

■ Régions • Auvergne • Bourgogne • Centre • Languedoc-Roussillon • Limousin • Pays de la Loire • Rhône-Alpes ■ Départements • Allier • Ardèche • Cher • Creuse • Indre-et-Loire • Loir-et-Cher • Loire • Haute-Loire • Loire-Atlantique • Loiret • Lozère • Maine-et-Loire • Nièvre • Puy-de-Dôme • Saône-et-Loire • Haute-Vienne ■ Villes et Agglos • Agglomération de Nevers • Angers Loire Métro-

ETABLISSEMENT PUBLIC
LOIRE

pole • Blois • Bourges • Châteauroux • Clermont Communauté • Joué-Lès-Tours • Limoges • Montluçon • Nantes Métropole • Orléans • Roannais Agglomération • Saint-Etienne-Métropole • Saint-Nazaire • Saumur Loire Développement • Tours • Vichy • Vierzon ■ SICALA • Allier • Cher • Indre-et-Loire • Loir-et-Cher • Haute-Loire • Loiret • Maine-et-Loire • Nièvre • Saône-et-Loire



IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE BASSIN DE LA LOIRE & SES AFFLUENTS

Eléments de connaissance scientifique

Sommaire

1/ Mise en contexte	4
a. Caractéristiques et enjeux du bassin de la Loire et ses affluents.....	4
b. L'initiative ligérienne d'adaptation aux impacts du changement climatique.....	5
2/ Des changements hydro-climatiques importants observés depuis les 50 dernières années sur la Loire	7
a. Tendances significative à la hausse des températures de l'air et de l'eau.....	7
b. Des précipitations globalement stables.....	7
c. Une légère diminution des débits	8
d. Mise en évidence d'une variabilité multi-décennale	9
e. Amélioration des connaissances sur les interactions Eaux de surface/Eaux souterraines.	9
3/ Evolution future de la ressource en eau de la Loire	10
a. De nouveaux outils sur le bassin de la Loire.....	10
b. Quelles projections climatiques sur le bassin de la Loire ?	11
c. Vers une augmentation des températures de la Loire.....	11
d. Vers une diminution de la ressource en eau	13
e. Incertitudes sur les crues	14
4/ Des écosystèmes et une biodiversité fortement impactée, quelques exemples.	15
a. Mise en place de réseaux d'observations	15
b. Les poissons	15
c. Prolifération de cyanobactéries et développement de nouvelles espèces aquatiques.	17
d. Des changements sur la dynamique estuarienne	18
e. Les tourbières du massif central	18
f. Le peuplier noir	18
g. Quelles hypothèses pour quels impacts ?.....	19
5/ Quels impacts sur les usages ?	19
6/ Conclusion	20
Futures pistes de recherche.....	20
Vers quelles adaptations ?.....	21
/Glossaire	22
/Références	23
/Liens utiles	27
/Annexes	28
Annexe 1 – Note sur le rapport de « Le Climat de la France au XXIème siècle – Volume 4 – Scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer » publié en août 2014 sous la direction de Jean Jouzel.	28
Annexe 2 – Note sur l'article "A systematic approach to assessing the sensitivity and vulnerability of water availability to climate change in Europe" de Martina Weiss et Joseph Alcamo, publié dans Water Resources Research, vol. 47, W02549, 2011.....	32
Annexe 3 – Note sur l'article "Europe's freshwater biodiversity under climate change: distribution shifts and conservation needs." De Danjela Markovic <i>et al.</i> , publié dans diversity and Distributions, (2014)20, 1097-1107.....	34

Annexe 4 – Note sur l’article “Global river discharge and water temperature under climate change” de Michelle T. H. van Vliet <i>et al.</i> , publié dans <i>Global Environmental Change</i> , (2013)23, 450-464.	36
Annexe 5 – Note sur le chapitre « Prospective socio-économique et démographique. Pressions anthropiques » du projet Explore 2070.	37
Annexe 6 – Tableau de travail faisant l’inventaire des différents projets et ayant permis d’aboutir au présent rapport.	42

1/ Mise en contexte

a. Caractéristiques et enjeux du bassin de la Loire et ses affluents

Le bassin de la Loire représente 1/5^{ème} de la superficie française (117 000 km²) et est naturellement contrasté. Les reliefs sont variés, relativement élevés dans le massif central avec des altitudes dépassant les 1 500 m, ils s'aplanissent ensuite vers l'aval avec de grandes plaines dont celle de la Beauce par exemple. Ses propriétés hydrogéologiques sont très différentes du massif central à l'amont au massif armoricain à l'aval en passant par le bassin parisien et par quelques zones karstiques entre Gien et Orléans (Figure 1).

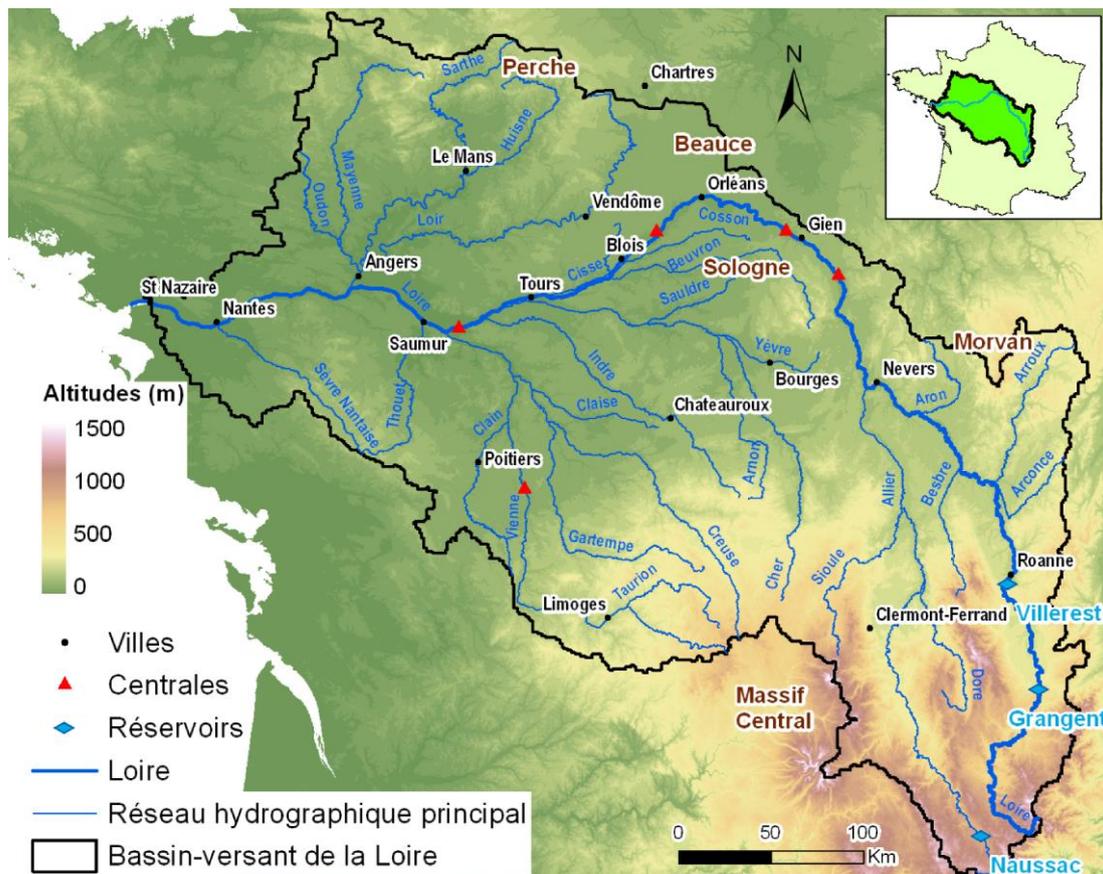


Figure 1- Bassin versant de la Loire (extrait de Monteil, 2011)

Ces contrastes géographiques se traduisent par des différences climatiques. Le massif central est la partie du bassin la plus arrosée avec un peu plus de 1000 mm/an dont près de 20% sous forme de neige, alors que la zone centrale du bassin reçoit moins de 700 mm/an. Sous l'influence de l'océan atlantique, la zone estuarienne reçoit un peu plus de précipitations que la zone centrale. Des résultats de modélisation montrent que en moyenne annuelle sur 35 ans, la pluie efficace représente près du quart des précipitations dans le bassin de la Loire et environ deux tiers de la pluie efficace contribue à la recharge des aquifères (Brugeron *et al.*, 2013)

Le bassin de la Loire est également caractérisé par une forte anthropisation et les nombreux usages (agricoles, énergétiques, touristiques, écologiques) présents sur le bassin sont autant d'enjeux dans la gestion des ressources en eau. Le changement

climatique en cours pose la question de savoir s'il pourrait exacerber des tensions entre usagers en fragilisant l'équilibre entre ressources et besoins.

b. L'initiative ligérienne d'adaptation aux impacts du changement climatique

Une démarche d'adaptation aux impacts du changement climatique pour les régimes d'inondation et de sécheresse dans le bassin de la Loire a été initiée en début d'année 2007. Sa maîtrise d'ouvrage a été assurée par l'Etablissement. Elle faisait suite à la proposition du Ministère de l'écologie, en fin d'année 2006, de retenir le bassin de la Loire comme site pilote au niveau national pour une démarche de ce type.

Un état des lieux initial des connaissances et projets concernant l'observation des impacts éventuels du changement climatique déjà perceptibles sur le bassin, et les éventuelles stratégies ou mesures d'adaptation déjà mises en œuvre a été réalisé. Par ailleurs, se sont également tenues une audition prospective, sur le thème : "Changement climatique et vulnérabilité des activités humaines et des milieux naturels dans le bassin de la Loire" ainsi qu'une table ronde technique, avec des spécialistes du climat et de la modélisation, sur le choix des scénarios climatiques à prendre en compte dans la perspective du lancement d'un appel à projets.

Sur cette base, un appel à projets de recherche sur la connaissance des vulnérabilités des activités humaines et des milieux du bassin de la Loire par rapport aux effets du changement climatique sur les régimes d'inondation et de sécheresse a été lancé en juin 2008. Deux projets ont été retenus et ont été réalisés en 2009-2010 :

- EV2B / Evaluation de la vulnérabilité de la biodiversité et des zones bâties inondables du corridor ligérien, pour une meilleure anticipation des effets du changement climatique sur les régimes hydrologiques de la Loire (Servain-Courant, 2010 ; Greulich et al., 2010)
- ICC-HYDROQUAL / Impact du Changement Climatique sur l'hydrosystème Loire : HYDROlogie, Régime thermique, QUALité des eaux (Moatar et al., 2010a)

Les résultats de ces projets ont fait l'objet de diffusion depuis lors, également d'exploitation dans le cadre de plusieurs opérations réalisées ou en cours. L'ensemble des éléments (description, rapports, synthèse) concernant cette initiative sont consultables sur le plateau collaboratif d'échange du plan Loire : www.plan-loire.fr/changement-climatique.

De plus, **le plan Loire grandeur nature III** a permis de progresser par rapport aux manques identifiés en 2007, en soutenant une quinzaine de projets traitant de cette problématique.

En 2014, l'initiative ligérienne fait l'objet d'une actualisation. Cela a permis, dans un premier temps, de mettre à jour un certain nombre de résultats récemment acquis sur la Loire, notamment lors de ces projets, mais également au cours d'autres projets soutenus par les agences de recherches nationales ou européennes.

Ce rapport de l'Etablissement public Loire, réalisé à l'issue d'un travail mené de septembre à décembre 2014 par Claire MAGAND, présente les principaux résultats de ces études dans des domaines, identifiés comme cruciaux pour le bassin de la Loire (ressources en eau, inondation, énergie, agriculture, biodiversité, tourisme...) et à différentes échelles pertinentes (locales, régionales, nationales, européennes voire même mondiales). Ce rapport se veut le plus complet possible mais n'est pas exhaustif du fait du caractère parfois très local ou très spécialisé de certaines études qui n'ont donc pas été prises en compte.

L'ensemble des résultats présentés ici ont été obtenus à l'aide de scénarios issus de l'AR4 du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (le GIEC). En 2014, un nouveau rapport, l'AR5, a été publié. Ce rapport se base sur de nouveaux scénarios climatiques obtenus avec une méthode différente et avec une nouvelle génération de modèles climatiques. Néanmoins les scénarios de l'AR4 ne sont pas obsolètes car il a été montré que ces scénarios produisent des projections climatiques très similaires sur le territoire français (Boé et Terray, 2014 ; Jouzel et al., 2014). Pour plus d'informations, le lecteur pourra se référer à la note en annexe 1.

2/ Des changements hydro-climatiques importants observés depuis les 50 dernières années sur la Loire



a. Tendence significative à la hausse des températures de l'air et de l'eau

Le changement climatique est d'ores et déjà en cours sur le bassin de la Loire et ses affluents. Une tendance significative à la hausse des températures moyennes annuelles de l'air sur le bassin de la Loire a été constatée, en particulier depuis 1980 (entre 0.8°C et 1.5°C selon les différents endroits du bassin), comme le montre la figure 2.

Les températures de la Loire¹ sont très surveillées du fait de la présence des centrales nucléaires qui rejettent l'eau ayant circulé dans les circuits de refroidissement. De plus, elles jouent un rôle prépondérant dans le cycle de reproduction des poissons migrateurs.

Moatar et Gailhard (2006) ont mis en évidence une augmentation de la température de la Loire d'environ 0.8°C en moyenne annuelle et estivale au cours du siècle dernier. Cette élévation de la température de l'eau s'accroît depuis la fin des années 1980, du fait du réchauffement de la température de l'air, mais aussi à cause d'une diminution de la vitesse du vent, de la nébulosité et de l'hydraulicité (Gosse et al., 2009). A partir d'observations réalisées en amont de la première centrale nucléaire (Belleville) ainsi qu'à d'autres points en aval, Moatar et Gailhard (2006) ont montré que les rejets ne jouent qu'un rôle secondaire dans l'élévation de la température. L'année 2003 ressort comme une année record concernant les températures de l'écosystème fluvial avec une température moyenne sur 7 jours de près de 30°C (Moatar et Gailhard, 2006 ; Gosse et al., 2009).

En Loire moyenne, l'élaboration d'un modèle hydrogéologique a permis de montrer que le régime thermique de la Loire est modifié par les apports d'eau souterraine; en particulier par l'aquifère de Beauce (Monteil, 2011). Ces apports permettent en effet de réduire d'environ 0.5°C la température de l'eau et même de 1°C lors de fortes chaleurs estivales (Brugeron *et al.*, 2013).

b. Des précipitations globalement stables

Les études statistiques sur des chroniques d'observations de précipitations n'ont pu déceler de tendance sur celles-ci. Ceci est vraisemblablement dû au fait que les précipitations sont mesurées en des points spécifiques grâce à des pluviomètres et qu'elles sont soumises à de plus fortes variations spatiales que les températures.

¹ La température de la Loire à Belleville varie annuellement entre 3 et 28 °C (Huguet et al., 2008)

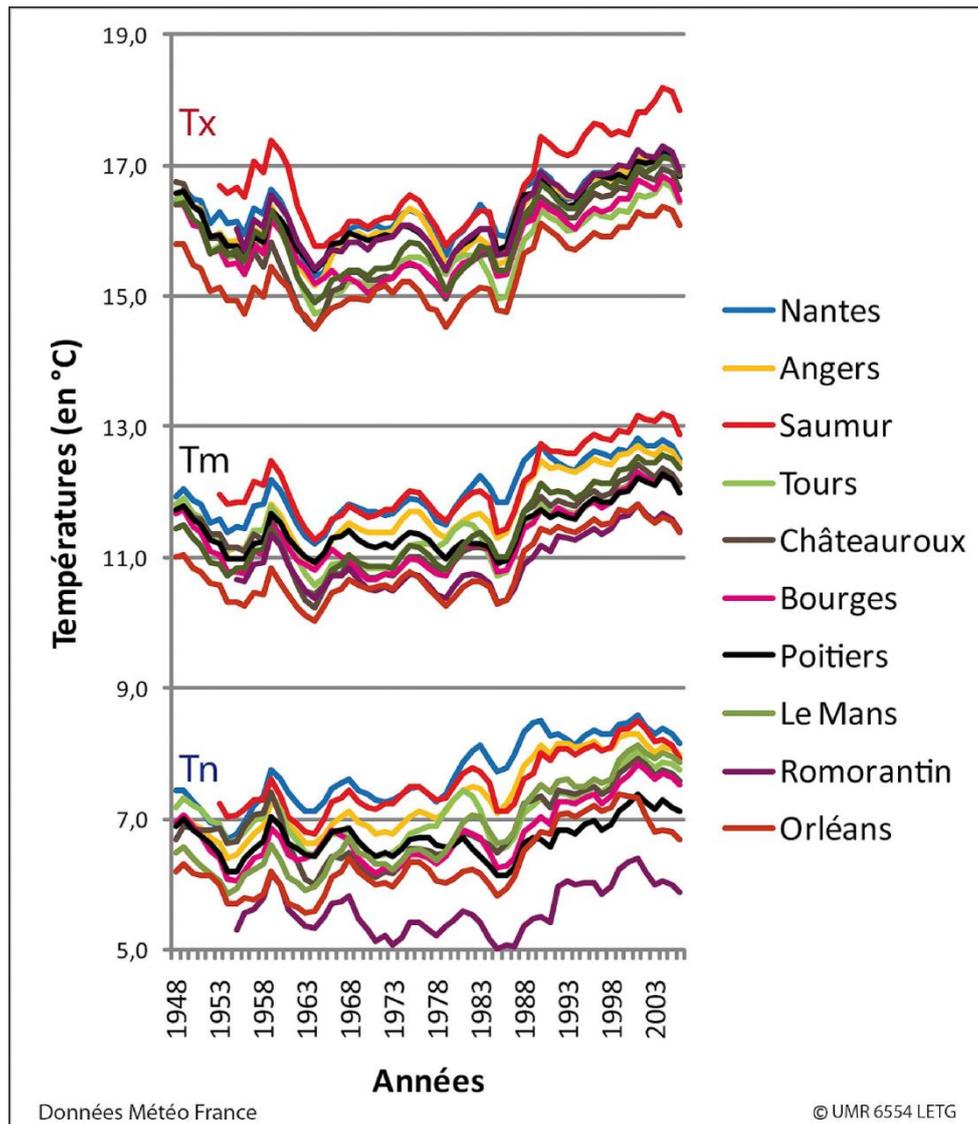
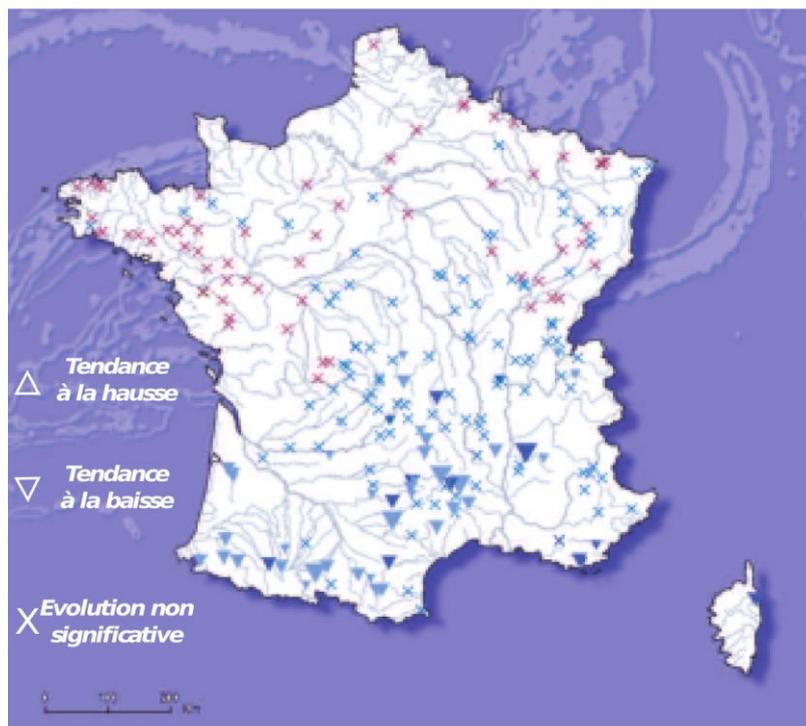


Figure 2 Evolution des températures (selon une moyenne glissante calculée sur une fenêtre de 5 ans) dans le Val de Loire depuis 1948. Tx est la températures maximale annuelle, Tm est la température moyenne et Tn, la température minimale. (Extrait de Bonnefoy et al., 2010.)

c. Une légère diminution des débits

De récentes études sur des chroniques de débits d’au moins 50 ans ont montré une légère diminution des débits avec une tendance à l’accentuation de la dispersion saisonnière (diminution des basses eaux estivales et élévation des hautes eaux hivernales), en particulier à l’amont du bassin (« Y a-t-il une dérive hydrologique en Auvergne » - [wikhydro](#) ; ONEMA, 2012). Les tendances semblent légèrement différentes à l’aval du bassin avec une augmentation des débits proche de l’estuaire (figure 3). De manière générale et pour l’ensemble du bassin ligérien, la fréquence des crues et des étiages sont stables sur les 50 dernières années (Renard, 2006).

Evolution des moyennes annuelles de débit



Rapidité de l'évolution des indices à la baisse (en bleu) et à la hausse (en rouge)	en % par décennie
	0 à 1,5%
	1,5 à 3%
	3 à 5%

Figure 3 Tendances détectées sur la moyenne annuelle du débit (Extrait de ONEMA, 2012)

d. Mise en évidence d'une variabilité multi-décennale

Une variabilité des débits sur plusieurs décennies a très récemment été mise en évidence sur de plus longues chroniques d'observations (>90 ans sur la Loire) (Boé et Habets, 2013). Cette variabilité, vraisemblablement liée aux variations de températures de l'Atlantique Nord, a affecté les débits annuels de près de 20 à 30% dans le passé. Une grande prudence est donc de mise pour analyser les tendances sur les chroniques de moins de 50 ans et des recherches approfondies sur ce sujet se poursuivent afin de réduire les incertitudes sur les projections futures à court terme (2030-2050).

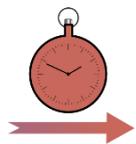
e. Amélioration des connaissances sur les interactions Eaux de surface/Eaux souterraines.

Les travaux de thèse de Monteil (2011) ainsi que ceux de Brugeron et al. (2013) ont préalablement été cités à propos de l'influence des apports souterrains sur le régime thermique de la Loire. Ces travaux ont en effet consisté à construire et valider un modèle hydrogéologique en Loire moyenne. Ce modèle a permis de montrer une différence de fonctionnement notable entre la partie de la nappe de Beauce située en rive droite de la Loire où 83 % de la pluie efficace est infiltrée et la nappe sous Sologne où seulement 29% est infiltré. Les prélèvements jouent un rôle majeur sur le

fonctionnement du système et ont été pris en compte dans la modélisation. Leur impact sur le niveau des nappes captives, en particulier, est significatif.

Deux autres projets ont contribué à améliorer les connaissances hydrogéologiques sur d'autres parties du bassin. Le premier est la thèse de Ré Bahuaud (2012), consistant à caractériser les eaux souterraines du Forez. Les aquifères de cette zone ont ainsi été classés en trois catégories selon leur vulnérabilité aux risques de sécheresse et de pollution. Le deuxième projet sur l'hydrogéologie de la nappe alluviale de l'Allier a permis de déterminer la provenance de l'eau au niveau d'un champ captant proche de Clermont-Ferrand, grâce à des analyses chimiques et bactériologiques (Celle-Jeanton, 2014). Ainsi, il a été montré que le pompage modifie la circulation « naturelle » de l'eau souterraine des coteaux vers la rivière, en provoquant une plus grande pénétration de l'Allier vers le champ captant. Une analyse de la qualité de l'eau a permis de montrer que plus les puits sont éloignés de l'Allier, plus la qualité est dégradée, avec de forts taux de nitrates, sulfates, chlorures ainsi que des concentrations élevées en pesticides et la présence de molécules pharmaceutiques. Ces deux dernières études réalisées à partir d'observations mettent en évidence les éventuelles vulnérabilités des nappes d'eau souterraine du Forez et de l'Allier face au changement climatique.

3/ Evolution future de la ressource en eau de la Loire



a. De nouveaux outils sur le bassin de la Loire

En 2007, lors du lancement de l'initiative ligérienne, aucune étude prospective d'impacts hydrologiques du changement climatique n'est notée sur le bassin de la Loire, à la connaissance des auteurs, malgré l'existence des scénarios climatiques globaux du GIEC. Ce manque était dû à l'absence de scénarios régionalisés.

Depuis, de grands progrès ont été réalisés et de nouveaux scénarios sont maintenant disponibles non seulement pour les études hydrologiques mais également pour les études d'impacts sur l'agriculture par exemple. Les premiers scénarios régionalisés sur le bassin de la Loire ont été élaborés grâce à une méthode de descente d'échelle statistique (Boé, 2007) et dans le cadre du projet ICC-HydroQual soutenu par le plan Loire grandeur nature III (Moatar et al., 2010a). D'autres méthodes de descente d'échelle ont ensuite été utilisées notamment dans le cadre de la thèse de Monteil (2011). Très récemment, de nouveaux scénarios régionalisés ont été construits grâce à une méthode dynamique sur l'amont du bassin par exemple dans le projet HYCARRE (Brulebois, 2014).

Cette diversité des méthodes de descente d'échelle est très importante car il a été montré que ces méthodes sont porteuses d'incertitudes en particulier à un horizon temporel proche (e.g. Brugeron et al., 2013 ; Dumas et al., 2013 ; Hingray et Saïd, 2014). L'existence de plusieurs méthodes permet ainsi de mieux caractériser les

incertitudes associées aux projections afin d'envisager ensuite l'élaboration de stratégies d'adaptation.

b. Quelles projections climatiques sur le bassin de la Loire ?

L'ensemble des études scientifiques internationales s'accordent sur une augmentation de la température de l'air moyenne au niveau mondial, en partie due à l'émission de gaz à effet de serre d'origine anthropique (GIEC, 2014). Selon le scénario médian A1B du GIEC, le réchauffement sur le bassin de la Loire est de l'ordre de 2°C ($\pm 0.4^\circ\text{C}$) en moyenne annuelle à l'horizon 2050 et de l'ordre de 2.8°C ($\pm 0.7^\circ\text{C}$) pour la fin du siècle. Les étés de la fin de ce siècle seraient particulièrement touchés avec une augmentation de près de 4°C pour les moyennes de température de l'air du mois d'août (figure 4).

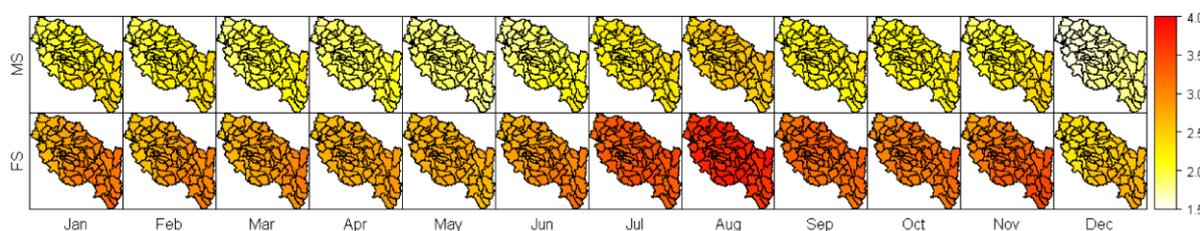


Figure 4 Anomalie moyenne multi-modèles de climat sous scénario A1B des températures moyennes mensuelles (en °C) sur le bassin de la Loire subdivisé en 68 sous-bassins versants, entre la période 1971-2000 et le milieu du siècle (MS ; 2046-2065) et la fin du siècle (FS ; 2081-2100). Extrait de Moatar et al. (2010b).

La dispersion entre modèles climatiques sur les précipitations est beaucoup plus importante que pour les températures mais on peut noter en moyenne multi-modèles une légère augmentation des précipitations au printemps, et une diminution le reste de l'année. Aucune conclusion ne peut être tirée sur l'évolution des précipitations extrêmes compte tenu de la grande dispersion entre les modèles. L'augmentation de la température est à l'origine d'une absence quasi-totale de neige en octobre sur le bassin contrairement à ce que l'on peut observer de nos jours (Moatar et al., 2010b). L'augmentation des températures et la disponibilité en eau de la région entraînent une augmentation significative des pertes par évapotranspiration (entre +18 et +35% selon les projections) (Monteil, 2011).

c. Vers une augmentation des températures de la Loire

Plusieurs travaux menés à différentes échelles convergent pour indiquer une hausse des températures de la Loire (Moatar et al., 2010b ; MEDDE, 2012b ; Brugeron et al., 2013 ; Beaufort et al., 2015). Cette hausse de températures est due à une augmentation de la température de l'air mais également à un abaissement des niveaux piézométriques, dont la nappe de Beauce par exemple (MEDDE, 2012c ; Brugeron et al., 2013). En moyenne, la recharge pourrait en effet diminuer de -20 à -40% dans le bassin de la Loire (MEDDE, 2012c).

La figure 5 montre que l'occurrence simulée de températures supérieures au seuil de 24°C (seuil défini car c'est la température létale du saumon atlantique) s'accroît fortement au cours du siècle sur l'ensemble du réseau. Alors que le seuil de 24°C se

situé aujourd'hui vers Villerest, il serait d'ici la fin du siècle plus en amont vers Bas-en-Basset. Quant à la figure 6, elle montre un avancement de la date de dépassement du seuil thermique de 16°C (température de reproduction de la grande alose) de 20 à 30 jours (Beaufort, 2015).

L'étude réalisée à l'échelle mondiale de van Vliet et al., (2011) confirme ces résultats avec une augmentation des températures moyennes de l'eau de la Loire de 1.6°C à l'horizon 2071-2100 par rapport à la période 1971-2000. Notons que cette augmentation est plus faible que dans le cas des autres fleuves européens dont l'augmentation est de 2.0°C en moyenne.

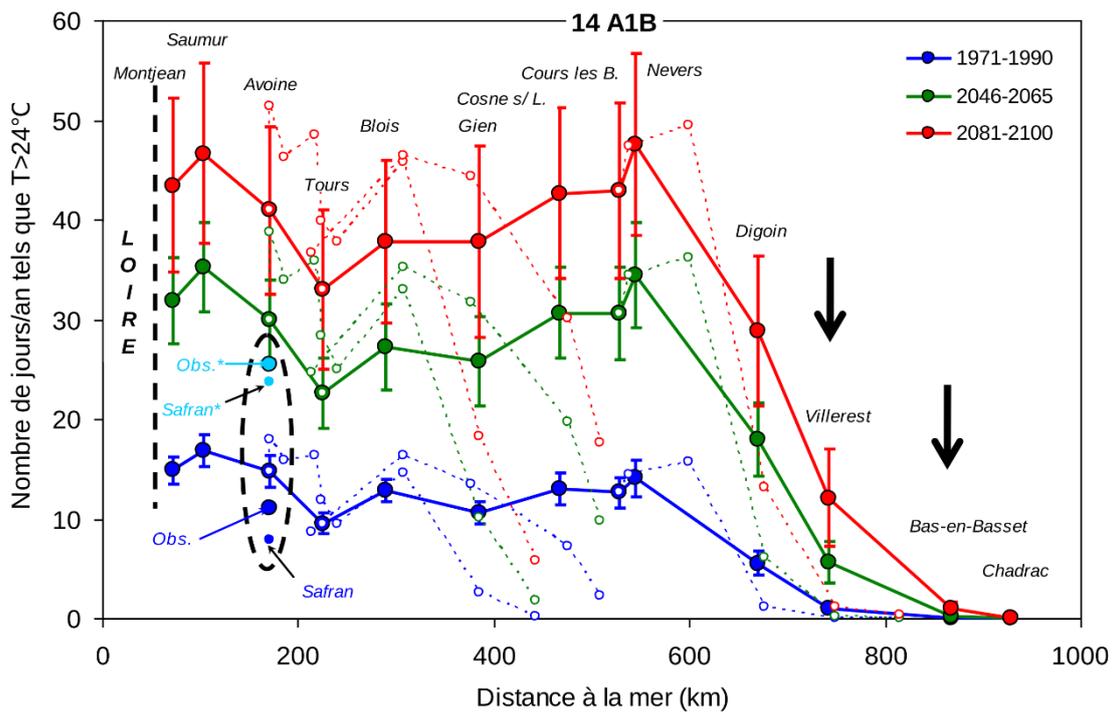


Figure 5 Evolution simulée du nombre de jours par an au-delà desquels la température de l'eau est au-dessus de 24°C en fonction de la distance à la mer et pour différentes périodes : temps présent (en bleu), milieu de siècle (en vert) et fin de siècle (en rouge). Extrait de Moatar (2014).

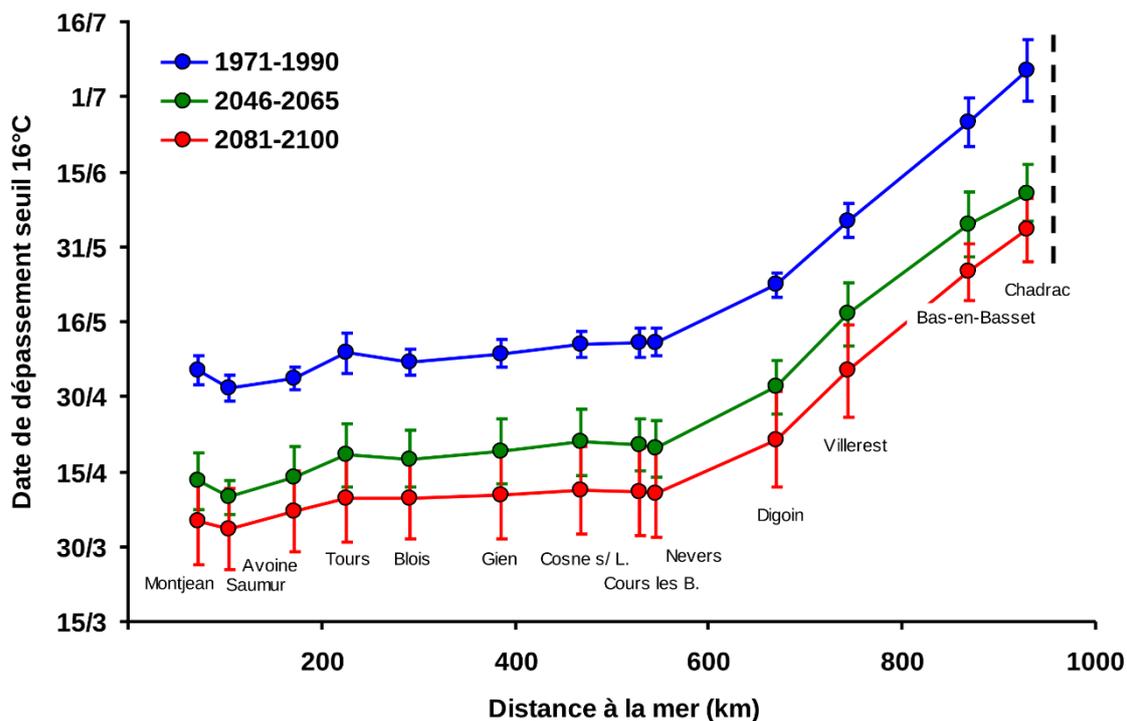


Figure 6 Evolution de la date de dépassement du seuil de 16°C en fonction de la distance à la mer (en km) pour la période de référence 1971-1990 (en bleu), le milieu du siècle (en vert) et la fin du siècle (en rouge). Extrait de Moatar (2014).

d. Vers une diminution de la ressource en eau

L'augmentation des températures de l'air et de l'évapotranspiration entraîne une diminution significative des débits moyens (de -20 à -50 %) et des débits d'étiage sur la Loire (Moatar et al., 2010b ; MEDDE, 2012a ; Chauveau et al., 2013).

Ces résultats sont confirmés par l'article de van Vliet et al., (2014) qui étudie l'évolutions des débits de grands fleuves à l'échelle mondiale dont la Loire et le Rhône pour la France. La Loire présente la plus forte baisse des débits d'étiages au monde avec une diminution statistiquement significative de -53% à l'horizon 2071-2100 par rapport à la période 1971-2000 (cf. annexe 3).

Enfin une dernière étude vient appuyer ces résultats, l'étude de Weiss et Alcamo (2011) qui fait l'objet d'une note en annexe 2. Selon cette étude qui examine les évolutions de débits sur 18 bassins européens, la sensibilité du régime hydrologique de la Loire aux changements de précipitations et de températures figure parmi les bassins médians. Au regard de cette étude, le Rhin, l'Elbe et le Pô sont les fleuves ayant les comportements les plus similaires à celui de la Loire en termes de sensibilité et de vulnérabilité aux changements climatiques.

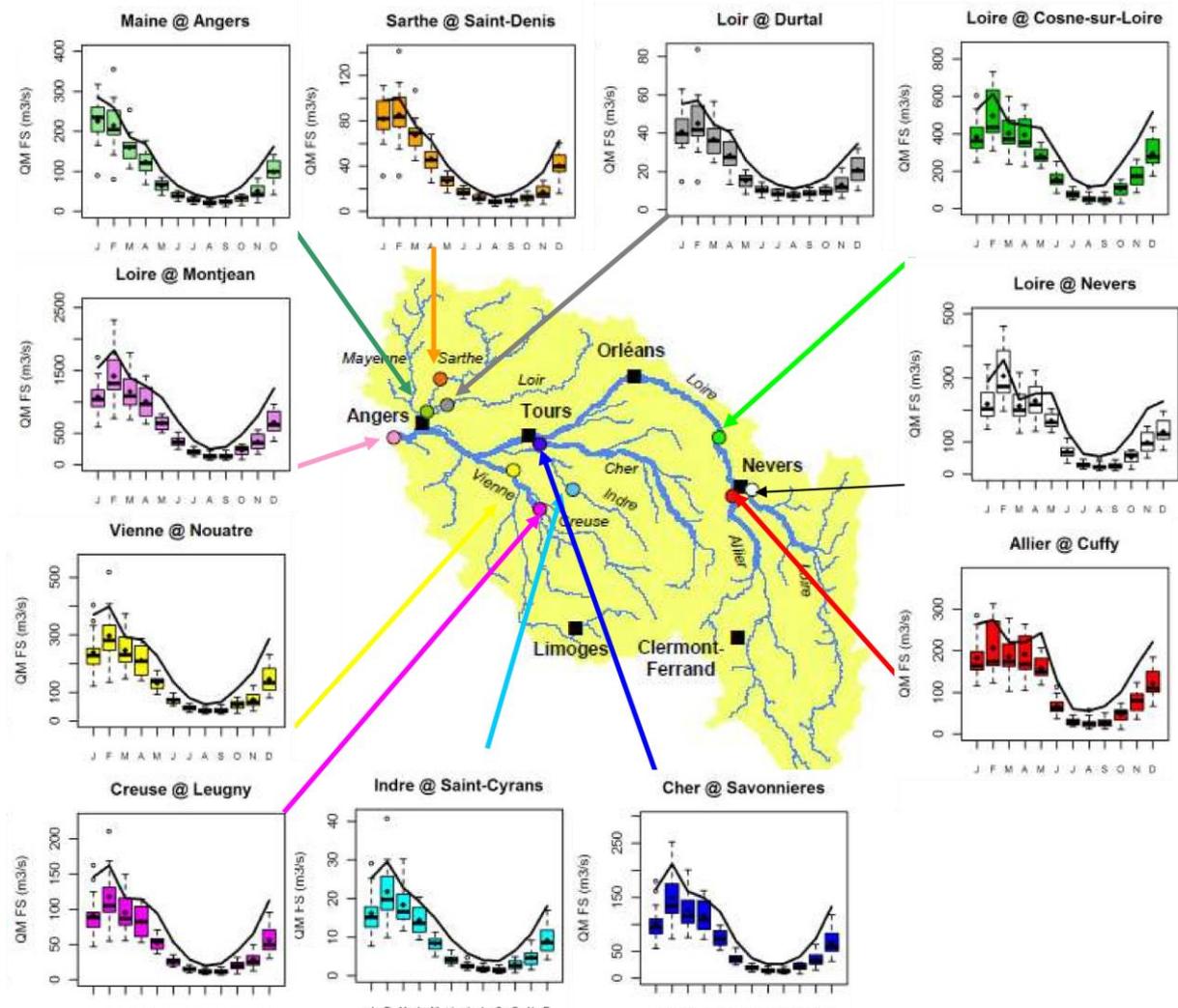


Figure 7 Evolution saisonnière en onze stations des débits mensuels en fin de siècle selon le modèle EROS (boîtes à moustache) comparée aux valeurs observées sur le temps présent (courbe noire). Les boîtes à moustaches résument la dispersion des débits mensuels simulés à partir de 14 projections A1B du GIEC : le rectangle est défini par le premier et troisième quartiles et coupé par la médiane ; la longueur des « moustaches » est définie par 1,5 fois l'écart interquartile ; la moyenne est représentée par un losange noir. Extrait de Moatar et al. (2010b).

e. Incertitudes sur les crues

Les incertitudes sur les épisodes pluvieux extrêmes demeurent très importantes dans les modèles climatiques. Les phénomènes convectifs tels que les phénomènes cévenols sont encore mal simulés par les modèles. Ainsi, aucune tendance significative sur la fréquence et l'intensité des crues de la Loire et de ses affluents n'est constatée pour les années à venir avec les actuelles projections hydrologiques (Moatar et al., 2010b ; Weiss et Alcamo, 2011 ; MEDDE, 2012a, van Vliet et al., 2014).

4/ Des écosystèmes et une biodiversité fortement impactée, quelques exemples.

a. Mise en place de réseaux d'observations

Parmi les recommandations faites lors de l'état des lieux des connaissances initial (SAFEGE-Biotope, 2008), la mise en place de réseaux d'observation de la biodiversité et des relations avec les variables climatiques et environnementales, ainsi que la mise à disposition de ces données apparaissaient prioritaires et préalables à toutes études d'impacts. D'importants efforts ont été entrepris dans cette voie. Tout d'abord avec la définition d'indicateurs pertinents définis dans le projet EV2B (Greulich et al., 2010) puis par la mise en place du réseau d'observation de la biodiversité de la Loire et ses affluents, OBLA (Greulich et al., 2014), puis du projet BD Biodiv (fiche de présentation du projet sur [le plateau collaboratif d'échange du plan Loire](#)).

b. Les poissons

De manière générale pour l'ensemble des populations piscicoles, les simulations annoncent un glissement des aires de répartition des espèces d'eau froide vers les zones amont (ONEMA, 2014). L'aire de répartition des espèces inféodées aux têtes de bassin se réduirait à des zones refuges en altitude, avec un risque accru d'extinction dans certains bassins ayant une gamme d'altitude réduite et moyenne plus basse, tel que celui de la Loire. A l'inverse, les espèces situées dans les zones intermédiaires ou aval devraient être favorisées (Figure 8). En d'autres termes, on s'attend à une augmentation de la richesse spécifique de certaines communautés mais elles se ressembleront d'avantage. Il y a donc un risque de perte de diversité (Daufresne et Boët, 2007).

Plusieurs espèces de poissons migrateurs (l'anguille, le flet, le saumon atlantique, l'alose, la lamproie...) sont présentes dans le bassin de la Loire et de ses affluents. La spécificité de ces poissons est qu'ils effectuent des déplacements, ou migrations, plus ou moins longs au cours de leur vie pour accomplir leur cycle biologique. Les espèces migratrices présentes sur le bassin de la Loire sont des espèces amphihalines: elles effectuent une partie de leur cycle de vie en mer, et une partie en rivière (LOGRAMI, cf. liens utiles). On différencie les espèces thalassotoques qui se reproduisent en mer et grandissent en rivière telles que l'Anguille Européenne, espèce emblématique de la Loire, et les espèces potamotoques qui se reproduisent en rivière mais grandissent en eaux salées telles que le Saumon Atlantique.

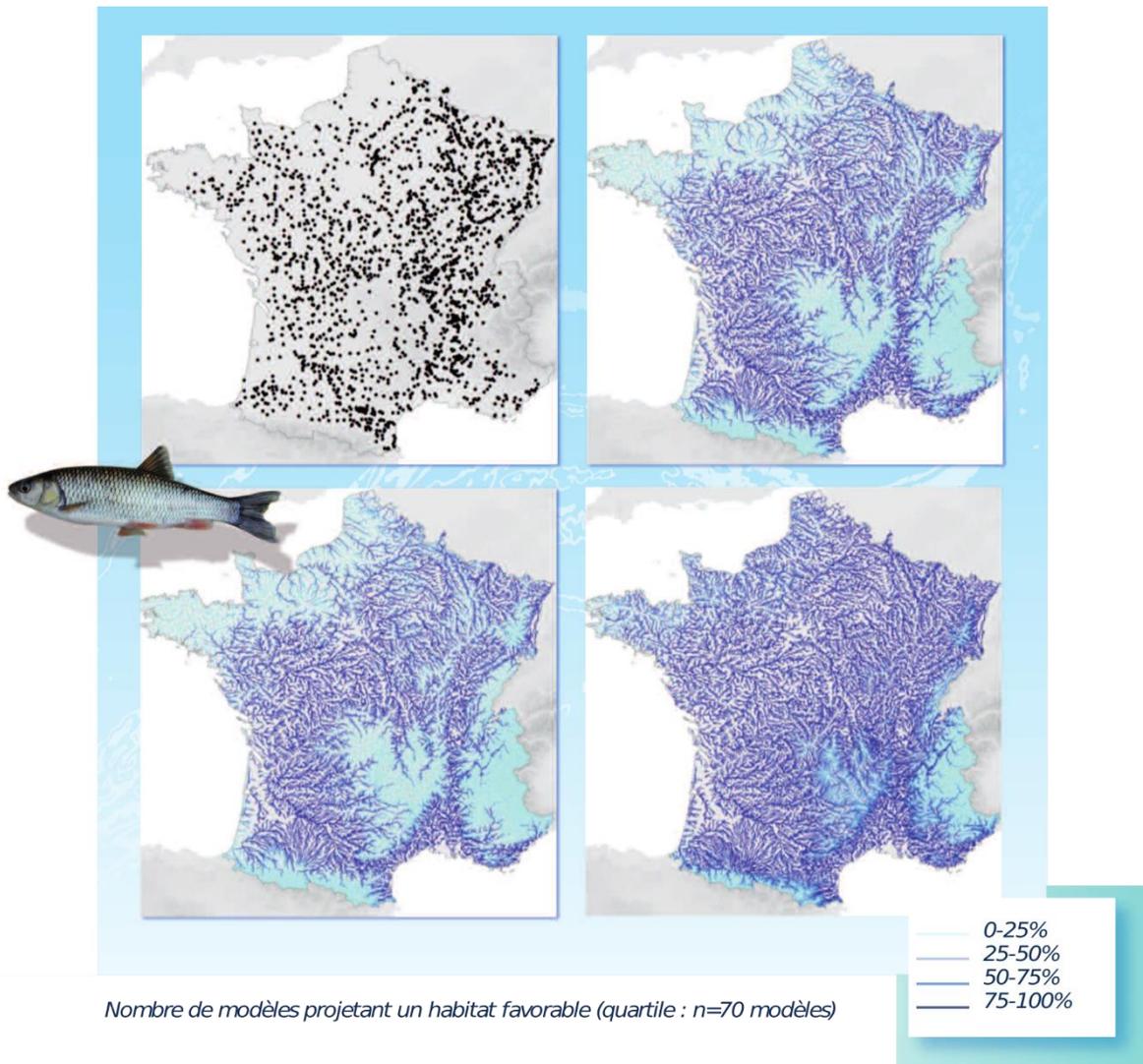


Figure 8 Exemple de projections d'habitats favorables pour une espèce (le chevesne) répondant positivement au changement climatique. (a) Présence observée du Chevesne (n= 2 219 sur 4381 stations d'échantillonnage - source Onema 2000-2008 - pêche électrique). (b) Habitats modélisés comme actuellement favorables, (c) habitats potentiellement favorables dans le futur selon le scénario de dispersion nulle, (d) habitats potentiellement favorables dans le futur selon le scénario de dispersion illimitée (scénario A1B pour la période 2060-2089). Plus le nombre de modèles projetant un habitat favorable est élevé, plus la probabilité que le tronçon soit favorable à l'espèce est grande. (Extrait de ONEMA (2014)). Le lecteur pourra se référer à l'annexe 3 pour une explication des scénarios de dispersion.

La fécondité, l'âge de reproduction, la croissance pondérale, la longévité de ces poissons migrateurs voire même leur survie sont directement influencés par les conditions hydromorphologiques des cours d'eau ainsi que par leur température, ces deux facteurs impactant fortement la qualité des milieux (King et al., 2007 ; ONEMA, 2014 ; Martin, 2014 ; Figure 9). Des mesures réalisées par le GIP Loire Estuaire (cf. liens utiles) ont montré qu'en dessous de 6°C et au-dessus de 20°C, les conditions ne sont plus optimales, et la migration est perturbée pour le Saumon Atlantique. Des températures trop basses peuvent bloquer la montaison de ces saumons. Les températures, cette fois-ci élevées, conditionnent l'enclenchement de la dévalaison et la capacité d'adaptation des smolts à l'estuaire. Le débit conditionne également la vitesse de dévalaison des smolts et leur capacité de survie aux prédateurs.

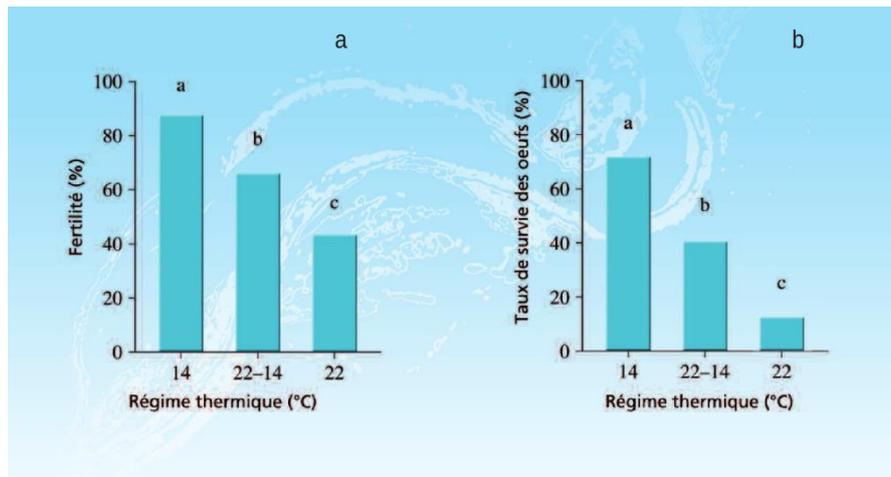


Figure 9 (a) Taux moyen de fertilité et (b) de survie des oeufs à différents régimes thermiques (maintenus à une température constante - 14-22°C - durant toute la durée d'expérimentation ou à une température variable - 22°C durant 6 semaines puis 14 °C durant 6 autres semaines). La présence de lettres différentes indique des différences significatives entre les traitements thermiques (Extrait de ONEMA, 2014, d'après King et al., 2007)

Au vu des projections de températures sur la Loire présentées par Moatar (2014) (Figures 5 et 6), le changement climatique devrait donc fortement impacter ces espèces de poissons. A l'échelle de l'Europe, la grande alose et le Saumon Atlantique pourraient donc voir une contraction de leur zone d'habitat avec une possible disparition dans le bassin de la Loire.

De plus, les poissons migrateurs seraient très vulnérables aux événements extrêmes. En effet, le Conseil économique et social des Pays de la Loire (2004) a constaté des modifications des rythmes de migrations de quatre espèces migratrices (le saumon Atlantique, l'aloise, l'anguille et la lamproie marine) ainsi qu'une augmentation de leur taux de mortalité lors de la canicule de 2003. Plusieurs projets sur le comportement des poissons migrateurs du bassin de la Loire face au changement climatique sont en cours, leurs résultats sont très attendus (e.g. SalTemp).

Enfin, il faut noter que les activités humaines viendront peut-être renforcer les effets du changement climatique sur la ressource en eau notamment à travers une augmentation des prélèvements destinés à l'AEP ou à l'agriculture (ONEMA, 2014).

c. Prolifération de cyanobactéries et développement de nouvelles espèces aquatiques.

Le changement climatique pourrait être très favorable à d'autres organismes notamment les cyanobactéries. Ces organismes, aussi appelés algues bleues, sont des bactéries qui utilisent la photosynthèse pour se développer. Elles jouent un rôle fondamental dans le fonctionnement des écosystèmes en assurant une part importante de la production d'oxygène et de la fixation du carbone atmosphérique (Sabart et Latour, 2012). Leur prolifération, favorisée par l'eutrophisation, l'augmentation des températures ou encore une stagnation des masses d'eau, peut cependant avoir des conséquences graves d'un point de vue à la fois sanitaires et écologiques (ONEMA, 2014).

Par ailleurs, l'apparition d'espèces exotiques envahissantes telles que les corbicules, espèce de palourdes d'eau douce originaire des régions subtropicales, a été constatée sur le bassin de la Loire. Il semblerait que leur apparition soit liée au changement climatique en cours, car une augmentation des températures et un déclin des débits sont particulièrement favorables à leur développement (Floury, 2013).

d. Des changements sur la dynamique estuarienne

Le changement climatique sur l'estuaire de la Loire se manifeste principalement par une augmentation de la température de la mer, une élévation de son niveau et une variation des apports de sédiments en amont. Le niveau moyen de l'Atlantique a déjà évolué en moyenne de + 2.6mm/an sur la période 1914-1996 (Agence de l'Eau Adour-Garonne, 2014). L'estuaire évolue naturellement en fonction des marées et des tempêtes. La morphodynamique de l'estuaire se produit à la même échelle de temps que le changement climatique, ce qui complique la modélisation (Le Hir et al., 2014). Les résultats sous changement climatique se basent sur les simulations obtenues dans le projet ICC-HYDROQUAL (Moatar et al., 2010a) et montrent que le bouchon vaseux de l'estuaire ligérien est très dépendant du débit de la Loire, avec une remontée plus importante pour une diminution des débits. Les recherches à ce sujet débutent et les résultats du projet C3E² sont fortement attendus (Le Hir et al., 2014, cf. liens utiles).

e. Les tourbières du massif central

Les tourbières sont des zones humides dont la surface est composée de mousses et de plantes basses. Elles sont nombreuses à l'amont du bassin, dans la partie du massif central. Ces écosystèmes protégés bénéficient d'une biodiversité importante mais sont également très vulnérables aux changements de température et d'humidité. En effet, Duranel (2014) a montré à partir d'expérimentation sur le plateau de Millevaches en amont du bassin de la Loire qu'il existait une forte connectivité des tourbières étudiées avec le réseau hydrographique. Cette forte connectivité laisse supposer une forte vulnérabilité de ces tourbières vis-à-vis du changement climatique, du fait d'une diminution des débits.

D'autre part, Guillon (2012) s'est intéressé aux ectothermes de ces territoires et en particulier à deux espèces de vipères, les Aspics et les Péliade, la première étant commune alors que l'autre est une espèce rare. Il montre que ces vipères possèdent des capacités d'adaptation au froid mais qu'elles sont particulièrement vulnérables aux températures élevées. Il y a donc un fort risque de déplacement de la limite sud de l'aire de distribution des deux espèces de vipères considérées.

f. Le peuplier noir

Des espèces végétales dont le peuplier noir, espèce dominante de la ripisylve ligérienne devraient être capables de s'adapter à une augmentation des températures, selon des tests effectués en laboratoire, et ceci grâce à une plasticité génétique importante (Chamaillard, 2011).

g. Quelles hypothèses pour quels impacts ?

La plupart des études d'impacts du changement climatique sur la biodiversité que nous venons de citer, repose sur l'observation rétrospective des comportements des espèces et extrapole les résultats au temps futur en fonction d'hypothèses climatiques. Cependant, une récente étude sur l'évolution de peuplements de macro-invertébrés benthique suggère que les effets actuels du changement climatique sur la biodiversité ligérienne pourraient être masqués par l'amélioration de la qualité de l'eau des dernières années (Floury, 2013). La possible exacerbation des futurs impacts n'est donc pas à négliger.

D'autre part, des exercices de modélisation de la distribution d'un grand nombre d'espèces animales et végétales se basent les projections climatiques et hydrologiques mais également sur des hypothèses de répartition et de migration de ces espèces. C'est notamment le cas de l'étude de Markovic et al. (2014) (cf. annexe 3). Dans cette étude, deux hypothèses sont prises en compte, la « migration libre » qui suppose que les espèces peuvent migrer librement d'un territoire à l'autre et « l'absence de migration » où les populations animales sont restreintes à leur habitat d'origine et ne peuvent plus migrer d'un territoire à l'autre à cause d'obstacles anthropiques. La figure A3.13 (en annexe 3) montre que sous ces deux hypothèses, la répartition des espèces est affectée par le changement climatique. Néanmoins, les conséquences sont beaucoup plus dramatiques sous l'hypothèse d' « absence de migration ». Le respect de la continuité écologique semble donc indispensable pour limiter les impacts du changement climatique sur la biodiversité.

5/ Quels impacts sur les usages ?

Si les usages impactés par le changement climatique peuvent être identifiés, les impacts précis, quant à eux, sont en revanche beaucoup plus difficiles à évaluer et n'ont pas fait l'objet de beaucoup de travaux.

Le projet CLIMATOR a analysé les effets du changement climatique sur les systèmes cultivés et forestiers français, trois sites expérimentaux situés dans le bassin de la Loire ont été considérés : Saint Etienne, Clermont-Ferrand et Lusignan dans le département de la Vienne. Les résultats de ce projet montrent que les besoins en irrigation des cultures actuellement irriguées vont augmenter en particulier pour les zones productrices de maïs comme à Lusignan. L'augmentation de l'irrigation du blé ne concernera que les situations particulièrement défavorables telles qu'à Saint-Etienne où les sols sont superficiels et un besoin en eau avant floraison se ferait vraisemblablement sentir. De nouveaux besoins pourraient apparaître ponctuellement pour la prairie. Des opportunités accrues pour les cultures de sorgho et de tournesol. Enfin, la présence potentielle de hêtre ferait place à une augmentation de la présence potentielle du chêne vert aux trois stations ligériennes considérées (Brisson et Levraut, 2010)

Un certain nombre de projets traitant de la réponse de la viticulture au changement climatique (TERVICLIM, TERADCLIM, ADVICLIM), constate que le changement climatique semble a priori favorable pour la viticulture du Val de Loire, en particulier pour les cépages tardifs.

D'autres usages sur le bassin ligérien : l'alimentation en eau potable, l'énergie via les cinq centrales nucléaires présentes sur le bassin et le tourisme, devraient également être impactés mais l'amplitude de ces impacts reste à explorer.

6/ Conclusion

Le plan Loire grandeur nature III a permis que la problématique du changement climatique et de ses impacts dans le bassin ligérien soit mise en avant, et que différents projets cherchant à y répondre soient soutenus. Une comparaison avec l'état des lieux réalisé en 2008 a montré que de nombreux résultats ont été obtenus dans plusieurs domaines pour lesquels des manques avaient été identifiés (cf. tableau en annexe 6). De plus, l'Etablissement public Loire a déployé d'importants moyens afin de faire connaître l'ensemble des projets réalisés dans le cadre du plan Loire III, grâce à l'animation de manifestations (les rendez-vous annuels chercheurs et gestionnaires, le forum « Loire & Affluents : au cœur de l'Europe »), ainsi que de la plateforme RDI du plan Loire : www.plan-loire.fr/RDI.

Les principaux résultats à retenir dans le cas du bassin de la Loire et de ses affluents sont l'augmentation des températures de l'air et de l'eau que l'on constate déjà depuis plus d'un demi-siècle. Les projections indiquent que cette élévation des températures à l'échelle du bassin de la Loire et plus généralement à l'échelle mondiale continue, induisant notamment une élévation du niveau de la mer et une diminution des débits. Ces évolutions climatiques impactent l'ensemble des usages écologiques, agricoles, énergétiques, touristiques et il reste encore de nombreuses conséquences à évaluer.

Il est indispensable que le lecteur soit conscient que ces résultats ne sont pas exempts d'incertitudes. Ces incertitudes ne pourront jamais être totalement éliminées, en raison, entre autres, de la nature chaotique du climat ou encore du fait de l'imprévisibilité humaine. Il semble donc très important de pouvoir les caractériser, les hiérarchiser et les communiquer aux différents acteurs du bassin ligérien afin d'élaborer des stratégies d'adaptations suffisamment flexibles pour les différents futurs possibles.

Futures pistes de recherche

De grandes avancées en termes de recherche ont été réalisées depuis sept ans, qu'en est-il maintenant ?

A l'échelle nationale et européenne, les recherches sur ce sujet sont identifiées comme prioritaires tant dans le cadre de la stratégie nationale de recherche rédigée par l'académie des sciences au printemps 2014 que dans le cadre du Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC).

Cependant, le bassin de la Loire et de ses affluents reste un bassin sous-représenté en termes de bibliographie par rapport à ceux de la Seine et du Rhône, malgré son

importante superficie et sa position centrale au sein du territoire français². Ceci s'explique peut-être en partie par le fait que la population y est moins nombreuse ou que les changements projetés sont moins drastiques que dans le bassin du Rhône par exemple. De nombreux impacts du changement climatique sur les activités humaines et les milieux du bassin de la Loire et ses affluents, croisant des enjeux au niveau national, comme la politique énergétique française (présence de cinq centrales dans le bassin ligérien) ou européen, comme sur la biodiversité (préservation patrimoine naturel européen) imposent toutefois de chercher à améliorer les recherches en cours, à construire des stratégies d'adaptation car les besoins seront tout autant présents que dans les bassins de la Seine et du Rhône.

Les recherches concernant l'évaluation des impacts du changement climatique sur certains domaines sont à leurs balbutiements notamment concernant la dynamique estuarienne, ou encore sur les comportements liés aux usages, ayant pourtant déjà été identifiées comme des pistes de recherche à suivre en 2008 (SAFEGE-Biotope, 2008). Le tourisme est un secteur d'activité réputé être suffisamment résilient pour pouvoir s'adapter rapidement aux changements, est-ce vraiment le cas ?

Suite aux recherches effectuées ces sept dernières années et aux résultats obtenus, la compréhension de la variabilité multi-décennale des précipitations et des débits ainsi qu'une meilleure description des épisodes cévenols doivent aussi figurer parmi les pistes de recherche prioritaires afin d'obtenir des scénarios à court terme (2030-2050) plus fiables.

Vers quelles adaptations ?

Peu de travaux de recherche sur l'adaptation ont été réalisés à notre connaissance, nous pouvons toutefois citer l'étude effectuée dans le cadre du projet Explore 2070 et qui fait l'objet de la note en annexe 5. En ce qui concerne la préservation des espèces piscicoles, la bonne santé des milieux est une condition requise pour pouvoir être plus résilient aux évolutions liées au changement climatique et donc de réduire la vulnérabilité de ces espèces (ONEMA, 2014).

Par ailleurs, des travaux sont en cours à l'Etablissement public Loire afin de répertorier les éventuelles mesures d'adaptation déjà mises en œuvre sur le bassin de la Loire et de ses affluents.

² Une analyse bibliométrique basique montre que le nombre d'occurrence pour la combinaison « Loire + climate + change » est 3 fois moins important que pour la combinaison « Seine + climate + change » et 1.5 fois moins important que pour la combinaison « Rhône + climate + change ». Cela est également valable pour d'autres combinaisons conservant le changement climatique mais en différenciant les fleuves, par exemple « fleuve+climate+change+water+resources ».

/Glossaire

Anomalie météorologique : Ecart entre grandeur instantanée ou locale et la moyenne des valeurs sur une période ou sur un territoire donné. Cette moyenne est aussi dites « normale ».

Anthropisation : En géographie et en écologie, l'anthropisation est la transformation d'espaces, de paysages, d'écosystèmes ou de milieux semi-naturels sous l'action de l'homme.

Aquifère : Formation géologique composée de roche perméables (formation poreuses et/ou fissurées) contenant de l'eau en quantité significative. Il comporte une zone saturée – ensemble du milieu solide et de l'eau contenue – suffisamment conductrice d'eau souterraine pour permettre l'écoulement d'une nappe souterraine et la captage d'eau (drainage, pompage)

Bassin versant : Territoire qui draine l'ensemble de ses eaux vers un exutoire commun, cours d'eau ou mer.

Bouchon vaseux : Zone d'un estuaire où les sédiments fins en suspension sont fortement concentrés. Il résulte de la rencontre des eaux douces et salées et migre au gré des marées le long de l'estuaire.

Débit d'objectif d'étiage : Débit minimal qui permet la satisfaction de tous les usages et le bon fonctionnement du milieu aquatique.

Ectotherme : Animaux à température variable. Ils ne

produisent pas de chaleur et leur activité dépend entièrement de la température extérieure.

Etiage : Période de l'année où le niveau d'un cours d'eau atteint son niveau le plus bas.

Eutrophisation : Détérioration d'un écosystème aquatique, liée en générale à un apport excessif de substances nutritives (phosphates, nitrates), engendrant la prolifération de certains végétaux, notamment des algues planctoniques.

Evapotranspiration : Flux d'eau de la surface du sol vers l'atmosphère, évaporé par le sol et transpiré par la végétation.

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat ouvert à tous les pays membres de l'ONU. Il a pour mission d'évaluer de façon méthodique, les informations d'ordre scientifique, technique et socio-économique nécessaires pour mieux comprendre les risques liés au changement climatique et pour envisager des stratégies d'adaptation et d'atténuation.

Méthode de descente d'échelle : Méthodes permettant d'affiner la résolution des modèles climatiques et de descendre à des échelles plus fines de l'ordre de la dizaine de kilomètre voire du kilomètre.

Migrateur amphihaline : Qualifie une espèce dont une partie du cycle biologique se fait en mer et une autre partie en rivière.

Piézométrie : Niveau de la nappe d'eau mesuré grâce à un tube creusé dans le sol.

Pluie efficace : Précipitations qui alimentent les cours d'eau par ruissellement et permettent l'alimentation des nappes d'eau souterraines par infiltration (précipitations-évapotranspiration).

Recharge : phénomène qui s'opère lorsque le sol reçoit plus d'eau de pluie qu'il ne peut en retenir, l'eau s'écoule gravitairement vers les nappes dont le niveau augmente alors.

Résilience : capacité d'un organisme à s'adapter à un environnement changeant. Terme issu de la biologie et de l'écologie où il définit la capacité d'un écosystème, d'une espèce à récupérer un fonctionnement à l'équilibre après avoir subi une perturbation. Par extension, le terme s'emploie aussi pour les activités humaines.

SDAGE : Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux. Ce document fixe les objectifs d'amélioration de la qualité des eaux superficielles et souterraines, sur un bassin hydrographique, pour une durée de 6 ans. Il est élaboré par le Comité de Bassin et approuvé par le Préfet coordinateur de bassin. Le SDAGE est né avec la loi sur l'eau de 1992, qui stipule qu'il « fixe pour chaque bassin ou groupement de bassins les orientations fondamentales d'une gestion équilibrée de la ressource en eau ».

Smolt : Jeune saumon.

/Références

Agence de l'Eau Adour-Garonne (2014). **Eau et changements climatiques en Adour-Garonne. Les enjeux pour la ressource, les usages et les milieux.** Rapport de vulgarisation, 20 pages

Beaufort A, Moatar F, Curie F, Ducharne A, Bustillo V, Thiéry D. **River temperature modelling by Strahler order at the regional scale in the Loire river basin, France.** River Research and Applications, accepted with minor revisions.

Beaufort A., **Régime thermique et faune piscicole au XXIème siècle** (titre provisoire). Thèse effectuée à l'Université de Tours, soutenance prévue le 17 février 2015.

Boé, J. (2007). **Changement global et cycle hydrologique : une étude de régionalisation sur la France.** PhD Thesis, Université Paul Sabatier-Toulouse III.

Boé, J. et Habets, F. (2013). **Multi-decadal river flows variations in France.** Hydrol. Earth System. Sci., 10, 1-40.

Bonnefoy, C., Quenol, H., Planchon, O. et Barbeau, G. (2010). **Températures et indices bioclimatiques dans le vignoble du Val de Loire dans un contexte de changement climatique.** EchoGéo, 14.

Brisson, N., & Levraut, F. (2010). **Livre vert du projet CLIMATOR. Changement climatique, agriculture et forêt en France: simulations d'impacts sur les principales espèces.**

Brugeron, A., Doukouré, C., Flipo, N., Krimissa, M., Monteil, C., Peron, S., Poulin, M., Schomburgk, S., Ferry, C., Poulhe, P. et Winckel, A. (2013). **Contribution des principaux aquifères du bassin au fonctionnement hydrologique et thermique de la Loire à l'étiage – Modélisation de la Loire et des aquifères pour la prévision des débits d'étiage de la Loire Moyenne – Synthèse.** Rapport technique, 69 pages.

Brulebois, E. (2014). **Impacts du changement climatique sur la ressource en eau en Bourgogne : aspects quantitatif et qualitatif.** Communication au forum Loire et ses affluents au cœur de l'Europe des Fleuves, Orléans.

Celle-Jeanton, H. (2014). **Hydrogéologie de la nappe alluviale de l'Allier.** Livret de vulgarisation de l'EPTB-Loire.

Chamaillard, S. (2011). **Efficienc e d'utilisation de l'eau chez le peuplier noir (Populus nigra L.) : variabilité et plasticité en réponse aux variations de l'environnement.** Thèse de doctorat de l'Université d'Orléans, 194 pages.

Chauveau, M., Chazot, S., Perrin, C., Bourgin, P-Y., Sauquet, E., Vidal, J-P., Rouchy, N., Martin, E., David, J., Norotte, T. (2013). **Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070 ?** La Houille Blanche, (4) :5-15.

Conseil Economique et Social des Pays de la Loire, (2004). **Les enseignements de la canicule de l'été 2003 dans les pays de la Loire**. Rapport technique, 62 pages.

Daufresne, M. et Boët, P. (2007). **Climate change impacts on structure and diversity of fish communities in rivers**. *Global Change Biology* 13:2467:2478.

Dumas, P., Hallegatte, S., Quintana-Segui, P., et Martin, E. (2013). **The influence of climate change on flood risks in France – First estimates and uncertainty analysis**. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(3) :809-821.

Duranel, A. (2014). **Eco-hydrologie des tourbières acides du massif central**. Livret de vulgarisation de l'EPTB LOIRE.

Floury, M. (2013). **Analyse des tendances d'évolution de peuplements de macroinvertébrés benthiques dans un contexte de réchauffement des eaux**. Thèse de doctorat de l'université Blaise Pascal de Clermont Ferrand II, 276 pages.

GIP Loire Estuaire (2014). **Fiche de synthèse L2C3 : Passage de poissons migrateurs : les saumons. Analyse des données du réseau SYVEL**. Fiche de vulgarisation (cf. liens utiles).

Gosse, P., Gailhard, J. et Hendrickx, F. (2009). **Analyse de la température de la Loire moyenne en été sur la période 1949 à 2003**. *Hydroécol. Appl.*, 16:233-274.

Greulich, S., Secondi, J., Richard, N., Villar, M., La Jeunesse, I., Yengué, J-L., Carreau, C., Chantereau, M., Lafage, D. et Hudin, S. (2010). **Vulnérabilité de la biodiversité par rapport au changement climatique dans le bassin versant de la Loire – Synthèse des données existantes et mise en place d'un protocole standardisé de suivi en vue d'une modélisation**. Rapport technique, 90 pages.

Greulich, S., Gandouin, E., Leitao, M., Abonyi, A., Vallet, J., Bouillet, V., Chabrol, L., Cordier, J., Filoche, S., Lacroix, P., Magnanon, S., Wantzen, K. M., Richard, N., Lafage, D., Boisneau, C., Secondi, J., Faivre, B., Roché, J., Marchadour, B. et Airaud, S. (2014). **Mise en place d'un réseau d'Observation de la Biodiversité de la Loire et de ses Affluents (OBLA)**. Rapport technique, Université de Tours, 144 pages.

Guillon, M. (2012). **De la physiologie à la répartition : adaptations climatiques et sensibilité thermique chez une relique glaciaire**. Thèse de doctorat de l'Université de Poitiers, 244 pages.

Hingray, B. et Saïd, M. (2014). **Partitioning internal variability and model uncertainty components in a multimember multimodel ensemble of climate projections**. *Journal of Climate*.

Huguet, F., Parey, S., Dacunha-Castelle, D. et Malek, F. (2008). **Is there a trend in extremely high river temperature for the next decades ? A case study for France**. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8(1):67-79.

Jouzel, J., Ouzeau, G., Déqué, M., Jouini, M., Planton, S., Vautard, R. (2014). **Le climat de la France au XXIe siècle – Volume 4 – Scénarios régionalisés : édition**

2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer. Rapports pour la direction générale de l'Energie et du Climat. 62 pp.

King, H.R., Pankhurst, N.W., Watts, M. (2007). **Reproductive sensitivity to elevated water temperatures in female Atlantic Salmon is heightened at certain stages of vitellogenesis.** Journal Of Fish Biology 70 :190:205.

Le Hir, P., Walther, R., Cayocca, F., Bioret, F., Sawtschuk, J., Vareilles, J., Bayard, E. (2014). **Projet C3E2 – Conséquences du Changement Climatique sur l'Ecomorphologie des Estuaires.** Communication au forum Loire et ses affluents au cœur de l'Europe des Fleuves, Orléans.

MEDDE, (2012a). **Hydrologie de surface – A1 – Rapport de synthèse.** Projet Explore 2070, rapport technique. 148 pages.

MEDDE, (2012b). **Hydrologie de surface – B4 – Etude de la thermie des cours d'eau.** Projet Explore 2070, rapport technique. 67 pages.

MEDDE, (2012c). **Hydrologie souterraine – résumé.** Projet Explore 2070, rapport technique. 54 pages.

Moatar, F. et Gailhard, J. (2006). **Water temperature behaviour in the river Loire since 1976 and 1881.** Comptes Rendus Geosciences, 338(5):319-328.

Moatar, F., Ducharne, A., Thiéry, D., Bustillo, V., Sauquet, E. et Vidal, J-P. (2010). **La Loire à l'épreuve du changement climatique.** Géosciences, 12 :78-87.

Moatar, F., Ducharne, A., Thiéry, D., Sauquet, E., Vidal, J-P., Bernard, A., Bustillo, V. (2010a). **Impact du changement climatique sur l'hydrosystème Loire : HYDROlogie, Régime thermique, QUALité des eaux. Action 1 : Evolution hydroclimatique de la Loire et de ses affluents sous changement climatique.** Rapport technique, 107 pages.

Moatar, F., Ducharne, A., Thiéry, D., Bustillo, V., Sauquet, E. et Vidal, J-P. (2010b). **La Loire à l'épreuve du changement climatique.** Géosciences, 12 :78–87.

Moatar, F. (2014). **Projet ICC-HYDROQUAL (2008-2011) – Impact du changement climatique sur le bassin de la Loire : HYDROlogie, régime thermique, QUALité.** Communication au forum Loire et ses affluents au cœur de l'Europe des Fleuves, Orléans.

Monteil, C. (2011). **Estimation de la contribution des principaux aquifères du bassin versant de la Loire au fonctionnement hydrologique du fleuve à l'étiage.** PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.

ONEMA, Giuntoli, I., Maugis, P. et Renard, B. (2012). **Evolutions observées dans les débits des rivières en France – Sélection d'un réseau de référence et analyse de l'évolution temporel des régimes des 40 dernières années.** Rapport technique, 5 pages.

ONEMA, Baptist F., Poulet, N., & Séon- Massin, N. (2014). **Les poissons d'eau douce à l'heure du changement climatique : état des lieux et pistes pour l'adaptation**. Rapport technique, 131 pages.

Ré-Bahuaud, J. (2012). **Apports d'une approche couplée physique et géochimie des eaux souterraines pour caractériser les fonctionnements hydrodynamiques transitoires. Cas Ide la plaine alluviale du Forez**. Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 370 pages.

Renard, B. (2006). **Détection et prise en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques en France**. Phd thesis, INP Grenoble.

Sabart, M. et Latour, D. (2012) **PRédiction du pOtentiel toxique de proliFérations CYanobactériennes à l'échelle du bassin Loire (PROFECY)**. Rapport intermédiaire, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 25 pages.

SAFEGE-Biotope (2008). **Etat des lieux et recommandations relatifs à la connaissance des impacts du changement climatique sur le bassin de la Loire ainsi qu'aux stratégies ou mesures d'adaptation correspondantes déjà mises en œuvre**. Rapport technique de l'initiative ligérienne d'adaptation aux impacts du changement climatique, plan Loire grandeur nature III, 84 pages.

Servain-Courant, S. (2010). **Connaissance et analyse de la vulnérabilité sociale des zones bâties inondables de la vallée de la Loire, de Nevers à Nantes, pour une meilleure anticipation des effets du changement climatique sur les régimes hydrologiques de la Loire**. Rapport technique, 192 pages.

van Vliet, M.T.H., Franssen, W. H. P., Yearsley, J. R., Ludwig, F., Haddeland, I., Lettenmaier, D. P., Kabat, P. (2013). **Global river discharge and water temperature under climate change**. Global Environmental Change, 23, 450-464

Weiss, M., and J. Alcamo (2011), **A systematic approach to assessing the sensitivity and vulnerability of water availability to climate change in Europe**, Water Resour. Res., 47, W02549.

/Liens utiles

- www.plan-loire.fr
- Page de l'[initiative ligérienne d'adaptation aux impacts du changement climatique](http://www.plan-loire.fr/changement-climatique), www.plan-loire.fr/changement-climatique
- Base de données des [projets soutenus par le plan Loire 2007-2013](#)
- « Y a-t-il une dérive hydrologique en Auvergne ? », [wikhydro](#)
- <http://www.driasclimat.fr/>
- [Site du projet Hycarre](#)
- [Site du projet SalTemp](#)
- [Site du projet C3E²](#)
- [Site du projet ADVICLIM](#)
- [Site de LOGRAMI](#) (Loire Grands Migrateurs, association œuvrant pour la gestion et la restauration des populations de poissons migrateurs.)
- [Site du GIP Loire Estuaire](#)

/Annexes

Les annexes ci-dessous rassemblent un ensemble de notes rédigées entre septembre et décembre 2014 sur des articles ou rapports scientifiques intéressants pour les impacts du changement climatique dans le bassin de la Loire et les premières pistes d'adaptation. La dernière annexe présente le tableau de travail ayant permis d'identifier les différents projets et résultats exposés dans ce rapport.

Annexe 1 – Note sur le rapport de « Le Climat de la France au XXIème siècle – Volume 4 – Scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer » publié en août 2014 sous la direction de Jean Jouzel.

Cette note a pour premier objectif de présenter les scénarios du dernier rapport du GIEC³, l'AR5, par rapport à ceux de l'AR4 datant de 2007, utilisés jusqu'ici dans les projets financés par le Plan Loire. Le second objectif de cette note est ensuite de synthétiser les résultats décrits dans le dernier rapport de la direction générale de l'énergie et du climat, en se focalisant principalement sur les résultats concernant le bassin ligérien.

Quelques mots sur l'AR5

Le GIEC a été créé en 1988 par deux institutions des Nations Unies : l'organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE). Il a pour objectif d'évaluer l'état des connaissances les plus avancées relatives au changement climatique. Pour ce faire, des exercices d'intercomparaison de modèles de climat (les CMIPs pour Coupled Model Intercomparison Project) sont mis en place à la suite de quoi des rapports d'évaluation sont rédigés : quatre ont été publiés entre 1990 et 2007 et le dernier rapport, l'AR5, a été rendu intégralement public le 31 mars 2014. Pour ce dernier rapport, de nouveaux forçages radiatifs⁴ sont proposés et une nouvelle génération de modèles de climat a été utilisée. Auparavant, les forçages radiatifs provenaient de scénarios d'évolution socio-économiques, les SRES (du nom du rapport spécial publié en 2000 pour les présenter *Special Report on Emissions Scenarios*) (Nakicenovic et Swart, 2000). Avec l'AR5, la démarche a changé, le GIEC propose maintenant directement des profils d'évolution des forçages radiatifs, appelés RCPs pour *Representative concentration pathways* (Moss *et al.*, 2010) à partir desquels les climatologues et les sociologues et économistes élaborent en parallèle des scénarios climatiques et socio-économiques. Pour le dernier exercice, quatre RCPs ont été proposés, ceci afin d'éviter de privilégier un scénario médian.

De plus, les modèles de climat utilisés lors de ce nouvel exercice appartiennent à une nouvelle génération. Ils prennent notamment en compte un cycle interactif du carbone, une modélisation de la chimie et du transport des aérosols et une prise en compte des changements d'occupation des sols.

La Figure A1.10 présente une comparaison entre les évolutions des températures de surface simulées lors du précédent exercice par rapport au nouveau restitué dans l'AR5, en fonction des différents forçages radiatifs. Cette figure montre que l'augmentation des températures du précédent exercice est moins linéaire que celle de CMIP5. Cette différence pourrait s'expliquer

³ Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat. Ce groupe est également connu par son acronyme anglais IPCC pour Intergovernmental Panel on Climate Change.

⁴ Un forçage radiatif, exprimé en W/m², désigne la modification du bilan radiatif de la terre au « sommet » de l'atmosphère (différence entre l'énergie reçue et émise par la surface de la Terre vers l'espace). Un forçage radiatif reflète donc les changements dans les forçages externes comme la concentration en gaz à effet de serre dans l'atmosphère (CNRS *et al.*, 2011).

par l'intégration des forçages solaire et volcanique dans les scénarios RCPs et une meilleure prise en compte de l'effet indirect des aérosols par les GCMs (Knutti et Sedláček, 2013). On constate que la gamme des projections augmente avec les scénarios RCPs. Les nouvelles projections indiquant une faible augmentation des températures proviennent du fait que l'on considère pour la première fois un scénario intégrant les effets de politiques de réduction des gaz à effet de serre (le RCP2.6). Les projections pessimistes, quant à elles, proviennent d'une légère augmentation des forçages radiatifs en absence de politique climatique. De manière générale, les nouvelles projections de températures mondiales obtenues pour l'AR5 sont très similaires à celles obtenues lors du précédent rapport, avec une évolution médiane identique entre les deux rapports. Les structures spatiales des températures et des précipitations sont également cohérentes entre les deux rapports.

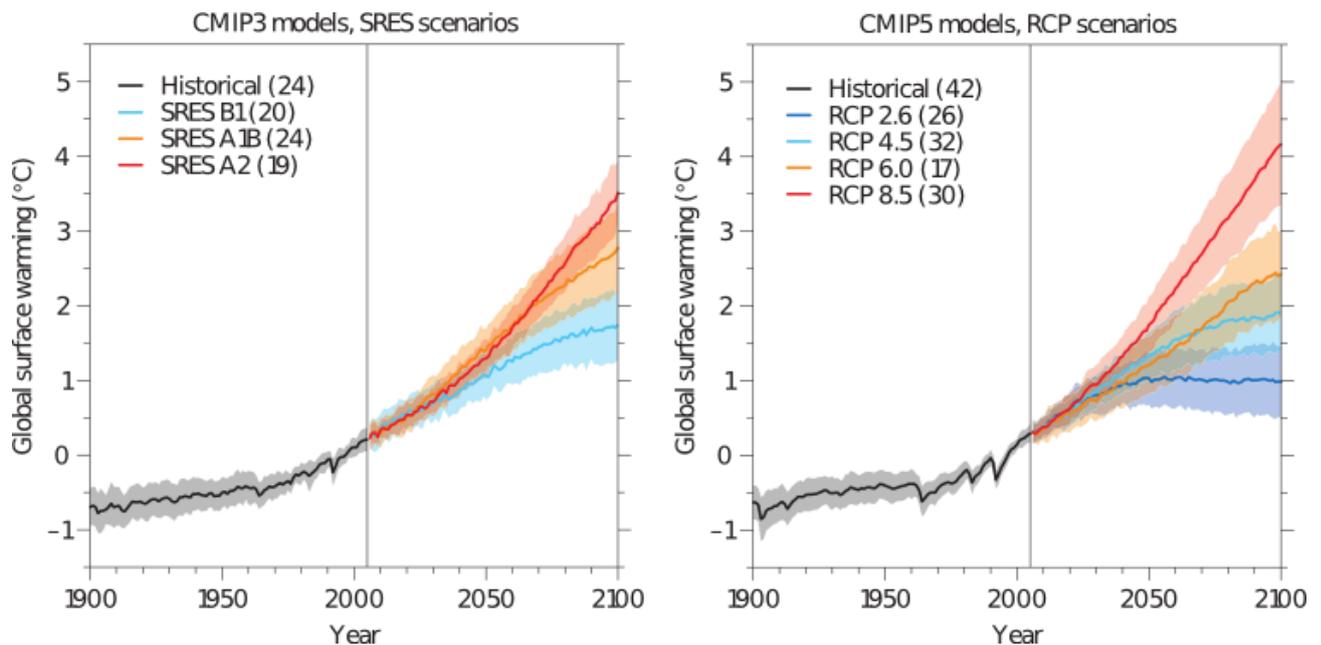


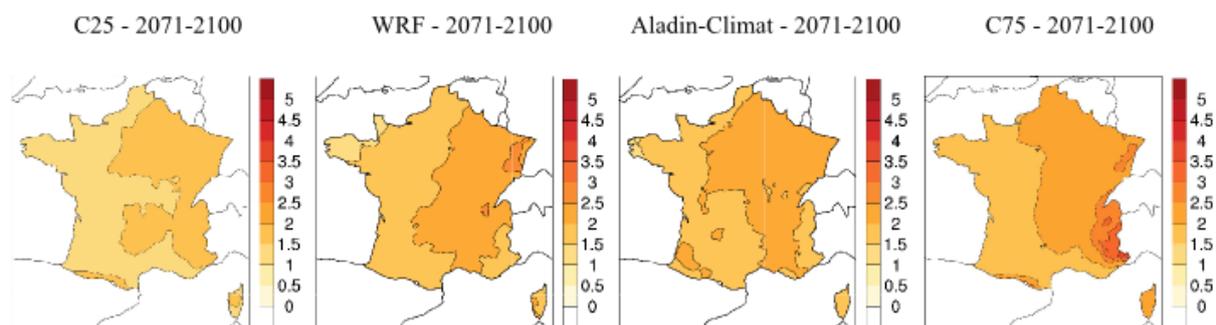
Figure A1.10 - Evolution des anomalies de températures de surface moyennes par rapport à 1986-2005 pour les scénarios SRES utilisés dans CMIP3 et les RCPs utilisés dans CMIP5. Le nombre de modèles de climat utilisés est donné entre parenthèse. Extrait de Knutti et Sedláček (2013).

Synthèse sur le rapport dirigé par Jean Jouzel de septembre 2014.

L'intérêt du rapport présenté auprès du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie en septembre 2014 par rapport à celui du GIEC réside dans l'utilisation de modèles de régionalisation qui permettent d'affiner les évolutions de climat à l'échelle de la France, en passant d'une faible résolution (pixel ~200km) dans l'AR5 à une résolution plus élevée (pixel 12 km). Ce rapport présente l'évolution des variables de températures et de précipitations.

Concernant les températures, les modèles s'accordent sur une augmentation uniforme sur l'ensemble du bassin de la Loire à l'horizon 2021-2050 pour les deux scénarios RCP4.5 et RCP8. Cette augmentation de températures est légèrement plus forte en été (+[0.6 ; 2.0]°C, tous scénarios confondus) qu'en hiver (+[0.3 ; 1.6]°C, tous scénarios confondus). En revanche, les évolutions de températures sont plus contrastées à l'horizon 2071-2100 avec une augmentation plus forte dans la partie amont du bassin de la Loire, comme le montre la figure A1.11 pour le scénario RCP4.5.

a) hiver



b) été

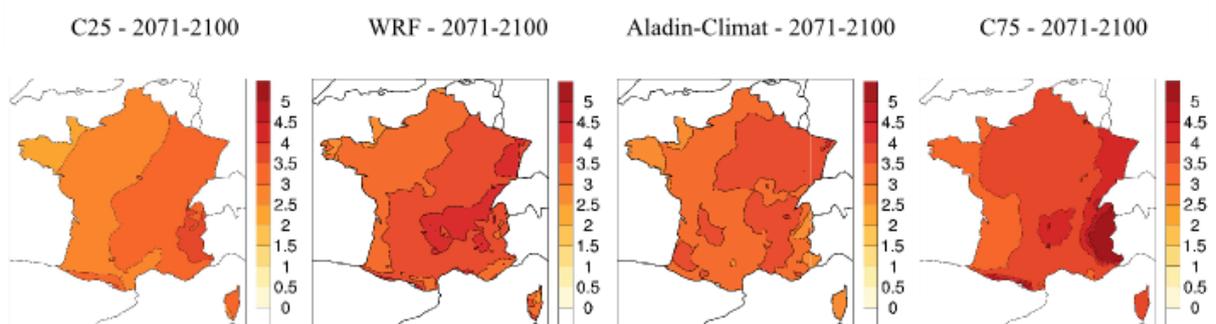


Figure A1.12 - Ecart de température (°C) en France relativement à la référence 1976-2005 pour le scénario RCP4.5 à l'horizon 2071-2100, pour les saisons (a) hivernale et (b) estivale. Pour chaque ligne, de gauche à droite : 25^e centile de l'ensemble, WRF, Aladin Climat et 75^e centile de l'ensemble des projections climatiques. Extrait de Jouzel *et al.*, (2014)

Concernant les précipitations, les incertitudes sont beaucoup plus importantes, et ceci en particulier pendant la période estivale. Les deux modèles de régionalisation français ne s'accordent alors pas sur le signe des changements. La répartition géographique des changements est également très incertaine avec le modèle de régionalisation WRF indiquant une augmentation des précipitations sur la façade atlantique, donc plutôt à l'aval du bassin ligérien alors que le modèle français de Météo France, Aladin-Climat présente une augmentation des précipitations plutôt uniforme. De manière générale, les précipitations tendent à augmenter en hiver et à diminuer en été mais ces changements restent dans une gamme très faible sur le bassin de la Loire ([-0.5 ;+0.5] mm/j) selon tous les scénarios.

Les résultats actuels des projets sur la Loire restent-ils valides ?

Les projets d'études d'impacts du changement climatique sur la Loire, financés ou non par le plan Loire, ont été réalisés avec les scénarios du précédent exercice de modélisation, CMIP3. Il est alors légitime de se poser la question de la validité des résultats de ces projets par rapport aux nouveaux scénarios et projections climatiques. Ces projets ont utilisé le scénario médian A1B. D'après la figure 1, ce scénario se situerait plutôt vers le scénario RCP6.5 en termes d'évolution de la température, c'est à dire entre les scénarios RCP4.5 et RCP8 dont les résultats sont présentés dans le paragraphe précédent. Etant donné que les résultats des projets sur la Loire s'appuient sur un scénario médian, ceux-ci restent donc tout à fait valides vis-à-vis des nouveaux scénarios.

Les modèles de régionalisation utilisés dans les projets tels que ICC-HYDROQUAL financé par le plan Loire ou ceux menés parallèlement par EDF, sont différents de ceux utilisés pour obtenir les résultats présentés dans le paragraphe précédent. Ils appartiennent aux modèles dits statistiques⁵. En termes de températures, les résultats du projet ICC-HYDROQUAL sont cohérents avec les résultats présentés dans le paragraphe précédent, avec une augmentation croissante des températures de l'aval vers l'amont du bassin pour la fin du XXI^{ème} siècle (Moatar *et al.*, 2010b). Concernant les précipitations, les résultats semblent se rapprocher de ceux issus du modèle de régionalisation de Météo-France, Aladin-Climat, avec une forte diminution des précipitations estivales sur l'ensemble du bassin ligérien.

Le rapport de Jouzel *et al.*, (2014) souligne les fortes incertitudes concernant les précipitations. Ces fortes incertitudes semblent provenir de la difficulté des modèles de régionalisation à représenter correctement les épisodes convectifs locaux. Parmi ceux-ci, les épisodes cévenols impactent fortement l'amont du bassin de la Loire et donc l'ensemble de son régime hydrologique. Un travail à suivre qui devrait être très intéressant pour la gestion des barrages de Naussac et de Villerest, ainsi que pour les mesures de prévention des crues est la thèse d'Etienne Brulebois qui s'intéresse notamment à la représentation de ces processus convectifs à l'origine des épisodes cévenols dans le modèle de régionalisation dynamique WRF, à l'échelle de 3km. De plus, ce projet utilise les nouvelles projections climatiques globales issues du dernier exercice, CMIP5.

Bibliographie

L'ensemble des résultats est accessible sur le portail DRIAS (www.driasclimat.fr) dans la rubrique « nouveaux scénarios (RCP) », sous plusieurs formes, d'une part des cartes interactives dans l'Espace Découverte et d'autre part des données numériques à télécharger dans l'Espace Données et Produits. Les principales variables climatiques disponibles portent sur les températures et précipitations moyennes, les indices de vague de froid, de chaleur, de sécheresse et de précipitations extrêmes.

Jouzel, J., Ouzeau, G., Déqué, M., Jouini, M., Planton, S., Vautard, R. (2014). Le climat de la France au XXI^e siècle – Volume 4 – Scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer. *Rapports pour la direction générale de l'Energie et du Climat*. 62 pp.

Knutti, R. and Sedláček, J. (2013). Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nature Climate Change*, 3(4) :369–373.

Moatar, F., Ducharne, A., Thiéry, D., Bustillo, V., Sauquet, É., Vidal, J.-P., et al. (2010). La Loire à l'épreuve du changement climatique. *Géosciences*, 12 :78–87.

Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., et al. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282) :747–756.

Nakicenovic, N. and Swart, R. (2000). Special report on emissions scenarios. *Special Report on Emissions Scenarios, Edited by Nebojsa Nakicenovic and Robert Swart, pp. 612. ISBN 0521804930. Cambridge, UK : Cambridge University Press, July 2000.*, 1.

⁵ Contrairement aux modèles de régionalisation dynamique qui représentent de manière explicite les différents processus existant localement, les modèles statistiques relient des types de circulations atmosphériques globales aux observations faites à l'échelle locale. Ainsi, ils s'appuient sur le principe que le climat à l'échelle locale peut s'expliquer par des phénomènes atmosphériques à grande échelle de manière invariante dans le temps.

Annexe 2 – Note sur l'article "A systematic approach to assessing the sensitivity and vulnerability of water availability to climate change in Europe" de Martina Weiss et Joseph Alcamo, publié dans *Water Resources Research*, vol. 47, W02549, 2011

La publication de Martina Weiss et Joseph Alcamo⁶ cherche à évaluer la sensibilité et la vulnérabilité de 18 grands bassins versants européens aux changements climatiques à l'horizon 2100 (Figure A2.13). Ces bassins présentent un fort gradient climatique Nord-Sud ainsi qu'un fort gradient d'anthropisation. Parmi ces grands fleuves, deux sont français, la Seine et la Loire et un est transfrontalier, le Rhin.

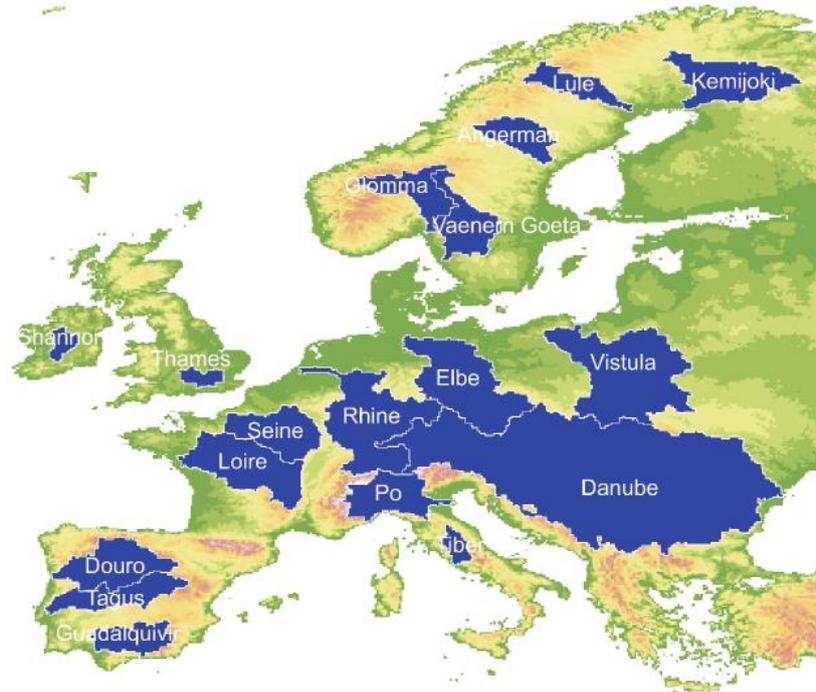


Figure A2.13 - Carte des bassins sélectionnés (Extrait Weiss et Alcamo, 2011)

Une première étude de sensibilité aux changements de précipitations et aux températures est menée. Selon leur étude, les débits de la Loire sont linéairement proportionnels aux changements de précipitations. Une augmentation des précipitations est donc tout de suite convertie en débit, la Loire est ainsi très sensible aux changements de précipitations. En termes de sensibilité du régime hydrologique aux changements de précipitations et de températures, la Loire figure parmi les bassins médians. Le gradient Nord-Sud semble principalement expliquer cette sensibilité, les bassins nordiques (*e.g.* le Lule et le Glomma) étant les plus sensibles du fait de leur influence nivale (les crues printanières sont avancées dans l'année), et les bassins méridionaux (*e.g.* le Guadalquivir et le Douro) les moins sensibles.

La vulnérabilité d'un territoire a ensuite été évaluée en fonction des caractéristiques démographiques et sociétales actuelles de ce territoire, ainsi que de la moyenne de 6 scénarios climatiques régionaux issus de l'AR4 du GIEC. La possibilité d'une adaptation n'a pas été prise en compte. Aucune tendance significative n'est notée sur les fréquences d'occurrences des crues et étiages de la Loire, contrairement aux fleuves nordiques qui voient la fréquence des crues augmenter. La Loire est assez vulnérable aux scénarios de changement climatique, avec

⁶ Weiss, M., and J. Alcamo (2011), A systematic approach to assessing the sensitivity and vulnerability of water availability to climate change in Europe, *Water Resour. Res.*, 47, W02549.

un rapport prélèvements sur disponibilité en eau qui augmente. Au regard de cette étude, le Rhin, l'Elbe et le Pô sont les fleuves ayant les comportements les plus similaires à celui de la Loire en termes de sensibilité et de vulnérabilité aux changements climatiques.

On peut noter plusieurs limites à cette étude, la comparaison entre des bassins radicalement différents en termes de surface drainée (le Danube vs le Shannon), d'anthropisation (la Seine vs le Kemijoki). La régulation des débits n'a pas non plus été considérée, or les régimes hydrologiques des fleuves méridionaux tels que le Guadalquivir ainsi que le Douro mais également celui la Loire sont très fortement influencés par les ouvrages de (barrages, seuils). Malgré ces limites, cette étude a l'intérêt de présenter une première tentative de comparaison des vulnérabilités des bassins vis-à-vis des changements climatiques à l'échelle de l'Europe.

Annexe 3 – Note sur l'article "Europe's freshwater biodiversity under climate change: distribution shifts and conservation needs." De Danjela Markovic *et al.*, publié dans *diversity and Distributions*, (2014)20, 1097-1107.

Dans l'article de Danjela Markovic *et al.* (2014), la vulnérabilité de la biodiversité face au changement climatique de trente fleuves européens est étudiée numériquement à l'aide de trois bases de données mondiales ou européennes météorologiques⁷, hydrologiques⁸ et sur la biodiversité⁹. Trois modèles de climat ont été utilisés pour évaluer le climat d'ici 2050, tous forcés par le scénario d'émissions de gaz à effet de serre A1B. Deux scénarios futurs concernant le comportement des espèces face au changement de climat sont étudiés, l'un dit de « non-dispersion » considère que les espèces sont contraintes à rester dans leur milieu d'origine, et l'autre dit de « dispersion libre », considère que les espèces peuvent migrer d'une région à l'autre, sous réserve de connections hydrauliques pour les espèces aquatiques. Le premier est donc pessimiste par rapport au deuxième que l'on peut voir comme plutôt optimiste.

Dans le scénario pessimiste, la région méditerranéenne est très fortement touchée par le changement climatique, et une diminution drastique de la biodiversité est projetée, le Nord est également touché, la partie centrale n'est pas totalement épargnée mais le nombre d'espèces actuellement présentes reste relativement élevé. Une limite assez claire est visible sur la Figure A3.14, or il apparaît clairement que le bassin de la Loire chevauche cette limite, une partie pourrait donc être fortement impactée par le changement climatique. Dans le cas du scénario optimiste (« dispersion libre »), la région très méridionale de l'Europe est touchée par une diminution du nombre d'espèces présente aujourd'hui. Au contraire, les régions nordiques connaîtraient une augmentation du nombre d'espèces actuelles. La Figure A3.14 montre que la Loire n'est pas fortement impactée par le changement climatique. Sans grande surprise, les espèces rares et endémiques seraient dans les deux scénarios les plus vulnérables au changement climatique.

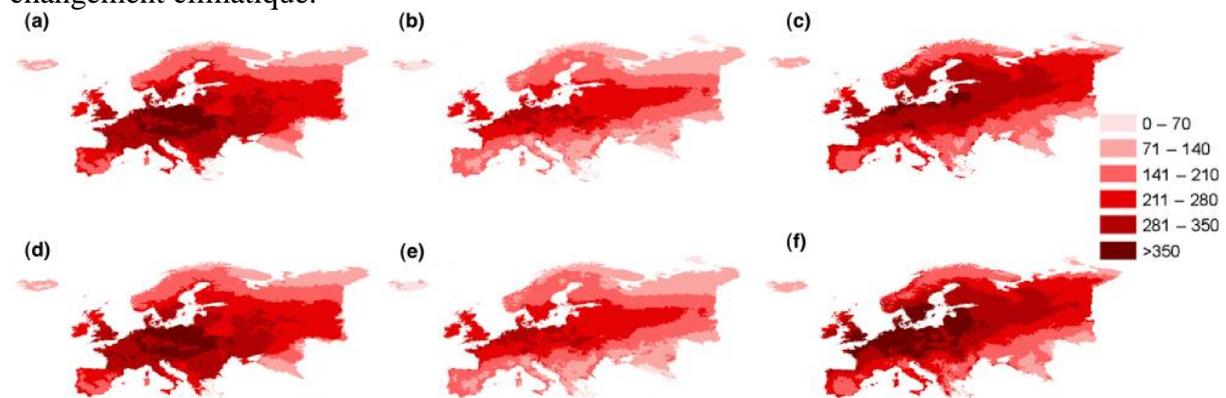


Figure A3.14 - Configurations actuelles et futures des espèces d'eau douce d'Europe tous taxons confondus: (a-c) pour les espèces communes, (d-f) pour les espèces rares et communes). La première colonne de carte présente la configuration actuelle, la deuxième montre la configuration en 2050 en supposant le scénario de

⁷ www.worldclim.org et www.ccafs-climate.org pour les projections climatiques.

⁸ <http://project.freshwaterbiodiversity.eu/index.php/global-hydrobasins>

⁹ www.iucn.org/species_BioFresh

« non dispersion » et la dernière illustre les projections pour 2050, en supposant le scénario de « dispersion libre ».

Une fois de plus, on retrouve dans cet article les similitudes de la Loire avec L'Elbe et le Rhin, déjà évoquées dans la note sur l'article de Martina Weiss et Joseph Alcamo. D'autres fleuves ont également été examinés dans cet article qui présentent des similarités avec la Loire, tels que le Dniestr (long fleuve ukrainien) ou l'Oder (République Tchèque). Il semble intéressant de remarquer que le Pô présent dans l'article de Martina Weiss et qui montrait de fortes similitudes avec la Loire en termes de projections hydrologiques a un comportement relativement différent de celui de la Loire concernant la biodiversité avec une diminution du nombre d'espèce présente sur le bassin plus forte que sur la Loire, ce qui pourrait être due à sa position plus méridionale.

Bibliographie

Europe's freshwater biodiversity under climate change : distribution shifts and conservation needs. (2014). Danjela Markovic, Savrina Carrizo, Jörg Freyhof, Nuria Cid, Szabolcs Lengyel, Mathias Scholz, Hans Kasperdius and William Darwall. *Diversity and Distribution*, **20**, 1097-1107

Annexe 4 – Note sur l’article “Global river discharge and water temperature under climate change” de Michelle T. H. van Vliet *et al.*, publié dans *Global Environmental Change*, (2013)23, 450-464.

L’article de Van Vliet propose d’examiner le devenir des débits et des températures des cours d’eau face aux changements climatiques à l’échelle mondiale.

Cette étude est menée à l’aide du modèle hydrologique VIC-RBM, de deux scénarios d’émissions de gaz à effet de serre (A2 et B1) et de trois modèles de climat. Les résultats issus de ces six expériences numériques sont moyennés. En Europe, quatre fleuves sont considérés, le Danube, le Rhin, la Loire et le Rhône. La Loire présente la plus forte baisse des débits d’étiages (Q_{10}) par rapport aux autres fleuves européens avec une diminution statistiquement significative de -53% à l’horizon 2071-2100 par rapport à 1971-2000 (). L’augmentation des températures moyennes de l’eau à ce même horizon temporel est de 1.6°C, ce qui est plus faible que dans le cas des autres fleuves européens dont l’augmentation est de 2.0°C en moyenne.

Tableau A4.1- Changements projetés pour les débits moyens (Q_{mean}), les étiages (Q_{10}), et les hauts débits (Q_{95}), ainsi que les changements de températures des cours d’eau moyennes (T_{mean}) et de fortes températures (T_{95}) pour 2071-2100 par rapport à 1971-2000. Les changements sont moyennés sur tous les pixels du bassin versant du fleuve considéré et pour les six projections climatiques. La significativité des changements est testé via un test de student apparié pour les pixels de chaque bassin. Les changements pour lesquels la significativité est supérieure ou égale à 99% sont indiqués en gras. Valeurs entre parenthèses indiquent des changements pour les températures de l’eau estivales pour les rivières qui sont gelées un grande partie de l’année.

Basin	d Q_{mean} [%]	d Q_{10} [%]	d Q_{95} [%]	d $T_{w_{mean}}$ [°C]	d $T_{w_{95}}$ [°C]
North America					
Mackenzie	+22	+24	+20	+1.1 (+1.4)	+2.2
Mississippi	-6	-20	-3	+2.4	+2.7
Columbia	+25	-8	+20	+1.6	+1.9
Colorado	-1	-15	+2	+1.9	+2.6
Rio Grande	-13	-27	-15	+1.6	+1.4
South America					
Amazon	+21	+12	+23	+0.5	+0.7
Parana	+12	-2	+16	+1.0	+1.2
Europe					
Danube	-20	-43	-14	+2.1	+2.7
Rhine	-8	-37	+1	+1.9	+2.8
Loire	-23	-53	-7	+1.6	+1.8
Rhone	-11	-46	+1	+2.1	+2.8
Africa					
Congo	+20	+12	+24	+1.4	+1.2
Zambezi	+1	-10	+4	+1.5	+1.3
Niger	+9	-1	+11	+1.3	+1.7
Orange	+8	+1	+11	+1.3	+1.0
Asia					
Ganges-Brahmaputra	+4	-13	+5	+1.2	+1.5
Indus	+65	+30	+78	+1.3	+0.8
Mekong	+3	-22	+7	+0.9	+0.9
Yangtze	-1	-18	+5	+1.8	+1.8
Yellow	+22	+10	+28	+1.8	+2.3
Asia (Arctic)					
Lena	+48	+31	+55	+1.1 (+2.1)	+2.3
Ob	+17	+5	+21	+0.9 (+1.3)	+1.2
Amur	+23	+10	+27	+1.5 (+2.0)	+2.2
Oceania					
Murray-Darling	-10	-25	-8	+1.3	+1.3

Bibliographie :

Van Vliet, M.T.H., Franssen, W. H. P., Yearsley, J. R., Ludwig, F., Haddeland, I., Lettenmaier, D. P., Kabat, P. (2013). Global river discharge and water temperature under climate change. *Global Environmental Change*, **23**, 450-464

Annexe 5 – Note sur le chapitre « Prospective socio-économique et démographique. Pressions anthropiques » du projet Explore 2070.

Ce chapitre du projet Explore 2070 cherche à évaluer les tendances démographiques et socioéconomiques à l’horizon 2070 et leurs impacts sur les prélèvements d’eau, en s’appuyant sur deux scénarios tendanciels de stabilité climatique (*i.e.* sans prise en compte des effets du changement climatique). Des stratégies d’adaptation et deux hypothèses énergétiques (maintien de production nucléaire à 70% ou réduction de la production nucléaire à 50%) ont ensuite été proposées et leurs impacts sur les prélèvements d’eau ont été évalués.

Les scénarios tendanciels

Ces scénarios se basent sur les prévisions de l’INSEE concernant la démographie à l’horizon 2070 indiquent une hausse de la population en France métropolitaine de 13 millions d’habitants avec un vieillissement de la population malgré une arrivée nette de quelques 100 000 migrants par an. L’augmentation de la population et de son âge induit une légère augmentation des ménages de 0.5%. Un déplacement progressif vers la façade atlantique et vers le sud est également présagé.

Les deux scénarios tendanciels concernent la manière dont vont se dérouler ces changements. Le premier scénario est un scénario de concentration relative de l’habitat où l’on suppose que 70% des nouveaux ménages privilégient des appartements plutôt que des maisons individuelles. Le deuxième scénario, quant à lui, suppose une accélération du phénomène d’étalement de l’habitat constaté ces dernières années, avec 70% des nouveaux ménages choisissant une maison individuelle plutôt qu’un appartement. Ces deux scénarios impactent principalement la surface artificialisée et donc les surfaces disponibles pour l’agriculture.

Ainsi, le scénario « concentration » permet une augmentation de la superficie consacrée à l’agriculture, une hausse modérée des rendements des principales cultures agricoles et une augmentation de la surface dédiée aux agro-carburants. Dans ce même scénario, le parc d’habitation est par ailleurs modernisé, permettant ainsi de réduire de moitié la consommation énergétique finale des logements. Le scénario « étalement » ne permet pas une augmentation des surfaces cultivées, et le taux de couverture de la demande allouée de la demande intérieure par la production domestique diminue. Les impacts de ce scénario sur les autres secteurs d’activité n’ont été que partiellement chiffrés.

Conséquences sur les prélèvements en eau.

Les prélèvements moyens en France en 2070 stagnent par rapport à ceux de 2006 dans le scénario « concentration » et baisse très légèrement (-2%) dans le cas du scénario « étalement », avec des évolutions différentes selon les deux scénarios pour les différents secteurs (Tableau A5.2). La demande provenant de l’Alimentation en Eau Potable (AEP) diminue plus dans le scénario « concentration » que dans le scénario « étalement » (-12% vs -7%). Au contraire, les demandes en irrigation augmentent dans les deux scénarios mais de manière plus importante dans le scénario « concentration » (+66% vs +44%). Enfin, ce sont les prélèvements dans le secteur industriel qui sont majoritairement réduits dans les deux scénarios (-56%), grâce à une meilleure exploitation de procédés et de fermetures des circuits de refroidissement.

Tableau A5.2 Evolution des prélèvements d’eau par usage dans le scénario tendanciel.

	2006	2006-2070 (%)
--	------	---------------

	(millions de m ³)	Variante « concentration »	Variante « étalement »
Eau potable (AEP)	5862	-12	-7
Industrie	3279	-56	-56
Energie nucléaire	15958	0	0
Irrigation	3793	66	44
Total	28892	0	-2

L'évolution des prélèvements n'est naturellement pas uniforme sur la France entière mais seule celle concernant les prélèvements pour l'AEP a été spatialisée par bassin versant pour les deux scénarios (Figure A5.154).

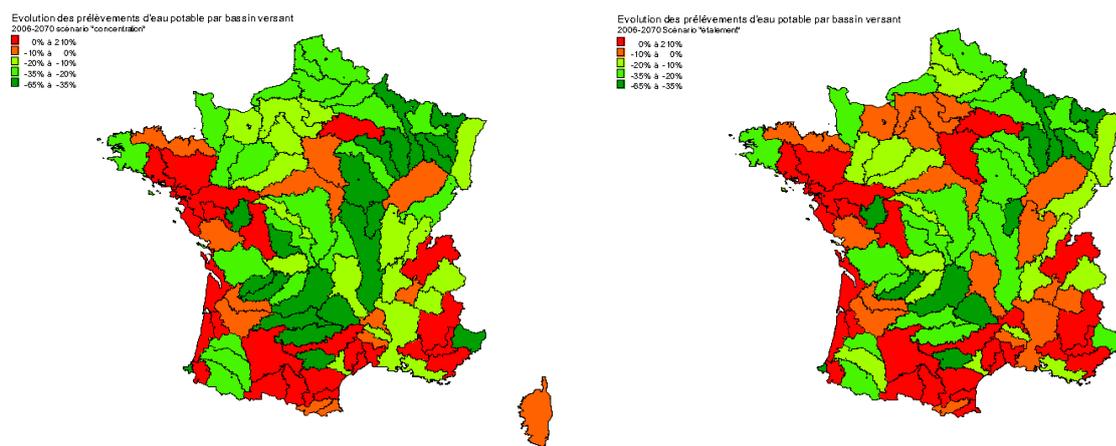


Figure A5.15 Variation des volumes d'eau prélevée pour l'eau potable par bassin versant entre 2006 et 2070, à gauche pour le scénario "concentration" et à droite pour le scénario "étalement".

Malgré la diminution moyenne des prélèvements, ces cartes montrent une augmentation dans certaines régions notamment pour l'aval du bassin ligérien.

Notons que ces évolutions des prélèvements sont basées sur des hypothèses fortes dans les différents secteurs d'activité telles que le maintien des productions actuelles d'électricité par énergie nucléaire, aucune rupture technologiques majeures et maintien des mêmes secteurs industriels, maintien des systèmes d'irrigation existants, etc.

Malgré cette baisse globale des prélèvements d'eau, les consommations continuent d'augmenter et ceci s'explique principalement par l'augmentation des besoins en irrigation.

Trois stratégies d'adaptation et deux hypothèses énergétiques testées

Trois stratégies d'adaptation et deux hypothèses énergétiques sont proposées et évaluées vis-à-vis de leurs impacts sur les prélèvements d'eau. Les trois stratégies d'adaptation, S1 pour une sobriété dans les usages de l'eau, SI la stratégie intermédiaire et S2 qui projette une augmentation des besoins en eau impactent les secteurs liés à l'AEP, l'industrie et l'agriculture. Les hypothèses énergétiques impactent uniquement les prélèvements provenant des centrales nucléaires, elles s'appliquent de manière identique sur les trois stratégies et ne sont pas considérées pour calculer les impacts sur les prélèvements provenant des autres secteurs d'activités mentionnés ci-dessus (AEP, industrie, agriculture).

Le Tableau A5.3 récapitule ces différentes stratégies et hypothèses.

Tableau A5.3 Stratégies d'adaptation et hypothèses énergétiques (extrait du rapport)

3 stratégies d'adaptation	Stratégie d'adaptation 1 (S1)	Stratégie d'adaptation intermédiaire (SI)	Stratégie d'adaptation 2 (S2)
2 hypothèses énergétiques pour chaque stratégie	Sobriété dans les usages de l'eau		Augmentation des besoins en eau
Energie (E1) Maintien de la production du nucléaire au niveau actuel : 70% de la production totale d'électricité.	AEP/industrie Par rapport au scénario central : <ul style="list-style-type: none"> Fuites dans les réseaux réduites à 15% dans tous les bv ayant un taux supérieurs à 15% Réduction des consommations d'eau par ménage de 20% Réduction des consommations d'eau par l'industrie de 20% 		AEP/industrie Hypothèses identiques à celles des scénarios tendanciels
Energie (E2) Réduction de la part du nucléaire dans la production totale d'électricité à 50% d'ici 2050	Agriculture Conversion de 100% du maïs irrigué en : 50% céréales sèches, 30% blé irrigué, 10% soja irrigué et 10% céréales irriguées	Agriculture Conversion de 50% du maïs irrigué en : 25% céréales irriguées et 25% céréales sèches. Conversion de 20% du blé tendre sec en blé tendre irrigué au nord de la Loire	Agriculture Conversion de 20% du blé tendre sec en blé tendre irrigué au nord de la Loire. Augmentation jusqu'au double au maximum de toutes les superficies irriguées au sud de la Loire.

Impacts des stratégies d'adaptation sur les prélèvements

Les stratégies S1 et SI permettent de réduire les prélèvements de -33 et -32 % respectivement pour les scénarios « concentration » et « étalement » par rapport à 2006 contre -12 et -7% sans la prise en compte de ces stratégies de réduction de la consommation en eau dans les ménages. Ces stratégies sont donc particulièrement bénéfiques pour le scénario « étalement ». En ce qui concerne le secteur industriel, les stratégies d'adaptation S1 et SI permettent de gagner 10 points supplémentaires avec une réduction des prélèvements de 65%. Mais, c'est sur le secteur agricole que les stratégies diffèrent le plus. La stratégie S1 est nettement la plus avantageuse car elle permet de réduire les prélèvements de moitié pour le scénario « étalement » et de -17% pour le scénario « concentration ». Au contraire, la stratégie S2 présente une augmentation des prélèvements par rapport aux scénarios tendanciels et représente un chemin à ne pas suivre.

Il est intéressant de remarquer de nouveau que le bassin ligérien a une position centrale, il représente souvent une frontière entre les techniques d'adaptation préconisées pour le nord ou pour le sud de la France. Une spatialisation des différentes stratégies agricoles serait donc particulièrement bienvenue.

Impacts des hypothèses énergétiques sur les prélèvements provenant de la filière nucléaire

Les deux hypothèses sont très semblables. Elles se basent toutes deux sur :

- la fermeture des circuits de refroidissement,
- plusieurs centrales de type EPR pourraient d'ici 2070 remplacer les centrales existantes et,
- sur la réduction du nombre de sites de centrales nucléaires passant de 19 à 13, dont la fermeture des centrales de la Vienne et un regroupement des capacités de la Loire se traduisant par la fermeture de deux centrales (Belleville sur Loire et Saint-Laurent-Nouan) et le renouvellement de deux autres (Chinon et Dampierre).

La différence entre les hypothèses E1 et E2 réside uniquement sur le nombre de tranches nucléaires en fonctionnement.

Ces hypothèses E1 et E2 permettent de fortement réduire les prélèvements de -84% et de -90%, respectivement (représentant 13347 et 14349 millions de m³). Cette réduction de prélèvements ne signifie pas une réduction des consommations. Ces hypothèses retenues sont extrêmement importantes car les prélèvements provenant des centrales nucléaires représentent actuellement près de 44% des prélèvements totaux et permet donc une forte diminution de ces derniers comme le montre le tableau récapitulatif, peu importe la stratégie considérée.

Tableau récapitulatif des prélèvements en fonction des différentes stratégies et hypothèses

	2006 (millions de m ³)	2006-2070 (millions de m ³)													
		Tendanciel		S1				SI				S2			
				E1		E2		E1		E2		E1		E2	
		C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E	C	E
AEP	5862	5171	5476	3935	3960	3935	3960	3935	3960	3935	3960	5171	5476	5171	5476
Industrie	3279	1453	1453	1162	1162	1162	1162	1162	1162	1162	1162	1453	1453	1453	1453
Energie nucléaire	15958	15958	15958	2611	2611	1609	1609	2611	2611	1609	1609	2611	2611	1609	1609
Agricole	3793	6313	5410	3156	1888	3156	1888	5863	3959	5863	3959	10055	6724	10055	6724
Total	28892	28895	28297	10864	9621	9862	8619	13571	11692	12569	10690	19290	16264	18288	15262
Evolution sur les prélèvements totaux 2006-2070(%)	-	0%	-2%	-62%	-67%	-66%	-70%	-53%	-60%	-56%	-63%	-33%	-44%	-37%	-47%

C : scénario « concentration »

E : scénario « étalement »

S1 : stratégie d'adaptation 1 – sobriété des besoins

SI : stratégie d'adaptation Intermédiaire

S2 : stratégie d'adaptation 2 – augmentation des besoins

E1 : maintien de la production d'énergie d'origine nucléaire 70%

E2 : diminution de la production d'énergie d'origine nucléaire à 50%

Annexe 6 – Tableau de travail faisant l'inventaire des différents projets et ayant permis d'aboutir au présent rapport.

Ce tableau est construit à partir des manques et recommandations émises dans l'état des lieux de SAFEGE-Biotope (2008)

Manques identifiés lors de l'état des lieux et recommandations datant de 2008 (Rapport Safege/BioTope)	Avancées effectuées (Projets)							Perspectives : verrous et pistes de recherche
	ID du projet	Chercheur coordinateur et organisme de rattachement	Thème abordé (selon PNACC 2011-2015)	Résultats principaux	Zone d'étude	Période de projet	PL/HPL	
Développer des scénarios climatiques à l'échelle régionale/locale	ICC-HydroQUAL	Florentina Moatar / Université de Tours	RECHERCHE (Action N°1)	Régionalisation de 21 projections climatiques globales (à partir de 16 modèle de climat et préférentiellement forcé par le SRES A1B) avec une méthode statistique (régimes de temps de Boé)	Totalité BV Loire	2009-2010	PL	Grâce à l'étude de Cécile Doukouré, on voit l'importance de prendre en compte plusieurs méthodes de descente d'échelle pour correctement explorer les incertitudes à l'échelle locale. Il faut ensuite pouvoir caractériser ces incertitudes et les hiérarchiser à chaque maillon de la chaîne de modélisation (SRES, GCM, MDES), cf. étude de Hingray & Said (2014) ; Il serait également intéressant de comparer différents types de méthodes (dynamiques vs statistiques) qui sont à leur balbutiements
	Estimation de la contribution des principaux aquifères du bassin versant de la Loire au fonctionnement hydrologique du fleuve à l'étiage	Céline Monteil / Mines-Paris Tech & EDF	RECHERCHE (Action N°1)	Régionalisation de 4 projections climatiques globales (forcé par le SRES A1B et 4 modèles de climat) avec une méthode statistique (régimes de temps de Boé) [scénarios régionalisés inclus dans HydroQUAL]	Totalité BV Loire	2008-2011	HPL	
	Modélisation de la Loire et des aquifères pour la prévision des débits d'étiage de la Loire moyenne	Cécile Doukouré / EDF	RECHERCHE (Action N°1)	95 scénarios régionaux à l'aide d'un SRES A1B, de 5 modèles de climat avec plusieurs conditions initiales et de plusieurs réalisations de 2 méthodes de descente d'échelle (de régionalisation) => [Forte augmentation de l'incertitude en prenant en compte ces deux méthodes de descente d'échelle statistiques sur les précipitations et les débits par rapport à l'étude précédente de Céline Monteil : e.g. toutes les projections de débits étaient à la baisse dans l'étude de CM alors que ce n'est plus le cas désormais, une partie des scénarios projette une légère augmentation du débit annuel]	Totalité BV Loire	2011-2012	HPL	
	Impact du changement climatique sur la disponibilité de la ressource en eau en Bourgogne : aspects qualitatif et quantitatif	Etienne Brulebois / Université de Bourgogne	RECHERCHE (Action N°1)	Régionalisation à l'aide d'une méthode dynamique avec le RCM WRF, (utilisation des projections climatiques globales CMIP5) en cours,	Loire amont (Arroux, Nohain, Nièvre)	2013-2016	HPL	
Evaluer les impacts hydrologiques (en particulier les extrêmes) du changement climatique	Observations : Détection et prise en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les	Benjamin Renard / INP Grenoble	EAU / RISQUES NATURELS (Action N°1)	Il n'y a pas de tendance particulière détectée sur les débits observés pendant les 50 dernières années sur le bassin de la Loire.	Totalité BV Loire	2003-2006	HPL	Continuer le suivi, obtenir plus de données améliorant ainsi la représentativité des mesures à l'échelle d'un territoire

extrêmes hydrologiques en France.							
Observations : Y a-t-il une "dérive hydrologique" en Auvergne?	Jean-Nicolas Audouy / DREAL Auvergne	EAU / RISQUES NATURELS (Action N°1)	Tendances significatives à la hausse pour les températures, précipitations stables et légère diminution des débits en été (mais attention de l'ordre de l'erreur hydrométrique). La différence entre les hautes eaux d'hiver (stable ou en hausse) et les basses eaux (en baisse) semble s'accroître. Aucune tendance détectée sur les événements extrêmes (crues et sécheresse).	Allier, Loire, Tiretaine	2008-2011	HPL	
Observations : Evolution observées dans les débits des rivières en France	Ignazio Giuntoli / ONEMA	EAU / RISQUES NATURELS (Action N°1)	Peu de tendance significative concernant la sévérité des étiages. On note, en revanche pour 7 stations, un avancement de la période d'étiage, en particulier à l'amont du bassin de la Loire. Aucune tendance significative n'est décelable sur le débit moyen annuel, ni sur les maximum annuel de débits (sauf pour 3 stations, l'une située en amont et l'autre en aval du bassin de la Loire). Contrairement au reste de la France pour lequel cette étude a montré la significativité de la tendance à la baisse des débits, élément nouveau par rapport aux études précédentes, les tendances sont toujours globalement non significatives sur le bassin de la Loire.	Totalité du BV Loire (~50 stations hydrométriques)	2014	HPL	Continuer le suivi et l'analyse des données dans les années à venir afin d'évaluer les impacts du CC sur l'hydrologie de la Loire
Observations : publi : "Multi-decadal river flows variations in France" projet ECHO	Julien Boé et Florence Habets	EAU	Mise en évidence d'une variabilité multi-décennale ayant affectée les débits annuels de près de 20 à 30% dans le passé, due à des variabilités de température sur l'Atlantique Nord. Ces variations peuvent être en phase ou en opposition de phase avec les variations associées au seul changement climatique.	5 stations	2012-2016	HPL	Recherche sur les incertitudes associées à la désagrégation, aux imperfections des modèles climatiques et à la variabilité intrinsèques du climat en cours et perspectives à venir.
Simulations : HydroQUAL	Florentina Moatar / Université de Tours	EAU / RISQUES NATURELS (Action N°1)	Tendance à la baisse des débits moyens et des étiages, absence de tendances significatives sur les crues	Totalité BV Loire	2009-2010	PL	Fortes incertitudes sur les crues, liées aux incertitudes des scénarios climatiques régionaux qu'il semble important de caractériser
Simulations : Explore 2070	MEDDE	EAU / RISQUES NATURELS (Action N°1)	idem à HydroQUAL	Totalité BV Loire	2010-2012	HPL	

	Simulations : Analyse et modélisation des TEMPératures de l'EAU dans les annexes hydRaulqueS de l'AlliEr (TEMPEAU-RISE)	Ana Casado / Université Blaise Pascal de Clermont Ferrand	EAU / BIODIVERSITE	Modélisation du régime thermique des bras morts. Résultats en cours	Allier	2013- 2014	PL	
	Simulations : "A systematic approach to assessing the sensitivity and vulnerability of water availability to climate change in Europe"	M. Weiss / University of Kassel	EAU	cf. fiche résumé	Totalité BV Loire		HPL	
	Simulations : "Global River discharge and water temperature under climate change". Projet FP6 -Watch, Commission Européenne.	Michelle T.H. van Vliet / Eart System Science - Climate Change and Adaptative Land and Water Management, Wageningen University and Research Center	EAU / BIODIVERSITE	Forte diminution des débits d'étiage (-53%) à l'horizon 2071-2100 en considérant les SRES A2 et B1 et 3 GCMs. Augmentation qui est particulièrement forte au regard des autres fleuves européens. Augmentation des températures des cours d'eau de 1.6°C en moyenne, relativement faible par rapport aux autres fleuves européens.	Totalité BV Loire	2013	HPL	Explication de la faible augmentation des températures de la Loire relativement aux Rhin, Rhône et Danube?
	Simulations : Régime thermique et faune piscicole au XXIème siècle (thèse A. Beaufort)	Aurélien Beaufort / Université de Tours	EAU / BIODIVERSITE	Caractérisation et modélisation du régime thermique de la Loire afin d'évaluer les impacts du changement climatique en cours sur la faune piscicole. Une publication soumise("River temperature modelling by Strahler order at the regional scale in the Loire river basin"), résultats en cours...	Totalité BV Loire	2012- 2015	PL	
Caractériser le fonctionnement des nappes et analyser les problématiques de nappes en termes de	Modélisation des eaux souterraines du Forez	Jordan Ré Bahaud / Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint- Etienne	EAU (Actions n°1 et n°2)	Obtention et analyse de données hydrogéologiques du plateau du Forez. Classification des aquifères en trois catégories avec indication de leur résistance ou de leur résilience vis-à-vis des risques de sécheresse et des risques de pollution selon leur temps de résidence. Evaluation de leur vulnérabilité.	Loire amont	2008- 2012	PL	Développement d'un modèle complet, nappes libres/nappes profondes

quantité et de qualité face au CC	Estimation de la contribution des principaux aquifères du bassin versant de la Loire au fonctionnement hydrologique du fleuve à l'étiage	Céline Monteil / Mines-Paris Tech & EDF	EAU (Actions n°1 et n°2)	Etude des aquifères : alimentation principale par les infiltrations sur les versants ; apport des aquifères à la Loire provenant principalement de la nappe de Beauce rive droite ; quantification des prélèvements : 43% des prélèvements totaux proviennent de nappes profondes et dans le domaine de la Beauce, ce sont 85% des prélèvements qui proviennent l'aquifère. Développement d'un modèle interface eaux de surface, eaux souterraines.	Totalité BV Loire (Focus sur Loire Moyenne)	2008-2011	HPL	Utilisation du modèle par d'autres acteurs / Possibilités de l'améliorer pour mieux simuler les périodes d'étiages (importance vis-à-vis des scénarios de changement climatique)
	Modélisation de la Loire et des aquifères pour la prévision des débits d'étiage de la Loire moyenne	Cécile Doukouré / EDF	EAU (Actions n°1 et n°2)	Utilisation du modèle pour évaluer l'influence des apports des nappes sur le régime thermique de la Loire . Apports actuels des nappes selon le modèle permettent d'abaisser d'environ 0,5°C et même de 1°C pour les étés chauds, Si les débits d'apport baissaient de 30% environ cela entraînerait une variation de l'ordre de 0,3°C sur la température de la Loire pour les été les plus chauds	Totalité BV Loire (Focus sur Loire Moyenne)	2011-2012	HPL	Faire cette étude sur d'autres endroits du BV Loire.
	Hydrogéologie de la nappe alluviale de l'Allier	Hélène Celle-Jeanton & Nabaz Mohammed / Université Blaise Pascal de Clermont Ferrand	EAU (Actions n°1 et n°2)	Execution d'analyses chimiques et bactériologiques afin de déterminer la provenance de l'eau, ainsi que des prospections géologiques et géophysiques. Circulation de l'eau souterraine des côteaux vers la rivière, le pompage modifie cette circulation en provoquant une plus grande pénétration de l'Allier vers le champ captant. Plus les puits sont éloignés de l'Allier, plus la qualité est dégradée. Ceci est dû au fait que la nappe est alors uniquement alimentée par les eaux de surface provenant des côteaux et dont la qualité est fortement dégradée par les rejets agricoles et urbains.	Champ captant de Cournon-Dallet-Mezel (proche Clermont Ferrand)	2011-2014	PL	INTERPRETATION : Signifie que si le niveau de l'Allier baisse, on risque une dégradation de la qualité de l'eau dans les puits, en particulier ceux proches du cours d'eau. Développement d'un modèle permettant de gérer mieux la qualité de l'eau dans les pluies en fonction du débit dans l'Allier et donc des conditions climatiques (scénarios climatiques), permettant alors de prendre des mesures adaptées. OU s'attaquer à la base du problème et diminuer drastiquement les pesticides et nitrates sur les côteaux.

Evaluer la vulnérabilité aux risques d'inondations	EV2B	Sylvie Servain-Courant / Université de Tours	RISQUES NATURELS (Action N° 1, 2 et 3)	Vulnérabilité du bâti : la zone inondable déjà largement urbanisée fait encore l'objet de projets ne prenant pas en compte le risque d'inondation. La perception du risque est intégrée par les acteurs, mais la représentation par les habitants est abstraite et lointaine ce qui est un frein pour la gestion des crises.	Vallée de la Loire, de Nevers à Nantes	2009-2010	PL	
	L'évolution de la Loire amont sur le temps long	Ronan Steinmann / Université de Bourgogne	RISQUES NATURELS (Action N° 1, 2 et 3)	Analyse sur deux sites du tracé du fleuve depuis 2 siècles => La Loire est particulièrement sensible à toute variation des flux et ajuste rapidement sa morphologie.	Loire amont et tête de bassin	2010	PL	Elaboration d'un modèle d'évolution de la Loire amont.
	Evaluer et caractériser les déchets des inondations (MECaDéPI)	Bruno Barroca / Université Paris-Est, Marnes la Vallée	RISQUES NATURELS	Construction d'une méthode de quantification a priori des déchets produits par les inondations sur un territoire donné (avec les hypothèses de calcul retenues afin de rendre la méthode acceptable)	Totalité BV Loire	2011-2012	PL	Utilisation de la méthode par rapport aux inondations projetées par les scénarios hydrologiques afin d'élaborer de potentielles stratégies d'adaptation
	Dynamique de l'hydrosystème ligérien sur le long terme (programme AGES)	Cyril Castanet / Laboratoire de Géographie Physique (CNRS)	EAU / RISQUES NATURELS	Etude des réponses fluviales aux changements climatiques, environnementaux et sociétaux de nature et d'ampleur différente de celles perçues par l'étude des seules séries hydrologiques des XIX ^e et XX ^e siècles. Etude de la vulnérabilité et des risques vis à vis des inondations.	Totalité BV Loire	2012-2015	PL	Cartes de vulnérabilité
	Forecast and Projection in climate scenario of Mediterranean intense events : uncertainties and propagation on environment. Projet MEDUP	Pierre Dumas / CIRED	EAU / RISQUES NATURELS	Etude de l'influence du CC sur les risques d'inondations d'un point de vue économique. Les deux méthodes de descente d'échelle donnent des résultats très différents l'une de l'autre. Selon l'une d'elle, les bassins du Loir et de la Sarthe seront très vulnérables aux inondations avec une augmentation des coûts par rapport au reste de la France. En revanche ces deux bassins ne se distinguent pas du reste de la France selon l'autre méthode. La conclusion de l'article est que prédire le changement de vulnérabilité à l'échelle d'un bassin versant face au CC est hors de portée pour l'instant, compte tenues des incertitudes. Cependant, l'adaptation des territoires devrait être prise en compte via des mesures "no-regret".	Totalité BV Loire	2013	HPL	Mesures "no-regret" à définir, quelles pourraient-elles être?

	STARFLOOD (Strengthening And Redesigning European Flood risk practices. Toward appropriate and resilient flood risk governance arrangements. 2012-2016)	Prof. Peter Driessen / Utrecht University environmental governance	EAU / RISQUES NATURELS	Elaboration de stratégies politiques afin de limiter les risques d'inondation. Les résultats sont attendus à l'échelle européenne, nationale, régionale et pour le développement de PPP. Parmi les 17 sites étudiés, figure la Loire à Nevers (lien avec l'Etude globale du Risque d'Inondation sur l'Agglomération de Nevers). Résultats en cours	la Loire à Nevers	2012-2016	HPL	
	Compréhension des socio-écosystèmes littoraux et marins (COSELMAR)	Sophie Pardo (Université de Nantes) et Philippe Hess (IFREMER)	EAU / RISQUES NATURELS	Etude par ACM de la vulnérabilité de 120 communes littorales face aux risques d'inondation, Vulnérabilité déjà identifiée au regard des événements passés tels que la tempête de 1937 mais qui a fortement augmenté due à une augmentation du tourisme et à l'expansion de l'urbanisme. Ref. Publi : "La vulnérabilité face au risque de submersion marine : exposition et sensibilité des communes littorales de la région Pays de la Loire" (Chevillot-Miot Elie et Mercier Denis)	Estuaire, Littoral du Pays de la Loire	2013-2017	HPL	Augmentation de ce risque/vulnérabilité face au CC?
Etudier les capacités d'adaptation des écosystèmes/ développer le lien entre biodiversité et milieu	EV2B	Sylvie Servain-Courant / Université de Tours	BIODIVERSITE	Définition de critère de vulnérabilité d'espèces végétales/animales par rapport à l'augmentation des températures et de la modification des régimes d'inondation. Ils constatent qu'il y a peu de connaissances qui lient les organismes avec les températures. Les changements hydro-climatiques sont identifiés comme prioritaires sur les habitats aquatiques, les écotones terrestres et inondables.	Totalité BV Loire	2009-2010	PL	Réseau d'Observation de la Biodiversité de la Loire et de ses Affluents (OBLA)
	Impact des changements globaux sur la biodiversité des landes et tourbières du haut bassin de la Loire	Michael Guillon / CNRS, Centre d'étude biologique de Chizé	BIODIVERSITE	"Les résultats de modélisation corrélative soulignent clairement que le climat est suffisant pour prédire la majeure partie de la répartition des espèces." Cette étude montre que les vipères Aspice et Péliade possèdent des capacités d'adaptation au froid mais qu'elles sont particulièrement vulnérables aux températures élevées notamment en période estivale. Il y a un fort risque de déplacement de la limite sud de l'aire de distribution des deux espèces de vipères considérées (péliade et aspice)	Landes et tourbières de la Loire amont	2008-2012	PL	Utilisation des scénarios de changement climatique.
	Eco-hydrologie et fonctions des zones humides dans un contexte de changement climatique	Arnaud Duranel / Université de Jean Monnet de Saint-Etienne	BIODIVERSITE	Forte connectivité des tourbières avec le réseau hydrographique et son fonctionnement hydrologique. On peut donc supposer une forte vulnérabilité des tourbières vis-à-vis du changement climatique.	Loire amont	2010-2014	PL	Modélisation du comportement hydrologique des tourbières. Possibilité d'évaluer les impacts des changements climatiques et des changements d'occupation du sol.

Le peuplier noir face au changement climatique	Sylvain Chamillard / Université d'Orléans	BIODIVERSITE	Le peuplier noir, espèce dominante de la ripisylve ligérienne, semble, d'après cette étude en laboratoire, posséder des capacités d'adaptation pour répondre aux augmentations de températures estivales prédites par le changement climatique. Ceci grâce à une importante plasticité génétique.	Loire moyenne	2008-2011	PL	
Suivi de la dévalaison des smolts de saumon atlantique	Patrick Martin / Conservatoire National du Saumon Sauvage	BIODIVERSITE	Le but de cette étude est d'améliorer les connaissances sur la dévalaison des smolts sachant que les deux facteurs importants (la température et le débit) sont susceptibles d'être modifiés avec le changement climatique. La température conditionne l'enclenchement de la dévalaison et la capacité d'adaptation des smolts à l'estuaire. Le débit conditionne la vitesse de dévalaison des smolts et leur capacité de survie aux prédateurs. Résultats en cours	Chanteuges sur l'Allier (43) et Varades (44) à l'aval de la Loire	2013	PL	
Réseau SYVEL	GIP Loire Estuaire	BIODIVERSITE	Lien entre le comportement migratoire et la température de l'eau des rivières : "En-dessous de 6°C et au-dessus de 20°C, les conditions ne sont plus optimales, et la migration est perturbée." "Les périodes de froid longues et tardives auraient donc un impact plus négatif sur la montaison que les chutes de températures très basses mais très courtes" "Les dévalants les plus tardifs rencontrent parfois des eaux à plus de 25°C, températures qui peuvent leur être fatales si elles durent plusieurs jours."	6 stations de Nantes à l'estuaire	2012-2014	HPL	Utilisation de scénarios de températures des cours d'eau
Evolution de l'eutrophisation du bassin de la Loire	Florentina Moatar / Université de Tours	BIODIVERSITE / EAU	Résultats en cours	Loire moyenne et aval	2012-2014	PL	
Europe's freshwater biodiversity under climate change: distribution shifts and conservation needs (BioFresh project)	Markovic Danijela / Leibniz Institute of freshwater Ecology and Inland fisheries	BIODIVERSITE / EAU	Données climatiques : http://www.worldclim.org/ (res : 1x1km) ; Données hydro : http://project.freshwaterbiodiversity.eu/index.php/global-hydrobasins ; Données sur la biodiversité : www.iucn.org/species_BioFresh . Conclusions générales: on attend une diminution de 90% de leur population pour 6% des espèces communes et 77% des espèces rares. Dans ce projet, il y a également la Seine et le Rhône. Vis à vis de l'Europe, la Loire se situe à la limite des régions les plus touchées par la disparition d'espèces,	Totalité BV Loire	2010-2014	HPL	

Analyse des tendances d'évolution de peuplements de macroinvertébrés benthiques dans un contexte de réchauffement des eaux	Mathieu Floury / LNHE, EDF	BIODIVERSITE / EAU	Observations sur le long terme depuis 1950 : "(i) un réchauffement significatif de la température de l'eau concomitant à une réduction du débit et (ii) des actions de gestion qui ont conduit à l'amélioration locale de la qualité de l'eau par limitation des concentrations en phosphates et en chlorophylle-a, malgré une augmentation des concentrations en nitrates." " Les facteurs hydroclimatiques influencés par les changements climatiques globaux ont affecté la composition de la communauté d'invertébrés à Dampierre, de manière analogue à d'autres systèmes lotiques. Le nombre et l'abondance de taxons natifs polluosensibles et rhéophiles ont diminué, contrairement aux taxons polluo-tolérants et limnophiles, dont plusieurs espèces dites invasives, en conséquence, notamment, du réchauffement des températures de l'eau. A l'inverse, les changements locaux positifs de la chimie de l'eau, impulsés par les actions de gestion mises en place sur la Loire, sont capables de confondre et de réduire partiellement les effets néfastes de ces changements globaux."	Loire moyenne	2010-2013	HPL	l'amélioration des conditions de qualité de l'eau semble avoir atténué les impacts du réchauffement, qu'en sera-t-il dans le futur?
DESYNCHRO	/ Museum National d'Histoire Naturelle	BIODIVERSITE	Obj : associer une caractérisation moléculaire et fonctionnelle du contrôle neuroendocrinien de la smoltification et de la migration à une étude de l'impact de réchauffement de l'eau sur ce contrôle, dans un contexte de conservation du saumon Atlantique de rivière longue. Résultats en cours	axe Loire-Allier	2014-2015	HPL	en cours
Influence du réchauffement climatique sur la smoltification et la migration du saumon de Loire-Allier	Jack Falcon / CNRS, Biologie Intégrative des Organismes Marins (BIOM)	BIODIVERSITE	Obj : Evaluation de l'impact d'une élévation de température de 5°C mimant le réchauffement climatique chez des saumons issus du milieu naturel et ceux produits en pisciculture. Résultats en cours	axe Loire-Allier	2014-2015	PL	en cours
SalTemp (Réchauffement global et adaptation à la migration chez le saumon Atlantique de rivière longue, l'axe Loire-Allier	Jack Falcon / CNRS, Biologie Intégrative des Organismes Marins (BIOM)	BIODIVERSITE	Ce projet étudie l'impact d'un réchauffement de 5°C sur l'activité locomotrice et le comportement de dévalaison et sur les mécanismes moléculaires, endocriniens et physiologiques, qui les contrôlent. Résultats en cours.	-	2013-2017	HPL	en cours

Développer un réseau d'observatoires de la biodiversité (en particulier en Bourgogne)	Diatomées des tourbières, diagnostics hydro-écologiques	Sandra Delachanal-Chatelard / Université Jean Monnet de Saint-Etienne	BIODIVERSITE	Mise en place d'un suivi des diatomées, bons indicateurs des changements climatiques et hydrologiques. Résultats et analyses en cours	Nord du massif central dans le bassin de l'Allier (les marais de Limagne et de Ribains)	2008-2011	PL	
	Mise en place du réseau OBLA	Sabine Greulich / Université François Rabelais de Tours	BIODIVERSITE	Impact du climat sur la paléobiodiversité indécélable car manque de données. Mise en place d'un suivi des températures de l'air, de l'eau et du sol ; des débits ; de la durée, la fréquence et du timing des inondations simultanément avec un suivi des différents groupes taxonomiques afin de détecter des influences du CC sur la biodiversité.	4-6 sites régulièrement répartis le long de la Loire (de l'amont vers l'aval : Feurs, Digoin, Pouilly sur Loire, Mareau-aux-pres, Brehemont, Varades) et 2 sites sur l'Allier (Alleyras et Limons)	2012-2013	PL	Analyse et synthèse des données récoltées
	BD Biodiv	Sabine Greulich / Université François Rabelais de Tours	BIODIVERSITE	En cours		2013-2014	PL	Analyse et synthèse des données récoltées
Développer une méthodologie pour isoler les variations actuelles du niveau de la mer dues au changement climatique	Echanges particuliers entre l'estuaire de la Loire et les eaux côtières adjacentes	Iman Khojasteh Pour Fard / Ifremer Brest	INFRASTRUCTURE & SYSTEMES DE TRANSPORT/PECHES ET AQUACULTURES	Développement d'un modèle hydro-sédimentaire simulant les flux de sédiments en fonction des conditions de marées, du vent et des débits de la Loire.	Loire aval - estuaire de la Loire et zone côtière (44 – 56 – 85)	2009-2012	PL	Utilisation de ce modèle pour élaborer des projections futures et les impacts du changement climatique sur
	C3E ² : Conséquences du changement climatique sur l'écomorphologie des Estuaires (Pierre le Hir de l'Ifremer de Brest)	Pierre le Hir / Ifremer Brest	INFRASTRUCTURE & SYSTEMES DE TRANSPORT/PECHES ET AQUACULTURES	Elaboration d'un modèle des flux hydrosédimentaires dans l'estuaire en fonction des forçages anthropiques et climatiques. Résultats en cours	Loire aval	2011-2014	HPL	

	Restauration de l'estuaire de la Loire	Pierre Bona / GIP Loire Estuaire	INFRASTRUCTURE & SYSTEMES DE TRANSPORT/PECHES ET AQUACULTURES	Elaborer des scénarios d'intervention sur la morphologie du fleuve pour un fonctionnement physique plus favorable aux usages. Utilisation des projections hydrologiques d'HydroQUAL	Loire aval	2009-2012	HPL	
Evaluer l'impact du changement climatique sur les systèmes cultivés	TERVICLIM -	Cyril Bonnefoy / Université de Rennes 2	AGRICULTURE	Mise en place d'un réseau d'observations pour la spatialisation du climat des terroirs viticoles dans un contexte de changement climatique	Val de Loire	2008-2012	HPL	
	CLIMASTER	Philippe Mérot / UMR SAS, Rennes	AGRICULTURE	Influence de la variabilité et du changement climatiques sur les pratiques agricoles. Etudes des cycles d'eau et d'azote avec une mise en évidence de la vulnérabilité des zones humides de tête de bassin. Dans le pays de la Loire, les éleveurs laitiers constatent une évolution climatique mais elle ne constitue pas une préoccupation majeure, contrairement aux éleveurs rencontrés dans le Poitou Charentes. Concernant la viticulture, le changement climatique en cours est plutôt favorable dans le cas du val de Loire, en particulier pour les cépages tardifs (Cabernet Franc, Cabernet sauvignon et Chenin). Sur les grandes cultures, les effets néfastes du climat futur pourraient être compensés par l'augmentation du CO2 mais attention l'augmentation de la variabilité interannuelle invite à la prudence et à la recherche de solutions alternatives. La concertation avec les agriculteurs montrent que le sujet du changement climatique est connu mais n'est pas ressentie comme une réalité au quotidien, plutôt comme un risque éloigné et invisible. Publication : Changement climatique dans l'Ouest . Evolution, impacts et perceptions.	Région Pays de la Loire	2008-2011	HPL	1. Développer un réseau d'observatoires et affiner les projections locales. 2. Développer des outils de concertation et d'appropriation des enjeux liés au changement climatique avec les acteurs tels que le jeu RamiFourrager
	Climator	Nadine Brisson et Denis Allard / INRA Avignon	AGRICULTURE	Les besoins en irrigation des cultures actuellement irriguées vont augmenter en particulier pour les zones productrices de Maïs comme à Lusignan. L'augmentation de l'irrigation du blé ne concernera que les situations particulièrement défavorables telles qu'à Saint Etienne où les sols sont superficiels et un besoin en eau avant floraison se fera sentir. De nouveaux besoins vont apparaître ponctuellement pour la prairie. On voit apparaître des opportunités accrues pour les cultures de sorgho et de tournesol. La présence potentielle de hêtre fait place à une augmentation de la présence potentielle du chêne vert aux trois stations considérées.	3 stations à l'amont du bassin de la Loire (Saint Etienne, Clermont Ferrand et Lusignan)	2007-2010	HPL	

	TERADCLIM	Hervé Quenol / Université de Nantes	AGRICULTURE	Observation et spatialisation du climat des terroirs viticoles dans un contexte de changement climatique. Résultats en cours	Val de Loire	2011- 2013	HPL	
	LIFE-ADVICLIM (Adaptation of Viticulture to Climate Change)	Hervé Quenol / Université de Nantes	AGRICULTURE	Amélioration de la gestion de petits vignobles, choix de cépages pérennes. En cours	Val de Loire?	en cours (2014- 2019)	HPL	
Analyser le futur des usages de l'eau et leur répartition selon les différents secteurs d'activité / Quantifier l'évolution des besoins en eau								
Elaborer des scénarios d'impacts et d'évolution des activités en fonction des changements climatiques								
Evaluer l'impact du changement climatique sur le secteur touristique								
Renforcer les mesures et les analyses de l'enneigement du massif central								
Harmoniser, centraliser et diffuser des données et des projets de recherche	Site Plan Loire - EPTB Loire			Mise en place et suivi de la plateforme collaborative du plan Loire			PL	
Assurer une veille des indicateurs économiques								
Stimuler les réflexions en sciences sociales pour évaluer les changements comportementaux dus au changement climatique	Développement d'une méthodologie de mise en perspective des dommages économiques à l'échelle du bassin fluvial de la Loire (METHODOLOIRE)		FINANCEMENT ET ASSURANCE					
Développer des études pluridisciplinaires voire transdisciplinaires								



Un outil des collectivités
au service du développement durable
de la Loire et ses affluents

2 quai du Fort Alleaume • CS 55708
45057 ORLEANS CEDEX

direction@eptb-loire.fr • www.eptb-loire.fr