

Rapport Clim-arbres

Établi pour



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral de l'Environnement

Contrat : 06.0122.PJ/G231-0238/810.07.176



En collaboration avec



UNIVERSITÉ
DE GENÈVE
FACULTÉ DES SCIENCES

Unil

UNIL | Université de Lausanne



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Nous lisons les rapports que nous livrent scientifiques et économistes, mais nous continuons sur la même route comme si nous étions pris d'une cécité intellectuelle fulgurante. Comme si, bien que nous sachions, nous ne voulions pas y croire.

Il est trop tard pour être pessimiste. Nous savons très bien qu'aujourd'hui les solutions existent. Nous avons tous le pouvoir de changer. Alors qu'est-ce qu'on attend ?

Home 2009, Yann Arthus-Bertrand

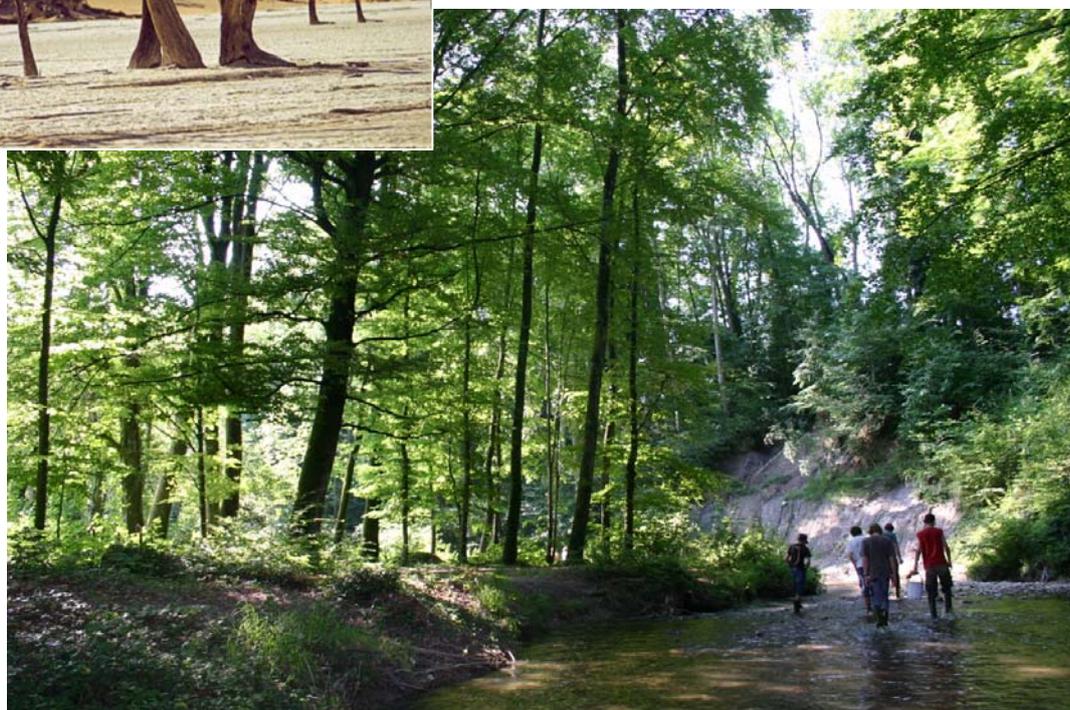


Table des matières

1	Principes de l'étude	8
1.1	Contexte	8
1.2	Equipe de recherche	9
1.3	Problématique	11
1.4	Objectifs de l'étude	13
1.5	Niveaux d'étude	16
1.6	Découpage de l'étude	17
2	Comprendre la thermique de la rivière au niveau du secteur test	20
2.1	Introduction	20
2.2	Matériel et méthodes	22
2.2.1	Description du secteur test	22
2.2.2	Techniques de mesures	23
2.2.3	Modèle énergétique	24
2.3	Résultats	25
2.3.1	Validation du modèle	25
2.3.2	Effet de la ripsilve	26
2.3.3	Effet des pompages dans la nappe phréatique	27
2.4	Conclusions et conséquences pratiques	30
3	Comprendre la thermique de la rivière au niveau de son bassin versant	32
3.1	Introduction	32
3.2	Matériel et méthodes	33
3.2.1	Description géographique du Boiron de Morges	33
3.2.2	Mesures de la température de l'eau	37
3.2.3	Concentration en oxygène	39
3.2.4	Débits	39
3.2.5	Mesures de la température de l'air	41
3.2.6	Scénarios climatiques	41
3.3	Résultats	42
3.3.1	Evolution de la température de l'eau de 2005 à 2009	42
	Evolution générale	42
	Phases annuelles de réchauffement ou de refroidissement de l'eau	43
	Amplitude de température journalière	43
3.3.2	Evolution de la température de l'eau le long de la rivière	44
	Situation aux sources	44
	Effet de la pluie	45
	Evolution d'amont en aval	45
	Production de vagues chaudes	46
	Maxima de température journalier	47
3.3.3	Effet de la végétation riveraine sur la température de l'air	48
3.3.4	Corrélation entre température de l'air et de l'eau	49
	Type de corrélation	49
	Conséquences de l'impact d'une hausse de température le long du cours d'eau	49
3.3.5	Conséquences sur la concentration de l'oxygène dans l'eau	51
3.4	Discussion	52
3.4.1	Corrélation entre les températures de l'eau et de l'air	52
3.4.2	Le continuum thermique d'une rivière	53

3.4.3	Influence des berges boisés sur la température de l'eau	54
3.4.4	Influences sur la concentration d'oxygène dissous dans le cours d'eau	54
3.5	Conclusions et conséquences pratiques	55
4	Comprendre la thermique de la rivière aux niveaux régional et national	58
4.1	Introduction	58
4.2	Matériel et méthodes	59
4.2.1	Origine des données régionales	59
4.2.2	Origine des données nationales	60
4.2.3	Période concernée	61
4.2.4	Mise en place des enregistreurs de température d'eau	61
4.2.5	Température de l'air	61
	Température mesurée	61
	Température estimée	61
4.2.6	Ecomorphologie	62
4.2.7	Description des forêts	62
4.3	Présentation des données	63
4.3.1	Choix des paramètres descripteurs de température	63
	Température moyenne estivale	64
	Température maximale estivale	65
	Amplitude thermique estivale	66
	Amplitude thermique journalière	67
4.3.2	Ecomorphologie	68
4.3.3	Effet du passage souterrain	72
4.3.4	Effet de la présence d'un lac sur la température	74
	Le cas du barrage de la SEFA sur l'Aubonne	74
	Le cas du Léman sur le Rhône	76
4.3.5	Effet du débit	79
4.4	Analyses des données	80
4.4.1	Température de l'air	80
4.4.2	Distance à la source	81
4.4.3	Corrélation entre température et écomorphologie	82
	Ecomorphologie locale	82
	Accroissement de température	83
	Ecomorphologie amont	83
4.4.4	Effet de la ripisilve	84
4.4.5	Débit	85
4.5	Discussion	86
4.5.1	Facteurs d'origine naturelle	86
	Débit	86
	Topographie	86
	Corrélation avec la distance à la source	88
	Hétérogénéité du milieu	88
	Présence de lac ou de retenue	88
	Nature du substrat	88
	Présence de macrophytes	89
	Présence d'un cordon boisé	89
4.5.2	Facteurs d'origine anthropique	90
	Barrages hydroélectriques	90
	Prélèvements d'eau	91
	Endiguements	91
	Déboisement	91
4.6	Résumé et conclusions	92
4.7	Annexes	94

5	Modèle thermique	96
5.1	Introduction	96
5.1.1	Contexte	96
5.1.2	Les différents types de modèles possibles	97
5.1.3	Objectifs	99
5.2	Matériel et méthodes	100
5.2.1	Origine des données	100
5.2.2	Mesure des températures de l'air	102
5.2.3	Traitement et analyse des données	102
5.2.4	Choix des variables environnementales	102
5.2.5	Etablissement des modèles	103
5.2.6	Application des modèles	103
5.3	Résultats	104
5.3.1	Etablissement du modèle	104
	Analyses préliminaires	104
	Construction du modèle	105
	Modèle choisi	106
5.3.2	Validation du modèle	107
5.3.3	Application du modèle	108
	Quel gain pour quelle intervention ?	108
	Quelle est la situation aujourd'hui ?	109
	Quelles sera la situation en 2050 ? (Scénario optimiste)	118
	Quelle sera la situation en 2050 ? (Scénario moyen)	122
	Quelle sera la situation en 2050 ? (Scénario pessimiste)	126
	Récapitulation des scénarios	130
5.3.4	Priorisation des actions	133
	Agir sur les rivières elles-mêmes	133
	Permettre la migration vers des zones favorables	133
5.4	Discussion	137
5.4.1	Corrélation entre températures de l'air et de l'eau	137
5.4.2	Descripteurs de température	138
5.4.3	Choix des variables environnementales	138
5.4.4	Situation en 2010	139
5.4.5	Rivières en danger en 2050	139
5.5	Perspectives	140
5.6	Annexe: Données	141
6	Physiologie des végétaux	144
6.1	Expériences préliminaires	144
6.1.1	Introduction	144
6.1.2	Matériels et méthodes	145
	Expérience Effet ombrage	145
	Expérience Effet Essences	146
6.1.3	Résultats	147
	Expérience effet ombrage	147
	Expérience Effet Essence	149
6.2	Capacités d'évapotranspiration de diverses espèces de saules	150
6.2.1	Introduction	150
	La transpiration	150
	L'évaporation	150
	L'évapotranspiration	151
	L'évapotranspiration de référence (ET_0)	152
	L'évapotranspiration maximale (ET_m)	153
	Le coefficient cultural (K_c)	153

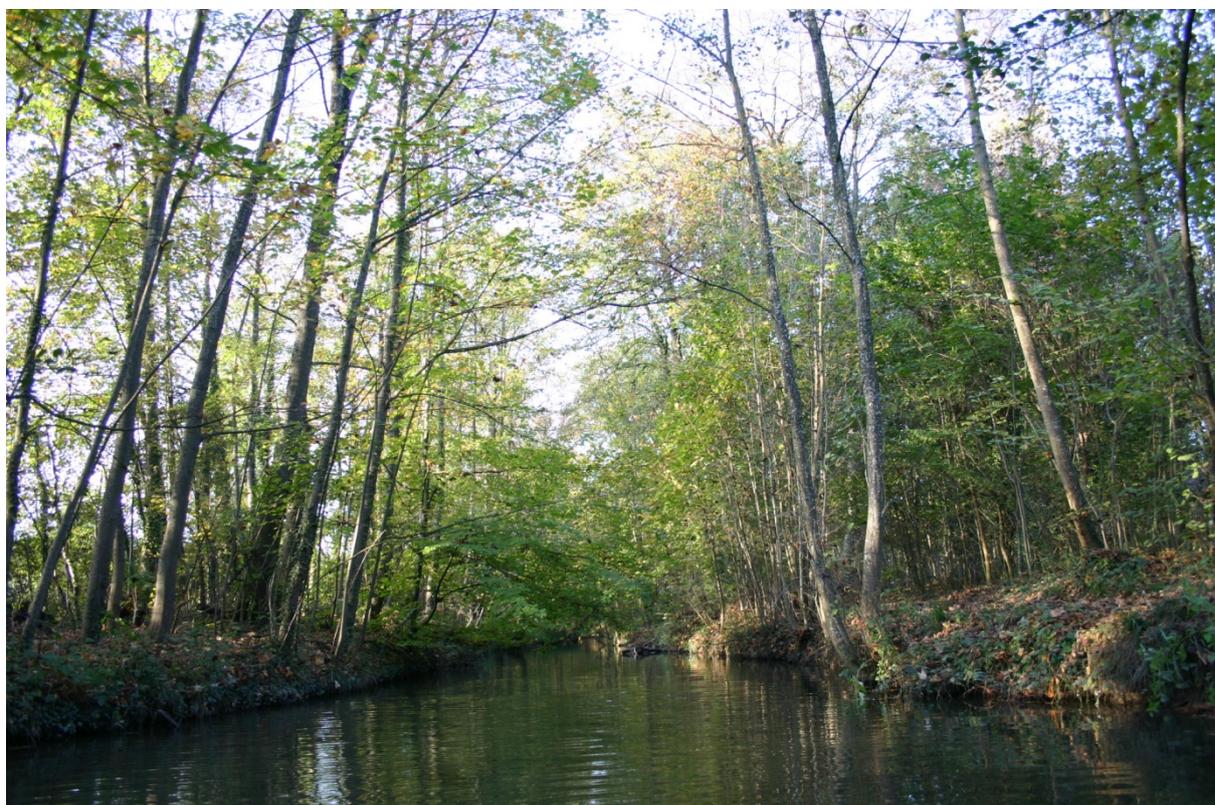
	Surface foliaire	154
6.2.2	Matériel et Méthodes	155
	Sites de prélèvement et choix des espèces	155
	Calcul du coefficient cultural	156
	Mesure de la surface foliaire	160
6.2.3	Résultats	161
	Taux de reprise	161
	Méthode du Potomètre	161
	Méthode du Poids Perdu	162
6.2.4	Discussion	165

7 Bibliographie..... 167



Rapport Clim-arbres

Chapitre 1 : Principes de l'étude



En collaboration avec



1 Principes de l'étude

1.1 Contexte

Le projet **Clim-arbres** fait l'objet d'un contrat n° G231-0238, signé le 10 juillet 2007, entre la Confédération suisse, représentée par M. Daniel Hefti de l'Office fédéral de l'environnement (ci-après OFEV) et la Haute Ecole du Paysage, d'Ingénierie et d'Architecture de Genève) (ci-après hepia), représentée par le Dr. J.-F. Rubin.

Le réchauffement climatique est une réalité qui s'observe parfaitement dans les rivières de Suisse. Les périodes de sécheresse extrême, enregistrées ces dernières années, entraînent des conditions défavorables pour la faune aquatique en général et les poissons en particulier. **Clim-arbres** propose une démarche pragmatique cherchant à lutter, non pas contre le réchauffement climatique en soi (bien que ce soit évidemment un objectif essentiel), mais contre ses effets. Ce projet est issu de la volonté de l'Office Fédéral de l'Environnement de mettre en place une nouvelle politique, via d'éventuels subventionnements, visant à proposer aux administrations des campagnes de plantations en bordure des cours d'eau exposés. Où, comment, combien, pour quel montant, avec quelles incidences sur le paysage, sont quelques unes des questions auxquelles ce projet va répondre pour permettre la mise en place de cette nouvelle politique environnementale. Les livrables à l'issue de ce projet sont notamment prévus à l'attention des administrations pour leur permettre la mise en place de ces méthodes. Les informations sur les méthodes de plantations notamment sont également mises à la disposition des particuliers qui souhaiteraient effectuer de tels aménagements.

Clim-arbres est donc un projet concret de biologie appliquée visant à trouver des solutions pratiques et directement applicables à un problème général. En ce sens, il entre exactement dans la démarche des HES qui visent justement à apporter des réponses concrètes en liaison directe avec l'économie, la société et l'environnement. Il correspond également parfaitement aux objectifs fixés dans le *Plan directeur de recherche Environnement pour les années 2008-2011* de la Confédération (OFEV, 2007) dont le thème prioritaire IV concerne la « *Mutation du système climatique et ses conséquences pour la nature et la société* », ainsi que son thème III « *Protection et utilisation durable des ressources naturelles* ».

Ce rapport est le fruit du travail d'une équipe pluridisciplinaire comprenant des spécialistes dans tous les domaines touchés par cette problématique. Par ailleurs il est incrémenté par des travaux de bachelors et masters réalisés par plusieurs étudiants des Universités de Lausanne et de Genève dont la thématique est directement liée au projet mentionné.

1.2 Equipe de recherche



L'ensemble du projet a été coordonné par le Dr **Jean-François Rubin**, Prof HES à hepia et Président de la Fondation de La Maison de la Rivière. C'est lui qui a pris contact avec l'ensemble des partenaires et a une vision d'ensemble du projet. Il a coordonné notamment l'ensemble des prestations de terrain, ainsi que la transmission des différentes données entre les groupes de recherche.



Dans ces différentes tâches, J.-F. Rubin a été secondé par M. **Alexandre Richard**, Adjoint scientifique, auquel les différents membres de l'équipe ont fait appel en fonction des besoins de chacun.



Sur le terrain, ainsi qu'en laboratoire, de nombreux travaux et suivis ont été assurés par M. **Pierre-Alain Chevalley**, Mme **Jane O'Rourke** et M. **Sylvain Ingold**, d'hepia.



Le Prof. Dr. **Martine Rebetez** du Swiss Federal Research Institute WSL (Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage) a été dans le projet la personne ressource pour toute la problématique qui touchait à l'évolution globale du climat. Sa connaissance approfondie des variations climatiques nous a permis d'affiner les concepts qui sont élaborés dans le cadre de ce projet.



Le Laboratoire de Mécanique des Fluides de l'Environnement et d'Hydrologie de l'EPFL, avec le Dr. **Hendrick Huwald**, PhD du Swiss Federal Institute of Technology, ETH Zurich, responsable Thermodynamique des cours d'eau, s'occupait des mesures de température sur le secteur test.



Le Laboratoire de Communication Audiovisuelle, en collaboration avec le Centre National de compétences en matière de recherche sur les Mobile Information and Communication Systems (MICS), avec le Dr **Guillermo Barrenetxea**, s'est occupé des stations météo sur le secteur test.



Certains aspects liés à la mise au point d'un modèle hydrothermique ont été placés sous la responsabilité du Prof HES **Patrick Haas**, du groupe de compétences en mécanique des fluides et procédés énergétiques (CMEFE) de l'institut IMEC d'hepia. Il a également dirigé le travail de bachelor de **Romain Montavon**, étudiant d'hepia.



Le traitement des données sous forme de système d'informations géo référencées a été placé sous la responsabilité d'**Olivier Travaglini**, ancien adjoint scientifique d'hepia. Licencié en géographie de l'Université de Genève (Formation en SIG et Télédétection),



Pour les modèles SIG, notamment pour les simulations 3D, le projet a bénéficié de l'aide d'**Antoine Guisan**, Professeur assistant du Département d'écologie et évolution de l'Université de Lausanne. Responsable du Spatial Ecology group, c'est notamment avec lui que JF Rubin a codirigé des travaux de master à l'Université de Lausanne sur ce sujet.



La mise au point des concepts de réalisation et d'entretien a été placée sous la responsabilité du Prof HES **Pierre-André Frossard** d'hepia. Spécialiste en techniques d'aménagements naturels, P.A. Frossard dispense notamment le cours de génie biologique et coordonne l'ensemble des modules liés aux aménagements naturels en général et à l'entretien des milieux naturels.



Le choix des végétaux les plus aptes à permettre une thermorégulation des cours d'eau a été notamment étudié par le Prof HES **Patrice Prunier** d'hepia, avec l'aide d'**Ismael Zouaoui**, étudiant de l'Université de Genève, qui a effectué une thèse de master sur le sujet.



Mlle **Carole Pusterla** a effectué une thèse de master à l'Université de Lausanne sur l'établissement d'un modèle thermique.



M. **Mickael Cid** de l'Université de Genève a effectué une thèse de master sur l'établissement d'un modèle thermique.



Finalement, le personnel de la Maison de la Rivière, Mmes **Géraldine Gavillet**, **Nathalie Kummer** et **Vanda Ciotti**, ont participé aux nombreuses opérations de terrain.

1.3 Problématique

En Suisse, le réchauffement climatique est particulièrement important (environ 2 fois plus que dans la moyenne de l'hémisphère nord) car notre pays est situé à des latitudes relativement élevées et loin des océans. L'importance du réchauffement climatique augmente en effet avec la latitude (Ficke *et al.*, 2007). En Suisse, les températures moyennes de l'air ont augmenté, durant les 3 dernières décennies, de 1975 à 2004, de 0.57°C par décennie (Rebetez and Reinhard, 2008). Ce réchauffement concerne l'ensemble du pays et correspond, comme dans la première partie du 20^{ème} siècle, au double du réchauffement pour la moyenne de l'hémisphère Nord.

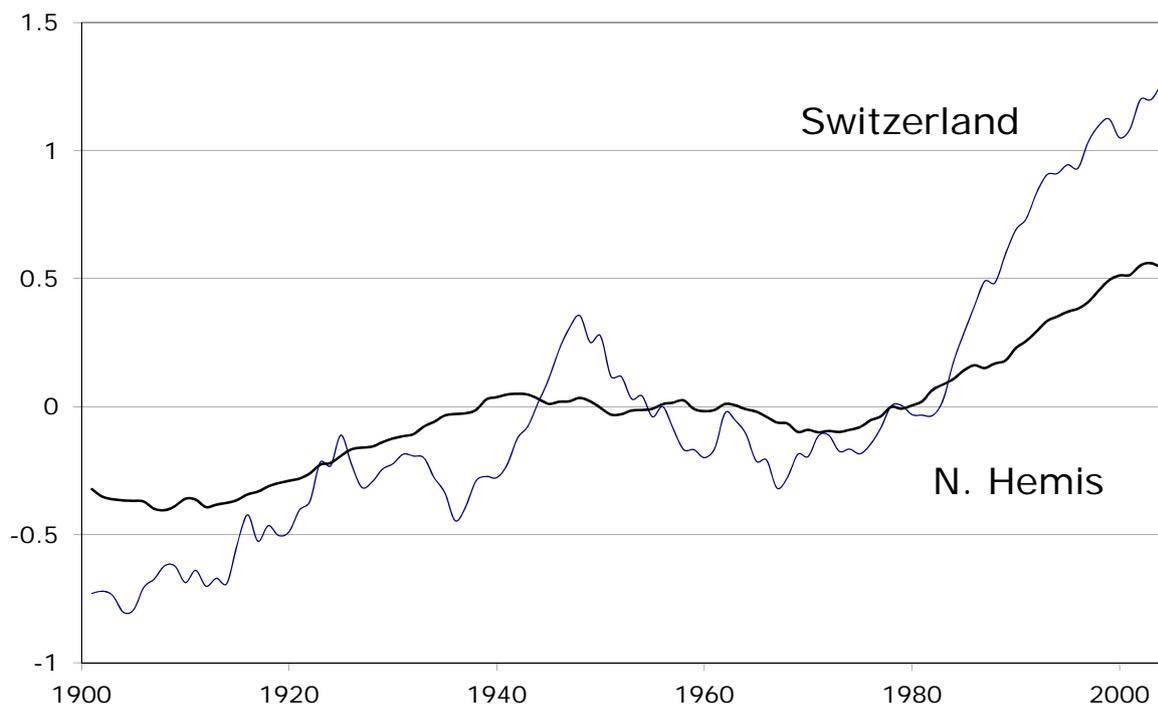


Figure 1: Evolution de la température en Suisse (en bleu) et dans l'hémisphère nord (en noir) (source : (Rebetez and Reinhard, 2008))

Outre un réchauffement général, ce sont surtout les phénomènes climatologiques extrêmes qui sont en augmentation (canicule, chute de pluie violente entraînant des crues, etc.) (Frei *et al.*, 1998; Frei and Schaer, 2001; Schmidli *et al.*, 2001; Schmidli *et al.*, 2002; Rebetez, 2004; Schaer *et al.*, 2004; Frei *et al.*, 2006; Rebetez *et al.*, 2006; IPCC, 2007), comme l'ont démontré les récents événements météorologiques.

Par ailleurs, l'augmentation de l'intensité des sécheresses pourrait renforcer, sur la température des cours d'eau, l'effet direct de l'accroissement des températures atmosphériques.



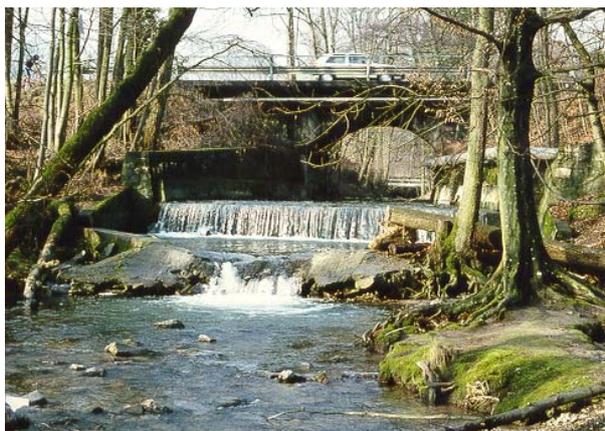
Figure 2: Première page suite aux crues de l'été 2007

Un modèle climatique développé pour l'Europe propose pour le Danemark une augmentation de l'ordre de 4°C entre septembre et janvier, et de 5°C entre février et août pour l'horizon 2070-2100 par rapport aux années 1961-1990 pour un accroissement du CO₂ atmosphérique à une concentration de 630-830 ppm. Selon ce modèle la température dans les rivières danoises étudiées passerait de 8 à 12-13°C (Pedersen and Sand-Jensen, 2007).



Le réchauffement climatique est une réalité qui s'observe parfaitement dans les rivières de Suisse (Hari *et al.*, 2006). Dans une certaine mesure, il peut déjà expliquer en partie le déclin de plusieurs populations de poissons, comme les truites et les ombres (Figure 3) par exemple (Johnson, 2004; Caissie, 2006; Hari *et al.*, 2006). Ces dernières sont à considérer comme des espèces-cibles, les plus menacées de disparition liées au réchauffement climatique.

Figure 3: Ombre de rivière, *Thymallus thymallus*, sur une frayère. Photo ©Michel Roggo



Avec le réchauffement, l'habitat préférentiel de certaines espèces sensibles de poissons comme les salmonidés se déplace vers l'amont des rivières, les parties basses devenant trop chaudes. Or, dans de nombreux cas, une telle migration n'est plus possible en raison de la présence d'obstacles infranchissables (Figure 4). Ainsi globalement avec l'élévation des températures, les zones favorables au développement des populations piscicoles se réduisent.

Figure 4: Ancien obstacle infranchissable sur le Boiron de Morges

Par ailleurs, l'effet combiné de ces élévations avec l'apparition de maladie, comme la maladie rénale proliférative (MRP) par exemple, explique probablement en grande partie le déclin des populations de salmonidés en Suisse (Hari *et al.*, 2006). Ainsi, toute mesure qui pourrait être prise pour limiter ces risques serait *de facto* favorable également aux autres espèces moins sensibles de poissons, ainsi qu'à la faune et la flore d'une manière générale. A terme, s'il se poursuit comme on le prévoit (IPCC, 2007), le réchauffement climatique pourrait certainement être la cause de la disparition de nombreuses populations d'animaux ou de plantes dans des cours d'eau exposés (Moosmann *et al.*, 2005). S'il est difficile, à l'échelle de la Suisse, de lutter directement et significativement contre le réchauffement climatique en lui-même, on peut par contre mettre en place des mesures efficaces pour lutter localement contre ses effets. On le fait par exemple avec toutes les mesures de lutte contre les crues dont on s'attend à ce qu'elles soient plus fortes et plus fréquentes en lien avec le changement climatique.

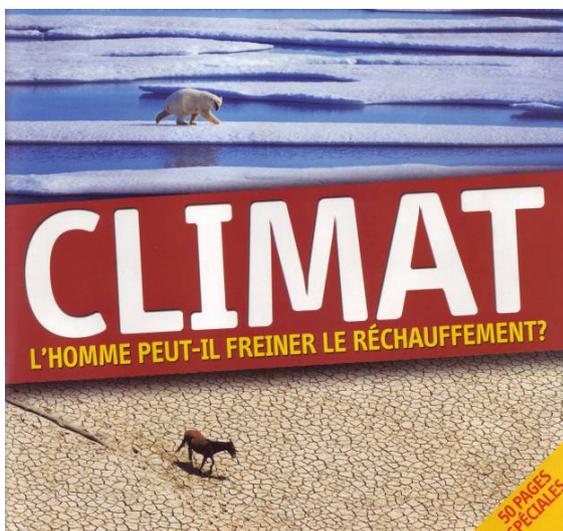
1.4 Objectifs de l'étude

Clim-arbres est un projet pluridisciplinaire visant la mise au point de méthodes de plantations de végétation le long des rivières (Figure 5). Le cordon boisé ainsi créé devrait permettre de diminuer le réchauffement des rivières.



Figure 5: Exemples de cours d'eau sans cordon boisé, très exposé au réchauffement climatique ou au contraire bien protégé. Photos: © PA Frossard

On trouve une littérature abondante, tant dans des revues scientifiques spécialisées que dans la presse et les médias en général, décrivant le réchauffement climatique et des modèles prédictifs du devenir des écosystèmes (Webb and Zhang, 1999; Pedersen and Sand-Jensen, 2007). Plus rarement, on trouve des propositions pour lutter contre ce réchauffement. Dans la plupart des cas, il s'agit d'options générales et de choix de société visant notamment à diminuer les émissions de CO₂ (plus grande utilisation des transports en commun, développement des énergies renouvelables, etc.).



Toutes ces alternatives impliquent des décisions politiques importantes à l'échelle de la Suisse tout au moins, et à l'échelle mondiale. Notre pouvoir décisionnel en la matière est donc extrêmement restreint et notre marge de manœuvre ténue. **Clim-arbres** vise au contraire à lutter concrètement contre certains effets néfastes du changement climatique à un niveau régional, avec des répercussions potentielles directes localement.

Clim-arbres propose une démarche pragmatique, réaliste et relativement facile à mettre en œuvre localement. Ce sont ces caractéristiques qui en font tout le caractère innovant. À l'issue de celui-ci, on sera capable de mettre en place des solutions simples et locales pour lutter avec efficacité contre certains effets du changement climatique indépendamment de la réalisation ou non des objectifs du protocole de Kyoto ou post-Kyoto par l'ensemble des États. Quelles que soient les mesures prises, le changement climatique est déjà en cours et on ne pourra que limiter son ampleur.

Les changements climatiques nécessitent une lutte à deux niveaux : (1) Limiter les émissions de gaz à effet de serre contribuant au réchauffement de l'atmosphère, (2) Intervenir concrètement pour limiter les effets de ces changements, qui sont déjà en cours, quelles que soient les mesures prises pour les limiter.

La lutte contre les effets du réchauffement climatique recouvre des objectifs limités dans le temps et l'espace, pour lesquels des actions concrètes, locales ou régionales, sont susceptibles d'avoir des répercussions directes et significatives. L'objectif poursuivi dans le projet présenté ici consiste à tester la possibilité de produire massivement de l'ombre sur les cours d'eau afin de diminuer le rayonnement thermique sur la rivière et donc le réchauffement des eaux. Une élévation moindre de la température de l'eau à certains moments de l'année et de la journée pourrait s'avérer cruciale pour le maintien de certaines espèces sensibles. Le projet propose donc la mise au point de méthodes de plantation le long des rivières selon une procédure adaptée à chaque site, en fonction des caractéristiques propres du milieu.

Clim-arbres répond à 3 questions principales :

1. Quels sont les facteurs principaux déterminant la température de l'eau d'une rivière ?

Diverses expériences et monitoring sont mises en place sur le terrain afin de déterminer le régime thermique de diverses rivières. Par ailleurs, les données des cantons et de la Confédération sont compilées afin de compléter la base de données. Un modèle thermique est décrit et validé sur la base des données recueillies.

2. Où sont les rivières les plus menacées par le réchauffement ?

En appliquant le modèle thermique à l'échelle d'une région en fonction de divers scénarios climatiques, on parvient à localiser les rivières allant souffrir en premier du réchauffement, donc celles sur lesquelles des mesures doivent être prises en priorité.

3. Comment protéger ces rivières ?

Par diverses expériences en laboratoire et en nature, il s'agit de déterminer quels sont les essences les mieux à même d'influencer le microclimat des cours d'eau. En fonction des caractéristiques de chaque essence, et de chaque type de site à reboiser, on pourra alors établir des fiches techniques donnant toutes les consignes pour effectuer les plantations dans les meilleures conditions.

Ainsi, en termes de planification, connaissant les coûts au mètre linéaire d'une telle intervention et la longueur de berges à aménager pour une région donnée en fonction d'un optimum attendu d'efficacité, on pourra donc finalement estimer les coûts réels à l'échelle de toute une région qu'induirait cette politique nouvelle de lutte contre certains effets problématiques du réchauffement climatique. Par ailleurs, outre le fait de produire de l'ombre, la végétation en bordure des cours d'eau peut avoir de nombreux autres avantages écologiques selon les essences employées (habitat pour de nombreuses espèces notamment). Elle est également un des éléments essentiels du paysage et les cordons boisés contribuent fortement à la création de

réseaux écologiques diversifiés favorables à l'établissement durable de nombreuses espèces d'animaux, notamment de mammifères et d'oiseaux.

A titre d'exemple, les investigations sont effectuées à l'échelle du Canton de Vaud, un canton intéressant pour cette problématique puisqu'il offre une variété importante de cours d'eau : de plaine, de moyenne montagne et d'altitude, du Plateau, du Jura et des Alpes. Travailler en étroite collaboration avec l'administration nous permet ainsi de bien répondre aux attentes et contraintes des différents services responsables en la matière.

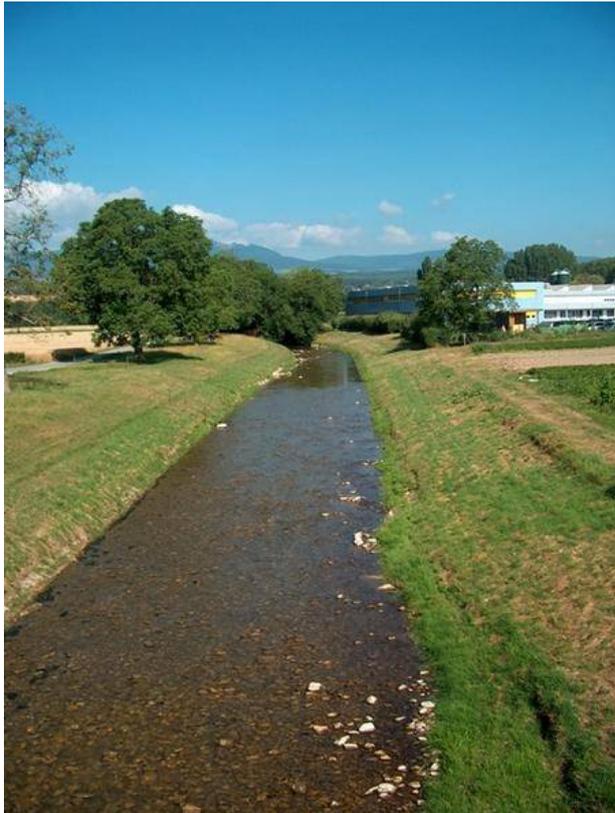


Figure 6: La Venoge à Lussery (à gauche), le Boiron à Lully (à droite), deux configurations pour lesquelles les effets du réchauffement climatique seront différents

1.5 Niveaux d'étude

Le principe de base de ce travail est de comprendre certains processus à une petite échelle pour ensuite extrapoler ces notions à l'échelle suivante. C'est ainsi que 4 niveaux d'étude distinct (constituant autant de chapitres du présent rapport) ont été définis (Figure 7).

4. Niveau Suisse

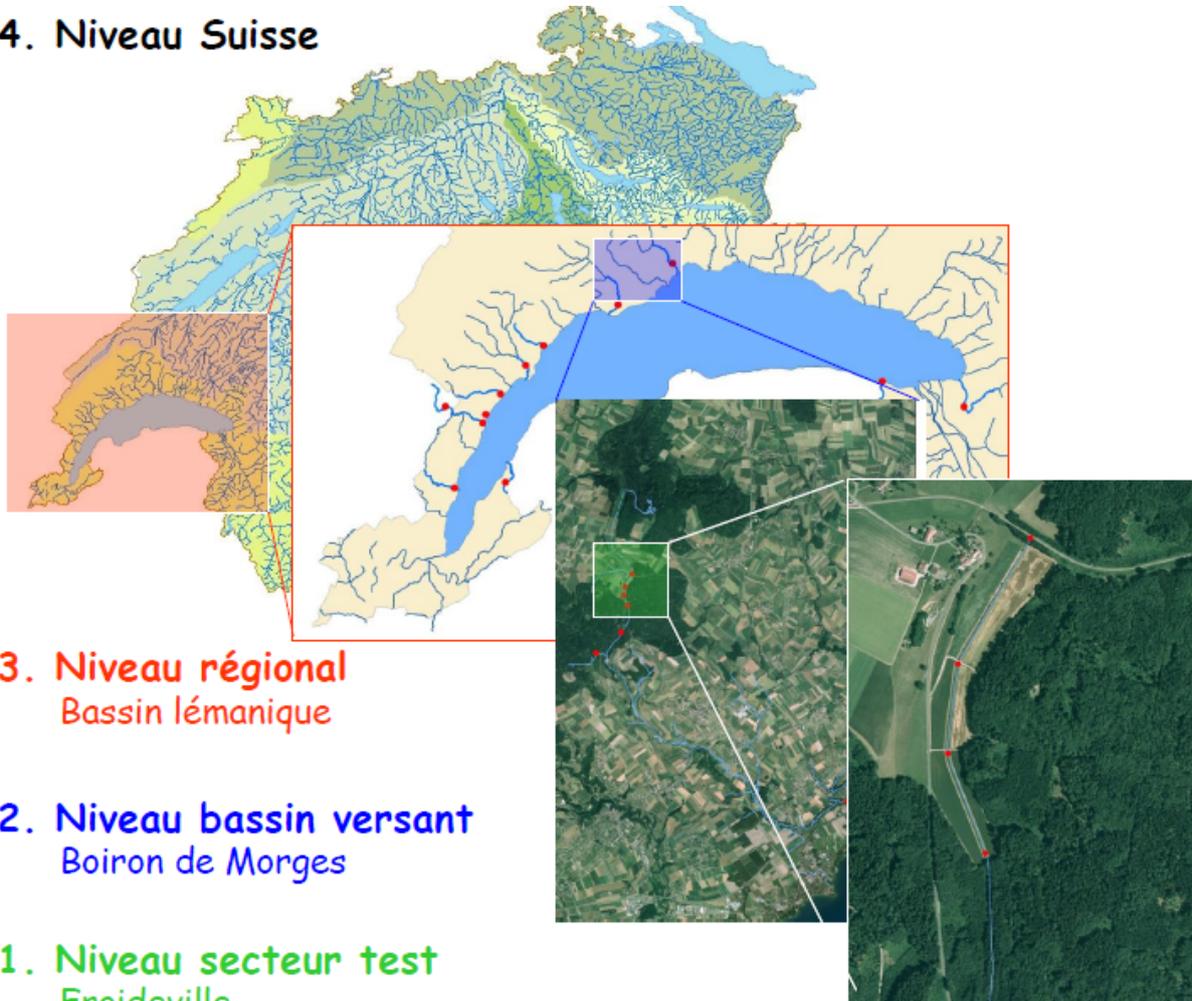


Figure 7: Niveaux d'étude du projet *Clim-arbres*

1.6 Découpage de l'étude

Pour faciliter la lecture, le projet est divisé en 6 chapitres différents, correspondant chacun à un niveau d'étude, soit :

Chapitre 1 : Principes de l'étude

Chapitre 2 : Comprendre la thermique de la rivière au niveau d'un secteur test

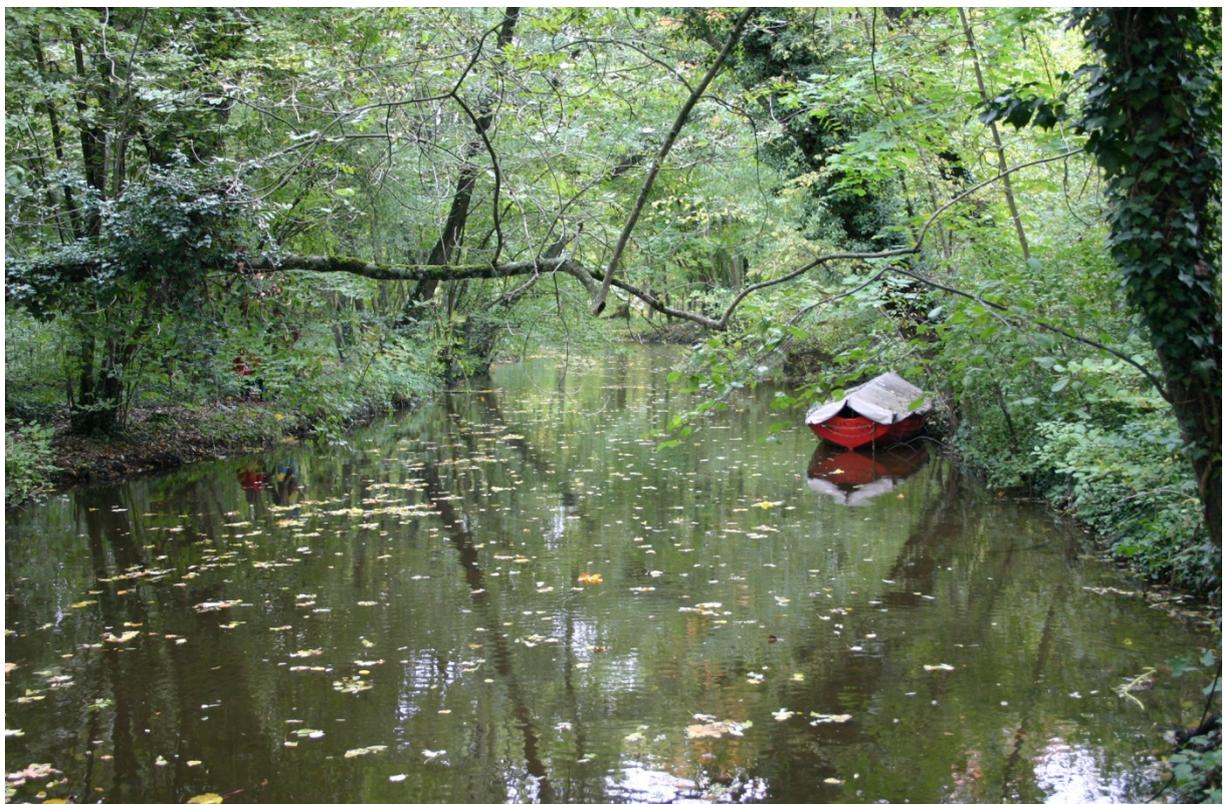
Chapitre 3 : Comprendre la thermique de la rivière au niveau d'un bassin versant

Chapitre 4 : Comprendre la thermique de la rivière au niveau régional

Chapitre 5 : Modèle thermique

Chapitre 6 : Physiologie des végétaux

Ce rapport est complété par un cahier en annexe, illustrant les bonnes pratiques en matière de plantation le long des cours d'eau





Rapport Clim-arbres

Chapitre 2 : Comprendre la thermique de la rivière au niveau d'un secteur test



En collaboration avec

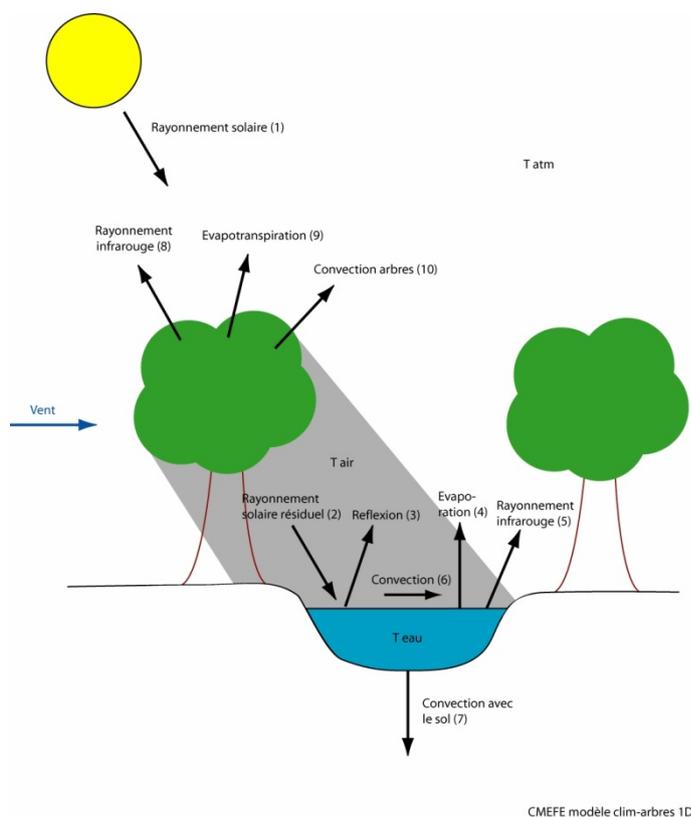


2 Comprendre la thermique de la rivière au niveau du secteur test

Cette partie de recherche a fait l'objet d'une publication scientifique : « *Stream temperature response to three riparian vegetation scenarios by use of a distributed temperature validated model* » (Roth *et al.*, 2010). Les principaux résultats de cette étude sont présentés dans les pages ci-dessous. Par ailleurs, d'autres résultats en relation avec les pompages dans la nappe, non publiés à ce jour, viennent compléter ce chapitre. Ces derniers résultats ont été obtenus avec l'aide du Prof. Aurèle Parriaux de l'EPFL.

2.1 Introduction

Les pratiques agricoles et d'aménagement du territoire sont bien connues pour jouer un rôle prépondérant pour le régime thermique des cours d'eau (Holtby, 1988; Poole and Berman, 2001; Borman and Larson, 2003). L'habitat des poissons est en constante dégradation suite aux effets directs des activités humaines et des changements climatiques (Fitzgerald *et al.*, 1997). Ces phénomènes ont menacés de nombreuses espèces, mettant en évidence la nécessité de mettre en place de nouvelles politiques de gestion de l'eau, afin de préserver l'habitat des populations naturelles de poissons.(Fitzgerald *et al.*, 1997). Les poissons d'eau froide, comme les salmonidés, montrent des taux de mortalité important lorsque la température des rivières dépasse des valeurs critiques (Brett, 1956; Lee and Rinnie, 1980; Theurer *et al.*, 1985; Peterson and Kitchell, 2001; Marine and Cech, 2004; Burkhardt-Holm, 2008). C'est la raison pour laquelle il apparait essentiel de comprendre comment une rivière réagit thermiquement, notamment suite à la modification de certaines pratiques agricoles.



Le rayonnement solaire est souvent le facteur physique le plus important influençant la température d'un cours d'eau en relation avec la gestion agricole (Brown and Krygier, 1970; Lee and Rinnie, 1980; Sinokrot and Stephan, 1993; Webb and Zhang, 1997; Johnson, 2004). Un accroissement de la végétation riveraine réduit la radiation solaire absorbée par l'eau, en diminuant ainsi les maxima de température enregistrés pour la rivière. Comme la végétation peut réduire la perte de rayonnement infrarouge durant la nuit, les températures minimales sont moins influencées (Cox and Rutherford, 2000; Johnson and Jones, 2000). Ce sont souvent les variations journalières qui jouent un rôle important pour la santé de l'environnement.

Figure 8: Paramètres physiques influençant la température de l'eau (Montavon, 2008)

La perte de la ripisilve peut accroître d'autres processus jouant un rôle important dans les échanges de chaleur entre l'eau et l'air, comme par exemple l'accroissement du vent ou la diminution de l'humidité relative (Chen *et al.*, 1993; Beschta, 1997; Johnson, 2004). L'absence de végétation riveraine est corrélée avec un accroissement de la température du sol, ce qui peut induire des modifications importantes dans les transferts de masses d'air proche des cours d'eau (Mostovoy *et al.*, 2008). Plusieurs études récentes sur les effets de la végétation riveraine en relation avec le rayonnement solaire se sont concentrées notamment sur les effets liés à l'ombrage (Larson and Larson, 1996; Zwieniecki and Newton, 1999; Johnson, 2004). La capacité d'une rivière à résister à un accroissement de température dépend largement de son débit, ainsi que de la proximité de la ripisilve (Larson and Larson, 1996).

Dans ce chapitre, un modèle décrivant la réponse thermique d'un segment de rivière à divers types d'aménagements riverains est proposé. Un modèle physique, unidimensionnel de température est couplé avec une technologie *Distributed Temperature Sensing* (DTS), ainsi que des stations de mesures *in situ* afin de valider le modèle. Avec cette technologie, 3 questions sont abordées :

1. Quel type d'aménagement est le plus efficace pour limiter les pics de température estivaux ?
2. Quels effets peut-on attendre d'une restauration de la ripisilve le long d'une rivière en regard avec la température de l'eau ?
3. Est-ce que les modèles utilisant ce type de technologie sont susceptibles d'apporter une aide dans les projets de renaturation ?

2.2 Matériel et méthodes

2.2.1 Description du secteur test

Le secteur test constitue la partie amont du Boiron de Morges (Figure 9). Le bassin versant de cette rivière est décrit dans le cahier 3 de l'étude *Clim-arbres*. Les premiers 1260 m depuis que l'eau de la rivière parvient à l'air libre constitue le terrain d'étude. Plus en amont, à la hauteur d'un ancien marais, la rivière a été mise sous tuyau. On y trouve 3 types de berge :

1. **Section ouverte** : de 0 (position de la « source ») à 340 m, la rivière est entièrement canalisée avec une végétation basse sur les berges.
2. **Section macrophytes** : de 340 à 860 m de la source, le fond du canal est entièrement recouvert de macrophytes. Par contre les berges sont de même nature qu'en amont
3. **Section forêt** : de 860 à 1260 m, la rivière méandre naturellement au sein d'une forêt.

Le substrat des sections ouverte et macrophytes est constitué de dalles en béton ajourées. Ces blocs augmente la conductivité thermique du sol et leur présence est donc prise en compte dans les équations de balance énergétique.

Le profil en travers est trapézoïdal, avec une largeur de 2.10 à 3.75 m (moyenne 3.07 m). Pendant la période d'essai, du 11 au 13 août 2007, le débit de la rivière était de 82.5 l/s. La hauteur d'eau était de 0.29, 0.58 et 0.47 m respectivement dans chaque section. La vitesse du courant était de 0.076 m/s dans les sections ouverte et forêt et de 0.072 m/s dans la section macrophytes, induisant un temps de séjour de l'eau dans l'ensemble du tronçon de 4.6 - 4.9 h.

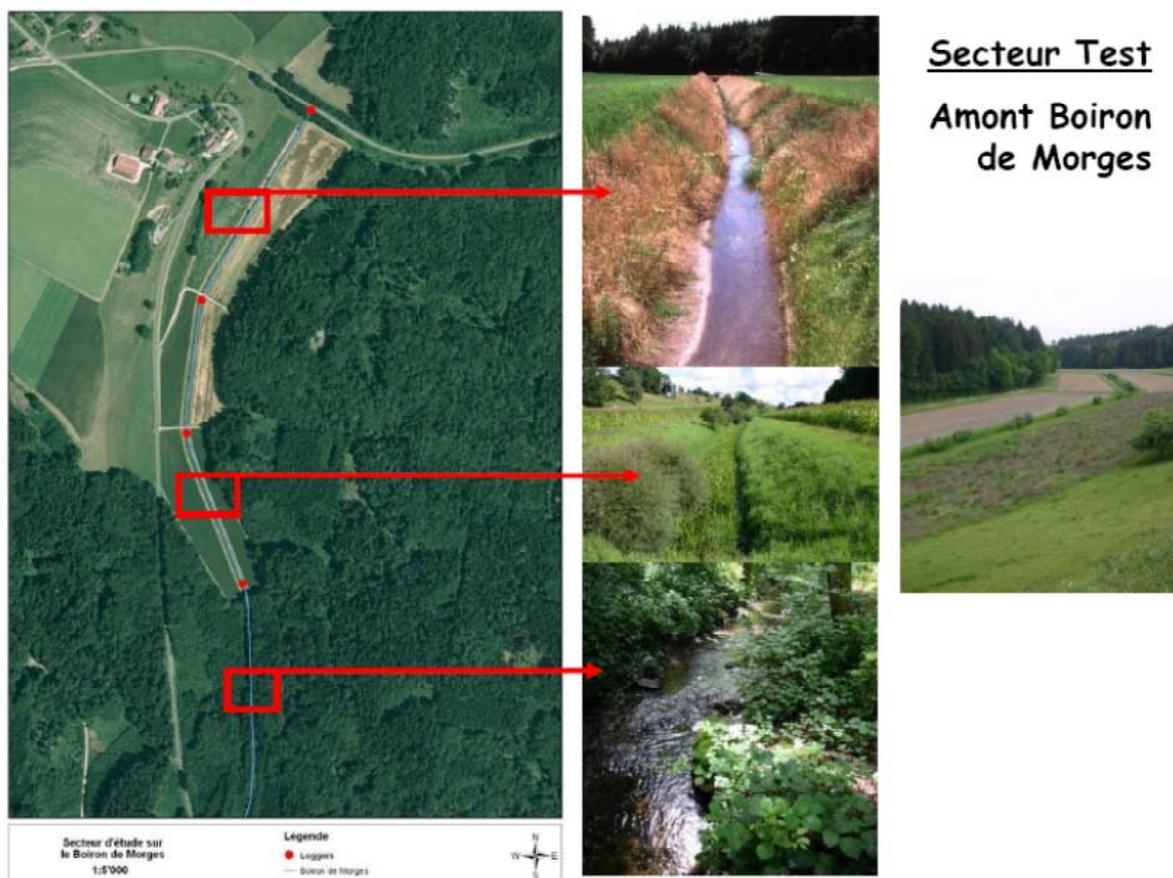


Figure 9: Caractéristiques du secteur test avec les 3 sections : ouverte, macrophytes et forêt

2.2.2 Techniques de mesures



La température de l'eau a été mesurée grâce à une fibre optique (DTS instrument Agilent N43386A, duplex mode 50/125 BRU steel fiber optic cable Bruggs) avec une résolution de 1.5 m et un pas de temps de 10 m.

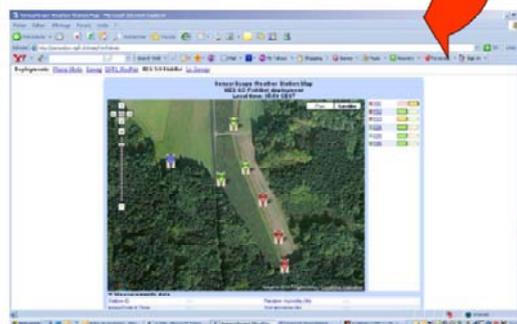
La fibre a été posée au milieu du cours d'eau sur le substrat. En aval, la fibre était reliée à un ordinateur collectant les données.



Figure 10: Fibre optique mise en place par l'EPFL



Stations météo



Les données météorologiques, fournies par un réseau de stations météo, étaient transmises directement à l'EPFL via un système sans fil (Figure 11). Les stations sensorscope ont été déployées sur 6 sites différents, d'amont en aval de la rivière le long du secteur test. Les paramètres suivantes furent enregistrés : le rayonnement solaire, température de l'air ambiant et de la surface du sol, humidité relative, vitesse et direction du vent, ceci toutes les 2 minutes et à 2 m de hauteur.

Figure 11: Système de transmission des données météorologiques

2.2.3 Modèle énergétique

Afin de simuler la température de l'eau, un modèle de balance énergétique a été établi (Westhoff *et al.*, 2007) en utilisant les paramètres suivants :

- Rayonnement solaire
- Rayonnement infrarouge
- Conduction du substrat
- Evaporation
- Convection

Les flux ont été calculés en utilisant la formule de Penman-Monteith (Monteith, 1981). Les différentes équations pour définir le modèle sont décrites en détail dans l'article scientifique complet (Roth *et al.*, 2010).

Une fois le modèle établi et validé par les observations de terrain, il a été possible de simuler, en définissant 3 scénarios, quelles auraient été les températures de la rivière si :

1. **Scénario ouvert** : tous les arbres avaient été enlevés (correspondant à la situation de la section ouverte)
2. **Scénario macrophytes** : tout le fond de la rivière avait été recouvert de macrophytes (correspondant à la section macrophytes)
3. **Scénario forêt** : toute la rivière avait été entourée d'une forêt (correspondant à la section forêt).

2.3 Résultats

2.3.1 Validation du modèle

Le modèle a été validé en comparant les données directement mesurées par la fibre optique à celle estimées à partir du modèle (Figure 12).

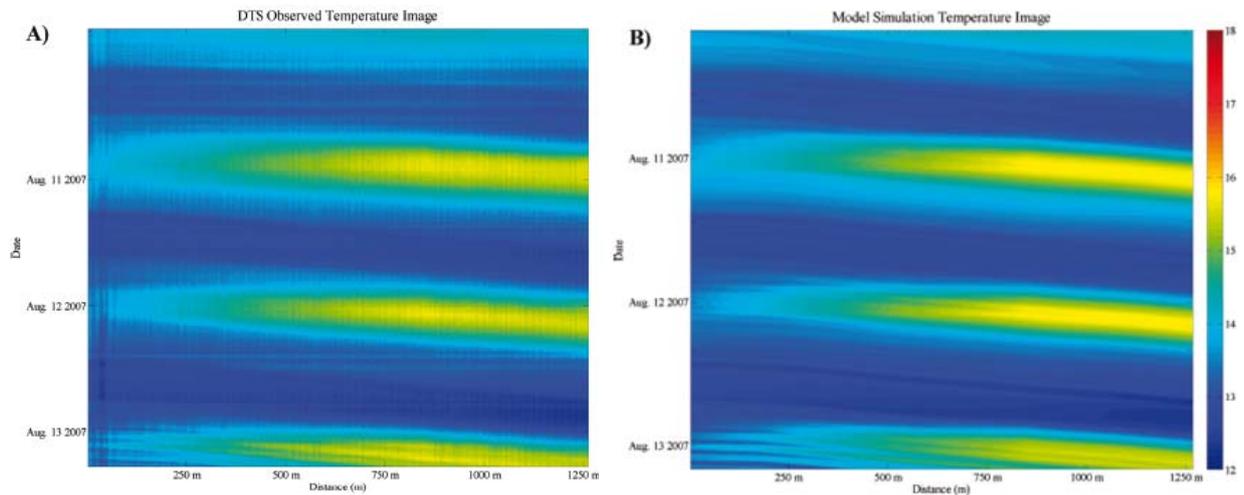


Figure 12: (A) Température mesurée au moyen de la fibre optique le long du tronçon test (B) Température estimée par le modèle. Ordonnée: distance à la source, Couleurs: Valeur de température de l'eau en T°C

La comparaison des deux schémas démontre que le modèle décrit convenablement la situation réelle observée.

2.3.2 Effet de la ripsilve

Le modèle permet d'estimer quelle aurait été la température de l'eau si l'ensemble du tronçon avait été ouvert, recouvert de macrophytes, ou encore bordé d'une forêt (Figure 13).

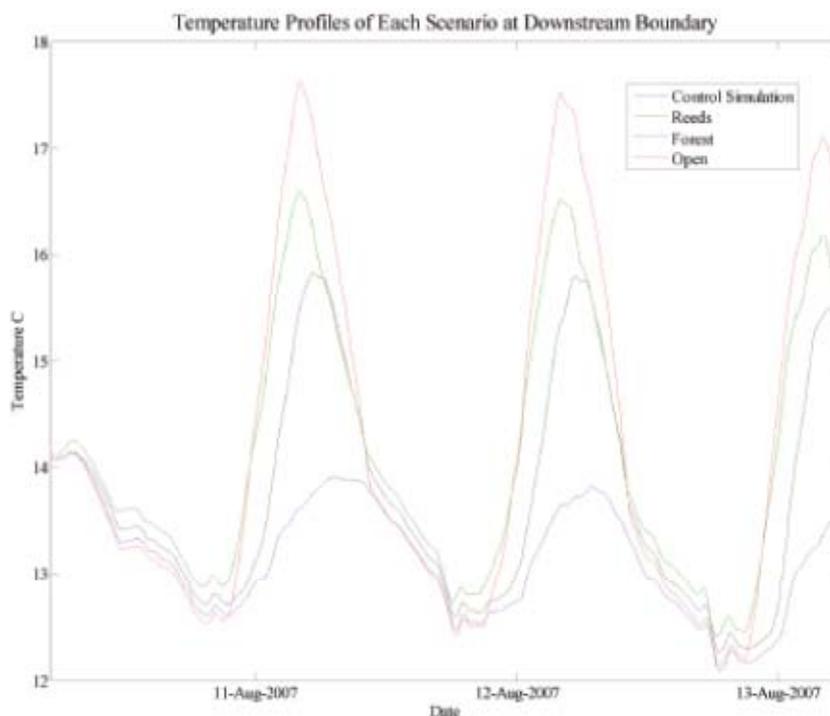


Figure 13: Température de l'eau estimée par le modèle à l'extrémité aval du tronçon en fonction des 3 scénarios environnementaux, comparée à la situation réelle observée.

Les simulations démontrent que la ripsilve est à même de considérablement réduire les pics de température qui sont engendrés en situation ouverte (Tableau 1).

Tableau 1: Température de l'eau et de l'air dans le tronçon test en fonction des scénarios environnementaux

	T°C eau max	T°C eau min	Amplitude thermique	T°C air max
Valeurs observées	15.7	12.3	3.4	21.7
Valeurs estimées par le modèle	15.8	12.3	3.5	21.7
Scénario ouvert	17.6	12.2	5.4	22.2
Scénario macrophyte	16.6	12.4	4.2	21.8
Scénario forêt	14.3	12.1	2.2	20.6

La forêt sur l'ensemble du tronçon aurait donc induit une diminution de température maximale de 3.3°C par rapport à une situation entièrement ouverte. Par ailleurs, les macrophytes semblent également à même de jouer un rôle non négligeable avec une diminution de 1°C. Les températures minimales ne sont par contre que peu affectées. Dans une situation ouverte, l'amplitude de variation thermique de l'eau est plus du double de celle que l'on observerait en forêt (Tableau 1). Cette diminution de l'amplitude thermique grâce à la forêt est probablement un facteur clé pour le maintien des biocénoses dans les secteurs ombragés.

2.3.3 Effet des pompages dans la nappe phréatique

La structure d'une rivière dépend au moins de trois composants interdépendants : le lit de la rivière, sa zone ripariale (zone influencée par l'humidité induite par la rivière) et son aquifère alluvial (eau souterraine) (Poole and Berman, 2001). Ainsi, une rivière n'est donc pas limitée par son lit, mais va bien au delà. La largeur de cette zone est très variable en fonction de la taille de la rivière (de quelques mètres à plusieurs km voire centaines de km comme pour l'Amazone par exemple).

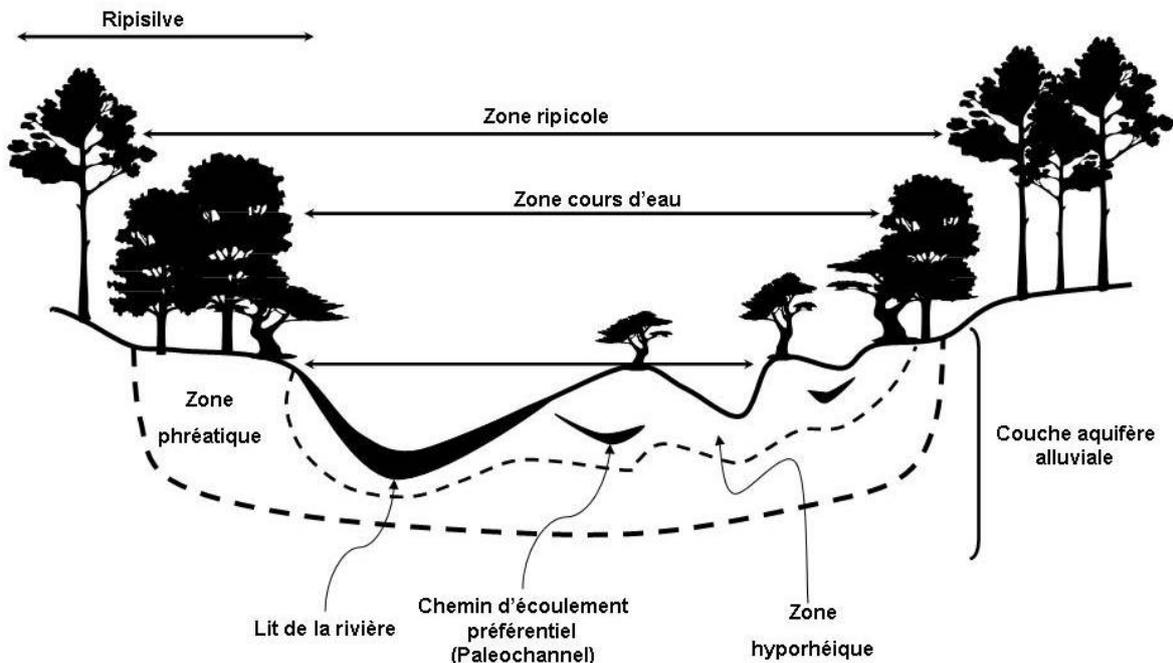


Figure 14: Composants structurels d'une rivière d'après (Poole and Berman, 2001)

La température des rivières dépend de nombreux groupes de facteurs liés à ces 3 compartiments (Sinokrot and Stephan, 1993; Clark *et al.*, 1999; Erickson and Stefan, 2000; Caissie *et al.*, 2001; Poole and Berman, 2001; Johnson, 2003; Caissie, 2006; Pedersen and Sand-Jensen, 2007).

Lors des expériences effectuées avec la fibre optique (voir ci-dessus), des variations régulières complémentaires de température ont été observées du 13 au 25 août 2007 (Figure 15).

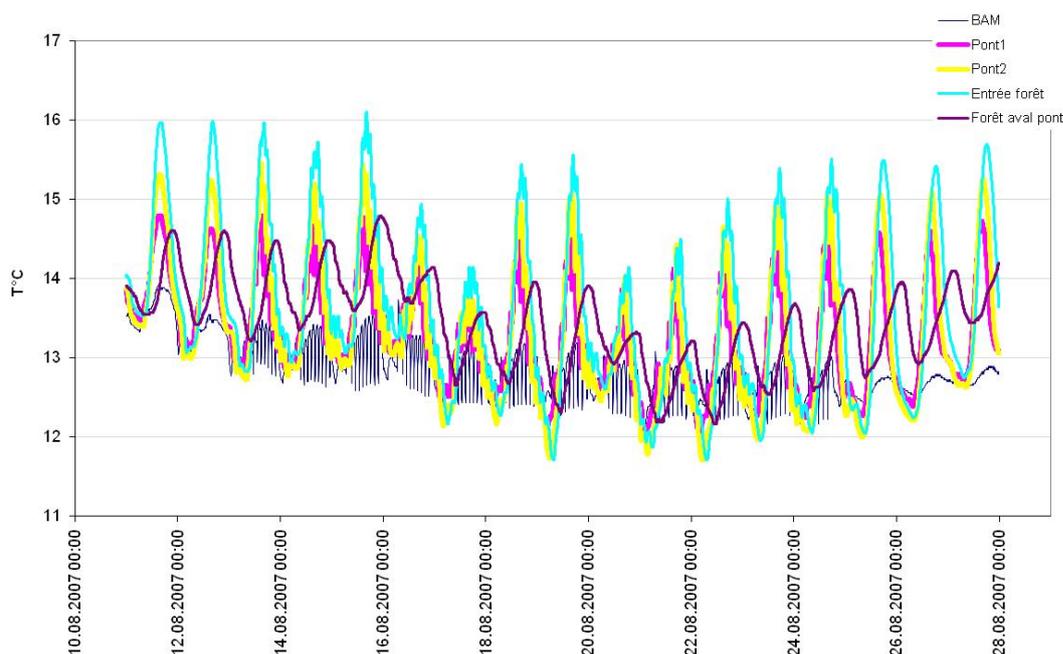


Figure 15: Variation de température observable dans la partie amont du secteur test

Après enquête, ces variations observables correspondaient à une période de pompage, réalisée par des agriculteurs dans la partie en amont du Boiron, là où la rivière est entièrement sous tuyau, avant qu'elle n'apparaisse pour la première fois à l'air libre. Ces variations étaient observables avec une remarquable périodicité de 2 heures, et étaient d'autant plus importantes que l'on se trouvait proche de la « source » à la station « BAM » (Figure 16).

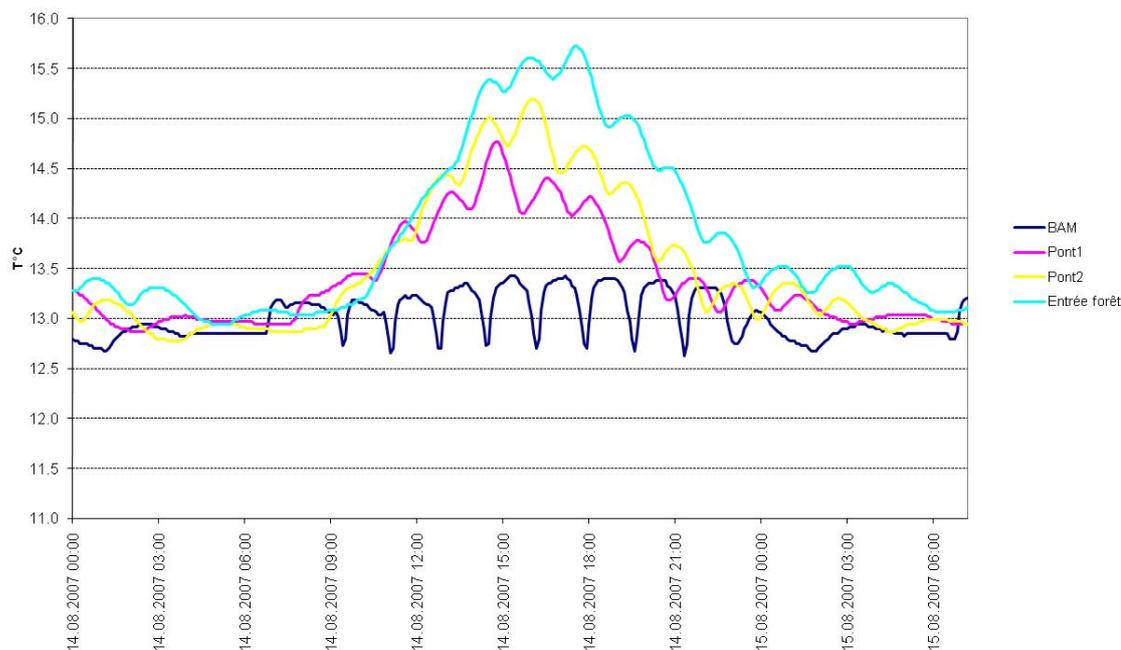


Figure 16: Variation de température observable dans la partie amont du Boiron le 14 août 2007

Ces variations étaient parfaitement visibles sur les graphiques obtenus à partir des mesures de température effectuées avec la fibre optique en comparant un jour avec ou sans pompage (Figure 17).

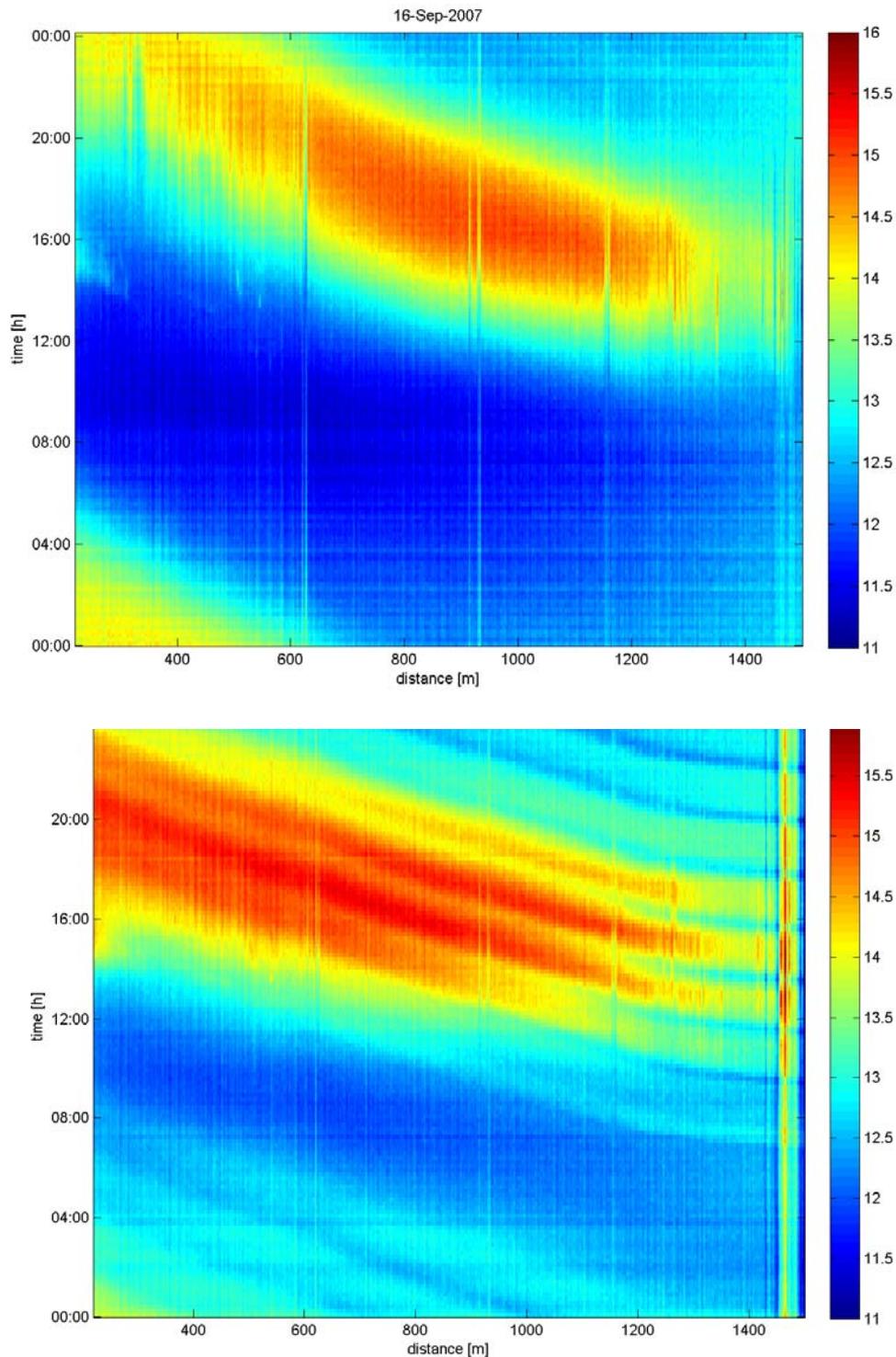


Figure 17: Schéma typique de l'évolution des températures le long du tronçon test, en haut : un jour sans pompage, en bas : un jour avec pompage

Ces pompages dans la nappe en amont perturbaient les échanges hydriques entre cours d'eau et nappe en modifiant la hauteur de cette dernière. En conséquence des apports d'eau froide supplémentaires venaient alimenter la rivière. Ces apports sont clairement visibles et directement en lien avec les opérations de pompage.

2.4 Conclusions et conséquences pratiques

Cette étude démontre, à l'échelle d'un tronçon test, que :

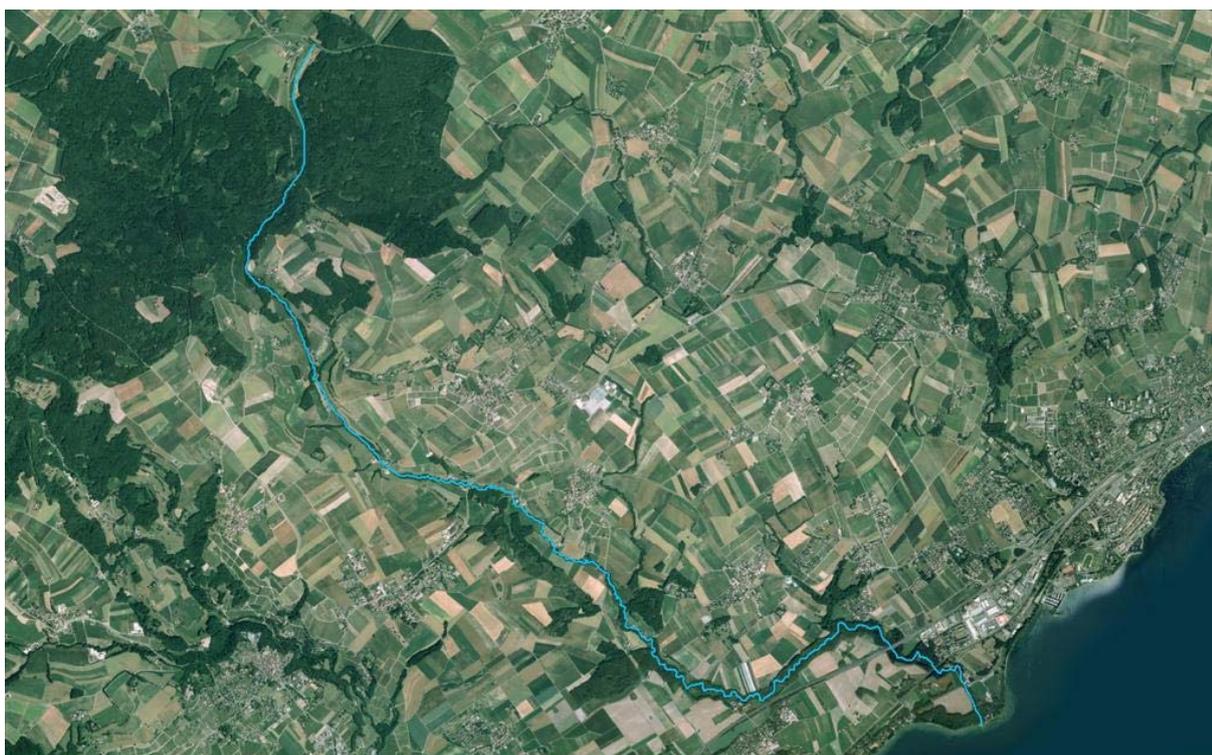
1. Le rayonnement solaire est le facteur physique prépondérant influençant la température de l'eau.
2. La présence d'une forêt permet de diminuer drastiquement les pics de température qui se produisent lorsque la rivière chemine dans des portions ouvertes, non protégées du rayonnement solaire. Dans le même temps l'amplitude thermique est également moindre.
3. Les simulations montrent que, dans une configuration comme celle de la partie amont du Boiron, par rapport à un tronçon entièrement ouvert et canalisé, la présence d'une forêt éviterait un réchauffement de l'eau de l'ordre de 3.3°C observable à l'aval du tronçon de 1260 m. On peut donc admettre que la plantation d'une ripisilve dense en lieu et place d'une portion entièrement ouverte permettrait un non-accroissement de la température maximale de l'eau d'environ 2.6°C/km.
4. La présence de macrophytes est également à même de réduire l'accroissement de température d'un cours d'eau.
5. Nappe phréatique et rivière sont intimement liées. Aussi toute perturbation sur l'une (pompage par exemple) est à même de modifier immédiatement les régimes hydriques et thermiques observables sur l'autre.

En conséquence, dans la mesure du possible, lors des projets d'aménagement de cours d'eau, il convient de prévoir un espace suffisant afin de pouvoir :

1. Planter, ou conserver, une ripisilve suffisante
2. Maintenir, ou favoriser, le développement d'herbiers de macrophytes dans le lit du cours d'eau. Par conséquent, une politique visant à curer systématiquement le lit des rivières peut être à même d'augmenter les effets néfastes du réchauffement climatique. Si l'on choisit de maintenir les macrophytes, il conviendra cependant bien entendu de se pencher sur le problème du gabarit d'écoulement, puisque la présence de ces plantes diminuera forcément la vitesse de l'eau, ainsi que le gabarit de la rivière, ce qui pourrait poser problème en cas de crue notamment.
3. Evaluer en détail toutes les conséquences possibles sur le régime hydraulique d'un cours d'eau lors de l'octroi d'une concession de pompage dans la nappe phréatique. Même si l'eau n'est pas directement prise dans la rivière, mais dans la nappe, les impacts sur la rivière peuvent néanmoins être importants.

Rapport Clim-arbres

Chapitre 3 : Comprendre la thermique de la rivière au niveau de son bassin versant



En collaboration avec



3 Comprendre la thermique de la rivière au niveau de son bassin versant

Cette partie de la recherche fait l'objet d'un article scientifique en cours de publication : "*Observed forest impact on the temperatures of air and river water*"

Dont les auteurs sont: Jean-François Rubin^{1 et 3}, Alexandre Richard¹, Pierre-Alain Chevalley¹, Patrick Haas¹, Hendrik Huwald², Guillermo Barrenetxea², Carole Pusterla³ & Martine Rebetez⁴

1 : hepia. Haute Ecole du Paysage de l'Ingénierie et de l'Architecture, 150, route de Presinge, CH-1254 Jussy, Switzerland, 2: EPFL, ENAC, 3: Fondation Maison de la Rivière, CP 88, CH-1131 Tolochenaz, Switzerland, 4 : WSL Swiss federal institute for forest, snow and landscape research, CP 96, 1015 Lausanne

Les principaux résultats de cette étude sont présentés dans les pages ci-dessous.

3.1 Introduction

Sur la plupart des rivières suisses, un accroissement de la température a été observé en relation avec le réchauffement climatique (Hari *et al.*, 2006; Roth *et al.*, 2010). La température moyenne de l'air a augmenté de 0.57°C entre 1975 et 2004 au Nord des Alpes (Rebetez and Reinhard, 2008). Concomitamment, une augmentation significative de 1.5 à 2.0°C de la température maximale annuelle a été observée dans certaines rivières au cours de ces 20 dernières années (Burkhardt-Holm *et al.*, 2002). Des observations similaires ont été faites sur le Danube avec un accroissement des températures moyennes mensuelles de 0.8°C sur la période 1901-1990 (Webb and Nobilis, 1994).

L'influence de la présence d'un cordon boisé sur la température de l'eau des rivières est connu depuis longtemps (Brown, 1969; Gray and Edington, 1969; Li *et al.*, 1994; Johansen *et al.*, 2005). A titre d'exemple, pour 6 rivières de Nouvelle-Zélande, l'extension des forêts a induit une diminution des variations de température saisonnières (Johnson, 1971). Des modèles prédictifs liant les températures de l'air et de l'eau ont certes déjà été établis pour déterminer l'impact de l'exploitation forestière ou de la construction de barrage (Brown, 1969; Marcotte and Duong, 1973; Ringler and Hall, 1975). Toutefois, l'observation et la compréhension de l'impact de la ripisilve sur la température de l'eau d'une rivière à l'échelle spatio-temporelle de tout son bassin versant est encore largement lacunaire.

C'est la raison pour laquelle ce chapitre décrit les variations de température, les relations entre l'air et l'eau, ainsi que les fluctuations de concentration en oxygène, mesurés sur l'ensemble du Boiron de Morges, un affluent du Léman, sur une période de 5 ans. Il est ainsi possible de mettre en évidence les effets de la ripisilve sur la température de l'eau, de la source à l'embouchure. Par ailleurs plusieurs scénarios possibles décrivant les augmentations de la température de l'air ont été appliqués à ce cas afin d'évaluer l'évolution possible de la température de l'eau et d'ainsi déterminer comment la ripisilve peut permettre de lutter contre les effets du réchauffement climatique.

3.2 Matériel et méthodes

3.2.1 Description géographique du Boiron de Morges

Le Boiron de Morges prend sa source au sud de Ballens. D'une longueur de 13.4 km, il se jette dans le Léman entre St-Prex et Tolochenaz. La longueur totale du cours principal et de ses affluents est de 23 km. Le bassin versant du Boiron a une superficie de 31.619 km² (Figure 18).



Figure 18: Bassin versant du Boiron

Le bassin versant est composé de 16 communes. Le territoire de certaines communes, comme Lussy et Villars-sous-Yens, est compris en totalité dans le bassin versant, d'autres seulement en partie.

En termes d'occupation du sol, on peut diviser globalement le bassin versant en 3 parties (Figure 19) :

1. La zone amont, en dessus du village de Yens, constituée principalement de forêts
2. La zone intermédiaire où les activités agricoles, principalement viticoles, dominent. Le cordon boisé de part et d'autre de la rivière est généralement peu large.
3. La zone aval à caractère plus naturel, avec un cordon boisé à nouveau plus large.

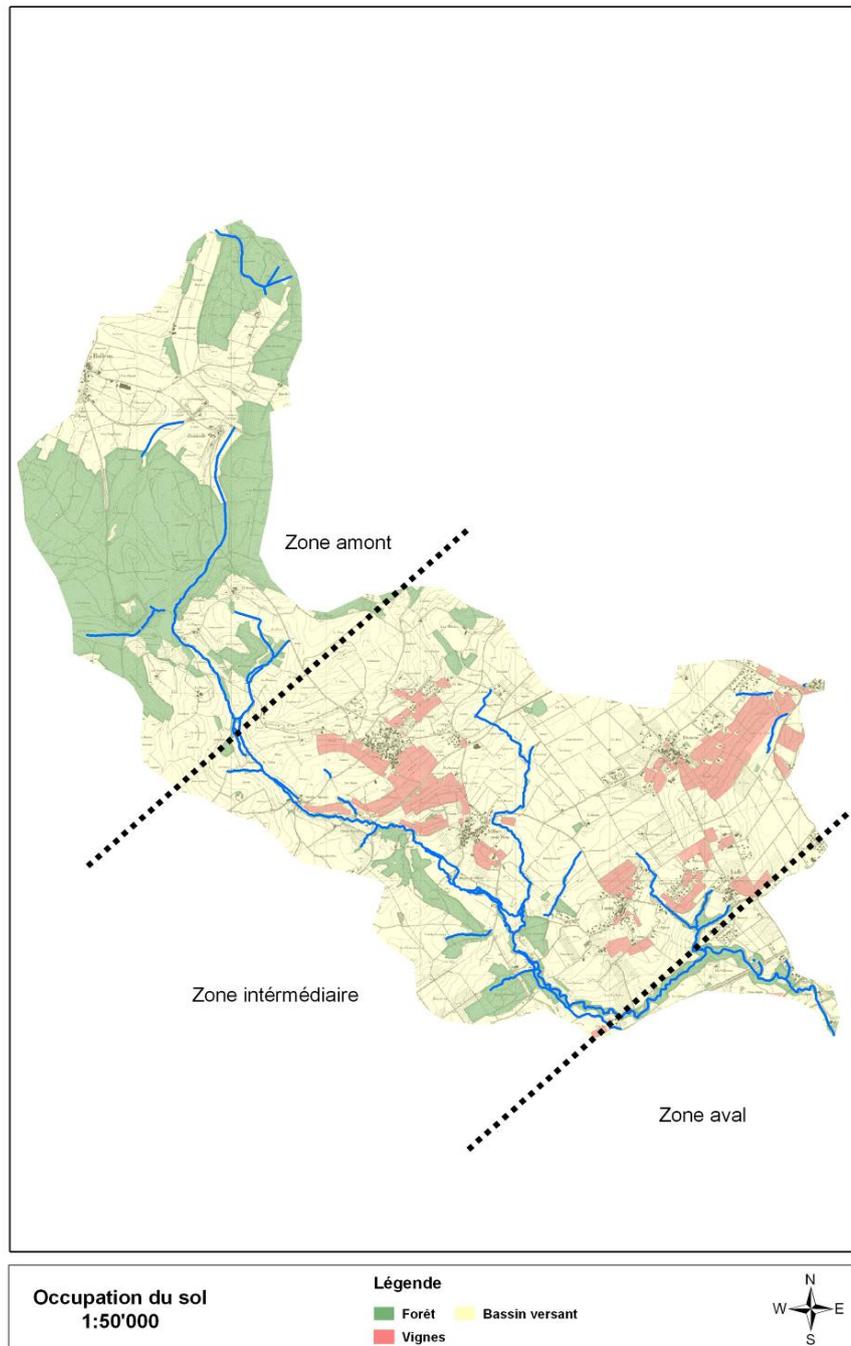


Figure 19 : Occupation du sol du bassin versant du Boiron

La source du Boiron résulte essentiellement de l'assainissement d'une ancienne zone marécageuse "*Grand Marais*", située sur la commune de Ballens (Figure 20). Une digue a été construite au début du siècle afin d'isoler la zone humide ; les eaux issues de la partie amont de cette retenue s'écoulent dans le Veyron, un affluent de la Venoge.



Figure 20: Source du Boiron sur la Commune de Ballens



La digue sépare de façon très marquée le bassin versant du Veyron, (milieu resté naturel), du bassin du Boiron, qui lui, a été fortement remanié en début de parcours (Figure 21). En effet, la zone humide a fait place aux cultures maraîchères, pratique rendue possible grâce à un important réseau de drainage qui constitue l'actuel cours principal amont du Boiron. Une large zone forestière a été implantée artificiellement en bordure de la zone cultivée, afin de puiser au maximum l'eau du sol.

Figure 21: Digue artificielle séparant les eaux du Veyron et du Boiron

Des sources secondaires à débit constant résurgent en trois principaux endroits, au lieu-dit "*Les Léchères*", sur la commune de Yens. Ces sources naissent sur un sol en pente et forment directement un petit cours d'eau. De nombreuses gravières se sont implantées dans ce périmètre, exploitant les zones de graviers aquifères (Figure 22). Certaines de ces sources sont la propriété de la Commune de St-Prex.



Figure 22: Zone des sources secondaires du Boiron sur la Commune de Yens

En-dessous de Froideville, le cours du Boiron est entièrement à ciel ouvert, quoique les berges soient endiguées pour permettre l'exploitation agricole. C'est ce site qui constitue le secteur test (voir Chapitre 2). La disparition des marais en amont est responsable - en partie du moins - du faible débit d'étiage en été. En effet, ces zones tampons assuraient un écoulement faible, mais régulier, même en saison sèche.

Autrefois, quatre moulins, utilisant la force hydraulique de l'eau, étaient employés pour la mouture des céréales, le travail du fer, ainsi que pour la production d'électricité locale. Ces bâtiments expliquent la présence des nombreux canaux de dérivation des eaux longeant le cours principal, dans la zone intermédiaire de la rivière. Le canal du Moulin de Lussy est affecté aujourd'hui à l'élevage piscicole d'alevins de truites. Le Bief de St-Prex est utilisé pour l'approvisionnement en eau de diverses exploitations agricoles et industrielles.

Suite à cette partie endiguée, le Boiron parcourt ensuite les bois de la Commune de Yens. C'est le secteur le plus sauvage de la rivière. La forêt constitue une très bonne zone tampon entre le cours d'eau lui-même et les activités humaines. En aval de Yens, la rivière devient plus large. Elle reste bordée d'un cordon boisé dont l'importance varie selon les secteurs. C'est entre Yens et Villars-sous-Yens que celui-ci est le plus étroit. Les berges sont presque entièrement naturelles à part quelques secteurs où des enrochements ont été mis en place pour lutter contre l'érosion. A la hauteur de Villars-sous-Yens, la step déverse ses eaux épurées dans la rivière. A Lully, le Boiron reçoit les effluents de sa seconde step. Le Boiron reçoit les eaux de plusieurs affluents : le Boironnet, le Nouriflon, l'Irence, le Blacon, le Pontet et le Blétru. L'Irence se jette dans le Boiron en aval de Villars-sous-Yens. Le Blacon, le Pontet et le Blétru se rejoignent pour former un affluent qui se jette dans le Boiron à Lully. A la hauteur du Moulin de Lussy se situe le seul point de prélèvement d'eau important de la rivière.



Un Bief, construit depuis fort longtemps, alimente en eau diverses exploitations agricoles et industrielles de la Commune de St-Prex.

Figure 23: Partie aval du Boiron de Morges en période d'étiage

3.2.2 Mesures de la température de l'eau

Un réseau de 16 enregistreurs (HOBO® Water Temp Pro v2 Data Logger, Onset) a été mis en place afin de mesurer l'évolution spatio-temporelle de la température de l'eau de la rivière (Figure 24, Tableau 2).

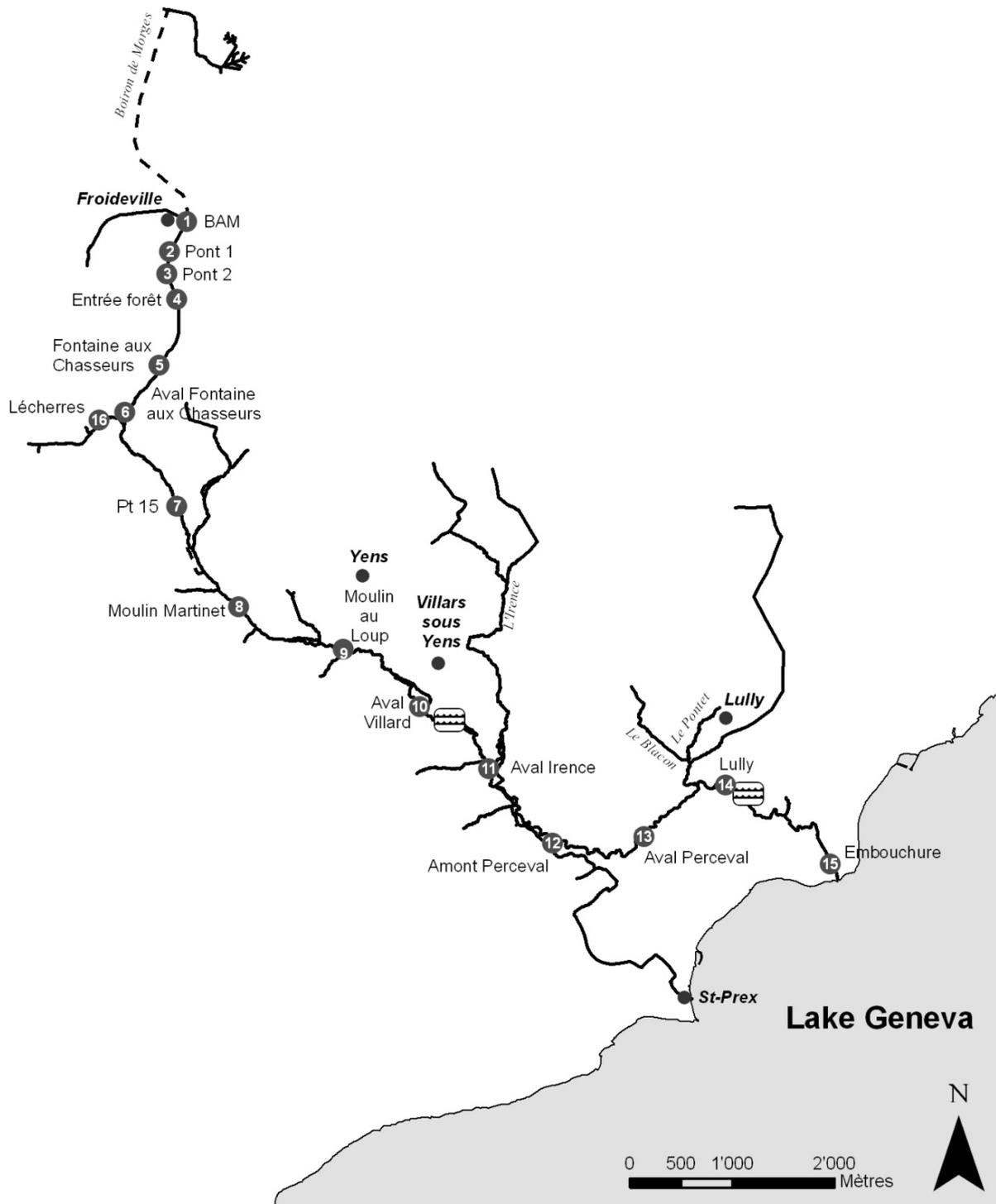


Figure 24: Carte du réseau d'enregistreurs de température de l'eau le long du Boiron de Morges

Les mesures de température ont été effectuées toutes les 10 minutes avec une précision de $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ à 25°C . Dans les portions calmes, les enregistreurs ont été lestés par une brique en béton. Par contre, dans les zones de courant, pour éviter d'être emportés par d'éventuelles crues, chaque enregistreur a été placé dans un tube en inox fixé à la berge (Figure 25) et ajouré de manière à laisser circuler l'eau à l'intérieur. L'enregistreur était maintenu dans le tube par un fil métallique de manière à se trouver à une profondeur correspondant au milieu du plan d'eau.



Figure 25: A gauche, tube de protection d'un enregistreur de température. A droite enregistreur lesté par une brique en béton

Tableau 2: Localisation des enregistreurs de température dans le Boiron de Morges

Station	Nom	Coordonnées	Distance à la station en amont (m)	Distance cumulée depuis la source (m)	Altitude (masl)	Date de première mise en service T°C eau	Date de première mise en service T°C air
1	BAM	520023 / 155807	0	0	663.3	25.09.2007	09.01.2009
2	Pont 1	519856 / 155514	339	339	662.8	25.09.2007	-
3	Pont 2	519833 / 155290	226	565	662.4	25.09.2007	-
4	Entrée forêt	519927 / 155039	268	833	662.2	25.09.2007	12.02.2009
5	F. aux Chasseurs	519756 / 154390	706	1539	660.1	25.09.2007	09.01.2009
6	Aval Fontaine	519418 / 153930	611	2150	641.1	27.11.2004	12.02.2009
7	Pt 15	519925 / 153007	1217	3367	580.6	08.04.2008	12.02.2009
8	Moulin Martinet	520528 / 152012	1265	4632	534.4	08.04.2008	15.06.2009
9	Moulin au Loup	521554 / 151594	1249	5881	484.0	08.04.2008	12.02.2009
10	Aval Villard	522297 / 151031	1242	7123	458.3	08.04.2008	12.02.2009
11	Aval Irence	522977 / 150418	1189	8312	439.7	08.04.2008	09.01.2009
12	Amont Perceval	523598 / 149687	1317	9629	419.9	08.04.2008	12.02.2009
13	Aval Perceval	524491 / 149751	1325	10954	405.7	08.04.2008	12.02.2009
14	Lully	525287 / 150256	1207	12161	389.6	27.11.2004	15.06.2009
15	Embouchure Lac	526310 / 149480	1739	13900	373.0	27.11.2004	12.02.1009
16	Lécherres	526373 / 149362	136	14036	371.9	-	-
		519171 / 153855	0	0	654.3	27.11.2004	12.02.2009

3.2.3 Concentration en oxygène



La concentration en oxygène (mg/l, % de saturation) a été mesurée toute les 30 minutes du 23 mai 2008 au 14 octobre 2008 (Figure 26). La station de mesure se trouvait à Lully au même emplacement que l'enregistreur de température n°14.

Figure 26: Station de mesure d'oxygène

3.2.4 Débits

Plusieurs affluents parviennent au Boiron : le Boironnet en aval de la station 7, l'Irence à la station 11. Le Blacon, le Pontet et le Blétru convergent pour ne former plus qu'un seul affluent qui se jette dans le Boiron à la station 14. En aval de la station 11, un canal de dérivation prélève des quantités importantes d'eau vers St-Prex. Le débit a été mesuré le 28 novembre 2008 sur divers points du profil en long mettant en évidence différents apports dans ou hors de la rivière (Figure 27).

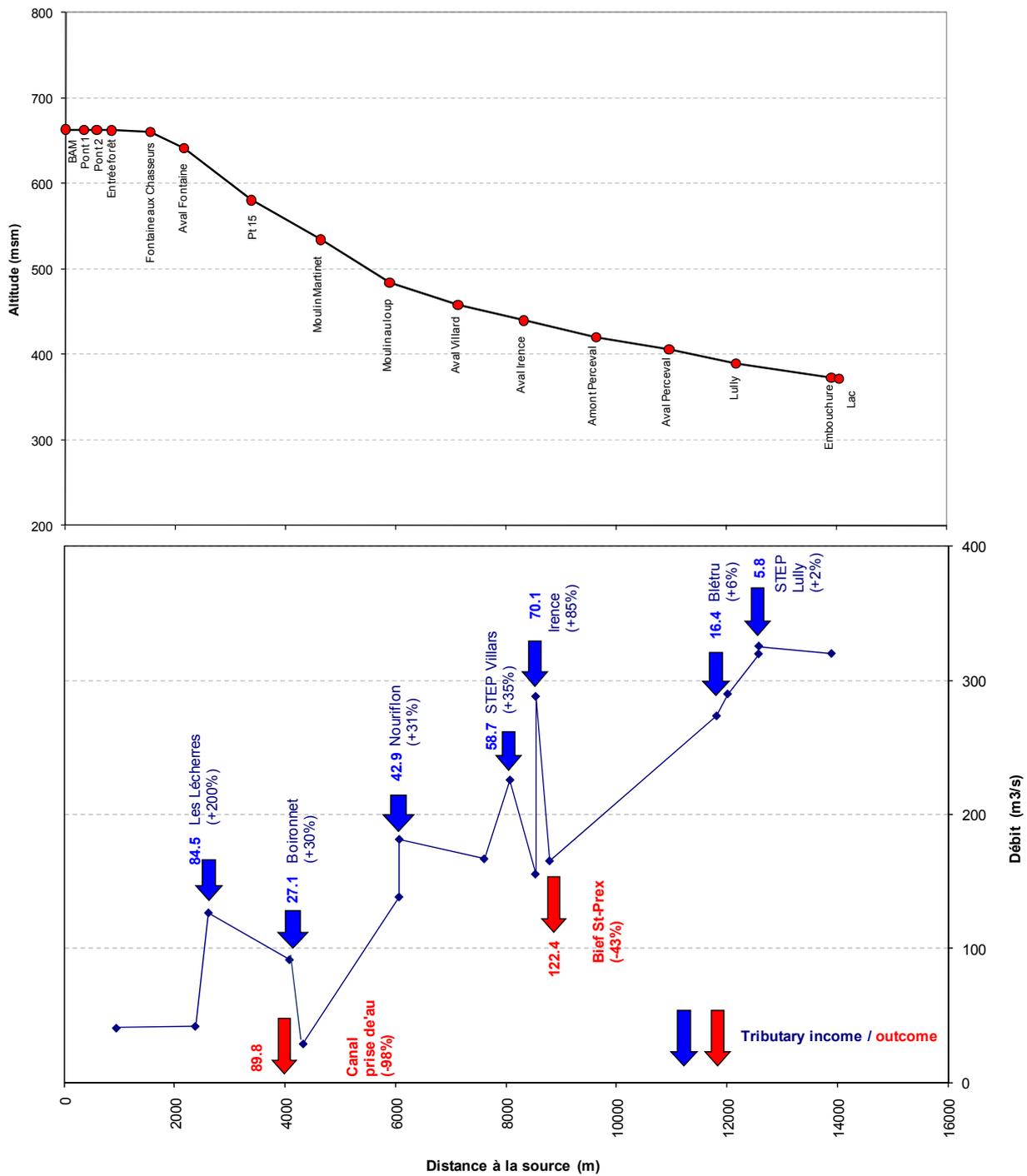


Figure 27: Profil longitudinal du Boiron et variation de débits mesurés le 28 nov. 2008.

3.2.5 Mesures de la température de l'air

Les données météorologiques provenant de la station de Météo suisse de Changins ont été utilisées. De plus, dès janvier 2009 pour améliorer la mesure locale des températures d'air, 14 stations ont été équipées d'enregistreurs (DS1922L/T iButtons®) (Figure 24, Tableau 2). Une mesure a été effectuée chaque heure du 9 février au 15 juin 2009 et toutes les deux heures du 15 juin au 24 novembre 2009, avec une précision de 0.125°C.

Par ailleurs pour mettre en évidence l'influence de la forêt sur la température de l'air, un dispositif expérimental a été mis en place sur le secteur-test du Boiron de Morges, au niveau de l'interface champ – forêt. Treize piquets en bois ont été plantés le long du cours du Boiron, espacés chacun de 5 m. Sur chaque piquet a été fixé un enregistreur de température, numéroté de 1 à 13 d'amont en aval (Figure 28). Le septième enregistreur était placé exactement à la lisière de la forêt. Les enregistreurs ainsi positionnés mesuraient la température toutes les 5 minutes. Le système a permis alors d'avoir en simultanément une valeur de température sur 30 m de part et d'autre de la lisière. Pour chaque enregistreur, la température maximale journalière a été retenue, du 11 au 25 septembre 2007, ce qui correspond aux journées les plus chaudes pendant la période de mesure.



Figure 28 : Dispositif mis en place le long du Boiron de Morges (a), avec enregistreur de température (b), pour estimer la large efficacité de cordon boisé

3.2.6 Scénarios climatiques

Au total 3 scénarios climatiques ont été appliqués, permettant ainsi d'estimer l'évolution de la température de l'eau en 2050. Les accroissements de température de l'air suivants ont été retenus : (scénario 1) +1.0°C, (scénario 2) +2.5°C, (scénario 3) +5.0°C (Frei, 2004; OCCC, 2004).

3.3 Résultats

3.3.1 Evolution de la température de l'eau de 2005 à 2009

Evolution générale

Pour 4 stations, n° 6, 14, 15 et 16, une chronique de 5 ans entre la température de l'eau et celle de l'air mesurée à la station météorologique de Changins est disponible (Figure 29)

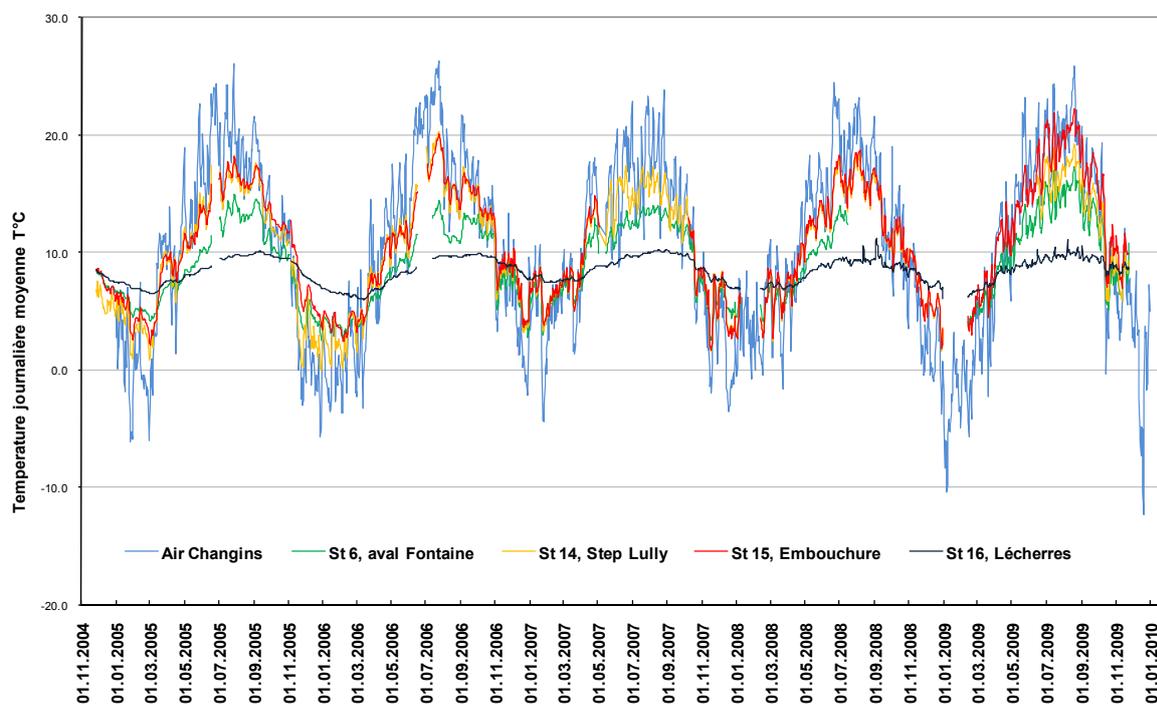


Figure 29: Evolution de la température moyenne journalière du Boiron et celle de l'air mesurée à la station météorologique de Changins entre 2004 et 2009.

L'amplitude des variations de température d'air est plus grande que celle de l'eau car : (1) la température de l'eau en hiver ne descend pas en dessous de 0°C, (2) en été, les processus d'évaporation de l'eau contrecarrent l'accroissement de la température de l'eau, (3) l'eau a une plus grande capacité calorifique que celle de l'air. La température de l'eau à la station 16 est plus stable dans le temps que les autres, parce qu'elle se trouve près d'une source et par conséquent est moins affectée par les variations de température de l'air.

La gamme annuelle de variation de température de l'eau augmente de l'amont vers l'aval et se rapproche de plus en plus de la température de l'air. La station 15 est une exception car elle se trouve parfois dans le remous du Léman et la température de l'eau de la rivière y est donc parfois tamponnée par celle du lac. Ainsi, c'est donc à la station 14 que l'on observe la plus grande variation de température (presque 20°C pendant l'année 2006 par exemple) comparé à la plus petite variation observée à la station 16 (seulement 4°C en 2006).

Phases annuelles de réchauffement ou de refroidissement de l'eau

Chaque année, on observe une phase de réchauffement (lorsque la température de l'air est supérieure à celle de la rivière à sa source) et une phase de refroidissement (qui est l'inverse) (Figure 30). Les inversions de phases se produisent généralement en mars-avril et en octobre-novembre. Au cours des 5 dernières années, les phases de réchauffement ont duré généralement 210 ± 23 jours et celles de refroidissement 156 ± 22 jours.

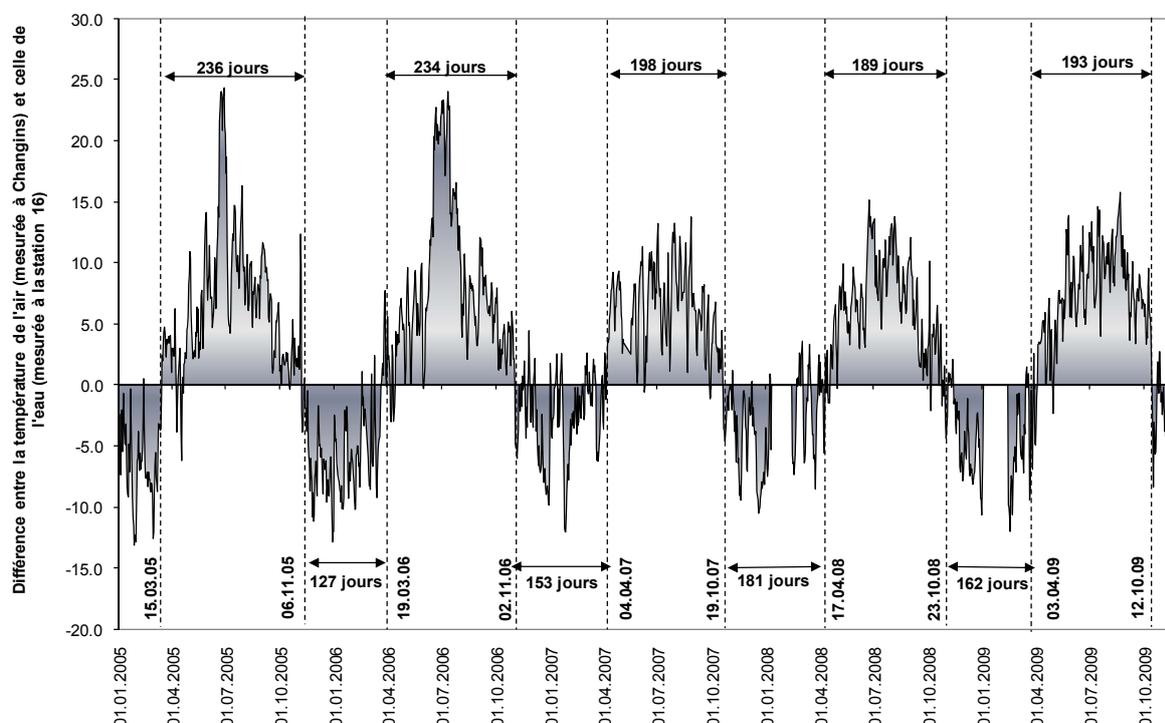


Figure 30: Phases de réchauffement, respectivement de refroidissement, dans le Boiron de Morges en fonction de la température de l'air mesurée à Changins et celle de l'eau mesurée à la station 16.

Amplitude de température journalière

Chaque mois, de 2005 à 2008, les maxima et minima journaliers des températures de l'eau et de l'air ont été déterminés et les amplitudes de température compilées (Tableau 3).

Tableau 3: Moyenne mensuelle de l'amplitude de température journalière pour l'air et l'eau (Amplitude thermique de l'eau « ATE ») de 2005 à 2008

Mois	ΔT air Changins				ΔT eau station 6 Station amont				ΔT eau station 14 Station aval				ΔT eau station 15 Station embouchure				ΔT eau station 16 Source secondaire			
	2005	2006	2007	2008	2005	2006	2007	2008	2005	2006	2007	2008	2005	2006	2007	2008	2005	2006	2007	2008
1	6.63	4.61	6.30	6.66	0.13	0.26	1.41	0.64	0.85	1.10	1.25	0.94	0.40	0.24	0.86	0.92	0.03	0.02	0.06	0.10
2	5.88	5.87	7.15	8.28	0.10	0.22	1.57	1.55	0.95	1.37	1.47	2.12	0.35	0.28	1.09	1.87	0.03	0.04	0.03	0.08
3	9.19	7.54	8.82	6.94	0.13	0.31	2.86	1.19	1.80	2.28	2.70	2.33	0.52	0.57	2.53	2.19	0.04	0.05	0.04	0.09
4	8.39	9.68	12.84	7.99	0.15	0.39	3.92	0.76	2.15	3.17	4.49	2.76	0.55	1.16	3.57	2.77	0.04	0.05	0.05	0.09
5	10.22	9.58	10.12	9.98	0.15	0.42	0.81	0.94	2.01	2.33	2.81	2.53	0.43	0.74	2.11	2.37	0.03	0.04	0.05	0.13
6	11.42	11.92	9.65	9.32	0.16	0.60	0.36	0.71	2.01	3.47	2.58	2.50	0.37	0.76	-	2.12	0.03	0.04	0.04	0.21
7	11.38	12.07	9.81	11.19	0.37	0.33	0.41	0.84	1.08	3.00	2.30	2.88	0.42	0.68	-	2.19	0.03	0.02	0.03	0.40
8	9.85	8.56	9.45	10.33	0.28	0.24	0.31	-	0.69	2.25	2.00	2.24	0.23	0.63	-	1.67	0.01	0.02	0.03	0.67
9	9.38	8.65	9.28	8.01	0.35	0.27	0.28	-	0.56	1.72	1.75	1.42	0.22	0.40	-	1.29	0.02	0.02	0.04	0.70
10	7.76	7.52	6.65	7.22	0.45	0.28	0.78	-	0.40	1.20	1.16	1.25	0.14	0.38	0.99	1.16	0.02	0.03	0.11	0.46
11	6.38	7.43	5.98	5.82	0.46	1.51	1.15	-	1.03	1.51	1.36	1.18	0.28	1.03	1.18	1.10	0.05	0.06	0.12	0.47
12	4.68	5.43	4.66	4.69	0.31	1.16	0.85	-	1.17	1.11	0.91	1.01	0.24	0.86	0.83	0.81	0.04	0.06	0.10	0.46

La plus grande amplitude est généralement observée au printemps et en été pour toutes les stations, tant pour l'air que pour l'eau. Les plus faibles valeurs sont observées à la station 16 avec une amplitude de température de l'eau maximale de 0.7°C seulement sur 4 ans, car cette station est située près d'une source. Plus bas, l'amplitude augmente, avec la valeur la plus grande observée à la station 14 avec une variation de 4.5°C mesurée en avril 2007. Les variations journalières sont généralement plus faibles à la station 15 qu'à la 14, même si elle se trouve plus en aval, ceci à cause de l'effet tampon des eaux du Léman qui parfois refluent à cet endroit.

3.3.2 Evolution de la température de l'eau le long de la rivière

Situation aux sources

A la station 1, l'eau provient d'un système de drainage d'anciens marais, considéré comme la source principale du Boiron. A la station 16, l'eau jaillit du sol sous la forme d'une source. Cette différence dans l'origine des sources induit un régime thermique différent pour ces deux points (Figure 31). A titre d'exemple durant l'année 2008, à la station 16, la température de l'eau était nettement plus stable qu'à la station 1, jusqu'à 0.5°C plus douce en hiver et jusqu'à 4°C plus fraîche durant le reste de l'année. Par ailleurs, l'influence de la température de l'air était nettement plus importante à la station 1 par comparaison avec la station 16, ceci probablement du fait qu'à la station 1, l'eau courait juste sous la surface du sol dans un réseau de canalisation durant plusieurs km, alors qu'à la station 16, l'eau provenait directement de failles profondes du sol.

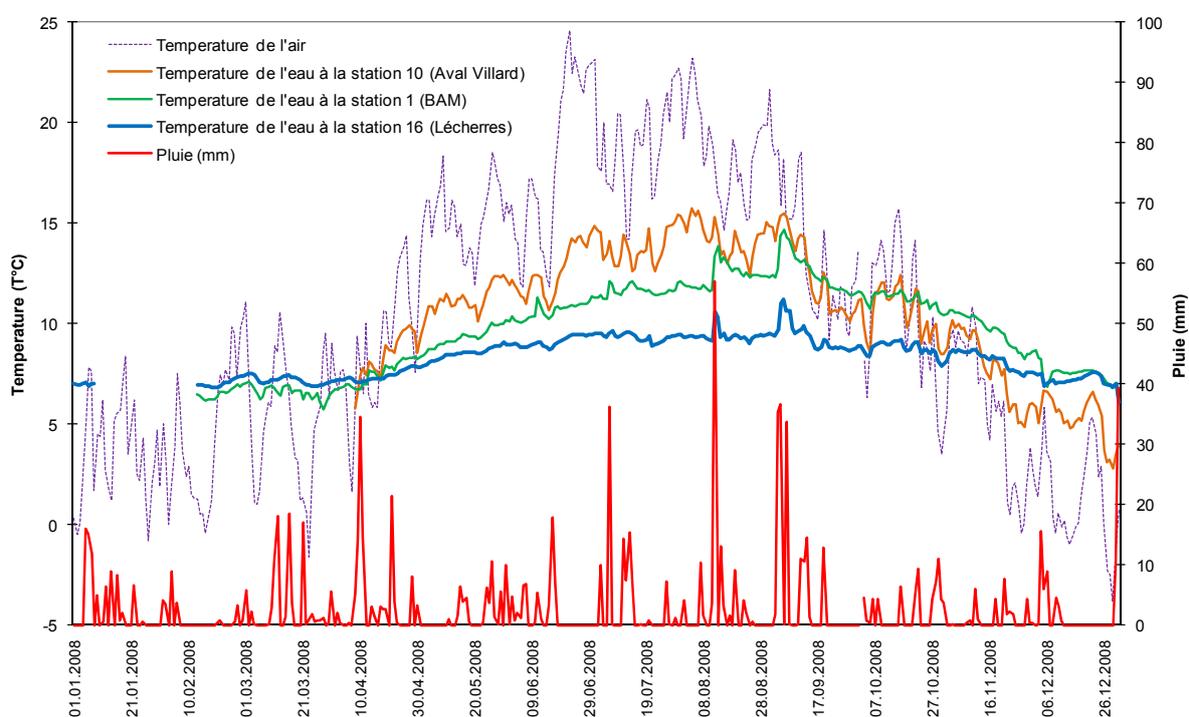


Figure 31: Influence des pluies sur la température des sources du Boiron

Effet de la pluie

L'influence de la pluie sur la température de l'eau de la rivière dépend d'une part de la quantité de précipitation et d'autre part de la différence de température entre l'air et l'eau au moment de la pluie. Pour les deux sources du Boiron (stations 1 and 16), deux accroissements significatifs de leur température furent observés en 2008, le 12 août et le 4 septembre, correspondant à chaque reprise avec d'abondantes chutes de pluie (56.9 et 36.6 mm) durant des jours chauds (température moyenne de l'air 17.7 et 15.9°C). L'influence de ces apports d'eau chaude fut observée jusqu'à 7 km en aval des sources. D'autres importantes chutes de pluie furent observées en 2008, mais à des températures de l'air plus basse (de février à mai), avec donc une influence négligeable sur la température des sources du Boiron.

Evolution d'amont en aval

Parce que la température de l'eau à un point donné dépend à la fois des conditions locales et des conditions en amont, l'accroissement de température de l'eau a été calculé pour chaque section comme la différence de température observée entre ce point et celui directement à l'amont. Cette valeur a ensuite été divisée par la distance du secteur en question de manière à obtenir un accroissement par km linéaire (Figure 32). Les données pour la station 6 ne sont pas disponibles pour la première moitié de 2008. Nous avons utilisé les données de 2008 du 4 avril au 22 octobre (correspondant à la phase de réchauffement de la rivière) et du 23 octobre au 31 décembre (correspondant à la phase de refroidissement). Nous avons utilisé une période de 2 mois pour chaque phase (juillet et août, respectivement novembre et décembre), de manière à tenir compte des variations maximales de température journalière.

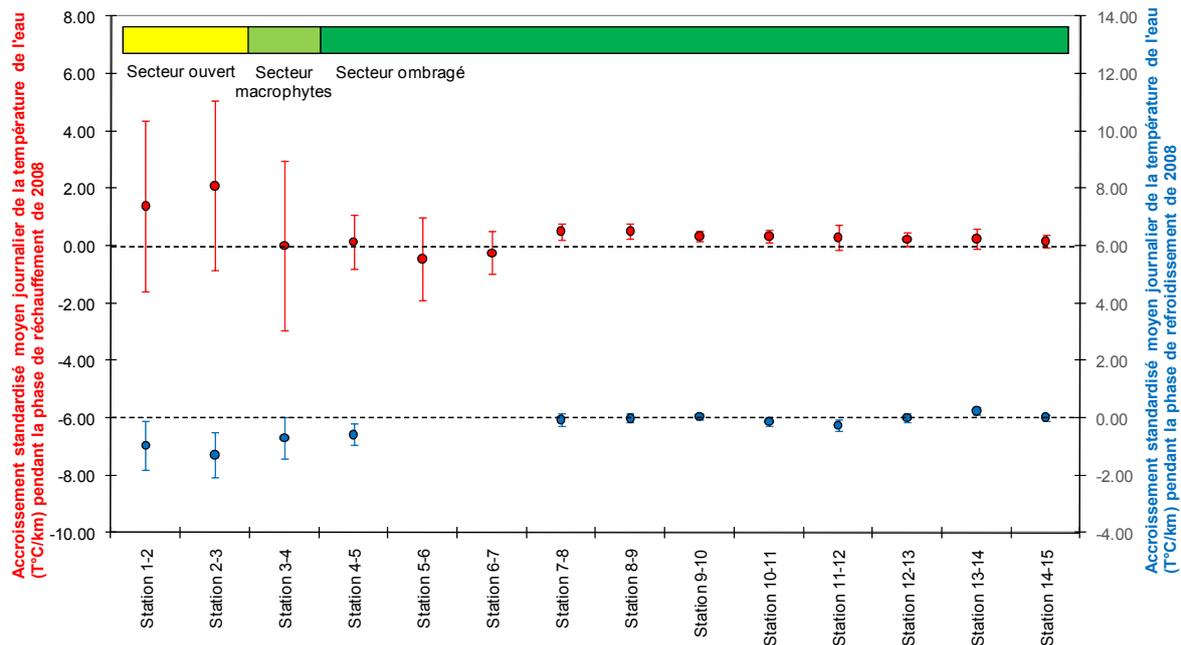


Figure 32: Accroissement de température de l'eau normalisé par km, pour les périodes de juillet-août et novembre-décembre 2008 (moyenne \pm écart-type)

L'accroissement de température est plus important dans la partie haute, ouverte, de la rivière (station 1 à 4) pendant les mois de juillet-août 2008 (moyenne : $1.03 \pm 0.87^{\circ}\text{C}/\text{km}$) comparé à la situation plu en aval, dans les secteurs ombragés (station 7 à 15) (moyenne : $0.46 \pm 0.13^{\circ}\text{C}/\text{km}$).

C'est également en amont que le refroidissement est le plus important en novembre-décembre (moyenne : -0.75 ± 0.43 °C/km) par comparaison avec l'aval (moyenne : 0.03 ± 0.08 °C/km). La variation de l'accroissement (mesuré par l'écart-type) est également plus importante dans les secteurs ouverts à l'amont que dans les secteurs aval ombragés.

Dans la partie amont (station 1 à 4), tant pendant la phase de réchauffement que de refroidissement, l'accroissement de température est moins important pour les stations 3 et 4 (1.25 ± 3.91 °C/km), même si la rivière coule en secteur ouvert. La présence de macrophytes, *Sparganium neglectum*, dans le lit de la rivière pourrait expliquer ce phénomène. Ces plantes apportent localement de l'ombre et peuvent également refroidir l'eau par évapotranspiration.

Production de vagues chaudes

Le 1^{er} juillet fut le jour le plus chaud de l'année 2008. Cette période fut sélectionnée à titre d'exemple pour visualiser les variations de température de l'eau au cours d'une journée, le long d'un secteur ouvert, respectivement ombragé, dans la partie amont de la rivière (Figure 33).

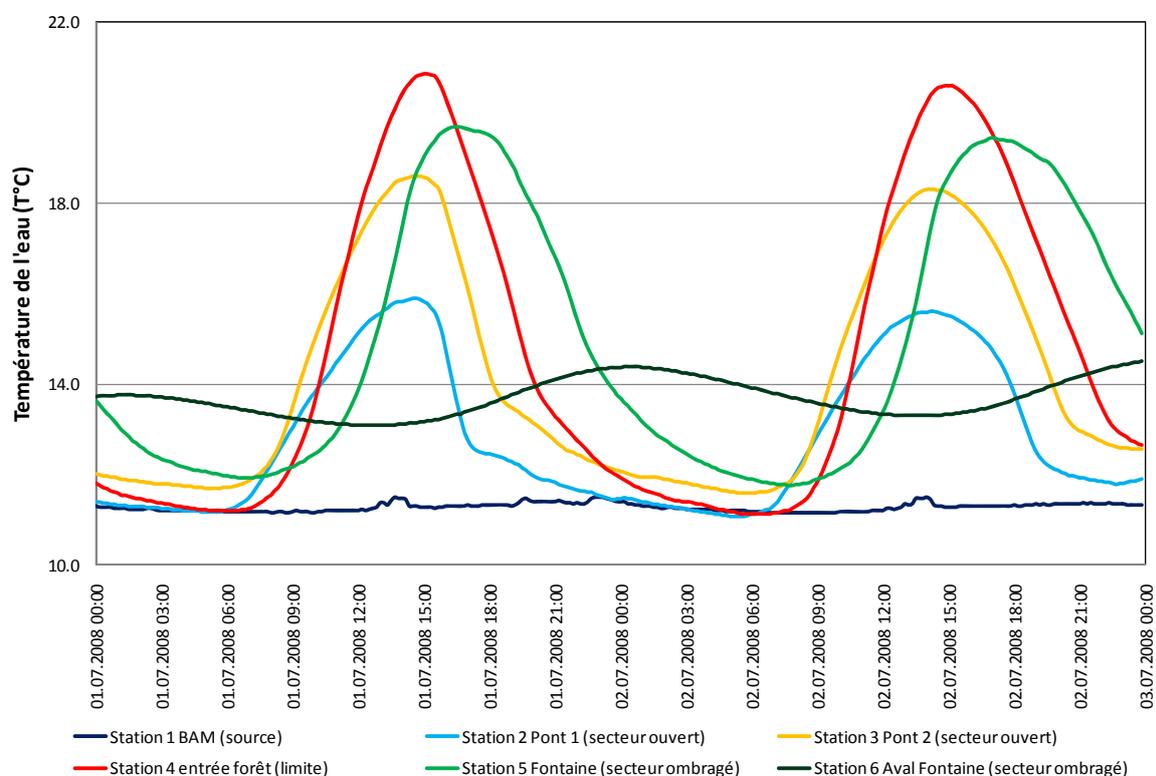


Figure 33: Production d'une vague chaude dans la partie amont du Boiron le 1^{er} juillet 2008 et le jour suivant.

A la station 1, là où la rivière coule à l'air libre pour la première fois, sa température est restée stable tout au long de la journée, avec une moyenne de 11.3 ± 0.1 °C. Le réchauffement solaire était insignifiant à cet endroit. Pour contre, pour les cinq stations plus en aval, le processus similaire suivant était observé : Une période de réchauffement, depuis tôt le matin (entre 6h00 et 8h00) jusqu'à midi. A ce moment là, la température de l'eau était maximale. S'en suivait immédiatement, une phase de refroidissement, tout d'abord rapide avec le coucher du soleil, suivie d'une plus lente pendant la nuit jusqu'à l'aube suivante. Pour chaque station, les différences majeures résidaient essentiellement (1) dans le moment auquel la rivière atteignait son maximum de température et (2) dans la valeur absolue de ce maximum.

Maxima de température journalier.

En 2008, août fut le mois le plus chaud. Pour chaque station, ont été définis une température d'eau maximale journalière « TEMJ », ainsi qu'une heure « H » à laquelle ce maximum était atteint. Ensuite les valeurs moyennes de TEMJ et H ont été compilées pour tout le mois (Tableau 4).

Tableau 4: Température maximale et période en août 2008

Station				Température maximale de l'eau					Horaire					
Type	Distance à la station sup. m	Nom de la station	N°	Max journalier		Différence à la station sup. °C	Sign stat	Accroissement °C / km	Heure à T° max		Différence par rapport à la st. sup. hh:mm	Sign stat	Vitesse de la vague m / min	
				Mean	St. dev				Mean	St. dev				
Source	0	BAM	1	13.0	1.1	-	-	-	11:34	08:34	-	-	-	
Ouvert	339	Pont 1	2	15.6	1.0	2.6	**	7.7	15:05	01:26	+	03:31	ns	1.61
	226	Pont 2	3	16.3	1.2	0.7	*	3.1	16:22	02:01	+	01:17	**	2.94
	268	Entrée	4	16.5	1.3	0.2	ns	0.7	17:50	01:04	+	01:28	**	3.05
Forêt	706	Amont Font	5	15.7	1.0	-0.8	*	-1.1	22:29	02:15	+	04:39	**	2.53
	611	Aval Font	6	15.3	1.0	-0.4	ns	-0.7	19:10	04:14	-	03:19	**	-
Source		Lécherres	16	9.8	0.7	-	**	-	16:56	03:26	-	-	*	-
Forêt	1217	Pt 15	7	12.5	0.6	-2.8	**	-2.3	18:45	03:44	-	00:25	ns	-
	1265	M. Martinet	8	13.6	0.7	1.1	**	0.9	18:43	02:24	-	00:02	ns	-
	1249	M. au loup	9	14.6	1.0	1.0	**	0.8	19:32	02:57	+	00:49	ns	-
	1242	Aval Villars	10	15.3	1.0	0.7	*	0.6	19:55	02:31	+	00:23	ns	-
Affluent		Irence		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Forêt	1189	Aval Irence	11	15.7	1.0	0.4	ns	0.3	19:33	02:50	-	00:22	ns	-
Effluent		Bief		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Forêt	1317	Amont Perceval	12	16.7	1.3	1.0	**	0.8	16:20	03:10	-	03:13	**	-
	1325	Aval Perceval	13	17.5	1.7	0.8	ns	0.6	17:10	02:46	+	00:50	ns	-
Affluent		Blacon/Pontet/Bletru		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Forêt	1207	Lully	14	17.4	1.3	-0.1	ns	-0.1	18:36	01:50	+	01:26	*	-
	1739	Embouchure	15	17.3	1.3	-0.1	ns	-0.1	20:39	02:21	+	02:03	**	-

Signification statistique : ns = T-Test $P > 0.05$; * = T-Test $P < 0.05$; ** = T-Test $P < 0.01$

Dans la partie ouverte de la rivière, avant qu'elle n'entre dans la forêt, On peut clairement observer la production de vagues chaudes avec un accroissement de TEMJ de $13.0 \pm 1.1^\circ\text{C}$ à la station 1 à $16.5 \pm 1.3^\circ\text{C}$ à la station 4. L'accroissement de température était particulièrement important entre les stations 1 et 2 ($7.7^\circ\text{C}/\text{km}$), pour ensuite diminuer régulièrement ($0.7^\circ\text{C}/\text{km}$) entre les stations 3 et 4. L'heure à laquelle les maxima étaient atteints était également différée d'une station à l'autre pour couvrir pratiquement tout l'après-midi, de $11:34 \pm 08:34$ à la station 1 à $17:50 \pm 01:04$ à la station 4. La vitesse de propagation de la vague augmentait également le long de cette portion de rivière avec une vitesse de 1.6 m/min à la station 2 à 3.05 m/min à la station 4 (Tableau 4).

Quand le cours d'eau atteint la forêt, à l'aval de la station 4, TEMJ diminue immédiatement avec une valeur de $15.7 \pm 1.0^\circ\text{C}$ observée à la station 5 et de $15.3 \pm 1.0^\circ\text{C}$ à la station 6, c'est-à-dire une réduction respectivement de 1.1 à $0.7^\circ\text{C}/\text{km}$, ce qui démontre l'effet tampon de la forêt. H est aussi retardé avec une valeur de $22:29 \pm 02:15$ observée à la station 5. A cette station, la vague chaude est encore visible mais se déplace beaucoup plus lentement qu'avant, à seulement 2.53 m/min. A la station 6, la vague chaude n'est plus discernable. Les 1317 m de forêt semblent donc suffire largement pour tamponner la vague chaude produite le long des premiers 833 m du secteur ouvert.

Entre les stations 6 et 7, le cours d'eau reçoit de l'eau froide (TEMJ: $9.8 \pm 0.7^\circ\text{C}$) d'une source secondaire (Lécherres, station 16). En conséquence, TEMJ est la plus basse de la rivière à la station 7 ($12.5 \pm 0.6^\circ\text{C}$) avec une diminution significative de 2.8°C par rapport à la station du dessus. Ensuite plus à l'aval jusqu'à la station 10, TEMJ augmente légèrement de station en station avec une augmentation significative de 0.9 à $0.6^\circ\text{C}/\text{km}$ respectivement. Mais

contrairement aux observations à l'amont, les maxima apparaissent simultanément dans toutes les stations 7 à 10 avec des différences non significatives (Tableau 4). En conséquence, dans la forêt, on n'observe aucune formation de vague chaude.

Entre les stations 10 et 11, le cours d'eau reçoit de l'eau d'un affluent, l'Irence. Sa température n'est pas connue car le ruisseau n'est pas équipé d'un enregistreur de température. Néanmoins l'analyse a montré qu'il n'avait aucune influence sur la température du cours d'eau puisque la situation à la station 11, à l'aval de la confluence, n'est pas significativement différente de l'amont que ce soit pour TEMJ ou H.

Entre les stations 11 et 12, une grande quantité d'eau est prélevée du cours d'eau, par le Bief, pour l'agriculture (Figure 27). Cette réduction du courant a un grand impact sur la température de l'eau, d'une part en provoquant une hausse de TEMJ à la station 12 (16.7 ± 1.3 °C) comparé à la station 11 (15.7 ± 1.0 °C) et d'autre part en provoquant une modification de H ($16:20 \pm 03:10$ contre $19:33 \pm 02:50$). Le prélèvement de cette quantité d'eau peut avoir des impacts considérables sur le régime de la température d'un cours d'eau en réduisant le débit, et donc permettant une plus grande influence de la température de l'air. A l'aval, à la station 13, la situation est stabilisée et aucune différence de TEMJ ou H n'est observée.

Entre les stations 13 et 14, le cours d'eau reçoit un apport de trois affluents. Comme pour l'Irence, cette entrée d'eau ne semble avoir aucun impact sur le régime de température comme aucune différence significative n'a été observée à l'aval de la station 14.

Finalement pour les stations 14 et 15, la situation est stabilisée. TEMJ n'est pas significativement différente d'une station à l'autre. La seule différence observée est pour H qui est retardée, mais cela pourrait être dû à l'entrée de l'eau du lac par l'embouchure très proche.

3.3.3 Effet de la végétation riveraine sur la température de l'air

La journée du 14 septembre 2007 est utilisée comme un exemple de journée chaude et ensoleillée. Le placement des enregistreurs de température de l'air tous les 5 m, a permis d'observer l'évolution de la température de l'air au cours du temps dans la forêt et dans les endroits découverts (Figure 34). Dans la forêt, la température de l'air paraît très stable au cours de la journée, avec une variation maximale journalière de seulement 9.0°C sur les 30 m mesurés, comparé à la situation dans le secteur découvert, avec une variation de 22.7°C. Comparé au secteur ouvert, dans la forêt, l'air est plus frais pendant la journée, et plus chaud pendant la nuit. L'inertie thermique du système forestier permet d'accumuler de l'énergie pendant la journée et de le restituer pendant la nuit. Au cours de la partie chaude de la journée, la température de l'air diminue très rapidement déjà après 10 m dans la forêt (dû à l'ombrage des arbres).

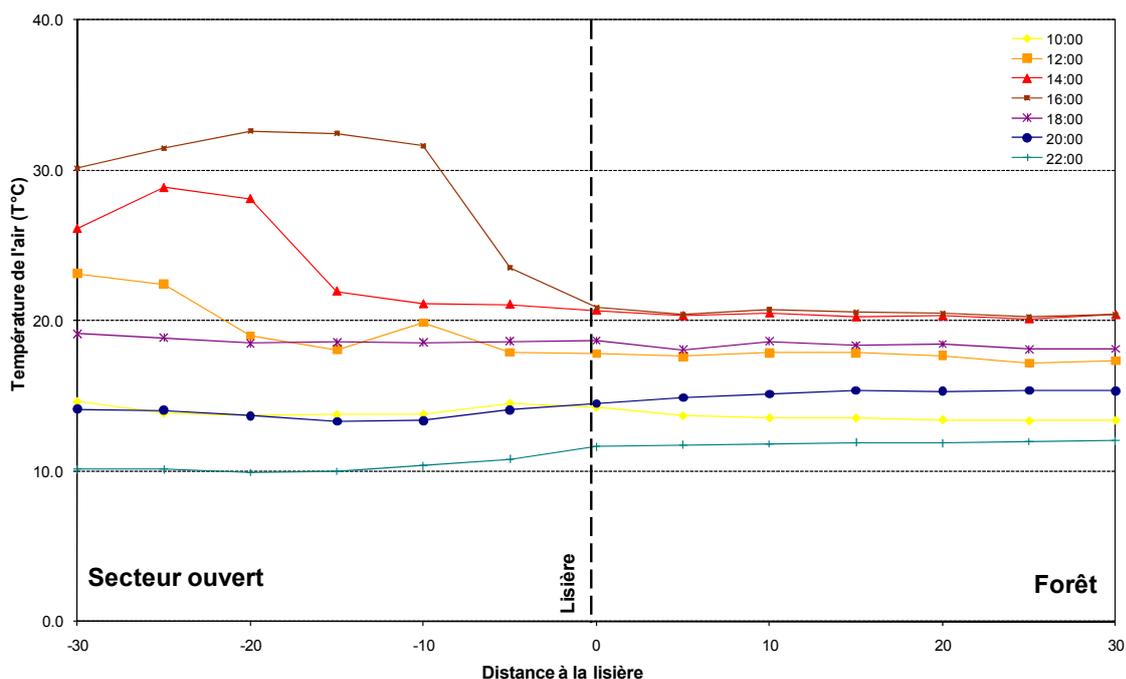


Figure 34: Profils de température de l'air enregistré le long du Boiron de Morges à différentes heures du 14 septembre 2007

3.3.4 Corrélation entre température de l'air et de l'eau

Type de corrélation

Pour toutes les stations, des régressions linéaires entre la température moyenne journalière de l'eau (mesurée par des enregistreurs) et de l'air (mesurée par la station météo de Changins) ont été calculées en utilisant toutes les données à disposition. De plus, une régression sigmoïde de Boltzmann a été appliquée sur les mêmes données afin de comparer la robustesse des deux modèles (Test de Fisher). A cause de leurs différents régimes thermiques, le cours d'eau a été divisé en deux parties principales : amont (station 1 à 6) et aval (station 7 à 15). Une gamme de valeurs de R^2 plus élevées a été obtenue pour le modèle sigmoïde, comparé au modèle linéaire. Cette corrélation est statistiquement très significative pour les stations 13 et 15 (Test de Fisher). Concernant les stations 11 et 12, les deux modèles montrent un R^2 élevé, de plus de 0.9, et aucune différence statistique n'a pu être mise en évidence. Ces résultats indiquent une meilleure fiabilité du modèle sigmoïde pour la description des relations air-eau.

Conséquences de l'impact d'une hausse de température le long du cours d'eau

Pour les deux parties du cours d'eau, plus la station est en aval, plus la pente de la régression est forte. La pente de la régression augmente de 0.307 à la station 7 à 0.631 à la station 14. Ceci est dû au fait que chaque station reçoit de l'eau de la section amont et que durant le trajet de l'eau entre ces deux points, le cours d'eau reçoit (réchauffement) ou perd (refroidissement) de l'énergie. Une pente plus forte signifie que pendant l'été, pour une même température de l'air, l'eau est donc plus chaude à l'aval. Dans le contexte du changement climatique, cela veut dire aussi que l'impact d'une augmentation de température va être plus grand pour les stations aval. Par exemple, le scénario d'une hausse de 5°C en 2050, causerait, selon le modèle linéaire, une augmentation de 1.5°C à la station 7 et de 3.2°C à la station 14, c'est-à-dire 2 fois l'impact mesuré à l'amont. Le même scénario utilisant le modèle sigmoïde montre une augmentation moindre mais un impact trois fois supérieur à l'aval : 0.7°C à la station 7 et 2.0 à la station 14. A la station 15, la pente pour les deux modèles est plus faible dû au mélange avec l'eau du lac.

Tableau 5: Corrélation entre les moyennes journalières des températures de l'air et de l'eau, et prévisions des augmentations dans le contexte du réchauffement

Station	Linear Model			Boltzmann sigmoidal Model					Fisher-test p-value	Daily water increment with linear model			Daily water increment with Boltzmann sigmoidal model, based on the mean temperature of July 2008 (19.05°C)		
	Slope	Origin	R ²	Slope	Bottom	Top	V50	R ²		Optimist scenario (+1°C)	Medium scenario (+2.5°C)	Pessimist scenario (+5°C)	Optimist scenario (+1°C)	Medium scenario (+2.5°C)	Pessimist scenario (+5°C)
1	0.225	7.366	0.504	2.577	7.301	11.600	9.049	0.539	<0.001	0.2	0.6	1.1	0.0	0.1	0.1
2	0.285	6.894	0.637	3.971	6.610	13.000	10.200	0.654	<0.001	0.3	0.7	1.4	0.1	0.3	0.4
3	0.329	6.643	0.789	4.471	6.123	13.990	10.370	0.804	<0.001	0.3	0.8	1.6	0.2	0.4	0.6
4	0.367	6.042	0.781	4.706	5.557	14.630	11.130	0.795	<0.001	0.4	0.9	1.8	0.2	0.5	0.9
5	0.436	5.081	0.847	5.251	4.136	15.670	11.100	0.858	<0.001	0.4	1.1	2.2	0.3	0.7	1.2
6	0.408	4.537	0.813	4.356	3.729	13.620	10.270	0.832	<0.001	0.4	1.0	2.0	0.2	0.5	0.8
7	0.307	5.794	0.886	7.856	1.084	13.240	4.781	0.905	<0.001	0.3	0.8	1.5	0.2	0.4	0.7
8	0.365	5.496	0.871	8.281	-0.141	14.670	5.087	0.886	<0.001	0.4	0.9	1.8	0.2	0.5	1.0
9	0.413	5.295	0.878	8.613	-0.770	16.080	5.833	0.889	<0.001	0.4	1.0	2.1	0.3	0.6	1.2
10	0.445	5.224	0.882	9.172	-1.510	17.340	6.134	0.890	<0.001	0.4	1.1	2.2	0.3	0.7	1.4
11	0.490	4.907	0.891	9.732	-2.828	18.790	6.340	0.898	<0.001	0.5	1.2	2.5	0.4	0.9	1.6
12	0.551	4.327	0.907	10.730	-3.428	21.980	8.990	0.909	0.083	0.6	1.4	2.8	0.5	1.1	2.1
13	0.576	4.216	0.909	15.910	-9.891	28.110	8.499	0.910	0.482	0.6	1.4	2.9	0.5	1.3	2.5
14	0.631	3.590	0.910	7.710	-1.666	20.530	9.254	0.915	<0.001	0.6	1.6	3.2	0.5	1.1	2.0
15	0.584	4.320	0.879	5.895	2.304	19.420	11.310	0.890	<0.001	0.6	1.5	2.9	0.5	1.1	1.9

3.3.5 Conséquences sur la concentration de l'oxygène dans l'eau

A la station 14, la concentration d'oxygène dissous a aussi été mesurée pendant l'année 2008. Pour le mois le plus chaud, août, la concentration minimale journalière d'oxygène « MINO2 » dissous en fonction du temps a été mesurée. Ces résultats ont ensuite été compilés avec les températures maximales « TEMJ » (Figure 35).

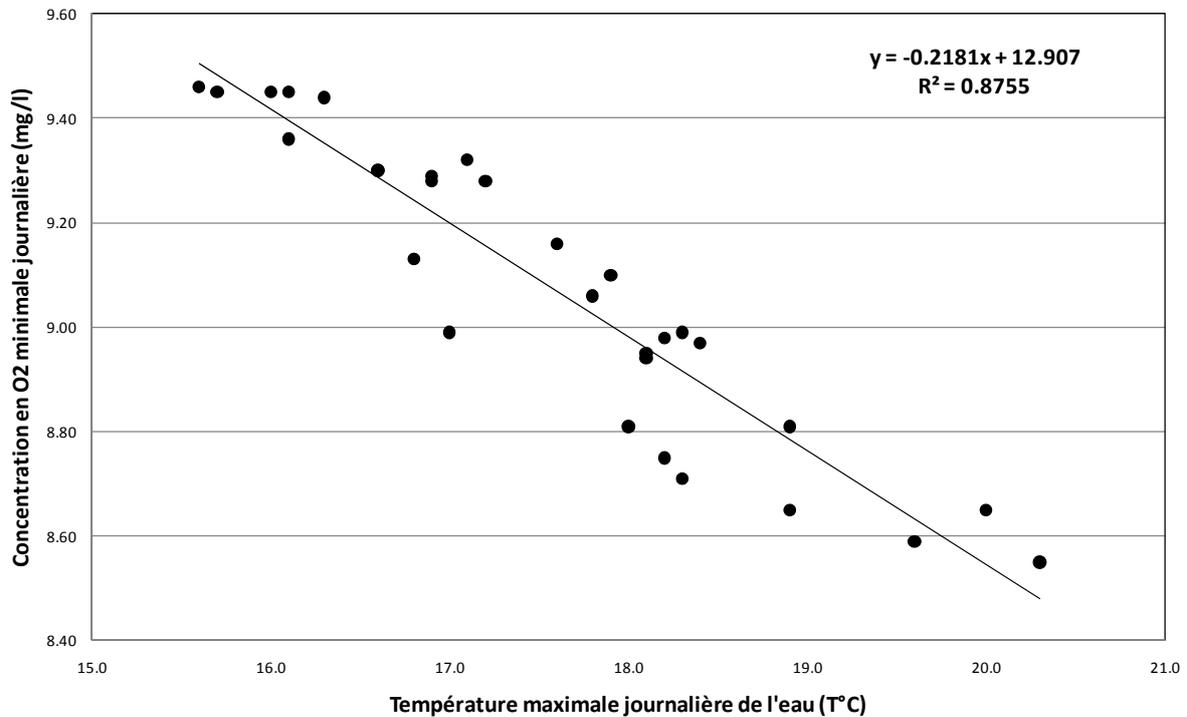


Figure 35: Corrélation entre la température journalière maximum (TEMJ) et la concentration journalière minimum d'oxygène dissous (MINO2) mesurée en août 2008 à la station 14 du Boiron de Morges.

Il y existe une corrélation significative entre MINO2 et TEMJ, la concentration d'oxygène diminuant avec l'augmentation de la température. Durant la période étudiée, les valeurs maximales de la température de l'eau ont été observées à 17:33 ± 01:55, alors que les valeurs minimales d'oxygène dissous apparaissent avec un retard d'environ 4 heures à 21:10 ± 02:10.

Il a été démontré plus haut que les portions ouvertes d'un cours d'eau produisent des vagues chaudes qui s'écoulent le long de la rivière à une certaine vitesse. Ces vagues atteignent les parties aval du cours d'eau tard dans la journée et voir même en soirée, soit à un moment de la journée où l'oxygène ne peut plus être produit par la photosynthèse, mais au contraire consommé par la respiration. Par ailleurs, la diminution de la concentration d'oxygène est proportionnelle à l'augmentation de la température de l'eau (Figure 35). Par conséquent, plus la portion ouverte (sans protection de la forêt) d'un cours d'eau est grande, plus il y a de risques d'observer une concentration critique en oxygène à l'aval de celui-ci, avec potentiellement un impact important sur la faune aquatique.

Tableau 6: Estimation de la concentration d'oxygène observée à la station 14 selon le scénario climatique

Type de scénario pour 2050	Augmentation de la température de l'air (modèle linéaire) T°C	Estimation de l'augmentation de la température de l'eau T°C	Baisse de la concentration de l'O2 dissous à midi mg/l	Baisse de la concentration de l'O2 dissous à minuit mg/l
optimiste	1.0	0.6	-0.1	-0.1
moyen	2.5	1.6	-0.2	-0.3
pessimiste	5.0	3.2	-0.4	-0.7

L'application des différents scénarios climatiques montrent qu'à minuit une baisse de 0.1 à 0.7 mg/l pourrait être observée à la station 14. Par conséquent, pour les cours d'eau où la concentration d'O₂ est aujourd'hui déjà critique, une augmentation de la température de l'eau pourrait avoir des effets très nuisibles pour la faune aquatique.

3.4 Discussion

3.4.1 Corrélation entre les températures de l'eau et de l'air

Dans le Boiron de Morges, un modèle non linéaire décrit mieux la relation entre les températures de l'eau et de l'air. De simples régressions ont souvent été utilisées pour expliquer cette corrélation. Comme exemple, un modèle de régression linéaire peut expliquer au moins 86% de la variance de la température de l'eau de huit rivières anglaises (Mohseni and Stefan, 1999). Cependant le modèle linéaire a ses limites (Erickson and Stefan, 2000; Morrill *et al.*, 2005), particulièrement pour les valeurs extrêmes, car la température de l'air peut descendre au dessous de 0°C, alors que celle de l'eau ne descend jamais en dessous de cette valeur à cause des processus de gel (Smith and Lavis, 1975). De même, pour les valeurs hautes, l'évaporation empêche l'élévation additionnelle de la température de l'eau. Un modèle sinusoïde présuppose une asymptote à une valeur maximale. C'est pourquoi en général des modèles non-linéaires, comme dans cette étude, explique mieux la relation entre les températures de l'eau et de l'air (Morrill *et al.*, 2005; Pedersen and Sand-Jensen, 2007).

Utiliser un modèle approprié est essentiel quand on essaye d'évaluer l'impact du réchauffement climatique. Ainsi par exemple, un modèle linéaire fût utilisé pour évaluer l'évolution de la température dans les rivières des Etats-Unis, avec l'hypothèse d'une augmentation de la concentration de CO₂ d'un facteur 2. Avec un tel scénario la température de l'air devrait augmenter de 2 à 6°C.

L'analyse des données de 584 stations aux USA ont également montré la non linéarité entre les températures de l'eau et de l'air pour les valeurs extrêmes (en dehors de la gamme de température de 0-20°C) (Mohseni and Stefan, 1999). En conséquence, quand on extrapole les températures de l'eau pour un réchauffement climatique donné, on obtient des valeurs de température de l'eau bien plus élevées avec un modèle linéaire qu'avec un modèle sinusoïdal au-delà d'un seuil (>25°C) (Erickson and Stefan, 2000). Cela a aussi été démontré pour des cours d'eau danois (Pedersen and Sand-Jensen, 2007) où l'application d'un modèle logistique non linéaire pour un scénario de réchauffement de la température de l'air de 4-5°C en 2070-2100, a prédit des augmentations de la température de l'eau de 1.6-3.0°C durant l'hiver et l'été, et de 4.4-6.0°C pendant le printemps dans des cours d'eau ouverts avec peu d'apport d'eau de source.

3.4.2 Le continuum thermique d'une rivière

Dans le Boiron de Morges, la corrélation entre les températures de l'eau et de l'air augmente le long du cours d'eau de l'amont vers l'aval. Ce résultat est en accord avec ce qui a été démontré sur différentes rivières danoises (Pedersen and Sand-Jensen, 2007). La présente étude démontre aussi qu'à un point spécifique, la température de l'eau dépend non seulement des conditions locales, mais aussi des conditions à l'amont. L'augmentation de la température le long du cours d'eau a lieu comme une vague chaude, qui est formée dans les parties hautes du Boiron, puis qui se déplace le long du cours d'eau avec une vitesse qui dépend du débit et de la couverture le long des berges. L'amplitude de la vague a tendance à augmenter rapidement dans les secteurs ouverts et à diminuer dans les secteurs ombragés. En conséquence, à l'aval, la vague chaude est beaucoup moins visible à cause de l'effet tampon de la forêt. Pour le Boiron, la baisse de température observée provoquée par la présence de forêt le long des berges, peut être au mieux de 1°C par km.

Pour cette raison, la dynamique thermique d'une rivière apparaît fondamentalement différente de celle d'un lac (Peeters *et al.*, 2002), même si dans un lac des phénomènes de stratifications thermiques verticales peuvent aussi avoir lieu (Livingstone and Lotter, 1998). En Suisse, les températures de l'air et de la surface d'un lac sont fortement corrélées, spécialement pour les lacs situés en dessous de 2000 m d'altitude (Livingstone *et al.*, 1999; Livingstone *et al.*, 2005). Aujourd'hui, par analogie, plusieurs modèles de prédiction prennent en compte l'altitude pour déterminer l'impact du réchauffement climatique sur les rivières. Or, si ce facteur est pertinent pour un lac, qui par définition ne change pas d'altitude, cette approche ne l'est certainement pas pour une rivière dont l'eau coule par définition le long d'une pente et donc change d'altitude le long de son trajet. En conséquence pour les rivières, des modèles dynamiques et non statiques, devraient être utilisés pour décrire la relation entre les températures de l'air et de l'eau.

Dans ce contexte, le débit est déterminant (Smith, 1975; Webb and Nobilis, 1994; Bormans and Webster, 1998; Webb and Zhang, 1999; Meier *et al.*, 2003; Pedersen and Sand-Jensen, 2007). Dans le Boiron de Morges, entre les stations 11 et 12, 38% de la quantité d'eau est déviée dans le Bief de St-Prex pour l'agriculture et l'industrie, avec comme conséquence, une augmentation significative de la température de l'eau à l'aval. Un prélèvement pareil peut avoir un impact très important (Smith and Lavis, 1975). En effet le débit détermine la capacité assimilative thermique du cours d'eau (Poole and Berman, 2001). La vitesse à laquelle une quantité d'eau change de température dépend de la profondeur et du débit. En traversant un secteur non ombragé, un cours d'eau peu profond et lent se réchauffera plus rapidement et atteindra une température plus élevée qu'un cours d'eau profond et rapide. De même il se refroidira plus vite en entrant dans une forêt (Moore *et al.*, 2005). L'énergie thermique peut être assimilée à un composé chimique qui se dissout dans l'eau. Plus la quantité de produit augmente dans un volume donné, plus sa concentration augmente. Ainsi, pour la même quantité de produit, une diminution du volume d'eau induit une élévation de la concentration du produit. Par analogie, une baisse de débit dans la rivière va provoquer une augmentation de la température. Le débit et la température sont donc en étroite relation (Poole and Berman, 2001). Ce phénomène a été clairement démontré dans le Boiron ainsi que dans d'autres petits cours d'eau alpins suisses de la vallée de Blenio, où des déviations pour produire de l'énergie hydroélectrique peut amener des changements de température significatifs, jusqu'à 3.7°C sur une section de 21 km de long, avec un débit faible et sous un rayonnement solaire élevé en été (Meier *et al.*, 2003).

3.4.3 Influence des berges boisés sur la température de l'eau

La structure du cours d'eau est déterminée par au moins trois éléments : le chenal, la zone riveraine et la nappe aquifère. De ce fait, l'extrémité d'une rivière n'est pas le bord de son lit, mais celui de la zone riveraine (Poole and Berman, 2001). En conséquence la forêt riveraine fait partie intégrante du cours d'eau et peut jouer un rôle significatif dans l'écosystème aquatique même hors de l'eau. Ainsi, toute perturbation de l'un de ces éléments peut directement affecter la température du cours d'eau et par conséquent l'écosystème entier. La végétation riveraine peut jouer un rôle important probablement en tamponnant les débits, en limitant l'érosion donc les apports de sédiments, en maintenant des températures plus fraîches, en apportant un abri pour les poissons et de la nourriture en offrant un habitat pour les invertébrés, dont certains vont devenir les proies des poissons. Comme exemple, dans une étude comparative sur la densité des saumons juvéniles (*Salmo salar*), dans 20 cours d'eau en Norvège, il a été démontré que les densités les plus élevées ont été trouvées dans des rivières bordées d'une végétation riveraine dense (Johansen *et al.*, 2005). Les mêmes résultats ont été observés pour des populations de truites arc-en-ciel dans l'Oregon (Li *et al.*, 1994).

Dans les années 1950, il avait déjà été démontré que les températures hebdomadaires maximales de l'eau d'un cours d'eau dans une région ouverte, à proximité d'une ferme, était supérieures à celles dans une région boisée (Gray and Edington, 1969). Les auteurs ont aussi montré que de couper les arbres le long de la rivière avait provoqué une hausse de 6.5°C de la température maximale de l'eau enregistrée pendant l'été.

Dans le Boiron de Morges, à l'aval station 7, la température de la rivière apparaît plus stable qu'à l'amont, ceci grâce à la présence quasi continue de la forêt. En général, du fait que la température de l'air est plus élevée que celle de l'eau, pendant la période de réchauffement, une légère et constante hausse de la température de l'eau est observée de ce point jusqu'à l'embouchure, avec une hausse moyenne de 0.3 ± 0.16 °C/km, tout au long de la journée. L'absence de fluctuation journalière comme observée dans les secteurs amont est aussi due à la présence protectrice de la forêt. Ce résultat montre que la couverture des arbres joue un rôle important en protégeant le cours d'eau du réchauffement pendant la journée et du refroidissement pendant la nuit. En fait, les forêts influencent les microclimats en modifiant le rayonnement solaire, la pluviométrie, l'évapotranspiration et la vitesse du vent (Johnson, 1971; Moore *et al.*, 2005; Renaud and Rebetez, 2008; Webb *et al.*, 2008). Au Boiron de Morges, l'effet de la proximité des zones boisées est de modifier les températures extrêmes en réduisant les températures de l'eau journalières minima et maxima, et donc en baissant l'amplitude thermique. Le même phénomène a été démontré dans un cours d'eau en Nouvelle Zélande (Johnson, 1971; Moore *et al.*, 2005). Dans ce contexte, l'impact d'une coupe d'arbres est déterminant pour la faune aquatique. Des études de cours d'eau dans l'Oregon dont les bassins versants ont été déboisés partiellement ou complètement, ont montré une hausse de température dans l'eau et dans le gravier interstitiel et une baisse simultanée de la concentration en O₂ dissous (Brown and Krygier, 1970; Ringler and Hall, 1975). En conséquence, une réduction de la population de truites résidentes a été observée (Ringler and Hall, 1975). De même, un déboisement similaire de 41% du bassin de Carnation Creek, British Columbia, a entraîné une augmentation de la température du cours d'eau durant toute l'année (Holtby, 1988).

3.4.4 Influences sur la concentration d'oxygène dissous dans le cours d'eau

Dans le Boiron de Morges, la concentration en O₂ est liée à la température de l'eau, à la photopériode et donc à l'activité photosynthétique. En conséquence, le déboisement ou l'élimination de la végétation aquatique pourrait avoir un effet négatif à travers plusieurs mécanismes (Poole and Berman, 2001): (1) Le manque d'ombrage sur le cours d'eau peut

induire une augmentation de la température. Or, comme la solubilité de l'oxygène dépend de la température, quand la température monte, la concentration en O₂ dissous diminue simultanément. De plus, quand la température augmente, la demande en oxygène pour la dégradation des débris organiques dans le gravier augmente aussi, causant une baisse supplémentaire de la concentration d'O₂ (Ringler and Hall, 1975). (2) La végétation aquatique produit de l'oxygène par la photosynthèse durant la journée. Par conséquent, la disparition de la végétation aquatique diminue d'autant la production d'oxygène dans l'eau, (3) Le déboisement peut aussi avoir un effet indirect sur la concentration en O₂ en augmentant l'apport de sédiment fin dans le cours d'eau par l'érosion (Brown and Krygier, 1970). Quand ce matériel fin se dépose sur le lit de la rivière, l'échange d'eau entre le cours d'eau et le substrat est réduit (Wickett, 1954). En conséquence, à cause des activités biotiques dans le substrat, la concentration en O₂ diminue rapidement, ce qui peut être dramatique si le substrat est utilisé comme frayère (Rubin, 1995; Rubin and Glimsäter, 1996). Ainsi dans trois petits cours d'eau du Lincoln County, Oregon, une diminution de 30% d'O₂ dissous dans le lit de la rivière a été observée après un déboisement du bassin (Ringler and Hall, 1975). Pour les organismes aquatiques, une migration d'un habitat à un autre pour éviter les conditions défavorables peut être une solution temporaire. Cela a été observé dans des conditions estivales extrêmes dans un cours d'eau du sud de la Californie, où les truites arc-en-ciel migrent dans des bassins plus profonds afin de trouver de l'eau plus froide (Matthews and Berg, 1997). Cette utilisation de bassins profonds comme refuge a aussi été observée dans les populations de truites en Angleterre (Elliott, 2000). La présence d'arbres sur les berges provoque généralement des embâcles dans le cours d'eau, ce qui favorise la diversification de l'habitat et la création de bassins.

3.5 Conclusions et conséquences pratiques

Dans le Boiron de Morges, selon le scénario climatique choisi, la température de l'eau dans la partie inférieure pourrait augmenter de 0.6 à 3.2°C. De même, en 1993 au centre des Etats Unis, une hausse moyenne de 2.4 à 4.7°C a été prédite pour les petits cours d'eau. La prévision a même atteint 6°C en été dans les zones où la couverture boisée a été détruite (Stefan and Sinokrot, 1993). Cet article précurseur parlait déjà du rôle protecteur de la végétation dans la lutte contre les effets du réchauffement climatique. En général, plus le lit de la rivière est grand, plus la conduction et le rayonnement entre l'air et l'eau sont rapides. La végétation riveraine y aura donc moins d'influence (Poole and Berman, 2001). En conséquence, le reboisement des berges sera plus efficace sur les petits cours d'eau.

Dans le contexte de cette étude, il n'est pas important d'estimer si la température de la rivière va augmenter d'un ou deux degrés ou même plus. Ce qui est pertinent est que la température de l'air va continuer d'augmenter dans les prochaines décennies quelque soit la stratégie mise en place pour réduire les émissions de CO₂. La présence de berges boisées semble donc être un des facteurs principaux dans la régulation de la température du cours d'eau. Dès lors, des actions immédiates afin de sauvegarder les forêts présentes le long des cours d'eau et la création de nouvelles berges boisées doivent être mises en place pour protéger les rivières des effets du changement de climat. Dans ce contexte des expériences doivent être mis en place afin de choisir les espèces d'arbres les plus adaptées. L'effet régulateur d'une forêt semble dépendant de la composition spécifique. Ainsi par exemple, une forêt de pins a un effet opposé car elle induit une température plus élevée sous sa canopée (Renaud and Rebetz, 2008). La présente étude a aussi montré qu'un cours d'eau dans lequel de l'eau est prélevée, souffrira plus des effets du réchauffement. Il convient donc de tenir compte de ce facteur lorsque de nouvelles concessions sont demandées ou lors de renouvellements de concessions.



Rapport Clim-arbres

Chapitre 4 : Comprendre la thermique de la rivière aux niveaux régional et national

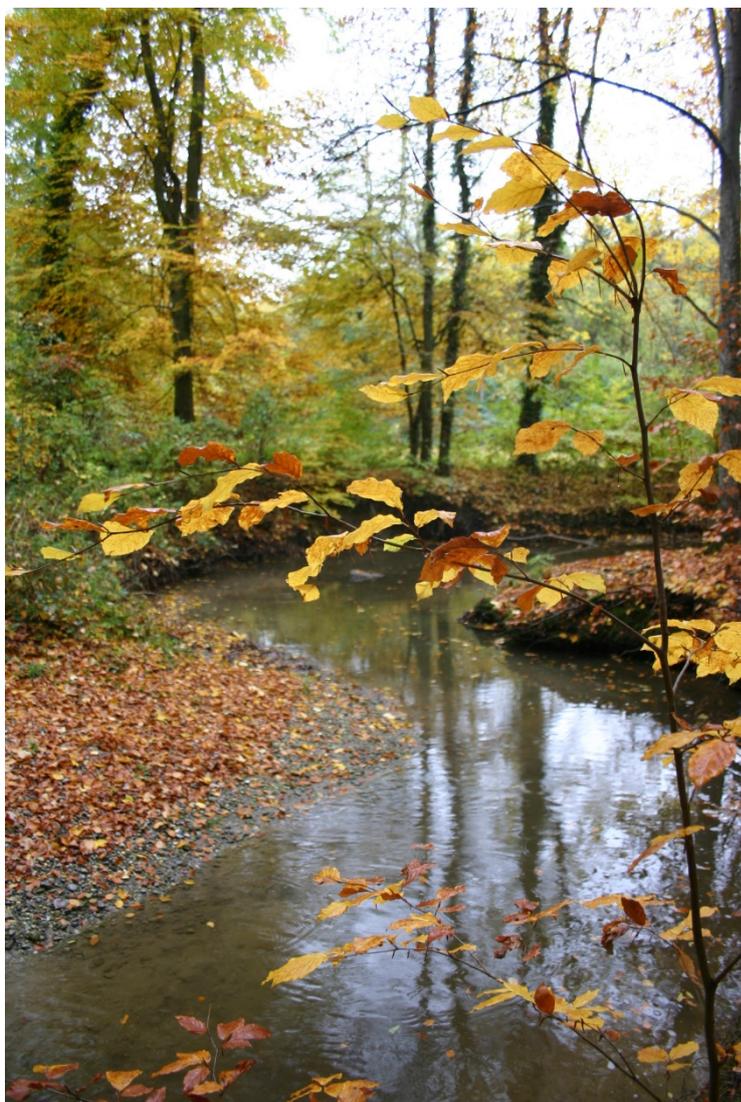


En collaboration avec



4 Comprendre la thermique de la rivière aux niveaux régional et national

4.1 Introduction



L'étude d'un secteur test (chapitre 2), puis d'un bassin versant (chapitre 3), ont permis d'identifier plusieurs facteurs qui influencent la température de l'eau d'une rivière.

Dans le présent chapitre, il s'agit de vérifier si ces principes peuvent être généralisés à l'ensemble des rivières d'une région.

Pour ce faire un ensemble d'enregistreurs de température ont été placés sur diverses rivières du Canton de Vaud. Le choix des rivières témoins a été fait de manière à disposer d'un maximum de diversité au niveau des conditions climatiques, géographiques, physico-chimiques et éco-morphologiques.

Dans ce chapitre, nous analyserons différents cas de figure emblématiques permettant d'expliquer pourquoi l'eau d'une rivière peut être plus ou moins chaude ou froide à un certain endroit. Ces valeurs nous seront ultérieurement utiles (Chapitre 5) pour établir un modèle thermique pour les cours d'eau de la région.

Ce chapitre a été écrit par JF Rubin avec la précieuse collaboration de MM M. Cid, étudiant à l'Université de Genève et S. Nusslé, collaborateur à la Fondation de la Maison de la Rivière.

4.2 Matériel et méthodes

4.2.1 Origine des données régionales

Les données utilisées proviennent de 3 sources distinctes :

1. Les données récoltées par les enregistreurs de température que nous avons placés spécifiquement pour cette étude. Au total, 63 stations.
2. Les données provenant des enregistreurs gérés par le Service des Eaux, Sols et Assainissement (SESA) du Canton de Vaud. Au total, 11 stations.
3. Les données provenant des enregistreurs gérés par la Confédération. Au total, 2 stations.

C'est ainsi **76 stations** de mesures réparties sur **34 cours d'eau** qui ont été utilisées pour cette partie de l'étude (Figure 36).

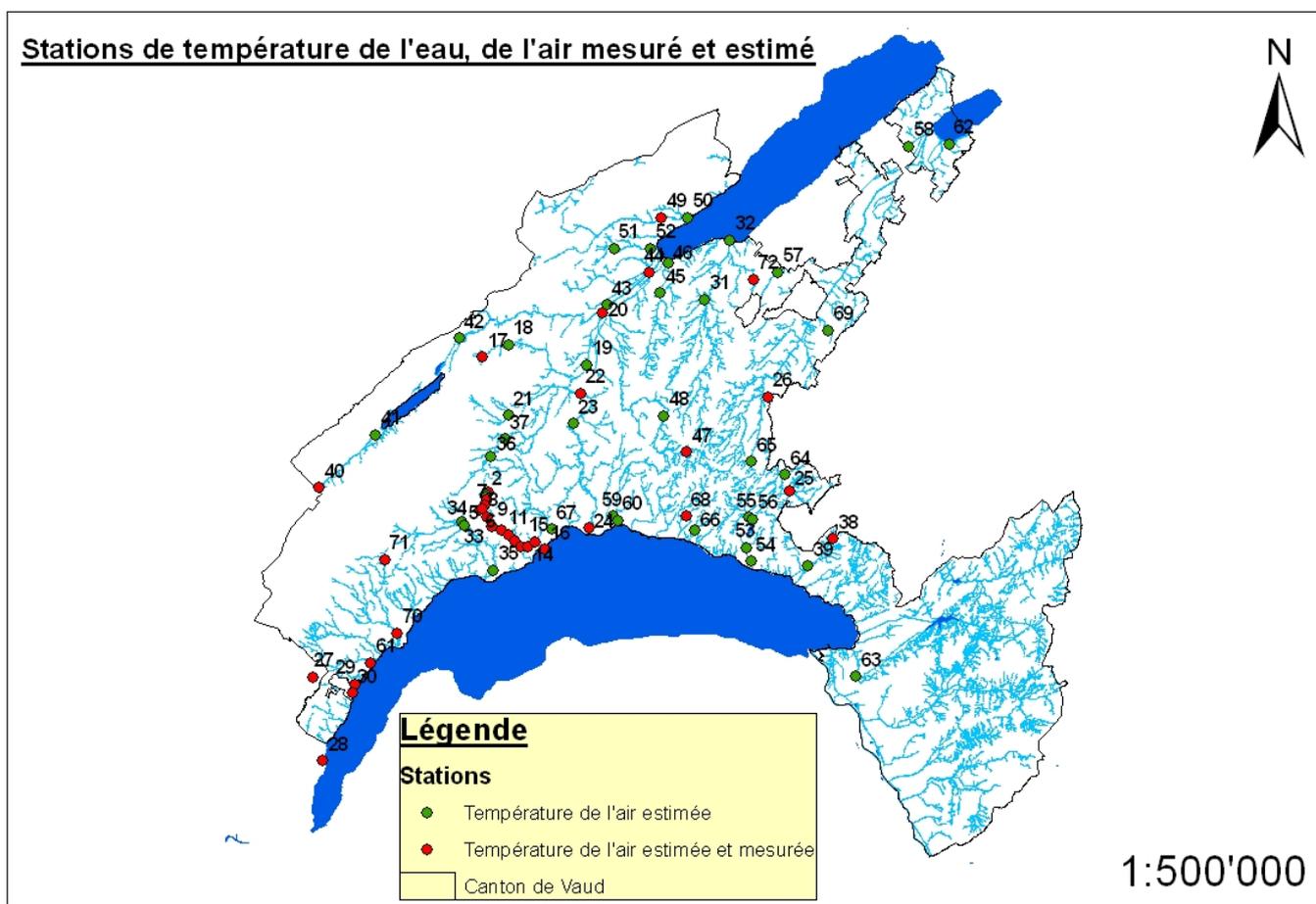


Figure 36: Carte de répartition des enregistreurs de température en 2010. Tous les points représentent les stations de mesures pour lesquelles la température de l'eau a été mesurée. La distinction de couleur représente celles pour lesquelles la température de l'air a pu être estimée et mesurée ou seulement estimée

4.2.2 Origine des données nationales

Les données nationales proviennent du site de l'OFEV (<http://www.bafu.admin.ch/hydrologie>). Afin d'établir un modèle thermique et diverses corrélations permettant d'estimer les valeurs manquantes sur certains sites, les données de température de l'eau, mais aussi de l'air et du débit, doivent être disponible pour la même année. Ceci est le cas de l'année 2008 pour laquelle un total de 77 stations a été sélectionné (Figure 37).

Ces données ont été regroupées en 3 écorégions distinctes :

- Ecorégion 1 : Plateau et Jura
- Ecorégion 2 : Préalpes et Alpes du Nord
- Ecorégion 3 : Alpes centrales, Sud des Alpes et Engadine

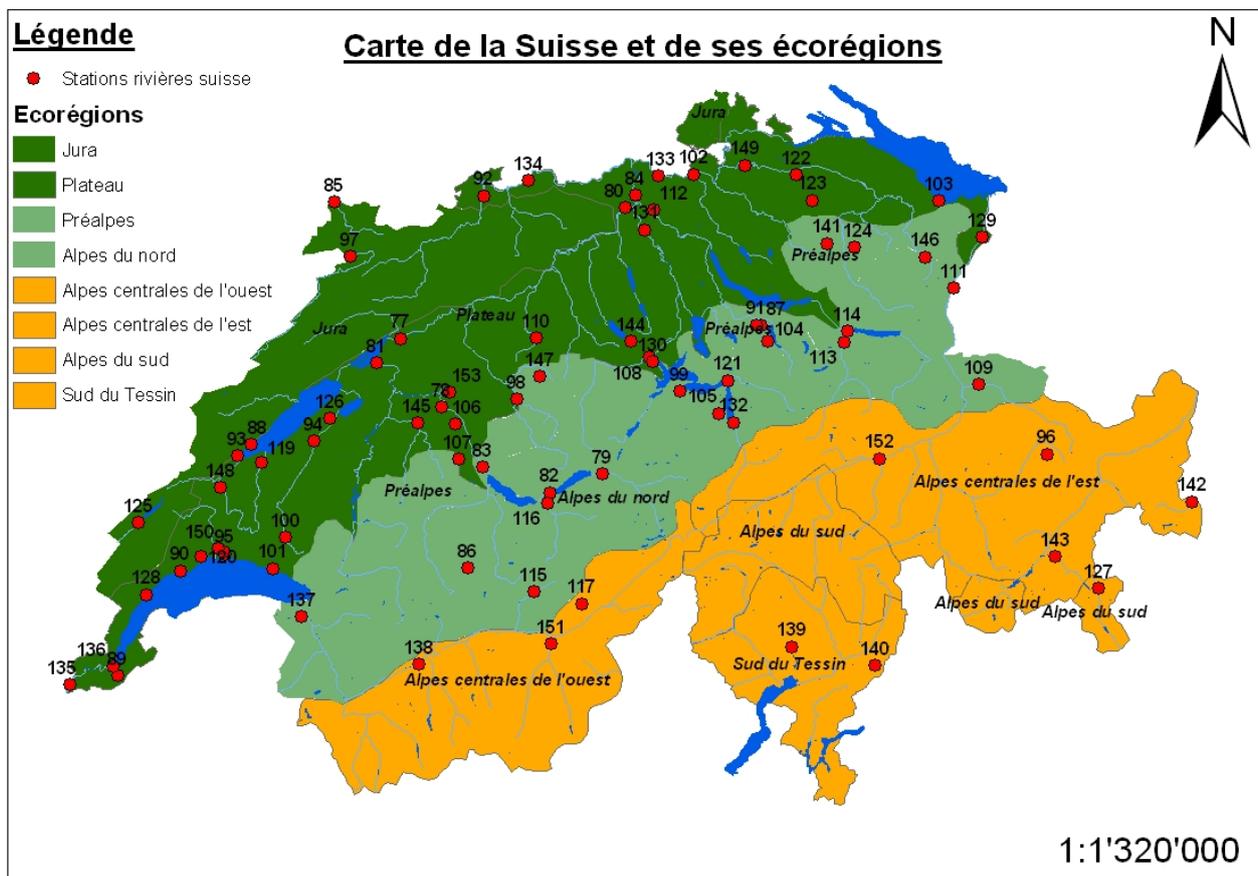


Figure 37: Carte de la Suisse avec localisation des enregistreurs de température et écorégions

4.2.3 Période concernée

Les enregistreurs ont été programmés de manière à mesurer la température de l'eau toutes les 30 min. Pour la suite des analyses, les valeurs couvrant la période de l'été 2010, soit de juin, juillet et août, ont été utilisées.

4.2.4 Mise en place des enregistreurs de température d'eau

Les enregistreurs ont été placés dans des tubes métalliques, fichés dans le sol, en bord de berge. Pour la description des types d'enregistreurs et des modalités de mise en place, on se référera au chapitre 3.

4.2.5 Température de l'air

Température mesurée

Pour **34 stations** appartenant à **14 rivières** différentes, la température de l'air a été mesurée simultanément à celle de l'eau. Pour ce faire, le même matériel que celui décrit au chapitre 3 a été utilisé.

Température estimée

Pour les rivières dont on ne disposait pas simultanément de mesures *in situ* de la température de l'eau et de l'air, cette dernière a été estimée. En effet, au niveau national, de nombreuses données peuvent être obtenues au travers du portail de Météo Suisse (<https://gate.meteoswiss.ch/idaweb/login.do>) (Tableau 14). Par conséquent, ces données ont été extraites de cette base. Cette corrélation a permis d'estimer les valeurs manquantes pour la température de l'air grâce à l'altitude des stations (Figure 38).

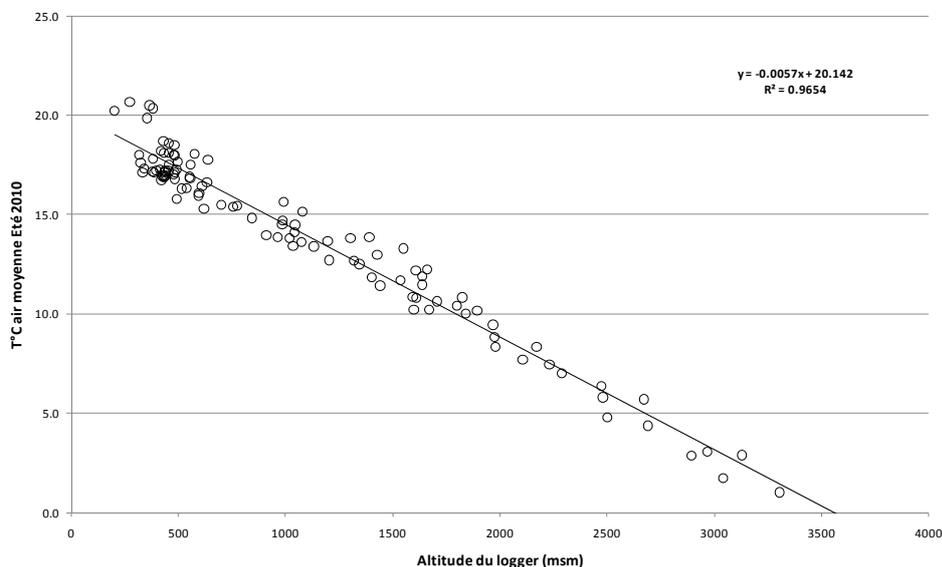


Figure 38:
Corrélation entre
altitude et
température de
l'air en 2010
(données :
météosuisse)

Comme pour l'eau, la température de l'air peut être décrite de différentes manières avec divers intervalles de temps (journalier, mensuel ou estival) :

- La température moyenne
- Les extrêmes (température minimale ou maximale)
- L'amplitude de la variation de température

4.2.6 Ecomorphologie

Différentes classes d'écomorphologie sont classiquement décrites (OFEV, 1998) :

1. Naturel
2. Peu atteint
3. Très atteint
4. Artificiel

Par ailleurs, l'écomorphologie est définie de deux manières différentes :

- L'**écomorphologie locale** est la valeur obtenue à l'endroit exact de l'enregistreur de température. Cette valeur est fournie par la base de données *Gesreau* du Service des Eaux, Sols et Assainissement du Canton de Vaud (ci-après SESA) calculée selon la méthode standardisée de la Confédération (OFEV, 1998).
- L'**écomorphologie amont** est calculée pour tout le secteur en amont du point de mesure de température (y compris les affluents) de la manière suivante : la rivière en amont est divisée par tronçon de même écomorphologie. La longueur de chaque tronçon est multipliée par sa valeur écomorphologique. La somme des valeurs ainsi obtenue est divisée par la longueur totale de la rivière en amont. On obtient ainsi une valeur écomorphologique moyenne standardisée.

4.2.7 Description des forêts

La présence d'une forêt aux abords d'une rivière (ripisilve) peut avoir un effet sur la température de l'eau. La végétation riveraine peut réduire les radiations solaires absorbées par l'eau, en diminuant les maxima de température enregistrés dans la rivière. La proximité de la ripisilve et de l'ombrage ainsi créés sont des facteurs favorisant la capacité d'une rivière à résister à un accroissement de température (Larson and Larson, 1996; Zwieniecki and Newton, 1999; Johnson, 2004).

Les données sur la mixité des forêts de la Suisse sont présentes sur le portail *GEOSTAT* de l'Office Fédéral de la Statistique. Différentes classes de type de forêt sont définies :

0. Non forêt
1. Forêt de résineux
2. Forêt de feuillus
3. Forêt mixte à prédominance de résineux
4. Forêt mixte à prédominance de feuillus

Ces données ont permis d'attribuer à chaque station un type de forêt. En comparant les valeurs de températures de l'eau de chaque station par type de forêt, il y a donc été possible de déterminer l'effet de la ripisilve (bande de forêt en bordure du cours d'eau) sur la température des rivières.

4.3 Présentation des données

4.3.1 Choix des paramètres descripteurs de température

Dans le cadre de ce travail, la température de l'eau d'une rivière a été décrite par 4 types de paramètres, avec un intervalle de temps pouvant être horaire, journalier, mensuel, saisonnier, annuel :

- La température moyenne
- Les extrêmes (température minimale ou maximale)
- L'amplitude de la variation de température
- L'accroissement ($\Delta T/km$)

Selon le paramètre choisi, deux stations peuvent apparaître identiques ou différentes. A titre d'exemple (Figure 39), on observe, en été 2010, une température moyenne estivale pratiquement identique (9.4 / 9.5°C) pour la source des Lécherres sur le Boiron et pour la station en amont de l'arboretum sur l'Aubonne, alors que les valeurs minimales (8.3 / 7.2 °C) et maximales (11.0 / 17.6 °C), de même que les amplitudes thermiques moyennes journalières (0.5 / 2.1 °C) ou estivales (2.7 / 10.3 °C) sont fort différentes. Il est donc plus que probable que la faune et la flore aquatiques réagissent très différemment dans ces deux rivières qui pourtant démontrent une température moyenne pratiquement identique. La station des Lécherres apparaît globalement beaucoup plus stable thermiquement parlant que celle de l'Aubonne. Le choix du paramètre décrivant la température de la rivière apparaît donc déterminant.

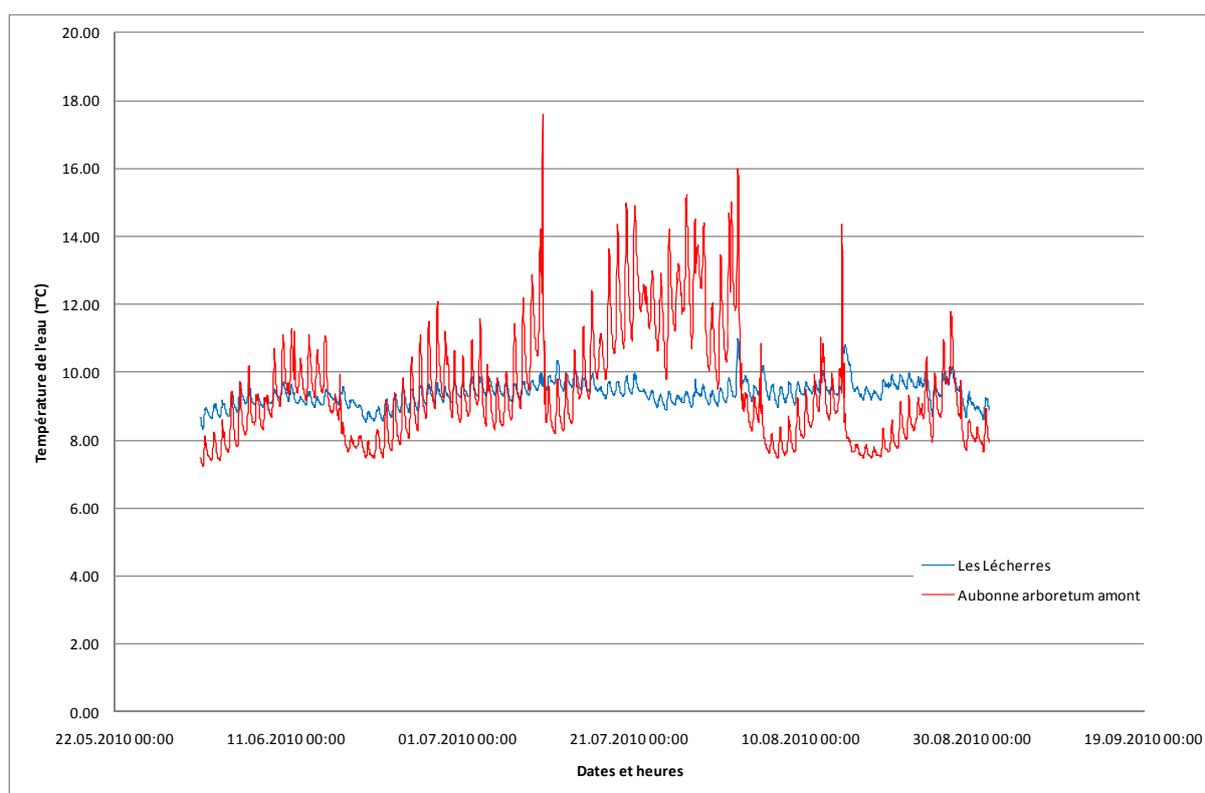


Figure 39: Comparaison des régimes thermique de la source des Lécherres sur le Boiron et de la station en amont de l'arboretum sur l'Aubonne durant l'été 2010

Température moyenne estivale

La température moyenne (\pm écart-type) estivale de l'eau, pour l'ensemble des 76 stations, pour tout l'été 2010, était de 14.6 ± 2.1 °C. La valeur la plus faible fut enregistrée sur la Versoix à Divonne (8.5 ± 0.4 °C). A l'autre extrémité, la température moyenne la plus chaude fut observée sur le Buron à la hauteur de la step (20.1 ± 3.4 °C). Au total, on observe, pour 34 stations sur 76 (44.7%), une température moyenne supérieure à 15°C¹. (Figure 40).

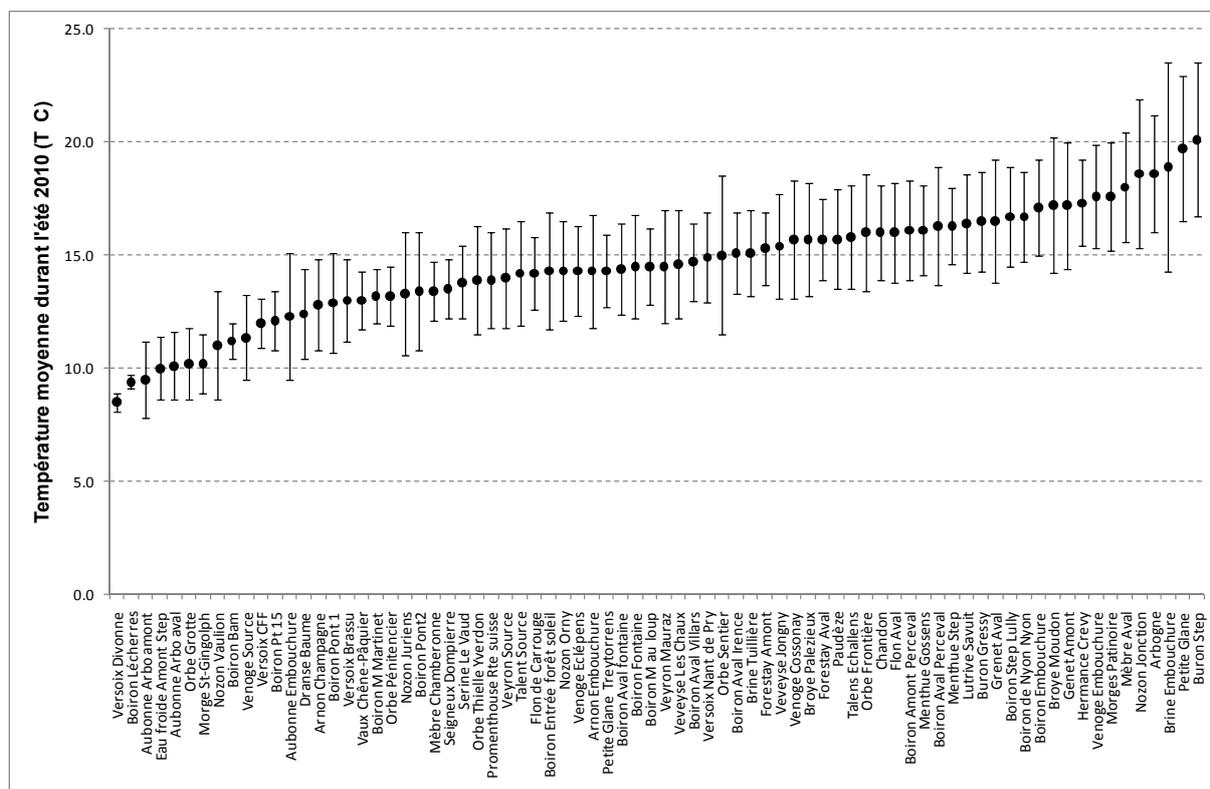


Figure 40: Température moyenne (\pm écart-type) observée durant l'été 2010

¹ Pour rappel, 15°C est considéré comme la valeur limite au-delà de laquelle la maladie rénale proliférative peut occasionner des mortalités importantes chez les jeunes truites.

Température maximale estivale

La température maximale de l'eau, pour l'ensemble des 76 stations, sur tout l'été 2010, était en moyenne de 20.4 ± 4.0 °C. La valeur maximale la plus faible a été enregistrée à la source des Lécherres sur le Boiron (11.0 °C) seulement. A l'autre extrémité, la température maximale la plus chaude a été observée à l'embouchure de la Brine (34.9 °C). Au total, il n'y a que 6 stations sur 76 (7.9%) pour lesquelles on n'observe jamais une température supérieure à 15°C. (Figure 41).

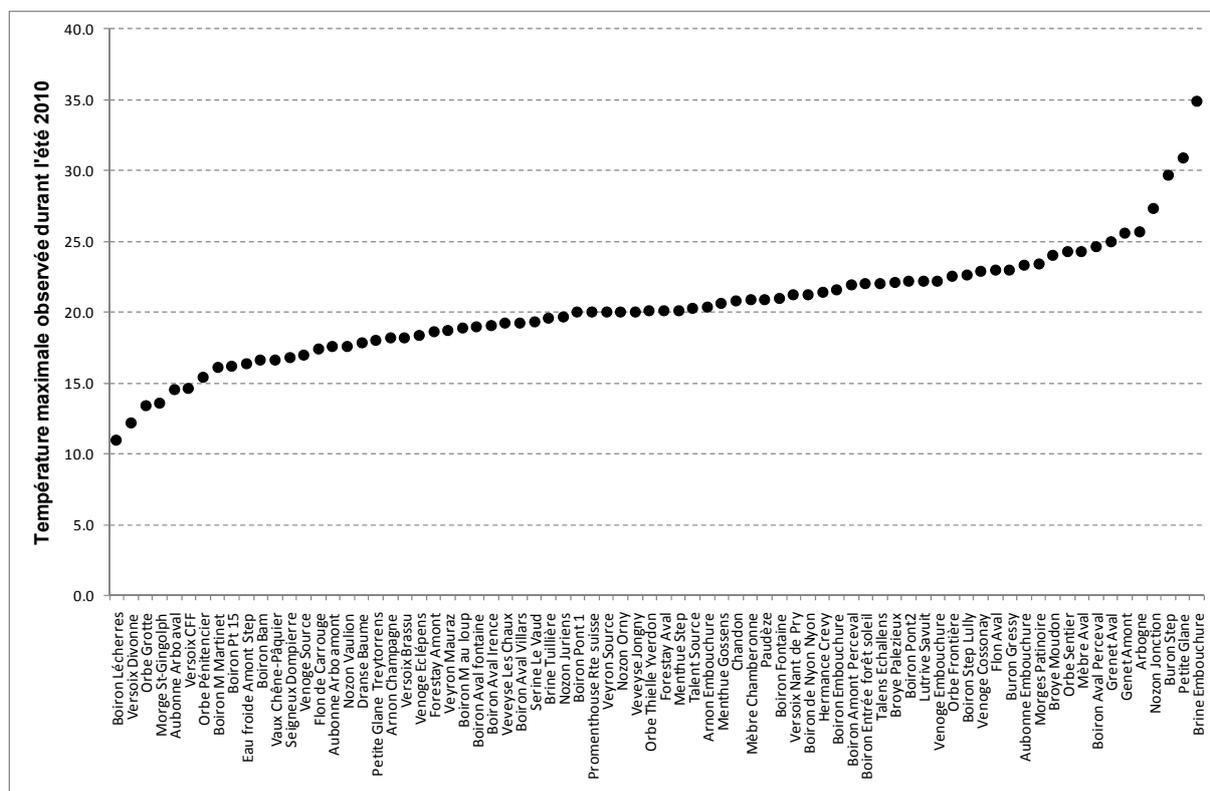


Figure 41: Température maximale observée durant l'été 2010

Amplitude thermique estivale

Pour chaque station, les valeurs minimales et maximales observées pendant l'été 2010 ont été relevées, puis l'amplitude thermique estivale déterminée par la différence entre ces valeurs.

L'amplitude thermique estivale, observée pour l'ensemble des 76 stations, était en moyenne de 11.0 ± 3.4 °C. L'amplitude la plus faible durant l'été 2010 a été observée à la source des Léchères du Boiron (2.7°C) seulement. A l'autre extrémité, l'amplitude maximale a été observée à l'embouchure de la Brine (24.4°C). (Figure 41). Cette station fait figure d'exception², car pour aucune autre la valeur maximale observée ne dépasse les 20°C.

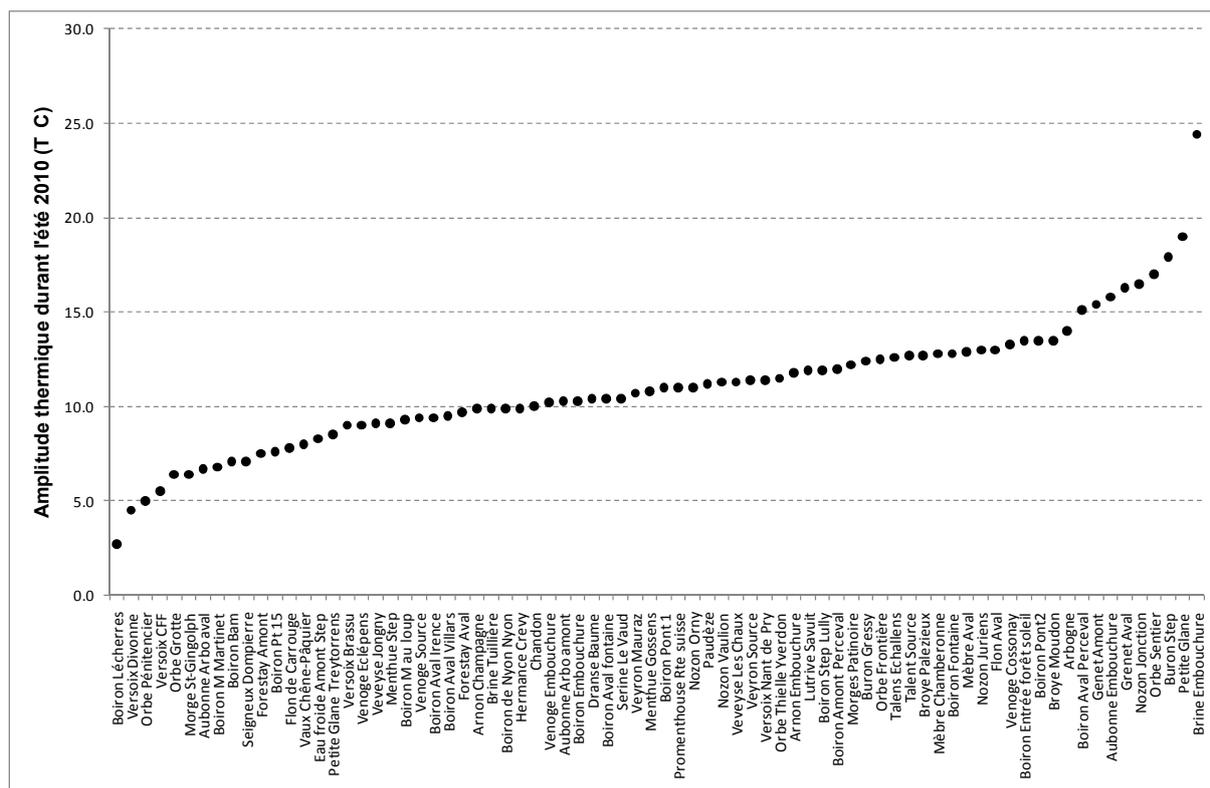


Figure 42: Amplitude thermique durant l'été 2010

² Il n'est pas exclu que l'enregistreur de température aie été quelques fois hors de l'eau pour cette station.

Amplitude thermique journalière

Pour chaque station, les valeurs minimales et maximales observées chaque jour pendant l'été 2010 ont été relevées, puis l'amplitude thermique journalière déterminée par différence entre ces valeurs. L'amplitude thermique journalière moyenne a ensuite été calculée pour toute la période.

L'amplitude thermique journalière, observée pour l'ensemble des 76 stations, était en moyenne de 2.5 ± 1.4 °C. L'amplitude journalière la plus faible durant l'été 2010 a été observée sur l'Orbe à la hauteur du pénitencier (0.4°C) seulement. A l'autre extrémité, l'amplitude journalière maximale a été observée à l'embouchure de la Brine (9.2°C). (Figure 43). A nouveau, la Brine fait office d'exception.

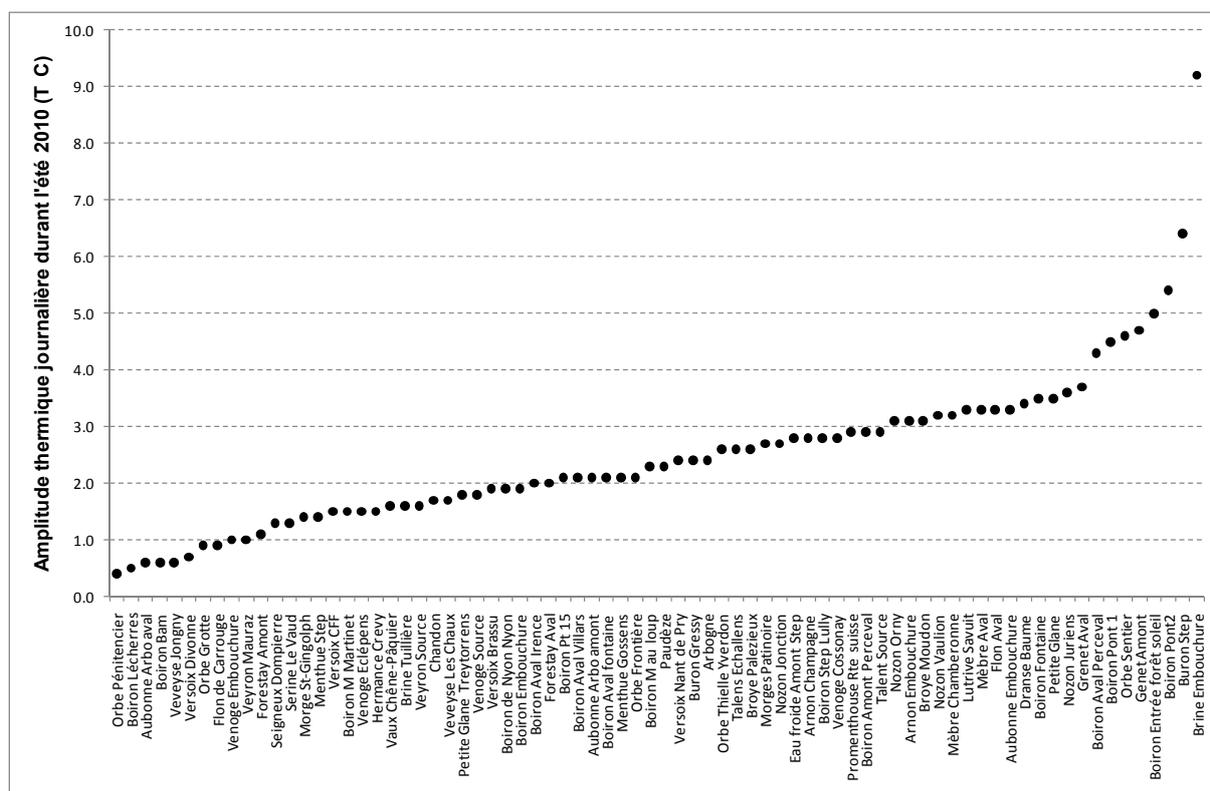


Figure 43: Variation journalière de température durant l'été 2010

4.3.2 Ecomorphologie

Aux chapitres 2 et 3, il a été démontré, dans la partie amont du Boiron, que lorsque la rivière coule dans un secteur canalisé et non ombragé, on pouvait observer la création de vagues d'eau chaude se déplaçant de l'amont vers l'aval. L'amplitude thermique dans de tels secteurs était donc beaucoup plus importante que dans des portions protégées par la forêt. Ce phénomène n'est pas particulier au Boiron et l'on peut parfaitement le mettre en évidence ailleurs dans le Canton de Vaud. La Venoge (Figure 44) et le Nozon (Figure 45) sont présentés ci-dessous à titre d'exemples.

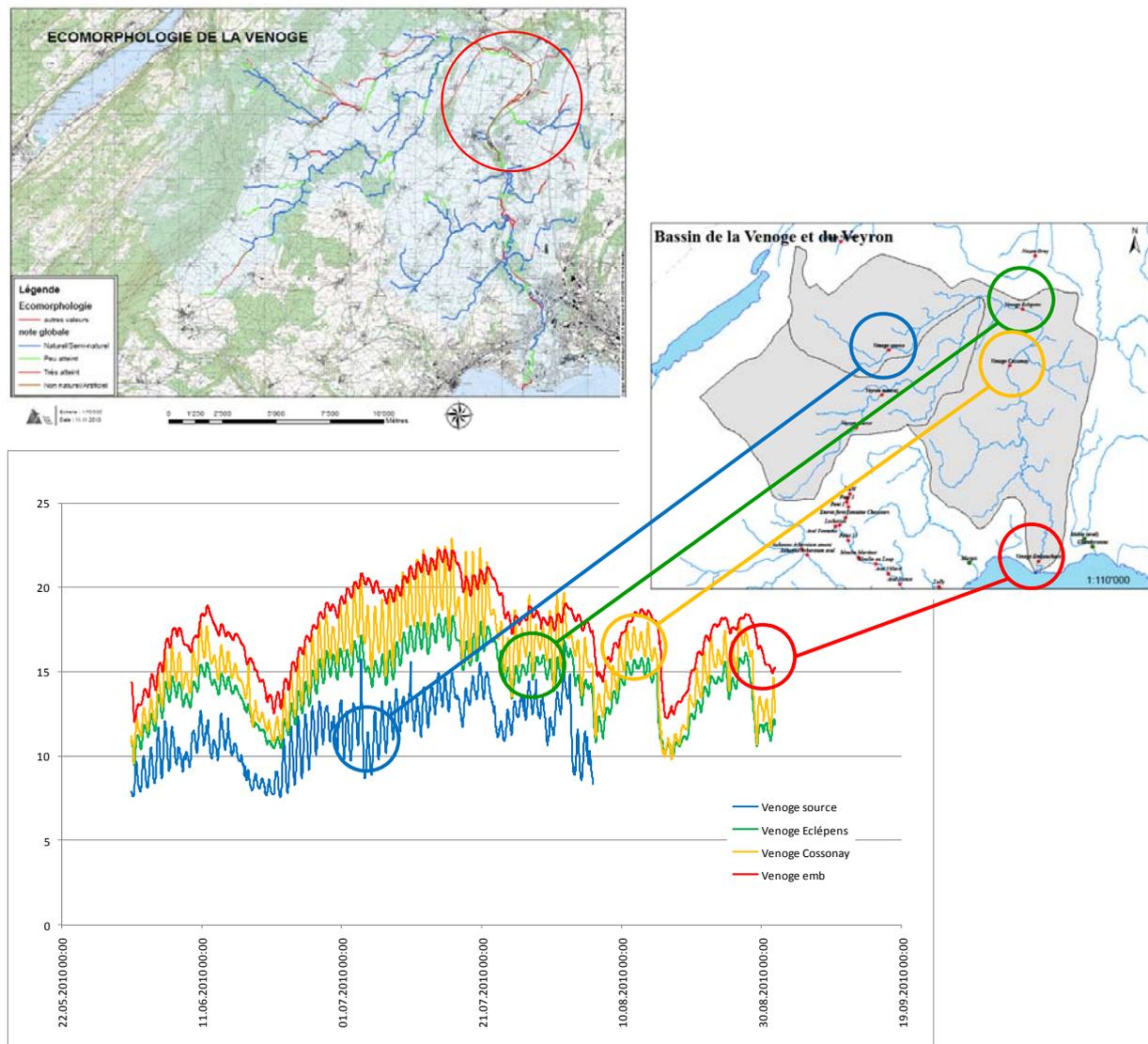


Figure 44: Ecomorphologie, localisation des enregistreurs de température et température de la Venoge durant l'été 2010.

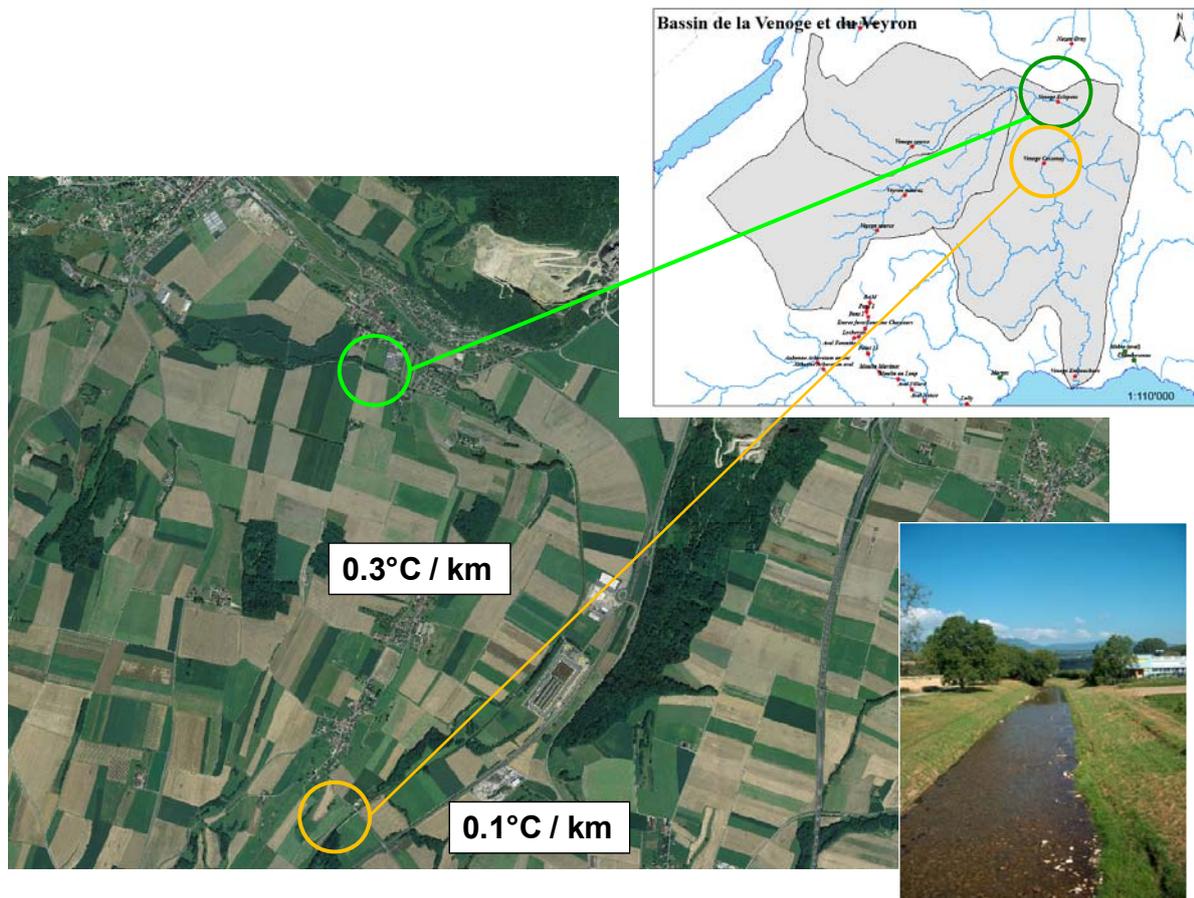


Figure 45: Influence d'un endiguement sur l'accroissement thermique de l'eau, observé dans le secteur de Cossonay sur la Venoge en été 2010.

Le secteur entre Eclépens et Cossonay sur la Venoge est totalement canalisé et très peu ombragé (Figure 45). Le lit de la rivière est relativement large et la profondeur faible. Autant de paramètres qui devraient induire un réchauffement important de l'eau et la production de vagues chaudes identiques à ce qui a été observé précédemment dans la partie amont du Boiron. Les mesures effectuées pendant l'été 2010 montrent en effet que l'accroissement de température sur ce secteur canalisé est de $0.3^{\circ}\text{C}/\text{km}$ alors qu'il n'est que de $0.1^{\circ}\text{C}/\text{km}$ plus en aval dans des secteurs à l'écomorphologie plus naturelle et plus ombragés (Figure 45).

Par ailleurs, l'analyse détaillée des températures mesurées sur l'ensemble du cours de la Venoge montre que (Tableau 7) :

Tableau 7: Température de la Venoge en été 2010

Station	T°C en été 2010				Amplitude journalière		
	T°C moyenne	T°C min	T°C max	Amplitude estivale	T°C moyenne	T°C min	T°C max
Source	11.3 ± 1.9	7.5	17.0	9.4	2.5 ± 1.0	0.6	5.2
Eclépens	14.3 ± 2.0	9.5	18.4	9.0	1.5 ± 0.6	0.4	4.3
Cossonay	15.7 ± 2.6	9.6	22.9	13.3	2.8 ± 1.4	0.6	6.7
Embouchure	17.6 ± 2.3	12.0	22.2	10.3	1.0 ± 0.5	0.2	4.7

1. La température moyenne observée durant l'été 2010 augmente de l'amont vers l'aval (de 11.3 à 17.6°C), ce que l'on observe généralement.
2. Par contre, à Cossonay, soit juste en aval du tronçon canalisé, on observe la plus grande amplitude, tant estivale (13.3°C), que journalière (2.8°C), ainsi que les valeurs maximales de température estivale (22.9°C) et d'amplitude journalière (6.7°C), ce qui démontre bien l'influence néfaste de ce tronçon canalisé sur la température de l'eau avec la production de vagues d'eau chaude.

Sur le Nozon, on peut faire le même type de constatations avec un accroissement de température de 0.1°C/km entre Juriens et Orny dans une portion naturelle du cours d'eau et de 0.7°C/km entre Orny et Jonction dans une portion canalisée (Figure 46) :

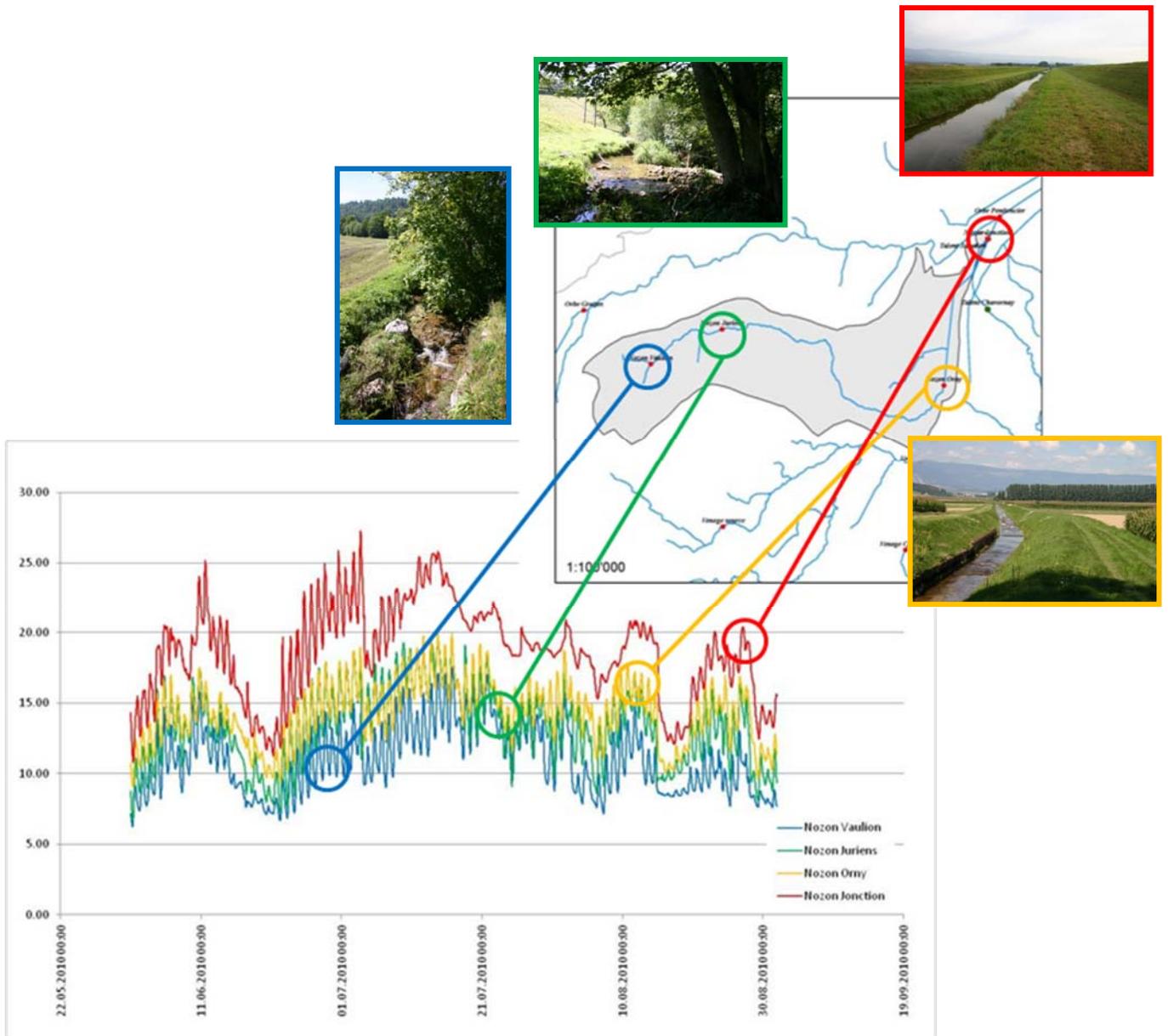


Figure 46: Ecomorphologie, localisation des enregistreurs de température et température du Nozon durant l'été 2010.

4.3.3 Effet du passage souterrain

L'Orbe est prise à titre d'exemple pour démontrer l'effet sur la température de l'eau d'un passage de la rivière dans un réseau karstique souterrain (Figure 47).

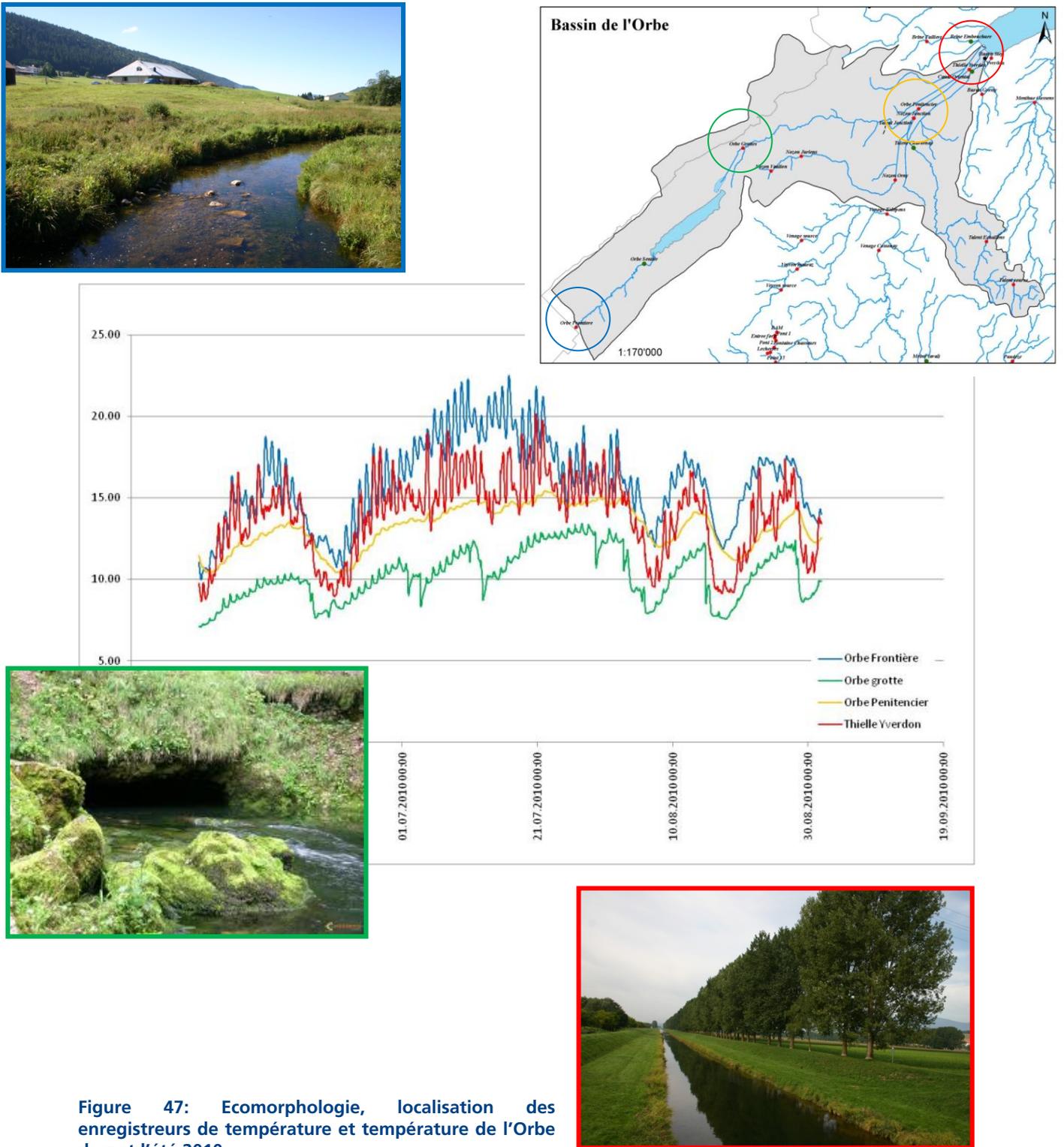


Figure 47: Ecomorphologie, localisation des enregistreurs de température et température de l'Orbe durant l'été 2010.

L'analyse de l'évolution de la température de l'eau le long de l'Orbe durant l'été 2010 montre que (Tableau 8) :

1. L'Orbe est un cas particulier puisque la plus haute température moyenne estivale est observée dans la station la plus en amont (station Frontière : $16.0 \pm 2.6^{\circ}\text{C}$) ! Cela pourrait être expliqué par le fait que ce secteur est totalement ouvert, sans arbres qui pourraient assurer un certain ombrage à la rivière (Figure 47). C'est, probablement à cause de son écomorphologie particulière, la raison pour laquelle on observe également là une grande amplitude journalière.
2. Après son passage sous terre dans les grottes, l'Orbe réapparaît à l'air libre avec une température considérablement plus fraîche (station Grotte : $10.2 \pm 1.6^{\circ}\text{C}$), soit presque 6°C de moins qu'à l'amont. L'amplitude thermique, tant estivale que journalière, est également diminuée d'un facteur 2 environ.
3. Jusqu'à la station Pénitencier, l'Orbe se réchauffe, mais faiblement
4. Après son passage en secteur ouvert, dans la plaine, on enregistre sur l'Orbe à Yverdon les amplitudes journalières les plus importantes, ceci à nouveau vraisemblablement en relation avec l'écomorphologie peu favorable de la rivière à cet endroit.

Tableau 8: Température de l'Orbe en été 2010

Station	T°C en été 2010				Amplitude journalière		
	T°C moyenne	T°C min	T°C max	Amplitude estivale	T°C moyenne	T°C min	T°C max
Frontière	16.0 ± 2.6	10.0	22.5	12.5	2.1 ± 1.2	0.4	5.1
Grotte	10.2 ± 1.6	7.1	13.4	6.4	0.9 ± 0.7	0.1	3.7
Pénitencier	13.2 ± 1.3	10.4	15.4	5.0	0.4 ± 0.2	0.0	1.1
Yverdon	13.9 ± 2.4	8.7	20.1	11.5	2.6 ± 1.1	0.2	5.6

4.3.4 Effet de la présence d'un lac sur la température

La présence d'une retenue sur le cours d'une rivière est souvent considérée comme un paramètre pouvant influencer sa température. Pour illustrer ce phénomène deux cas sont présentés ici.

Le cas du barrage de la SEFA sur l'Aubonne

Dans la partie amont de la rivière, on trouve la retenue du barrage de la SEFA, une usine hydroélectrique. Deux enregistreurs de température ont été placés, en amont et en aval de l'ouvrage, afin de déterminer l'influence de ce lac de retenue (Figure 48).

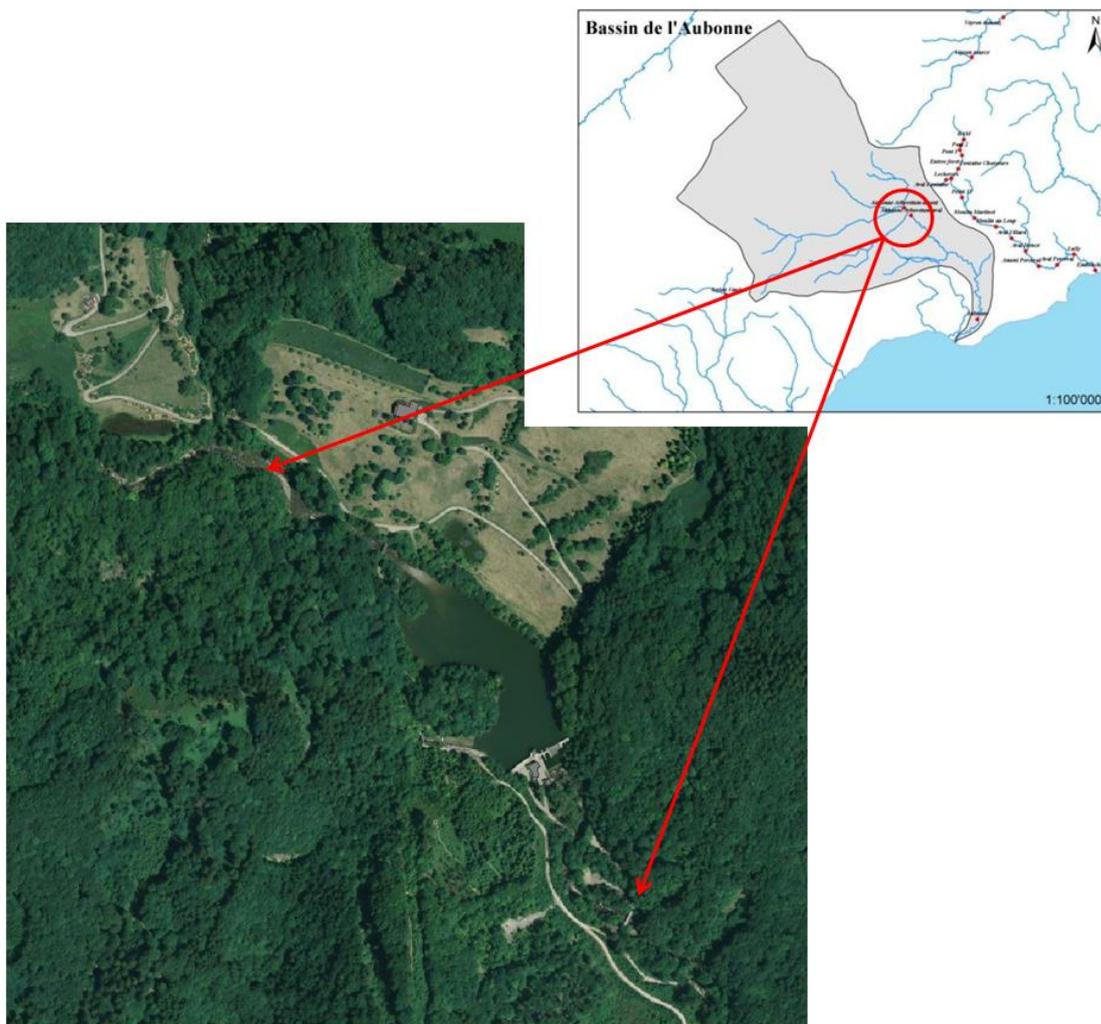


Figure 48: Localisation des deux enregistreurs de température de part et d'autre de la retenue du barrage de la SEFA sur l'Aubonne

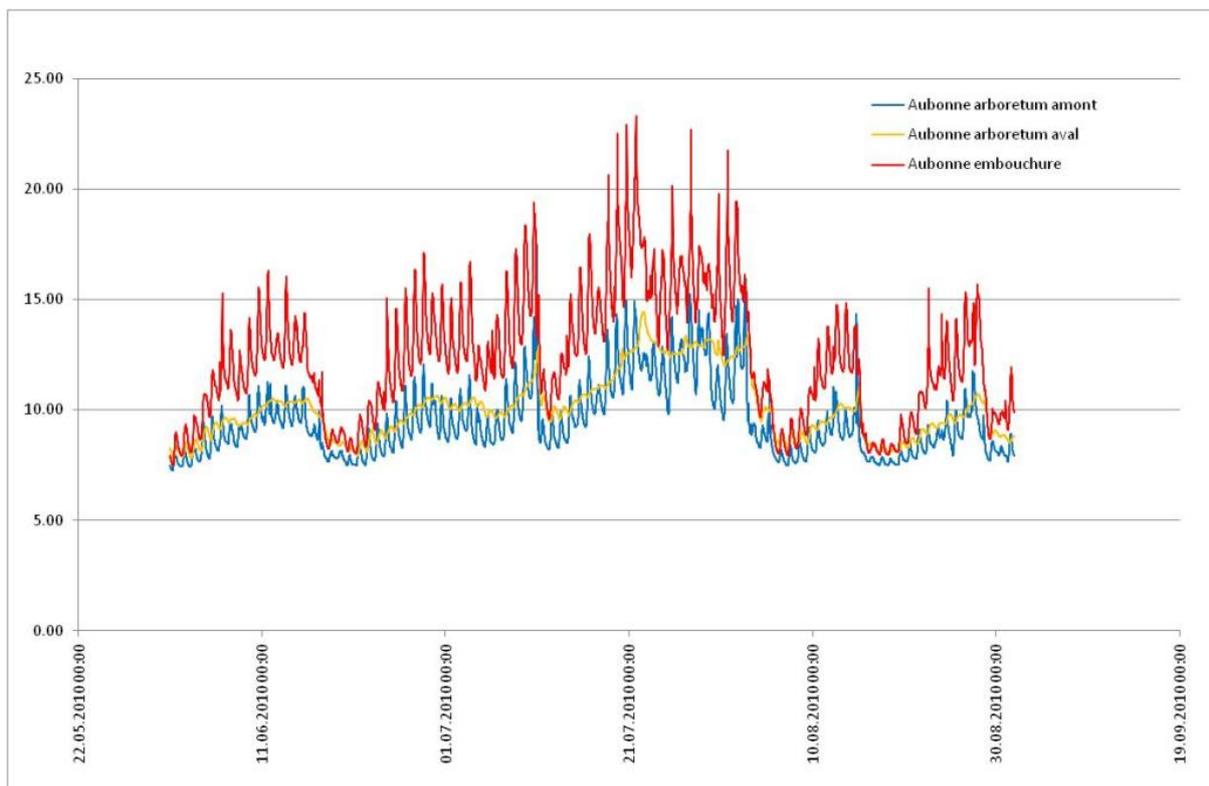


Figure 49: Evolution de la température de l'Aubonne durant l'été 2010

L'analyse de l'évolution de la température de l'eau le long de l'Aubonne durant l'été 2010 démontre que (Figure 49, Tableau 12) :

1. D'amont en aval, la température moyenne estivale augmente, sans surprise, comme partout ailleurs.
2. La présence du lac de retenue a pour effet de tamponner considérablement, tant l'amplitude estivale, que l'amplitude journalière (un facteur 2 en moyenne dans le cas de l'Aubonne). Ceci est probablement dû à l'inertie thermique liée à l'important volume d'eau que constitue le lac.

Tableau 9: Température de l'Aubonne en été 2010

Station	T°C en été 2010				Amplitude journalière		
	T°C moyenne	T°C min	T°C max	Amplitude estivale	T°C moyenne	T°C min	T°C max
Amont	9.5 ± 1.7	7.2	17.6	10.3	2.1 ± 1.3	0.3	7.1
Aval	10.1 ± 1.5	7.8	14.5	6.7	0.6 ± 0.5	0.1	3.0
Embouchure	12.3 ± 2.8	7.5	23.3	15.8	3.3 ± 2.0	0.5	9.3

Le cas du Léman sur le Rhône

Il s'agit là d'un cas extrême puisque le temps de résidence d'une goutte d'eau dans le Léman est de 11.4 ans. On peut néanmoins appréhender l'impact de la présence d'un tel lac sur le régime thermique du Rhône en comparant les valeurs enregistrées aux différentes stations (Figure 50).

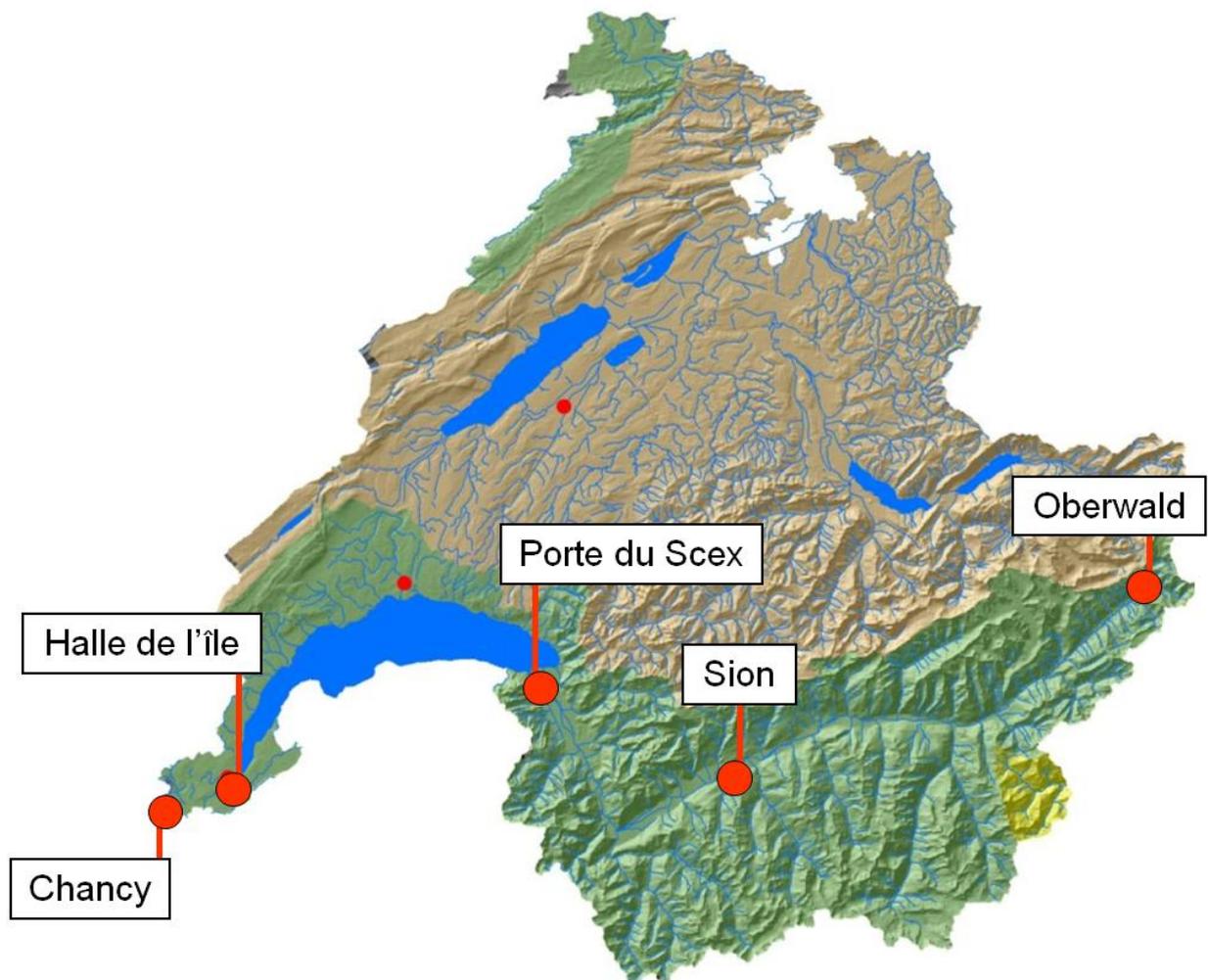


Figure 50: Localisation des stations de mesures de température sur le Rhône



Figure 51: Evolution du régime thermique du Rhône en 2006 (données OFEV)

Les températures du Rhône mesurées durant l'année 2006 (les données 2010 ne sont pas disponibles pour certaines stations) sont prises ici à titre d'exemple (Figure 51). La comparaison de ces courbes nous montre que :

1. **La température du Rhône à Oberwald** reste très constante au cours de l'année. Elle ne dépasse guère les 6°C en moyenne mensuelle, 10°C en valeur maximale et $3.8 \pm 1.9^\circ\text{C}$ en moyenne annuelle. Pendant l'été, directement issue de la fonte des glaces, elle passe de 0°C à 5.7°C en moyenne annuelle sur les 7 km de linéaire, soit un accroissement de 0.8°C par km. L'augmentation des températures estivales de l'air a pour effet principal un accroissement de la fonte des glaces, donc un accroissement du débit, sans un accroissement significatif concomitant de la température. L'eau n'a pas le temps de se réchauffer beaucoup sur ce parcours, puisqu'un accroissement de la température de l'air signifie un accroissement du débit (comme le démontrent les mesures effectuées à la station de Reckingen) donc de la vitesse de déplacement de l'eau. Dans cette configuration, le réchauffement climatique devrait agir sur cette station plus sur une augmentation du débit que de la température, ce qui n'est pas forcément le cas pour les stations plus en aval.
2. **La température du Rhône à Sion** est nettement différente de celle mesurée à Oberwald. Si l'allure de la courbe est globalement similaire, en revanche elle est décalée vers le haut. Pendant l'été, on passe d'une température moyenne de $5.7 \pm 0.6^\circ\text{C}$ mesurée à Oberwald en 2006 à $8.9 \pm 0.7^\circ\text{C}$ mesuré à Sion pendant la même période. La distance entre Oberwald et Sion est de 100 km, ce qui correspond donc à un accroissement thermique de 0.03°C par km de linéaire. C'est dans cette portion, au moment où il arrive dans la plaine, que le Rhône se réchauffe le plus avant son arrivée dans le Léman. Cet accroissement de température

reste cependant considérablement plus faible que ce que l'on observe pour des rivières à plus faible débit (voir plus haut).

3. **La température du Rhône à la Porte du Scex** est très similaire à celle mesurée à Sion. Les deux stations sont distantes de 55 km. La température moyenne estivale en 2006 y était de $10.0 \pm 0.8^{\circ}\text{C}$. L'accroissement thermique sur ce parcours est donc de 0.02°C par km de linéaire, soit pratiquement identique à ce qui est observé en amont. Le Rhône se réchauffe donc dans la plaine, mais est tempéré par les apports d'eau froide provenant des affluents et des centrales hydro-électriques rejetant de l'eau prélevée directement à haute altitude et transférée dans des conduites forcées en plaine sans passer par des cours d'eau.
4. **La température du Rhône au Halle de l'île à Genève** est complètement différente à ce que l'on observait en Valais. C'est l'eau du Léman qui s'écoule à cet endroit. Une goutte d'eau provenant du Rhône valaisan met en moyenne en théorie 11.4 ans pour passer de Villeneuve à Genève. En conséquence, la température du fleuve à cet endroit dépend totalement du régime thermique des quelques 88 km^3 d'eau du Léman.
5. **La température du Rhône à Chancy** peut apparaître de prime abord paradoxale. En effet, c'est la première fois que l'on observe, non pas une augmentation, mais bien une diminution de la température moyenne estivale mesurée en 2006 entre deux stations, passant de $19.7 \pm 4.5^{\circ}\text{C}$ au Halle de l'île à $18.4 \pm 3.7^{\circ}\text{C}$ à Chancy. En fait, ce sont les apports d'eau froide de l'Arve qui sont principalement responsable de ce phénomène.

Cette analyse montre que la situation thermique du Rhône est éminemment complexe. Elle dépend de nombreux facteurs indépendants, en première instance, de phénomènes purement climatiques, mais également des apports d'eau des affluents. Ainsi, selon que le réchauffement climatique induirait une augmentation ou une diminution des débits de ceux-ci, la température des eaux en aval devrait suivre cette évolution. Par ailleurs, la présence du Léman au milieu du parcours modifie complètement la donne. Finalement les accroissements de température estivale observés sont beaucoup plus faibles que pour les autres rivières étudiées dans le présent rapport, ceci essentiellement dû au débit considérable du fleuve.

4.3.5 Effet du débit

Le débit peut jouer un rôle important sur le régime thermique d'une rivière. Cela a été démontré précédemment. On peut également le mettre en évidence en comparant les régimes thermique de la Versoix et de ses deux effluents le Brassu et le Nan de Pry (Figure 52).

La Versoix est un cas intéressant, puisqu'elle est constituée en amont d'une rivière unique, qui se sépare ensuite en trois éléments : (1) la Versoix proprement dite dont on va trouver l'embouchure à Versoix, et qui conserve la majeure partie du débit initial, (2) le Brassu et (3) le Nan de Pry, deux effluents qui vont se jeter dans le Léman à la hauteur de Céligny avec un débit relativement faible. Ces 3 cours d'eau ont donc une même origine et donc une température de l'eau identique au moment où ils se séparent. A leur arrivée dans le Léman cependant, leur température est fortement différente tant en valeurs moyennes qu'en amplitudes, avec une température nettement plus faible pour La Versoix comparée à celles des effluents. Le débit du cours d'eau apparaît donc jouer un rôle important dans ce cas.

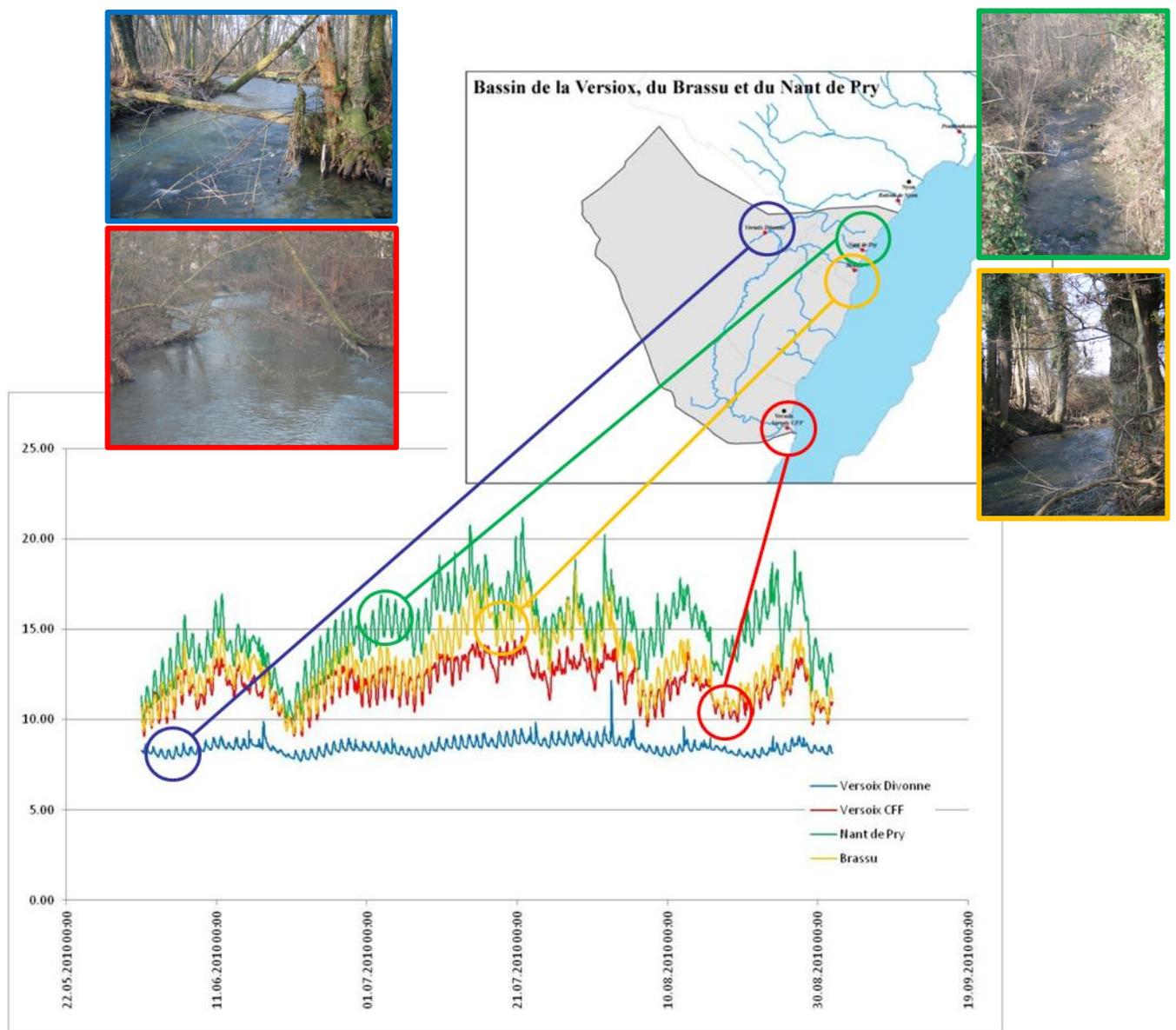


Figure 52: Localisation des enregistreurs et régimes thermiques de la Versoix et de ses effluents

4.4 Analyses des données

4.4.1 Température de l'air

Pour établir un modèle permettant d'estimer la température de l'eau à partir de divers paramètres environnementaux, la température moyenne journalière de l'eau est parfois corrélée à la température de l'air le même jour ou les jours précédents. Il s'agissait donc de déterminer avec les températures de quel jour celles de l'eau étaient les mieux corrélées.

La température moyenne de l'eau, déterminée pour chaque station, a été corrélée à la température moyenne de l'air mesurée sur le même site, le jour même (J-0), ou les jours précédents (J-1 à J-7). Puis, en comparant les coefficients de corrélation linéaire (R^2), on peut ainsi déterminer, pour chaque station, aux valeurs de température de l'air de quel jour, celles de l'eau sont les mieux corrélées.

Tableau 10: Coefficient de corrélation linéaire (R^2) entre températures moyennes journalières de l'eau et de l'air pour le même jour (J-0) ou les jours précédents (J-1 à J-7) pendant l'été 2010

Station	J-0	J-1	J-2	J-3	J-4	J-5	J-6	J-7
Boiron BAM	0.0031	0.0002	0.0026	0.0028	0.0066	0.0059	0.0035	0.0041
Boiron entrée forêt	0.5601	0.4941	0.3421	0.2442	0.2224	0.2030	0.2089	0.1875
Boiron Fontaine Chasseur	0.8605	0.7441	0.4886	0.3167	0.2315	0.1939	0.1789	0.1380
Boiron aval Fontaine	0.8361	0.7936	0.5408	0.3428	0.2297	0.1788	0.1447	0.1021
Boiron Lécherres	0.4235	0.4080	0.2685	0.1699	0.1176	0.0561	0.0244	0.0059
Boiron Pt 15	0.8819	0.7648	0.5021	0.2815	0.1514	0.0877	0.0539	0.0180
Boiron Moulin Martinet	0.8174	0.7893	0.5763	0.3634	0.2137	0.1186	0.0877	0.0561
Boiron Moulin au loup	0.8044	0.8003	0.5969	0.4038	0.2571	0.1671	0.1336	0.0921
Boiron aval Villars	0.7610	0.7986	0.5998	0.4179	0.2773	0.1860	0.1449	0.1013
Boiron aval Irence	0.8088	0.8588	0.6572	0.4530	0.3023	0.2092	0.1630	0.1130
Boiron amont Perceval	0.9424	0.8391	0.6111	0.4043	0.2565	0.1605	0.1163	0.0777
Boiron aval Perceval	0.9323	0.8759	0.6501	0.4268	0.2747	0.1865	0.1345	0.0823
Boiron Lully	0.9225	0.8937	0.6868	0.4920	0.3429	0.2446	0.1820	0.1235
Boiron Embouchure	0.8791	0.8999	0.7098	0.5147	0.3591	0.2510	0.1544	0.1250
Nozon Vaultion	0.6071	0.5562	0.3739	0.2607	0.1953	0.1744	0.1624	0.1207
Nozon Jonction	0.7289	0.7396	0.5308	0.3386	0.1988	0.1074	0.0634	0.0219
Venoge Eclépens	0.6923	0.7890	0.6419	0.4584	0.3167	0.2104	0.1544	0.0932
Venoge Embouchure	0.7484	0.8380	0.7141	0.5118	0.3337	0.2097	0.1426	0.1083
Broye Palezieux	0.8312	0.8949	0.7082	0.4691	0.2830	0.1904	0.1534	0.0938
Broye Moudon	0.8358	0.8648	0.6864	0.4675	0.2895	0.1873	0.1382	0.0803
Versoix Divonne	0.2268	0.3696	0.4293	0.4671	0.5082	0.4151	0.3579	0.2487
Versoix CFF	0.5556	0.6414	0.5097	0.3736	0.3273	0.2702	0.2269	0.1851
Versoix Nant de Pry	0.7700	0.7335	0.5364	0.4070	0.3269	0.2429	0.1955	0.1689
Versoix Brassu	0.4912	0.5464	0.4253	0.3526	0.3251	0.3016	0.2815	0.2515
Veveyse amont	0.7923	0.8780	0.7290	0.5252	0.3389	0.2327	0.1829	0.1177
Orbe Frontière	0.6492	0.7734	0.6752	0.4954	0.3499	0.2751	0.2302	0.1520
Orbe Thielle Yverdon	0.5023	0.5833	0.5618	0.4234	0.2873	0.1894	0.1384	0.0873
Talent source	0.8854	0.8613	0.6208	0.4085	0.2633	0.1846	0.1465	0.0899
Arnon Champagne	0.7301	0.7470	0.5428	0.3727	0.2679	0.2087	0.1775	0.1147
Promenthouse	0.7638	0.7333	0.5311	0.3987	0.3055	0.2051	0.1532	0.1064
Boiron Nyon	0.8078	0.8867	0.6983	0.4792	0.3211	0.2200	0.1620	0.1144
Paudèze	0.8620	0.9053	0.7016	0.4847	0.3081	0.2091	0.1592	0.0970
Serine Vaud	0.6385	0.7398	0.6013	0.4283	0.2957	0.2035	0.1557	0.1000
Vaux	0.5824	0.6018	0.4788	0.3329	0.2511	0.1975	0.1582	0.1044
moyenne	0.7098	0.7248	0.5567	0.3909	0.2746	0.1966	0.1550	0.1083
écart-type	0.2042	0.1916	0.1507	0.1079	0.0836	0.0710	0.0656	0.0560
n R^2 max observé	14	18	0	0	2	0	0	0
%	41%	53%	0%	0%	6%	0%	0%	0%

On constate que pour 53% des stations le meilleur R^2 est obtenu en corrélant les valeurs de températures moyennes journalières de l'eau à celles de l'air du jour précédent et pour 41% le même jour. Pour 2 stations (6%), la corrélation la meilleure est obtenue avec la température de l'air mesurée 4 jours plus tôt. A noter que ces deux stations se trouvent, en tête de bassin, proches des sources.

4.4.2 Distance à la source

Dans la plupart des cas évoqués plus haut, les corrélations entre température de l'air et de l'eau sont d'autant plus fortes que la station est située plus en aval (Figure 53).

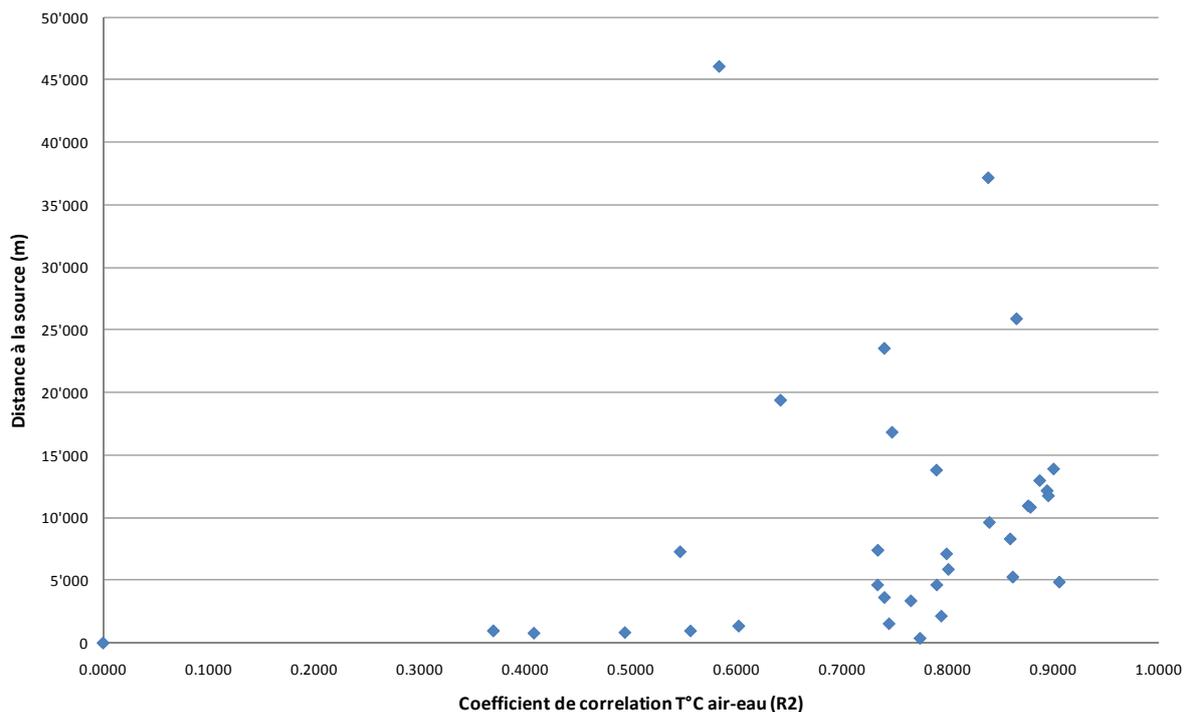


Figure 53: Corrélation entre le coefficient de corrélation linéaire entre la température de l'eau et celle de l'air mesurée le jour précédent, et la distance à la source

D'une manière générale, les stations les plus froides en moyenne sont effectivement celles situées près des sources des rivières et les plus chaudes celles proches des embouchures. Toutefois, la corrélation entre distance à la source et température moyenne reste faible lorsqu'elle est appliquée à l'ensemble des données, mais forte généralement lorsque l'on ne prend en compte que les stations appartenant à un même bassin versant. Ainsi, plus la distance à la source est grande, plus l'eau, à débit identique, mettra de temps à atteindre un point plus en aval. Or, comme l'eau se réchauffe au contact de l'air, plus le temps de parcours est long, plus l'eau se réchauffera, d'où la corrélation entre température moyenne de l'eau et distance à la source.

4.4.3 Corrélation entre température et écomorphologie

Ecomorphologie locale

Plusieurs observations (voir plus haut) indiquent que la température de l'eau est influencée par l'écomorphologie de la rivière. Les analyses statistiques préliminaires n'ont pas montré de différences entre les différents descripteurs de température de l'eau et les 3 premières classes d'écomorphologie (naturel, peu atteint, très atteint). Par contre, on obtenait des valeurs très différentes avec la classe 4 (artificiel). Dès lors, nous avons regroupés les rivières en deux classes d'écomorphologie :

1. Non canalisé
2. Canalisé

Ceci peut être démontré en comparant, pour les différentes rivières étudiées au niveau régional, leurs différentes températures estivales 2010 avec leur écomorphologie (Figure 54).

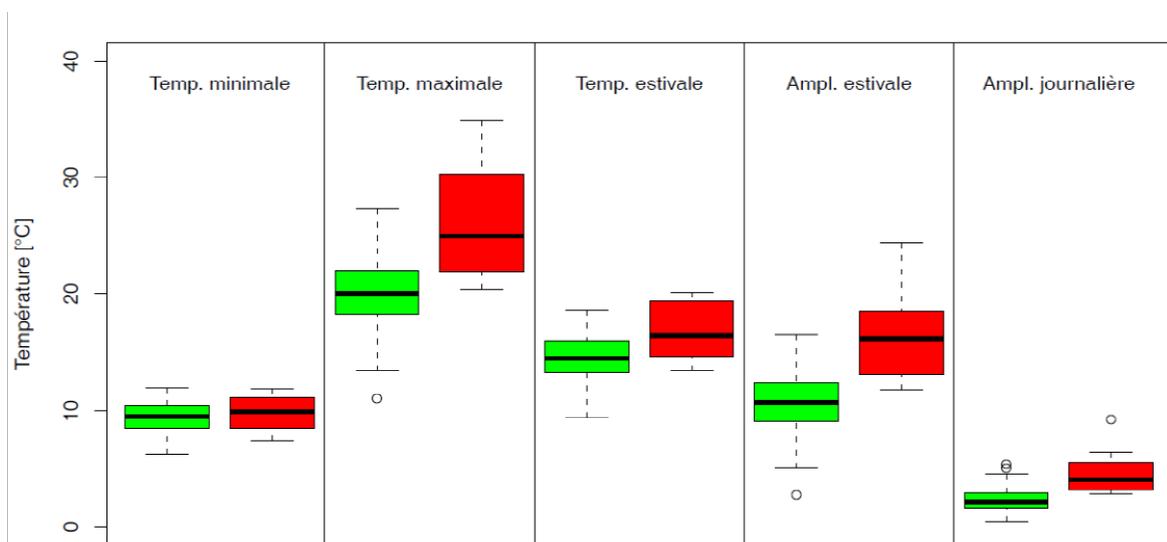


Figure 54: Corrélation entre température de l'eau durant l'été 2010 et écomorphologie locale des rivières (moyenne ± écart-type), Non canalisé : vert, canalisé : rouge

On constate que :

- Dans les secteurs canalisés, les températures sont globalement plus élevées que dans les secteurs non canalisés.
- Pour la température minimale, il n'y a pas de différence statistique significative (T-Test, $t=-0.88$, $dl=67$, $p=0.38$).
- Pour la température maximale, on observe une différence statistique significative de **6.3°C** en moyenne entre les secteurs non canalisés et canalisés (T-Test, $t=-5.14$, $dl=67$, $p<0.001$).
- Pour la température moyenne estivale, on observe une différence statistique significative de **2.3°C** en moyenne entre les secteurs non canalisés et canalisés (T-Test, $t=-2.82$, $dl=67$, $p<0.01$).
- Pour l'amplitude estivale, on observe une différence statistique significative de **5.9°C** en moyenne entre les secteurs non canalisés et canalisés (T-Test, $t=-5.53$, $dl=67$, $p<0.001$).

- Pour l'amplitude journalière estivale, on observe une différence statistique significative de **2.4°C** en moyenne entre les secteurs non canalisés et canalisés (T-Test, $t=-5.14$, $dl=67$, $p<0.001$).

Ainsi la dégradation de la qualité écomorphologique d'une rivière induit directement une augmentation de sa température, Cette augmentation est particulièrement importante pour la température maximale et l'amplitude thermique, deux paramètres clé pour la maintenance de certaines espèces dans ces écosystèmes.

Accroissement de température

Pour les rivières pour lesquelles on dispose de plusieurs enregistreurs, on peut déterminer pour chaque tronçon entre deux enregistreurs son écomorphologie locale ainsi que l'accroissement de température observé par rapport au point plus en amont (Tableau 11).

Tableau 11: Ecomorphologie et accroissement de température

Ecomorphologie locale	Accroissement pondéré T°C/km		
	Moyenne	Ecart-type	n
1	0.5	0.8	19
2	0.6	1.0	4
3	1.3	1.8	9
4	0.0	1.0	6

Dans les tronçons naturels ou peu atteints (écomorphologie 1 et 2), l'accroissement de température est en moyenne de 0.5 à 0.6°C/km, alors qu'il est plus du double dans les secteurs très atteints (écomorphologie 3). Dans les secteurs non naturels ou artificiels (écomorphologie 4), l'accroissement est en moyenne nul. Cette dernière valeur n'est pas forcément étonnante puisque ces secteurs sont souvent des tronçons de rivière sous tuyaux, donc sous terre, à l'abri du soleil.

A nouveau, la dégradation écomorphologique d'un cours d'eau (le faisant passer d'une écomorphologie 2 à 3) on double ses risques en lien avec le réchauffement climatique.

Ecomorphologie amont

On n'observe aucune corrélation significative entre les différents paramètres de température de l'eau et l'écomorphologie amont (Régression linéaire, $R^2=0.02$, $dl=69$, $p=0.26$). Cela indique que l'écomorphologie peut jouer **localement** un rôle important, mais que, par contre, cette influence peut être tamponnée à l'échelle de la rivière lorsque l'eau parcourt des tronçons présentant des écomorphologies différentes.

4.4.4 Effet de la ripisilve

Les rivières bordées d'arbres sont significativement plus froides que celles sans couvert végétal (Figure 20).

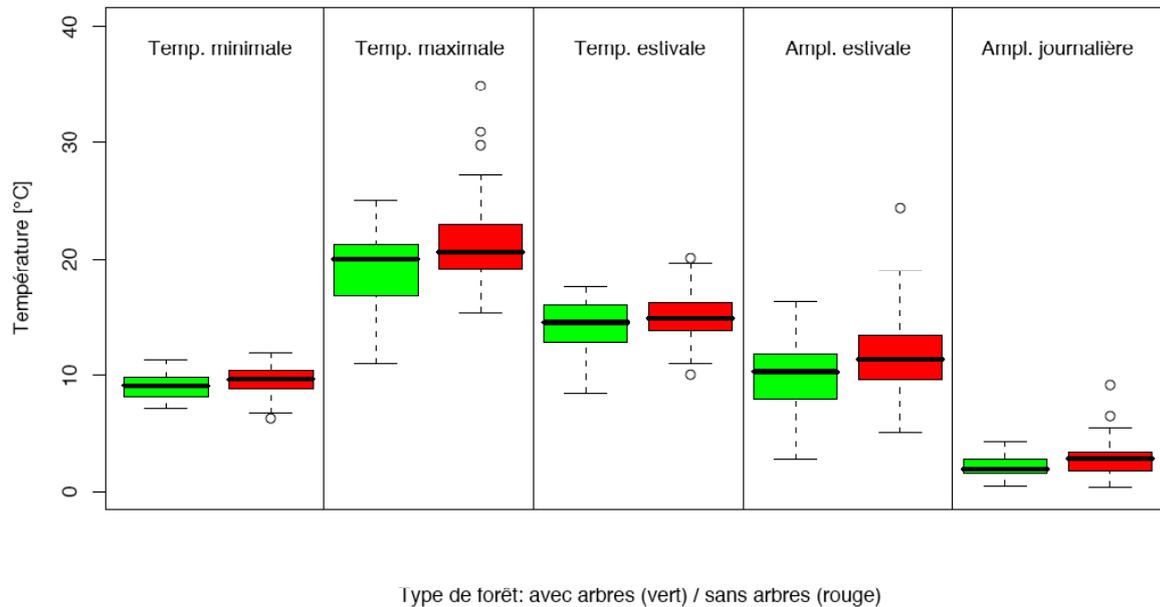


Figure 20: Effet de la ripisilve sur la température des rivières. Vert : avec une forêt (classes 1 à 4). Rouge : sans forêt (classe 0)

Les analyses statistiques, tenant compte de l'effet de l'altitude, c'est-à-dire en analysant les résidus de la régression linéaire entre température de l'eau et altitude entre chacune des deux classes, montrent :

- Une différence significative de **1.14°C** pour la température *estivale moyenne* entre les rivières bordées de forêt et celles sans forêt (test de t : $t = -2.12$, $dl = 71$, $P < 0.05$, intervalle de confiance à 95% = [2.22 : 0.7]).
- Une différence significative de **0.57°C** pour la température *estivale minimale* entre les rivières bordées de forêt et celles sans forêt (test de t : $t = -2.11$, $dl = 71$, $P < 0.05$, intervalle de confiance à 95% = [1.10 : 0.03]).
- Une différence significative de **2.59°C** pour la température *estivale maximale* entre les rivières bordées de forêt et celles sans forêt (test de t : $t = -3.00$, $dl = 71$, $P < 0.01$, intervalle de confiance à 95% = [4.31 : 0.87]).
- Une différence significative de **2.60°C** pour l'*amplitude estivale* de température entre les rivières bordées de forêt et celles sans forêt (test de t : $t = -3.00$, $dl = 71$, $P < 0.05$, intervalle de confiance à 95% = [3.60 : 0.48]).
- Une différence significative de **0.84°C** pour l'*amplitude journalière* de température entre les rivières bordées de forêt et celles sans forêt (test de t : $t = -2.58$, $dl = 71$, $P < 0.05$, intervalle de confiance à 95% = [1.50 : 0.19]).

Les forêts de résineux ne produisent que très peu d'évapotranspiration par rapport aux forêts de feuillus et cette capacité d'évapotranspiration peut conditionner la faculté des arbres à modifier les conditions climatiques locales, en particulier la température.

On remarque toutefois que les rivières bordées de résineux sont significativement plus froides (Figure 21).

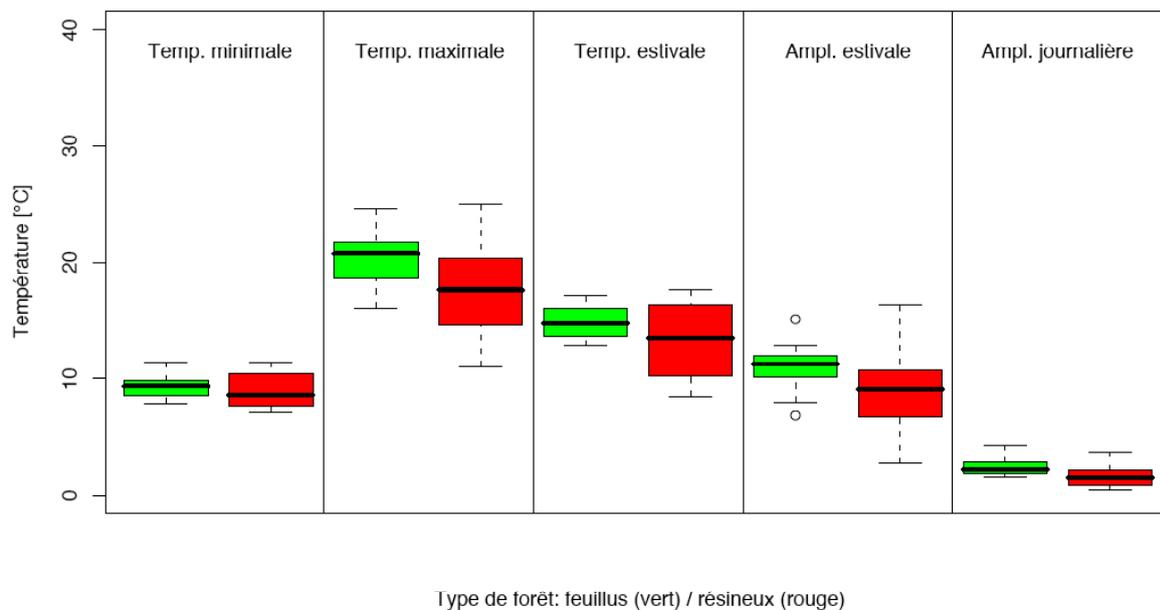


Figure 21: Effet de la ripisilve sur la température des rivières. Vert : avec évapotranspiration (classes 2 et 4). Rouge : sans évapotranspiration (classes 1 et 2)

Toutefois, comme les forêts de feuillus se trouvent généralement en plaine et celles de résineux en altitude, l'effet potentiel de l'évapotranspiration pourrait être masqué. En effet, l'effet de diminution de température lié au phénomène d'évapotranspiration pourrait être annulé par l'effet d'altitude, car les rivières de plaines sont généralement plus chaudes que celles d'altitude.

En résumé, la végétation riveraine semble influencer la température d'une rivière. Sa présence régule les fluctuations journalières et diminue les écarts de température.

4.4.5 Débit

Pour certaines rivières prises individuellement, une diminution de débit peut se traduire par une élévation de température (voir exemple plus haut). Toutefois, sur l'ensemble des rivières, avec le jeu de données disponibles, le débit moyen ne semble pas influencer significativement la température de l'eau (Régression linéaire avec transformation logarithmique, $R^2=0.00$, $dl=34$, $p=0.97$).

4.5 Discussion

Le régime thermique d'une rivière dépend de nombreux facteurs, d'origine naturelle ou anthropique, que l'on peut classer en 4 groupes principaux (Smith, 1975; Johnson, 2004; Caissie, 2006) : (1) les conditions atmosphériques (Brown and Krygier, 1970; Smith, 1975; Johnson, 2004) qui comprennent notamment la radiation solaire, la température de l'air, le vent, les précipitations, l'évaporation, (2) la topographie qui comprend l'ombrage, la végétation, la géologie, l'orientation, la latitude, l'altitude, (3) le débit qui comprend la friction, le volume d'eau, la pente, les turbulences, les apports / prélèvements d'eau, (4) la nature du lit de la rivière (Clark *et al.*, 1999; Malcolm *et al.*, 2002) qui comprend la conduction, les échanges hyporhéiques, les apports de la nappe. Le rôle de ces différents éléments a pu être mis en évidence grâce aux diverses mesures effectuées dans le cadre de ce projet.

4.5.1 Facteurs d'origine naturelle

Débit

L'exemple de la Versoix, ou du Rhône valaisan, démontre que le débit peut jouer un rôle important dans certains cas. Néanmoins, l'analyse effectuée sur l'ensemble des données disponible n'a pas pu monter un effet significatif.

Plusieurs auteurs ont toutefois mis en évidence les relations entre température et débit (Brown, 1969). Poole & Berman (2001) expliquent de manière très convaincante les relations entre débit et température par une analogie entre processus physique et chimique : L'énergie thermique peut être assimilée à un composé chimique pouvant se dissoudre dans l'eau. Plus la quantité de ce produit augmente dans un volume d'eau donné, plus sa concentration s'accroît. Traduit dans le présent contexte : plus l'énergie thermique augmente dans une rivière (suite au réchauffement climatique ou au déboisement des berges, par exemple) plus la température de l'eau croît. *Clim-arbres* pourrait donc limiter ces apports supplémentaires d'énergie par les plantations d'arbres. Mais l'analogie ne s'arrête pas là. Ainsi, pour une même quantité de produit, une diminution du volume d'eau dans le milieu récepteur induit concomitamment un accroissement de la concentration du produit concerné. Dès lors, par analogie, pour une même quantité d'énergie thermique incidente, une diminution du débit de la rivière induira une augmentation de sa température. Débit et température sont donc intimement liés.

Les efforts consentis pour éviter des apports d'énergie thermique supplémentaire dans les cours d'eau seront donc vains si l'on ne s'attache pas dans le même temps à leur garantir un débit suffisant. Par conséquent les zones où des pompages ou des dérivations sont effectués deviennent *de facto* particulièrement sensibles au réchauffement climatique.

Topographie

D'une manière générale, plus les rivières sont petites, plus leurs variations de température sont importantes (Caissie, 2006). Pour les rivières de la côte nord-ouest des Etats-Unis, les écarts journaliers de température sont d'autant plus grands que les rivières sont de faible profondeur et non ombragées (Sinokrot and Stephan, 1993). Ainsi dans le présent rapport, l'augmentation des amplitudes thermiques a clairement été mis en évidence dans les secteurs canalisés et ou sans évapotranspiration. Ce phénomène a également été clairement démontré pour la Tee River en Angleterre (Smith, 1975). Plus la rivière est large et sa profondeur faible, plus les variations de température journalière seront importantes (Caissie, 2006). C'est notamment le cas pour la Venoge dans le secteur d'Eclépens. De même, la température des cours d'eau augmente généralement avec leur ordre (classification), ainsi que de l'amont vers l'aval (Caissie, 2006), comme démontré dans plusieurs exemples ci-dessus.

Dans la littérature, on trouve une valeur d'accroissement de température de l'ordre de 0.6°C/km pour les petites rivières, de 0.2°C/km pour de taille intermédiaire et de 0.09°C pour les grandes rivières (Caissie, 2006). Ces valeurs correspondent bien à ce que l'on observe dans la présente étude.

D'une manière générale, la structure physique d'une rivière change d'amont en aval (river continuum). Dès lors l'influence des différents compartiments sur la température de l'eau varie concomitamment (Poole and Berman, 2001) (Tableau 12).

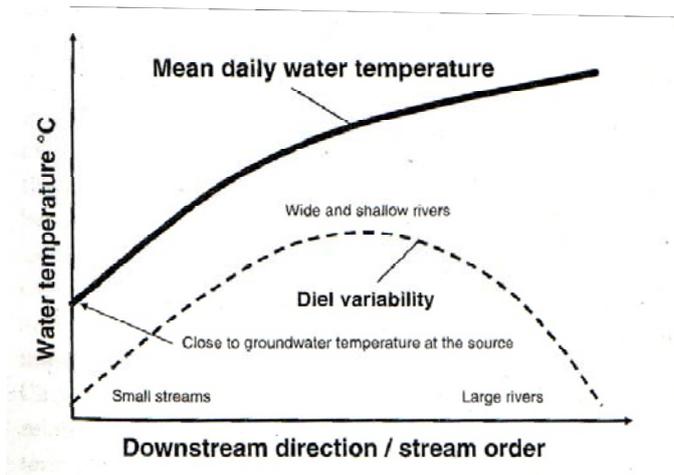
Tableau 12: Influence relative des caractéristiques d'une rivière sur la température pour de petits, moyens et grands cours d'eau (Poole and Berman, 2001)

Ordre	Ombre de la ripisilve	Débit de la rivière	Affluents	Apport de la nappe phréatique	Apport hyporheic
1-2	Fort	Faible	Modéré	Fort	Faible à modéré
3-4	Modéré	Modéré	Fort	Modéré	Modéré à fort
5 et +	Faible	Fort	Faible à modéré	Faible à modéré	Modéré à fort

Pour les petits cours d'eau (ordre 1-2), l'ombre de la ripisilve et les apports de la nappe phréatique apportent une stabilité thermique à la rivière. Dans les cours d'eau de moyenne importance, c'est surtout les apports des affluents qui sont prépondérants. Finalement, pour les grands cours d'eau, leur importante diversité morphologique (présence de bras morts, de cours principaux/secondaires) entraîne une grande variation thermique entre les compartiments. Par ailleurs, l'inertie thermique liée aux grands volumes d'eau en présence permet dans une certaine mesure à la rivière de résister aux changements brusques de température (Poole and Berman, 2001).

Ce tableau démontre clairement que l'efficacité de *Clim-arbres* ne sera pas la même selon à quel cours d'eau le projet s'applique. C'est bien pour les petits cours, de faible numéro d'ordre, que le projet devrait se montrer le plus efficace puisque c'est pour eux que l'ombre de la ripisilve a l'influence la plus forte. En Suisse, 60% des cours d'eau ont une largeur inférieure à 2 m, c'est probablement sur eux que ce type d'aménagements aura le plus de chance d'être réalisé.

Corrélation avec la distance à la source



D'après (Caissie, 2006), la température moyenne de la rivière augmente avec la distance à la source. Généralement l'accroissement de température ne serait pas linéaire et le taux d'accroissement plus grand pour les petites rivières. De même l'amplitude thermique moyenne journalière serait faible pour les petites rivières, maximal pour les rivières larges et peu profondes et faible pour les grandes rivières.

Figure 55: Corrélation entre température moyenne, amplitude thermique et distance à la source (Caissie, 2006)

Hétérogénéité du milieu

La rivière peut être thermiquement hétérogène si son cours est diversifié. Ainsi, des zones plus profondes peuvent parfois présenter des régimes de température différents de ceux du reste de la rivière et ainsi constituer des refuges appréciables pour une partie de la faune (Clark *et al.*, 1999). Le maintien de cette hétérogénéité est un facteur essentiel de stabilité thermique pour un cours d'eau (Poole and Berman, 2001). Dans certaines rivières anglaises, la variation des profondeurs pouvaient induire des différences thermiques locales jusqu'à 5°C. D'une manière générale, la température dans les zones de faible profondeur varie beaucoup plus que dans les zones profondes qui sont thermiquement plus stables et moins soumises aux variations de température de l'air (Clark *et al.*, 1999).

Cette constatation offre des perspectives intéressantes dans le cadre de la renaturation. En effet, la création à certains endroits de zones profondes serait donc à même de créer des poches d'eau froide servant potentiellement de refuge aux poissons lors des épisodes de canicule. Le maintien de telles zones dépend cependant grandement des capacités de charriage de la rivière.

Présence de lac ou de retenue

La présence de lacs le long du cours d'eau influence considérablement le régime thermique des rivières comme démontré pour plusieurs rivières danoises (Pedersen and Sand-Jensen, 2007). Ainsi, la présence de marais, de lacs ou de barrages le long du cours de la rivière peut considérablement augmenter le réchauffement de celle-ci (Caissie, 2006; Pedersen and Sand-Jensen, 2007). C'est très clairement le cas pour le Rhône, par exemple, dont le régime thermique est totalement différent en amont ou en aval du Léman. C'est également le cas sur l'Aubonne où la retenue hydroélectrique induit d'importantes modifications de température de l'eau en aval.

Nature du substrat

Le type de substrat du lit de la rivière peut également jouer également un rôle important. Le réchauffement d'un cours d'eau soumis à un même rayonnement solaire peut être très différents selon que l'eau coule sur la roche nue ou sur des sédiments (Johnson, 2004). Dans certains cas, la température du sol peut également influencer considérablement celle de l'eau (Brosofske *et al.*, 1997). Selon la perméabilité du substrat, en fonction de la granulométrie, des quantités non négligeables d'eau, de température variable, peuvent circuler à l'intérieur même du lit et influencer significativement la température de l'eau de la rivière (Clark *et al.*, 1999). Cela a clairement été démontré le long du secteur test (Chapitre 2).

Présence de macrophytes

La présence de macrophytes peut isoler une portion d'eau proche de la surface qui est dès lors susceptible de se réchauffer de manière importante à certains moments de la journée. À l'inverse la végétation palustre ou riveraine peut induire un gradient de température transversal non négligeable, les portions ombragées étant significativement plus froide (Clark *et al.*, 1999). Dans certaines rivières anglaises, il a été démontré que la présence de *Ranunculus* spp., *Elodea canadensis* et *Nastrutium aquaticum*, pouvait isoler une fine couche d'eau en surface du reste de la colonne d'eau, qui se réchauffait significativement en milieu de journée (Clark *et al.*, 1999). L'effet de la présence de macrophytes sur la température de l'eau a été clairement démontré sur le secteur test (chapitre 2).

Par ailleurs, la présence d'un cordon boisé ou d'une végétation palustre ou riveraine, dans les cours d'eau calme, peut induire un gradient thermique latéral, les zones à l'ombre étant significativement plus froides (jusqu'à 2°C) (Clark *et al.*, 1999). De même, la présence de macrophytes réduit d'autant la vitesse du courant dans certains secteurs et favorise ainsi l'hétérogénéité thermique des eaux (Clark *et al.*, 1999).

Cela démontre que même pour de larges rivières, *Clim-arbres* peut être utile car la plantation d'arbres ou de roselières sur les rives permettrait de créer des conditions locales thermiques favorables même si cela n'influence pas de manière significative la température dans le chenal principal.

Présence d'un cordon boisé

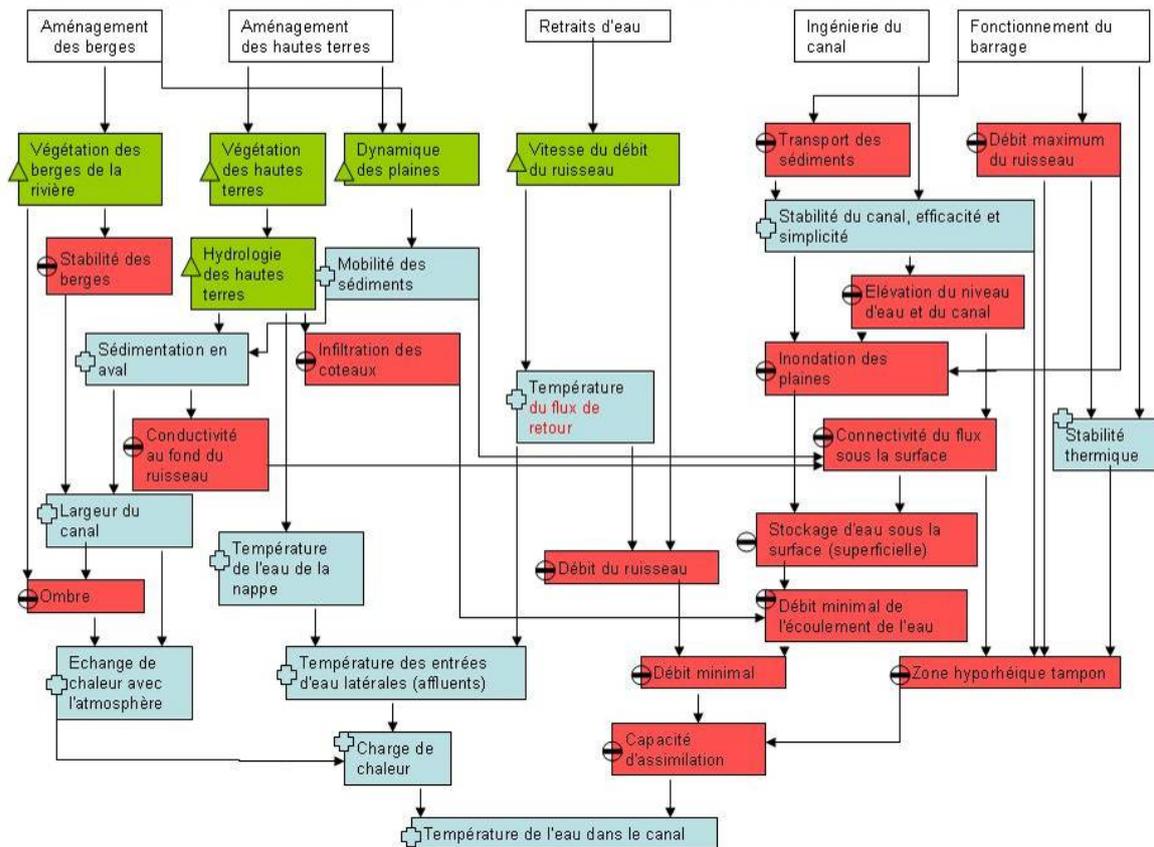
La végétation riveraine influence de manière complexe la température d'un cours d'eau (Moore *et al.*, 2005) : La canopée réduit en effet la radiation solaire de 90 à 75% généralement selon la densité du feuillage. La quantité de précipitation retenue par le feuillage et perdue par évaporation varie de 10 à 30% en fonction des espèces végétales. La vitesse du vent est généralement de 10 à 20% inférieure en forêt qu'en espace ouvert. La canopée augmente la radiation de longue longueur d'onde. Ces phénomènes ont pour effet de modifier les conditions thermiques et l'humidité dans la forêt. Ainsi, la température en journée en forêt est généralement inférieure de 3 à 6°C à celle des espaces ouverts et de 1°C supérieure durant la nuit. Les écarts de températures jour-nuit au sol peuvent être encore plus grands, de 10 à 15°C entre la forêt et les espaces ouverts. C'est exactement ce que l'on observe le long du Boiron (chapitres 2 et 3) ou dans les autres rivières dont la ripisilve produit de l'évapotranspiration (présent chapitre).

Pour maintenir un microclimat, une étude américaine a démontré qu'un cordon boisé d'une largeur minimale de 45 m était nécessaire (Brososke *et al.*, 1997). La végétation empêche tout d'abord la radiation solaire d'atteindre l'eau et en réduit ainsi l'apport en énergie. Par ailleurs, elle peut également réduire la vitesse du vent directement au-dessus de la surface et ainsi piéger de l'air sur l'eau. Cette action a pour conséquence la réduction des échanges thermiques entre eau et air en diminuant les processus de convection et d'advection (Poole and Berman, 2001). Plus la surface du lit de la rivière est grande, plus les processus de conduction et de radiation seront rapides entre l'eau et l'air, donc moins grande sera l'influence du cordon boisé (Poole and Berman, 2001). *Clim-arbres* sera donc d'autant plus efficace que la largeur de la rivière est faible.

4.5.2 Facteurs d'origine anthropique

Les interactions entre facteurs anthropiques peuvent souvent être complexes dans leurs effets sur la température d'une rivière (Tableau 13)

Tableau 13: Interactions potentiels entre facteurs anthropiques sur la température de l'eau d'une rivière (Poole and Berman, 2001)



Barrages hydroélectriques

Les barrages à accumulation en altitude, uniquement dans un contexte thermique, peuvent apparaître favorables puisqu'ils apportent via leurs conduites forcées, de l'eau fraîche directement en plaine. Par contre, dans un contexte écologique plus large, leur influence peut être extrêmement négative en raison des variations importantes de débit que leur mode d'exploitation impose au cours d'eau récepteur ou dans les secteurs à débit réservé. Ainsi, dans la partie de la rivière ne recevant que l'eau résiduelle, le faible débit pourrait permettre une élévation importante de la température à certains moments de la journée. En conséquence, une mesure compensatoire qui pourrait être imposée pour des renouvellements de concession pour des ouvrages hydro-électriques pourrait être le boisement des berges des cours d'eau dans les portions à débit réservé.

La situation est différente pour les barrages au fil de l'eau, en plaine, qui peuvent être assimilés à des lacs au travers desquels passe la rivière. Au Danemark, pour plusieurs rivières dans ce contexte, il a été démontré que la présence des lacs avait pour effet d'induire une température

estivale supérieure (comme dans le cas du Rhône genevois après son passage dans le Léman et avant la confluence avec l'Arve) et une température hivernale inférieure que dans les rivières qui en sont dépourvus (Pedersen and Sand-Jensen, 2007). Dans le cas de l'Aubonne, étudié ici, c'est plutôt un effet de tampon thermique du barrage qui a été mis en évidence.

Prélèvements d'eau

Les prélèvements d'eau limitent le débit et *de facto* expose plus facilement les rivières aux risques de réchauffement. Par ailleurs, certaines activités industrielles (centrales nucléaires, installations de climatisation) peuvent être à la base de réchauffements directs locaux de la température des eaux (Smith, 1975; Sinokrot and Stephan, 1993). En Angleterre, par exemple, près de 50% des demandes des prélèvements d'eau concernent des installations de refroidissement pour des centrales énergétiques (Smith, 1975).

Endiguements

L'endiguement des cours d'eau génère une diminution des interactions entre la rivière proprement dit et les secteurs directement avoisinants. L'augmentation des vitesses résultant de ces endiguements réduit d'autant les possibilités de l'eau d'entrer en contact avec l'aquifère alluvial et ainsi diminue les chances pour l'eau souterraine de soutenir les débits lors des épisodes d'étiage estivaux. Par ailleurs, la perte de plusieurs bras temporaires au profit d'un seul lit large et linéaire, réduit *de facto* l'influence potentielle d'un cordon boisé puisque son efficacité est inversement proportionnelle à la largeur du cours d'eau. Par ailleurs, la simplification du système hydrologique diminue l'hétérogénéité thermique potentiel présent et diminue ainsi d'autant les possibilités de présence de zones plus fraîches liés à des facteurs environnementaux locaux particuliers (Poole and Berman, 2001). Finalement ces dégradations de l'écomorphologie peuvent être directement responsables d'un accroissement de la température de l'eau en aval et surtout d'une augmentation des amplitudes estivales ou journalière, comme cela a été clairement démontré pour plusieurs cours d'eau étudiés dans la présente étude.

Déboisement

En Oregon, les conflits liés au déboisement et à son effet sur les milieux aquatiques sont connus depuis longtemps et ont donné lieu à une étude pluridisciplinaire détaillée dès 1958 (Brown and Krygier, 1970). En 1969, une étude sur les effets du déboisement de deux rivières en Alaska mettait en évidence une augmentation significative des températures moyennes mensuelles de 2°C et un accroissement des températures maximales mesurées en juillet-août de 4.5°C (Brown and Krygier, 1970). La comparaison entre deux méthodes de déboisement (coupe claire ou coupe sélective) dans les bassins versants de deux rivières d'Oregon sur la côte du Pacifique a montré que les coupes claires pouvaient induire sur les petits cours d'eau une élévation de température mensuelle maximale de 7°C alors que dans le même temps, les températures restaient inchangées dans les secteurs soumis à des coupes sélectives (Brown and Krygier, 1970). En Oregon, un accroissement de la température de l'eau de plus de plusieurs degrés a été enregistré sur une distance de moins de 1.3 km après le déboisement des berges (Caissie *et al.*, 2001).

Le déboisement est maintenant clairement identifiée comme une source importante de perturbation du régime thermique des rivières (Sinokrot and Stephan, 1993; Caissie *et al.*, 2001; Moore *et al.*, 2005; Caissie, 2006). Les effets cumulés d'une élévation des températures et d'une dégradation générale de l'environnement liés à des impacts anthropogènes pouvant créer une véritable menace générale pour la biodiversité de la faune aquatique, ont été clairement démontrés en Suisse (Moosmann *et al.*, 2005; Hari *et al.*, 2006), comme ailleurs (Rahel *et al.*, 1996; Hauer *et al.*, 1997; Clark *et al.*, 1999; Caissie *et al.*, 2001; Morgan *et al.*, 2001; Johnson,

2004; Cooney *et al.*, 2005; Caissie, 2006; Crozier and Zabel, 2006), ainsi que dans la présente étude.

Les débats sur les effets du déboisement sur la température des rivières est toujours vif aux USA (Moore *et al.*, 2005). Si on admet généralement des mesures de protection pour les cordons boisés en bordure des larges rivières piscicoles, c'est n'est de loin pas le cas en revanche pour les petits cours d'eau sans poisson. En Colombie britannique par exemple, les cordons boisés riverains de rivières non piscicoles ne sont protégés que si le cours d'eau est une source d'eau de boisson. Si le lit est de moins de 1.5 m aucune protection n'est appliquée que le ruisseau soit piscicole ou non (Moore *et al.*, 2005).

Si les températures minimales ou moyennes journalières ne sont pas forcément significativement influencées par l'ombrage, en revanche les maxima de température sont nettement plus faibles sous ombrage (Johnson, 2004). En effet, sans cordon boisé ou avec un débit plus faible, la rivière perd ses facultés de tampon thermique. Il en résulte donc une augmentation de l'amplitude des écarts journaliers, possiblement sans modification significative des valeurs moyennes (Poole and Berman, 2001). Ces écarts ne peuvent être déterminés que par des mesures en continu qui font souvent défaut dans les jeux de données. Or, dans de nombreux cas, ce sont bien probablement ces maxima qui sont susceptibles de causer des dégâts importants à la faune et la flore.

Au centre des Etats-Unis par exemple, on prédisait en moyenne une élévation de 2.4 à 4.7°C. Pour les petits cours d'eau, on prévoyait que la température pourrait augmenter même de 6°C en été dans les secteurs où le cordon boisé aurait été détruit (Stefan and Sinokrot, 1993). Cet article précurseur évoquait donc déjà bien, dès 1993, le rôle protecteur essentiel de la végétation dans la lutte contre les effets du réchauffement climatique.

4.6 Résumé et conclusions

L'analyse détaillée d'un grand nombre de rivière de la région démontre que :

1. Une attention particulière doit être apportée quant au choix des paramètres descripteurs de la température. En effet, deux rivières peuvent avoir exactement la même température moyenne tout en présentant un régime thermique totalement différent.
2. Près de la moitié des rivières étudiées présentent une température moyenne estivale supérieure à 15°C et on observe que pour plus de 90% cette valeur est dépassée au moyen une fois durant l'été. On peut donc en conclure que de très nombreuses populations de salmonidés sont probablement en danger en relation avec le développement de la maladie rénale proliférative.
3. Pour la moitié des cours d'eau, la température de l'eau est la mieux corrélée avec les valeurs de température de l'air mesurée le jour-même, l'autre moitié avec les valeurs du jour précédent. Seuls les stations proches des sources réagissent plus tardivement avec la température de l'air.
4. Pour la plupart des rivières, la température de l'eau augmente d'amont en aval. C'est donc dans les secteurs proches des embouchures que les effets du réchauffement climatique se feront sentir en premier lieu. C'est également là que la qualité de l'eau est généralement la plus faible. Ces synergies induisent donc des conditions potentiellement très défavorables pour les poissons en aval des cours d'eau. C'est donc sur ces portions que les actions de

reboisement doivent être effectuées en premier lieu, tout en construisant des passes à poissons permettant aux espèces de migrer vers les zones amont des rivières moins atteintes.

5. Les secteurs canalisés, induisant une dégradation de l'écomorphologie du cours d'eau provoquent, dans les secteurs directement en aval, une brusque augmentation de la température moyenne et surtout une augmentation de l'amplitude thermique, tant estivale que journalière, avec la formation de vagues d'eau chaude. C'est donc dans les secteurs dégradés que les effets du réchauffement climatique seront les plus marqués.
6. La présence d'un lac ou d'une retenue peut induire des modifications importantes du régime thermique du cours d'eau.
7. La ripisilve joue un rôle prépondérant sur la température de l'eau en limitant les élévations de température ainsi que l'amplitude thermique. Sa présence est donc capitale.
8. Pour les grandes rivières et les fleuves, en raison de leur complexité, le présent projet n'apporte que peu de réponses et de concepts pouvant être sans autre extrapolés. *Clim-arbres* est donc peu adapté à de tels systèmes hydrologiques.

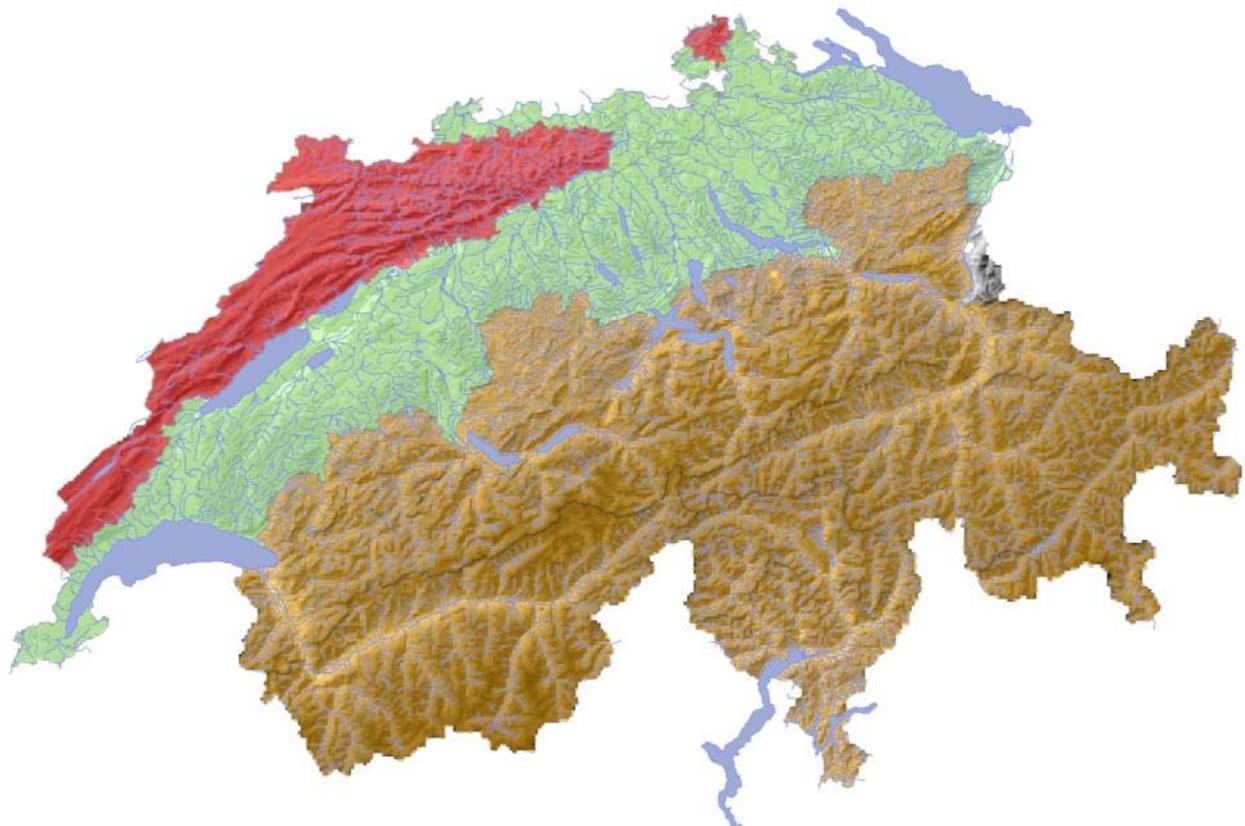
4.7 Annexes

Tableau 14: Données de température d'air en 2010 (source: Météosuisse)

stn	Nom	Longitude/Latitude	Coord.	Coord.	Altitude	T°C 2010	T°C Juillet 2010	T°C Août 2010	T°C été 2010
ABO	Adelboden	7°34/46°30'	609400	148975	1320	12.4	15.5	13.1	12.7
AIG	Aigle	6°55/46°20'	560400	130713	381	17.9	21.0	18.2	17.8
ALT	Altdorf	8°37/46°53'	690174	193558	438	17.2	19.8	17.2	16.9
AND	Andeer	9°26/46°37'	752687	164035	987	14.6	17.8	15.3	14.7
ANT	Andermatt	8°36/46°38'	688500	165340	1442	11.1	14.5	12.0	11.4
ARH	Altenrhein	9°34/47°29'	760350	261380	398	17.4	20.5	17.7	17.2
ARO	Arosa	9°40/46°47'	770730	183320	1840	9.6	13.4	10.2	10.0
ATT	Les Atteas	7°16/46°06'	586850	105310	2733				
BAS	Basel	7°35/47°32'	610911	265600	316	18.0	21.6	18.3	18.0
BEH	Passo del Bernina	10°01/46°25'	798660	143180	2307				
BER	Bern	7°28/46°59'	601929	204499	552	16.6	20.3	17.4	16.9
BEZ	Bezau	8°14/47°33'	659808	267693	325	17.8	20.9	17.9	17.6
BIL	Biel/Bienne	7°15/47°07'	586260	218840	433	18.1	21.8	18.2	18.1
BLA	Blatten	7°49/46°25'	629400	140975	1535	12.0	14.8	11.8	11.7
BRL	La Brévine	6°37/46°59'	536840	203750	1048				
BUF	Buffalora	10°16/46°39'	816494	170225	1968	9.2	12.5	10.2	9.5
BUS	Buchs	8°05/47°23'	648389	248365	386	17.4	20.3	17.5	17.1
CFD	La Chaux-de-Fond	6°48/47°05'	550923	214893	1018	13.8	17.0	14.0	13.8
CGI	Changins	6°14/46°24'	506880	139573	455	17.6	21.8	18.4	18.1
CHA	Chasseral	7°03/47°08'	570842	220154	1599	9.8	13.5	10.3	10.2
CHD	Château-d'Oex	7°09/46°29'	577200	147310	985	14.1	17.7	14.9	14.5
CHM	Chaumont	6°59/47°03'	565750	211240	1073	13.3	17.0	13.8	13.6
CHU	Chur	9°32/46°52'	759471	193157	556	17.9	20.8	17.6	17.5
CHZ	Cham	8°28/47°11'	677825	226880	440	17.3	20.4	17.7	17.2
CIM	Cimetta	8°47/46°12'	704433	117452	1661	11.6	15.4	12.5	12.2
CMA	Crap	9°11/46°51'	732820	189380	2480	4.6	8.9	6.2	5.8
COM	Aquarossa	8°56/46°28'	714998	146440	575	18.0	21.7	18.3	18.1
COV	Piz Corvatsch	9°49/46°25'	783146	143519	3305	0.2	3.8	1.6	1.0
CRM	Cressier	7°04/47°03'	571160	210800	431	17.4	20.9	17.8	18.7
DAV	Davos	9°51/46°49'	783514	187457	1594	10.8	14.1	11.1	10.9
DEL	Delémont	7°21/47°22'	593220	245330	415	17.1	20.7	17.7	17.3
DIA	Les Diablerets	7°12/46°20'	581920	130630	2966	2.5	6.0	2.9	3.1
DIS	Disentis	8°51/46°42'	708188	173789	1197	13.5	16.9	13.9	13.7
DOL	La Dôle	6°06/46°25'	497061	142362	1669	9.6	13.6	10.4	10.2
EBK	Ebnat-Kappel	9°06/47°16'	726191	237146	620	15.8	18.3	15.7	15.3
EGH	Egglishorn	8°06/46°26'	650280	141900	2893	3.0		4.2	2.9
EIN	Einsiedeln	8°45/47°08'	699790	220375	910	13.9	17.0	14.4	14.0
ELM	Elm	9°11/46°55'	732400	198475	965	14.0	16.8	14.1	13.9
ENG	Engelberg	8°25/46°49'	674156	186097	1035	13.5	16.4	13.8	13.4
EVI	Evionnaz	7°02/46°11'	568190	114700	480	18.0	21.4	18.0	18.0
EVO	Evolène	7°31/46°07'	605415	106740	1825	10.4	13.8	11.0	10.8
FAH	Fahy	6°56/47°25'	562458	252676	596	15.8	19.5	16.4	16.1
FRE	Bullet	6°35/46°50'	534221	188081	1205	12.4	16.1	12.9	12.7
GEN	Monte Generoso	9°01/45°56'	722250	87300	1608	11.6	15.3	12.7	12.2
GLA	Glarus	9°04/47°02'	723752	210567	516	16.8	19.4	16.3	16.3
GOE	Gösgen	7°58/47°22'	640417	245937	380	17.1	20.5	17.6	17.2
GOR	Gornergrat	7°47/45°59'	626800	92460	3130	2.6		4.5	2.9
GRA	Fribourg	7°07/46°46'	575280	179880	634	16.1	20.1	17.1	16.6
GRC	Grächen	7°50/46°12'	631070	116850	1550	13.2	16.5	13.3	13.3
GRE	Grenchen	7°25/47°11'	598216	225348	430	17.0	20.4	17.4	17.0
GRH	Grimmel	8°20/46°34'	668583	158215	1980	7.7	11.4	8.6	8.4
GRO	Grono	9°09/46°15'	732100	123700	382	19.8	24.0	20.6	20.4
GSB	Gd St Bernard	7°10/45°52'	579200	79720	2472	5.0	9.5	7.0	6.4
GST	Gstaad	7°17/46°28'	588260	146165	1045	14.3	17.5	14.6	14.5
GUE	Gütsch	8°37/46°39'	690140	167590	2287	6.1	10.1	7.5	7.0
GUT	Güttingen	9°17/47°36'	738419	273960	440				
GVE	Genève-Cointrin	6°08/46°15'	498903	122624	420	17.6	22.1	18.7	18.2
HAI	Salen-Reutenen	9°01/47°39'	718900	278900	700	15.7	18.8	15.7	15.5
HIR	Hinterrhein	9°11/46°31'	733900	153980	1611	10.3	13.9	11.5	10.8
HLL	Hallau	8°27/47°42'	676530	283550	432	17.1	20.1	17.0	16.9
HOE	Hörnli	8°56/47°22'	713155	247755	1132	13.3	16.8	13.5	13.4
INT	Interflaken	7°52/46°40'	633019	169093	577				
JUN	Jungfrau-Joch	7°59/46°33'	641930	152275	3580				
KLO	Zürich Kloten	8°32/47°29'	682706	259337	426	17.1	20.2	17.4	17.0
KOP	Koppigen	7°37/47°08'	613250	219525	483	16.3	20.0	17.3	16.8
LAE	Läger	8°24/47°29'	672250	259460	845	14.8	18.2	15.0	14.8
LAG	Langnau	7°48/46°56'	628070	198830	755	15.0	18.0	16.0	15.4
LEI	Leibstadt	8°11/47°36'	656378	272111	341	17.6	20.7	17.6	17.3
LUG	Lugano	8°58/46°00'	717873	95884	273	20.2	24.4	21.0	20.7
LUZ	Luzern	8°18/47°02'	665540	209848	454	17.3	20.3	17.6	17.2
MAE	Männlichen	7°56/46°37'	638480	162550	2230	6.8	10.4	7.6	7.5
MAG	Magadino	8°56/46°10'	715475	113162	203	20.2	23.8	20.5	20.2
MAH	Mathod	6°35/46°45'	534870	178070	435	17.1	20.6	17.7	17.1
MER	Meiringen	8°11/46°44'	656460	175400	595	16.2	18.7	16.2	16.0
MLS	Le Moléson	7°01/46°33'	567723	155072	1974	8.2	12.0	8.8	8.8
MTR	Matro	8°55/46°25'	714260	140940	2171	7.5	11.4	8.7	8.3
MUB	Mühleberg	7°17/46°58'	587788	202478	479	16.8	20.5	17.4	17.0
MVE	Montana	7°28/46°18'	601706	127482	1427	12.9	16.1	13.1	13.0
NAP	Napf	7°56/47°00'	638132	206078	1403	11.4	15.1	12.0	11.8
NAS	Naluns	10°16/46°49'	815374	188987	2400				
NEU	Neuchâtel	6°57/47°00'	563150	205600	485	17.7	21.6	18.1	18.0
OTL	Locarno	8°47/46°10'	704160	114350	366	19.9	24.3	20.8	20.5
PAY	Payerne	6°57/46°49'	562127	184612	490	17.0	20.8	17.8	17.3
PIL	Pilatus	8°15/46°59'	661910	203410	2106	7.2	10.7	7.7	7.7
PIO	Piotta	8°41/46°31'	695888	152261	990	15.6	18.7	15.8	15.6
PLF	Plaffeien	7°16/46°45'	586808	177400	1042	13.6	17.4	14.5	14.1
PMA	Piz Martegnas	9°32/46°35'	760250	160570	2670	3.8	7.9	5.4	5.7
PSI	Würenlingen	8°14/47°32'	659540	265600	334	17.4	20.2	17.4	17.1
PUY	Pully	6°40/46°31'	540811	151514	455	18.2	22.2	18.8	18.6
RAG	Bad Ragaz	9°30/47°01'	756900	209370	496	17.7	20.9	17.7	17.7
REH	Zürich Affoltern	8°31/47°26'	681428	253545	443	17.2	20.2	17.4	17.0
ROB	Poschivao	10°04/46°21'	801850	136180	1078	15.2	18.6	15.5	15.2
ROE	Robièi	8°31/46°27'	682587	144091	1894	9.3	13.3	10.5	10.2
RUE	Rünenberg	7°53/47°26'	633246	253845	611	16.3	19.9	16.7	16.4
SAE	Sântis	9°21/47°15'	744200	234920	2502	4.4	7.9	4.9	4.8
SAM	Samedan	9°53/46°32'	787210	155700	1708	10.5	13.6	11.2	10.6
SBE	San Bernardino	9°11/46°28'	734112	147296	1638	11.1	14.5	11.9	11.5
SBO	Stabio	8°56/45°51'	716034	77964	353	19.8	23.6	20.1	19.9
SCU	Scul	10°17/46°48'	817135	186393	1303	13.9	17.2	14.1	13.8
SHA	Schaffhausen	8°37/47°41'	688698	282796	438	17.5	20.4	17.4	17.2
SIA	Segl-Maria	9°46/46°26'	778800	145738	1798	10.2	13.3	10.7	10.4
SIO	Sion	7°20/46°13'	591630	118575	482	18.9	21.8	18.5	18.5
SMA	Zürich Fluntern	8°34/47°23'	685117	248061	555	16.9	20.0	17.2	16.8
SMM	Sia Maria Val Müstair	10°25/46°36'	828760	165350	1390	14.3	17.7	13.8	13.9
STC	St Chrischona	7°41/47°34'	618700	269020	493				
STG	St Gallen	9°24/47°26'	747861	254586	775	15.4	18.6	15.9	15.4
TAE	Aadorf	8°54/47°29'	710514	258221	539	16.2	19.5	17.0	16.3
TIT	Titlis	8°26/46°46'	675400	180400	3046	4.3	1.8	1.8	1.7
ULR	Ulrichen	8°18/46°30'	666740	150760	1345	12.7	15.6	12.7	12.5
VAD	Vaduz	9°31/47°08'	757718	221696	457	17.7	20.7	17.8	17.5
VIS	Visp	7°51/46°18'	631149	128020	639	18.3	20.9	17.7	17.8
WAE	Wädenswil	8°41/47°13'	693849	230708	485	17.2	20.4	17.4	17.1
WFJ	Weissfluhjoch	9°48/46°50'	780615	189635	2690	3.5	7.5	5.0	4.4
WYN	Wynau	7°47/47°15'	636400	233850	422	17.0	20.0	17.1	16.8
ZER	Zermatt	7°45/46°02'	624350	97566	1638	12.1	15.2	11.8	11.9

Rapport Clim-arbres

Chapitre 5 : Modèle thermique



En collaboration avec



UNIVERSITÉ
DE GENÈVE
FACULTÉ DES SCIENCES

Unil
UNIL | Université de Lausanne

5 Modèle thermique

Une partie de cette étude a fait l'objet de la thèse de Master de Mlle Carole Pusterla, de l'Université de Lausanne, travail soutenu en janvier 2010, avec pour titre : « *Predicting where to plant trees to mitigate effects of climate warming on fresh water fishes* », sous la codirection des professeurs Jean-François Rubin d'hepia, Antoine Guisan de l'Unil et Martine Rebetz du WSL. Par ailleurs, cette thèse a été prolongée d'un mandat d'une année à temps partiel attribué à Mlle Pusterla par la Fondation de la Maison de la Rivière afin d'affiner ce modèle à l'aide d'un réseau plus conséquent d'enregistreurs de température.

Ce travail a été complété par une partie de la thèse de Master de M. Michael Cid de l'Université de Genève, travail réalisé de 2010 à 2012, avec pour titre : « *Changement climatique : Impacts sur la température de l'eau des rivières du Canton de Vaud* », sous la codirection des professeurs Jean-François Rubin d'hepia et d'Anthony Lehmann de l'Université de Genève. Les modèles statistiques ont été établis grâce à l'aide de M. Sébastien Nusslé de la Fondation de la Maison de la Rivière. Les résultats ci-dessous sont le fruit de ces thèses de master et des mandats qui ont suivi.

5.1 Introduction

5.1.1 Contexte

Le réchauffement climatique est particulièrement important en Suisse, car ce pays est situé à des latitudes relativement élevées et loin des océans. Les effets du réchauffement climatique augmentent avec la latitude (Ficke *et al.*, 2007). En Suisse, les températures moyennes de l'air ont augmenté, durant les 3 dernières décennies, de 1975 à 2004, de 0.57°C par décennie (Rebetz and Reinhard, 2007). Outre un réchauffement général, ce sont surtout les phénomènes climatologiques extrêmes qui sont en augmentation (canicule, chute de pluie violente entraînant des crues, etc.) (Frei *et al.*, 1998; Frei and Schaer, 2001; Schmidli *et al.*, 2001; Schmidli *et al.*, 2002; Rebetz, 2004; Frei *et al.*, 2006; Rebetz *et al.*, 2006).

Un modèle climatique développé pour l'Europe propose pour le Danemark une augmentation de l'ordre de 4°C entre septembre et janvier, et de 5°C entre février et août pour l'horizon 2070-2100, par rapport aux années 1961-1990, pour un accroissement du CO₂ atmosphérique à une concentration de 630-830 ppm. Selon ce modèle, la température dans les rivières danoises étudiées passerait de 8 à 12-13°C (Pedersen and Sand-Jensen, 2007).

Avec le réchauffement, l'habitat préférentiel de certaines espèces sensibles de poissons comme les salmonidés se déplace vers l'amont des rivières, les parties basses devenant trop chaudes. Or, dans de nombreux cas, une telle migration n'est plus possible en raison de la présence d'obstacles infranchissables. Ainsi, avec l'élévation globale des températures, les zones favorables au développement des populations piscicoles typiques des milieux d'eau froide se réduisent donc. Toute mesure qui pourrait être prise pour limiter ces risques serait favorable également aux autres espèces moins sensibles de poissons, ainsi qu'à la faune et la flore d'une manière générale. A terme, s'il se poursuit comme on le prévoit, le réchauffement climatique pourrait certainement être la cause de la disparition de nombreuses populations d'animaux ou de plantes dans des cours d'eau exposés (Mohseni *et al.*, 2003; Moosmann *et al.*, 2005). S'il est difficile à l'échelle de la Suisse, de lutter directement et significativement contre le réchauffement climatique en lui-même, on peut par contre mettre en place des mesures efficaces pour lutter localement contre ses effets.

Les changements climatiques observés ces 30 dernières années ont eu un impact sur la distribution et l'abondance des espèces. De plus, ils pourront mener à une extinction majeure

d'espèces natives dans un futur proche (Harte, 2004; Thomas, 2004). Dans les systèmes aquatiques par exemple, la sensibilité de plusieurs organismes à des faibles modifications du régime thermique et l'altération du cycle de vie dans la chaîne trophique ont déjà été observés avec d'importantes conséquences pour la biodiversité aquatique (Webb and Nobilis, 1994; Malcolm *et al.*, 2002; Ebersole *et al.*, 2003b; Ficke *et al.*, 2007).

Les tolérances de température de certaines espèces leur permettent de s'adapter aux modifications de leur environnement. Au contraire, les salmonidés sont potentiellement l'une des espèces les plus vulnérables de la faune aquatique car ils ont besoin constamment d'une eau relativement froide et bien oxygénée (Matthews and Berg, 1997; Elliott, 2000). Par ailleurs, des études précédentes ont démontré que les changements climatiques pouvaient mener à l'extinction des salmonidés à cause de la colonisation de leur habitat par des espèces d'eau plus chaudes comme les Cyprinidés dans les parties hautes de la rivière (Brosse and Lek, 2000; Mohseni *et al.*, 2003; Buisson and Grenouillet, 2009). D'autres études ont défini les tolérances maximum de température pour différentes espèces de poissons. Pour la truite commune, *Salmo trutta*, que l'on trouve en Suisse, cette limite supérieure a été fixée à 24.1°C (Chatters *et al.*, 1991; Mohseni *et al.*, 2003). Cependant, un autre facteur peut affecter la survie de ces poissons. La Maladie Rénale Proliférative (MRP) est une grave infection létale pour les Salmonidés lorsque la température des rivières atteint 15°C ou plus (Hari *et al.*, 2006). De plus, les barrages et autres obstacles présents dans la plupart des rivières peuvent empêcher l'accès à des zones en amont de la rivière où la température de l'eau est en dessous de 15°C (Ovidio *et al.*, 2007). Les Salmonidés sont encore présents sur de nombreux cours d'eau de Suisse, bien que leur maintien soit souvent dû aux intenses efforts de repeuplement pratiqués.

La couverture végétale est connue pour influencer les microclimats (Johnson, 2003; Moore *et al.*, 2005). La canopée présente sur les berges d'une rivière a un important rôle tampon en protégeant les rivières des variations de température journalières. Mais elle a aussi d'autres avantages comme celui de retenir les nutriments, de diversifier l'habitat et de réguler la nourriture. Le contrôle des sédiments est aussi très important car la modification du climat, causant des érosions et des coulées de boues, augmentera la charge sédimentaire en hiver, ce qui peut causer un problème pour la reproduction des Salmonidés (Scheurer, 2008).

5.1.2 Les différents types de modèles possibles

Pour évaluer les effets du réchauffement climatique sur la faune et la flore, de nombreuses études prédisent la distribution des espèces en calibrant des modèles de distribution pour ensuite les utiliser en simulant divers scénarios climatiques (Guisan and Thuiller, 2005). Ces méthodes basées sur des données de présence-absence (Elith *et al.*, 2006) sont de plus en plus utilisées pour la gestion et la conservation des espèces et des ressources, puisqu'elles permettent de prédire les distributions futures des espèces en fonction de la situation environnementale actuelle (Thuiller, 2004; Leatwick *et al.*, 2005). Les modèles de températures peuvent être de 3 types (Guisan and Zimmerman, 2000) :

- **Modèles phénoménologiques**

Ces modèles, basés sur des fonctions mathématiques empiriques et sur des données collectées sur le terrain, utilisent une ou plusieurs variables indépendantes pour prédire la variable réponse. A titre d'exemple, plusieurs études utilisent des régressions univariées pour prédire la température de l'eau avec la température de l'air comme variable indépendante (Webb and Nobilis, 1997; Caissie *et al.*, 2001; Caissie, 2006).

- **Modèles mécanistiques**

Ces modèles, basés sur des interactions réelles causes-à-effets, sont plus généraux et peuvent être appliqués dans d'autres domaines. En ce qui concerne la température de l'eau, les représentations mathématiques lient généralement des données physiques,

hydrologiques et météorologiques. A titre d'exemple, une récente étude utilise une approximation empirique pour modéliser la température moyenne journalière de l'eau sur une rivière espagnole (Marce and Armengol, 2008). Le principal problème de ce type d'approche est la nécessité d'avoir un très grand nombre de données pour la calibration du système.

- **Modèles analytiques**

Ces modèles sont utilisés pour prédire des réponses basées sur diverses fonctions mathématiques. Ainsi par exemple, un ensemble de courbes type a été établi pour estimer les changements de température de l'eau souterraine dans la zone de transition entre les aquifères marins et côtiers (Gunawardhana and Kazama, 2009). Ces modèles sont très généraux et peuvent être appliqués à d'autres écosystèmes, ils ne tiennent cependant que peu compte des spécificités locales.

Dans le cadre de ce travail, on cherche à établir un modèle à l'attention des gestionnaires. Par conséquent, une attention toute particulière a été apportée quant au choix des variables, de manière à ce que celles-ci soient « facilement » récoltables pour les gestionnaires via des cartes au 25'000, leur système d'informations géoréférencées cantonal, ou à l'aide d'enregistreurs de température simples à mettre en œuvre sur le terrain. Il existe dans la littérature une pléthore de modèles prédictifs, tous plus compliqués les uns que les autres. Toutefois, la plupart d'entre eux font appel à des variables qu'il est très difficile d'obtenir si l'on ne dispose pas de matériel très sophistiqué. Pour les raisons évoquées plus haut en matière d'applicabilité, ces types de modèles ont volontairement été écartés, même si leur précision semblait d'après la littérature supérieure.

De toute manière, un des objectifs importants de ce travail est de pouvoir prioriser les actions à effectuer sur le terrain. Dès lors, il n'apparaît pas fondamental de pouvoir estimer au dixième de degré près la température qu'aura telle ou telle rivière dans 50 ans. Ce qui apparaît essentiel en revanche est de pouvoir définir des tendances ou des régions où agir prioritairement. Dès lors, la précision des modèles proposés plus loin nous apparaît suffisante.

5.1.3 Objectifs

Les objectifs poursuivis par l'établissement d'un tel modèle de température sont d'offrir aux gestionnaires la possibilité de:

1. Prédire quelles seront les rivières les plus menacées par le réchauffement climatique.

Pour chaque type de rivière (ou chaque région géographique), il est possible d'estimer quelle sera la température de l'eau en fonction des différents scénarios climatiques (augmentation de la T° de l'air de 1 à 5°C). Ainsi on peut déterminer quelle rivière, ou tronçon de rivière, verra sa température dépasser une valeur critique à définir (par exemple 15°C). C'est donc sur ces tronçons qu'il faut agir en priorité.

2. Prioriser les actions de renaturation.

Lorsque l'on établit la carte des obstacles à la migration, ou celle des secteurs à l'écomorphologie dégradée, on se rencontre que la tâche en matière de renaturation est gigantesque. Dès lors, il s'agit de disposer de critères en fonction des stratégies d'action définies nous permettant de sélectionner les ouvrages à aménager en priorité. Cette tâche de priorisation des actions de renaturation est d'ailleurs imposée par la Confédération aux cantons.

3. Prédire aujourd'hui quelle intervention est la plus efficace pour éviter les effets du réchauffement de l'eau.

Il existe aujourd'hui de nombreuses rivières, ou tronçons de rivière, qui dépassent déjà certaines valeurs critiques de température. Ces tronçons sont donc déjà maintenant en danger. Pour pallier à cet état de fait, différents types d'interventions sont envisageables (reboisement des berges, limitation des prélèvements d'eau, décanalisation, etc.). Les coûts inhérents à chaque type d'interventions sont très différents. Or, il est possible de jouer spécifiquement sur l'un ou l'autre des paramètres du modèle (ex : reboiser une zone, décanaliser la rivière,...). On peut ainsi déterminer quel est le coût de chaque intervention pour quel gain (diminution de température). Ainsi diverses stratégies de renaturation peuvent être analysées et celle choisie sera fonction du meilleur rapport qualité-prix et/ou des opportunités locales.

5.2 Matériel et méthodes

5.2.1 Origine des données

Les données régionales proviennent de l'important réseau d'enregistreurs de température mis en place dans le cadre de cette étude (voir chapitres précédents).

Les données nationales proviennent du site de l'OFEV. Afin d'établir un modèle thermique et diverses corrélations permettant d'estimer les valeurs manquantes sur certains sites, les données de température de l'eau, mais aussi de l'air et du débit, doivent être disponibles pour la même année. Ceci est le cas de l'année 2008 (Tableau 40) pour laquelle un total de 77 stations a été sélectionné. Ces données ont été regroupées en 3 écorégions distinctes : (1) Plateau et Jura, (2) Préalpes et Alpes du Nord, (3) Alpes centrales, Sud des Alpes et Engadine (voir chapitre précédent)

Pour la suite du projet, le canton de Vaud a aussi été divisé selon les 3 écorégions (Figure 56), ceci afin de pouvoir observer plus facilement la distribution des loggers et la répartition des différentes classes de température de l'eau (Figure 56).

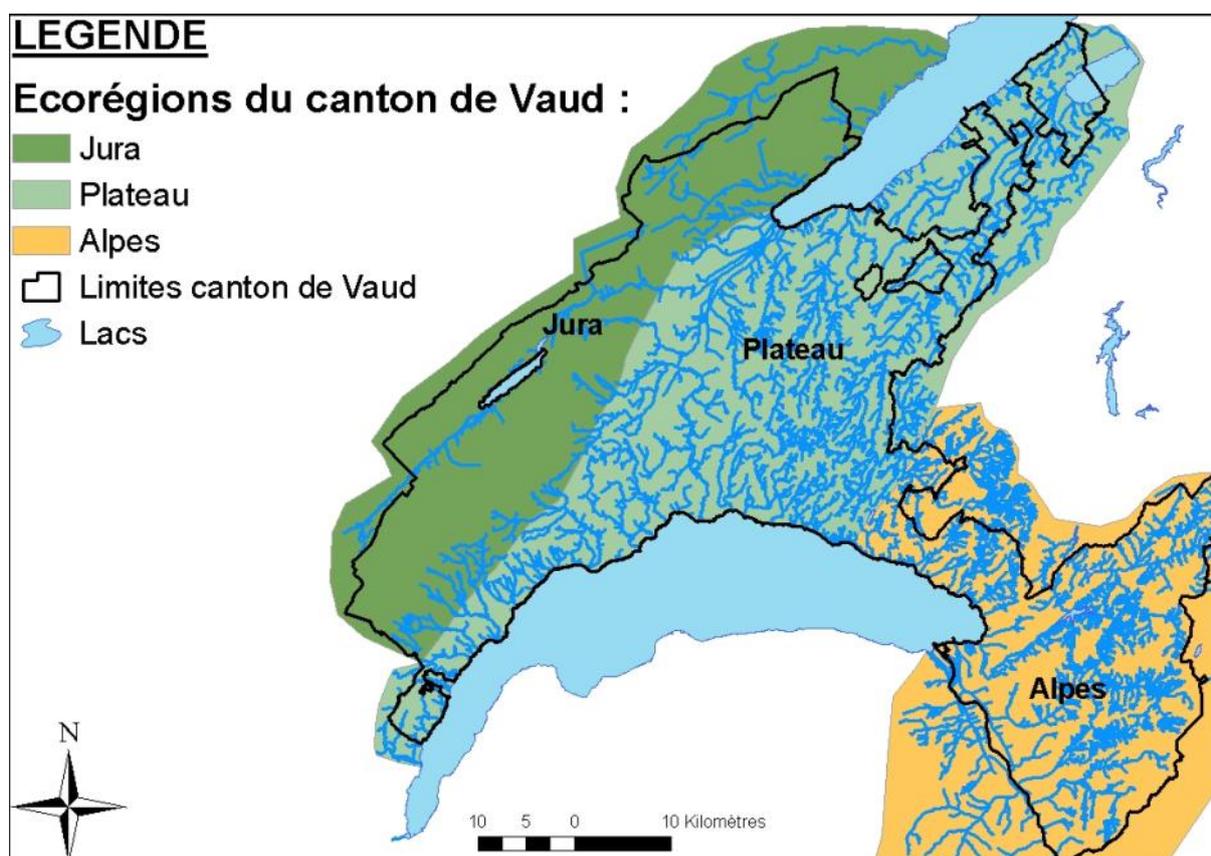


Figure 56: Ecorégions du Canton de Vaud

C'est la présence de ces 3 régions typiques de la Suisse, sur un territoire relativement restreint, qui nous a conduits à utiliser le Canton de Vaud comme exemple pour établir notre modèle thermique.

Au total, les données régionales utilisées proviennent de 3 sources distinctes :

- Les données récoltées par les enregistreurs de température placés spécifiquement pour cette étude. Pour un total de 63 stations.
- Les données provenant des enregistreurs gérés par le Service des Eaux, Sols et Assainissement (SESA) du canton de Vaud. Au total, 11 stations.
- Les données provenant des enregistreurs gérés par la Confédération. Au total, 2 stations.

C'est au final 76 stations de mesures réparties sur 34 cours d'eau qui ont été utilisées pour cette étude (Figure 57).

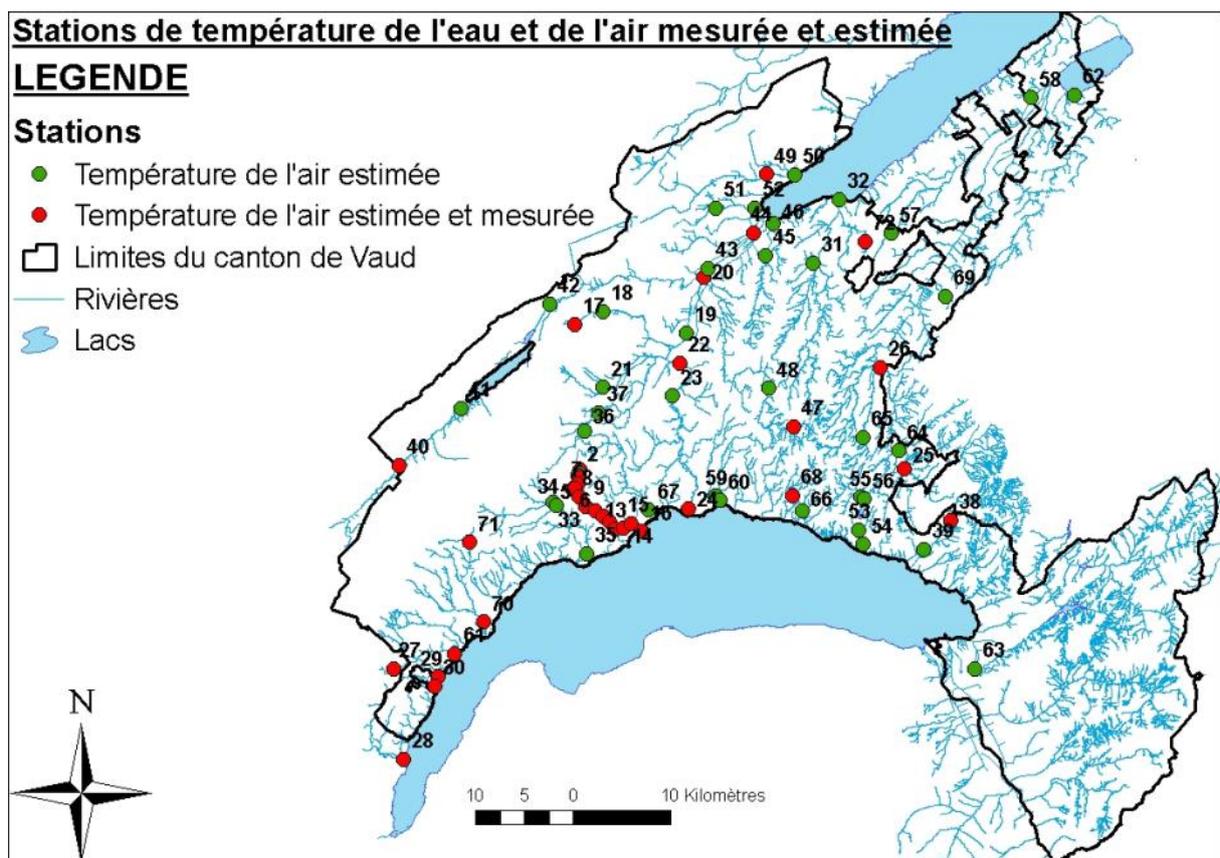


Figure 57: Carte de la répartition des enregistreurs de température en 2010

Pour la description des enregistreurs de température, on se référera aux matériels et méthodes des chapitres précédents.

5.2.2 Mesure des températures de l'air

Les données météorologiques provenant de la station de Météo suisse de Changins ont été utilisées pour l'étude du niveau du bassin versant du Boiron de Morges (voir chapitre précédent). De plus, dès janvier 2009, afin d'améliorer la mesure locale des températures d'air, 34 stations ont été équipées d'enregistreurs (DS1922LT iButtons®). Pour les rivières dont on ne disposait pas simultanément de mesures *in situ* de la température de l'eau et de l'air, celle-ci a été estimée. En effet, au niveau national par exemple, de nombreuses données peuvent être obtenues au travers du portail de Météo Suisse (<https://gate.meteoswiss.ch/idaweb/login.do>). Par conséquent, ces données ont été extraites de cette base et les corrélations établies entre altitude et température de l'air (voir chapitre précédent). Ensuite ces corrélations nous ont permis d'extrapoler les valeurs manquantes dans notre jeu de données, connaissant la température de l'air à Changins et la différence d'altitude entre les deux stations.

5.2.3 Traitement et analyse des données

Les différents modèles de régression, utilisés pour simuler la température de l'eau des rivières, ont été réalisés avec le logiciel R (R Development Core Team 2009). Le logiciel ArcGIS version 9.3 et 10 (ESRI 2005) a été utilisé pour générer toutes les variables environnementales et les cartes de température de l'eau.

5.2.4 Choix des variables environnementales

Une attention particulière a été apportée au choix des variables environnementales (Tableau 15). En effet, nous avons tenté de récolter un maximum de données descriptives. Or, certaines se sont révélées difficiles à obtenir ou nécessitaient des investigations complexes. Pour ce faire, et dans un souci d'applicabilité pour les gestionnaires, les modèles ont été établis avec différents types de variables plus ou moins faciles à obtenir. L'objectif à terme est d'établir le modèle le plus précis en utilisant le minimum possible de variables discriminantes.

Tableau 15: Liste des variables testées

Nom	Description	Type	Unité
Géographique			
Distance à la source	Distance linéaire entre l'enregistreur et la source de la rivière	Continue	m
Distance amont	Distance au point de mesure amont	Continue	m
Altitude enregistreur	Altitude de l'enregistreur	Continue	m
Altitude source	Altitude de la source	Continue	m
Pente rivière	Pente moyenne entre la source et l'enregistreur	Continue	%
Pente logger	Pente de part et d'autre de l'enregistreur	Continue	%
Orientation	Orientation	Continue	Degré
Radiation	Moyenne estivale de d'exposition à la radiation solaire	Continue	Kj/jour
Largeur	Largeur de la rivière	2 classes	m
Bassin versant	Surface du bassin versant	Continue	m ²
Climatique			
Température air	Température estivale de l'air	Continue	°C
Débit	Débit de la rivière	Continue	m ³ /s
Environnementale			
Ordre	N° d'ordre de la rivière	4 classes	
Forêt	Présence/absence de forêt	2 classes	
Quantité Forêt	Pourcentage de forêt	Continue	%
Type de forêt	Type de forêt	6 classes	
Zone piscicole	Zonation piscicole de Huet	5 classes	
Ecomorpho locale	Ecomorphologie locale	4 classes	
Ecomorpho amont	Ecomorphologie amont	Continue	

Au total, 19 variables ont été testées pour construire les modèles expliquant la température de l'eau. 7 variables peuvent être obtenues par simple lecture de la carte au 25'000. 15 nécessitent le recours aux SIG et ou à des investigations de terrain supplémentaires.

5.2.5 Etablissement des modèles

Pour estimer la température de l'eau, nous avons utilisé des régressions multiples avec les prédicteurs environnementaux. Une précédente étude ayant montré une relative équivalence entre les modèles linéaires (GLM) et les modèles additifs (GAM) (Master Pusterla 2010), nous n'avons utilisé pour cette étude que des modèles linéaires. Pour sélectionner les modèles les plus effectifs pour prédire la température de l'eau, nous avons utilisé deux approches différentes : la première approche, traditionnelle a consisté à utiliser une procédure « stepwise » de sélection de modèle basée sur l'AIC. Pour la seconde approche, le nombre de prédicteurs environnementaux potentiels étant élevés (près de 20) et le nombre d'observations relativement restreint (moins de 80), nous avons limité le nombre de variables explicatives dans le modèle afin de limiter le risque de « sur-paramétrisation » (2 variables ou trois variables plus les interactions) et nous avons testé toutes les combinaisons possibles. Afin de maximiser l'adéquation des modèles, chaque variable environnementale quantitative a été transformée plusieurs fois et testée dans les différents modèles (transformation logarithme, transformation carrée et transformation inverse).

Les modèles ont ensuite été sélectionnés en fonction de la variance expliquée (le R^2), de l'AIC ou encore de la valeur absolue moyenne des résidus, soit la différence moyenne entre les valeurs prédites et les valeurs observées. Un modèle idéal a été ensuite choisi en tenant compte à la fois de ses pertinences statistique et écologique.

Afin d'estimer la température de l'eau en cas de changement climatique, la relation entre la température de l'eau et la température de l'air a été modélisée en utilisant la méthodologie des modèles mixtes. Pour avoir une estimation précise, les températures hebdomadaires moyennes de l'air et de l'eau ont été modélisées, ceci afin d'exploiter au maximum les données des enregistreurs, sans avoir un problème de délai entre le changement de température de l'air et celui de l'eau.

5.2.6 Application des modèles

Au total, 3 scénarios pour 2050 ont été proposés en fonction de l'augmentation attendue de CO_2 : un **scénario optimiste** avec une augmentation de la température de l'air de **+ 1.0°C**, un **scénario moyen** avec une augmentation de **+ 2.5°C** et un **scénario pessimiste** avec une augmentation de **+ 5.0°C** (Frei, 2004; OCCC, 2004). Dès lors, pour prédire la température de l'eau en 2050 grâce aux modèles établis, la température de l'air actuelle a été augmentée par l'une des 3 valeurs proposées selon le scénario climatique choisi.

5.3 Résultats

5.3.1 Etablissement du modèle

Analyses préliminaires

Les analyses préliminaires (voir chapitres précédents) ont démontré que la température de l'eau est, d'une part très dépendante de celle de l'air (Figure 58), et que d'autre part l'influence de l'air est d'autant plus grande que la station est éloignée de la source. En effet, pour un débit constant, l'eau, pour une station donnée, est restée d'autant plus longtemps au contact de l'air qu'elle se situe plus en aval.

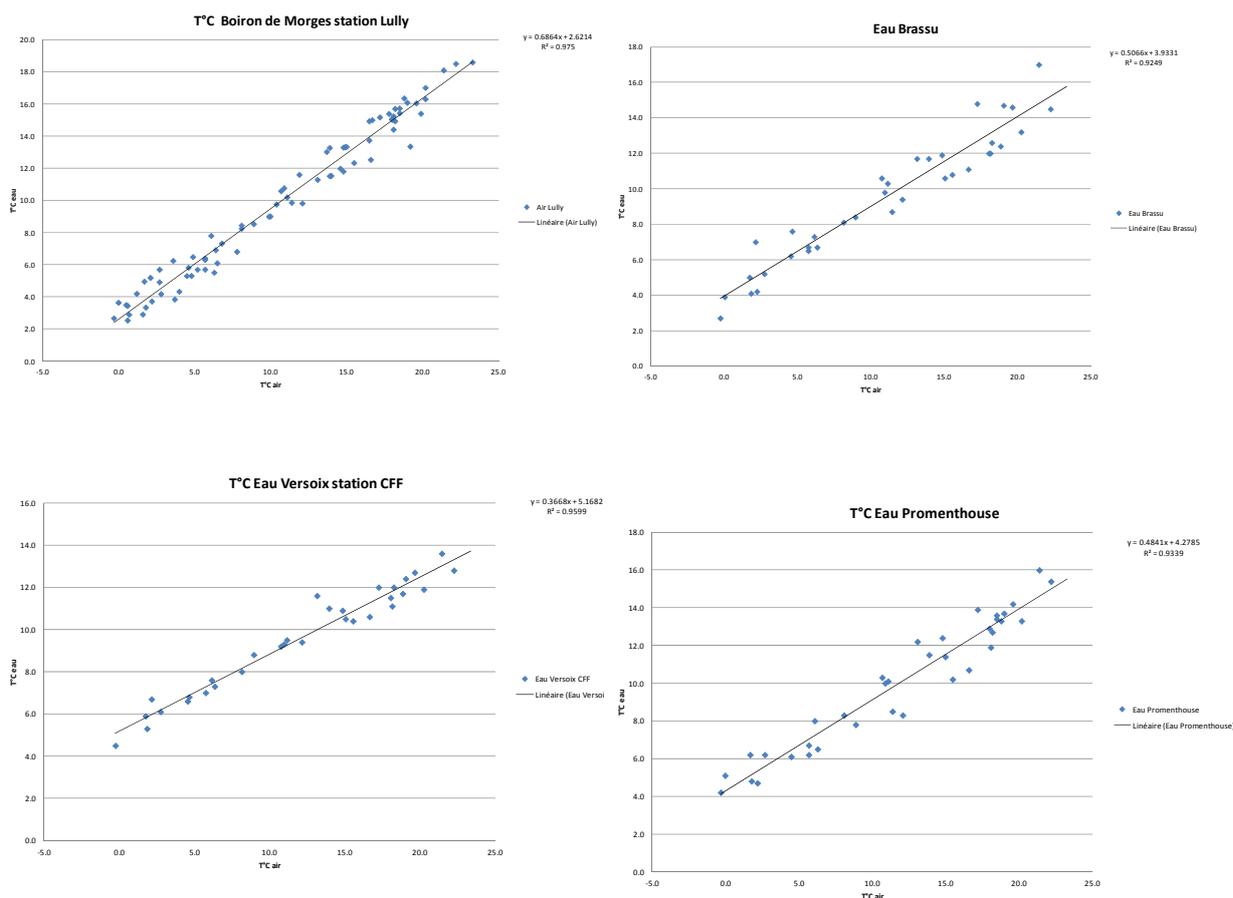


Figure 58: Exemples de corrélation entre température mensuelle de l'eau et de l'air pour diverses stations

Dès lors, fort de ces observations, *Température de l'air* et *Distance à la source* apparaissent logiquement comme deux paramètres essentiels à inclure dans le modèle. Les autres paramètres environnementaux (Tableau 15) ne sont par contre pas apparus statistiquement significatifs et n'apportaient rien de plus lorsqu'ils étaient inclus dans le modèle avec le jeu de données actuelles.

Par ailleurs, les investigations des chapitres précédents ont montré que les rivières réagissaient thermiquement différemment selon leur écomorphologie et la présence ou non sur leur berge d'une forêt. Dès lors, 3 catégories de rivières ont été définies :

- Catégorie 1 : Rivière à l'écomorphologie bonne, bordée d'une forêt
- Catégorie 2 : Rivière à l'écomorphologie bonne, sans forêt
- Catégorie 3 : Rivière à l'écomorphologie mauvaise, sans forêt

Le modèle thermique a donc été établi en utilisant ces différents paramètres pour ces 3 catégories de cours d'eau :

- Sont considérées comme ayant une écomorphologie bonne, les rivières de classe écomorphologie locale 1 et 2. Les rivières de classe écomorphologie 3 et 4 sont elles considérées comme écomorphologie mauvaise.
- Pour la forêt, 5 classes ont été définies (voir chapitre précédent). Les rivières sont regroupées pour l'établissement du modèle en 2 classes : (1) Non forêt regroupant la classe 0 et (2) Forêt regroupant les classes 1 à 4.

Construction du modèle

Cette étape a été réalisée sur la base du jeu de données final. Pour construire le modèle, nous partons du principe que toutes les stations sont indépendantes l'une de l'autre. Les grandes étapes de la construction du modèle sont dès lors :

1. Etablissement du modèle $T_{eau} \sim T_{air}$
2. Etablissement du modèle mixte dépendant de chaque station
3. Calcul de l'intercepte et de la pente pour chaque station
4. Estimation des effets des variables environnementales sur l'intercepte et la pente
5. Présélection des variables
6. Test de transformations logarithmiques, quadratiques et inverses
7. Etablissement de modèles simples pour sélectionner les variables pertinentes
8. Génération d'un grand nombre de modèles possibles
9. Application de la « Stepwise regression » pour sélectionner le meilleur modèle

Modèle choisi

Chaque rivière ayant sa relation propre entre la température de l'air et de l'eau, le principe du modèle est celui d'une régression linéaire où l'ordonnée à l'origine et la pente sont ajustés pour chaque rivière en fonction de leurs caractéristiques environnementales.

Le modèle construit est le suivant :

$$\text{Teau} = (4.56207 + \alpha_i) + (0.51719 + \beta_i) * \text{Tair}$$

Avec :

Teau = température de l'eau (moyenne : 10.0 ± 3.8 °C)

Tair = température de l'air (moyenne : 11.2 ± 6.7 °C)

α_i = les effets aléatoires sur l'ordonnée à l'origine pour chaque station i .

β_i = les effets aléatoires sur la pente pour chaque station i .

α_i , a une moyenne de 0 et une variance de 1.496, β_i une moyenne de 0 et une variance de 0.027. On peut estimer ces variables, pour chaque rivière, de la manière suivante (les distances sont exprimées en km) :

$$\alpha_i = A + B * \text{LN}(\text{distance à la source}) + C * (\text{Distance à la source})^2$$

avec

Variable	Catégorie 1 Ecomorpho bonne + forêt	Catégorie 2 Ecomorpho bonne sans forêt	Catégorie 3 Ecomorpho mauvaise sans forêt
A	1.6569	0.4508	0.4462
B	-1.3169	-0.4492	-1.0918
C	0.0059	0.0059	0.0059

$$\beta_i = A + B * \text{LN}(\text{Distance à la source})$$

avec

Variable	Catégorie 1 Ecomorpho bonne + forêt	Catégorie 2 Ecomorpho bonne sans forêt	Catégorie 3 Ecomorpho mauvaise sans forêt
A	-0.1954	0.0285	-0.0531
B	0.0915	-0.0123	0.0721

Les valeurs des différents paramètres sont des données en « output » calculées après avoir lancer les tests « lm » et « anova » sur le modèle choisi.

5.3.2 Validation du modèle

La validation du modèle a été effectuée en comparant la courbe observée de la température de l'eau à la courbe théorique donnée par le modèle. A titre d'exemple, c'est la station de Lully sur le Boiron de Morges qui a été choisie, car c'est l'une de celles pour laquelle on possède le plus grand nombre de valeurs observées (Figure 59).

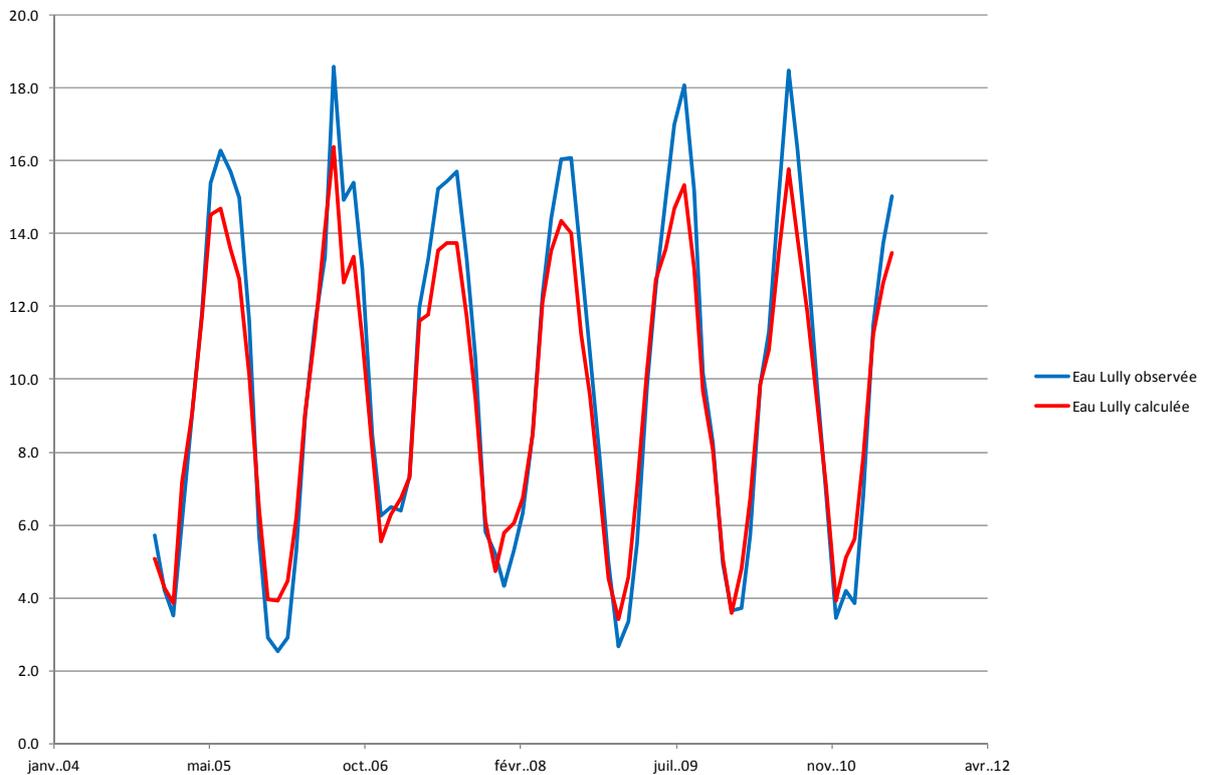


Figure 59: Comparaison entre la température de l'eau observée et calculée selon le modèle pour la station de Lully sur le Boiron de Morges

D'une manière générale, le modèle approxime relativement bien les valeurs observées. C'est seulement dans les extrêmes que les valeurs tendent à diverger avec des valeurs calculées légèrement sous-estimées par rapport aux valeurs observées.

De nombreuses réflexions sont faites dans la suite du document en prenant la valeur de 15°C comme limite maximale. Or, on constate que le modèle tend justement à sous-estimer les valeurs à partir de cette limite. Dès lors, les réflexions ci-après doivent être considérées comme « optimistes » puisque le modèle tend à sous-estimer les températures à partir de cette valeur.

En l'état actuel, avec les données actuellement disponibles, c'est ce modèle qui est utilisé ultérieurement pour estimer les effets du réchauffement climatique. Il pourra toujours être affiné lorsque de nouvelles données de température seront disponibles

5.3.3 Application du modèle

Quel gain pour quelle intervention ?

D'après le modèle établi, la température de l'eau apparaît dépendre de la température de l'air, de la distance à la source, de l'écomorphologie de la station et de la présence ou de l'absence d'une forêt riveraine. Si l'on ne peut évidemment pas intervenir sur la température de l'air, ni sur la distance à la source, par contre les méthodes actuelles de renaturation des cours d'eau nous permettent d'agir directement sur l'écomorphologie de la rivière (en aménageant les berges par exemple et/ou en la décanalisant) et sur la nature des berges (en plantant par exemple une forêt riveraine). Le modèle nous permet dès lors d'estimer les effets de telles interventions sur la température des cours d'eau.

Pour effectuer les simulations, nous avons admis une température de l'air de 20°C mesurée à Changins en moyenne pendant les 3 mois d'été (juin, juillet août). Cette valeur correspond pratiquement à la température réelle moyenne de l'air mesurée à Changins durant l'été 2010 (19.3°C). Par ailleurs, nous avons admis que la température de l'air restait constante tout au long du cours de la rivière, ce qui dans la réalité n'est pas forcément juste, les stations plus en aval ayant une altitude plus basse, donc une température de l'air plus élevée. Dès lors en fonction de la distance à la source et de la catégorie de rivière, on obtient les valeurs suivantes (Tableau 16) :

Tableau 16: Température de l'eau estimée par le modèle pour une température de l'air de 20°C

Distance à la source	Catégorie 1 Ecomorpho bonne + forêt	Catégorie 2 Ecomorpho bonne sans forêt	Catégorie 3 Ecomorpho mauvaise sans forêt
1 km	12.6	15.8	14.2
5 km	13.6	14.9	15.0
10 km	14.4	14.9	15.7
20 km	16.6	16.3	17.7
30 km	20.7	19.7	21.1

Les simulations montrent que :

- Pour une même catégorie, la température de l'eau est d'autant plus chaude que l'on s'éloigne de la source
- Le fait de planter une forêt riveraine (passage de la catégorie 2 à 1) induit généralement une diminution de la température de l'eau
- Le fait d'améliorer l'écomorphologie (passage de la catégorie 3 à 2) induit généralement une diminution de la température d'autant plus grande que l'on s'éloigne de la source

Quelle est la situation aujourd'hui ?

Température de l'air

Connaissant l'altitude de chaque point, on peut établir la carte de répartition des températures de l'air sur toute la zone d'étude (Figure 60).

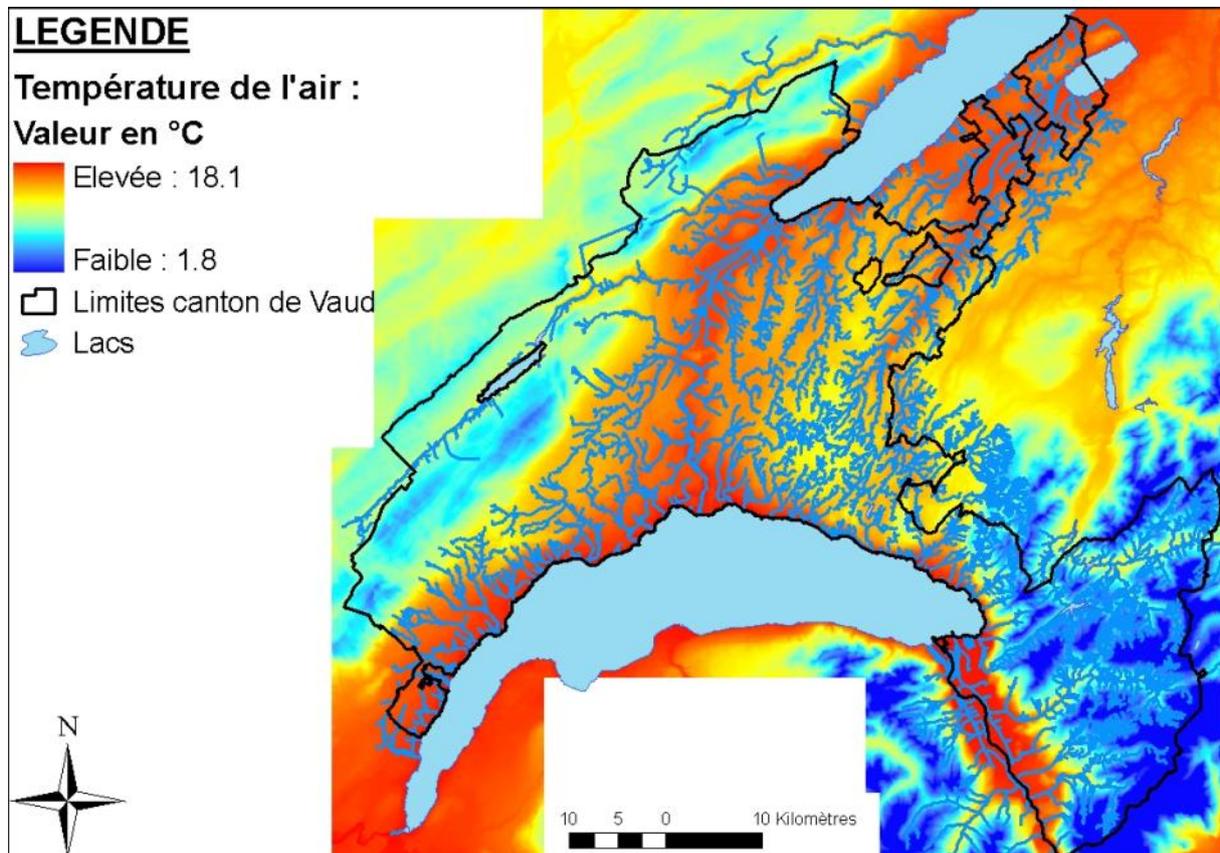


Figure 60: Carte de répartition des températures de l'air lorsqu'il fait 20°C à Changins

On observe sur cette carte que les températures de l'air les plus élevées se situent :

1. Sur les rives du Léman, à l'embouchure de nombreuses rivières
2. sur le milieu du Plateau romand,
3. ainsi que dans la vallée du Rhône.

Présence d'une forêt

En plus de la température de l'air, il est possible de représenter les deux autres paramètres utilisés dans le modèle statistique, à savoir la présence de forêt et l'écomorphologie (Figure 61).

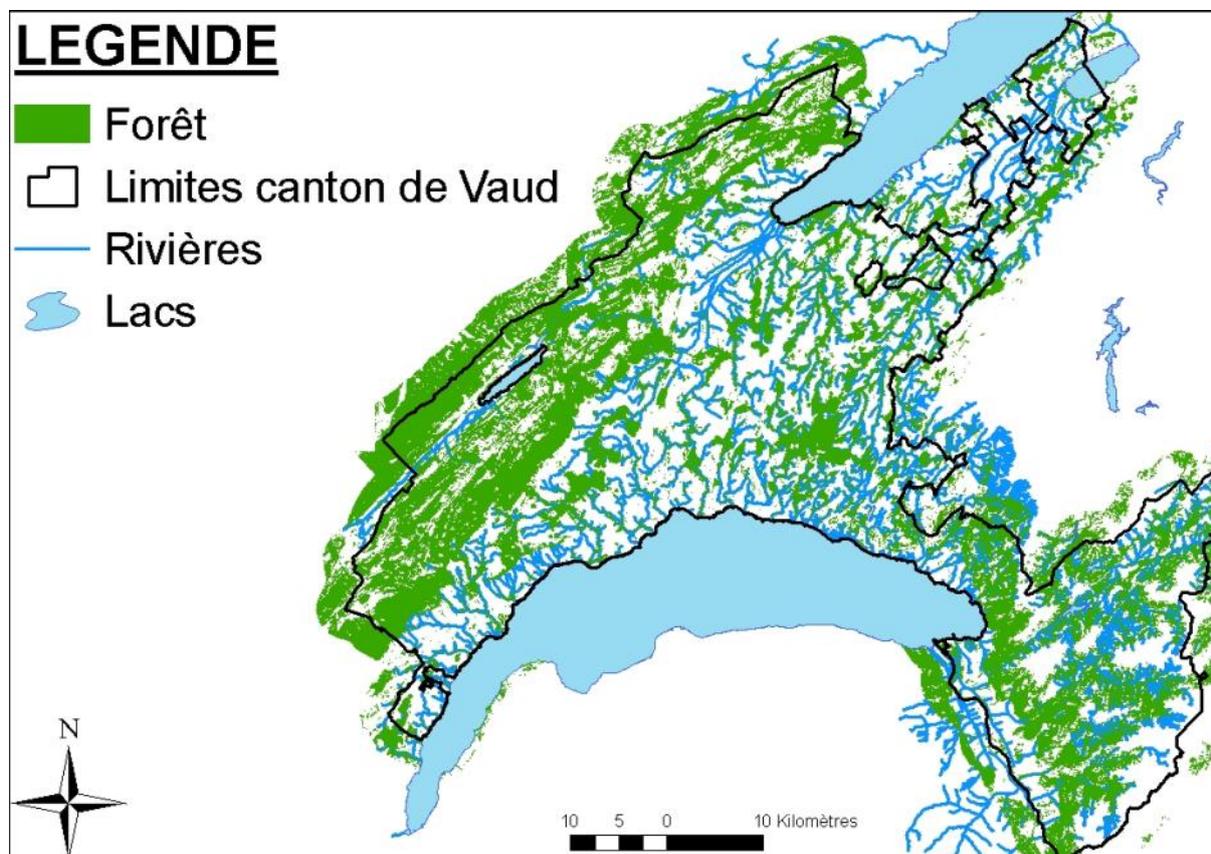


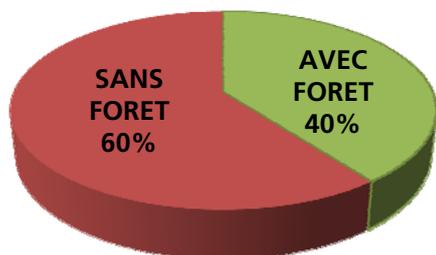
Figure 61 : Carte des zones de forêt dans le canton de Vaud

Tableau 17 : Surface de forêt dans le canton de Vaud

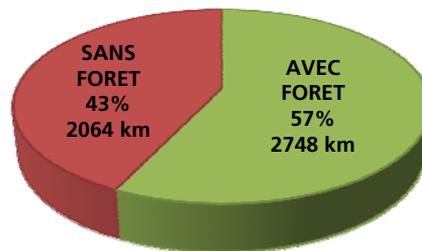
	Surface
Surface totale de forêt (selon couche SIG)	1276.7 km ²
Territoire vaudois recouvert par de la forêt	1123.3 km ²
Territoire vaudois non recouvert par de la forêt	1707.7 km ²
Surface du canton de Vaud	2831 km ²

La couche SIG de la forêt présente une surface plus importante que celle du canton de Vaud. En effet, on voit que les zones de forêt dépassent les limites cantonales. Les proportions calculées (Figure 62) se basent sur la surface cantonale et non sur la surface totale de forêt.

Pourcentage du territoire vaudois recouvert par de la forêt



Pourcentage et linéaire de rivière recouvert ou non par de la forêt



Proportion de forêt dans chaque écorégion

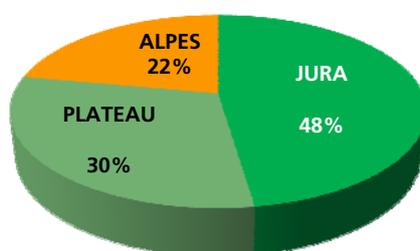


Figure 62 : Proportion de forêt sur le territoire vaudois

On observe (Figure 62) que :

1. Bien que moins de la moitié de la surface du territoire vaudois est couvert de forêt, plus de la moitié des rivières est bordé d'arbres,
2. C'est nettement dans le Jura que la proportion de forêt est la plus importante.

Ecomorphologie

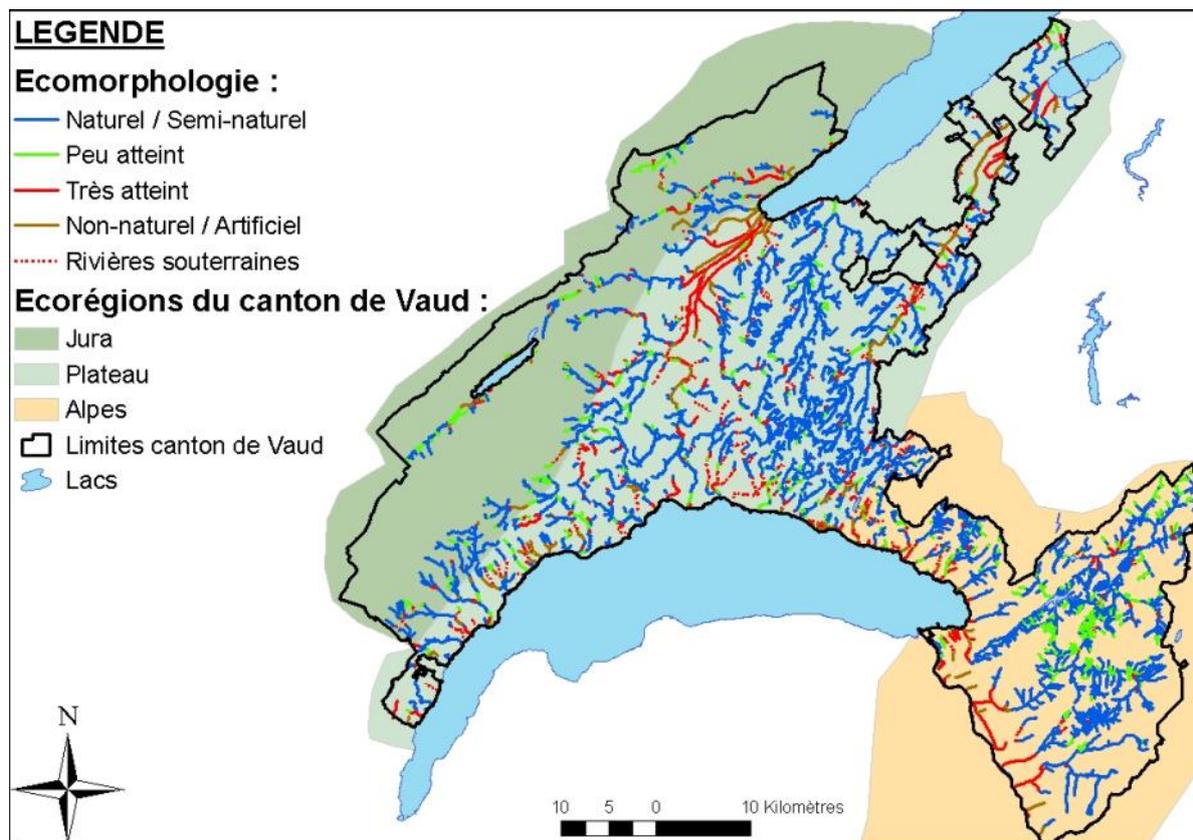
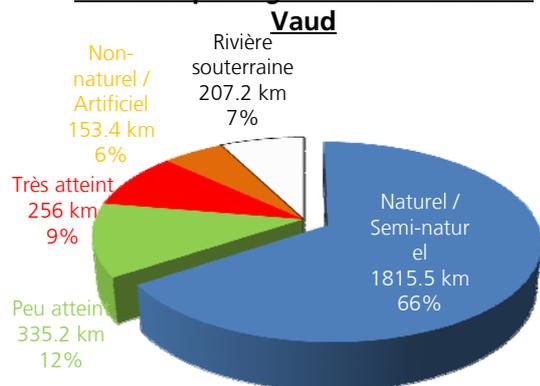


Figure 63 : Carte des différentes classes d'écomorphologie des rivières

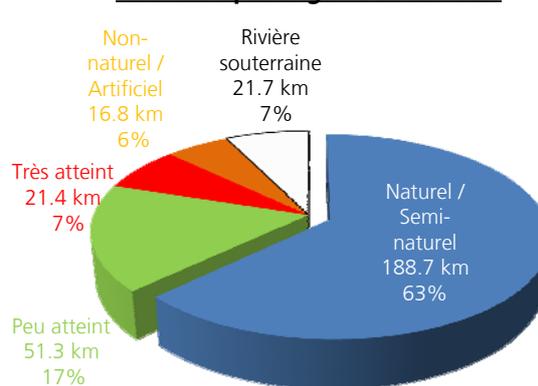
Tableau 18 : Répartition des différentes classes d'écomorphologie

CLASSES	JURA	PLATEAU	ALPES	VAUD
Naturel / Semi-naturel	188.68 km 62.9%	970.24 km 64.7%	656.57 km 67.9%	1815.48 km 65.6%
Peu atteint	51.34 km 17.1%	118.08 km 7.9%	165.75 km 17.1%	335.17 km 12.1%
Très atteint	21.39 km 7.1%	148.61 km 9.9%	86.04 km 8.9%	256.03 km 9.3%
Non-naturel / Artificiel	16.75 km 5.6%	116.16 km 7.7%	20.45 km 2.1%	153.36 km 5.5%
Rivières souterraines	21.70 km 7.2%	147.04 km 9.8%	38.50 km 4.0%	207.23 km 7.5%
Réseau total	299.85 km 10.8%	1500.12 km 54.2%	967.31 km 35.0%	2767.28 km

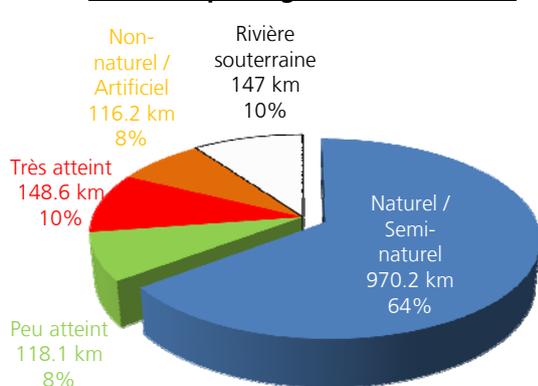
Répartition des différentes classes d'écomorphologie dans le canton de Vaud



Répartition des différentes classes d'écomorphologie dans le Jura



Répartition des différentes classes d'écomorphologie dans le Plateau



Répartition des différentes classes d'écomorphologie dans les Alpes

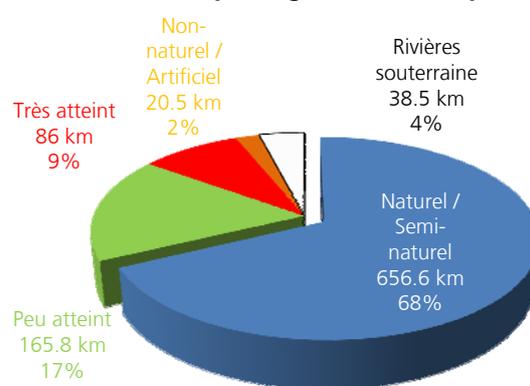


Figure 64 : Répartition des différentes classes d'écomorphologie

On observe (Figure 64) que :

1. La majeure partie des cours d'eau vaudois est de type naturel ou semi-naturel,
2. Cette répartition est approximativement identique pour toutes les écorégions
3. Les rivières du Plateau sont celles qui présentent en moyenne l'écomorphologie la moins favorable.

Application du modèle

De là, on peut appliquer le modèle aux rivières connaissant la température de l'air, la distribution de la forêt et leur écomorphologie (Figure 65).

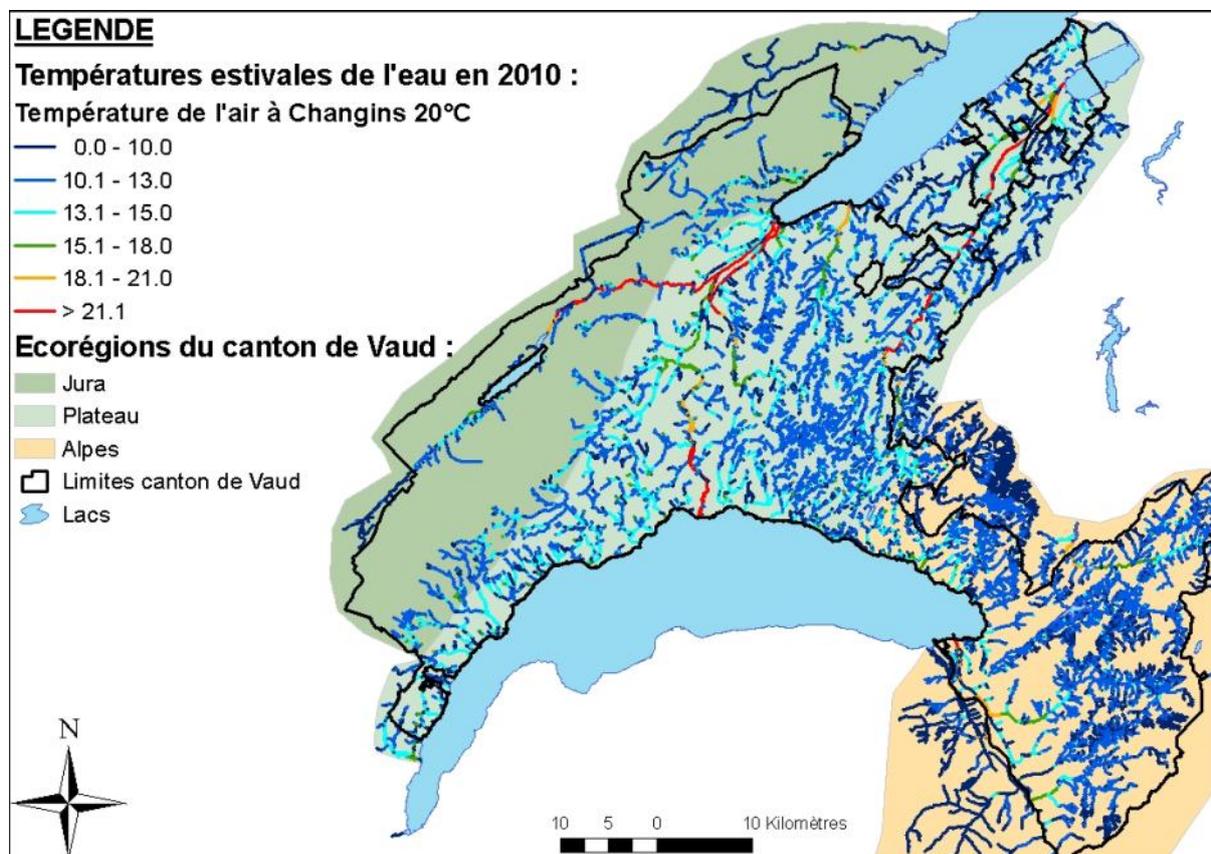


Figure 65 : Carte des températures estivales de l'eau pour les rivières vaudoises lorsque la température de l'air est de 20°C à Changins

Tableau 19 : Proportion des différents segments de rivières selon leur température en 2010

CLASSES DE TEMPERATURE	JURA		PLATEAU		ALPES		VAUD	
	km	%	km	%	km	%	km	%
°C								
0.0 - 10.0	201.93	36.2%	696.19	27.6%	998.18	42.7%	1896.30	35.0%
10.1 - 13.0	253.37	45.5%	1191.40	47.2%	1145.76	49.0%	2590.53	47.8%
13.1 - 15.0	72.06	12.9%	448.70	17.8%	138.25	5.9%	659.01	12.2%
15.1 - 18.0	12.69	2.3%	89.37	3.5%	25.59	1.1%	127.65	2.4%
18.1 - 21.0	2.40	0.4%	27.30	1.1%	22.50	1.0%	52.20	1.0%
>21.1	14.66	2.6%	73.64	2.9%	9.81	0.4%	98.11	1.8%
TOTAL	557.12	100.0%	2526.60	100.0%	2340.08	100.0%	5423.80	100.0%

Tableau 20 : Proportion des rivières avec une température inférieure ou supérieure à 15°C en 2010

TEMPERATURE	JURA		PLATEAU		ALPES		VAUD	
	km	%	km	%	km	%	km	%
< 15	527.36	94.7%	2336.28	92.5%	2282.19	97.5%	5145.83	94.9%
> 15	29.76	5.3%	190.31	7.5%	57.89	2.5%	277.96	5.1%
TOTAL	557.12	100.0%	2526.60	100.0%	2340.08	100.0%	5423.80	100.0%

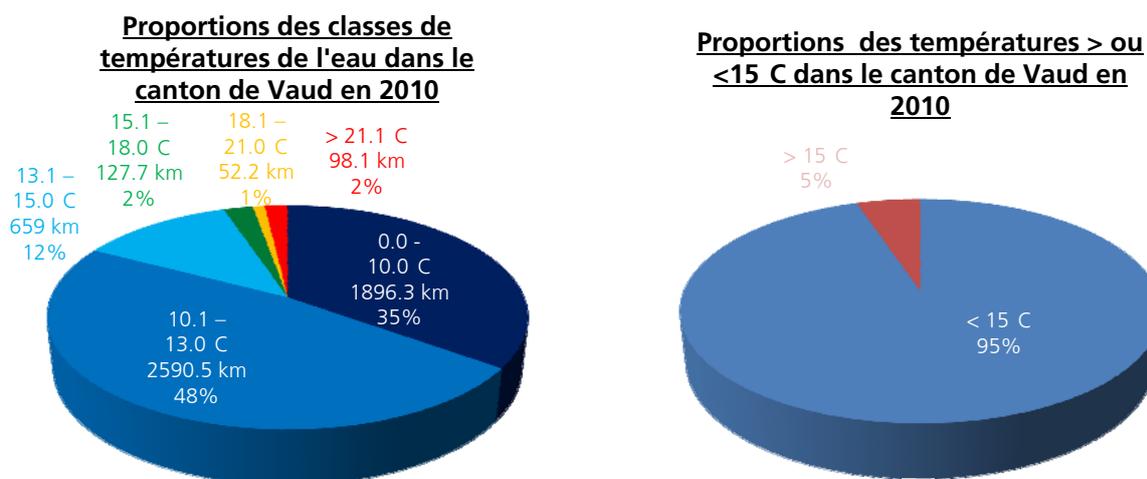


Figure 66 : Proportion des différents segments de rivières selon leur température et ceux avec une température inférieure ou supérieure à 15°C en 2010

On constate aujourd'hui (Figure 66) que :

1. Pour 5.1 % des cours d'eau vaudois, la température moyenne estivale de l'eau dépasse les 15°C
2. Ces rivières sont situées principalement dans les régions du Plateau romand et de la vallée du Rhône.

Zoom sur la Venoge

A titre d'exemple, à chaque étape du raisonnement, un zoom est effectué sur la Venoge, une rivière qui traverse une grande partie du territoire vaudois et qui présente de nombreux faciès différents (Figure 67).

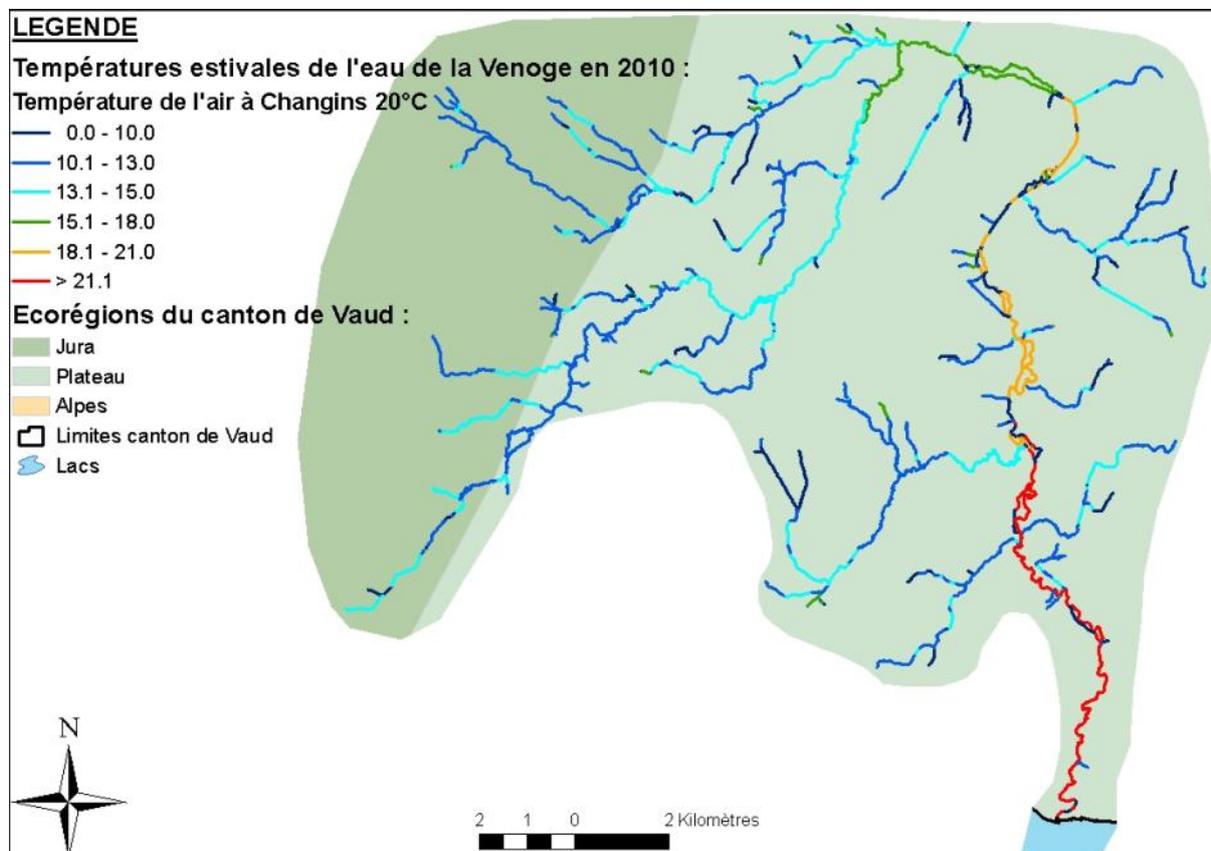


Figure 67 : Carte des températures estivales de l'eau de la Venoge en 2010 lorsque la température de l'air est de 20°C à Changins

Tableau 21 : Proportion des différents segments de la Venoge selon leur température en 2010

CLASSES DE TEMPERATURE	VENOGE	
	°C	km
0.0 - 10.0	27.45	13.0%
10.1 - 13.0	93.11	44.1%
13.1 - 15.0	54.53	25.8%
15.1 - 18.0	11.56	5.5%
18.1 - 21.0	10.31	4.9%
>21.1	14.03	6.7%
TOTAL	210.99	100.0%

Tableau 22 : Proportion des segments de la Venoge avec une température inférieure ou supérieure à 15°C en 2010

TEMPERATURE	VENOGE		
	°C	km	%
< 15		175.09	83.0%
> 15		35.90	17.0%
TOTAL		210.99	100.0%

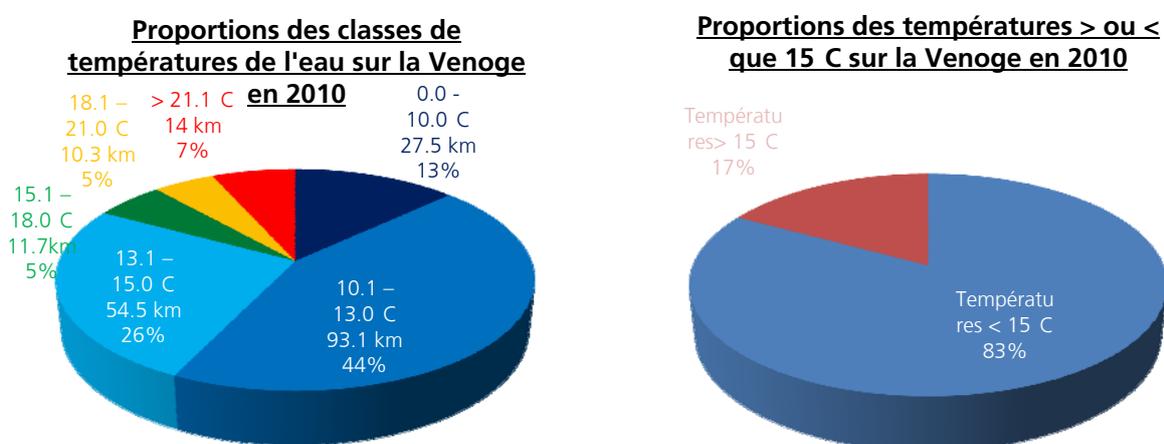


Figure 68 : Proportion des différents segments de la Venoge selon leur température et ceux avec une température inférieure ou supérieure à 15°C en 2010 (forme graphique)

On constate que pour 2010 (Figure 68) :

1. déjà 17% du réseau hydrographique de la Venoge présente une température estivale supérieure à 15°C.
2. Les températures les plus hautes sont observées dans la partie aval du cours d'eau.

Quelles sera la situation en 2050 ? (Scénario optimiste)

Les rivières vaudoises

En appliquant les différents scénarios climatiques, on peut estimer quelle sera la température moyenne des cours d'eau en 2050 (Figure 69).

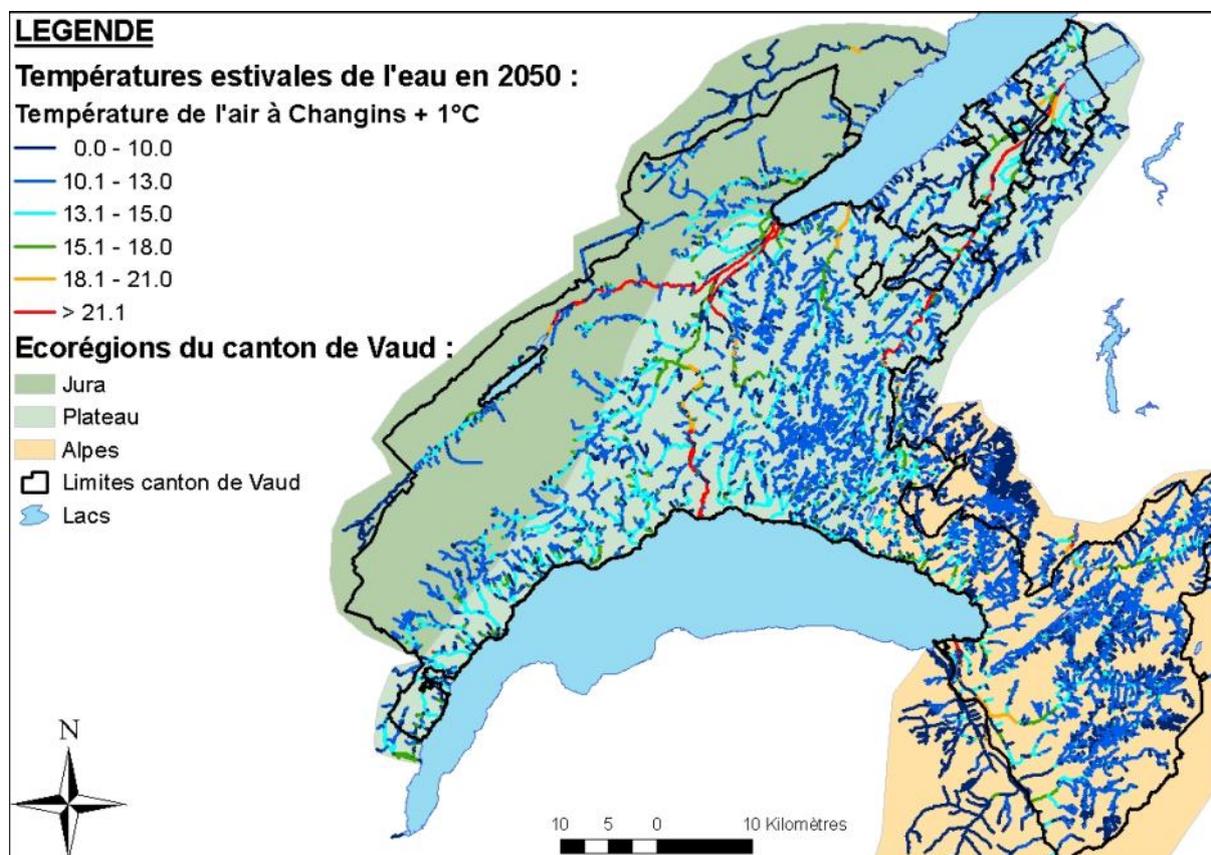


Figure 69 : Scénario optimiste (augmentation de 1.0°C) : Carte des températures estivales de l'eau pour les rivières vaudoises lorsque la température de l'air sera de 21°C à Changins

Tableau 23 : Proportion des différents segments de rivières selon leur température en 2050 +1°C

CLASSES DE TEMPERATURE	JURA		PLATEAU		ALPES		VAUD	
	km	%	km	%	km	%	km	%
0.0 - 10.0	201.96	36.3%	696.36	27.6%	926.89	39.6%	1825.20	33.7%
10.1 - 13.0	228.73	41.1%	1083.32	42.9%	1151.75	49.2%	2463.80	45.4%
13.1 - 15.0	89.36	16.0%	473.63	18.7%	180.81	7.7%	743.80	13.7%
15.1 - 18.0	19.05	3.4%	164.88	6.5%	44.77	1.9%	228.70	4.2%
18.1 - 21.0	2.54	0.5%	31.68	1.3%	23.41	1.0%	57.63	1.1%
>21.1	15.48	2.8%	76.74	3.0%	12.45	0.5%	104.67	1.9%
TOTAL	557.12	100.0%	2526.60	100.0%	2340.08	100.0%	5423.80	100.0%

Tableau 24 : Proportion des rivières avec une température inférieure ou supérieure à 15°C en 2050 +1°C

TEMPERATURE	JURA		PLATEAU		ALPES		VAUD	
	km	%	km	%	km	%	km	%
< 15	520.05	93.3%	2253.30	89.2%	2259.45	96.6%	5032.80	92.8%
> 15	37.07	6.7%	273.30	10.8%	80.63	3.4%	391.00	7.2%
TOTAL	557.12	100.0%	2526.60	100.0%	2340.08	100.0%	5423.80	100.0%

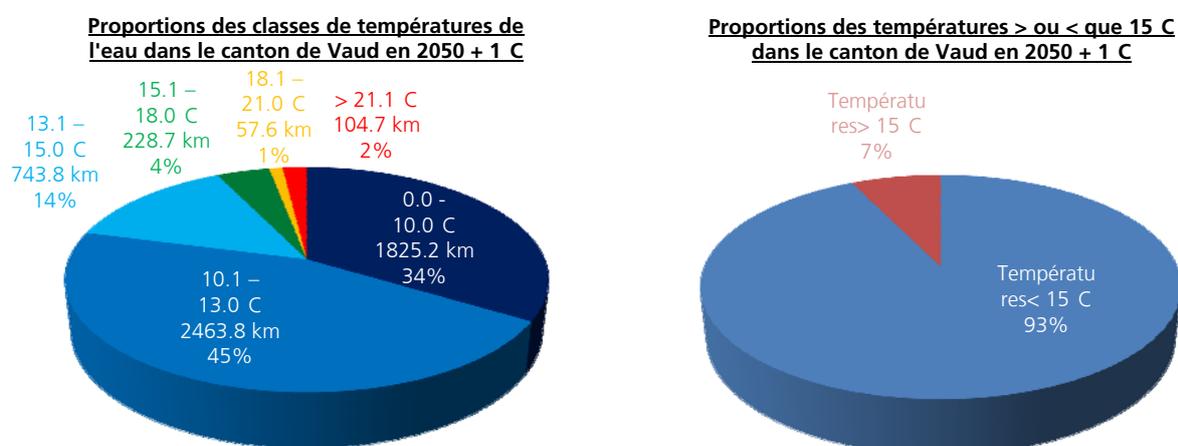


Figure 70 : Proportion des différents segments de rivières selon leur température et ceux avec une température inférieure ou supérieure à 15°C en 2050 +1°C

On constate pour ce scénario (Figure 70) que :

1. Pour 7.2 % des cours d'eau la température moyenne estivale de l'eau dépassera les 15°C,
2. soit une augmentation d'environ 2% par rapport à 2010.

Zoom sur la Venoge

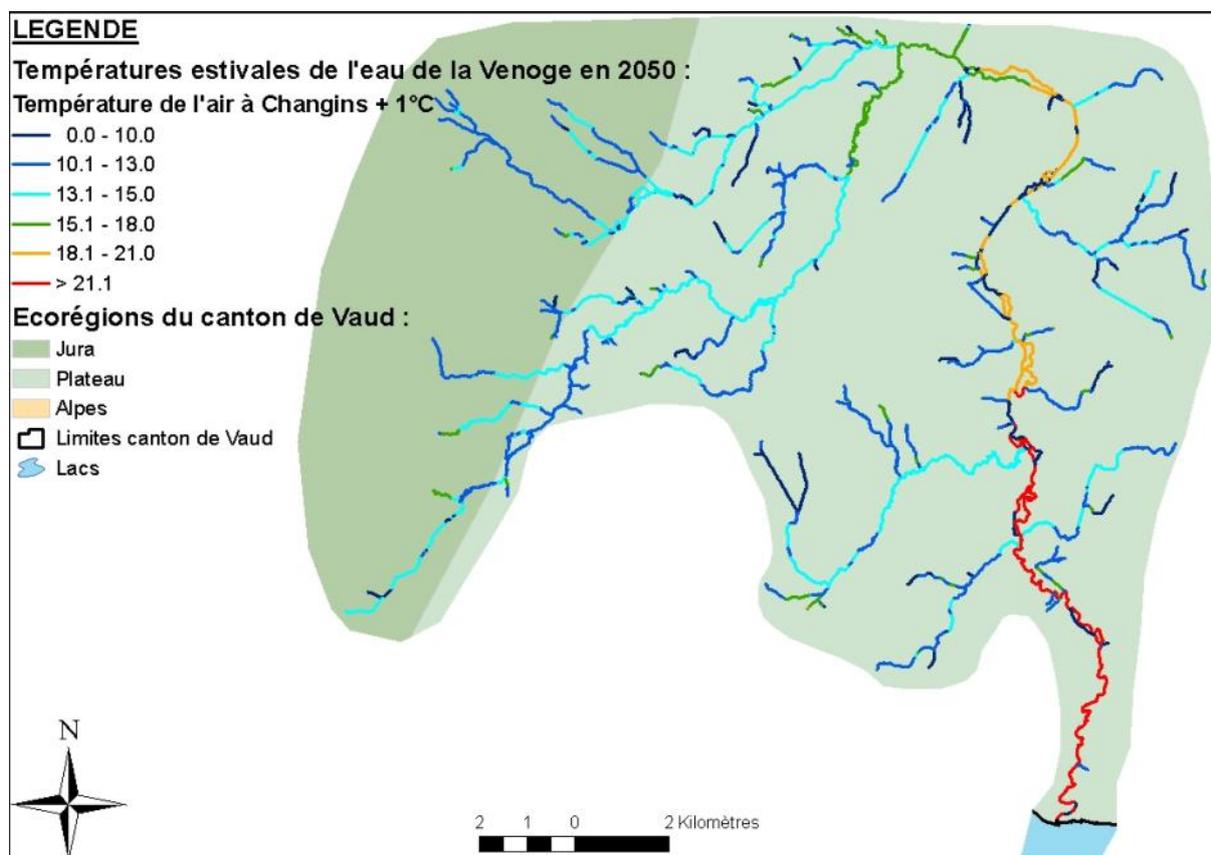


Figure 71 : Carte des températures estivales de l'eau de la Venoge en 2050 +1°C

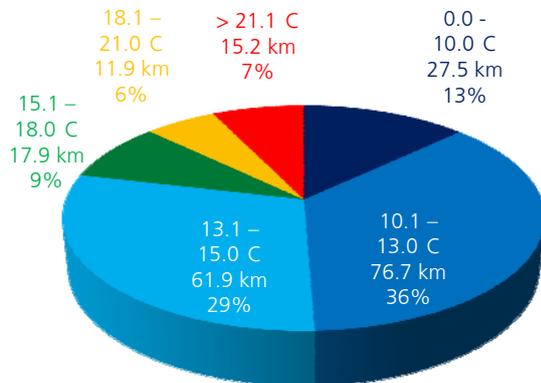
Tableau 25 : Proportion des différents segments de la Venoge selon leur température en 2050 +1°C

CLASSES DE TEMPERATURE	VENOGE	
	°C	km
0.0 - 10.0	27.46	13.0%
10.1 - 13.0	76.72	36.4%
13.1 - 15.0	61.87	29.3%
15.1 - 18.0	17.85	8.5%
18.1 - 21.0	11.88	5.6%
>21.1	15.21	7.2%
TOTAL	210.99	100.0%

Tableau 26 : Proportion des segments de la Venoge avec une température inférieure ou supérieure à 15°C en 2050 +1°C

TEMPERATURE	VENOGE		
	°C	km	%
< 15		166.05	78.7%
> 15		44.94	21.3%
TOTAL		210.99	100.0%

Proportions des classes de températures de l'eau sur la Venoge en 2050 + 1 C



Proportions des températures > ou < que 15 C sur la Venoge en 2050 + 1 C

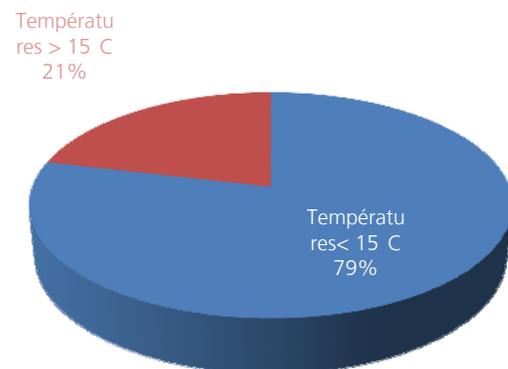


Figure 72 : Proportion des différents segments de la Venoge selon leur température et ceux avec une température inférieure ou supérieure à 15°C en 2050 +1°C

Pour la Venoge, dans le cas d'un scénario optimiste, on observe (Figure 72) que :

1. c'est 21% du réseau qui présentera une température moyenne estivale supérieure à 15°C,
2. soit une augmentation de 4% par rapport à 2010.
3. La zone défavorable s'étend en direction de la source.

Quelle sera la situation en 2050 ? (Scénario moyen)

Les rivières vaudoises

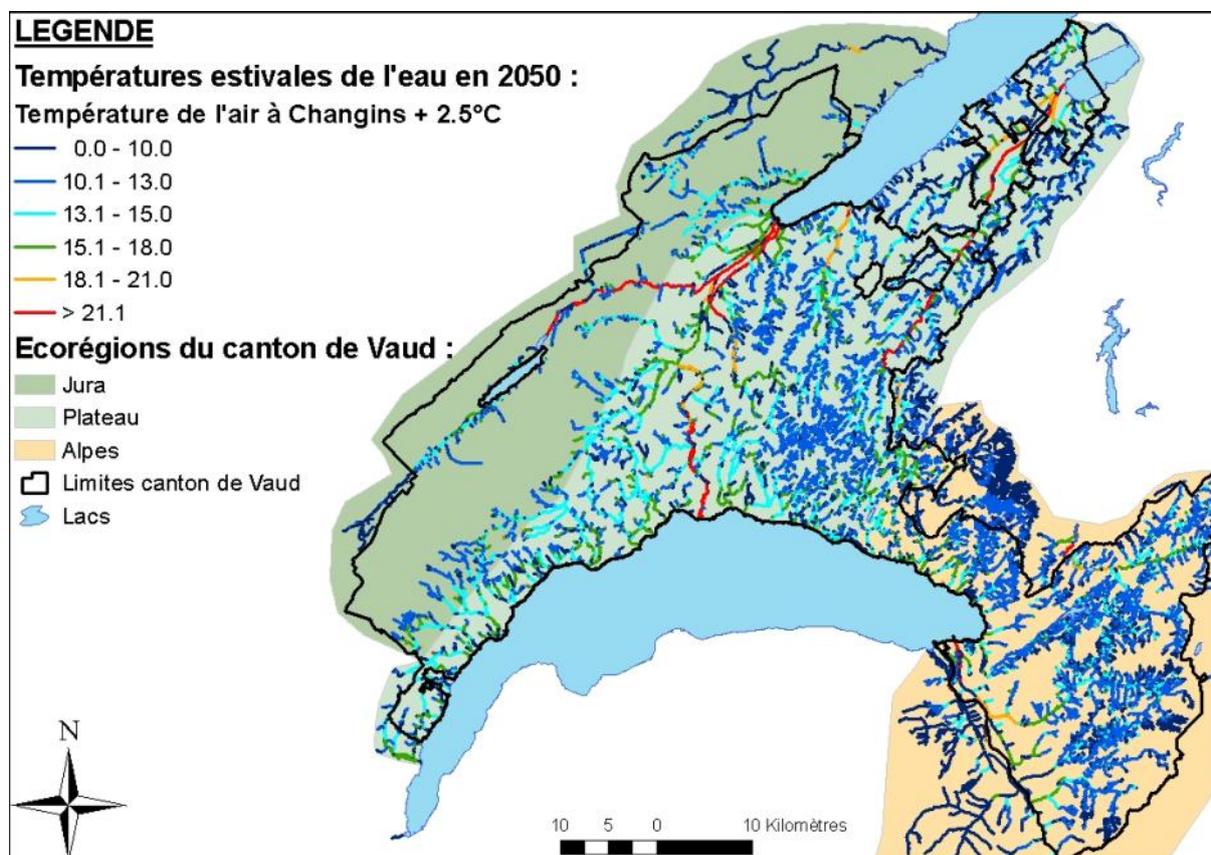


Figure 73 : Scénario moyen (augmentation de 2.5°C) : Carte des températures estivales de l'eau pour les rivières vaudoises lorsque la température de l'air sera de 22.5°C à Changins

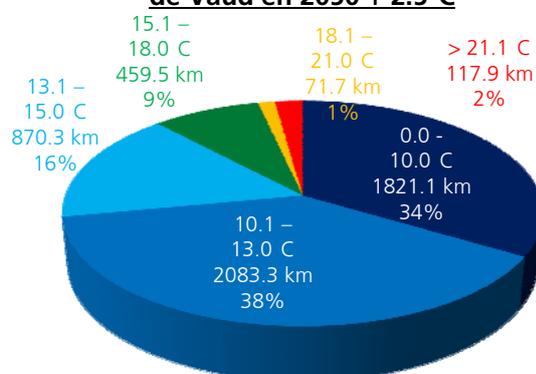
Tableau 27 : Proportion des différents segments de rivières selon leur température en 2050 +2.5°C

CLASSES DE TEMPERATURE	JURA		PLATEAU		ALPES		VAUD	
	km	%	km	%	km	%	km	%
0.0 - 10.0	202.05	36.3%	697.19	27.6%	921.82	39.4%	1821.07	33.6%
10.1 - 13.0	186.04	33.4%	880.47	34.8%	1016.78	43.5%	2083.30	38.4%
13.1 - 15.0	105.48	18.9%	494.51	19.6%	270.36	11.6%	870.34	16.0%
15.1 - 18.0	44.64	8.0%	325.15	12.9%	89.67	3.8%	459.46	8.5%
18.1 - 21.0	2.40	0.4%	46.29	1.8%	23.02	1.0%	71.71	1.3%
>21.1	16.51	3.0%	82.98	3.3%	18.42	0.8%	117.91	2.2%
TOTAL	557.12	100.0%	2526.60	100.0%	2340.08	100.0%	5423.80	100.0%

Tableau 28 : Proportion des rivières avec une température inférieure ou supérieure à 15°C en 2050 +2.5°C

TEMPERATURE	JURA		PLATEAU		ALPES		VAUD	
	km	%	km	%	km	%	km	%
< 15	493.57	88.6%	2072.18	82.0%	2208.97	94.4%	4774.72	88.0%
> 15	63.55	11.4%	454.42	18.0%	131.11	5.6%	649.08	12.0%
TOTAL	557.12	100.0%	2526.60	100.0%	2340.08	100.0%	5423.80	100.0%

Proportions des classes de température de l'eau dans le canton de Vaud en 2050 + 2.5 C



Proportions des températures > ou < que 15 C dans le canton de Vaud en 2050 + 2.5 C

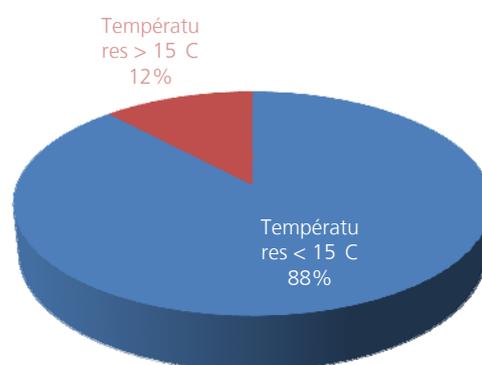


Figure 74 : Proportion des différents segments de rivières selon leur température et ceux avec une température inférieure ou supérieure à 15°C en 2050 +2.5°C

On constate, dans ce scénario, (Figure 74) que pour 12 % des cours d'eau la température moyenne estivale de l'eau dépassera les 15°C

Zoom sur la Venoge

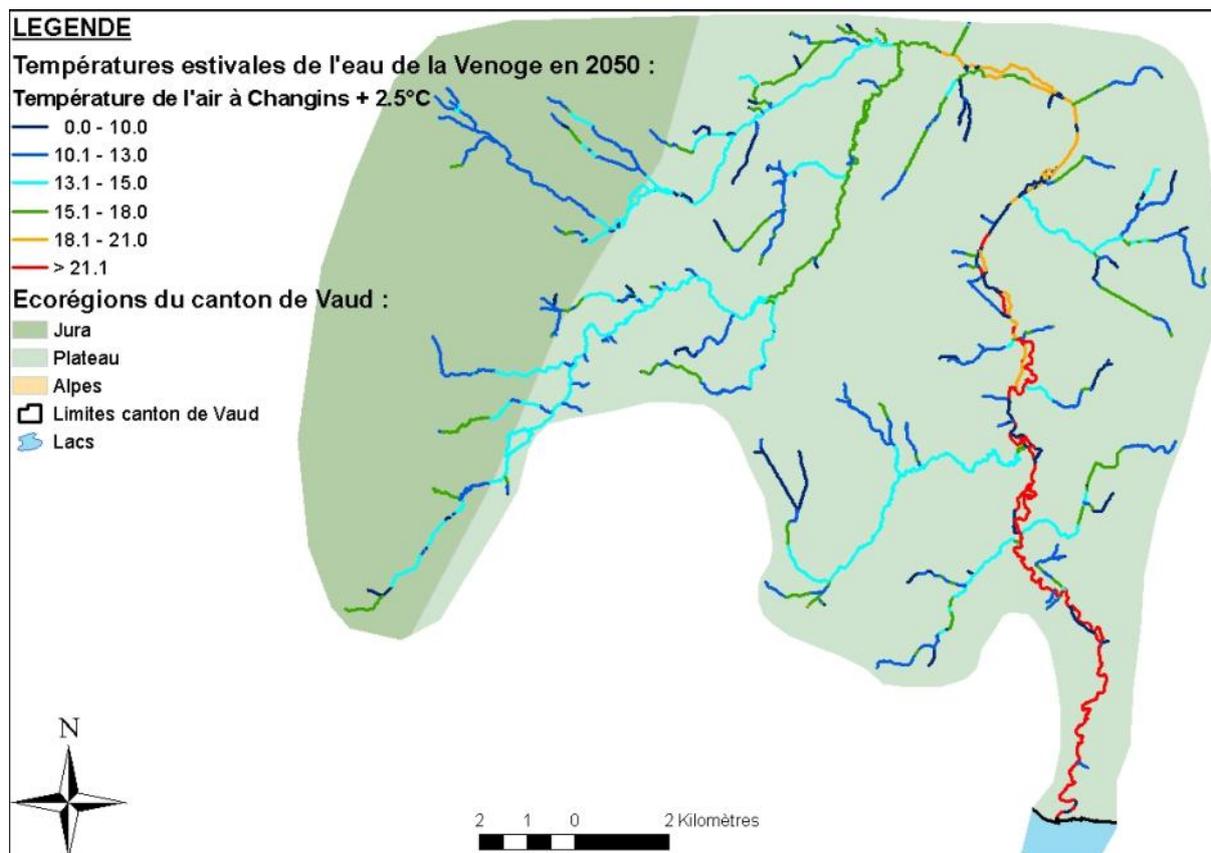


Figure 75 : Carte des températures estivales de l'eau de la Venoge en 2050 +2.5°C

Tableau 29 : Proportion des différents segments de la Venoge selon leur température en 2050 +2.5°C

CLASSES DE TEMPERATURE	VENOGE	
	°C	km
0.0 - 10.0	27.50	13.0%
10.1 - 13.0	58.69	27.8%
13.1 - 15.0	58.81	27.9%
15.1 - 18.0	37.73	17.9%
18.1 - 21.0	9.02	4.3%
>21.1	19.23	9.1%
TOTAL	210.99	100.0%

Tableau 30 : Proportion des segments de la Venoge avec une température inférieure ou supérieure à 15°C en 2050 +2.5°C

TEMPERATURE	VENOGE	
	°C	km
< 15	145.01	68.7%
> 15	65.98	31.3%
TOTAL	210.99	100.0%

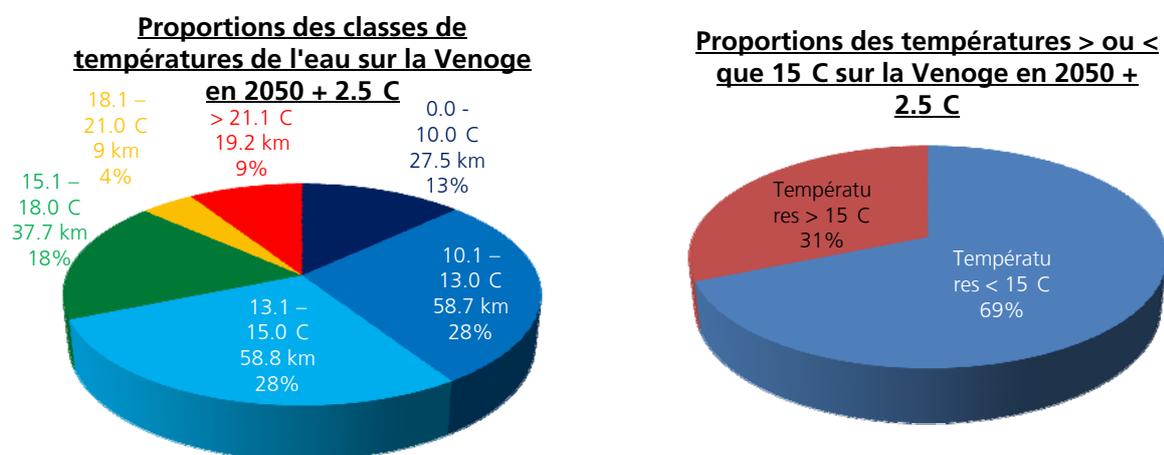


Figure 76 : Proportion des différents segments de la Venoge selon leur température et ceux avec une température inférieure ou supérieure à 15°C en 2050 +2.5°C

Dans ce scénario (Figure 76), environ 31% du réseau de la Venoge présente une température supérieure à 15°C.

Quelle sera la situation en 2050 ? (Scénario pessimiste)

Les rivières vaudoises

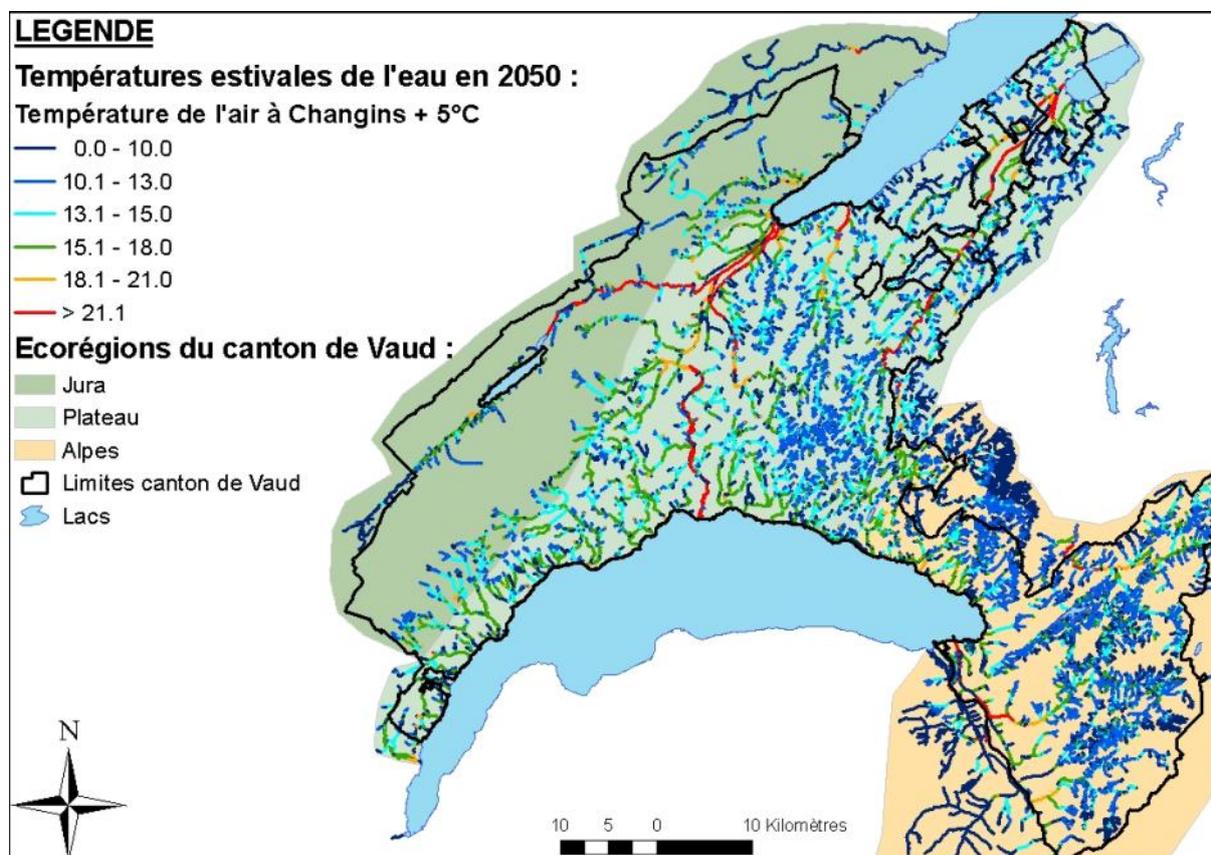


Figure 77 : Scénario pessimiste (augmentation de 5.0°C) : Carte des températures estivales de l'eau pour les rivières vaudoises lorsque la température de l'air sera de 25°C à Changins

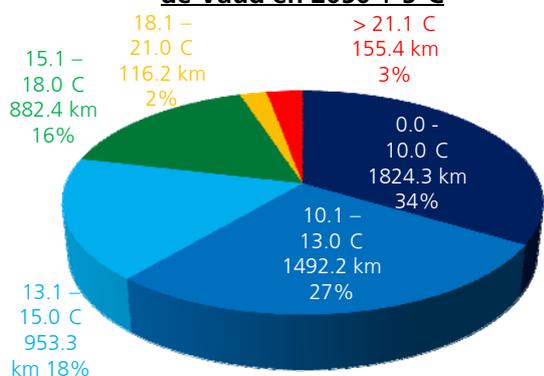
Tableau 31 : Proportion des différents segments de rivières selon leur température en 2050 +5°C

CLASSES DE TEMPERATURE	JURA		PLATEAU		ALPES		VAUD	
	km	%	km	%	km	%	km	%
0.0 - 10.0	202.33	36.3%	699.77	27.7%	922.23	39.4%	1824.33	33.6%
10.1 - 13.0	118.28	3.1%	559.45	22.1%	814.46	34.8%	1492.20	27.5%
13.1 - 15.0	107.28	19.3%	527.42	20.9%	318.57	13.6%	953.27	17.6%
15.1 - 18.0	101.88	18.3%	553.62	21.9%	226.91	9.7%	882.41	16.3%
18.1 - 21.0	10.11	1.8%	82.36	3.3%	23.71	1.0%	116.18	2.1%
>21.1	17.25	3.1%	103.97	4.1%	34.18	1.5%	155.40	2.9%
TOTAL	557.12	100.0%	2526.60	100.0%	2340.08	100.0%	5423.80	100.0%

Tableau 32 : Proportion des rivières avec une température inférieure ou supérieure à 15°C en 2050 +5°C

TEMPERATURE	JURA		PLATEAU		ALPES		VAUD	
	km	%	km	%	km	%	km	%
< 15	427.89	76.8%	1786.65	70.7%	2055.27	87.8%	4269.80	78.7%
> 15	129.24	23.2%	739.95	29.3%	284.81	12.2%	1153.99	21.3%
TOTAL	557.12	100.0%	2526.60	100.0%	2340.08	100.0%	5423.80	100.0%

Proportions des classes de température de l'eau dans le canton de Vaud en 2050 + 5 C



Proportions des températures > ou < 15 C dans le canton de Vaud en 2050 + 5 C

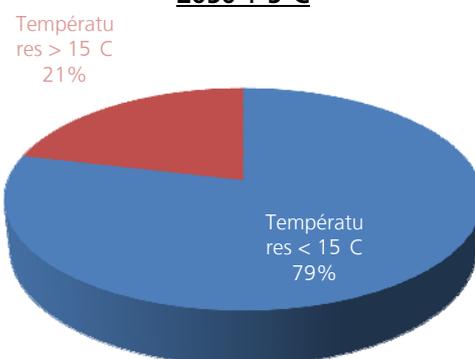


Figure 78 : Proportion des différents segments de rivières selon leur température et ceux avec une température inférieure ou supérieure à 15°C en 2050 +5°C

On constate que dans ce scénario (Figure 78) pour 21.3 % des cours d'eau la température moyenne estivale de l'eau dépassera les 15°C

Zoom sur la Venoge

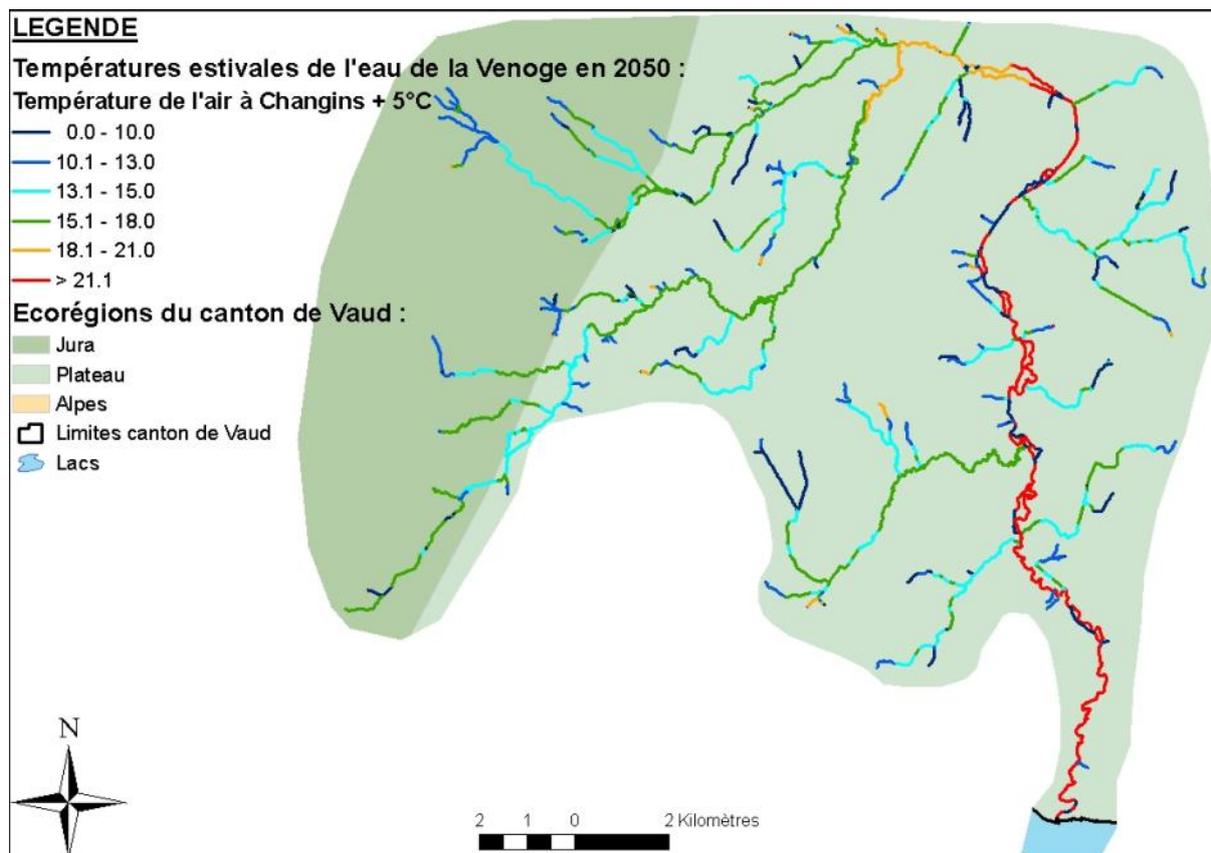


Figure 79 : Carte des températures estivales de l'eau de la Venoge en 2050 +5°C

Tableau 33 : Proportion des différents segments de la Venoge selon leur température en 2050 +5°C

CLASSES DE TEMPERATURE	VENOGE	
	°C	km
0.0 - 10.0	27.61	13.1%
10.1 - 13.0	28.77	13.6%
13.1 - 15.0	50.41	23.9%
15.1 - 18.0	68.88	32.6%
18.1 - 21.0	9.09	4.3%
>21.1	26.23	12.4%
TOTAL	210.99	100.0%

Tableau 34 : Proportion des segments de la Venoge avec une température inférieure ou supérieure à 15°C en 2050 +5°C

TEMPERATURE	VENOGE		
	°C	km	%
< 15		106.79	50.6%
> 15		104.20	49.4%
TOTAL		210.99	100.0%

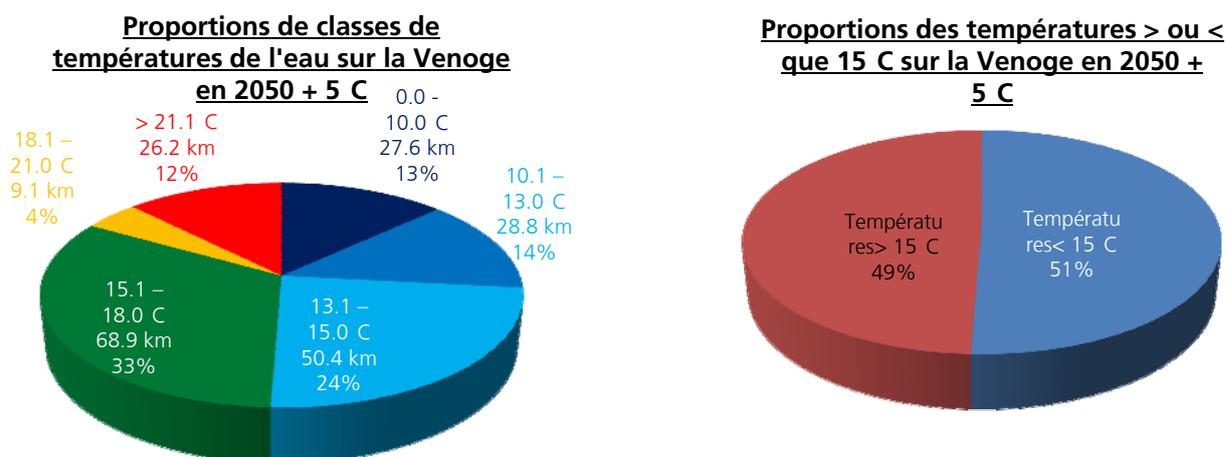


Figure 80: Proportion des différents segments de la Venoge selon leur température et ceux avec une température inférieure ou supérieure à 15°C en 2050 +5°C

Dans le cas d'un scénario pessimiste (Figure 80), la moitié du réseau de la Venoge pourrait être atteinte.

Les rivières vaudoises

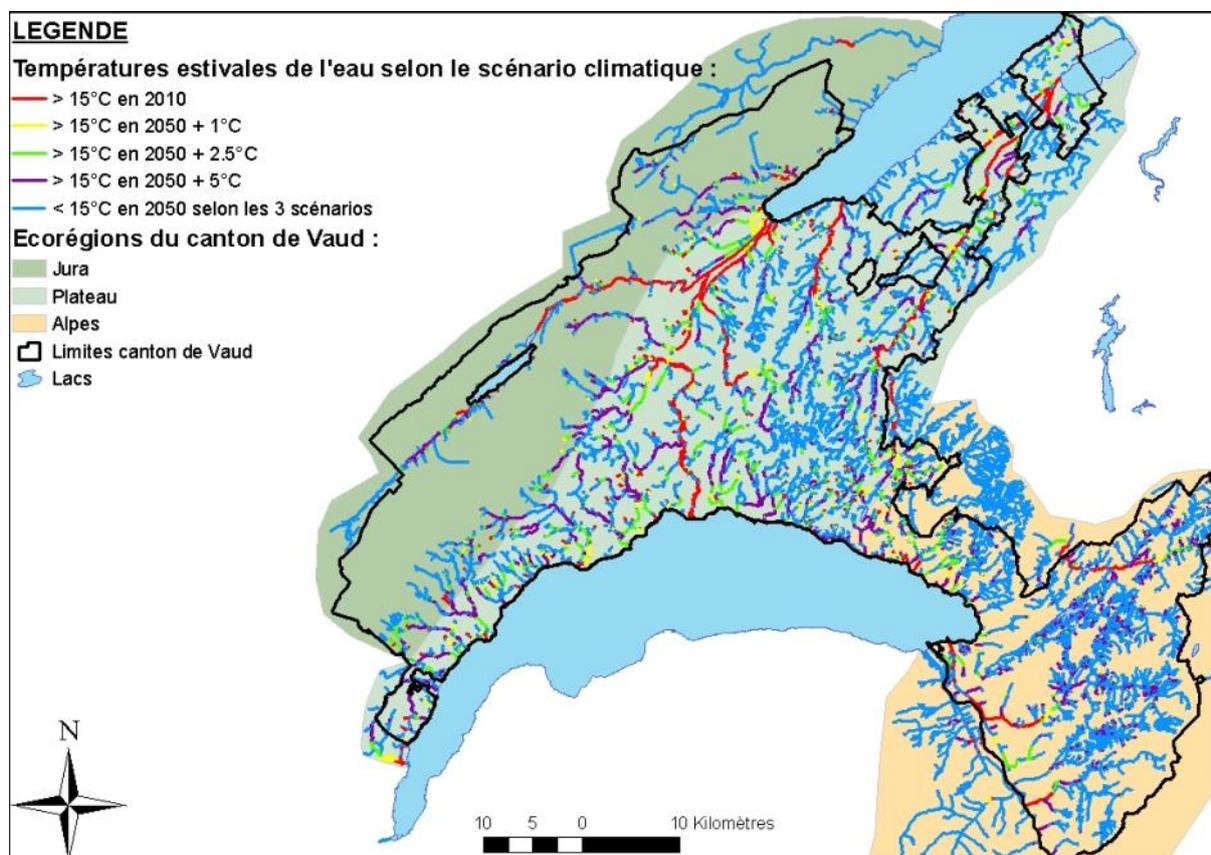


Figure 81 : Carte récapitulative de la température estivale de l'eau pour les rivières vaudoises selon les 3 scénarios climatiques

Tableau 35 : Tableau récapitulatif de la proportion des segments de rivières vaudoises selon le scénario climatique

SCENARIOS CLIMATIQUES	JURA			PLATEAU			ALPES			VAUD		
	km > 15°C	%	Δ AVEC 2010	km > 15°C	%	Δ AVEC 2010	km > 15°C	%	Δ AVEC 2010	km > 15°C	%	Δ AVEC 2010
> 15°C en 2010	29.8	5.3%	/	190.3	7.5%	/	57.9	2.5%	/	277.5	5.0%	/
> 15°C 2050 + 1°C	37.1	6.7%	1.3%	273.3	10.8%	3.3%	80.6	3.4%	1.0%	390.0	7.0%	2.0%
> 15°C 2050 + 2.5°C	63.6	11.4%	6.1%	454.4	18.0%	10.5%	131.1	5.6%	3.1%	647.2	11.6%	6.6%
> 15°C 2050 + 5°C	129.2	23.2%	17.9%	739.9	29.3%	21.8%	284.8	12.2%	9.7%	1146.4	20.6%	15.6%
< 15°C en 2050	427.9	76.8%	/	1786.6	70.7%	/	2055.3	87.8%	/	4415.5	79.4%	/
TOTAL	557.1	/	/	2526.6	/	/	2340.1	/	/	5561.9	/	/

La question, qui se pose à ce stade, est de savoir si les différences observées entre les trois écorégions sont significatives ou non. Pour répondre à cette question, on peut, pour chaque écorégion, comptabiliser le nombre de nouveaux segments de rivière qui franchissent la température de 15°C pour chacun des trois scénarios (Tableau 36), puis comparer statistiquement ces résultats par un Test de X^2 .

Tableau 36 : Nombre de nouveaux segments de rivières avec une température supérieure à 15°C

SCENARIOS CLIMATIQUES	JURA	PLATEAU	ALPES
°C	Nombre de nouveaux segments de rivière	Nombre de nouveaux segments de rivière	Nombre de nouveaux segments de rivière
> 15°C 2050 + 1°C	56	471	275
> 15°C 2050 + 2.5°C	186	1023	599
> 15°C 2050 + 5°C	458	1036	2039

Le test de X^2 donne une valeur de p-value $< 2.2e^{-16}$. Les différences observées entre régions sont donc hautement significatives. Cela induit les conclusions suivantes :

1. En admettant une élévation de température de 1 ou 2.5°C en 2050, ce sont essentiellement des tronçons de rivières du Plateau ou du Jura qui vont se réchauffer.
2. Par contre, en admettant un réchauffement de 5°C, un nombre considérable de rivière des Alpes vont, à leur tour, souffrir.

Zoom sur la Venoge

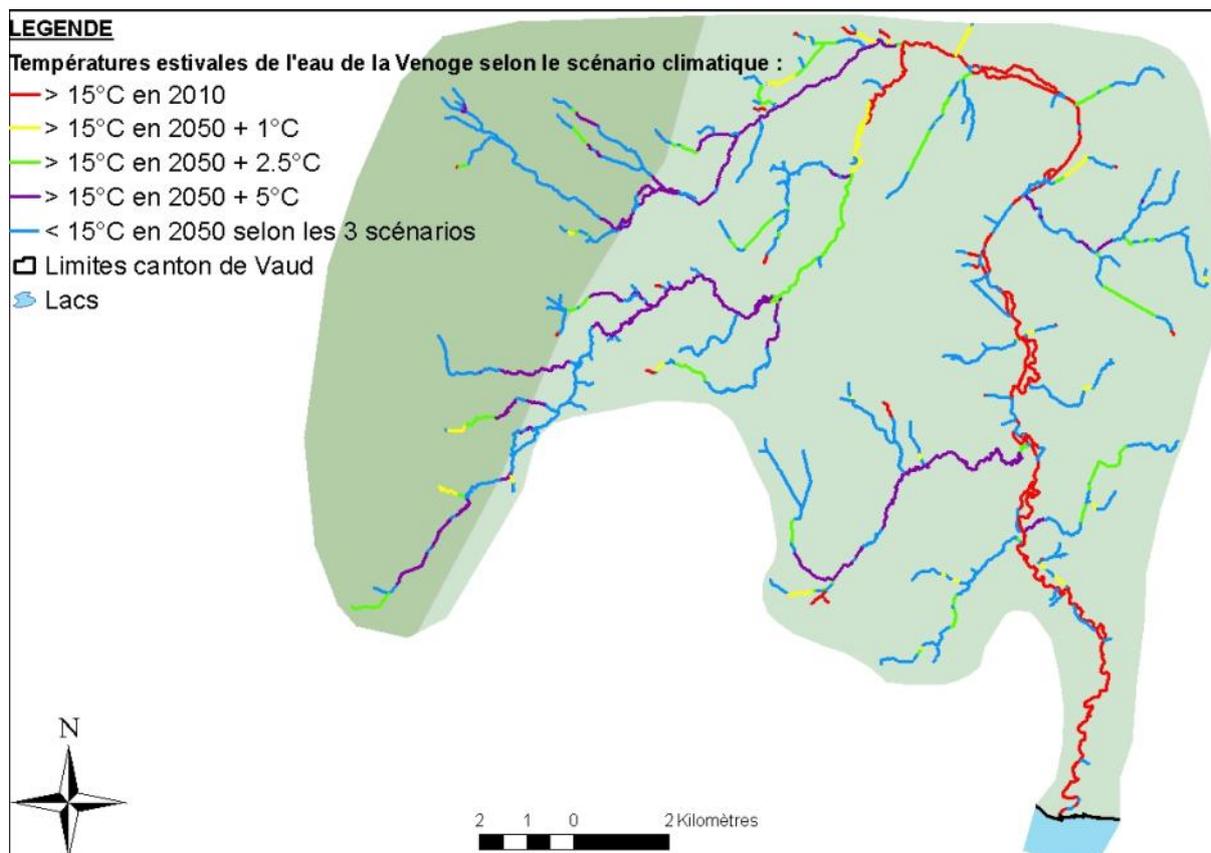


Figure 82: Carte récapitulative de la température estivale de l'eau de la Venoge selon les 3 scénarios climatiques

Tableau 37 : Tableau récapitulatif de la proportion des segments de la Venoge selon le scénario climatique

SCENARIOS CLIMATIQUES	VENOGE			
	°C	km > 15°C	%	Δ AVEC 2010
> 15°C en 2010		35.9	17.0%	/
> 15°C 2050 + 1°C		44.9	21.3%	4.3%
> 15°C 2050 + 2.5°C		66.0	31.3%	14.3%
> 15°C 2050 + 5°C		104.2	49.4%	32.4%
< 15°C en 2050		106.8	50.6%	/
TOTAL		211.0	/	/

En 2050, avec le scénario pessimiste, seules les têtes de bassin restent avec des températures relativement basses.

5.3.4 Priorisation des actions

Plusieurs types d'actions peuvent être imaginés dans le cadre de cette lutte contre les effets du réchauffement climatique. En effet on peut soit :

1. agir directement sur les rivières pour leur permettre d'éviter un réchauffement trop important, ce qui peut être long, compliqué administrativement, et d'un coût élevé, mais qui permet de solutionner le problème,
2. permettre aux poissons de quitter ces zones défavorables et de migrer vers l'amont en attendant que des mesures agissant directement sur les rivières soient mises en place.

Agir sur les rivières elles-mêmes

Le modèle a montré que, si l'on veut lutter contre les effets du réchauffement climatique, on peut agir sur l'écomorphologie et/ou sur la présence de forêt. A noter que ces paramètres sont souvent liés. En effet, lors de travaux de renaturation qui touchent aux berges, on profite souvent, pour autant que l'on ait la maîtrise des terrains, d'améliorer l'écomorphologie (par exemple en décanalisant la rivière) et de planter des arbres en bordure de cours d'eau. A cet égard, l'analyse a montré que c'est en priorité **les rivières du Plateau**, et surtout **en aval** de celles-ci, qu'il faut agir en premier, car ce sont celles qui sont le plus dégradées lorsque l'on considère ces deux paramètres. Les cartes présentées plus haut permettent d'identifier les secteurs où il faudrait agir prioritairement.

Permettre la migration vers des zones favorables

Une autre façon de lutter contre les effets du réchauffement climatique consiste à permettre aux poissons, aujourd'hui bloqués en aval, de pouvoir migrer en direction des sources des cours d'eau, dans des tronçons qui seront moins affectés par l'élévation de la température. On s'attaque ici à la problématique de la migration piscicole et donc à celle de la présence des obstacles à la migration. Ceux-ci sont extrêmement nombreux (4068 !) sur le territoire considéré (Tableau 38 ; Figure 83) et bien entendu l'argent et le temps manquent pour les assainir tous. Il s'agit donc à ce stade de définir lesquels devraient être aménagés en premier lieu. Pour répondre à cette question, deux raisonnements s'opposent, qui définissent autant de stratégies distinctes :

Stratégie du réduit climatique

L'application du modèle a montré que de nombreuses rivières des Alpes ne seront pas touchées par le réchauffement, ou en tout cas pas tant que celui-ci n'avoisine pas les 5°C. Or, il y a des cours d'eau qui, dès lors, pourraient abriter une population de truites importante, mais sur lesquels on trouve tout près de l'embouchure un obstacle qui bloque toute migration. Dès lors, l'aménagement de celui-ci permettrait la colonisation de la rivière et assurerait la présence d'une population pérenne de truites à l'abri des problèmes de réchauffement. Par analogie avec l'histoire suisse lors de la Seconde guerre mondiale, cette stratégie s'apparente à la **création d'un réduit climatique**, (similaire au Réduit national imaginé par le Général Guisan). On sauve les populations là où on peut les mettre en sûreté, mais de facto on abandonne celles qui sont déjà aujourd'hui menacées. Si on applique cette stratégie, ce sont donc les **obstacles en aval des rivières des Alpes** potentiellement favorables qu'il faut aménager en premier.

Stratégie du sauvetage immédiat

L'application du modèle a montré que pour de nombreuses rivières, la situation est déjà aujourd'hui problématique. Il est probable que les populations de truites y souffrent maintenant déjà des effets du réchauffement et que, par conséquent, elles sont menacées de disparition. Si

l'on veut sauver ces populations et se battre sur tous les fronts (par opposition à la stratégie du réduit climatique), c'est donc sur ces rivières qu'il faut dès maintenant aménager des passes à poissons, afin que les populations puissent migrer vers des secteurs plus favorables près des sources, en attendant que les autres mesures de renaturation (aménagement de l'écomorphologie, plantation d'arbres) fassent leur effet. Si l'on applique cette **stratégie du sauvetage immédiat**, c'est donc les obstacles sur les rivières aujourd'hui problématiques thermiquement parlant qu'il faut agir en premier, soit sur celles du **Plateau en aval des cours d'eau**.

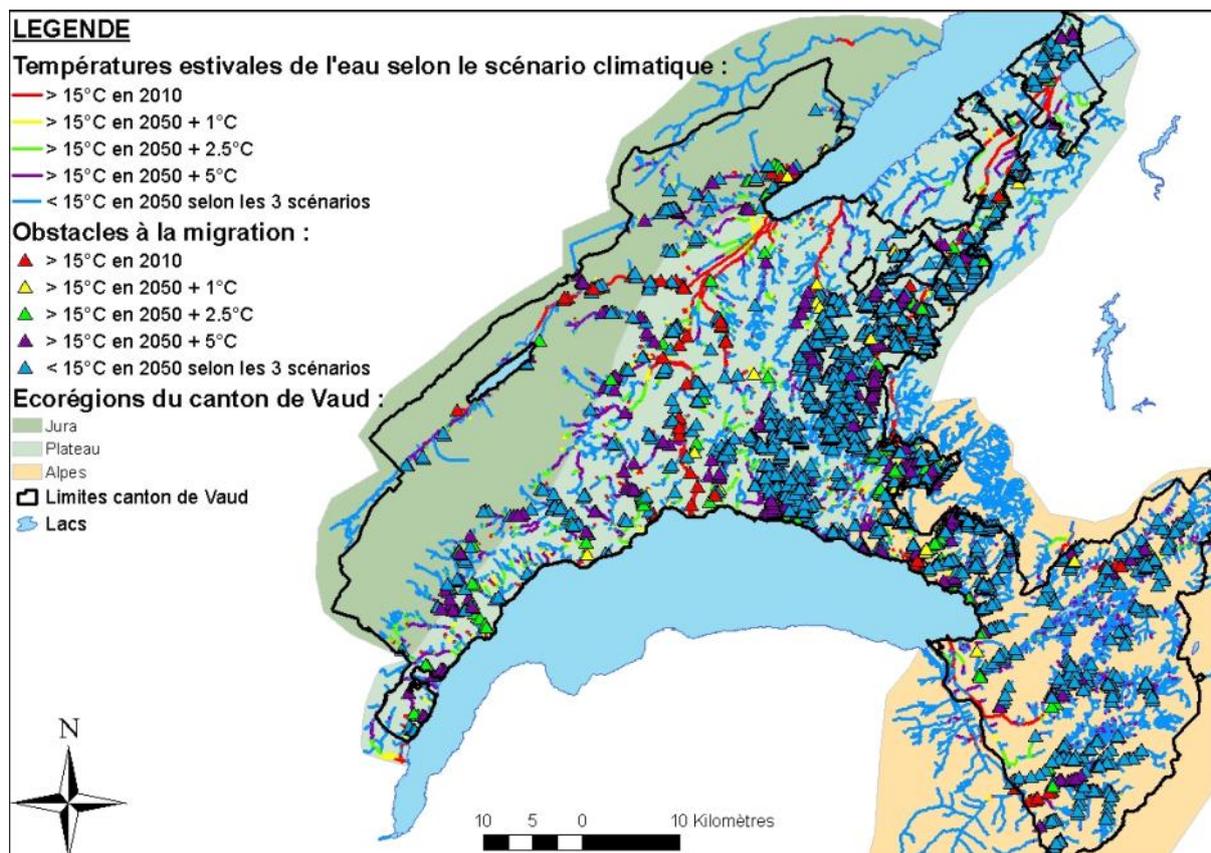


Figure 83 : Carte des obstacles à la migration critiques en 2050

En appliquant la stratégie du sauvetage immédiat, c'est donc aujourd'hui 101 obstacles qu'il faudrait aménager à l'échelle du canton de Vaud, et plus prioritairement les 49 sur le Plateau (Tableau 38).

Tableau 38 : Nombre d'obstacles à la migration dans le canton de Vaud selon le scénario climatique

SCENARIOS CLIMATIQUES	JURA	PLATEAU	ALPES	VAUD
°C	Nombre d'obstacles à la migration			
2010	18	49	34	101
2050 + 1°C	23 (+5)	81 (+32)	52 (+18)	156 (+55)
2050 + 2.5°C	35 (+12)	214 (+133)	162 (+110)	411 (+255)
2050 + 5°C	68 (+33)	470 (+256)	323 (+161)	861 (+450)
TOTAL	150	2758	1160	4068

Nombre d'obstacles à la migration dans le canton de Vaud et ses écorégions selon le scénario climatique

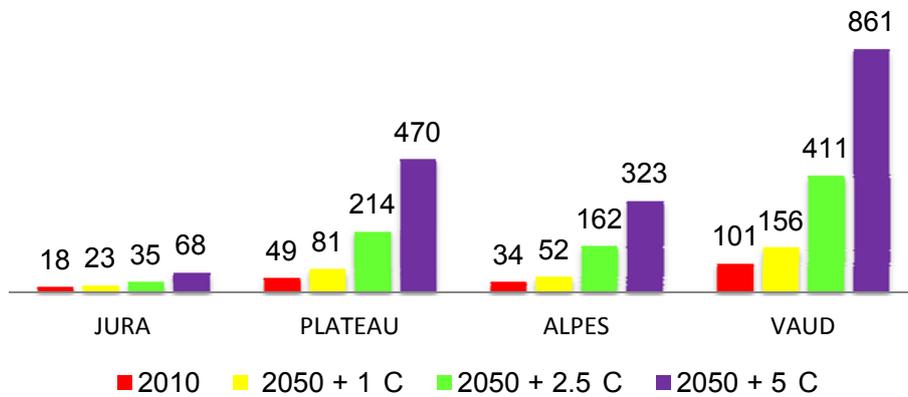


Figure 84 : Nombre d'obstacles à la migration dans le canton de Vaud selon le scénario climatique

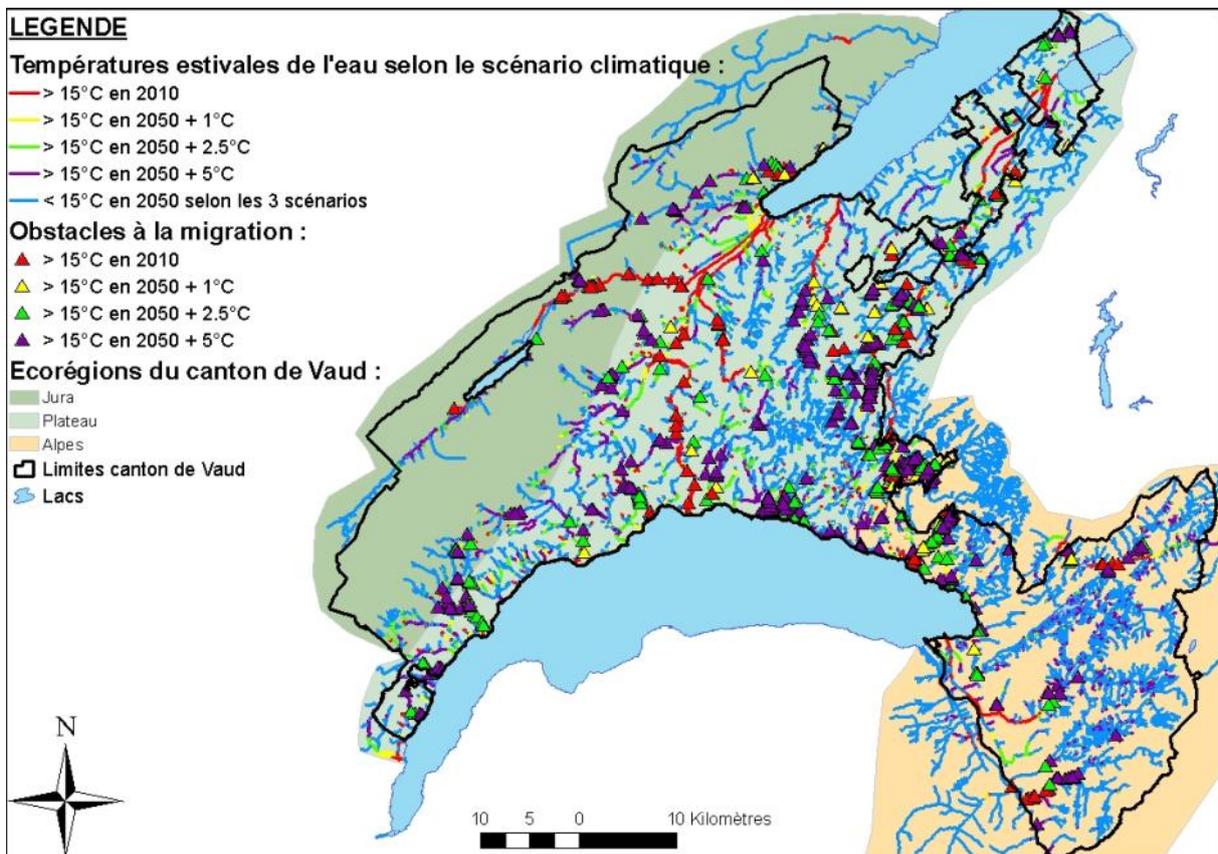


Figure 85 : Carte des obstacles à la migration critiques en 2050 sans la 4^{ème} classe (celle des obstacles sur les rivières avec une température de l'eau inférieure à 15 °C).

Pour la Venoge, la situation se présente comme suit (Figure 86) :

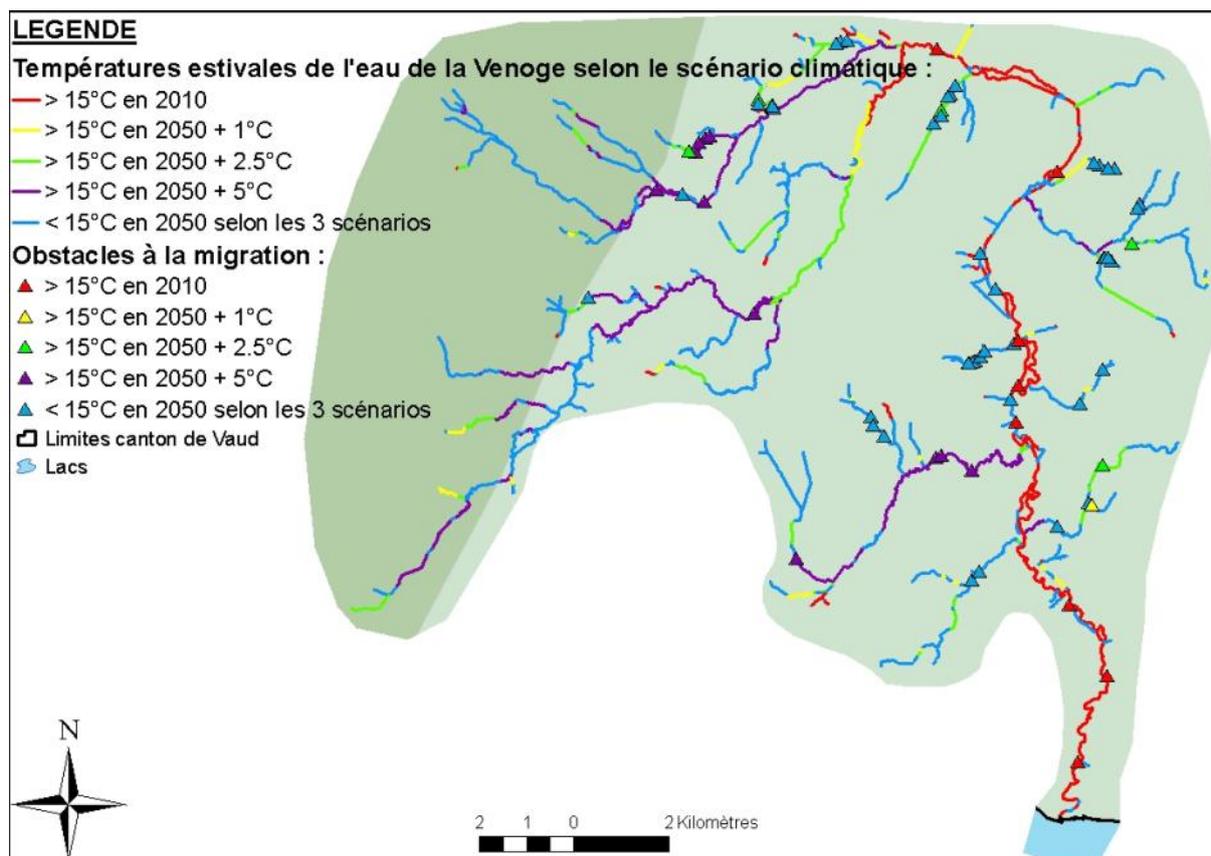


Figure 86 : Carte des obstacles à la migration critiques sur la Venoge en 2050

Tableau 39 : Nombre d'obstacles à la migration sur la Venoge selon le scénario climatique

SCENARIOS CLIMATIQUES	VENOGE
°C	Nombre d'obstacles à la migration
2010	8
2050 + 1°C	9 (+1)
2050 + 2.5°C	14 (+5)
2050 + 5°C	25 (+11)
TOTAL	69

Là, la question ne se pose pas, c'est bien de l'aval vers l'amont qu'il faut aménager les obstacles, soit les 8 premiers en rouge sur le graphique (Figure 86).

Nombre d'obstacles à la migration sur la Venoge selon le scénario climatique

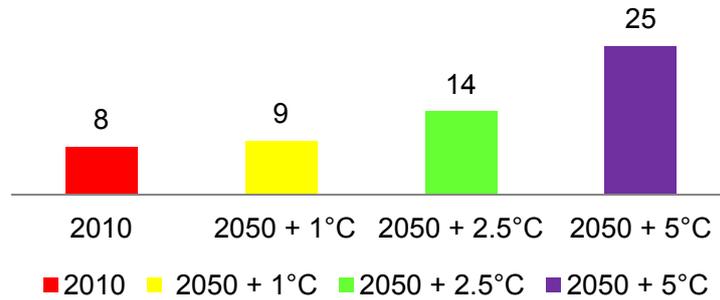


Figure 87 : Nombre d'obstacles à la migration sur la Venoge selon le scénario climatique

5.4 Discussion

5.4.1 Corrélation entre températures de l'air et de l'eau

Souvent, de simples régressions linéaires sont utilisées pour expliquer la corrélation entre température de l'air et celle de l'eau (Johnson, 1971; Smith, 1975; Mohseni and Stefan, 1999; Erickson and Stefan, 2000). Pour 8 rivières anglaises par exemple, un modèle de régression linéaire expliquait au moins 86% de la variance de la température de l'eau en utilisant la température de l'air comme variable (Mohseni and Stefan, 1999). Pour diverses rivières danoises, un modèle linéaire simple permet d'expliquer clairement la relation entre température de l'air et de l'eau (Pedersen and Sand-Jensen, 2007). Cependant, comme dans le cas du Boiron, près des sources la température des rivières danoises n'augmente que très peu en fonction de celle de l'air. Les corrélations sont donc d'autant plus significatives que l'on se situe en aval. L'application d'un modèle logistique non linéaire permettrait d'améliorer quelque peu la relation, de même qu'un modèle de régression multiple. Toutefois les différences entre modèles ne sont pas toujours significatives (Pedersen and Sand-Jensen, 2007). Le modèle linéaire a cependant des limites (Erickson and Stefan, 2000). En effet, pour les valeurs inférieures on observe une divergence entre air et eau, la température de l'air peut être clairement au-dessous de 0°C, alors que celle de l'eau ne descend jamais en dessous de cette valeur puisque l'eau se transforme en glace. C'est la raison pour laquelle un modèle sinusoïdal pourrait apparaître meilleur. A ce moment là, cependant, se pose la question pour les valeurs extrêmes supérieures. Lorsque la température de l'eau dépasse une certaine valeur, les processus d'évaporation permettront en partie d'éviter une augmentation supplémentaire de la température de l'eau. Un modèle linéaire permet donc une augmentation régulière théorique de la température de l'eau en fonction de celle de l'air, alors qu'un modèle sinusoïdal présuppose une asymptote à une valeur maximale. En conséquence, lorsque l'on extrapolera les valeurs de températures de l'eau à la suite du réchauffement climatique, on obtiendra des valeurs beaucoup plus grande de température de l'eau avec un modèle linéaire qu'avec un modèle sinusoïdal au-delà d'un certain seuil (>25°C) (Erickson and Stefan, 2000).

Un modèle linéaire a été utilisé pour évaluer l'évolution de la température des rivières avec comme hypothèse un doublement de la concentration en CO₂ aux USA. Avec un tel scénario, la température de l'air devrait s'accroître de 2 à 6°C. Pour estimer l'accroissement concomitant de la température de l'eau, la question se pose de l'extrapolation des valeurs pour les valeurs extrêmes. L'analyse des relevés de température de 584 stations aux USA montrait bien des signes de non-linéarité pour les valeurs extrêmes (hors de la tranche de température 0-20°C) (Mohseni and Stefan, 1999) (Figure 88).

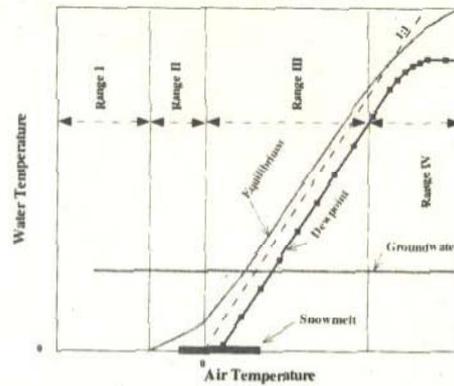


Fig. 9. Schematic representation of equilibrium temperature and natural upstream temperatures (groundwater temperature, snowmelt temperature and dew point temperature) in rivers. Stream temperature changes between equilibrium temperature and upstream temperature based on the length of the stream reach and the unit width of the streamflow.

Figure 88: Modèle de relation température de l'eau et de l'air (Mohseni et Stefan 1999)

5.4.2 Descripteurs de température

La plupart des modèles se base sur des températures moyennes journalières ou hebdomadaires. Or, dans de nombreux cas, il suffit de quelques heures d'exposition à des températures élevées pour entraîner la disparition de certaines espèces. Ce sont donc, les maxima et non les moyennes, de même que les amplitudes thermiques, qu'il faudrait modéliser afin d'estimer l'impact du réchauffement climatiques sur la faune aquatique. Un modèle numérique basé sur la température de l'air a été développé dans ce sens (Caissie *et al.*, 2001). Par ailleurs, on indique souvent la valeur de 15°C comme limite au delà de laquelle la maladie rénale proliférative se développe chez la truite (de Kinkelin and Lorient, 2001; Wahli *et al.*, 2002; Hari *et al.*, 2006). Or il est rarement précisé s'il doit s'agir de la moyenne annuelle, estivale, la valeur maximal instantanée ou sur un certain laps de temps. Cette confusion rend difficile l'établissement une valeur limite au-delà de laquelle les problèmes commencent.

La dynamique thermique de 5 rivières du Minnesota a été modélisée (Sinokrot and Stephan, 1993). Le modèle tenait compte des effets de la température de l'air, de la radiation solaire, de l'humidité relative, de la couverture nuageuse et de la vitesse du vent. L'analyse a montré de grands écarts de température journaliers surtout dans les secteurs de faible profondeur. Ces variations n'apparaissent plus lorsque l'on travaille sur les moyennes journalières (Sinokrot and Stephan, 1993; Erickson and Stefan, 2000).

5.4.3 Choix des variables environnementales

De nombreux modèles de calculs de température des eaux ont été proposé depuis longtemps (Marcotte and Duong, 1973). Mais, c'est en premier lieu pour déterminer l'impact sur la température des rivières de la gestion forestière, ou de la construction de barrages, que des modèles prédictifs ont été établis (Brown, 1969; Ringler and Hall, 1975). Puis, lorsque le réchauffement climatique est devenu une évidence, différents modèles prédictifs ont été établis en relation avec l'accroissement programmé de la température de l'air (Smith and Lavis, 1975; Sinokrot and Stephan, 1993; Stefan and Sinokrot, 1993; Mohseni and Stefan, 1999; Poole and Berman, 2001; Caissie, 2006; Pedersen and Sand-Jensen, 2007). Le problème principal résulte du fait que les causes du réchauffement des rivières peuvent être multiples. Dès lors, l'application de tel ou tel modèle, afin de proposer des solutions de gestion, peuvent être

inappropriées si le modèle en question ne prend pas en compte tel ou tel paramètre jouant un rôle particulier dans la situation locale que l'on étudie. En effet, les modèles, par définition, ne seront sensibles qu'aux paramètres sur lesquels ils sont basés (Poole and Berman, 2001).

La présente étude a montré que ce sont la température de l'air, la distance à la source, l'écomorphologie locale et la présence de forêt qui doivent être retenues comme étant les variables environnementales les plus discriminantes pour établir les modèles. Dans une vaste étude sur le Tagliamento en Italie, les facteurs influençant le plus la température de l'eau, et son amplitude journalière, étaient l'altitude, l'exposition, la pente, la profondeur, la vitesse du courant et la couverture végétale (Arscott *et al.*, 2001). Dès 1969 (Gray and Edington, 1969), de nombreuses études ont mis en évidence l'effet de la présence d'une forêt sur la température de l'eau d'une rivière (Johnson, 1971; Bartholow, 2000), avec parfois des effets importants sur les populations de poissons (Holtby, 1988; Ebersole *et al.*, 2003a; Johansen *et al.*, 2005). Certaines autres variables ont été plus difficiles à intégrer dans le modèle ou même plus difficile à obtenir à cause du nombre de stations de mesure relativement restreint à certains endroits. Par ailleurs, volontairement nous nous sommes restreints à choisir des variables pour lesquels un gestionnaire de cours d'eau peut avoir relativement facilement accès, ceci afin de rendre le modèle exploitable par le plus grand nombre. Des interpolations à grande échelle ou des extrapolations sur de telles données sont difficiles à mettre en place sur de très longues rivières. Dans d'autres études, les principaux prédicteurs climatiques utilisés pour modéliser les régimes thermiques des rivières sont le débit (Poole and Berman, 2001), les variables géo-topographiques, comme la distance à la source, la pente ou la surface du bassin versant (Wehrly *et al.*, 2009). Ces trois dernières variables ont donc été intégrées au modèle, mais seule la distance s'est avérée être une variables significative pour modéliser la température de l'eau.

5.4.4 Situation en 2010

Les résultats obtenus après modélisation montrent qu'en 2010, déjà plus de 5% des rivières vaudoises présentent une température estivale supérieure à 15°C. Ces rivières sont pour la plupart situées dans le plateau romand. Cette région présente une altitude faible et par conséquent une température de l'air plus élevée que dans les autres régions. De plus, cette dernière présente aussi la couverture végétale la plus faible, même si beaucoup de rivières sont bordées de forêt. Contrairement à la région du Jura ou les Alpes, la densité humaine y est plus importante, avec des surfaces « anthropiques » plus grandes. L'addition de tous ces paramètres accentue d'autant plus l'impact du réchauffement climatique sur ces rivières.

5.4.5 Rivières en danger en 2050

Les résultats ont montré qu'avec une augmentation de la température de l'air de 1°C, plus de 7% des rivières vaudoises présentent une température supérieure à 15°C. Avec une augmentation de 2.5°C, plus de 11% et avec 5°C de plus, c'est 20% des rivières vaudoises qui seront touchées, soit environ 15% de plus qu'en 2010. A titre de comparaison avec des scénarios similaires (doublement de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère), l'habitat pour les poissons d'eau froide serait réduit de 36% aux Etats-Unis (Mohseni *et al.*, 2003).

Dans le cas de la Venoge en 2010, 17% du réseau est déjà atteint, alors que dans le scénario le plus pessimiste, environ 50%, soit la moitié du réseau de la Venoge sera atteint. Des analyses statistiques supplémentaires ont aussi montré que le réchauffement climatique a des impacts différents selon le scénario climatique et la région concernée. Pour les deux premiers scénarios (+1°C et +2.5°C), c'est le « Plateau » qui est le plus touché (et dans un deuxième temps le Jura). Mais dans le cas du scénario +5°C, c'est dans la région des Alpes que cette différence est la plus nette. Car même si en termes de pourcentage pur, la région du Jura semble aussi très atteinte, la région des Alpes a un réseau de rivière et un dénivelé plus important. Le nombre de segments de rivière dont la température de l'air est supérieure à 15°C est plus important que dans les deux autres régions.

L'analyse sur les obstacles à la migration a montré que les zones prioritaires sont situées dans la région du Plateau (et dans un second temps les Alpes). Déjà en 2010, le nombre d'obstacles y est plus important, ce nombre ne cessant d'augmenter au fil des différents scénarios climatique. Les principales rivières concernées aujourd'hui sont la Venoge, l'Orbe, le Talent, le Nozon, la région de la Broye (toutes situées dans le plateau), puis la Veveyse, la Sarine et l'Avancon (dans la région des Alpes). Dans le cas d'un scénario pessimiste avec 5°C de plus, le Venoge pourrait comptabiliser un total de 25 obstacles infranchissables pour plusieurs espèces de poissons.

5.5 Perspectives

Cette étude a pu fournir une méthode qui combine températures de l'eau et obstacles à la migration pour identifier les régions les plus sensibles. Pour améliorer cette méthode, il serait possible dans un premier temps de se concentrer sur le modèle thermique. Une première approche serait d'augmenter le nombre de données en incluant les valeurs obtenues avec les nouveaux enregistreurs mis en place en 2011. En augmentant le nombre de mesures, il devient aussi possible d'augmenter le nombre de prédicteurs environnementaux, utilisés dans la calibration du modèle (Harrell *et al.*, 1996).

Le choix de la température moyenne estivale peut aussi être discuté. Les études actuelles montrent que la MRP se développe lorsque la température de l'eau est supérieure à 15°C. Mais il n'est pas encore clair s'il faut considérer comme paramètre significatif la moyenne estivale, mensuelle, journalière voir seulement quelques heures. Il serait nécessaire dans le cas d'études futures de connaître le temps exact d'exposition après lequel la MRP se développe. Ceci pourrait se faire en comparant les régimes thermiques des rivières où la MRP est présente à celles où elle est absente.

5.6 Annexe: Données

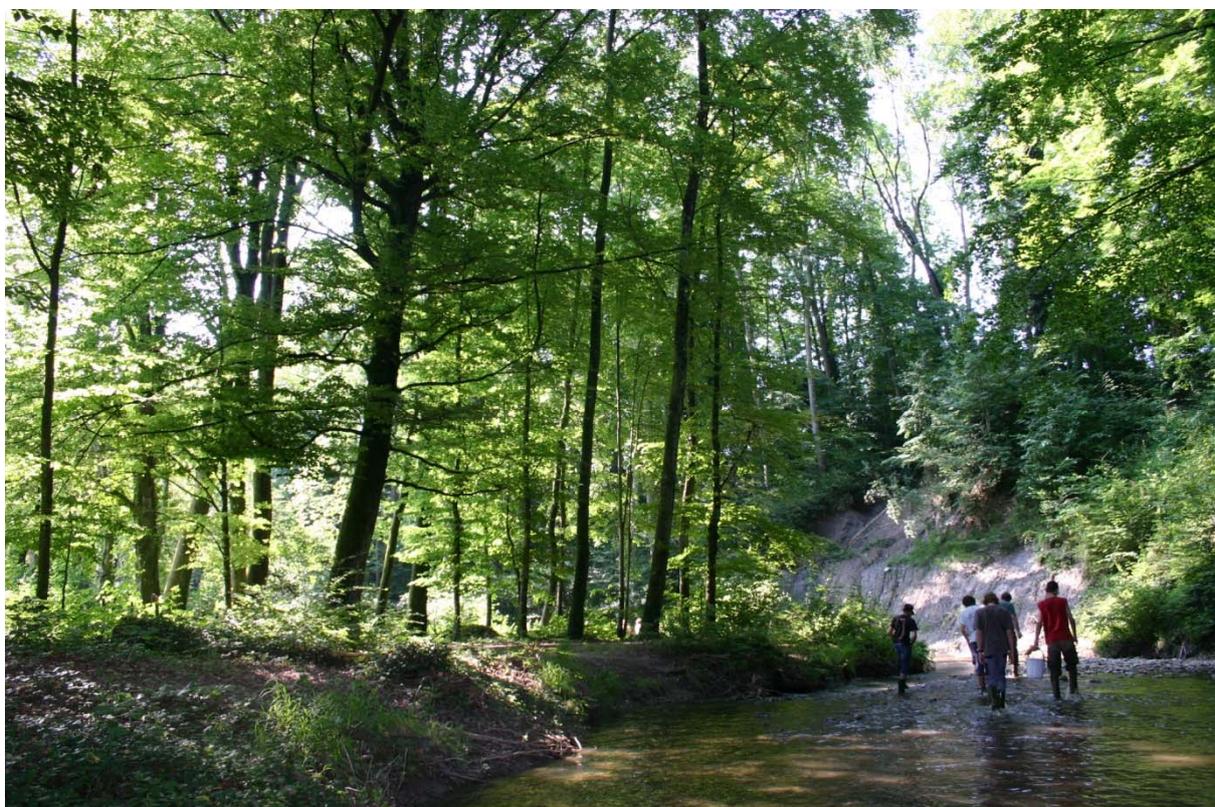
Tableau 40: Valeurs environnementales pour 2008 (source: OFEV)

Rivière	Coord.	Coord.	Altitude station msm	Altitude moyenne msm	Surface km2	Extention glacier %	Débit Juin 2008 m3/s	Débit Juillet 2008 m3/s	Débit août 2008 m3/s	Débit moyen été 2008 m3/s	Teau juin 2008 °C	Teau juillet 2008 °C	Teau août 2008 °C	Teau moyen été 2008 °C	Tair moyen été 2008 °C
Aare Aegerten	588220	219020	428	1150	8293.0	2.9	312.00	302.00	287.00	300.33	16.9	19.4	19.7	18.7	18.5
Aare Bern	600710	198000	502	1610	2945.0	8.0	227.00	223.00	201.00	217.00	14.3	16.8	17.4	16.2	18.1
Aare Brienzwiller	649930	177380	570	2150	554.0	21.0	65.80	71.20	65.80	67.60	7.5	8.2	8.5	8.1	17.7
Aare Brugg	657000	259360	332	1010	11726.0	2.0	375.00	366.00	351.00	364.00	17.7	19.8	19.7	19.1	19.0
Aare Hagneck	580680	211650	437	1380	5104.0	4.5	268.00	272.00	239.00	259.67	15.6	18.0	18.1	17.2	18.5
Aare Ringenberg	633730	171510	564	1970	1129.0	16.2	117.00	119.00	111.00	115.67	12.4	13.9	14.0	13.4	17.7
Aare Thun	613230	179280	548	1760	2466.0	9.5	207.00	204.00	184.00	198.33	14.3	16.7	17.4	16.1	17.8
Aare Untersiggenthal	659970	263180	326	1050	17601.0	2.1	780.00	752.00	678.00	736.67	17.4	19.8	19.9	19.0	19.1
Allaine Boncourt	567830	261200	366	559	215.0	0.0	1.28	1.15	1.68	1.37	15.4	16.4	15.8	15.9	18.9
Allenbach Adelboden	608710	148300	1297	1856	28.8	0.0	2.00	1.58	1.32	1.63	8.4	9.8	10.1	9.4	13.6
Alp Einsiedeln	698640	223020	840	1155	46.4	0.0	2.28	3.69	3.28	3.08	14.7	15.3	15.2	15.1	16.2
Arnon	542120	186380	434		83.0	0.0	1.39	1.09	1.20	1.23	13.8	15.5	15.0	14.8	18.5
Arve Bout du Monde	501220	115120	380	1370	1976.0	6.1	122.00	99.80	73.80	98.53	11.0	11.8	11.7	11.5	18.8
Aubonne Allaman	520720	147410	390	890	91.4	0.0	4.40	1.74	2.23	2.79	10.1	12.7	12.5	11.8	18.7
Biber Biberbrugg	697240	223280	825	1009	31.9	0.0	0.68	1.40	1.39	1.16	14.6	14.9	14.5	14.7	16.3
Birs Münchenstein	613570	263080	268	740	911.0	0.0	8.16	8.00	7.86	8.01	15.6	17.0	16.5	16.4	19.4
Brinaz	538000	182980	434		13.5	0.0	0.07	0.07	0.08	0.07	16.5	18.5	17.9	17.6	18.5
Broye Payerne	561660	187320	441	710	392.0	0.0	5.15	4.94	3.81	4.63	17.0	18.8	18.4	18.1	18.4
Chamberonne	534390	152620	375		38.3	0.0	0.46	0.98	1.00	0.81	13.5	15.0	14.9	14.5	18.8
Dischmabach Davos	786220	183370	1668	2372	43.3	2.1	5.73	4.62	2.32	4.22	6.3	7.7	8.7	7.6	11.6
Doubs Occourt	572530	244460	417	950	1230.0	0.0	23.80	13.60	22.70	20.03	15.1	17.1	16.7	16.3	18.6
Emme Emmenthal HS	623610	200430	638		443.0		11.40	12.60	11.40	11.80	14.9	15.1	14.5	14.8	17.3
Engelberger Aa Buochs	673555	202870	443	1620	227.0	4.3	30.00	23.50	17.70	23.73	8.8	9.9	10.1	9.6	18.4
Flon Oron	552800	157760	609		16.4	0.0	0.21	0.25	0.10	0.19	14.5	15.7	15.8	15.3	17.5
Forestay	549073	148070	560	560	12.2	0.0	0.11	0.15	0.14	0.13	15.1	17.0	16.6	16.2	17.8
Glatt Rheinsfelden	678040	269720	336	498	416.0	0.0	5.87	5.87	7.28	6.34	19.1	20.3	19.8	19.7	19.0
Goldach Goldach	753190	261600	399		50.0		0.61	2.10	1.63	1.45	16.8	16.7	16.6	16.7	18.7
Grossbach Gross	700750	218230	940	1276	9.1	0.0	0.41	0.66	0.48	0.52	12.9	13.2	13.2	13.1	15.6
Grosstalbach Isenthal	685500	196050	767	1820	43.9	9.3	4.70	4.68	3.33	4.24	8.9	9.4	9.5	9.3	16.6
Gürbe Belp	604810	192680	522	837	117.0	0.0	2.43	3.04	2.68	2.72	15.0	16.6	16.2	15.9	18.0
Gürbe Burgstein	605890	181880	569	1044	53.7	0.0	1.28	1.75	1.32	1.45	13.7	15.7	15.7	15.0	17.7
Kleine Emme Littau	664220	213200	431	1050	477.0	0.0	14.30	22.40	16.80	17.83	15.2	16.2	16.1	15.8	18.5
Landquart Felsenbach	765365	204910	571	1800	616.0	1.4	58.30	41.30	27.90	42.50	9.8	11.3	12.2	11.1	17.7
Langeten Huttwill	629560	219135	597	766	59.9	0.0	0.99	1.03	0.92	0.98	13.1	14.3	14.2	13.9	17.6
Lichtensteiner Binnenkanal	757750	234590	435	841	116.0	0.0	7.85	8.07	6.55	7.49	10.5	11.5	11.8	11.3	18.5
Limmat Baden	665640	258690	351	1130	2396.0	1.1	146.00	135.00	122.00	134.33	17.9	20.9	20.8	19.9	18.9
Linth Mollis	723985	217965	436	1730	600.4	4.4	61.40	47.90	36.80	48.70	9.7	10.8	11.4	10.6	18.5
Linth Weesen	725160	221380	419	1580	1061.0	2.5	96.90	77.70	63.20	79.27	13.6	16.9	17.2	15.9	18.6
Lonza Blatten	629130	140910	1520	2630	77.8	36.5	13.00	12.10	11.30	12.13	5.7	6.4	6.7	6.3	12.4
Lütschine Gsteig	633130	168200	585	2050	379.0	17.4	40.40	39.80	35.40	38.53	7.7	7.6	7.5	7.6	17.6
Massa Blatten	643700	137290	1446	2945	195.0	65.9	38.60	47.80	49.60	45.33	1.4	1.4	1.3	1.4	12.8
Mebre aval	533890	153120	390		19.7	0.0	0.24	0.55	0.31	0.36	15.9	17.1	17.0	16.7	18.7
Menthue Yvonand	545440	180875	449	679	105.0	0.0	0.81	1.10	0.90	0.94	15.4	16.4	16.2	16.0	18.4
Morges Morges	527070	151675	390		35.6	0.0	0.33	0.20	0.21	0.24	15.3	16.8	16.6	16.2	18.7
Muota Ingenhohl	688230	206140	438	1360	316.0	0.1	37.20	31.30	25.00	31.17	8.1	9.7	10.6	9.5	18.5
Murg Frauenfeld	709540	269660	390	580	212.0	0.0	2.55	1.89	2.41	2.28	16.6	18.0	17.6	17.4	18.7
Murg Wängli	714105	261720	466	650	78.9	0.0	1.06	1.11	1.18	1.12	15.2	16.4	16.4	16.0	18.3
Necker Mogelsberg	727110	247290	606	959	88.2	0.0	2.07	4.71	3.97	3.58	15.1	15.2	15.0	15.1	17.5
Orbe Sentier	507710	162190	1005		96.0	0.0	1.67	1.12	1.04	1.28	13.7	15.8	16.0	15.2	15.3
Petite Glane	566490	194420	433		84.6	0.0	0.61	0.81	0.62	0.68	18.6	19.7	17.3	18.5	18.5
Posciavino La Rôsa	802120	142010	1860	2283	14.1	0.4	1.33	0.97	0.47	0.92	6.2	7.1	7.6	7.0	10.5
Promenthouse Gland	510080	140060	394	1037	100.0	0.0	1.20	0.54	0.60	0.78	11.9	14.2	13.7	13.3	18.7
Rhein Diepoldsau	766280	250360	410	1800	6119.0	1.4	488.00	413.00	283.00	394.67	10.7	12.2	13.1	12.0	18.6
Reuss Luzern	665330	211800	432	1500	2251.0	4.2	227.00	207.00	167.00	200.33	16.7	19.2	20.2	18.7	18.5
Reuss Mellingen	662830	252580	345	1240	3382.0	2.8	254.00	246.00	200.00	233.33	16.7	19.1	19.9	18.6	19.0
Reuss Seedorf	690085	193210	438	2010	832.0	9.5	99.30	79.00	62.40	80.23	9.0	10.2	10.8	10.0	18.5
Rhein Rekingen	667060	269230	323	1080	14718.0	0.6	649.00	636.00	551.00	612.00	17.6	19.9	19.9	19.1	19.1
Rhein Rheinfelden	627190	267840	262	1039	34526.0	1.3	1449.00	1406.00	1250.00	1368.33	17.8	20.2	20.3	19.4	19.4
Rhône Chancy	486600	112340	336		10323.0	8.4	536.00	467.00	394.00	465.67	16.0	17.9	18.1	17.3	19.0
Rhône Hall de l'île	499890	117850	367	1670	8011.0	9.4	398.00	349.00	303.00	350.00	17.2	19.3	19.3	18.6	18.9
Rhône Porte du Scex	557660	133280	377	2130	5244.0	14.3	341.00	306.00	272.00	306.33	9.3	9.6	9.2	9.4	18.8
Rhône Sion	593770	118630	484	2310	3373.0	18.4	253.00	220.00	192.00	221.67	9.0	8.9	8.6	8.8	18.2
Riale di Pincascia Lavertezzo	708060	123950	536	1708	44.4	0.0	6.12	5.34	2.27	4.58	13.2	14.8	15.5	14.5	17.9
Riale di Roggiasca Roveredo	733545	118160	980	1711	8.1	0.0	0.82	1.16	0.27	0.75	9.7	11.2	12.2	11.0	15.4
Rietholzbach Mosnang	718840	248440	682	795	3.3	0.0	0.04	0.07	0.06	0.06	13.2	14.2	14.3	13.9	17.1
Rom Müstair	830800	168700	1236	2187	129.7	0.1	6.98	6.14	3.62	5.58	8.3	9.0	9.4	8.9	14.0
Rosegbach Pontresina	788810	151690	1766	2716	66.5	30.1	7.59	9.99	7.75	8.44	6.9	7.8	7.0	7.2	11.0
Sellenbodenbach Neuenkirch	658530	218290	515	615	10.5	0.0	0.10	0.34	0.19	0.21	15.5	16.6	16.8	16.3	18.0
Sense Thörishaus	593350	193020	553	1068	352.0	0.0	7.14	10.40	7.40	8.31	14.9	16.4	16.2	15.8	17.8
Sitter Appenzell	749040	244220	769	1252	74.2	0.1	3.07	4.38	3.70	3.72	11.0	12.5	12.6	12.0	16.6
Sperbelgraben Wasen	630725	207270	911	1063	0.5	0.0	0.02	0.01	0.01	0.02	11.9	13.3	13.3	12.8	15.8
Talent Chavornay	532700	173030	440		66.3	0.0	0.59	0.89	0.77	0.75	17.1	18.9	18.6	18.2	18.4
Thur Andelfingen	693510	272500	356	770	1696.0	0.0	37.20	52.00	46.60	45.27	17.4	18.5	18.1	18.0	18.9
Venoge Ecublens	532040	154160	383	700	231.0	0.0	2.40	1.52	1.72	1.88	15.3	17.5	17.1	16.6	18.8
Vispa Visp	634150	124850	659	2660	778.0	29.5	31.10	31.80	27.50	30.13	9.1	8.8	8.9	8.9	17.0
Vorderrhein Ilanz	735000	182030	693	2020	776.0	3.8	78.50	51.60	40.50	56.87	8.8	10.5	11.2	10.2	17.2
Worble Ittigen	603005	202455	522	679	60.5	0.0	0.97	0.81	0.70	0.83	14.1	15.7	15.7	15.2	18.0



Rapport Clim-arbres

Chapitre 6 : Physiologie des végétaux



En collaboration avec



UNIVERSITÉ
DE GENÈVE
FACULTÉ DES SCIENCES

Unil

UNIL | Université de Lausanne

6 Physiologie des végétaux

Une partie de cette étude a fait l'objet de la thèse de Master de M. Ismaël Zouaoui, de l'Université de Genève, travail soutenu au printemps 2011, avec pour titre : « *La quantification de l'évapotranspiration dans le genre Salix : une contribution à la renaturation et à la revitalisation des cours d'eau* », sous la codirection des professeurs Patrice Prunier d'hepia, et Walter Wildi de l'Université de Genève.

Dans cette partie, diverses expériences ont été mises sur pied afin de déterminer les effets potentiels de la présence d'un cordon boisé sur la température d'une rivière. On distinguera plus particulièrement deux effets potentiels du cordon boisé :

- **Ombrage** : Les arbres, par l'ombre qu'ils portent sur la rivière, limitent l'arrivée de la lumière sur le cours d'eau, donc son élévation de température. Selon l'essence, la densité du feuillage est différente, d'où une capacité variable à retenir les rayons du soleil.
- **Evapotranspiration** : Les arbres respirent et transpirent. Par ces actions, ils contribuent à refroidir l'air. L'intensité de ce processus est très différente en fonction des essences.

Ainsi donc, même à taille équivalente, la présence d'un arbre au bord d'une rivière peut influencer très différemment la température de celle-ci. Ces expériences nous ont permis d'identifier les essences les plus efficaces pour lutter contre le réchauffement.

6.1 Expériences préliminaires

6.1.1 Introduction

Pour déterminer les effets de la présence d'un cordon boisé, il fallait dans un premier temps préciser comment une essence végétale agit localement sur les paramètres climatiques. Le centre de Lullier est un site exceptionnel sur le canton de Genève, puisqu'il regroupe plus d'une centaine de variétés d'arbres différentes. A ce titre, il se prêtait très bien pour une étude précise et comparative de l'effet de l'ombage de diverses essences sur la température et l'humidité de l'air.

L'objectif de ces expériences préliminaires a été de quantifier l'effet « climatiseur » de différentes espèces d'arbres. Pour cela, deux expériences ont été mises en place :

- Dans la première, trois dispositifs identiques ont été installés, permettant d'enregistrer en continu trois paramètres (température de l'air, humidité et luminosité) sous un arbre, au soleil et sous une toile d'ombage.
- Dans la seconde, on s'est intéressé à mesurer la température simultanément au niveau de plusieurs essences.

Les questions posées étaient les suivantes :

- Comment évolue la température de l'air sous un arbre aux différentes heures de la journée ?
- Quel est l'effet de l'ombage (artificiel)? Qu'apporte l'arbre en plus ?
- Peut-on mettre en évidence des différences entre essences ?

6.1.2 Matériels et méthodes

Expérience Effet ombrage

L'expérience a consisté à placer trois caisses en bois (long. = 1.2 m, larg. = 1.06 m, haut. = 0.75 m) sous trois conditions différentes (Figure 89). Les deux premières ont été placées au soleil, en essayant de limiter tout ombrage dû aux bâtiments ou aux arbres situés à proximité, la deuxième étant recouvert d'une toile d'ombrage verte (Hortima, ref. ST30, effet d'ombrage = 65-70%). La troisième caisse a été placée sous un arbre, choisi pour sa situation dans le parc (relativement isolé des autres) et son intérêt pour l'étude.



Figure 89 : Mise en place des bacs au soleil et sous ombrage (à gauche) et sous un charme (à droite)

Les caisses ont été systématiquement orientées est-ouest ; la caisse sous l'arbre a été placée au sud du tronc. Les arbres retenus pour l'étude étaient relativement isolés des autres arbres, ainsi que des bâtiments. Quatre essences ont été retenues pour cette expérience : charme, hêtre, érable et noyer. Pour le hêtre, un répliquât sur un deuxième arbre a été réalisé.

Trois sondes couplées à un logger (réf. 1520 P1, Sefram) ont été placées dans chaque caisse. Elles ont mesuré toutes les 5 minutes à la fois la température, l'humidité de l'air (sonde HIH-3610 Series, Honeywell), ainsi que la luminosité (sonde OPT101, Burr-Brown®). Ces trois sondes ont été placées de manière rigoureusement identique dans chaque caisse (Figure 90). Le sol était recouvert d'une couche de Sagex blanc puis de gazon synthétique afin de s'affranchir de l'humidité du sol, et de reproduire des conditions expérimentales comparables d'un système à l'autre. Les sondes ont été suspendues à l'aide de câbles métalliques, à 10 cm en-dessous du rebord de chaque caisse, afin de limiter l'effet d'ombrage du aux parois.

La sonde luxmètre servait essentiellement à définir le nombre de couches de toiles d'ombrage nécessaires pour reproduire l'ombrage « naturel » d'un feuillage. Plusieurs tests préalables ont été nécessaires. Les premières mesures d'intensité lumineuse nous ont conduits à utiliser deux couches de toiles d'ombrage superposées, pour recréer un ombrage similaire à celui d'une essence végétale (par exemple un charme ou un hêtre). Ce système assurait ainsi, pour une journée très ensoleillée (100'000 Lux en plein soleil), une intensité lumineuse maximale d'environ 18'000 Lux sous la toile, et 10'000 Lux (pour le charme) à 15'000 Lux (pour le hêtre) sous ombrage végétal. Ces valeurs étant du même ordre de grandeur, la comparaison des enregistrements de température est envisageable.

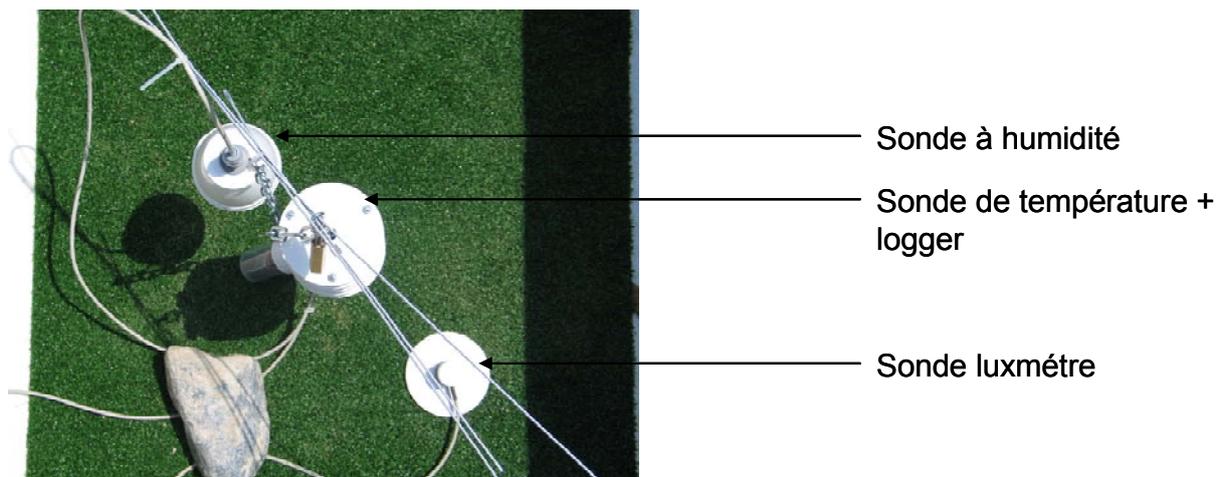


Figure 90 : Dispositif de mesure de la température et de l'humidité de l'air, ainsi que de la luminosité

Le dispositif a enregistré les valeurs en continu sur toute la période estivale (20 juin au 20 septembre 2007), successivement sous les 4 essences différentes. Seules les journées chaudes (température maximale au soleil supérieure à 35°C) non consécutives à des épisodes de pluie prolongés ont été prises en compte. Ce tri préalable a permis de retenir au final entre 3 et 5 « journées chaudes » par type d'essence, sur toute la durée de l'été.

Expérience Effet Essences

Cette deuxième expérience avait pour objectif de comparer les courbes de températures entre plusieurs essences. Pour ce faire, des enregistreurs de température (HOBO® Water Temp Pro v2 Data Logger, Onset) ont été placés sous une cloche en plastique, recouverte d'une feuille de papier aluminium, afin de limiter l'accumulation de chaleur au niveau de la paroi de la cloche (Figure 91).

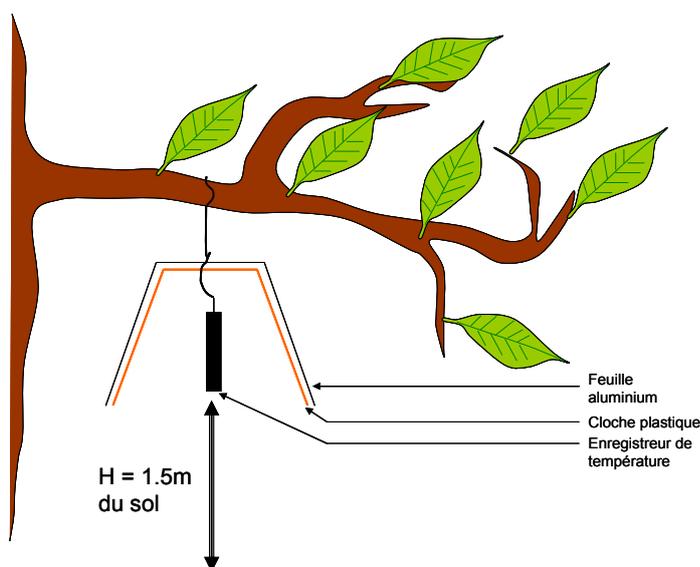


Figure 91 : Dispositif mis en place pour mesurer la température sous différentes essences

Le dispositif a été placé sous 8 arbres numérotés comme suit : 1-charme (*Carpinus betulus*), 2-hêtre (*Fagus sylvatica*), 3-noyer (*Juglans cinerea*), 4-aulne (*Alnus glutinosa*), 5-érable (*Acer campestre*), 6-frêne (*Fraxinus excelsior*), des répliques étant effectués pour le charme (n°7) et le hêtre (n°8).

Les cloches ainsi constituées ont été placées au sud du tronc, à 1.5m du sol. Des cloches témoins ont également été placées dans les caisses au soleil et sous ombrage. L'expérience a été mise en place le 24 juillet 2007. La température a ensuite été enregistrée toutes les 5 minutes, sous chaque arbre. Les journées du 25 au 30 juillet 2007, chaudes et ensoleillées, ont été retenues pour la suite de l'analyse.

6.1.3 Résultats

Expérience effet ombrage

Les relevés de température réalisés sous ombrage de différents arbres montrent globalement un « effet tampon » des arbres sur les paramètres climatiques enregistrés (Figure 92).

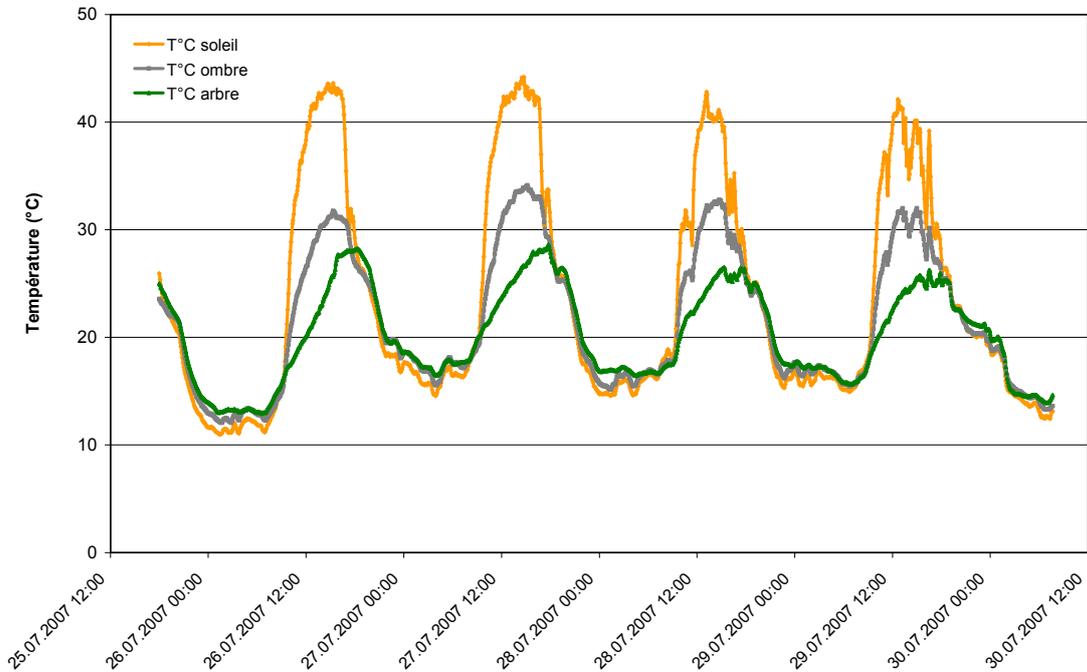


Figure 92: Courbes des températures enregistrées du 25 au 30 juillet 2007 au soleil, sous toile d'ombrage et sous un charme

Pendant les heures chaudes de la journée (12h-18h), alors que la température au soleil dépasse couramment les 40°C, la température sous l'arbre reste systématiquement inférieure à 30°C. Par ailleurs, Les différences de température observées entre la situation « ombre », soit uniquement sous une toile, ou « arbre », soit sous le feuillage d'un arbre, est dû au fait qu'en plus de produire de l'ombre, l'arbre évapotranspire, ce qui induit une diminution supplémentaire de la température ambiante.

On constate une synchronisation des maxima de température relevés au soleil et sous toile d'ombrage. Par contre, il existe un décalage dans le temps du maximum de température sous l'arbre. Ce maximum est en effet atteint en fin d'après-midi (vers 16h30-17h), alors qu'au soleil il s'observe entre 13h et 15h Cet effet « retard » est apparemment induit uniquement par la végétation, puisque la toile d'ombrage ne provoque pas ce phénomène. La nuit, l'effet tampon est également visible, mais de moindre intensité : la température sous couvert végétal reste légèrement plus élevée qu'en milieu ouvert (différence d'un degré en moyenne).

Ces observations correspondent parfaitement à ce qui avait été décrit sur le secteur-test (voir chapitre 2).

Sur la même période, l'humidité de l'air a été enregistrée (Figure 93).

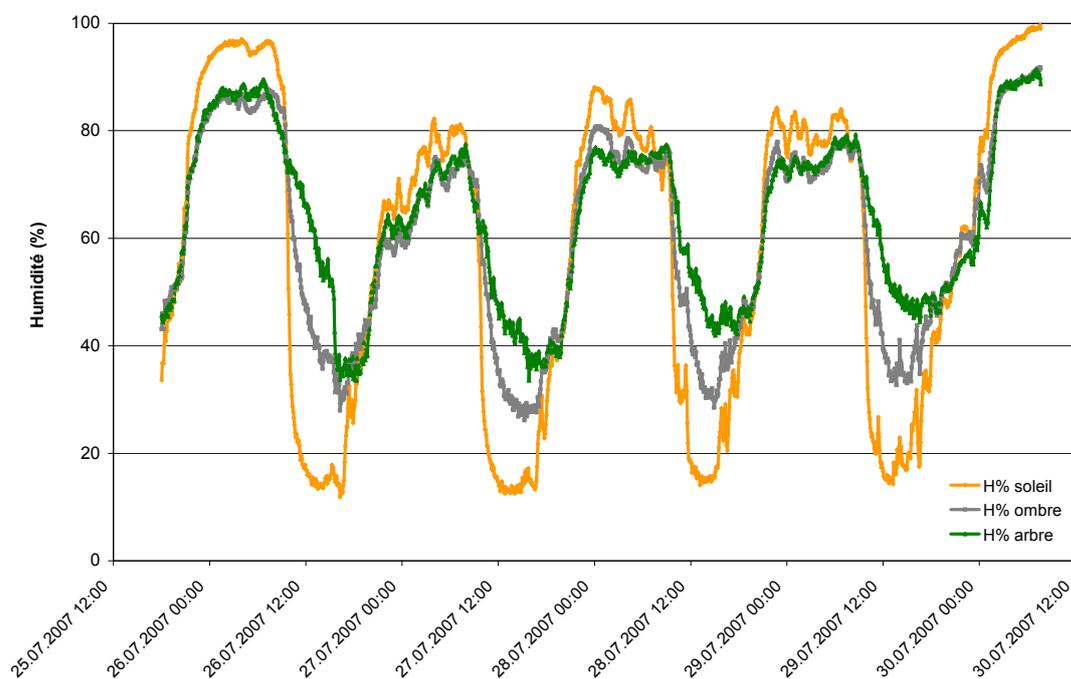


Figure 93: Evolution de l'humidité de l'air, du 25 au 30 juillet, au soleil, sous toile d'ombrage et sous un charme

L'humidité sous un arbre reste élevée la journée (supérieure à 35%), alors qu'elle descend sous les 15% au soleil, en début d'après-midi. La nuit, l'humidité dépasse les 70% pour les trois dispositifs, mais reste plus élevée dans le bac sans ombrage que dans les deux autres.

Expérience Effet Essence

Les résultats confirment l'existence d'un décalage dans le temps des maxima de températures relevés sous couvert végétal, par rapport aux témoins au soleil et à l'ombre, et ce, quelle que soit l'essence choisie (Figure 94). Cependant, le protocole opératoire n'a pas pu mettre en évidence de différence significative de température sous les différents arbres étudiés.

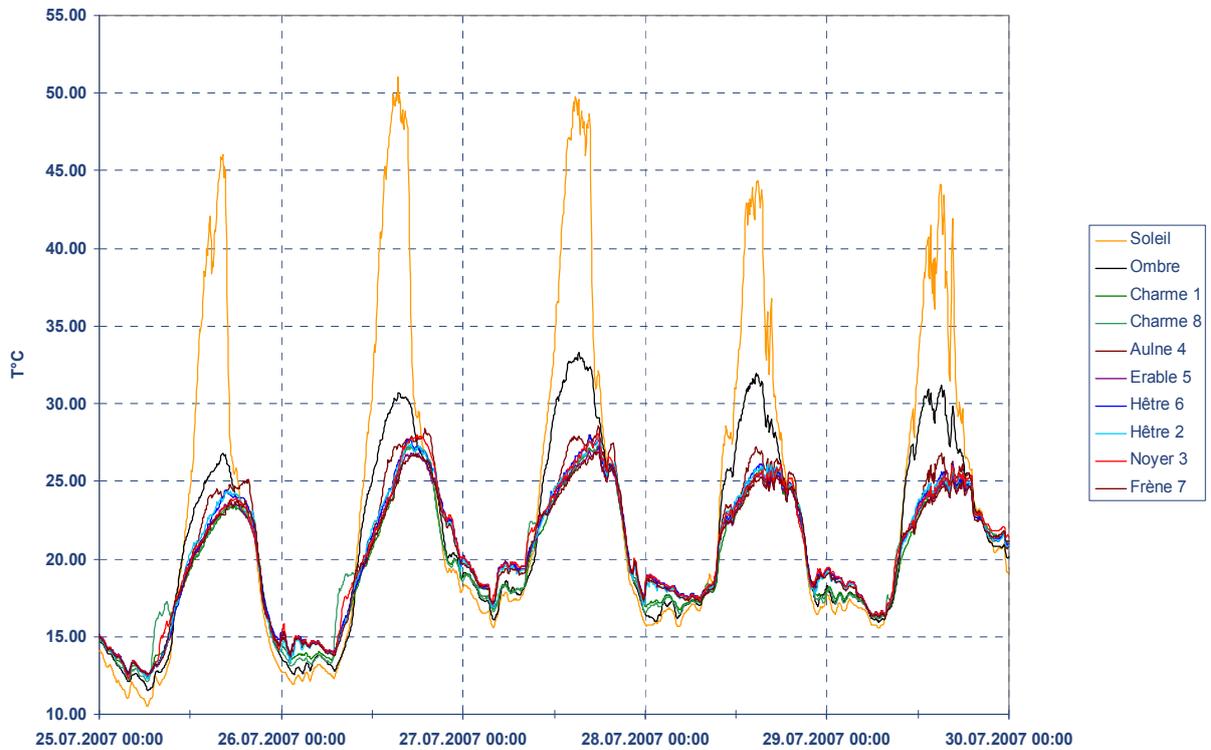


Figure 94 : Evolution de la température relevée sous 8 arbres différents, du 25 au 30 juillet 2007

6.2 Capacités d'évapotranspiration de diverses espèces de saules

6.2.1 Introduction

Parmi les végétaux que l'on peut planter au bord des cours d'eau pour former un cordon boisé protecteur, certaines espèces possèdent probablement un potentiel de régulation du microclimat différent, grâce à leur capacité particulière d'ombrage et d'évapotranspiration. Les échanges d'eau entre la plante et son environnement se font de 3 manières distinctes :

La transpiration

La transpiration transfère l'eau contenue dans les tissus des végétaux vers l'atmosphère. Les échanges gazeux entre plante et atmosphère s'effectuent par l'intermédiaire des stomates des feuilles. Leur ouverture est régulée par la lumière, ainsi que par les concentrations gazeuses, essentiellement la vapeur d'eau et le CO₂, dans les cavités sous-stomatiques. La majeure partie de l'eau absorbée par la plante est transpirée et seule une petite fraction est réellement utilisée. Comme l'évaporation, la transpiration est dépendante entre autre des conditions climatiques, du type de sol, de la gestion de la culture mais également des caractéristiques physiologiques intrinsèques de la plante. Le déficit en eau dû à la transpiration est contrebalancé par l'absorption racinaire, provoquant ainsi une différence de potentiel hydrique entre les racines, la tige et les feuilles, permettant dès lors la circulation de la sève du sol jusqu'aux parties aériennes de la plante (Hopkins, 2003).

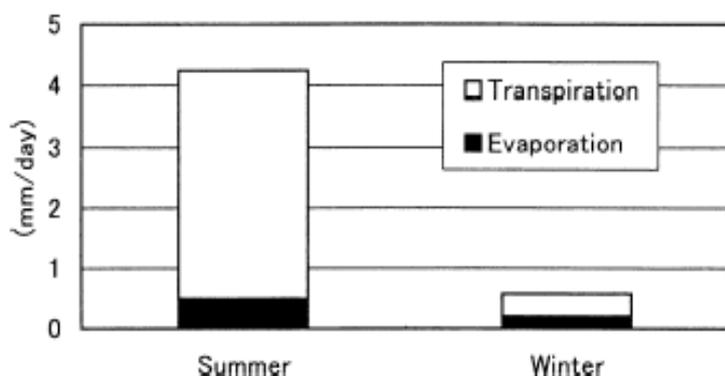


Figure 95: Taux d'évaporation du substrat et de transpiration d'un oranger en culture sous serre en été et en hiver (Yang *et al.*, 2003)

L'évaporation

L'évaporation est le passage de l'eau de la phase liquide à la phase gazeuse sous forme de vapeur d'eau. Cette transformation nécessite un apport d'énergie fourni par les radiations solaires, et dans une moindre mesure par la température ambiante. L'échange net de molécules d'eau entre les 2 phases par unité de temps détermine le taux d'évaporation (De Parcevaux and Hubert, 2007). De plus, si la pression de la vapeur d'eau augmente jusqu'à atteindre la pression à saturation, l'évaporation ne peut plus se faire. C'est pourquoi un gradient de pression, généralement exercé par le vent en déplaçant les masses d'air, est essentiel pour une évaporation optimale (Gray, 1973).

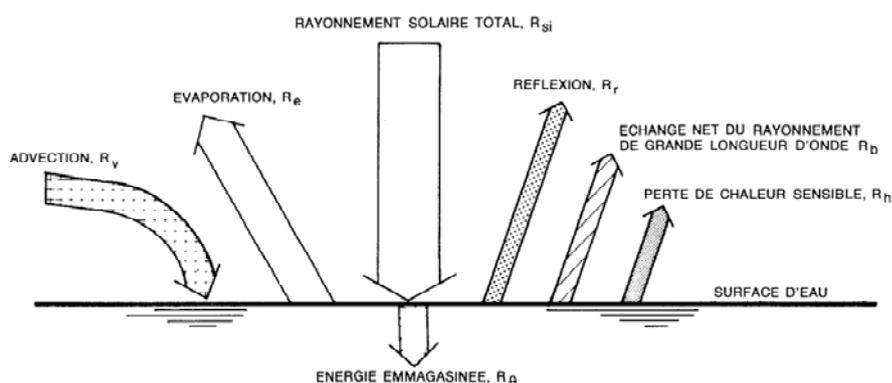


Figure 96: Bilan énergétique au-dessus d'une surface d'eau

L'évapotranspiration

L'évapotranspiration est constituée de deux processus différents : l'évaporation et la transpiration, qui ont toutes deux comme résultat de restituer l'eau, auparavant stockée dans la plante, à l'atmosphère sous forme gazeuse. Ces processus absorbent l'énergie calorifique provenant des radiations solaires et s'accompagnent d'un refroidissement de l'atmosphère environnante. L'évapotranspiration dépend des conditions climatiques et édaphiques, ainsi que de la physiologie intrinsèque de la plante (Hopkins, 2003). Les paramètres météorologiques tels que l'intensité et la durée d'ensoleillement, l'humidité relative, la pression atmosphérique ou la force du vent vont influencer le taux d'évapotranspiration. De plus, la nature du sol, l'humidité relative de l'air dans le sol, le coefficient de diffusion, la granulométrie, la composition du sol, la conductivité capillaire et la conductivité hydraulique, vont définir la quantité d'eau disponible. Les radiations solaires vont être captées de manière différente selon le type, la couleur, la densité, la surface foliaire ou encore selon la période et le stade de croissance de la plante considérée.

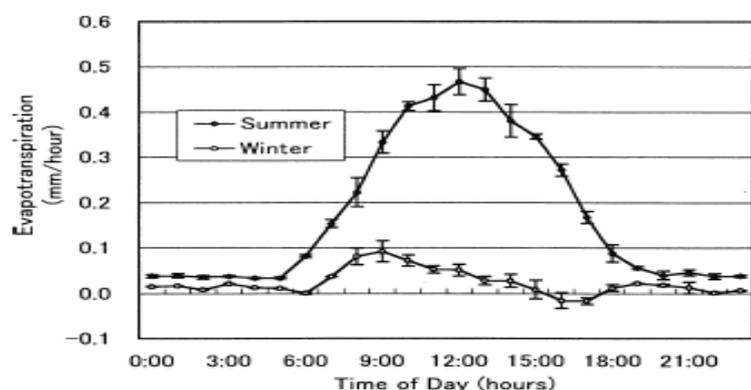


Figure 97: Variation journalière de l'évapotranspiration moyenne horaire pour l'été et pour l'hiver d'un orange en culture sous serre (Yang et al., 2003)

Pour définir les capacités des végétaux à réguler le microclimat, on peut définir différents indicateurs. Ceux-ci sont largement utilisés en agronomie et ont été déterminés pour de nombreux végétaux comestibles ou ayant un intérêt commercial. C'est la première fois que ces paramètres sont déterminés pour des saules.

L'évapotranspiration de référence (ET₀)

L'évapotranspiration de référence (ET₀) est le taux d'évapotranspiration d'une surface de sol de référence recouverte par une végétation possédant des caractéristiques particulières, à un stade végétatif maximal et non limitée en eau (Musy and Higy, 2004; Soutter *et al.*, 2077). ET₀ est considérée comme un paramètre climatique. Il exprime le pouvoir d'évaporation de l'atmosphère à un endroit donné et à un instant donné et ne prend pas en considération les caractéristiques de la plante. Il représente la quantité d'eau que peut évaporer un sol humide en tenant compte de l'humidité de l'air, de la température de l'air et du sol humide, ainsi que la vitesse du vent.

La formule de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) permet de déterminer l'évapotranspiration d'une pelouse de référence et offre un standard qui peut être ultérieurement utilisé pour permettre une comparaison au cours des différentes périodes de l'année, avec une localisation différente ou encore avec d'autres types de végétation :

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)}$$

Avec :

- R_n : la radiation nette (MJ/m²*j)
- G : le flux de chaleur du sol (MJ/m²*j)
- Y : une constante psychométrique (kPa/°C)
- T : la température journalière moyenne (°C)
- u₂ : la vitesse du vent à 2m (m/s)
- e_s - e_a : le déficit de pression vapeur de l'air (kPa)
- Δ: la pente de la courbe de pression de vapeur (kPa/°C)

Cette formule est largement répandue pour la détermination de l'ET₀ dans des régions à climat méditerranéen et continental et a permis de fixer des valeurs pour les systèmes climatiques globaux (Tableau 41).

Tableau 41 : Valeurs indicatives pour l'ET₀ (Anschütz *et al.*, 1998)

Zone climatique	Température journalière moyenne		
	Basse (< 15°C) ET ₀ (mm/j)	Moyenne (15 à 25°C) ET ₀ (mm/j)	Elevée (> 25°C) ET ₀ (mm/j)
Désertique	4 - 6	7 - 8	9 - 10
Semi-aride	4 - 5	6 - 7	8 - 9
Sub humide	3 - 4	5 - 6	7 - 8
Humide	1 - 2	3 - 4	5 - 6

L'évapotranspiration maximale (ET_m)

L'évapotranspiration maximale d'une culture est déterminée pour différents stades végétatifs et peut être atteinte si la culture n'est pas limitée en eau, avec des conditions de croissance optimales. La capacité d'évapotranspiration est corrélée au développement de la plante et dépend principalement de son état nutritionnel. L' ET_m varie en fonction de l'indice de surface foliaire (LAI) qui lui-même dépend de la fertilité du sol, de l'espèce et du type de culture. Lorsque les disponibilités en eau sont limitées dans le sol, l'évapotranspiration de la culture, à ce moment et à ces conditions données, est inférieure à l' ET_m et est alors appelée évaporation réelle (ET_r) (Soutter *et al.*, 2007).

Le coefficient cultural (K_c)

Le coefficient cultural est défini comme le rapport entre l' ET_0 et l' ET_r . Ce rapport varie en fonction du stade de développement, de l'espèce, de ses caractéristiques physiologiques, ainsi qu'en fonction des paramètres climatiques intrinsèques de la région considérée (De Parcevaux and Hubert, 2007). K_c tient compte des facteurs physiques retenus dans le calcul de l' ET_0 et des facteurs physiologiques exprimés dans le calcul de l' ET_r . K_c est depuis longtemps utilisé dans l'agriculture afin d'optimiser l'irrigation des cultures, en déterminant les besoins en eau pour chaque espèce (Aboukhaled and Smith, 1986). L' ET_r est relié à l' ET_0 par le coefficient cultural K_c (De Parcevaux and Hubert, 2007):

$$ET_m = K_c \times ET_0$$

soit :

$$K_c = \frac{ET_m \text{ (mm)}}{ET_0 \text{ (mm)}}$$

K_c est donc un indicateur des caractéristiques intrinsèques de la plante au cours de son développement et il reflète la manière dont elle utilise les ressources en eau.

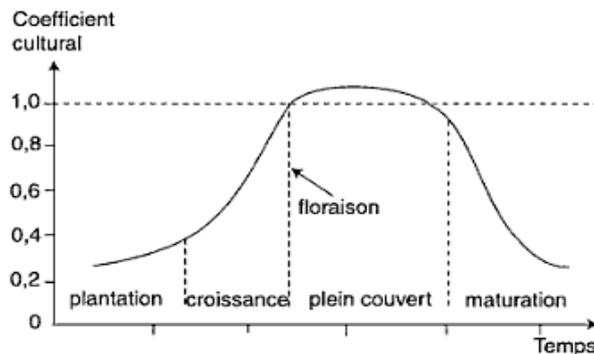


Figure 98: Evolution du coefficient cultural K_c au cours du temps

Dès lors pour déterminer le K_c de diverses espèces de saules, il s'agit de :

- Déterminer l'évapotranspiration de référence (ET_0) au moyen de la formule de Penmann-Monteith, connaissant les données climatiques du site,
- Calculer l'évapotranspiration réelle (ET_r) connaissant la consommation d'eau au cours du temps et par unité de surface végétale.
- Déterminer la surface foliaire totale (LAI) des individus testés ainsi que leur perte d'eau au cours du temps.

Surface foliaire

La surface foliaire détermine les échanges et les transferts d'énergie et de masse entre la plante et l'atmosphère (Weiss *et al.*, 2004; Eriksson *et al.*, 2005). La densité de surface foliaire (LAD) est définie comme la surface foliaire totale (d'une seule face du tissu photosynthétique) par unité de volume de la canopée en m^2/m^3 (Weiss *et al.*, 2004). L'index de surface foliaire (LAI) correspond à la surface foliaire totale (d'une seule face du tissu photosynthétique) par unité de surface de sol en m^2/m^2 (Jonckheere *et al.*, 2004). La surface foliaire spécifique (SLA) représente la surface foliaire par unité de poids sec en m^2/g (Eriksson *et al.*, 2005).

Le LAI varie en fonction des caractéristiques physiologiques et morphologiques de chaque espèce et aussi en fonction de l'âge, de la taille et des saisons. La partie active correspond aux feuilles participant au transfert d'énergie et au processus d'évaporation. Elles sont principalement situées dans la partie haute exposée à la lumière (canopée). Le LAI peut être calculé directement en récoltant les feuilles et en les mesurant une à une. Cette technique implique la destruction de l'individu considéré. Une autre méthode consiste à poser des pièges durant l'automne permettant ainsi de récupérer les feuilles caduques. La planimétrie consiste à placer une feuille sur un plan horizontal permettant ainsi de mesurer sa surface à l'aide d'un scanner. La gravimétrie est une autre technique s'appuyant sur la relation entre la surface des feuilles et leur poids sec.

6.2.2 Matériel et Méthodes

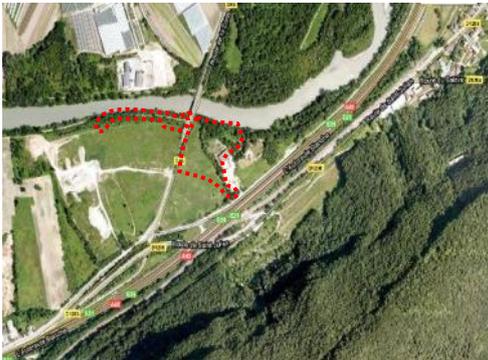
Sites de prélèvement et choix des espèces

Les espèces testées ont été récoltées sur trois sites : Gaillard, Contamines-sur-Arve et Sommand. Ces trois sites se trouvent sur le territoire français dans le département de la Haute-Savoie.



Figure 99: Vue satellite des différents sites de prélèvements, d'après Google map

Gaillard :



Sommand :



Contamines-sur-Arve :



Les espèces récoltées (Tableau 42) sont souvent regroupées le long des cours d'eau ou des zones humides. Elles résistent bien au froid, à l'humidité et sont généralement enracinées dans des sols de types divers. Ce sont également des espèces pionnières qui s'installent sur les alluvions mobiles des rivages, s'enracinent et stabilisent les berges. Elles favorisent la colonisation par d'autres espèces végétales ainsi que le développement de toute une microfaune en fournissant habitats et ressources.

Tableau 42: Espèces récoltées sur les trois différents sites de prélèvement

Espèces	Taille	Sol	Milieux / Etage
<i>Alnus glutinosa</i>	arbre (25m)	Plutôt humide et peu calcaire	<i>Alnion glutinosae</i> / coll.
<i>Alnus incana</i>	arbre (10m)	Humide et pauvre, calcaire à neutre	<i>Alnion incanae</i> / coll. à sub.
<i>Salix alba</i>	arbuste/arbre (25m)	Fin, riche, argilo-limoneux, graveleux	<i>Salicion albae</i> / coll. à mont.
<i>Salix appendiculata</i>	arbuste/arbre (6m)	Humide, peu acide	<i>Salicion elaeagni</i> , <i>Alnion viridis</i> / coll. à mont.
<i>Salix caprea</i>	arbuste/arbre (15m)	Plutôt humide, peu acide	<i>Sambuco Salicion</i> / coll. à sub.
<i>Salix daphnoïdes</i>	arbuste/arbre (15m)	Grossier, riche, sable gravier, alternance humide dessèchement	<i>Salicion elaeagni</i> / coll. à sub.
<i>Salix eleagnos</i>	arbuste/arbre (15m)	Grossier, riche, alluvions grossières, graviers, régulièrement inondé	<i>Salicion elaeagni</i> / coll. à mont. parfois sub.
<i>Salix foetida</i>	Arbuste (1,5m)	Plutôt humide et peu calcaire	<i>Salicion waldsteiniana</i> / sub. à alpin
<i>Salix nigricans</i>	Arbuste (2,5m)	Humide, peu acide	<i>Salicion elaeagni</i> / sub.
<i>Salix pentandra</i>	arbuste/arbre (12m)	Plutôt humide, alluvions	<i>Salicion elaeagni</i> , <i>Salicion cinerea</i> , <i>Alnion incanae</i> / coll. à sub.
<i>Salix purpurea</i>	Arbuste (6m)	Grossier, riche, alluvions grossières, graviers, régulièrement inondé	<i>Salicion elaeagni</i> , <i>Salicion albae</i> , <i>Alnion incanae</i> / coll. à mont.
<i>Salix triandra</i>	Arbuste (5m)	Fin, riche, argile, limon, sable, régulièrement inondé	<i>Salicion elaeagni</i> , <i>Salicion albae</i> / coll. à sub.

Calcul du coefficient cultural

Afin de déterminer le coefficient cultural K_c de chaque espèce, 2 méthodes ont été choisies : la méthode du Potomètre, en salle de culture, et la méthode du poids perdu, en plein air.

La surface foliaire a été calculée indirectement en mesurant la longueur des feuilles, pour la méthode du poids perdu, ou en scannant directement les feuilles, pour la méthode du potomètre. La perte d'eau a été mesurée, soit par différence de niveau (potomètre), soit par différence de poids (poids perdu). Une fois ces deux paramètres mesurés, l'évapotranspiration réelle (ET_r) pouvait être calculée. En parallèle, les différents paramètres météorologiques, mesurés en continu, permettaient de calculer l'évapotranspiration de référence (ET_o) à l'aide de la formule Penmann-Monteith. Finalement, le coefficient cultural K_c pouvait être calculé grâce à la relation :

$$K_c = \frac{ET_r (mm)}{ET_o (mm)}$$

Avec : $ET_o = \frac{0.408\Delta (Rn-G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)}$ formule de Penmann-Monteith

$$ET_r (mm) = \frac{Perte\ d'\ eau(L)}{Surface\ foliaire\ (m^2)}$$

Méthode du potomètre

Pour le calcul de ET_r , la méthode du potomètre consiste à mesurer la perte d'eau d'un rameau au cours du temps par la différence de niveau d'eau observé sur une pipette graduée. A cet effet, un rameau est plongé dans un Erlenmeyer rempli d'eau auquel une pipette graduée a été fixée à l'horizontale. Afin de prévenir toute évaporation directe d'eau, un bouchon hermétique est installé. Les paramètres climatiques sont fixés en salle de culture : une température de 20°C, un taux d'humidité de 30% et une photopériode de 16h. Le rayonnement lumineux est assuré par trois néons Sylvania Standard 129-RS de 40W.

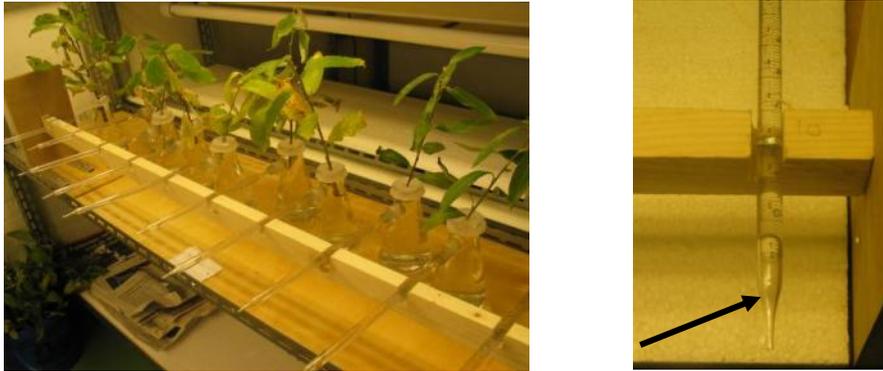


Figure 100: Test en chambre de culture et pipette de lecture d'absorption d'eau

Chaque espèce a été testée en deux séries de dix individus sur une période de 48 heures et chaque individu a été récolté sur une plante différente. Ces précautions permettent d'observer les éventuelles variations au sein d'une même espèce. Une fois testées, les feuilles de chaque individu ont été récoltées puis séchées afin d'en déterminer ultérieurement la surface à l'aide d'un scanner.

Pour le calcul de ET_0 la formule de Penmann-Monteith a été appliquée. L'échange de chaleur latente a été calculé à partir des conditions d'expérimentation, en tenant compte de la chaleur latente d'évaporation de l'eau (2,45 MJ/Kg). Les mesures du rayonnement (R_n) ont été réalisées à l'aide d'un solarimètre à 40 cm de la source lumineuse (au niveau des feuilles des individus testés). Les résultats de cette mesure ont donné des valeurs de R_n de seulement 11 W/m^2 . A titre de comparaison le rayonnement solaire est de 800 W/m^2 un jour d'été dégagé et d'environ 30 W/m^2 en hiver et en fin de journée. Par ailleurs, le R_n peut également être estimé à 10% de la puissance totale (3x40W ici), soit 12 W/m^2 , en fonction des déperditions d'énergie de chaque néon éclairant à 360°. Pour la suite du calcul, le R_n a été fixé à 12 W/m^2 , avec un vent nul, une température de 20°C et une hygrométrie de 30%, induisant donc une valeur de ET_0 de 0.74 mm/j.

Méthode du poids perdu

La méthode du poids perdu consiste à mesurer la perte d'eau d'une plante au cours d'un temps déterminé par simple différence de poids (Aboukhaled and Smith, 1986). La plante ne va utiliser qu'une petite partie de l'eau pour ses besoins physiologiques et va ensuite restituer le reste dans l'atmosphère par l'intermédiaire de ses stomates (Hopkins, 2003).



Figure 101: Mise en place des pots contenant les boutures pour l'expérimentation

Quatre boutures de chaque espèce ont été placées, après un trempage dans une hormone de bouturage (Acide Indole Butyrique) dans des pots de 10 litres contenant du terreau et de l'engrais. Les taux de reprise de chaque espèce ont été déterminés.

Le plan expérimental comprenait (Figure 102) :

- 16 blocs mis en place par rangées de deux, espacées d'environ 80cm permettant à 18 répliques de chaque espèce d'être testés simultanément.
- 12 individus d'espèces différentes dans chaque bloc, alimentées en eau par un système automatique de type « goutte-à-goutte ».
- Dans chaque bloc, les 12 individus ont été placés aléatoirement.
- Le surplus, des individus des différentes espèces bouturées, a été réparti en zone tampon autour de la zone d'essai.

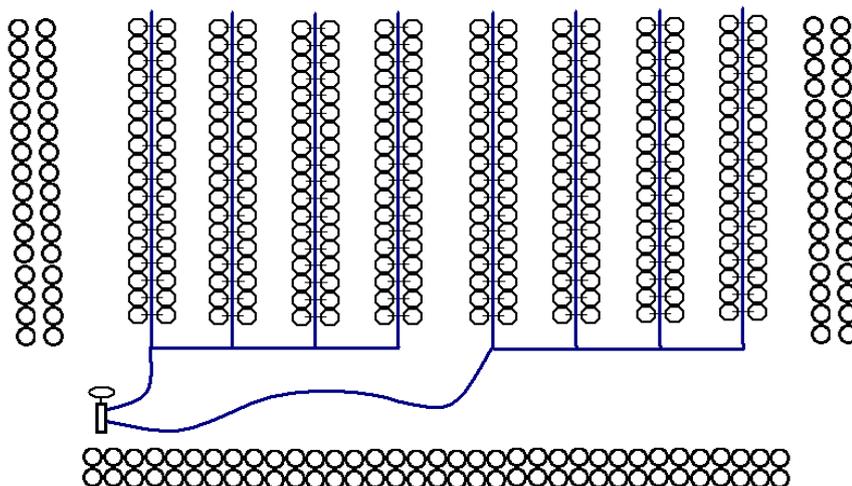


Figure 102: Schéma de la disposition des pots avec 3 zones tampons

Afin de connaître l'évaporation du substrat, des pots ne contenant pas d'individus ont également été disposés aléatoirement sur la zone d'essai et pesés. Par ailleurs, afin d'éviter toute absorption d'eau par le sol, tous les individus en test ont été surélevés de 20 à 30 cm (Figure 103) sur des caissettes en plastique.



Figure 103: Zone d'expérimentation et surélévation des pots

Les plants en pots ont été pesés tous les deux jours sur 5 jours d'expérience soit : les jours 1, 3 et 5. Trois périodes de test ont été effectuées du mois de juillet 2009 au mois de septembre 2009, ce qui a permis d'identifier les variations du K_c en fonction du stade de développement. Durant la série de pesées, les goutteurs automatiques initialement programmés pour quatre périodes d'arrosage d'une heure chacune réparties dans une journée, ont été coupés peu avant les relevés de poids, ceci afin de déterminer le poids total en condition hydrique optimale.



Figure 104: Pesée sur balance électronique (Mettler)



Figure 105: Système d'arrosage automatique

Les données météorologiques utilisées pour le calcul de l' ET_0 ont été acquises par l'intermédiaire de la station de mesure installée sur le site de Lullier.

Mesure de la surface foliaire



La surface foliaire totale de chaque individu a pu être déterminée par planimétrie, à l'aide d'un scanner à feuilles (AMR200).

Figure 106: Scanner de feuilles AMR200



Un minimum de 100 mesures de longueur de feuille par individu a été réalisé. Ces relevés ont été obtenus à l'aide d'un pied à coulisse électronique avec une précision au dixième de millimètre.

Figure 107: Pied à coulisse électronique

6.2.3 Résultats

Taux de reprise

Au cours de l'expérience, les espèces ont montré des taux de reprise différents. Il convient également de tenir compte de ce paramètre lorsque l'on choisit les espèces en vue de la végétalisation des berges, celles ayant les taux de reprise les plus élevés étant bien entendu à privilégier (Tableau 43).

Tableau 43: Taux de reprise des différentes essences

Espèce	Taux de reprise
Salix alba	98%
Salix purpurea	98%
Salix daphnoides	96%
Salix triandra	89%
Salix eleagnos	87%
Salix pentandra	73%
Salix appendiculata	68%
Salix nigricans	68%
Salix caprea	42%
Alnus glutinosa	< 5%
Alnus incana	< 5%

Méthode du Potomètre

Evapotranspiration réelle ET_r

S. triandra est l'espèce possédant le taux d'évapotranspiration le plus élevé dans les conditions d'expérimentation en chambre de culture (Figure 108).

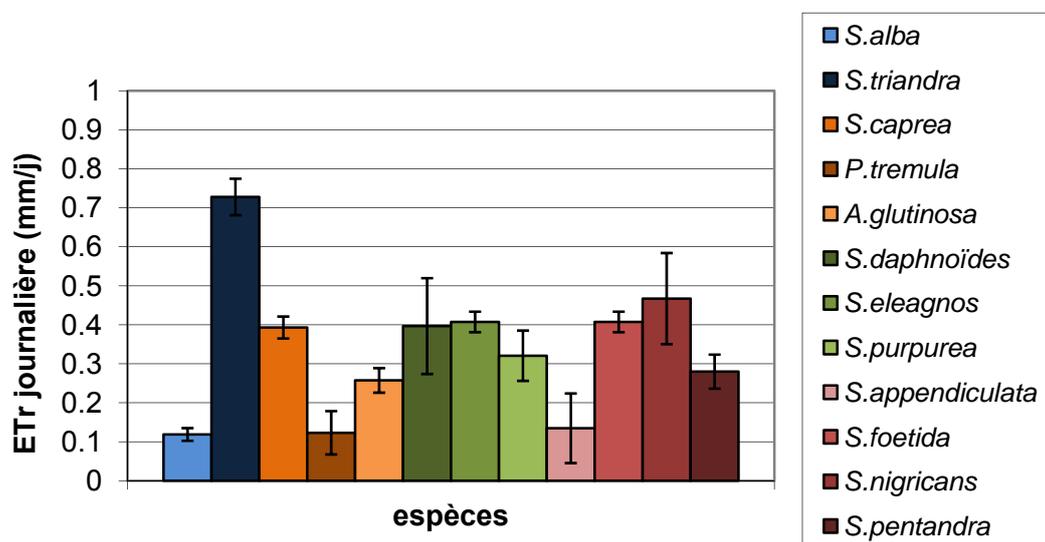


Figure 108: Evapotranspiration réelle journalière mesurée par le potomètre

- Bleu : Espèces de basse altitude sur sol fin
- Orange : Espèces de basse altitude sur sol brun
- Vert : Espèces de basse altitude sur sol grossier
- Violet : Espèces de haute altitude.

Coefficient cultural K_c

S.triandra est l'espèce qui possède le K_c le plus élevé (Figure 109). Bien que les valeurs absolues des K_c soient discutables en raison des conditions expérimentales particulières, les valeurs relatives, elles, restent valides.

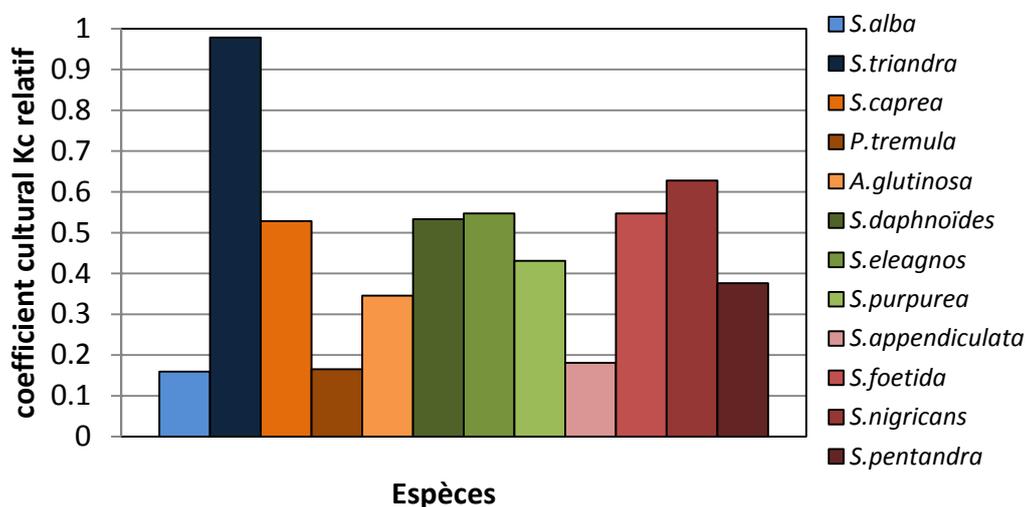


Figure 109: Coefficient cultural K_c mesuré par la méthode du potomètre

Méthode du Poids Perdu

Surface foliaire

La surface de la feuille peut être calculée d'après sa longueur par l'équation suivante :

$$\text{Surface} = a \text{ Longueur}^b$$

Les coefficients a et b ont été déterminés pour chaque espèce. Au total, 22'752 feuilles, appartenant à 298 individus, ont été mesurées afin de déterminer leur surface foliaire. Pour déterminer la surface foliaire totale des essences, 108'464 feuilles ont été comptées (Tableau 44.)

Tableau 44 : Surface foliaire calculée

Espèce	a	b	R ²	Surface totale (m ²)
<i>S.triandra</i>	2.186	1.468	0.925	0.184
<i>S.alba</i>	0.980	1.585	0.949	0.223
<i>S.caprea</i>	0.341	2.040	0.974	0.207
<i>S.daphnoïdes</i>	0.375	1.851	0.966	0.200
<i>S.eleagnos</i>	2.616	1.288	0.945	0.211
<i>S.purpurea</i>	1.756	1.443	0.924	0.316
<i>S.appendiculata</i>	0.477	1.924	0.917	0.225
<i>S.pentandra</i>	0.715	1.706	0.946	0.115
<i>S.nigricans</i>	0.276	2.055	0.902	0.302

Perte de poids

Trois séries de mesures ont été effectuées, en juillet, août et septembre. Les résultats obtenus montrent une grande similitude pour les séries de juillet et d'août, alors que la série de septembre est plus faible à cause des conditions météorologiques moins favorables.

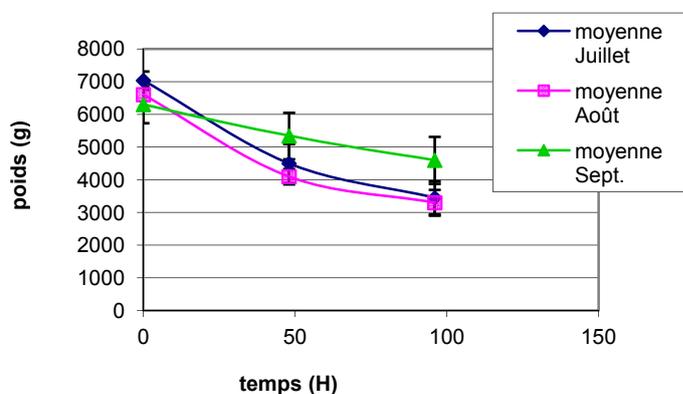


Figure 110: Exemple de résultats pour les mesures de perte de poids : *S. triandra*

Evapotranspiration réelle ET_r

Connaissant la surface foliaire et la perte de poids, l' ET_r peut être calculée (Tableau 45)

Tableau 45 : Evapotranspiration journalière calculée

Espèce	Juillet mm/j	Août mm/j	Septembre mm/j
<i>S. triandra</i>	1.2	1.4	0.9
<i>S. alba</i>	2.5	2.7	1.8
<i>S. caprea</i>	2.0	1.9	1.0
<i>S. daphnoïdes</i>	2.6	2.3	1.9
<i>S. eleagnos</i>	1.8	1.8	1.8
<i>S. purpurea</i>	1.8	1.4	1.1
<i>S. appendiculata</i>	1.3	1.8	1.3
<i>S. pentandra</i>	3.3	3.2	1.4
<i>S. nigricans</i>	2.7	2.7	2.7

Coefficient cultural K_c

Connaissant l'ET_r et l'ET₀, K_c peut être calculé (Tableau 46)

Tableau 46 : Coefficient cultural calculé

Espèce	Juillet	Août	Septembre
<i>S.triandra</i>	0.18	0.27	0.23
<i>S.alba</i>	0.39	0.53	0.48
<i>S.caprea</i>	0.30	0.38	0.28
<i>S.daphnoïdes</i>	0.41	0.46	0.49
<i>S.eleagnos</i>	0.28	0.38	0.43
<i>S.purpurea</i>	0.28	0.29	0.29
<i>S.appendiculata</i>	0.19	0.35	0.33
<i>S.pentandra</i>	0.51	0.65	0.35
<i>S.nigricans</i>	0.42	0.58	0.67

L'analyse statistique des résultats montre que :

- il n'y a pas de différences significatives entre les 18 différents blocs constituant la série de tests. Ceci écarte l'éventualité d'une variation en fonction de la position de l'individu au sein de la zone de test.
- il existe une différence significative entre les valeurs observées en septembre par rapport à celles de juillet ou d'août, ceci en raison des variations de météo observées.
- Il existe des différences significatives entre espèce (Figure 111).

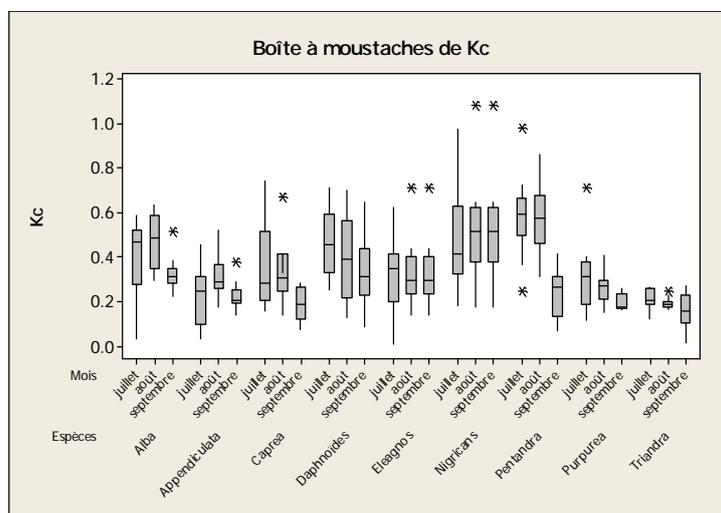


Figure 111 : boîte à moustache des K_c par espèce et par période

- Il existe une différence significative entre les deux méthodes. La méthode du potomètre obtient des résultats plus élevés que la méthode du poids perdu. Ceci est probablement dû aux conditions d'expérience qui sont différentes, avec d'un côté des parties d'individus sans substrat avec une irrigation constante (méthode du potomètre), et de l'autre côté des individus entiers sur un substrat limité avec une irrigation interrompue (méthode du poids perdu).

- Apparemment *S.triandra* possède le potentiel de refroidissement le plus élevé pour les espèces de basse altitude sur sol fin. Pour les milieux de basse altitude sur sol brun, le potentiel le plus élevé revient à *S.caprea*. Pour les milieux de basse altitude sur sol grossier, les trois espèces, *S.daphnoïdes*, *S.eleagnos* et *S.purpurea*, possèdent des potentiels similaires. Enfin, pour les espèces de haute altitude, *S.nigricans* possède le potentiel le plus élevé.

6.2.4 Discussion

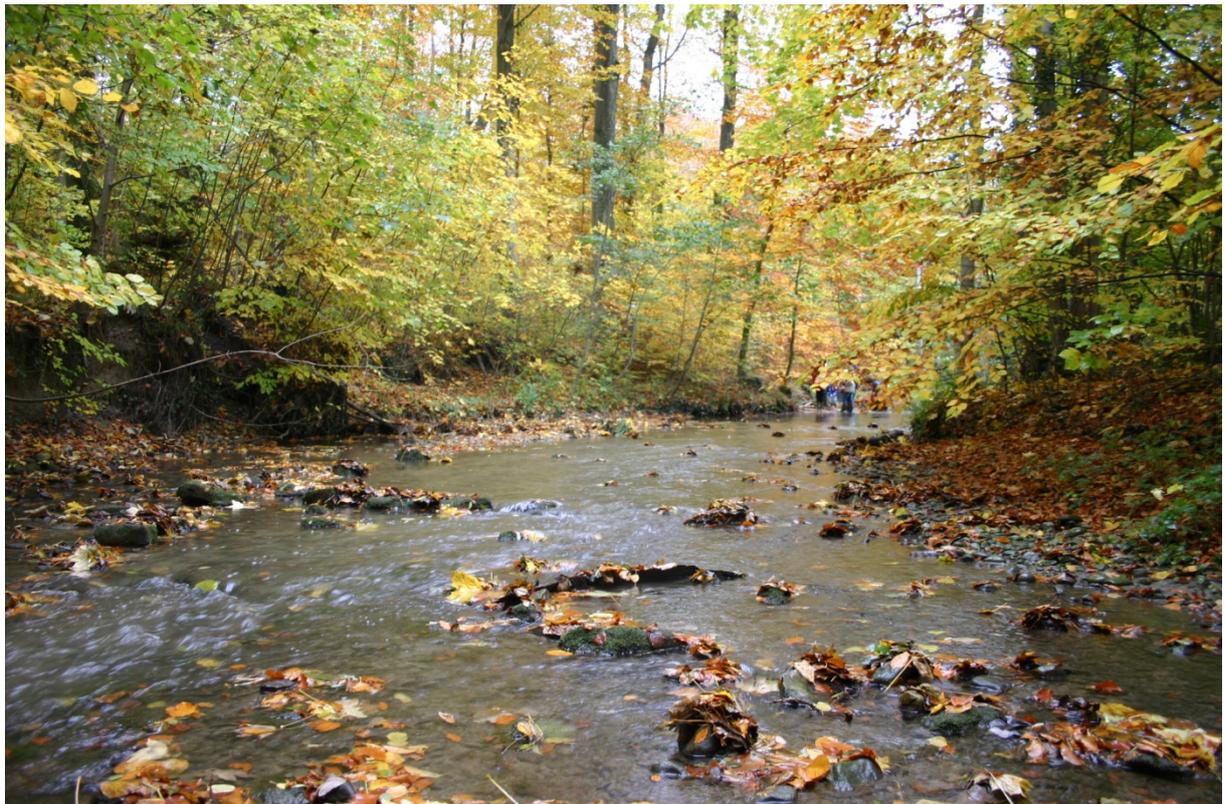
La méthode du potomètre est une méthode simple pour estimer l' ET_r . Les conditions environnementales sont contrôlées en chambre de culture, et l' ET_0 est dès lors constante. La valeur calculée ($ET_0 = 0.744\text{mm/j}$) apparaît cependant comme très faible par rapport aux conditions réelles. En effet, dans une zone semi aride (faible humidité) avec une température comprise entre 15 et 25°, l' ET_0 peut monter jusqu'à 7mm/j soit 10 fois plus. Cela s'explique par le rayonnement artificiel des lampes utilisées qui sont loin d'atteindre celui du rayonnement solaire. Par ailleurs, les individus testés par l'intermédiaire de cette méthode sont des rameaux de plante et ne représentent qu'une partie de l'individu. Cette méthode ne prend pas en compte le système dans son ensemble. Les paramètres liés au substrat et à son évaporation, ainsi que le système racinaire, vont modifier les échanges hydriques entre la plante, le sol et l'atmosphère. C'est pourquoi les résultats de K_c ne sont pas représentatifs de la réalité, mais fournissent une base permettant de comparer les différentes espèces entre elles.

La méthode du poids perdu est une méthode qui demande une grosse infrastructure et qui, au contraire de la méthode précédente, tient compte de l'ensemble de la plante. Le fait de laisser les individus sans apport d'eau durant les 5 jours de test les place dans des conditions de stress hydrique. Par ailleurs, les individus ne présentant pas de signes de flétrissement ont été réutilisés pour les trois périodes de test. Ceci suggère que certains individus ont eu un développement moins fort que s'ils avaient été en condition optimale de croissance avec des ressources non limitées en eau. A la fin des trois périodes, un nombre important d'individus ont présenté des signes de flétrissement.

Dans l'ensemble, les valeurs de K_c semblent faibles considérant que toutes ces espèces évoluent dans des milieux humides souvent bien alimentés en eau. Dans la littérature, la plus grande partie des espèces, pour lesquelles le K_c est connu, sont utilisées dans l'agriculture. Ces données sont malheureusement inexistantes pour les saules. Néanmoins, à titre de comparaison, le K_c du citronnier a été évalué entre 0.5 et 0.85 selon le stade de développement et la méthode de calcul, celui de l'avocatier a été estimé à 0.7 et celui de l'olivier entre 0.5 et 0.7. Pour les arbres fruitiers, tel que les pommiers, les cerisiers ou encore les abricotiers, des K_c moyens entre 0.5 et 1.2 sont retrouvés selon le stade de développement. En ce qui concerne des espèces de milieux humides, les roseaux (*Phragmites*) et les massettes (*Thypha*) ont un K_c évoluant entre 0.6 et 1.2 (Allen *et al.*, 1998). Enfin, le K_c des conifères est constant selon le stade développement et égal à 1.

Remerciements

Ce projet a été soutenu en partie par une bourse de l'Office Fédéral de l'Environnement (OFEV) attribué au projet *Clim-arbres* (contrat 06.0122.PJ/G231-0238/810.07.176) et par le programme de recherche des forêts, un programme commun à l'OFEV et au WSL. Certaines données proviennent de recherches antérieures faites par l'*Association Truite-Léman* et la *Fondation Maison de la Rivière*. Nous remercions toutes les équipes qui ont gelé, ou brûlé, le long du Boiron de Morges afin de mieux comprendre comment protéger le cours d'eau contre les effets du réchauffement climatique



7 Bibliographie

- Aboukhaled, A. & Smith, M., eds. (1986). *Les Lysimètres*: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. & Smith, M., eds. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Anschütz, J., Kome, A., Nederlof, M., de Neef, R. & van de Ven, T., eds. (1998). *Collecter l'eau et la rentention de l'humidité du sol*. Wageningen: Fondation Agromisa.
- Arscott, D. B., Tockner, K. & Ward, J. V. (2001). Thermal heterogeneity along a braided floodplain river (Tagliamento River, northeastern Italy). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **58**, 2359-2373.
- Bartholow, J. M. (2000). Estimating cumulative effects of clearcutting on stream temperatures. *Rivers* **7**, 284-297.
- Beschta, R. L. (1997). Riparian shade and stream temperature: an alternative perspective. *Rangelands* **19**, 25-28.
- Borman, M. & Larson, L. (2003). A case study of river temperature response to land use and environmental thermal patterns along a river in northeastern Oregon. *J. Soil Water Conserv.* **58**, 8-12.
- Bormans, M. & Webster, I. T. (1998). Dynamics of temperature stratification in lowland rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1059-1063.
- Brett, J. R. (1956). Some principles in thermal requirements of fishes. *Q. Rev. Biol.* **6**, 111-127.
- Brososke, K. D., Chen, J. C., Naiman, R. J. & Franklin, J. F. (1997). Harvesting effects on microclimatic gradients from small streams to uplands in western Washington. *Ecological Applications* **7**, 1188-1200.
- Brosse, S. & Lek, S. (2000). Modeling roach (*Rutilus rutilus*) microhabitat using linear and non linear techniques. *Freshwater Biology* **44**, 441-452.
- Brown, G. W. (1969). Predicting temperatures of small streams. *Water Resources Research* **5**, 68-75.
- Brown, G. W. & Krygier, J. T. (1970). Effects of clear-cutting on stream temperature. *Water Resources Research* **6**.
- Buisson, L. & Grenouillet, G. (2009). Contrasted impacts of climate change on stream fish assemblages along an environmental gradient. *Diversity and Distributions* **15**, 613-626.
- Burkhardt-Holm, P. (2008). Decline of brown trout (*Salmo trutta*) in Switzerland - How to assess potential causes in a multi-factorial cause-effect relationship. *Marine Environmental Research* **66**, 181-182.
- Burkhardt-Holm, P., Peter, A. & Segner, H. (2002). Decline of fish catch in Switzerland. *Aquatic Sciences* **64**, 36-54.
- Caissie, D. (2006). The thermal regime of rivers: a review. *Freshwater Biology* **51**, 1389-1406.
- Caissie, D., El-Jabi, N. & Satish, M. G. (2001). Modelling of maximum daily water temperatures in a small stream using air temperatures. *Journal of Hydrology* **251**, 14-28.

- Chatters, J. C., Neitzel, D. A., Scott, M. J. & Shankle, S. A. (1991). Potential Impacts of Global Climate Change on Pacific-Northwest Spring Chinook Salmon (*Oncorhynchus-Tshawytscha*) - an Exploratory Case-Study. *Northwest Environmental Journal* **7**, 71-92.
- Chen, J., Franklin, J. F. & Spies, T. A. (1993). Contrasting microclimates among clearcut edge, and interior of old-growth Douglas-fir forest. *Agricultural and Forest Meteorology* **63**, 219-237.
- Clark, E., Webb, B. W. & Ladle, M. (1999). Microthermal gradients and ecological implications in Dorset rivers. *Hydrological Processes* **13**, 423-438.
- Cooney, S. J., Covich, A. P., Lukacs, P. M., Harig, A. L. & Fausch, K. D. (2005). Modeling global warming scenarios in greenback cutthroat trout (*Oncorhynchus clarki stomias*) streams: Implications for species recovery. *Western North American Naturalist* **65**, 371-381.
- Cox, T. J. & Rutherford, J. C. (2000). Thermal tolerances of two stream invertebrates exposed to diurnally varying temperature. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* **34**, 203-208.
- Crozier, L. & Zabel, R. W. (2006). Climate impacts at multiple scales: evidence for differential population responses in juveniles Chinook salmon. *Journal of Animal Ecology* **75**, 1100-1109.
- de Kinkelin, P. & Lorient, B. (2001). A water temperature regime which prevents the occurrence of proliferative kidney disease (PKD) in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum). *Journal of Fish Diseases* **24**, 489-493.
- De Parcevaux, S. & Hubert, L., eds. (2007). *Bioclimatologie: Concepts et applications*. Versailles: Ed. Quae.
- Ebersole, J. L., Liss, W. J. & Frissell, C. A. (2003a). Cold water patches in warm streams: physicochemical characteristics and the influence of shading. *Journal of the American Water Resources Association*, 355-368.
- Ebersole, J. L., Liss, W. J. & Frissell, C. A. (2003b). Thermal heterogeneity, stream channel morphology, and salmonid abundance in northeastern Oregon streams. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **60**, 1266-1280.
- Elith, J., Graham, H., Anderson, R. P., Dudik, M., Ferrier, S., Guisan, A., Hijmans, R. J., Huettmann, F., Leatwick, J. R., Lehmann, A., Li, J. L., Lohmann, G., Loiselle, B. A., Manion, G., Moritz, C., Nakamura, M., Nakazawa, Y., Overton, J., Peterson, A. T., Philipps, S. J., Richardson, K., Scachetti-Pereira, R., Schapire, R. E., Soberon, J., Williams, S. L., Wisz, M. S. & Zimmermann, N. E. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography* **29**, 129-151.
- Elliott, J. M. (2000). Pools as refugia for brown trout during two summer droughts: trout responses to thermal and oxygen stress. *Journal of Fish Biology* **56**, 938-948.
- Erickson, T. R. & Stefan, H. G. (2000). Linear air/water temperature correlations for streams during open water periods. *Journal of Hydrologic Engineering*, 317-321.
- Eriksson, H., Eklundh, L., Hall, K. & Lindroth, A. (2005). Estimating LAI in deciduous forest stands. *Agricultural and Forest Meteorology* **129**, 27-37.
- Ficke, A. D., Myrick, C. A. & Hansen, L. J. (2007). Potential impacts of global climate change on freshwater fisheries. *Rev. Fish Biol. Fisheries* **17**, 581-613.
- Fitzgerald, D. G., Kott, E., Lanno, R. P. & Dixon, D. G. (1997). A quarter century of change in the fish communities of three small streams modified by anthropogenic activities. *J. Aquat. Ecosyst. Stress Recovery* **6**, 111-127.

- Frei, C. (2004). Die Klimazukunft der Schweiz - Eine probabilistische Projektion.
- Frei, C. & Schaer, C. (2001). Detection probability of trends in rare events: Theory and application to heavy precipitation in the Alpine region. *Journal of Climate* **14**, 1568-1584.
- Frei, C., Schaer, C., Luthi, D. & Davies, H. C. (1998). Heavy precipitation processes in a warmer climate. *Geophysical Research Letters* **25**, 1331-1434.
- Frei, C., Scholl, R., Fukutome, S., Schmidli, R. & Vidale, P. L. (2006). Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* **111**.
- Gray, D. M., ed. (1973). *Handbook on principles of hydrology*. New-York: Huntington.
- Gray, J. R. A. & Edington, J. M. (1969). Effect of Woodland clearance on stream temperature. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **26**, 399-403.
- Guisan, A. & Zimmerman, N. E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modeling* **135**, 147-186.
- Guisan, A. & Thuiller, W. (2005). Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters* **8**, 993-1009.
- Gunawardhana, L. N. & Kazama, S. (2009). Tidal effects on aquifer thermal regime: an analytical solution for coastal ecosystem management. *Journal of Hydrology* **377**, 377-390.
- Hari, R. E., Livingstone, D. M., Siber, R., Burkhardt-Holm, P. & Güttinger, H. (2006). Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. *Global Change Biology* **12**, 10-26.
- Harrell, F. E., Lee, K. L. & Mark, D. B. (1996). Multivariable prognostic models: issues in developing models, evaluating assumptions and adequacy, and measuring and reducing errors. *Statistics in Medicine* **15**, 361-387.
- Harte, J. (2004). Biodiversity conservation: Climate change and extinction risk. *Nature* **430**, 6995.
- Hauer, F. R., Baron, J. S., Campbell, D. H., Fausch, K. D., Hostetler, S. W., Leavesley, G. H., Leavitt, P. R., McKnight, D. M. & Stanford, J. A. (1997). Assessment of climate change and freshwater ecosystems of the Rocky Mountains, USA and Canada. *Hydrological Processes* **11**, 903-924.
- Holtby, L. B. (1988). Effect of logging on stream temperatures in Carnation Creek, British Columbia, and associated impacts on the Coho Salmon (*Oncorhynchus kisutch*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **45**, 502-515.
- Hopkins, W., ed. (2003). *Physiologie végétale*. Bruxelles: De Boek.
- IPCC, ed. (2007). *Climate change 2006*. Cambridge: The Scientific Basis IPCC.
- Johansen, M., Elliott, J. M. & Klemetsen, A. (2005). A comparative study of juvenile salmon density in 20 streams throughout a very large river system in northern Norway. *Ecology of Freshwater Fish* **14**, 96-110.
- Johnson, F. A. (1971). Stream temperature in an alpine area. *Journal of Hydrology* **14**, 322-336.
- Johnson, S. L. (2003). Stream temperature: scaling of observations and issues for modelling. *Hydrological Processes* **17**, 497-499.
- Johnson, S. L. (2004). Factors influencing stream temperatures in small streams: substrate effects and a shading experiment. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **61**, 913-923.

- Johnson, S. L. & Jones, J. A. (2000). Stream temperature responses to forest harvest and debris flows in western Cascades, Oregon. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **57**, 30-39.
- Jonckheere, I., Fleck, S., Nackaerts, K., Muys, B., Coppin, P., Weiss, M. & Baret, F. (2004). Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* **121**, 19-35.
- Larson, L. L. & Larson, S. E. (1996). Riparian shade and stream temperature: A perspective. *Rangelands* **18**, 149-152.
- Leatwick, J. R., Rowe, D., Richardson, J., Elith, J. & Hastie, T. (2005). Using multivariate adaptive regression splines to predict the distributions of New Zealand's freshwater diadromous fish. *Freshwater Biology* **20**, 2034-2052.
- Lee, R. M. & Rinnie, J. N. (1980). Critical thermal maxima of five trout species in the south-western United States. *Transaction of the American Fisheries Society* **109**, 632-635.
- Li, H. W., Lamberti, G. A., Pearsons, T. N., Tait, C. K., Li, J. L. & Buckhouse, J. C. (1994). Cumulative effects of riparian disturbances along high desert trout streams of the John Day basin, Oregon. *Transaction of the American Fisheries Society* **123**, 627-640.
- Livingstone, D. M. & Lotter, A. F. (1998). The relationship between air and water temperatures in lakes of the Swiss Plateau: a case study with palaeolimnological implications. *Journal of Paleolimnology*, 181-198.
- Livingstone, D. M., Lotter, A. F. & Walker, A. F. (1999). The decrease in summer surface water temperature with altitude in Swiss alpine lakes: a comparison with air temperature lapse rates. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* **31**, 341-352.
- Livingstone, D. M., Lotter, A. F. & Kettle, H. (2005). Altitude-dependent differences in the primary physical response of mountain lakes to climatic forcing. *Limnol. Oceanogr.* **50**, 1313-1325.
- Malcolm, I. A., Soulsby, C. & Youngson, A. F. (2002). Thermal regime in the hyporheic zone of two contrasting salmonid spawning streams: ecological and hydrological implications. *Fisheries Management and Ecology* **9**, 1-10.
- Marce, R. & Armengol, J. (2008). Modeling river water temperature using deterministic, empirical, and hybrid formulations in a Mediterranean stream. *Hydrological Processes* **22**, 3418-3430.
- Marcotte, N. & Duong, V. L. (1973). Le calcul de la température de l'eau des rivières. *Journal of Hydrology* **18**, 273-287.
- Marine, K. R. & Cech, J. J. (2004). Effects of high water temperature on growth, smoltification, and predator avoidance in juvenile Sacramento River Chinook Salmon. *North American Journal of Fisheries Management* **24**, 198-210.
- Matthews, K. R. & Berg, N. H. (1997). Rainbow trout responses to water temperature and dissolved oxygen stress in two southern California stream pools. *Journal of Fish Biology* **50**, 50-67.
- Meier, W., Bonjour, C., Wüest, A. & Reichert, P. (2003). Modeling the effect of water diversion on the temperature of mountain streams. *Journal of Environmental Engineering* **129**, 755-764.
- Mohseni, O. & Stefan, H. G. (1999). Stream temperature/air temperature relationship: a physical interpretation. *Journal of Hydrology* **218**, 128-141.

- Mohseni, O., Stefan, H. G. & Eaton, J. G. (2003). Global warming and potential changes in fish habitat in U.S. streams. *Climatic Change* **59**, 389-409.
- Montavon, R. (2008). Projet Clim-arbres: Bilan thermique et modèle d'écoulement d'une rivière. p. 67. Genève: hepia.
- Monteith, J. L. (1981). Evaporation and surface temperature. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* **107**, 1-27.
- Moore, R. D., Spittlehouse, D. L. & Story, A. (2005). Riparian microclimate and stream temperature response to forest harvesting: A review. *Journal of the American Water Resources Association*, 813-834.
- Moosmann, L., Schmid, M. & Wüest, A. (2005). Einfluss der Beschattung auf das Temperaturregime der Orbe. p. 27: EAWAG, Eidgenössische Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz, 6047 Kastanienbaum.
- Morgan, I. J., McDonald, D. G. & Wood, C. M. (2001). The cost of living for freshwater fish in a warmer, more polluted world. *Global Change Biology*, 345-355.
- Morrill, J. C., Bales, R. C. & Conklin, M. H. (2005). Estimating stream temperature from air temperature: Implications for future water quality. *Journal of Environmental Engineering* **131**, 139-146.
- Mostovoy, G. V., Anantharaj, V., King, R. & Filippova, M. G. (2008). Interpretation of the relationship between skin temperature and vegetation fraction: effect of subpixel soil temperature variability. *Int. J. Remote Sens.* **29**, 2819-2831.
- Musy, A. & Higy, C., eds. (2004). *Hydrologie: Une science de la nature*. Lausanne.
- OCCC (2004). La Suisse en 2050.
- OFEV (1998). Méthodes d'analyse et d'appréciation des cours d'eau en Suisse. Ecomorphologie niveau R. In *Informations concernant la protection des eaux*. Berne.
- OFEV (2007). Plan Directeur de recherche Environnement pour les années 2008-2011. p. 80. Berne: Office fédéral de l'environnement OFEV.
- Ovidio, M., Capra, H. & Philippart, J. C. (2007). Field protocol for assessing small obstacles to migration of Brown trout, *Salmo trutta*, and European grayling, *Thymallus thymallus*: a contribution to the management of free movement in rivers. *Fisheries Management and Ecology* **14**, 41-50.
- Pedersen, N. L. & Sand-Jensen, K. (2007). Temperature in lowland Danish streams: contemporary patterns, empirical models and future scenarios. *Hydrological Processes* **21**, 348-358.
- Peeters, F., Livingstone, D. M., Goudsmit, G. H., Kipfer, R. & Forster, R. (2002). Modeling 50 years of historical temperature profiles in a large central European lake. *Limnol. Oceanogr.* **47**, 186-197.
- Peterson, J. H. & Kitchell, J. F. (2001). Climate regimes and water temperature changes in the Columbia River: Bioenergetic implications for predators of juvenile salmon. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **58**, 1831-1841.
- Poole, G. C. & Berman, C. H. (2001). An ecological perspective on in-stream temperature: Natural heat dynamics and mechanisms of human-caused thermal degradation. *Environmental Management* **27**, 787-802.
- Rahel, F. J., Keleher, C. & Anderson, J. L. (1996). Potential habitat loss and population fragmentation for cold water fish in the North Platte River drainage of the Rocky Mountains: Response to climate warming. *Limnol. Oceanogr.* **41**, 1116-1123.

- Rebetez, M. (2004). Summer 2003 maximum and minimum daily temperatures over a 3300 m altitudinal range in the Alps. *Climate Research* **27**, 45-50.
- Rebetez, M. & Reinhard, M. (2007). Monthly air temperature trends in Switzerland 1901-2000 and 1975-2004. *Theoretical and Applied Climatology* **91**, 27-34.
- Rebetez, M. & Reinhard, M. (2008). Monthly air temperature trends in Switzerland 1901-2000 and 1975-2004. *Theoretical and Applied Climatology* **91**, 27-34.
- Rebetez, M., Mayer, H., Dupont, O., Schindler, D., Gartner, K., Kropp, J. & Menzel, A. (2006). Heat and drought 2003 in Europe: a climate synthesis. *Ann. For. Sc.* **63**, 569-577.
- Renaud, V. & Rebetez, M. (2008). Comparison between open-site and below-canopy climatic conditions in Switzerland during the exceptionally hot summer of 2003. *Agricultural and Forest Meteorology*.
- Ringler, N. H. & Hall, J. D. (1975). Effects of logging on water temperature and dissolved oxygen in spawning beds. *Transaction of the American Fisheries Society* **1**, 111-121.
- Roth, T. R., Westhoff, M. C., Huwald, H., Huff, J. A., Rubin, J.-F., Barrenxetxea, G., Vetterli, M., Parriaux, A., Selker, J. S. & Parlange, M. B. (2010). Stream temperature response to three riparian vegetation scenarios by use of a distributed temperature validated model. *Environmental Science & Technology* **44**, 2072-2078.
- Rubin, J.-F. (1995). Estimating the success of natural spawning of salmonids in streams. *Journal of Fish Biology* **46**, 603-622.
- Rubin, J.-F. & Glimsäter, C. (1996). Egg-to-fry survival of the sea trout in some streams of Gotland. *Journal of Fish Biology* **48**, 585-606.
- Schaer, C., Vidale, P. L., Luthi, D., Frei, C., Haberli, C., Liniger, M. A. & Appenzeller, C. (2004). The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* **427**, 332-336.
- Scheurer, K. (2008). Climate and landuse changes affecting river sediment and brown trout in alpine countries - a review. *Environmental Science and Pollution Research* **16**, 232-242.
- Schmidli, J., Frei, C. & Schaer, C. (2001). Reconstitution of mesoscale precipitation fields from sparse observations in complex terrain. *Journal of Climate* **14**, 3289-3306.
- Schmidli, J., Schmutz, C., Frei, C., Wanner, H. & Schaer, C. (2002). Mesoscale precipitation variability in the region of the European Alps during the 20th century. *International Journal of Climatology* **22**, 1049-1074.
- Sinokrot, B. A. & Stephan, H. G. (1993). Stream Temperature dynamics: measurements and modeling. *Water Resources Research* **29**, 2299-2312.
- Smith, K. (1975). Water temperature variations within a major river system. *Nordic Hydrology* **6**, 155-169.
- Smith, K. & Lavis, M. E. (1975). Environmental influences on the temperature of a small upland stream. *Oikos* **26**, 228-236.
- Soutter, M., Mermoud, A. & Musy, A., eds. (2007). *Ingénierie des eaux et du sol: processus et aménagements*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Soutter, M., Mermoud, A. & Musy, A., eds. (2007). *Ingénierie des eaux et du sol: processus et aménagements*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Stefan, H. G. & Sinokrot, B. A. (1993). Projected global climate change impact on water temperatures in five north central US streams. *Climatic Change* **24**, 353-381.

- Theurer, F. D., Lines, I. & Nelson, T. (1985). Interaction between riparian vegetation water temperature and salmonid habitat in the Tucannon River. *Water Resources Bulletin* **21**, 53-64.
- Thomas, C. D. (2004). Extinction risk from climate change. *Nature* **427**, 145-148.
- Thuiller, W. (2004). Patterns and uncertainties of species' range shifts under climate change. *Global Change Biology* **10**, 2020-2027.
- Wahli, T., Knuesel, R., Bernet, D., Segner, H., Pugovkin, D., Burkhardt-Holm, P., Escher, M. & Schmidt-Posthaus, H. (2002). Proliferative kidney disease in Switzerland: current state of knowledge. *Journal of Fish Disease* **25**, 491-500.
- Webb, B. W. & Nobilis, F. (1994). Water temperature behaviour in the River Danube during the twentieth century. *Hydrobiologia* **291**, 105-113.
- Webb, B. W. & Zhang, Y. (1997). Spatial and seasonal variability in the components of the river heat budget. *Hydrol. Processes* **11**, 79-101.
- Webb, B. W. & Nobilis, F. (1997). Long-term perspective on the nature of the air-water temperature relationship: a case study. *Hydrological Processes* **11**, 137-147.
- Webb, B. W. & Zhang, Y. (1999). Water temperature and heat budgets in Dorset chalk water courses. *Hydrological Processes* **13**, 309-321.
- Webb, B. W., Hannah, D. M., Moore, R. D., Brown, L. E. & Nobilis, F. (2008). Recent advances in stream and river temperature research. *Hydrological Processes* **22**, 902-918.
- Wehrly, K. E., Brenden, T. O. & Wang, L. (2009). A comparison of statistical approaches for predicting stream temperatures across heterogeneous landscapes. *Journal of American water resources association* **45**, 986-997.
- Weiss, M., Baert, F., Smith, G. J., Jonckheere, I. & Coppin, P. (2004). Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination. Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural and Forest Meteorology* **121**, 37-53.
- Westhoff, M. C., Savenije, H. H. G., Luxemburg, W., Stelling, J. G. S., van de Giesen, N., Selker, J. S., Pfister, L. & Uhlenbrook, S. (2007). A distributed stream temperature model using high resolution temperature observations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **11**, 1469-1480.
- Wickett, W. P. (1954). The oxygen supply to salmo eggs in spawning beds. *Journal of Fisheries Research Board of Canada* **11**, 933-953.
- Yang, S. L., Mehmet Aydin, M., Yano, T. & Li, X. (2003). Evapotranspiration of orange trees in greenhouse lysimeters. *Irrig. Sci.* **21**, 145-149.
- Zwieniecki, M. & Newton, M. (1999). Influence of streamside cover and stream features on temperature trends in forested streams of western Oregon. *West. J. Appl. For.* **14**, 106-112.