,6	1,6	1,6	1,7	1,7	1,5	1,5	1,4	1,5	1,5	1,5	1,7	1,7	1,8	1,7
Delta (futur-présent) med	2,2	2,2	2,1	2,2	2,3	2,1	2,0	2,1	2,0	2,0	2,1	2,1	2,3	2,3	2,5	2,2
Delta (futur-présent) max	2,6	2,6	2,6	2,7	2,8	2,7	2,5	2,6	2,6	2,6	2,7	2,7	2,9	2,9	2,9	2,8
Température de l'eau 1961-1990	14,1	12,6	8,9	13,6	8,2	13,4	15,3	11,6	12,5	12,6	13,9	13,1	13,0	13,2	10,4	14,1
Delta (guter-présent) min	1,5	1,2	0,8	1,5	1,3	1,1	0,8	1,3	1,1	1,2	1,4	1,3	1,3	1,3	1,0	1,5
Delta (futur-présent) med	2,1	1,9	1,2	2,0	1,8	1,5	1,2	1,9	1,7	1,7	2,1	2,0	2,1	2,1	1,5	2,1
Delta (futur-présent) max	2,7	2,6	1,7	2,6	2,3	2,0	1,5	2,3	2,3	2,3	2,9	2,7	2,9	2,7	1,8	2,7

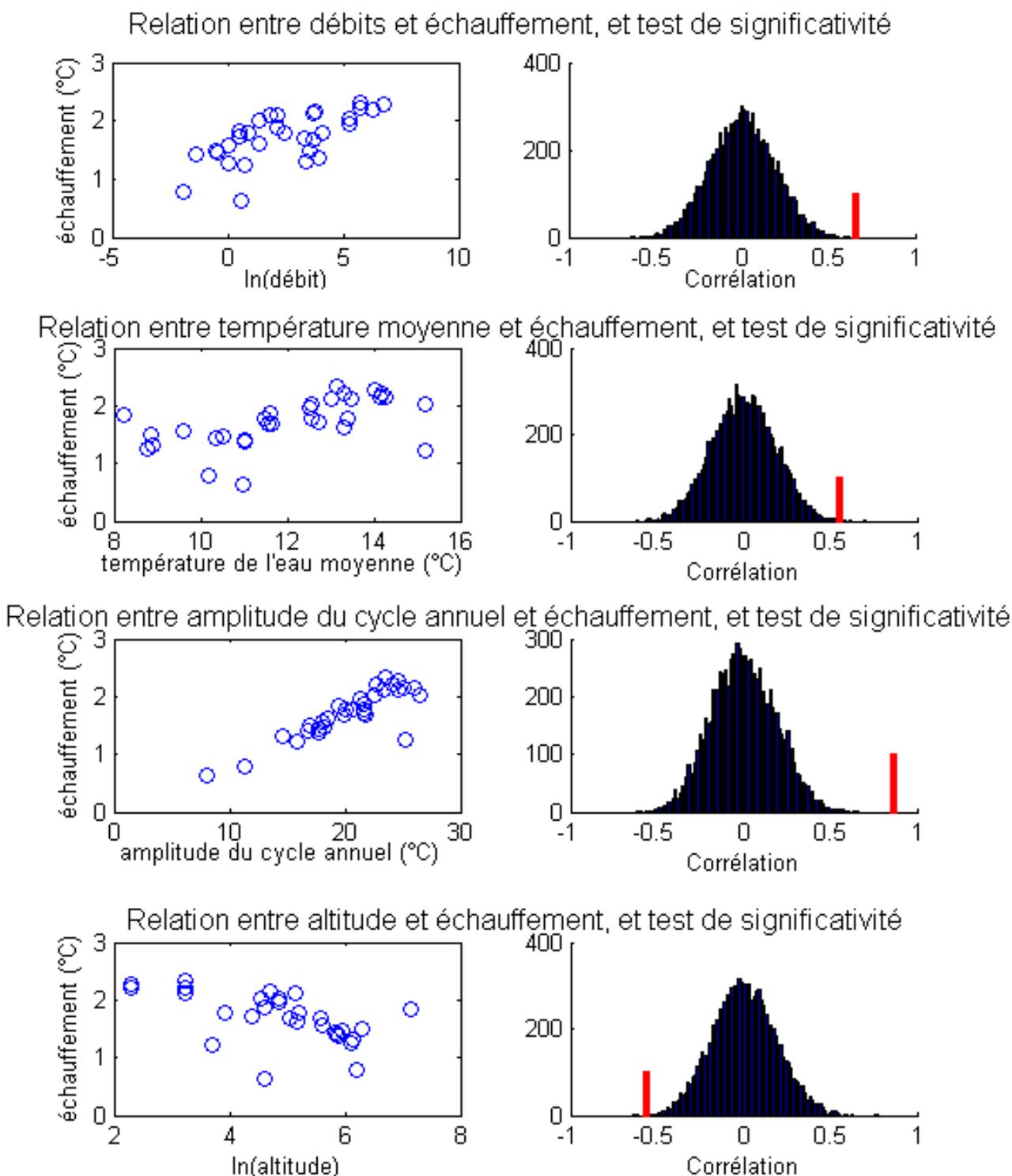
On retrouve sur le diagramme de la Figure 35 la grande dispersion des résultats en fonction des modèles. Le Tableau 15 montre que, pour certaines stations, les augmentations moyennes de température simulées peuvent varier d'un rapport proche de 3 entre les simulations extrêmes. Cette dispersion s'explique en partie par la dispersion des résultats des modèles climatiques, mais en certains points, les modèles thermiques semblent l'accroître. Toutefois, les modèles climatiques et pluie-débit conservent généralement la hiérarchie des stations. Seul le passage d'un modèle thermique à l'autre a un effet significatif sur ce classement des stations. Il peut donc être intéressant de chercher quels paramètres physiques sont corrélés avec les échauffements moyens sur l'ensemble des simulations.

Des corrélations ont été recherchées avec les débits (sous forme logarithmique), la température moyenne du cours d'eau, l'amplitude du cycle annuel du cours d'eau, l'altitude de la station de mesure de la température (sous une forme logarithmique), sa longitude et sa latitude.

Dans chaque cas, pour s'assurer de la significativité des chiffres obtenus, un test a été réalisé. Ce test consiste en la permutation aléatoire des éléments de l'une des deux séries dont on teste la corrélation, puis en un nouveau calcul de la corrélation. Répétée un grand nombre de fois, cette manipulation permet d'estimer dans quel intervalle une corrélation calculée peut être le résultat d'un processus aléatoire.

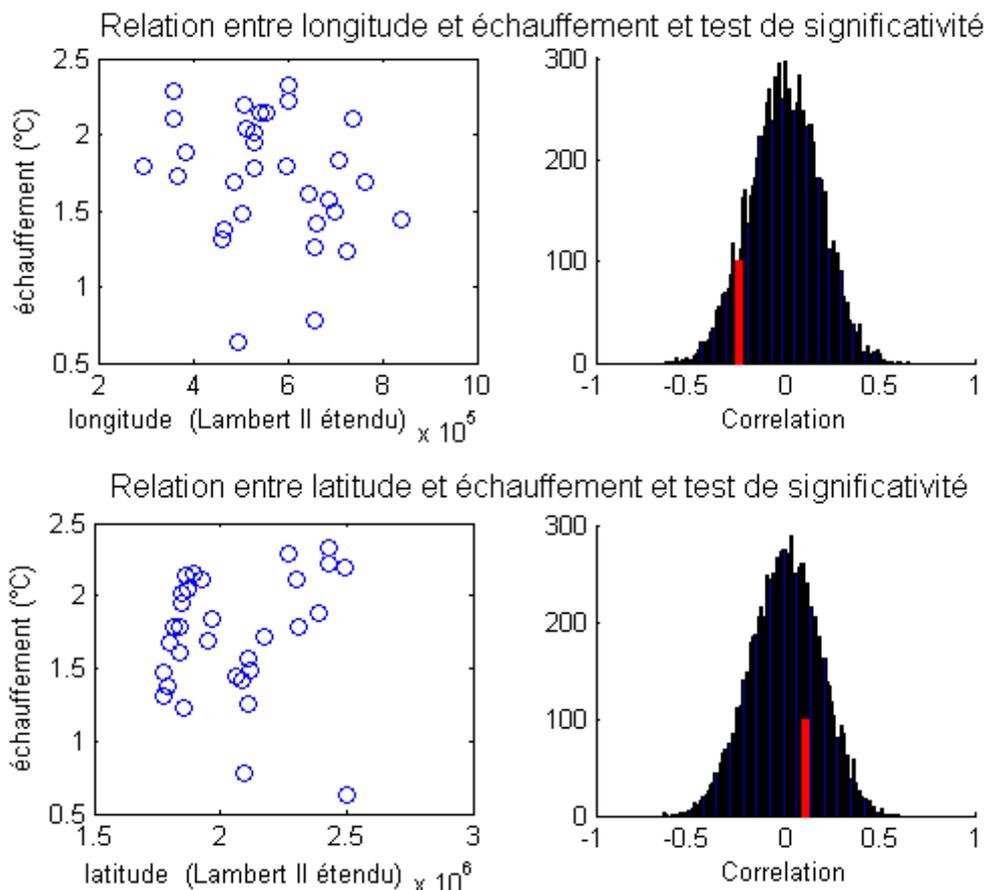
Ainsi, par exemple, les débits ont été « mélangés » à 10 000 reprises et la corrélation de cette nouvelle série avec les échauffements conservés dans « le même ordre » a été calculée à chaque itération. L'histogramme des corrélations obtenues est présenté Figure 36. Plus de 99,9 % des valeurs sont dans l'intervalle $[-0,60 ; +0,60]$, alors que la corrélation initiale était de 0,66. Ce chiffre est donc probablement significatif. A l'inverse, rien n'assure que la corrélation calculée entre les longitudes et les échauffements n'est pas le fait du hasard.

Figure 36 : Variables corrélées significativement avec les échauffements



La Figure 36 montre donc qu'on peut lier les échauffements et les débits, les températures moyennes, l'amplitude du cycle annuel et l'altitude. En revanche, la latitude et la longitude ne présentent pas de relation significative avec les augmentations moyennes de la température de l'eau (Figure 37).

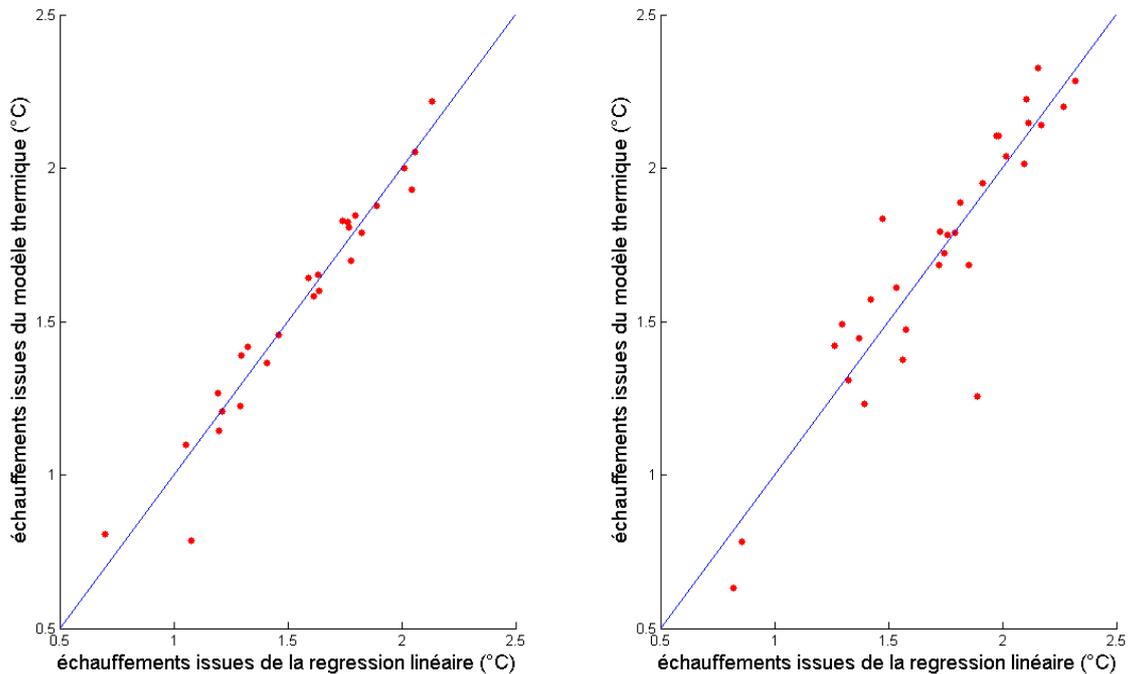
Figure 37 : Variables non-corrélées significativement avec les échauffements



Il s'agit bien ici d'un lien statistique, et pas nécessairement d'une relation de cause à effet. De plus, les quatre variables dont la corrélation avec l'échauffement est forte ne sont pas indépendantes. Les rivières d'altitude ont généralement des débits et des températures plus faibles. Leur cycle annuel peut aussi être d'une amplitude limitée par des échanges avec les eaux souterraines ou des lâchers de barrage.

Une combinaison linéaire de ces paramètres peut expliquer jusqu'à 95 % de la variance des échauffements moyens pour les résultats du modèle hebdomadaire, et 80 % de la variance pour les résultats du modèle journalier. Les erreurs types sont alors respectivement de 0,076 °C et 0,17 °C.

Figure 38 : Comparaison des échauffements issus des modèles thermiques au pas de temps hebdomadaire (à gauche) et journalier (à droite) et reconstitués par régression linéaire



On pourrait être tenté de reconstituer l'augmentation de la température de l'eau d'une rivière à partir de ces 4 variables, et généraliser cette étude à l'ensemble du territoire. Il faut toutefois être très prudent sur les relations proposées ci-dessus. Il n'est pas à exclure par exemple qu'elles ne fassent que traduire les défauts d'un modèle plus adapté aux rivières de plaine, aux faibles échanges avec les eaux souterraines, qu'aux cours d'eau d'altitude avec des variations d'amplitude de température plus limitée.

9. COMMENTAIRES ET LIMITES

9.1. HYPOTHESES LIEES A LA NATURE DU MODELE

Les modèles thermiques basés sur la corrélation entre température de l'eau et température de l'air ou débit sont valables dans des conditions où un ensemble de paramètres de long terme ne varient pas. On fait par exemple l'hypothèse qu'il n'y a pas d'évolution de l'exposition au vent ou au soleil par l'évolution de la végétation rivulaire. De même, l'imperméabilisation des surfaces et l'évolution des rejets thermiques anthropiques sont ignorés.

Pourtant, les échauffements observés depuis quelques décennies dans les rivières françaises ou du reste du monde ne peuvent généralement pas être complètement expliqués par l'évolution climatique, mais résultent de l'évolution d'une multitude de conditions (Khalanski et al., 2009 ; Poirel et al., 2009 ; Moatar et Gailhard, 2006 ; Gosse et al., 2009 ; Ferrari et al., 2007 ; Webb et Nobilis, 2007).

Par ailleurs, des conséquences directes possibles du changement climatique n'ont pas été considérées. Sous l'effet de l'augmentation des rayonnements à la surface du sol, la température du sol devrait augmenter. Le flux d'énergie descendant devrait donc augmenter et pourrait ainsi impacter la température des eaux souterraines. Selon cette augmentation de la température, la profondeur d'origine des eaux souterraines contribuant aux rivières et les volumes impliqués, la température des rivières pourrait être impactée. La conduction thermique par le lit de la rivière pourrait aussi avoir un effet dans certaines situations (Caissie, 2006) et les échanges nappe-rivières sont accrus par la température (la fluidité de l'eau augmente). Mais la température du sol en profondeur et la température des eaux souterraines évoluent lentement. Il faudrait donc utiliser un modèle à base physique ou disposer de mesures pendant une très longue période pour espérer percevoir leurs effets.

9.2. PERFORMANCES DU MODELE

Les erreurs types observées sont proches de celles des modèles similaires présentés dans la littérature (Mohseni et al., 1998 ; Bélanger et al., 2005). Il faut toutefois noter que certaines rivières étudiées ont un régime hydrologique classé comme fortement influencé par la banque HYDRO et étaient parfois mal modélisées (Figure 24).

9.3. COMPARAISON AVEC LES RESULTATS D'AUTRES ETUDES

Il est généralement difficile de comparer en détail les prévisions d'évolution des régimes thermiques de différentes études, car elles s'appuient souvent sur des scénarios, des modèles climatiques et thermiques différents. Une comparaison des ordres de grandeur peut toutefois être réalisée. Ainsi, par exemple, van Vliet et al. (2011) avaient calculé qu'une augmentation de la température de l'air de 4 °C pourrait être liée à une augmentation de la température de l'eau de 2,6 °C, voire plus en cas de débit réduit. Le rapport entre ces deux variations est du même ordre de grandeur que celui de notre étude.

Une étude réalisée à l'université de Tours s'intéresse aux variations de température de l'eau dans le bassin de la Loire entre la période de référence 1970-1990 et la période future 2046-2065 et s'appuie, entre autres, sur le scénario A1B et 5 modèles de circulation générale identiques à ceux d'Explore 2070 : ECHAM5-MPI, CCCMA-CGCM3, GFDL-CM2.1, GISS-MODEL-ER, MRI-CGCM2.3.2 (Moatar et al., 2010).

Le travail se fonde sur un modèle à base physique et la notion de température d'équilibre. Il s'agit donc de deux approches très différentes mais dont les résultats sont comparables (même scénario et même horizon temporel, les bases de données utilisées étant les mêmes).

Il ressort de la comparaison que les augmentations de température moyennes calculées par les deux modèles sont du même ordre de grandeur entre la période 2046-2065 et la période de référence pour les cours d'eau de débits importants (Tableau 16).

Le modèle à base physique ne montre pas la même incertitude sur la répartition saisonnière des variations de température. Pour la plupart des modèles climatiques, la température de l'eau augmente plus en moyenne lors des saisons intermédiaires (mars à mai, septembre à novembre). Parmi les cinq modèles communs aux deux études, les modèles MRI-CGCM2.3.2, GISS-MODEL-ER, GFDL-CM2.1 et CCCMA-CGCM3 conduisent à ce type de résultat, alors que le modèle ECHAM5-MPI prévoit seulement un maximum à l'automne.

Il faut aussi noter que ce modèle à base physique prévoit des augmentations de température plus fortes dans les cours d'eau d'ordre de Strahler petit. Cette tendance est inverse de celle observée avec les modèles empiriques (les cours d'eau de petit ordre de Strahler ont souvent des amplitudes de variation de température réduite). Le Tableau 16 montre les différences importantes entre les modèles pour les cours d'eau d'Auvergne de faible débit (Artière, Morge, St Genès, Crédogne, Sichon).

Cette différence s'explique en partie par les hypothèses sur la température des nappes. Alors que les modèles empiriques se basent sur l'hypothèse implicite que la température des nappes alimentant les cours d'eau ne varie pas, le modèle à base physique intègre l'hypothèse d'une augmentation de température des nappes du même ordre que celle de l'air (température égale à la température de l'air moyenne des 2 années précédentes), soit une augmentation supérieure d'environ 35 % à celle de la température d'équilibre. Ces deux hypothèses très fortes sur la température des nappes influencent sensiblement les températures simulées pour les ordres de Strahler petit (1 ou 2), mais aussi, dans certains cas, de plus grands cours d'eau (Loire et nappe de Beauce par exemple).

Tableau 16 : Comparaison des augmentations moyennes de température calculées par les modèles physiques et empiriques à partir de données issues des mêmes modèles climatiques.

Cours d'eau	Lieu	Delta moyen	
		Modèle empirique	Modèle à base physique
Artière	Clermont Ferrand	1,28	1,72
Morge	Montcel	0,99	1,85
St Genès	Malauzat	0,76	1,64
Crédogne	Puy-Guillaume	1,43	1,85
Sichon	Ferrières-sur-Sichon	1,40	1,77
Mayenne	Ambrières-les-Vallées	1,78	1,81
Loire	Montjean-sur-Loire	2,08	1,89
Oudon	Segré	1,91	2,21

10. CONCLUSION

L'objectif de cette étude était de modéliser et de simuler la température de l'eau des rivières en une trentaine de points de métropole. Le contexte d'Explore 2070 imposait des contraintes de modélisation particulières, en limitant les variables d'entrée disponibles et demandant des modèles transposables aux conditions futures possibles.

Des modèles régressifs utilisant des températures de l'air et des débits en entrée ont donc été utilisés. Dans la continuité de l'approche multi-modèles appliquée en amont du projet, deux modèles thermiques ont été mis au point. Le premier est linéaire et calé au pas de temps hebdomadaire, tandis que le second fixe des températures asymptotiques de l'eau et utilise un pas de temps journalier. Les erreurs types moyennes de l'ordre de 0,8 °C au pas de temps mensuel et les biais de l'ordre de 0,3 °C sont conformes aux résultats présentés dans la littérature spécialisée.

Les simulations ont été réalisées pour 7 modèles climatiques, 2 modèles pluie-débit et 2 modèles thermiques. Les combinaisons de modèle ont prédit des augmentations moyennes de la température comprises entre 1,09 °C et 2,16 °C, avec une moyenne de 1,64 °C. La grande dispersion de ces valeurs vient essentiellement de l'incertitude sur les températures de l'air. Une grande incertitude apparaît aussi lorsque l'on cherche à déterminer lors de quelles saisons les échauffements seront les plus forts. Cette fois, les modèles thermiques contribuent à brouiller l'information déjà divergente des modèles climatiques, si bien qu'aucune réponse évidente ne peut être apportée.

Les modèles s'accordent en revanche sur les points de simulation où la température pourrait le plus augmenter. Un rapport de 1 à 3 apparaît entre les points aux échauffements minimaux et maximaux. Si aucune corrélation significative n'apparaît entre les échauffements et la latitude ou la longitude, ceux-ci sont en revanche légèrement liés aux débits, à l'altitude, et aux températures moyennes de l'eau, et surtout très corrélés à l'amplitude du cycle annuel de température de l'eau (environ 90 %). Malgré ces corrélations, aucune généralisation de l'étude n'est envisageable. En effet, le nombre de points de simulation est trop faible pour représenter l'ensemble des conditions hydrologiques, hydromorphologiques et climatiques de France métropolitaine.

Si les modèles thermiques sont performants dans une situation de référence pour laquelle ils sont calés, il existe en revanche une incertitude sur leur pertinence dans des conditions futures. Des paramètres considérés comme invariants pour la mise au point des modèles pourraient en effet évoluer, aussi bien par le changement climatique (température des eaux souterraines, par exemple) que par l'effet direct des activités humaines (évolution de la forêt rivulaire, par exemple).

La plupart de ces évolutions induiraient une augmentation de température supérieure à celle calculée, dans la continuité de l'augmentation de température des rivières mise en évidence au cours du XX^e siècle. Les chiffres annoncés dans cette étude pourraient donc être considérés comme des bornes inférieures des variations réelles de température de l'eau à l'avenir.

Le changement climatique aura des conséquences sur les activités humaines, notamment sur le fonctionnement des centrales thermiques, mais aussi sur les milieux aquatiques. L'évolution de température aura des conséquences sur des paramètres chimiques de l'eau tels que le pH ou l'oxygène dissout. Elle induira des augmentations des températures maximales qui pourraient créer des épisodes de forte mortalité piscicole. Par ailleurs, la température influence souvent le cycle de vie des organismes aquatiques (éclosion des œufs, croissance, reproduction, etc.) ainsi que l'amplitude des relations avec les nappes. Les températures déterminantes pourraient être atteintes plusieurs dizaines de jours plus tôt dans 50 ans. Un changement profond de répartition de ces espèces semble donc inévitable, à condition que leur migration soit possible.

11. BIBLIOGRAPHIE

- Bélanger, M., El-Jabi, N., Caissie, D., Ashkar, F. et Ribí, J.-M., 2005. Estimation de la température de l'eau en rivière en utilisant les réseaux de neurones et la régression linéaire multiple. *Revue des sciences de l'eau*, 18(3): 403-421.
- Boé, J., Terray, L., Habets, F. et Martin, E., 2006. A simple statistical-dynamical downscaling scheme based on weather types and conditional resampling. *Journal of Geophysical Research*, 111.
- Boé, J., 2007. Changement global et cycle hydrologique : Une étude de régionalisation sur la France. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III.
- Bogan, T., Othmer, J., Mohseni, O. et Stefan, H., 2006. Estimating extreme stream temperatures by the standard deviate method. *Journal de l'Hydrologie*, 317: 173-189.
- Caissie, D., 2006. The thermal regime of rivers: a review. *Freshwater Biology*, 51: 1389-1406.
- Caissie, D., El-Jabi, N. et St-Hilaire, A., 1998. Stochastic modelling of water temperatures in a small stream using air to water relations. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 25(2): 250-260.
- Caissie, D., Satish, M.G. et El-Jabi, N., 2005. Predicting river water temperatures using the equilibrium temperature concept with application on Miramichi River catchments (New Brunswick, Canada). *Hydrological Processes*, 19(11): 2137-2159.
- Cluis, D.A., 1972. Relationship between stream water temperature and ambient air temperature. *Nordic Hydrology*, 3: 65-71.
- Ducharne, A., 2008. Importance of stream temperature to climate change impact on water quality. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12(3): 797-810.
- Dupeyrat, A. et Bertier, C., 2006. Impact du changement climatique sur les régimes hydrologiques et thermiques de la Loire. note interne EDF R&D, H-P76-2005-00904-FR, 90 p.
- El-Jabi, N., Le-Kourdahi, G. et Caissie, D., 1995. Modélisation stochastique de la température de l'eau en rivière. *Revue des sciences de l'eau*, 8(1) : 77-95.
- Ferrari, M.R., Miller, J.R. et Russell, G.L., 2007. Modeling changes in summer temperature of the Fraser River during the next century. *Journal de l'Hydrologie*, 342(3-4): 336-346.
- GIEC, 2007. *Climate Change 2007 The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, 940 p.
- Gosse, P., Gailhard, J. et Hendrickx, F., 2009. Analyse de la température de la Loire moyenne en été sur la période 1949 à 2003. *Hydroécol. Appl.*, 16: 233-274.
- Habets, F., Boone, A., Champeaux, J.-L., Etchevers, P., Franchistéguy, L., Leblois, E., Ledoux, E., Le Moigne, P., Martin, E., Morel, S., Noilhan, J., Quintana Segui, P., Rousset-Regimbeau, F. et Viennot, P., 2008. The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France. *Journal of Geophysical Research*, 113.
- Hendrickx, F., 2001. Impact of climate change on the hydrology of the Rhône catchment. *Hydroécologie Appliquée*, 13(1): 77-100.
- Hendrickx, F., 2008. Estimation de la température extrême de l'eau à partir d'une valeur extrême de la température de l'air : Application aux sites de Belleville, Dampierre, Saint Laurent, Chinon et Chooz, note interne EDF R&D, H-P73-2008-01473-FR, 38 p.

- Huguet, F., Parey, S., Dacunha-Castelle, D. et Malek, F., 2008. Is there a trend in extremely high river temperature for the next decades? A case study for France. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8(1): 67-79.
- Khalanski, M., Carrel, G., Desaint, B., Fruget, J.-F., Olivier, J.-M., Poirel, A. et Souchon, Y., 2009. Etude thermique globale du Rhône – Impacts hydrobiologiques des échauffements cumulés. *Hydroécol. Appl.*, 16: 53-108.
- Latu, M., 2003. Vers une modélisation des relations entre température de l'eau en rivière et température de l'air dans le bassin de la Seine. Université Pierre et Marie Curie, Mémoire de maîtrise.
- L'Heureux, J., 2002. Analyse des relations entre température des cours d'eau et température de l'air dans le bassin de la Seine. Université Pierre et Marie Curie, Mémoire de maîtrise.
- Moatar, F., Bustillo, V., Ducharne, A., Thierry, D., Sauquet, E. et Vidal, J.F., 2010. ICC-HYDROQUAL – Impact du Changement Climatique sur l'hydrosystème Loire : Hydrologie, Régime thermique, qualité des eaux. Plan Loire Grandeur Nature.
- Moatar, F. et Gailhard, J., 2006. Water temperature behaviour in the River Loire since 1976 and 1881. *Comptes Rendus Geoscience*, 338(5): 319-328.
- Mohseni, O., Erickson, T.R. et Stefan, H.G., 1999. Sensitivity of stream temperatures in the United States to air temperatures projected under a global warming scenario. *Water Resources Research*, 35(12): 3723-3733.
- Mohseni, O. et Stefan, H.G., 1999. Stream temperature air temperature relationship: a physical interpretation. *Journal de l'Hydrologie*, 218(3-4): 128-141.
- Mohseni, O., Stefan, H.G. et Erickson, T.R., 1998. A nonlinear regression model for weekly stream temperatures. *Water Resources Research*, 34(10): 2685-2692.
- Moisselin, J.M., Schneider, M., Canellas, C. et Mestre, O., 2002. Les changements climatiques en France au XXe siècle. *La Météorologie*, 38: 45-56.
- Morin, G., Couillard, D., Cluis, D., Jones, H.G. et Gauthier, J.M., 1987. Prediction of Temperatures in Rivers Using a Conceptual-Model. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 32(1): 31-41.
- Morrill, J.C., Bales, R.C. et Conklin, M.H., 2005. Estimating stream temperature from air temperature: Implications for future water quality. *Journal of Environmental Engineering-Asce*, 131(1): 139-146.
- Nelson, K.C. et Palmer, M.A., 2007. Stream temperature surges under urbanization and climate change: data, models, and responses. *Journal of the American water resources association*, 43(2): 440-452.
- Othmer, J.A., Mohseni, O. et Stefan, H.G., 2001. Statistical estimation of an upper bound on weekly stream temperature. University of Minnesota, Project Report n°442.
- Perrin, C., Michel, C. et Andréassian, V., 2007. Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR). Cemagref.
- Poirel, A., Lauters, F. et Desaint, B., 2009. 1977-2006 : Trente années de mesures des températures de l'eau dans le Bassin du Rhône. *Hydroécol. Appl.*, 16: 191-213.
- Poulin, M. et Hubert, P., 1982. A Method to Compute River Heating - Application to the Management of Thermal Loadings to the Rhine River. *Journal de l'Hydrologie*, 55(1-4): 195-211.

-
- Smith, K., 1981. The prediction of river water temperatures. *Hydrological Sciences Journal*, 26(1): 19-32.
- Stefan, H.G. et Preudhomme, E.B., 1993. Stream Temperature Estimation from Air-Temperature. *Water Resources Bulletin*, 29(1): 27-45.
- Uppala, S.M., Kallberg, P.W., Simmons, A.J., Andrae, U., Da Costa Bechtold, V., Fiorino, M., Gibson, J.K., Haseler, J., Hernandez, A., Kelly, G.A., Li, X., Onogi, K., Saarinen, S., Sokka, N., Allan, R.P., Andersson, E., Arpe, K., Balmaseda, M.A., Beljaars, A.C.M., Van De Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Caires, S., Chevallier, F., Dethof, A., Dragosavac, M., Fisher, M., Fuentes, M., Hagemann, S., Holm, E., Hoskins, B.J., Isaksen, I., Janssen, P.A.E.M., Jenne, R., McNally, A.P., Mahfouf, J.-F., Morcrette, J.-J., Rayner, N.A., Saunders, R.W., Simon, P., Sterl, A., Trenberth, K.E., Untch, A., Vasiljevic, D., Viterbo, P. et Woollen, J., 2005. The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131: 2961-3012.
- Webb, B.W. et Nobilis, F., 2007. Long-term changes in river temperature and the influence of climatic and hydrological factors. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 52(1): 74-85.
- Webb, B.W., Clack, P.D. et Walling, D.E., 2003. Water-air temperature relationships in a Devon river system and the role of flow. *Hydrological Processes*, 17(15): 3069-3084.
- Westhoff, M.C., Savenije, H.H.G., Luxemburg, W.M.J., Stelling, G.S., van de Giesen, N.C., Selker, J.S., Pfister, L. et Uhlenbrook, S., 2007. A distributed stream temperature model using high resolution temperature observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11: 1469-1480.
- Wright, S.A., Anderson, C.R. et Voichick, N., 2008. A simplified water temperature model for the Colorado river below Glen Canyon dam. *River research and application*, 25(6): 675-686.
- van Vliet, M.T.H., Ludwig, F., Zwolsman, J.J.G., Weedon, G.P. et Kabat, P., 2011. Global river temperatures and sensitivity to atmospheric warming and changes in river flow. *Water resources research*, 47, 19p.