

**Annexe au plan d'adaptation au changement climatique
pour le bassin Loire-Bretagne**

**État des lieux des connaissances sur le changement climatique
dans le bassin Loire-Bretagne**

Table des matières

1. Des projections de changement climatique disponibles sur le bassin Loire Bretagne	2
1.1. Évolution des températures de l'air	2
1.2. Évolution des précipitations	3
1.3. Évolution de l'évapotranspiration potentielle et de l'humidité des sols	5
1.4. Les extrêmes climatiques.....	6
1.5. Évolution de l'enneigement	9
2. Une ressource en eau impactée en quantité et en qualité	9
2.1. Température de l'eau	9
2.2. Impacts sur la qualité de l'eau.....	10
2.3. Évolution des débits	11
<i>Évolution du module.....</i>	<i>11</i>
<i>Évolution du QMNA5.....</i>	<i>12</i>
<i>Évolution des débits de crue.....</i>	<i>12</i>
2.4. Évolution des ressources en eau souterraine.....	12
3. Conséquences du changement climatique sur les écosystèmes aquatiques et humides et sur les territoires anthropisés	14
3.1. Les écosystèmes.....	14
3.1.1. <i>Des écosystèmes d'eau douce impactés par les évolutions de température et de débits .</i>	<i>14</i>
3.1.2. <i>Des écosystèmes humides vulnérables, à fort potentiel pour l'adaptation et l'atténuation.</i>	<i>16</i>
3.1.3. <i>Des écosystèmes littoraux exposés mais indispensables à la résilience des zones côtières</i>	<i>16</i>
3.2. Les territoires anthropisés.....	19
4. Conséquences du changement climatique sur les usages actuels et à venir de l'eau	20
4.1. L'agriculture	20
4.2. Les conséquences sur le petit cycle de l'eau.....	22
4.3. L'industrie	23
4.4. La pêche.....	24
4.5. Le tourisme.....	24

Introduction

Cette synthèse a pour objectif de faire un état des connaissances disponibles sur le changement climatique et ses conséquences dans le bassin Loire-Bretagne. Même s'il est partiel, cet état montre que les connaissances actuelles sur le changement climatique et ses impacts sur la gestion de l'eau sont suffisantes pour nous pousser à l'action. Il est nécessaire de s'engager dans un processus d'adaptation au changement climatique.

Après un rappel des projections de changement climatique disponibles sur le territoire du bassin Loire-Bretagne, les impacts sur la ressource en eau, les équilibres quantitatifs et les écosystèmes aquatiques et humides sont exposés. Cet exposé présente quelques actions possibles et/ou déjà en place, le plan de bassin d'adaptation ayant pour objet d'en faire un exposé détaillé.

1. Des projections de changement climatique disponibles sur le bassin Loire Bretagne

1.1. Évolution des températures de l'air

La hausse des températures de l'air est déjà observable. Les températures planétaires en juin 2016 placent les six premiers mois de l'année au premier rang des débuts d'année les plus chauds¹. Avec 0,79°C de plus que la moyenne calculée sur 1951/1980, le mois de juin 2016 poursuit la série des mois records depuis un an en battant l'année 2015. Cependant, à cause du cycle naturel pluriannuel du courant océanique El Niño, la fin de l'année 2016 puis l'année 2017 devraient être moins chaudes, avant que le réchauffement ne se poursuive. Ce phénomène océano-atmosphérique influe sur le réchauffement perceptible à l'échelle de quelques années, mais ne masque pas la tendance au réchauffement sur une plus grande échelle de temps.

Pour prendre un exemple dans le bassin, une température record pour un mois de juillet de 39°C a été observée en 2016 à la Ferrière Airoux (86, Vienne), soit 2°C de plus que le précédent record qui datait de 2015².

Par ailleurs, l'observatoire Oracle de Poitou-Charentes³ a montré une baisse du nombre de jours de gel allant de 9 à 13 jours par an en moins selon les endroits depuis 1960 (avec une forte variabilité interannuelle)... et une augmentation de 23 à 31 jours par an du nombre de jours estivaux⁴ sur la même période. L'observatoire Oracle des Pays de la Loire⁵ relève une baisse significative du nombre de jours de gel au Mans (21 jours par an en moins depuis 1970, également avec une forte variabilité interannuelle), avec une augmentation de 22 jours du nombre de jours estivaux sur la même période.

Différentes projections des températures de l'air peuvent être faites :

- en utilisant le modèle de Météo-France (nommé Aladin) ou celui de l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL) (nommé WRF),
- en se projetant à court, moyen ou long terme,
- en appliquant un scénario de baisse, de stabilisation ou de non-maîtrise des émissions de gaz à effet de serre (GES).

Les cartes ci-dessous présentent une projection de la température moyenne, avec le modèle de Météo-France, à moyen terme (2041-2070), pour les trois scénarios (baisse, stabilisation, non-maîtrise des émissions de GES). Les cartes sur la gauche donnent la situation de référence (période 1976-2005)⁶.

¹ Source : Données de l'équipe Nasa/Université Columbia de New-York, publiées dans le Monde du 21/07/2016

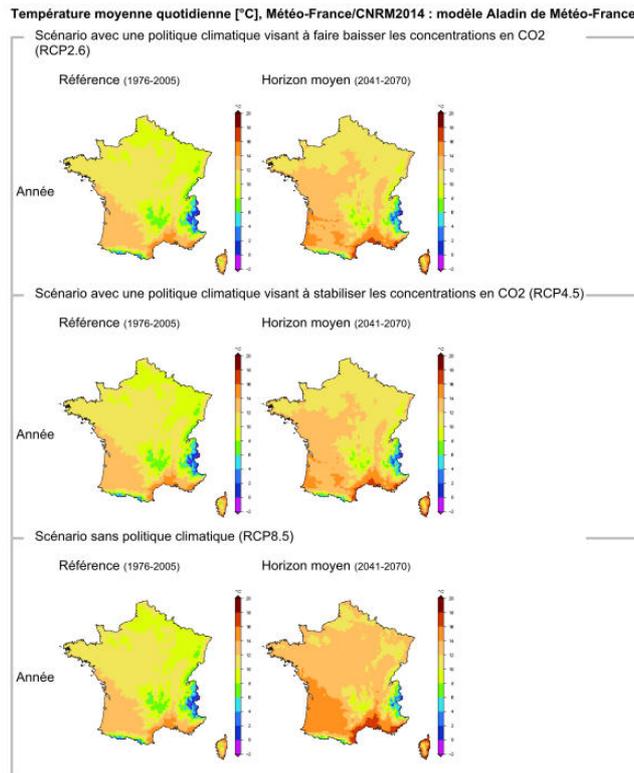
² Source : La Nouvelle République du 19 juillet 2016 citant Météo-France

³ ORACLE- Poitou-Charentes - Etat des lieux sur le changement climatique et ses incidences agricoles en région Poitou-Charentes – édition 2014

⁴ Jour estival : jour où la température maximale journalière est supérieure ou égale à 25°C

⁵ ORACLE – Pays de la Loire - Etat des lieux sur le changement climatique et ses incidences agricoles en région Pays de la Loire – édition 2015

⁶ Source : portail « Drias – les futurs du climat », <http://www.drias-climat.fr/>, porté par le Ministère chargé de l'environnement



On observe que le nord-ouest du bassin est moins touché par la hausse de la température moyenne de l'air, de même que la pointe sud-est (sauf dans le scénario le plus pessimiste). Ailleurs, sur le sud des Pays de la Loire, le Poitou-Charentes, le Centre-Val de Loire, la Bourgogne, il faut s'attendre à des hausses plus importantes (de l'ordre de 2°C).

Le Ceser Pays de la Loire⁷ relève que la température moyenne s'est élevée de 0,8°C au cours du XXème siècle, et qu'à l'horizon 2030 cette hausse, plus marquée en été, serait comprise entre 0,8 et 1,4°C selon les différents scénarios du GIEC.

1.2. Évolution des précipitations

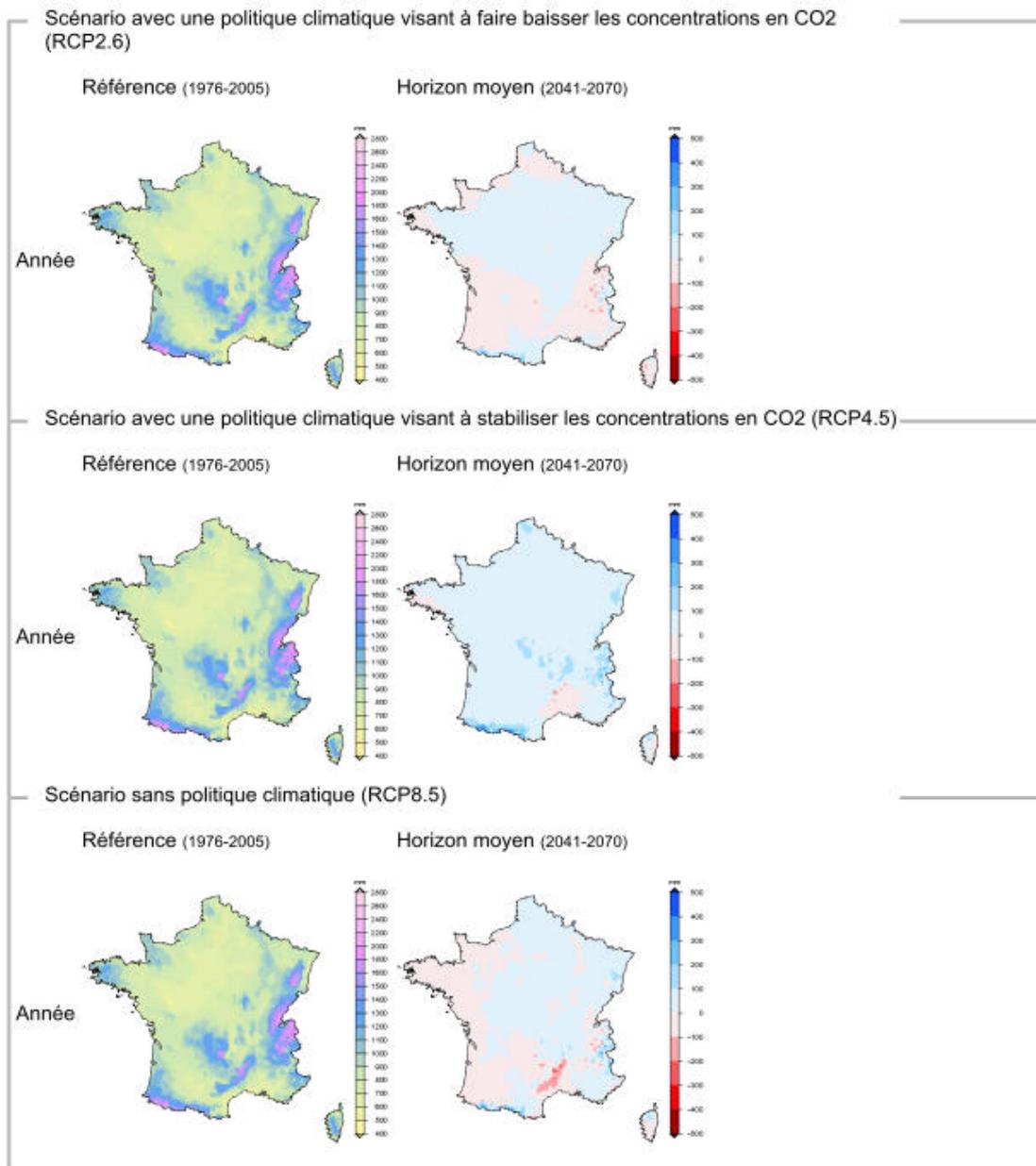
Les précipitations vont évoluer dans les décennies, tant en termes de répartition spatiale (quelle quantité de pluie à quel endroit) qu'en termes de répartition sur l'année (quelle quantité de pluie à quelle saison).

La simulation qui suit⁸ a été faite avec le modèle de Météo-France sur l'anomalie de cumul annuel des précipitations, c'est-à-dire l'écart à la période de référence des précipitations modélisées.

⁷ « Impacts des changements climatiques et mesures d'adaptation en Pays de la Loire » - Ceser Pays de la Loire, février 2016

⁸ Drias – Déjà cité

**Anomalie du cumul de précipitations : écart entre la période considérée et la période de référence [mm],
Météo-France/CNRM2014 : modèle Aladin de Météo-France**



On observe que le scénario joue beaucoup : selon que les émissions de GES sont plus ou moins maîtrisées, les projections aboutissent à une augmentation ou une baisse du cumul annuel des précipitations sur la majeure partie du bassin.

Sur la région Centre-Val de Loire, il est probable que le cumul des précipitations augmente un peu.

Sur la Bretagne, en revanche, le cumul annuel des précipitations baisse pratiquement partout dans tous les cas.

Les mêmes incertitudes se retrouvent sur les cartes de cumul saisonnier (non présentées) : il est difficile d'affirmer qu'il pleuvra plus en dehors de l'été, et moins pendant celui-ci. De plus, le modèle choisi influe sur les résultats de simulation : le modèle de l'IPSL prévoit ainsi une augmentation marquée des précipitations hivernales dans l'ouest du bassin avec le scénario le plus pessimiste, ce que ne prévoit pas le modèle de Météo-France, qui prévoit plutôt une légère hausse, voire une baisse sur la pointe bretonne.

L'étude Explore 2070⁹ avait déjà pointé la plus grande incertitude qui règne sur la modélisation des précipitations, avec de grandes disparités entre les modèles dans la répartition géographique des ratios de précipitations : « *Une tendance à la baisse apparaît sur la moyenne multimodèles, hormis en hiver où aucune tendance ne se dessine. Au printemps la baisse apparaît peu significative à l'échelle du territoire. C'est en été que les précipitations semblent le plus déficitaires avec -23,6% à -15,9% de la valeur moyenne de référence.* »

Une thèse¹⁰ consacrée à l'évolution du cycle hydrologique continental en France au cours des prochaines décennies a développé une méthode particulière de traitement des données. Si elle conclut également que les précipitations estivales vont diminuer sur l'ensemble du pays, elle estime cependant que d'ici la fin du siècle les précipitations hivernales augmenteront sur la moitié nord du pays et diminueront légèrement sur la moitié sud. A plus court terme, dans les prochaines décennies, la diminution des précipitations est importante en été mais l'évolution est moins marquée pour les autres saisons.

Le Ceser Pays de la Loire¹¹ a constaté la même prudence des experts, à propos de précipitations dont on peut s'attendre à ce qu'elles soient plus ou moins constantes en hiver et en diminution progressive en été.

L'observatoire Oracle de Poitou-Charentes¹² n'a pas relevé de tendance nette sur l'année concernant les précipitations passées, avec un signal assez faible d'augmentation des pluies de printemps et d'automne et de diminution des pluies d'été et d'hiver. L'observatoire Oracle de Pays de la Loire¹³ a relevé une légère tendance à l'augmentation des pluies annuelles passées, due à une augmentation en automne.

Ces incertitudes et ces contradictions s'expliquent par le fait que, à l'échelle de la planète, la France se situe à une latitude de transition entre des zones où les précipitations seront plus abondantes, et d'autres où elles le seront moins. Les lois de la physique nous enseignent aussi qu'un air plus chaud peut contenir plus d'eau en suspension ; c'est la relation de Clausius-Clapeyron : « plus l'air est chaud, plus il peut contenir de vapeur d'eau avant condensation ».

1.3. Évolution de l'évapotranspiration potentielle et de l'humidité des sols

L'Observatoire Oracle de Poitou-Charentes¹⁴ a déjà relevé une augmentation de 145 à 291 mm de l'évapotranspiration potentielle annuelle depuis 1960. Celui des Pays de la Loire¹⁵ montre une augmentation de 77 à 95 mm depuis 1971.

Les différents types de sécheresse

Il existe trois types de sécheresse :

- La sécheresse météorologique, qui est directement liée aux précipitations et aux mesures faites dans les pluviomètres
- La sécheresse agricole, qui prend en compte le taux d'humidité dans le sol à 1 mètre de profondeur
- La sécheresse hydrologique, qui est liée au débit des cours d'eau et au niveau des nappes.

Un indicateur de sécheresse agricole des sols¹⁶ a été modélisé par Météo-France dans le cadre du projet Climsec, avec deux modèles différents. Les cartes ci-dessous représentent l'anomalie moyenne de l'indicateur de sécheresse agricole des sols simulée, pour une période de référence sur le XX^{ème} siècle, ainsi que pour le XXI^{ème} siècle.

⁹ Explore 2070 – Ministère chargé de l'Environnement. Rapport B1 sur l'hydrologie de surface - 2012

¹⁰ « Evolution du cycle hydrologique continental en France au cours des prochaines décennies ». G. Dayon, Université de Toulouse - 2015

¹¹ Déjà cité

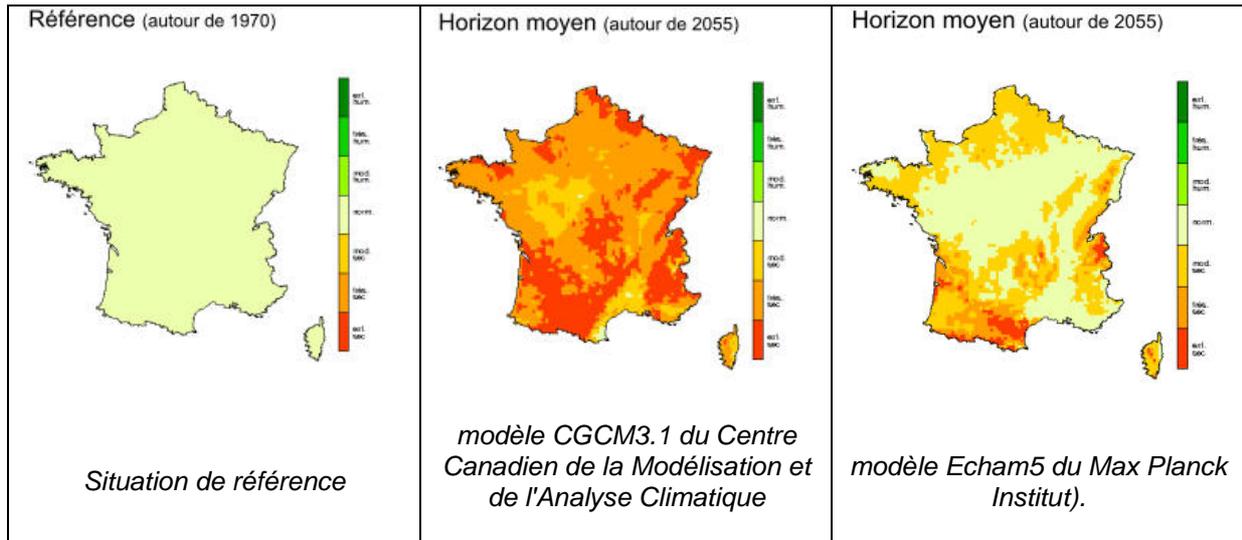
¹² Déjà cité

¹³ Déjà cité

¹⁴ Déjà cité

¹⁵ Déjà cité

¹⁶ Cet indicateur est un ratio prenant en compte le contenu intégré en eau du sol, le contenu en eau au point de flétrissement, et le contenu en eau du sol à la capacité au champ



Anomalie moyenne de l'indicateur de sécheresse agricole des sols simulée
(Source : Météo France)

On observe que la partie centrale du bassin serait moins touchée que la Bretagne, le Limousin et l'Auvergne. Ce stress hydrique breton a été mis en évidence dans une autre étude¹⁷.

L'évapotranspiration potentielle et sa possible évolution dans les décennies à venir devrait toujours être prise en compte dans les travaux de réflexion qui utilisent des projections de précipitations. En effet, il faut avoir en tête qu'à quantité de pluie égale, la quantité d'eau qui s'infiltrera dans le sol ou qui ruissellera ne sera pas la même : il y aura plus d'eau à retourner dans l'atmosphère du fait d'une évaporation, et d'une évapotranspiration, plus importantes.

1.4. Les extrêmes climatiques

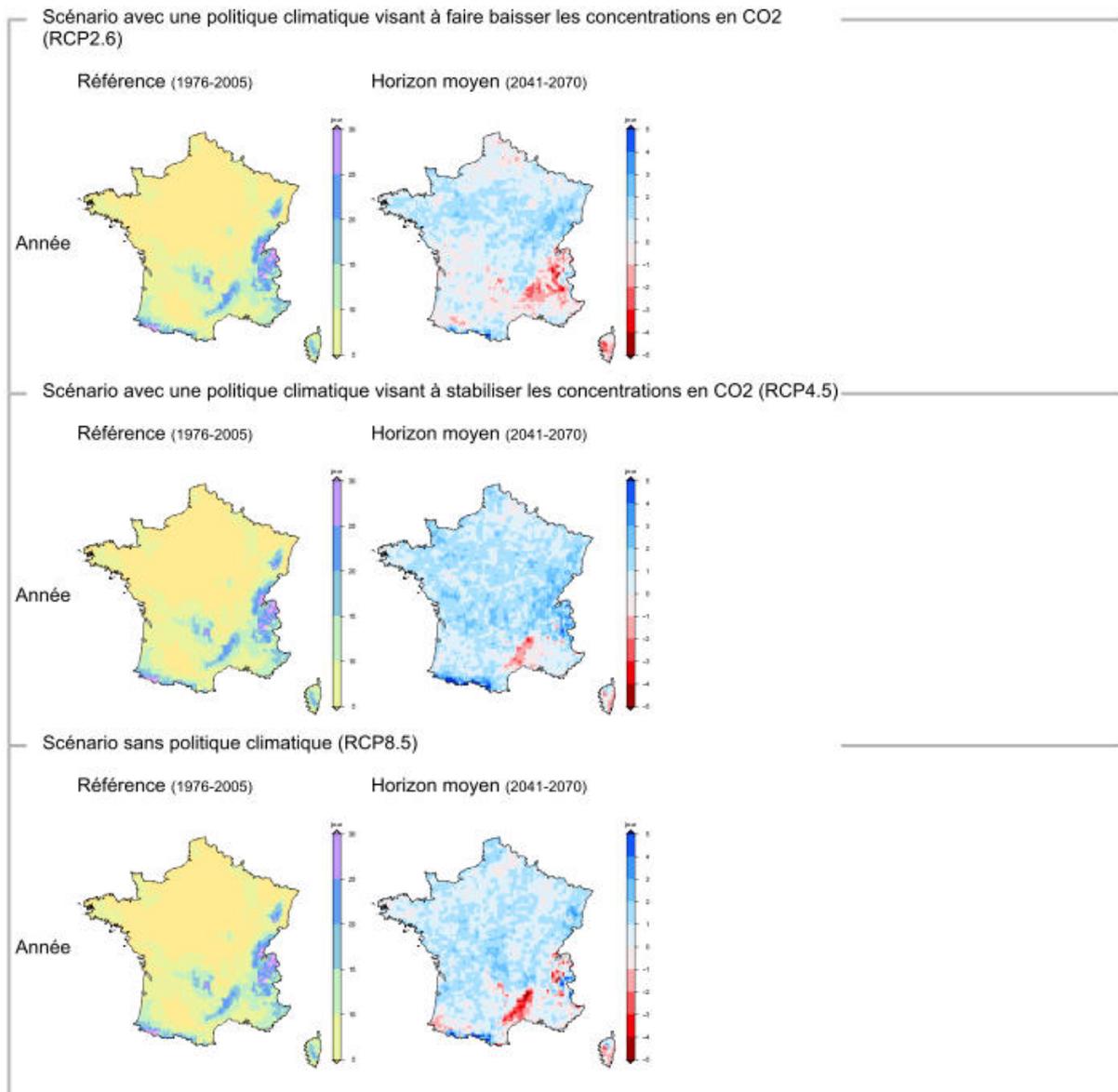
Les fortes pluies

Les cartes ci-dessous¹⁸ présentent l'évolution du nombre de jours de fortes précipitations sous la forme d'une anomalie par rapport à une période de référence, en fonction des scénarios d'évolution des émissions de gaz à effet de serre. Il y a une « forte précipitation » lorsqu'il est tombé plus de 20 mm par jour.

¹⁷ Modélisation du bilan hydrique en Bretagne dans le contexte du changement climatique, cas du scénario A1B du GIEC. Lamy C., Dubreuil V., 2011

¹⁸ Drias (déjà cité)

Anomalie du nombre de jours de fortes précipitations : écart entre la période considérée et la période de référence [NBJ], Météo-France/CNRM2014 : modèle Aladin de Météo-France



On observe que sur le bassin, il faut s'attendre à ce qu'il y ait 1 à 3 jours par an supplémentaires de fortes précipitations. À noter que le modèle de l'IPSL (non présenté) est plus pessimiste, avec des projections de l'ordre de 4 jours de fortes précipitations sur une plus grande partie du bassin.

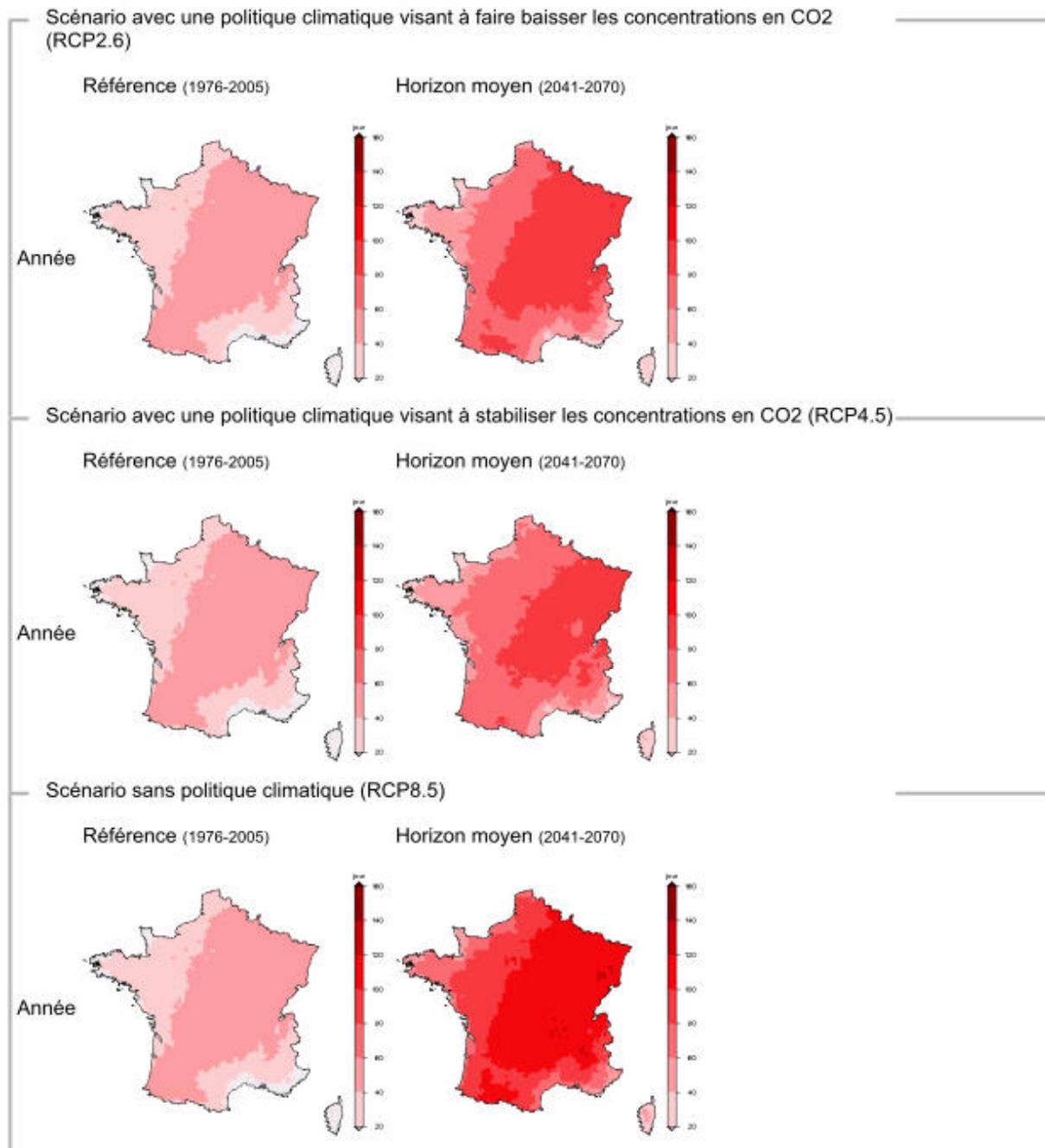
Certains scientifiques parlent d'une « intensification du cycle hydrologique », liée au fait que l'atmosphère contient plus de vapeur d'eau (Cf supra : relation de Clausius-Clapeyron). Il faut noter qu'il y a plus d'incertitudes concernant les événements extrêmes, comme les orages violents, que pour les modélisations de précipitations en général.

Les fortes chaleurs

Les cartes ci-dessous¹⁹ présentent l'évolution du nombre de jours anormalement chauds, en fonction des scénarios d'évolution des émissions de gaz à effet de serre. Une jour est considéré comme anormalement chaud lorsque la température maximale est supérieure de plus de 5°C à la normale.

¹⁹ Drias (déjà cité)

Nombre de jours anormalement chauds [NBJ], Météo-France/CNRM2014 : modèle Aladin de Météo-France



On observe que le bassin Loire-Bretagne n'est pas le plus touché de la métropole française, et qu'un gradient nord-ouest/sud-est est bien visible. Ainsi :

- sur la pointe ouest de la Bretagne, on passerait de moins de 20 jours à potentiellement 20 à 60 jours anormalement chauds selon les scénarios ;
- en Auvergne, on passerait de moins de 60 jours à potentiellement 80 à 120 jours anormalement chauds selon les scénarios.

La Datar des Pays de la Loire²⁰ a également relevé une hausse probable du nombre de jours de canicule.

²⁰ Stratégie d'adaptation au changement climatique dans le Grand Ouest - Datar 2013

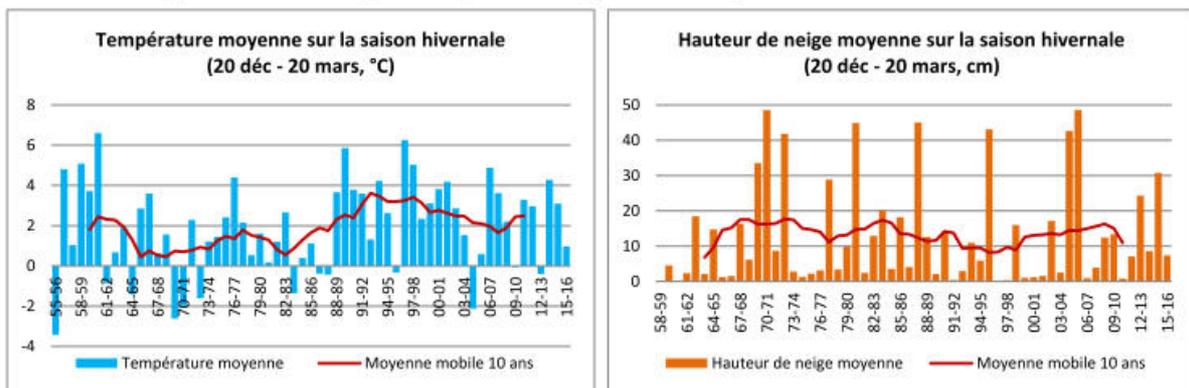
1.5. Évolution de l'enneigement

L'enneigement et les enjeux associés (comme le tourisme ou le stockage naturel de l'eau en hiver) ne constituent pas un enjeu majeur dans le bassin Loire-Bretagne ; on ne le retrouve d'ailleurs pas dans l'état des lieux 2013 du bassin²¹. Le bilan des connaissances sur les impacts du changement climatique dans le domaine de l'eau sur les bassins Rhône-Méditerranée et Corse²², explique toutefois : « *Le manteau neigeux devrait également subir des modifications en conséquence du changement climatique. Le couvert neigeux devrait diminuer, en volume et en durée (Leblois, 2003). Cette diminution serait prononcée aux basses altitudes et de moins en moins marquée vers les hautes altitudes. La quantité d'eau dans le manteau neigeux devrait donc baisser, avec un pic avancé d'environ un mois en haute altitude (Boé, 2007).* »

L'Onerc a mis en place depuis septembre 2016 un indicateur sur le stock nival dans les massifs montagneux français au 1^{er} mai. Cet indicateur ne concerne que les Alpes et les Pyrénées. Il met en évidence que « *Au 1er mai, le stock nival se réduit sur tous les massifs en moyenne de 20 kg/ m² par décennie, soit -12 % par rapport à la normale 1981-2010* ».

L'Orecc (Observatoire régional des effets du changement climatique, dans la région Auvergne Rhône-Alpes) a mis au point des indicateurs de suivi sur quelques paramètres climatiques. La synthèse de juin 2017 présente notamment les deux graphes ci-dessous, qui concernent la station du Sancy, au Mont Dore (Puy-de-Dôme).

→ Évolution des paramètres climatiques : température moyenne et enneigement sur la saison hivernale



On observe une **augmentation de +1°C** entre la période climatique 1957/1986 et la suivante, 1987/2016. Le réchauffement est donc avéré sur cette station de mesure.

La **différence de hauteur de neige moyenne** entre les périodes 1959/1988 et 1987/2016 est de -4 % (diminution de 3 cm), ce qui n'est pas significatif statistiquement.

Extrait de « *Changement climatique et tourisme en Auvergne Rhône-Alpes
Températures, enneigement et fréquentation des domaines skiables* »
ORECC – juin 2017

2. Une ressource en eau impactée en quantité et en qualité

2.1. Température de l'eau

La température de la Loire a déjà augmenté d'environ 0,8°C en moyenne annuelle et estivale au cours du siècle dernier, cette élévation s'accroissant depuis la fin des années 1980²³. L'étude Explore 2070²⁴ prévoit une augmentation moyenne de 1,6°C de la température des eaux superficielles, avec des augmentations allant de 1,1 à 2,2°C. Il existe une forte incertitude autour de ces résultats, liée aux

²¹ État des lieux du bassin Loire-Bretagne établi en application de la directive-cadre sur l'eau – Comité de bassin Loire-Bretagne – décembre 2013

²² Impacts du changement climatique dans le domaine de l'eau sur les bassins Rhône-Méditerranée et Corse - Bilan des connaissances. Agence de l'eau Rhône-Méditerranée et Corse, septembre 2012.

²³ Source : Moatar F. et Gaillard J., 2006

²⁴ Explore 2070 – Ministère chargé de l'environnement

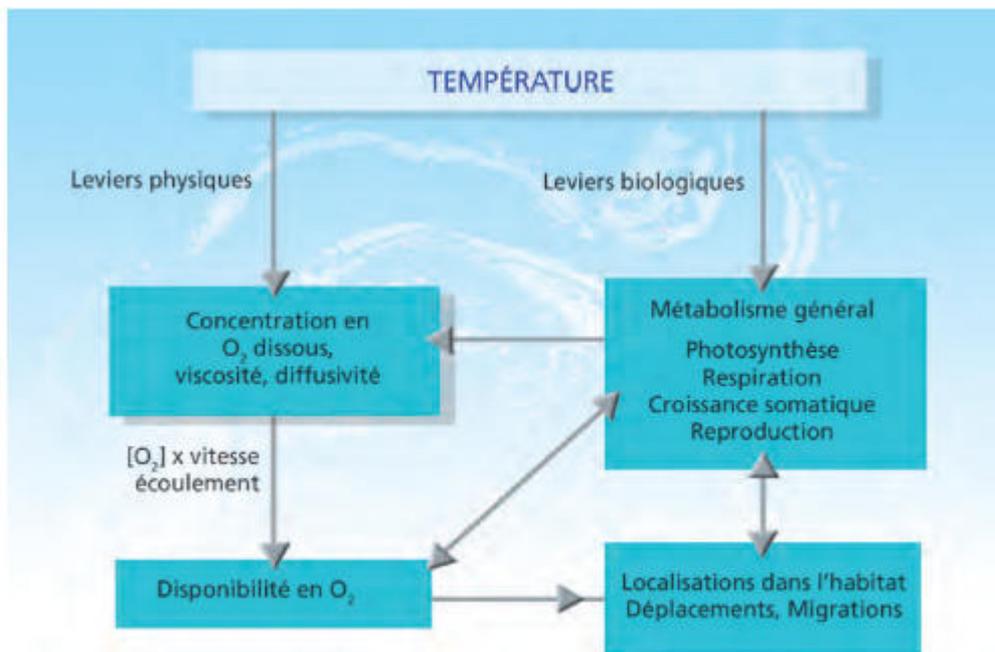
incertitudes sur la façon dont la température de l'air va évoluer. Il faut également savoir que la température de l'eau des nappes, qui alimentent les cours d'eau, est réputée comme ne changeant pas par rapport à aujourd'hui dans la modélisation, alors que l'on sait que l'eau des aquifères se réchauffera très probablement aussi.

La hausse des températures de l'eau concernera les eaux douces (lacs et rivières) comme les eaux salées (littoral et estuaires). Selon les différents scénarios du GIEC, la température de surface des océans augmentera de 1°C (scénario optimiste) à 3°C (scénario pessimiste). Il faut s'attendre à ce que les plans d'eau, dans lesquels une eau non courante sera soumise à une température de l'air extérieur plus élevée, voient mécaniquement leur température augmenter de façon plus importante. Cela induira également une évaporation plus intense.

2.2. Impacts sur la qualité de l'eau

Au-delà de la seule température, la qualité de l'eau aura tendance à se dégrader. L'eutrophisation, stimulée par la chaleur, engendrera une consommation plus importante de l'oxygène. À Montjean-sur-Loire, la production d'algues pourrait augmenter de 40%²⁵ (dans l'hypothèse d'apports d'azote et de phosphore identiques à ceux de 2001 et 2002, avec les projections climatiques et hydrologiques de 2050 dans un scénario pessimiste).

Le schéma ci-dessous explicite les conséquences de l'augmentation de la température sur la concentration en oxygène et les milieux aquatiques.



Processus reliant la température à la disponibilité en oxygène et ses impacts sur les écosystèmes aquatiques (d'après Dumont et al. 2007). Pour rappel, la concentration maximale en oxygène dissous dans l'eau diminue quand sa température augmente. Par exemple, à 10°C, la concentration maximale en oxygène dissous est de 11mg/L et, à 30°C, cette concentration maximale n'est plus que de 7 mg/L.

Des pluies intenses plus fréquentes (voir plus haut) pourront engendrer, selon les cas (type de sol, labouré ou non..),

- un ruissellement et une lixiviation plus importante qui chargeront les cours d'eau en matière organique et en eau peu oxygénée ;
- un lessivage en profondeur, vers la nappe souterraine, de particules non solubles (comme les argiles par exemple).

L'étude de l'Onema (devenue l'AFB) sur les populations de poissons²⁶ cite que « certains facteurs environnementaux comme le rayonnement UV dont la distance de pénétration dans la colonne d'eau

²⁵ Étude ICC-hydroqual de l'Établissement Public Loire – 2010

²⁶ Les poissons d'eau douce à l'heure du changement climatique : état des lieux et pistes pour l'adaptation. Baptist F., Poulet N., Seon-Massa N. Onema - 2104.

est largement dépendante du pH et de la transparence des eaux (deux paramètres pouvant subir l'influence du changement climatique) pourraient venir modifier la toxicité même de certains contaminants, en augmentant la réactivité de ces derniers par un phénomène appelé photo-activation. »

Dans les estuaires et sur le littoral, l'évolution de la qualité de l'eau douce aura des conséquences sur les milieux aquatiques, dont les micro-algues, qui s'ajouteront :

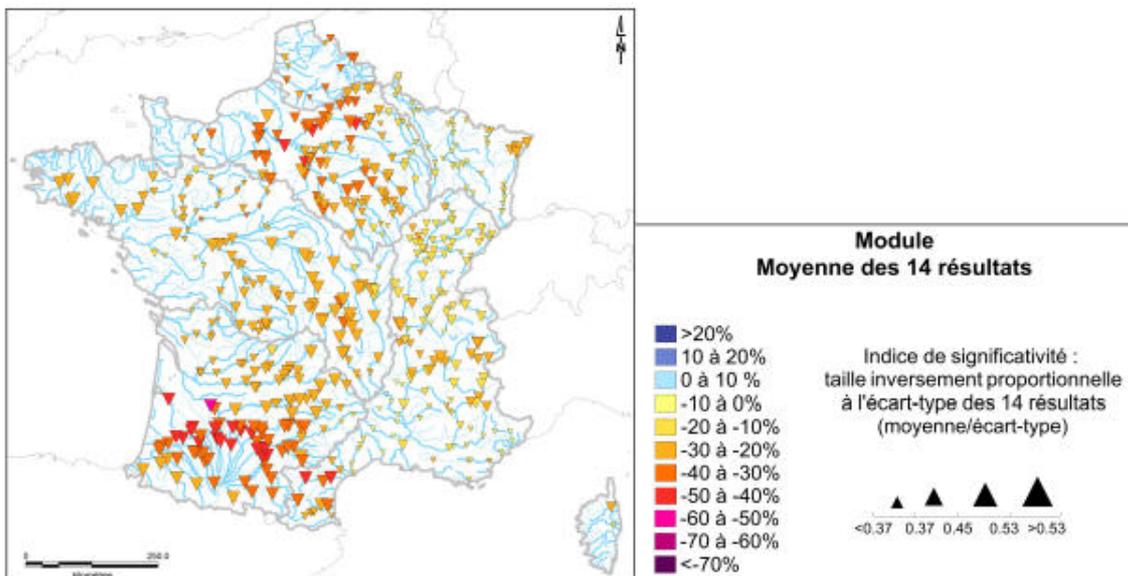
- à l'augmentation de la salinité due à l'apport moins important d'eau douce fluviale (baisse des débits) ;
- à la baisse du pH (acidification de l'eau due à l'absorption plus importante de CO₂ par les mers et océans) ; depuis le début du XX^{ème} siècle, le pH des océans a déjà diminué de 0,1 unité²⁷ ; cette baisse aura un impact sur la fixation du calcium par les coquillages ;
- à la hausse de la température de l'eau de mer, qui peut avoir un impact sur les migrations des espèces ;
- à la modification des grands courants océaniques, encore sujette à beaucoup d'incertitudes (notamment à cause de l'impact très difficile à estimer de la fonte des glaces de l'Antarctique).

2.3. Évolution des débits

L'étude Explore 2070²⁸ a permis de modéliser les débits des cours d'eau, ce qui donne une idée de la sécheresse hydrologique. Le résultat de l'étude pour le module (débit moyen annuel) et le QMNA5 (débit minimum mensuel de fréquence quinquennale) est présenté sur les deux cartes ci-après. Pour chaque point de mesure, 14 résultats de calcul sont disponibles, résultant de simulations fondées sur deux modèles hydrologiques et sept modèles de circulation générale (MCG).

Évolution du module

Figure 1 : Evolutions relatives possibles (en %) du débit moyen annuel entre 1961-90 et 2046-65 : Résultats moyens établis sur les 14 simulations (2 modèles hydrologiques x 7 MCG). La couleur des points est fonction de l'intensité du changement et la taille des points est liée à la convergence des 14 simulations.



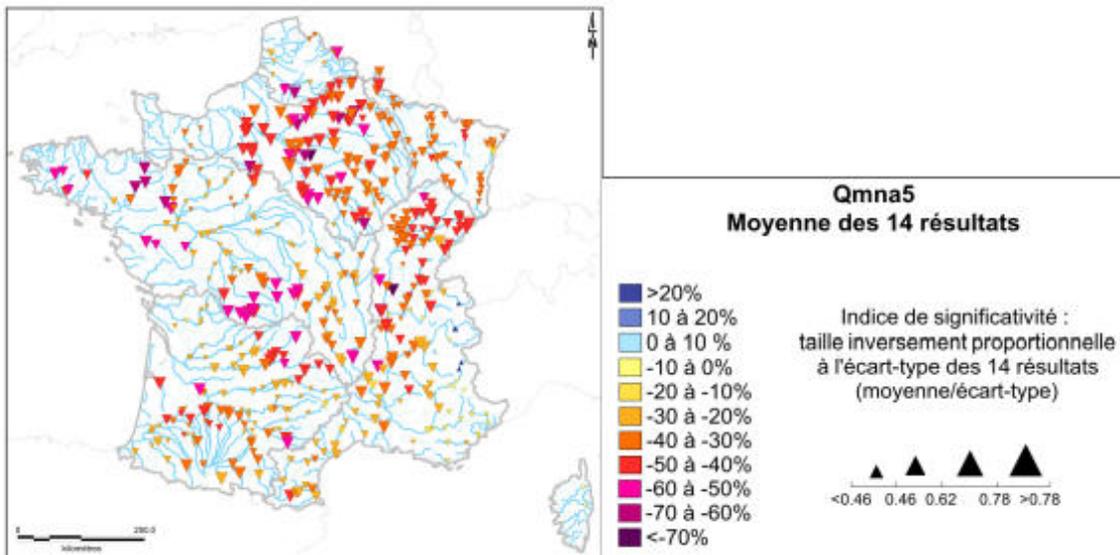
Concernant le module, le bassin Loire-Bretagne sera moins touché par la baisse du débit moyen annuel que les bassins Adour-Garonne et Seine-Normandie. Il faut pourtant bien voir que les modules des cours d'eau devraient tous baisser, de -10 à -40%.

²⁷ CNRS, L. Bopp, 2015

²⁸ Explore 2070 – déjà cité

Évolution du QMNA5

Figure 3 : Evolutions relatives possibles (en %) du QMNA5 entre 1961-90 et 2046-65 : Résultats moyens établis sur les 14 simulations (2 modèles hydrologiques x 7 MCG).



Dans le bassin Loire-Bretagne, le débit d'étiage accuse une baisse plus marquée que le module, avec des simulations pouvant atteindre -60% sur certains bassins des Pays de la Loire ou du Limousin.

L'étude ICC Hydroqual²⁹, qui a réalisé sur la Loire des modélisations différentes de celles d'Explore, conclut à une baisse des débits des cours d'eau tout au long de l'année avec une plus forte proportion en période estivale. Les débits moyens et les débits d'étiage diminueraient de 25 à 40%.

Évolution des débits de crue

L'étude Explore n'a pas pu montrer de tendance significative sur la majeure partie du territoire. Le bassin Loire-Bretagne serait plutôt concerné par une baisse de 10 à 20% de la crue journalière de fréquence décennale.

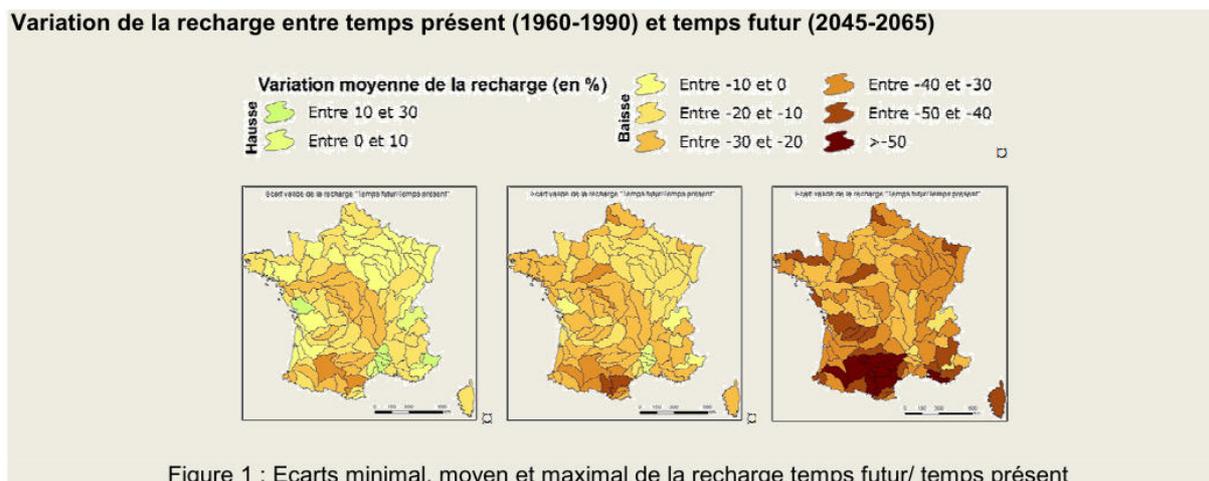
La thèse citée plus haut³⁰ a également analysé l'évolution des débits. Les résultats convergent avec ceux des études précédentes, avec « une augmentation de l'évapotranspiration, une diminution des débits et un assèchement des sols ». La thèse a utilisé plusieurs modèles climatiques globaux, et plusieurs modèles de débits. Elle pointe les fortes incertitudes qui influent sur les résultats, mais malgré cela elle conclut que « les changements de débits annuels [seront] plus forts sur la Loire, la Garonne et le Rhône que les changements maximaux observés pendant le XXème siècle ».

2.4. Évolution des ressources en eau souterraine

La variation de la recharge des aquifères entre temps présent et temps futur a été étudiée dans le cadre du projet Explore 2070. Mis à part dans le centre de la Bretagne selon un scénario optimiste, tous les scénarios prédisent une baisse de la recharge sur l'ensemble du bassin, celle-ci pouvant atteindre 50%.

²⁹ Déjà citée

³⁰ « Evolution du cycle hydrologique continental en France au cours des prochaines décennies ». G. Dayon, Université de Toulouse - 2015



L'observatoire Oracle de Poitou-Charentes n'a jusqu'à 2016 pas observé de tendance nette à la baisse de la recharge des aquifères.

Un réseau piézométrique géré par le BRGM³¹ est désormais en place sur le territoire national, avec 8 aquifères surveillés dans le bassin Loire-Bretagne :

- En Auvergne : chaîne des Puys (153AA)
- En Bretagne : socle breton (2 aquifères : 193AE et 193AA)
- En Centre-Val de Loire : calcaires de Beauce (107AA), Calcaires du Jurassique supérieur (135AC),
- En Limousin : massif granitique (201AE)
- En Pays de la Loire : Cénomaniens dans le bassin de la Sarthe (123AB05) et sables du Pliocène (104AB).

Deux autres aquifères avaient été sélectionnés mais aucun point de suivi répondant aux critères de l'étude n'a pu être trouvé.

Le cas des aquifères côtiers

Le BRGM a réalisé deux études³² sur les conséquences de la montée du niveau de la mer sur les aquifères côtiers, en utilisant des données sur les prélèvements et sur la sensibilité des nappes. Sur le bassin Loire-Bretagne, c'est la côte nord-est de la Bretagne et la côte nord du Poitou-Charentes qui sont les plus vulnérables.

³¹ Vernoux JF (2015) – Réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines. Rapport final. BRGM/RP-64858-FR, 51p, 18 fig., 7 tabl., 1 ann.

³² - Dörfliger N., Dumon A., Aunay B., Picot G., avec la collaboration de Moynet C. et de Bollard M. 2011a. Influence de la montée du niveau de la mer sur le biseau salin des aquifères côtiers des DROM/COM. BRGM RP-60828-FR et « Montée du niveau marin induite par le changement climatique : conséquences sur l'intrusion saline dans les aquifères côtiers en métropole ». BRGM/RP-60829-FR. Dörfliger N., Schomburgk S., Bouzit M., Petit V., Caballero Y., Durst P., Douez O., Chatelier M., Croiset N., Surdyk N.. Décembre 2011.

Le changement climatique pourra causer une perte de « synchronie trophique entre les espèces » : cette expression désigne la bonne cohérence des périodes de prolifération de certains individus avec celles d'individus qui s'en nourrissent.

Des conséquences sont également attendues sur la distribution des espèces, celles-ci pouvant soit s'adapter aux nouvelles conditions de vie, soit migrer vers de nouveaux espaces. Ces mouvements sont d'ailleurs déjà observés, et affectent plutôt les espèces dont la localisation géographique est située à l'amont (zones à truites, zones à barbeau), les autres espèces (dans les zones à brèmes) ayant plutôt tendance à étendre leur aire de distribution. « *De manière générale, l'ensemble des modèles annonce un glissement des aires de répartition des espèces d'eau froide vers les zones amont.* »

L'étude explique également que les poissons ne sont pas les seuls organismes aquatiques qui sont et seront impactés et prend les exemples des cyanobactéries ou des macroinvertébrés. Pour ces derniers, les taxons sont selon les cas favorisés ou au contraire pénalisés par les nouvelles conditions climatiques.

Enfin, l'étude note que « *Le changement climatique ne constitue de fait que l'un des éléments du changement global. Il est donc crucial de souligner que les pressions anthropiques et la modification du climat agissent de concert et tendent à renforcer la vulnérabilité des milieux et de leurs espèces (par exemple le renforcement de l'augmentation de la température de l'eau en réponse à une réduction des débits des cours d'eau).* ».

L. Buisson (thèse de 2009, « Poissons des rivières françaises et changement climatique ; impacts sur la distribution des espèces et incertitudes des projections ») envisage plusieurs impacts sur les populations de poissons, avec notamment une réorganisation des assemblages d'espèces (les espèces thermophiles ou venant de latitudes inférieures devenant dominantes), et une homogénéisation de ces assemblages. Les assemblages de poissons des têtes de bassin-versant devraient subir de plus importantes modifications de leur diversité et de leur composition que ceux situés à l'aval, qui seraient moins affectés.

L. Comte (thèse de 2013, « Changements globaux et distribution spatiale des espèces de poissons d'eau douce : observations récentes et prédictions futures ») envisage que les mouvements de population de poissons induisent des modifications fortes de leur structure et de leur diversité génétique (érosion). Certaines espèces migreraient vers des altitudes plus élevées, tandis que d'autres s'éteindraient et disparaîtraient des habitats les plus exposés au réchauffement.

M. Floury (thèse de 2013, « Analyse des tendances d'évolution de peuplements de macroinvertébrés benthiques dans un contexte de réchauffement des eaux ») explique que sur la Loire moyenne, les taxons rhéophiles (vivant en milieu courant) et psychrophiles (affectionnant les milieux frais) ont eu tendance à décliner ou disparaître depuis les 30 ans dernières années du fait de l'augmentation des températures de l'eau et dans une moindre mesure de la baisse des débits. Dans le même temps sont apparues des taxons limnophiles (vivant dans les eaux calmes voire stagnantes) et thermophile, dont des espèces invasives comme la corbicule. Il note aussi que l'amélioration des traitements d'épuration, avec la réduction des apports de phosphore, a permis de compenser au moins en partie l'augmentation du niveau trophique de la Loire attendue avec la hausse de la température moyenne de l'eau et la baisse des débits. Pour la même raison, la dérive progressive vers un assemblage généraliste et pollutotolérant a été partiellement confondue (i.e. masquée).

A. Maire (thèse de 2014 : « Comment sélectionner les zones prioritaires pour la conservation et la restauration des communautés de poissons de rivière ? Applications aux échelles de la France et du Pas-de-Calais ») propose une méthode de priorisation afin 1) de déterminer les priorités globales de conservation qui tiennent compte de la biodiversité actuelle et de ses éventuelles modifications dans le futur et 2) d'identifier les mesures de gestion qu'il serait souhaitable de mettre en place en priorité à l'échelle locale pour protéger les milieux naturels et restaurer leurs conditions environnementales naturelles.

Concernant le saumon, une étude est en cours sur l'influence du réchauffement climatique sur la smoltification et sur la migration de dévalaison du saumon de l'Allier » par le laboratoire Arago dans le cadre du contrat de projet interrégional Loire et du programme opérationnel interrégional Feder Loire.

Une étude de 2017³⁶ estime que la moitié des rivières européennes vont changer de régime hydrologique d'ici 2050, la France étant largement concernée. Cela impliquera des changements dans les écosystèmes, et pose au passage la question des « états de référence » définis dans la Directive cadre sur l'eau.

3.1.2. Des écosystèmes humides vulnérables, à fort potentiel pour l'adaptation et l'atténuation

La bibliographie sur le rôle de protection et de prévention que jouent les zones humides littorales est abondante, et le Pôle-relais Zones humides a publié en 2015 une bibliographie³⁷ très complète sur le sujet.

De façon synthétique, parmi les nombreux services écologiques qu'offrent les zones humides, on peut identifier les services suivants comme étant à l'origine du rôle d'« amortisseur climatique » qu'elles jouent³⁸ :

- le service de régulation du climat à travers le stockage du carbone (rôle dans l'atténuation du changement climatique) ;
- le service de protection contre les événements climatiques extrêmes ;
- le service de maîtrise des crues ;
- le service de soutien d'étiage.

Grâce à leur végétation, les milieux humides protègent les rives des cours d'eau et les rivages côtiers contre l'érosion. Ils stockent l'eau dans le sol et diminuent l'intensité des crues, tout en contribuant à la recharge des nappes et au soutien des étiages de cours d'eau.

J. Salmon-Monviola, dans sa thèse³⁹ de 2017, a mis en évidence l'importance des effets de l'augmentation de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère. Celle-ci augmente ainsi la minéralisation de l'azote et la dénitrification des sols dans les zones humides.

3.1.3. Des écosystèmes littoraux exposés mais indispensables à la résilience des zones côtières

Les conséquences du changement climatique sur le littoral concerneront plusieurs fonctions des organismes vivants : leur survie, mais aussi leur croissance, leur calcification, leur capacité photosynthétique...

Deux phénomènes sont attendus sur le littoral :

- La submersion des terres, directement liée à la montée du niveau de la mer ;
- L'érosion du trait de côte, c'est-à-dire le recul vers l'intérieur des terres de la ligne marquant la limite qu'atteignent les eaux marines. La montée du niveau de la mer favorise ce phénomène, de même que les événements violents. L'érosion n'est pas forcément compensée par un engraissement (ou accrétion, c'est-à-dire le phénomène inverse de l'érosion) sur une autre portion du trait de côte.

Les projections du GIEC dans son 5^{ème} rapport⁴⁰ sont moins pessimistes que celles du précédent (qui date de 2007) sur l'élévation du niveau de la mer. Les scientifiques tablent quand même sur une augmentation moyenne de 26 à 98 cm d'ici à 2100. Depuis la publication du rapport, une étude

³⁶ Laizé C et al. (2017) Projected novel eco-hydrological river types for Europe, *Ecology and Hydrobiology*.

³⁷ Changement climatique et zones humides – bulletin bibliographique – mise à jour 03/2015 – Pôle-relais zones humides.

³⁸ Extrait de « Services écologiques rendus par les zones humides en matière d'adaptation au changement climatique : état des lieux des connaissances et évaluation économique ». Tour du Valat – Arles ; Plan Bleu - Valbonne, Avril 2014 – Vaschalde D.

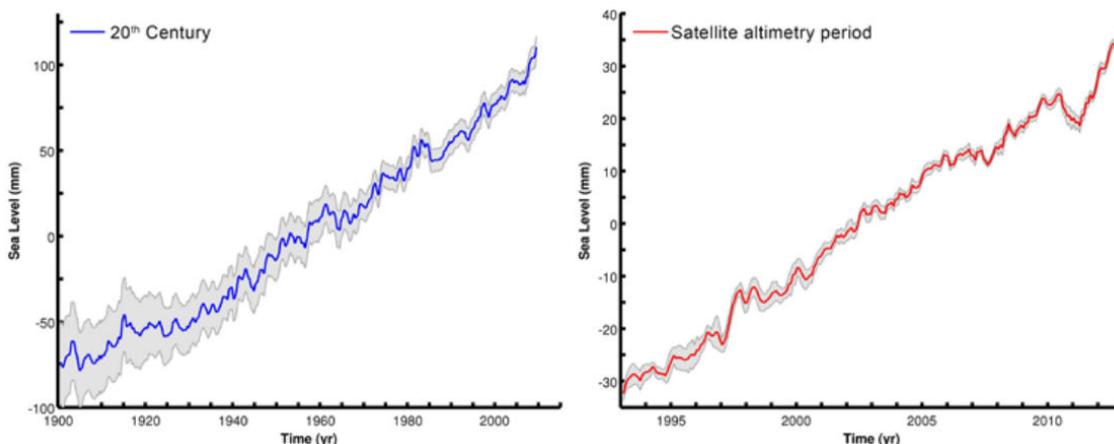
³⁹ « Modélisation agro-hydrologique spatialement distribuée pour évaluer les impacts de changements climatique et agricole sur la qualité de l'eau » - 2017 – Jordy Salmon-Monviola – AgroCampus Ouest

⁴⁰ 1. GIEC, 2013: Résumé à l'intention des décideurs, *Changements climatiques 2013: Les éléments scientifiques*. Contribution du Groupe de travail au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat sous la direction de Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York (État de New York), États-Unis d'Amérique

américaine ⁴¹ prenant mieux en compte la fonte des glaces de l'Antarctique fait l'hypothèse que celle-ci viendrait ajouter 1 mètre d'ici la fin du siècle.

Pour mémoire, entre 1901 et 2010, les océans se sont déjà élevés de 19 cm tandis qu'à Brest, l'océanographe a relevé une hausse de 25 à 30 cm depuis 1711, avec une accélération depuis les années 50. Les études du GIEC montrent qu'en métropole, 31% des côtes sableuses sont vulnérables à l'érosion et à la submersion marine.

Le graphe ci-dessous ⁴² présente l'évolution du niveau de la mer.



Évolution du niveau de la mer en centimètres en moyenne globale pour deux périodes : 1900-2010 (reconstruction à partir de données marégraphiques) à gauche et 1993-2012 (à partir de l'altimétrie spatiale) à droite (Medde – 2015)

La modélisation de la submersion marine peut être faite de façon assez simple en superposant le niveau marin simulé à la topographie. Néanmoins, cette simulation inonde des zones basses plus importantes que celles qui le seraient en réalité, car d'autres phénomènes viennent s'ajouter : la hauteur des vagues, les ouvrages de protection, les écoulements... Le BRGM a déjà réalisé localement ce genre de modélisation plus approfondie.

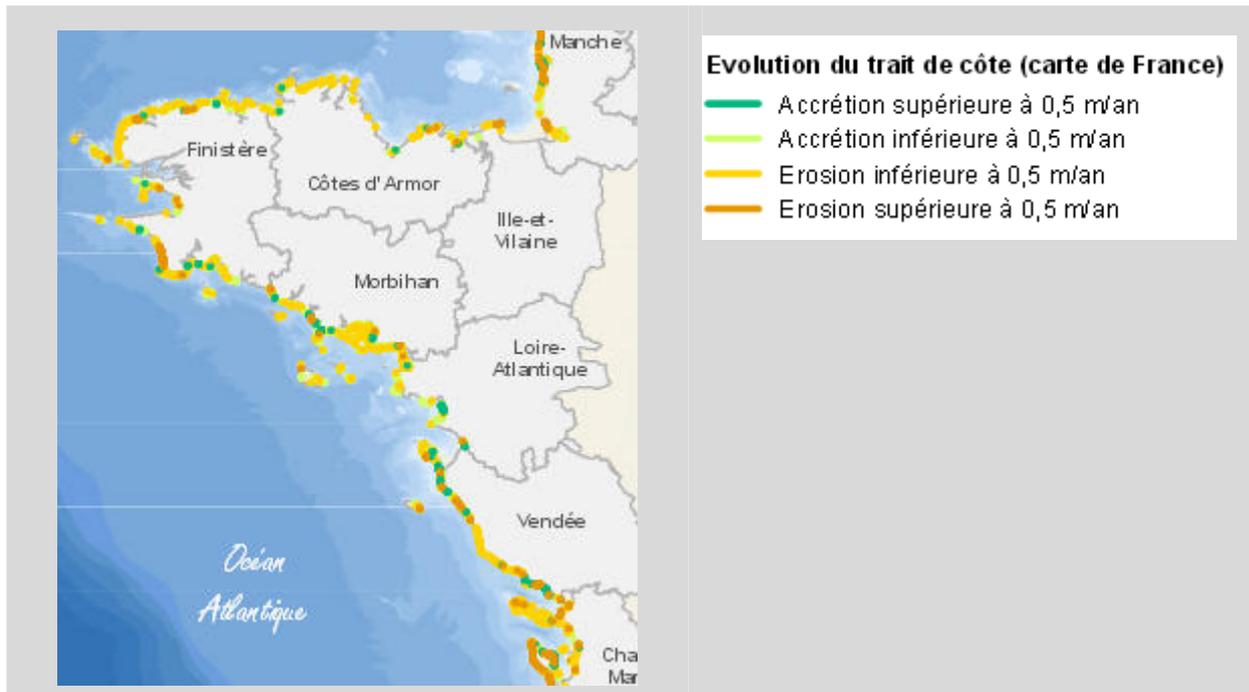
Par ailleurs, au-delà de l'élévation globale du niveau de la mer se pose la question des conséquences du changement de l'amplitude des marées exceptionnelles sur les phénomènes d'érosion comme de submersion.

Un indicateur national de l'érosion côtière a été mis en place ⁴³. Il présente l'évolution passée de cette ligne ; son élaboration rentre dans la stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte. Les cartes sont disponibles sur le site Geolittoral de même que les données cartographiques (un extrait est présenté ci-après). Au-delà de la mobilité du trait de côte, des phénomènes d'abaissement de plage sont observés.

⁴¹ DeConte R. (Université du Massachusetts) et Pollard D. (Université de Pennsylvanie) étude publiée dans la revue Nature le 31/03/2016 et citée dans Le Monde du même jour

⁴² D'après Church et White (2011) et Cazenave et Le Cozannet (2014) dans le rapport « changement climatique et niveau de la mer : de la planète aux côtes françaises » constituant le 5^{ème} volume de « Le climat de la France au XXIème siècle » (Medde, 2015).

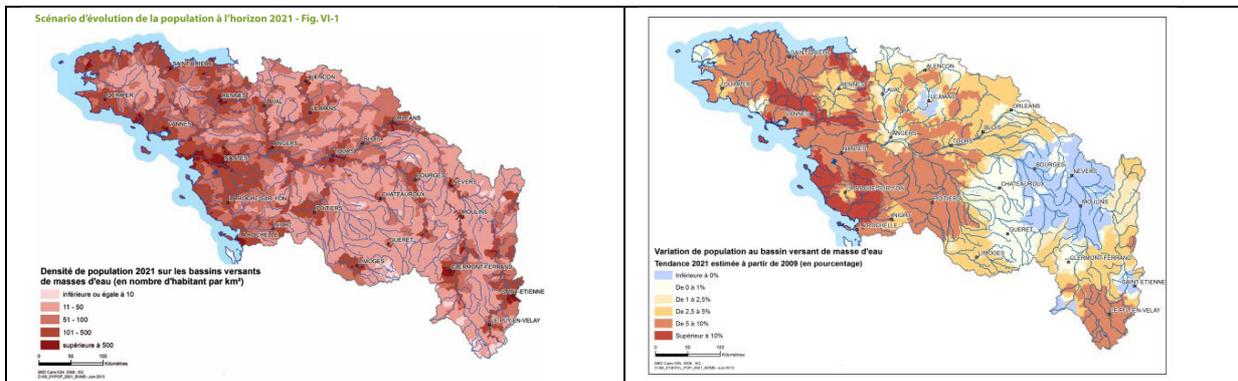
⁴³ « Développer la connaissance et l'observation du trait de côte – contribution nationale pour une gestion intégrée ». Cerema - Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie. 2015. Les données sont disponibles sur le portail Geolittoral (<http://www.geolittoral.developpement-durable.gouv.fr>)



Évolution du trait de côte en métropole
(Source : geolittoral)

Depuis la fin des années 60, l'accroissement de la population dans les communes du bord de mer est supérieur à la moyenne métropolitaine, et la pression de construction y est plus forte : 12,5% des logements construits en métropole entre 1990 et 2007 l'ont été sur ces 4% du territoire⁴⁴. Les cartes de l'évolution de la population publiées dans l'état des lieux 2013⁴⁵ illustrent le fait que la bande littorale est soumise à une pression croissante.

Le CESER Bretagne, qui s'est intéressé aux enjeux de l'eau à l'horizon 2040, relève que 95% de la population bretonne vit à moins de 60 km de la mer.



Extrait de l'état des lieux du bassin Loire-Bretagne
Agence de l'eau - 2013

Les habitats naturels côtiers participent à la résilience du milieu, en jouant un rôle de « tampon » vis-à-vis de l'érosion comme de la submersion. Ils amortissent l'énergie des vagues et des tempêtes (et protègent du même coup les biens et les personnes), constituent des réserves de biodiversité, et des espaces naturels de qualité.

Suite à la tempête Xynthia, de nombreuses études ont été réalisées pour essayer d'anticiper sur les risques futurs et les dégâts potentiels. Cette tempête, qui est venue après les tempêtes Lothar et

⁴⁴ Alternatives économiques, septembre 2016, citant les chiffres du Commissariat général au développement durable (Études et documents n°32).

⁴⁵ Déjà cité

Martin en 2009, a en effet suscité une prise de conscience du fait qu'une protection totale par endiguement n'était pas réaliste. Des alternatives sont à trouver.

Des expérimentations sont en cours pour envisager d'autres solutions d'adaptation pour le littoral. Le projet européen Adapt'O en fait partie, avec un site situé à Lancieux (22). Cet ancien polder aménagé depuis le Moyen-Age a été racheté par le Conservatoire du littoral, qui mène une concertation sur les aménagements possibles qui concilieraient restauration et protection de la biodiversité d'une part, et protection des populations d'autre part.

De façon plus générale, l'adaptation du littoral au changement climatique est à envisager à une échelle géographique plus large que celle de la seule zone potentiellement inondable, que ce soit :

- vers l'intérieur des terres, qui sera concerné par une réflexion sur le repli de certaines activités, la conservation ou la restauration des services écosystémiques rendus, l'évolution du front de salinité et du biseau salé aquifère...
- ou vers le milieu marin, concerné par les réflexions sur les conséquences de l'évolution de la qualité des eaux, l'élévation du niveau de la mer, la modification de la faune et de la flore...

Dans le cadre d'une étude sur le marais de Mortagne, la région Aquitaine mène avec l'Irstea une étude qui envisage la dépolderisation comme une opportunité pour recréer des zones de nourricerie pour les poissons. Ce marais est en effet submergé depuis que sa digue de protection a cédé lors de la tempête Martin en 1999 ; il a été rapidement recolonisé par les poissons et les crustacés. L'étude, à poursuivre, analyse les intérêts stratégiques, économiques et écologiques de cette submersion.

Le BRGM a réalisé une étude⁴⁶ sur l'adaptation au changement climatique et les coûts associés pour les risques côtiers, en croisant les enjeux actuels avec les aléas et en utilisant des coûts moyens de référence (coût de la submersion temporaire d'un logement, coût de reconstruction d'une entreprise...) ainsi que diverses hypothèses. Il en ressort que le coût des dommages potentiels dus à l'érosion et la submersion marine permanente (l'hypothèse prise étant celle d'une élévation de 1 mètre du niveau de la mer) est plus important que les coûts des dommages potentiels dus à la submersion marine temporaire. Les stratégies d'aménagement ont tout intérêt à s'appuyer sur ce type d'évaluation.

Dans le cas du littoral, comme pour d'autres territoires du bassin, l'adaptation au changement climatique gagne à être abordée pas uniquement comme une contrainte, mais également comme une opportunité pour repenser certaines politiques ou habitudes et en tirer finalement un bénéfice partagé entre le milieu naturel et les activités humaines.

3.2. Les territoires anthropisés

La problématique de l'adaptation des villes au changement climatique est une illustration de la nécessité de prendre en compte le petit cycle comme le grand cycle de l'eau :

- petit cycle car les villes, notamment sur le littoral, auront à faire face à des tensions plus importantes sur la ressource en eau pour garantir l'alimentation en eau potable des populations ;
- grand cycle car les villes, avec le phénomène des îlots de chaleur urbains, et la possible augmentation de la fréquence des événements secs ou pluvieux intenses, devront trouver des solutions pour entretenir des espaces verts en été tout en absorbant rapidement de grandes quantités d'eau.

La présence de végétation en ville a des bénéfices qui dépassent le fait de faire baisser localement la température (celle-ci baissant plus vite dans les zones moins denses où il y a de la végétation) : les plantes filtrent l'air, peuvent absorber l'eau pluviale,...La végétalisation est plus efficace que l'arrosage des rues lors des épisodes de chaleur (surface peu importante des routes, effet qui est ressenti surtout au ras du sol...). Son développement est cependant actuellement peu compatible avec la tendance observée à la minéralisation des villes, avec de grands espaces dallés. Le rôle des cours

⁴⁶ « Impacts du changement climatique – Adaptation et coûts associés en France pour les risques côtier ». BRGM, Groupe de travail « risques naturels, assurances et adaptation au changement climatique » : G. Le Cozannet, N. Lenôtre, P. Nacass, C. Perherin, C. Vanroye, C. Peinturier, C. Haiji, B. Poupat, C. Azzam, J. Chemitte, F. Pons – 2009

d'eau pour rafraîchir les villes semble quant à lui limité, la fraîcheur étant transportée le long des fleuves sans bénéficier aux espaces latéraux⁴⁷.

Une thèse de Martin Hendel réalisée avec l'Onema avait pour objet : « Rafraîchir les villes de demain : quels (nouveaux) usages de l'eau ? » Si l'arrosage de la chaussée permet, via la vapeur d'eau émise, de rafraîchir l'atmosphère (de 1.3°C en température ressentie), la généralisation de cette solution entraînerait une consommation d'eau supplémentaire de 25 litres d'eau par jour et par habitant (dans l'exemple pris, dans le centre de Paris). La thèse envisage plutôt alors la combinaison de solutions : végétation haute et basse, matériaux frais sur les toitures, façades et revêtements...

Certaines villes, comme Nantes, ont déjà mis en place des capteurs de température et d'humidité, afin d'identifier les quartiers et comprendre, grâce à ces données, les liens entre formes de quartiers, caractéristiques, lieux et températures.

Dans le cas des villes, l'adaptation au changement climatique peut aussi être envisagée comme une opportunité pour rendre la ville plus verte et plus agréable.

Une étude menée conjointement par Météo-France, l'Office national des forêts et l'inventaire forestier national montre qu'il faut s'attendre à une augmentation de la sensibilité de la végétation aux incendies de forêts estivaux.

Une étude⁴⁸ pilotée par l'Établissement Public Loire s'est intéressée à la vulnérabilité des zones bâties inondables du corridor ligérien, afin de mieux anticiper les effets du changement climatique sur les régimes hydrologiques de la Loire. Elle a permis de collecter des données et d'élaborer des méthodes.

4. Conséquences du changement climatique sur les usages actuels et à venir de l'eau

D'une manière générale, les conséquences sur les activités humaines ont été analysées par les CESER, notamment ceux des Pays de la Loire et de Bretagne (déjà cités). Le CESER Bretagne pointe ainsi le fait que « la limitation de l'usage de l'eau serait susceptible de devenir un frein au développement économique de certaines activités en Bretagne. » Il pose la question de la définition d'une « empreinte eau des productions et des activités », qui pourrait devenir « un nouvel indicateur, ou une clause d'éco-conditionnalité des produits marchands ».

4.1. L'agriculture

L'activité agricole est très liée au climat et les agriculteurs ont à la fois constaté certains changements climatiques et commencé à mettre en place des stratégies d'adaptation. L'atténuation du changement climatique fait également l'objet de beaucoup de recherches et projets, par exemple avec le programme « 4 pour 1000 » qui vise à augmenter chaque année le stock de carbone des sols de 4 pour 1000 (et donc la séquestration de carbone).

En 2003, dans une étude prospective sur l'eau et les milieux aquatiques⁴⁹, l'INRA et le Cemagref pointaient l'eau et les risques qui lui sont liés (inondations, sécheresses...) comme un enjeu majeur du développement local. Déjà, le caractère nécessairement local de la gestion était souligné : comme le besoin, la ressource dépend de conditions qui varient, et varieront, dans le temps et dans l'espace. Différents scénarios prospectifs sont envisagés, avec des hypothèses sur le marché de l'eau potable, la politique agricole commune, les politiques territoriales,...

Une conséquence très importante pour l'agriculture concerne la baisse de la disponibilité de la ressource en eau, liée d'une part à la baisse attendue des précipitations estivales (sans signal clair d'une augmentation des précipitations hivernales) et à l'augmentation de l'évapo-transpiration potentielle. Une possibilité d'adaptation réside dans la construction de retenues qui stockeraient l'eau en hiver. L'incertitude qui pèse sur l'évolution des précipitations hivernales, ajoutées aux autres enjeux environnementaux, rend nécessaire la réalisation d'études d'impact détaillées. D'autre part,

⁴⁷ Environnement et technique, juillet 2016

⁴⁸ Etablissement Public Loire – Programme 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 - 2011

⁴⁹ INRA, Cemagref – Prospective, l'eau et les milieux aquatiques, enjeux de société et défis pour la recherche – décembre 2003

une étude est en cours⁵⁰ qui a pour objectif d'expertiser l'impact cumulé des retenues d'eau sur un bassin-versant.

Toutefois, la problématique de la quantité ne doit pas occulter les conséquences du changement climatique qui affecteraient la qualité des eaux. En effet, la lutte contre certains ravageurs dont l'expansion est déjà constatée (comme la pyrale du chou) pourrait conduire à une utilisation plus importante de produits pesticides, créant ainsi un risque de pollution diffuse.

Certaines conséquences du changement climatique seront très directes : par exemple, le fait qu'il y ait moins de précipitations estivales entraînera mécaniquement une augmentation de la concentration des lisiers dans les fosses qui ne sont pas couvertes (ce phénomène a déjà été observé).

Les observatoires Oracle, mis en place par les Chambres d'agriculture de Poitou-Charentes et Pays de la Loire, et dont la mise en place dans d'autres régions est en cours, regroupent divers indicateurs, (dont certains ont été présentés plus haut) :

- sur le changement climatique : cumul de précipitations...
- sur « l'agro-climat », i.e. des indicateurs climatiques particulièrement pertinents pour l'agriculture comme le nombre de jours échaudants au printemps...
- sur les impacts agricoles : date de récolte du maïs grain...
- sur les adaptations : date de semis du blé tendre d'hiver...
- sur les atténuations : surfaces en légumineuses à graines en grande culture...

Fondés sur des observations passées, ils mettent en évidence, ou pas, des indices du changement climatique en cours.

Les chambres d'agriculture cherchent à améliorer leurs connaissances pour mieux anticiper les effets du changement climatique. Outre Oracle qui s'intéresse à l'évolution passée du climat, elles développent des outils comme :

- Agri-accept, qui consiste en une projection tendancielle de variables climatiques à moyen terme ;
- CLIMA XXI, qui modélise les effets du changement climatique à une plus longue échéance.

Le projet Climator a été mené de 2007 à 2010 sous maîtrise d'ouvrage de l'agence nationale pour la recherche. Il a établi une évolution potentielle du climat à partir de différentes hypothèses, puis caractérisé l'agriculture française par un nombre limité mais représentatif de productions végétales, de sites, de sols et d'itinéraires techniques. Cela a permis d'observer les impacts potentiels du changement climatique. Les conclusions sont organisées

- par thème, avec
 - o le timing ; diverses possibilités de modification des calendriers culturaux pour répondre à l'augmentation des températures sont envisagées ;
 - o l'eau ; le bilan hydrique sera de plus en plus déséquilibré ; cela se fera sentir sur le confort hydrique des cultures pluviales, et sur les capacités d'irrigation des cultures irriguées ;
 - o l'irrigation : les besoins vont évoluer et le rapport considère l'avancée des calendriers d'irrigation, renforcée par des choix variétaux plus précoces, comme une adaptation efficace à la moindre disponibilité en eau. « *La baisse probable des précipitations hivernales, généralisée dans le futur lointain, entraînera des difficultés de recharge des aquifères. Les projets d'accroissement des capacités de stockage d'eau pour l'irrigation devront en tenir compte.* »
 - o la matière organique, dont le stock dans le sol dépend beaucoup du système de culture ;
 - o la santé, avec une baisse de la pression des maladies fongiques pour les trois exemples étudiés grâce à une moindre humidité ;
 - o le rendement, dont les facteurs limitants dépendront plus fortement des conditions d'alimentation hydrique et des fortes températures en fin de cycle ;
- par culture. « *Le changement climatique, tel qu'il est prévu par les modèles climatiques, ne provoquera ni dégradation ni amélioration générale des possibilités de culture.* » Pour chaque culture (blé, maïs, sorgho, prairie, colza, tournesol, vigne ainsi que pour la forêt et l'agriculture biologique), les opportunités et les vulnérabilités sont ainsi passées en revue ;
- par région (sud –ouest, centre-est...)

⁵⁰ Étude en cours de l'Irstea, l'Inra, l'Onema et le Ministère chargé de l'Environnement.

Centrée sur le grand Ouest, l'étude Climaster s'est intéressée aux évolutions des systèmes agricoles et des ressources naturelles. Ses résultats indiquent :

- que le climat a déjà changé dans l'Ouest ;
- que la conduite des surfaces fourragères (herbe et maïs) devrait être plus souple, même si des incertitudes persistent ;
- que la ressource en eau est fragilisée et plus variable, et l'érosion des sols plus fréquente ;
- que les agriculteurs sont ouverts à la réflexion, pour peu qu'ils se reconnaissent dans les systèmes agricoles de référence choisis et que la réflexion soit positionnée par rapport à des situations ou des accidents vécus. La problématique de la qualité actuelle de l'eau rend difficile le questionnement à long terme.

La prairie devrait profiter de la plus forte concentration en dioxyde de carbone de l'atmosphère, qui lui permet de mieux récupérer après un épisode de sécheresse⁵¹, en stimulant la croissance des racines (permettant ainsi une repousse plus rapide après la fin de l'épisode de sécheresse). L'observatoire Oracle de Poitou-Charentes n'a pas observé d'évolution de la date de reprise de la végétation. La Dreal Pays de la Loire⁵², en exploitant les données d'Explore 2070 et celles de Climator, envisage une avancée des dates de mise à l'herbe, sous réserve d'une portance des sols suffisante.

Le programme « Life-Adviclim », piloté par plusieurs organismes de recherche français et européens, a pour objectif de faire des « *observations à haute résolution des scénarios d'adaptation et d'atténuation pour la viticulture* ». Le Val de Loire fait partie des sites d'expérimentation et de démonstration ; il a été équipé d'un réseau d'outils de mesures agroclimatiques à l'échelle locale des vignobles. Les viticulteurs peuvent ainsi évaluer les impacts du changement climatique sur leurs parcelles et simuler des scénarios d'adaptation.

4.2. Les conséquences sur le petit cycle de l'eau

La production d'eau potable sera affectée par le changement climatique de plusieurs façons :

- en termes de qualité. Comparativement aux autres bassins français, le bassin Loire-Bretagne a plus recours aux eaux superficielles pour la production d'eau potable, or il s'agit d'une ressource plus sensible à la pollution, à l'évaporation, et qui nécessite plus d'énergie pour être rendue potable. Le développement des cyanobactéries, favorisé par le réchauffement des eaux, complique le traitement de l'eau en interdisant le recours à certaines techniques (comme l'ultrafiltration).
- En termes de quantité, avec des conflits d'usages potentiellement plus fréquents dans un contexte de raréfaction de la ressource à certaines périodes de l'année.

La réutilisation des eaux usées traitées fait partie des solutions envisageables pour s'adapter à la raréfaction de la ressource. Irstea et Ecofilae ont réalisé des études coûts/bénéfices sur trois projets existants⁵³, en comparant la situation actuelle avec une situation où le projet n'aurait pas été mis en œuvre : réutilisation d'eaux usées d'une sucrerie et d'une Step près de Clermont-Ferrand, arrosage d'un golf à partir d'une Step dans le Morbihan et un cas de multi-usages des eaux usées traitées.

L'étude souligne que, pour que la réutilisation des eaux usées traitées soit réellement intéressante, deux conditions, en sus des contraintes réglementaires éventuelles, devraient être remplies :

- une demande à proximité de l'offre en eaux usées traitées pour minimiser les investissements nécessaires en matière de réseau de distribution et assurer une certaine rentabilité économique et financière pour les différents acteurs concernés ;
- un respect de certains critères qualitatifs et quantitatifs des masses d'eau à la fois réceptacles des eaux de la station d'épuration et des eaux qui feraient l'objet de substitution par les eaux usées traitées.

L'étude aborde seulement le premier point. Elle indique que le second, normalement préalable au premier, est particulièrement important et est de nature à nuancer très fortement les opportunités quantitatives de réutilisation des eaux usées traitées. Il est en effet difficilement envisageable de supprimer un rejet de station d'épuration en période estivale dans un cours d'eau dont le débit objectif

⁵¹ Roy J. (CNRS) et Picon-Chochard C. (Inra) - 2016

⁵² Zoom sur le changement climatique, la ressource en eau et l'agronomie en Pays de la Loire – Dreal - 2013

⁵³ S. Loubier et R. Declercq, Analyses coûts-bénéfices sur la mise en œuvre de projets de réutilisation des eaux usées traitées (REUSE) - application à trois cas d'études français, juin 2014, éd. Irstea, 37 p.

d'étiage (DOE) est difficilement atteint. Cela pourrait être envisageable si les eaux usées traitées sont utilisées par un usager remplaçant un prélèvement dans cette même masse d'eau. À l'opposé, des rejets en mer pourraient être partiellement supprimés si une demande locale existait.

L'analyse coûts-bénéfices a identifié des conditions de « succès ». En premier lieu, la proximité géographique de la station d'épuration et des utilisateurs potentiels de l'eau réutilisée (agriculteurs, golf...) minimise les coûts d'investissement en matière de réseau de distribution. Ensuite, le coût de traitement prohibitif des eaux de la sucrerie ou la nécessité de satisfaire la croissance de la demande future en eau potable à Sainte-Maxime compte tenu des projets de développement urbain, ont contribué à rendre économiquement intéressants ces projets. Enfin, troisième condition de succès repérée, l'existence de liens contractuels entre les fournisseurs des services de réutilisation des eaux usées et les usagers. Ce travail a aussi mis en lumière le fait que, dans certains cas, les acteurs qui supportent les coûts du projet de réutilisation des eaux usées ne sont pas ceux qui en tirent le plus de bénéfices. Les analyses économiques peuvent donc aider à chercher des solutions financières de compensation (tarification, modulation de subventions) pour se rapprocher de solutions gagnant / gagnant et obtenir une certaine équité dans la répartition du bénéfice collectif. Ce sera sûrement le cas dans le Morbihan où le golf est le principal bénéficiaire, alors que les porteurs du projet et les financeurs supportent un coût net.

De même la recharge artificielle de nappe est envisageable moyennant des précautions énoncées par l'Anses⁵⁴ afin de ne pas hypothéquer l'avenir et compromettre l'atteinte du bon état. De plus, cette solution dépend fortement du contexte local et des modalités de recharge naturelle des aquifères.

Concernant les rejets, la baisse attendue des débits d'étiage et l'augmentation de la température naturelle de l'eau nécessitera de réexaminer les conditions des rejets polluants dans les cours d'eau, dont la capacité de dilution sera amoindrie. À l'autre extrémité des valeurs de débit, le dimensionnement des déversoirs d'orage devra être repensé afin de limiter les apports ponctuels très importants d'une eau peu oxygénée et potentiellement chargée en contaminants.

Enfin, la vigilance sera nécessaire concernant les nombreux projets qui émergent visant à atténuer les émissions de gaz à effet de serre par les stations d'épuration, voire à en extraire de l'énergie. En effet, il est possible de mettre au point des solutions techniques pour augmenter la valeur des boues, voire valoriser les émissions (de méthane, par exemple). Il conviendra donc de ne pas perdre de vue que l'objectif premier d'une station d'épuration doit rester de rejeter dans le milieu naturel une eau dont la qualité ne compromet pas l'atteinte du bon état.

4.3. L'industrie

Les industriels n'ont pas attendu le changement climatique pour mettre en place des processus économes en eau, et ces économies seront de plus en plus intéressantes, aussi bien pour garantir la continuité de l'accès à la ressource qu'un coût maîtrisé. De nombreux industriels ont déjà mis en place une réutilisation de l'eau sur leur site. C'est le cas des betteraviers (comme celui d'Artenay par exemple), de l'abattoir de la Cooperl à Lamballe (22)...

L'eau étant souvent utilisée comme moyen de refroidissement à certaines étapes des processus, la température des rejets pourrait également poser plus de problèmes à l'avenir. Les solutions déjà existantes consistent par exemple à utiliser des bassins tampons, à stocker l'eau le temps qu'elle refroidisse...

Le CESER Pays de la Loire⁵⁵ relève que lors des épisodes de fortes chaleurs de juillet 2015, les ventes de glaces, de sirops ou encore de bière ont explosé (de +20% à +45%). Au-delà du fait que ces produits industriels sont fabriqués à base d'eau et que leur production constitue une pression sur la ressource, on peut y voir une opportunité économique.

Le cas de la production d'électricité

L'eau est présente dans tous les processus de fabrication d'électricité, que ce soit :

- comme force motrice, dans les centrales hydroélectriques, les usines marémotrices, les hydroliennes,

⁵⁴ ANSES, Avis de l'Anses, Risques sanitaires liés à la recharge artificielle de nappes d'eau souterraine, rapport d'expertise collective, avril 2016, 192 p.

⁵⁵ Impacts du changement climatique et mesures d'adaptation en Pays de la Loire- Ceser - 2016

- comme vecteur de chaleur, dans les turbines des centrales thermiques,
- comme moyen de refroidissement.

EdF a réalisé des études visant à modéliser la température des rivières à l'horizon 2035, et mis en place une stratégie qui consiste à disposer de modèles prédictifs à différentes échelles de temps, à augmenter la résistance des ouvrages actuels et intégrer les conséquences du changement climatique dans la conception des ouvrages futurs, et à renforcer la résilience des ouvrages aux aléas climatiques extrêmes⁵⁶. Des travaux ont déjà été engagés par exemple pour améliorer l'efficacité du refroidissement par temps chaud, et des mesures d'adaptation prises (comme le fait de favoriser la production des centrales de bord de mer en été).

L'Établissement Public Loire a réalisé des études sur l'adaptation du mode de gestion du barrage des barrages de Villerest et Naussac sous l'effet du changement climatique. Après avoir appréhendé les effets du changement climatique et des usages de l'eau sur le fonctionnement des barrages, ces études ont cherché à identifier les meilleures stratégies d'adaptation de leur gestion. Différents modèles ont permis de tester plusieurs cas de fonctionnement. Ces études ont montré une augmentation significative des besoins en soutien d'étiage des barrages de Villerest et Naussac d'ici 2065, de l'ordre de 116 millions de m³ pour assurer un objectif de 50 m³/s à Gien, à usage et objectifs égaux. Cette valeur correspond environ au double des prélèvements moyens actuels à l'étiage sur la Loire et l'Allier réalimentés en amont de Gien et correspond à l'ordre de grandeur du volume maximum prélevé. La Loire et l'Allier constituent donc des ressources d'ores et déjà limitées, et qui le seront encore davantage dans les années à venir sous l'effet du changement climatique.

4.4. La pêche

Les conséquences du changement climatique sur les milieux aquatiques et les populations de poissons (voir plus haut) auront des conséquences sur toute l'industrie de la pêche. Cela est également probable pour les piscicultures en circuit fermé, qui seront confrontées à la difficulté de maintenir la température de l'eau des bassins à un niveau acceptable pour les poissons.

4.5. Le tourisme

Le CESER Pays de la Loire a relevé⁵⁷ que le changement climatique constitue une opportunité pour certains secteurs d'activité, comme le tourisme. Il est en effet probable que les estivants délaisseront les côtes méridionales devenues trop chaudes et soumises à des épisodes caniculaires plus fréquents, pour le littoral de la côte Atlantique. Ce sera probablement vrai également pour la Bretagne, la Normandie... Le CESER note toutefois que ce développement du tourisme est conditionné par l'existence d'un littoral préservé.

⁵⁶ Source : EdF, présentation devant le comité de bassin Seine-Normandie, 2013

⁵⁷ Déjà cité