

IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LE DOMAINE DE L'EAU

sur les bassins Rhône-Méditerranée et Corse.
Bilan actualisé des connaissances.

BASSINS RHÔNE-MÉDITERRANÉE ET CORSE

Septembre 2016
Actualisé en novembre 2017

Ce document a été réalisé par l'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse.

Rédaction : Damien Aubé

Suivi du projet : Thomas Pelte

Le contenu de ce document a été amélioré en novembre 2017 grâce au travail de relecture et les contributions du conseil scientifique du comité de bassin Rhône-Méditerranée.

Citation du document :

Aubé D., 2016 Impacts du changement climatique dans le domaine de l'eau sur les bassins Rhône-Méditerranée et Corse - Bilan actualisé des connaissances –. Collection « eau & connaissance ». Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse. 114 pages.

Objet du rapport.....	1
Introduction.....	2
I Evolution des variables climatiques - Les températures augmentent et le régime des précipitations change.....	4
1.1 Évolution des températures	6
Le réchauffement de l'air est constaté en France.....	6
...et devrait continuer au cours du XXIème siècle.....	6
1.2 Évolution des précipitations	10
Les tendances passées restent difficiles à établir.....	10
L'été sera le plus impacté par les diminutions des précipitations.....	12
Le couvert neigeux sera impacté en quantité et en qualité.....	19
1.3 Évolution de l'évapotranspiration et des sécheresses.....	22
Tendance à l'augmentation de l'évapotranspiration.....	22
Le secteur agricole premier impacté.....	23
Des sécheresses amplifiées par le réchauffement climatique.....	25
1.4 Impacts sur la température des cours d'eau	28
1.5 Impacts sur la qualité des eaux.....	31
Les effets des activités anthropiques resteront majoritaires sur les risques d'eutrophisation.....	31
Les performances des stations d'épuration pourraient diminuer.....	32
incidences clés - Les variables climatiques.....	33
2 Impacts sur la ressource en eau	34
2.1 Les eaux de surface	34
Les bassins versants Alpains, tendances et projections.....	34
Les tendances passées à l'échelle nationale.....	38
Le Rhône, tendances passées et projections.....	41
Projections à l'échelle des bassins Rhône-Méditerranée et de Corse.....	44
Les incertitudes associées aux projections.....	52
2.2 Les eaux souterraines impactées, notamment par une diminution de la recharge par les précipitations.....	53
Peu de tendances observées par le passé.....	53
Les premières études d'impacts montrent une tendance à la diminution de la recharge.....	55
Incertitudes et possibilités d'amélioration.....	58
Les eaux souterraines sont sensibles aux changements globaux.....	59
Les aquifères littoraux principalement sensibles aux prélèvements anthropiques et à la diminution de la recharge.....	59
Incidences clés - Ressource.....	62
3 Les impacts du changement climatique sur les écosystèmes aquatiques et humides	63
3.1 Impacts sur les poissons	63
Effets sur la physiologie.....	63
Effets sur la phénologie.....	63

Effets sur la dynamique des populations	63
Effets sur la distribution	65
Impacts sur la diversité des assemblages	69
3.2 Impact sur les lacs	72
3.3 Impacts des assecs sur les communautés d'invertébrés	73
3.4 Impacts sur la ripisylve	74
3.5 Impacts sur les zones humides.....	74
3.6 Impacts sur les écosystèmes marins	79
Impacts sur les communautés piscicoles	81
Observera-t-on des effets de l'acidification sur la biodiversité ?	82
Incidences clés - Biodiversité	86
<hr/>	
4 Impacts sur le littoral	87
4.1 L'Élévation du niveau des mers.....	87
4.2 Impacts sur la submersion marine	91
Tendances d'évolution du trait de côte et des flux de sédiments	93
Les projections d'évolution	95
4.3 Les deltas	95
4.4 Moyens de protection	97
4.5 Impacts sur les infrastructures.....	100
Incidences clés - Littoral	101
<hr/>	
5 conclusion.....	102
Développer une stratégie d'adaptation au changement climatique.....	102
<hr/>	
bibliographie.....	104

OBJET DU RAPPORT

Ce document est une actualisation du bilan des connaissances scientifiques et techniques sur l'impact du changement climatique sur la ressource en eau et les milieux aquatiques. Il s'appuie sur des travaux publiés depuis 2012, date de réalisation de la première synthèse (Fabre, 2012).

Il répond à l'une des mesures du Plan de Bassin d'Adaptation au Changement Climatique (PBACC) qui vise à produire, tous les 4 ans, une synthèse des connaissances disponibles. Enrichir la connaissance et prendre en compte les nouveautés de la recherche permet d'adapter et de conforter la politique d'adaptation permettant de faire face aux effets attendus du changement climatique.

Ce rapport s'inscrit dans la continuité de la première synthèse. Il a vocation à préciser les incidences clés énoncées en 2012 et à porter à connaissance les nouveaux impacts projetés par les travaux de recherche pour interpeler les gestionnaires sur de nouveaux enjeux à considérer.

Fort des avis et recommandations émis par le conseil scientifique concernant la première synthèse, ce document présente de nombreux travaux analysant les chroniques de données du passé. Même si les tendances passées ne sont pas annonciatrices des situations futures, cela permet de renforcer la connaissance des hydrosystèmes, d'obtenir des retours d'expérience et améliorer la calibration des modèles.

De ces éléments découleront de nouvelles cartes de vulnérabilité basées sur des éléments scientifiques robustes permettant de justifier la mobilisation de moyens pour faire face aux nouveaux enjeux identifiés.

INTRODUCTION

Le cinquième rapport du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du Climat) pose le constat qu'il est certain que les températures ont augmenté au cours du vingtième siècle. A l'échelle mondiale, l'augmentation moyenne de la température de surface est de 0.85 °C [0.65 ; 1.06] sur la période 1880-2012. Il est très probable que ce réchauffement ait inversé une tendance naturelle à un refroidissement du climat initié il y a 5000 ans pour les moyennes et hautes latitudes de l'hémisphère Nord (Stocker et al., 2013).

Ce même rapport estime qu'il est extrêmement probable (certain à 95-100%) que le réchauffement observé depuis le milieu du XIXème siècle soit causé pour plus de la moitié par les activités anthropiques (le niveau de confiance était de 90-100% dans le rapport précédent, il a donc augmenté). On constate sur la Figure 1 que seule la considération d'un forçage radiatif d'origine anthropique permet de reproduire les températures observées depuis les années 1960. Les éléments naturels tendent à limiter le réchauffement (Figure 1b). Sans leur prise en compte par les modèles, la température aurait été supérieure (Figure 1c). Les éléments de forçage naturel limitent donc mais ne compensent pas les effets des activités anthropiques (Stocker et al., 2013).

Depuis 1998, la vitesse de l'augmentation des températures de surface tend à diminuer. Elle était de 0.11°C/décennie sur la période 1951-2012 et est de 0.04°C/décennie sur la période 1998-2012. Cette diminution non attendue de la vitesse du réchauffement, appelée « hiatus », est mal représentée par les modèles qui surestiment les températures sur cette période.

Ce hiatus peut provenir (i) de la variabilité interne naturelle du climat (ii) d'un oubli ou d'une mauvaise représentation de forçages (iii) d'erreur de réponse des modèles. A ce jour cette question n'est pas encore complètement résolue. Sur une période de temps courte (un climat se définit sur une période de 30 ans), il est très difficile de savoir si l'on observe la variabilité naturelle du climat, non représentable par les modèles, ou le début d'une tendance mal représentée. Après avoir écarté plusieurs hypothèses, il semble aujourd'hui que ce phénomène soit principalement dû à un transfert de chaleur de l'océan superficiel vers l'océan profond sous-estimé entraînant un refroidissement de la surface (Planton et al., 2015 ; Stocker et al., 2013).

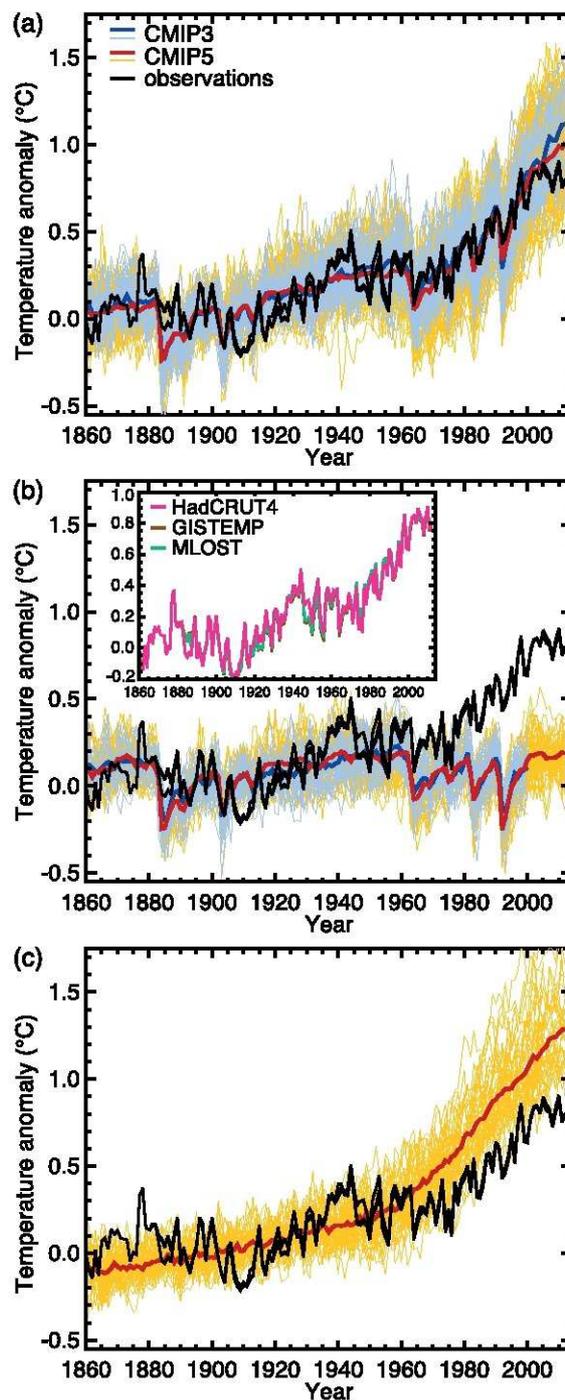
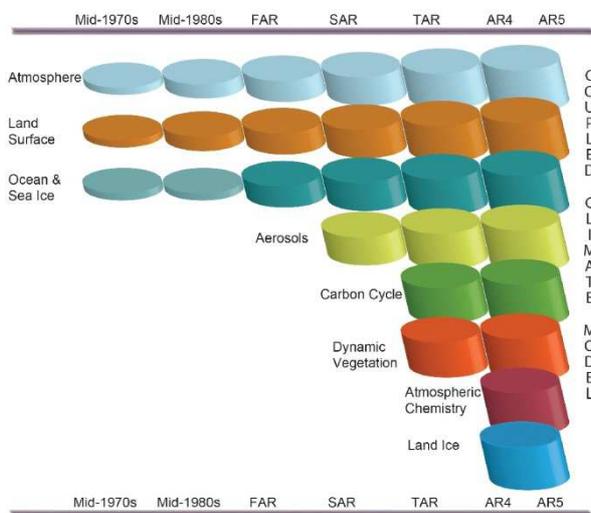


Figure 1 : Trois estimations de l'observation de l'augmentation globale des températures moyennes de surface (lignes noires) à partir de trois jeux de données (HadCRUT4, GISTEMP et MLOST) comparées aux résultats de modélisations (CMIP3, ligne bleues et CMIP5, lignes rouges) avec (a) forçages naturels et anthropiques, (b) forçage naturel uniquement et (c) forçage anthropiques uniquement. Les lignes bleues et rouges sont les moyennes de tous les résultats validés des modélisations CMIP3 et CMIP5 respectivement. Les données observées et simulées ont toutes été projetées sur la maille HadCRUT4 (jeu de données ayant la meilleure résolution spatiale), et les anomalies mondiales moyennes sont indiquées par rapport à 1880-1919, où toutes les données sont d'abord calculées en anomalies par rapport à 1961-1990. L'encart en (b) montre les trois jeux de données d'observations différenciés par couleur (Stocker et al., 2013).

Ce hiatus renvoie aux limites de tout exercice de modélisation, principalement l'état des connaissances scientifiques et la puissance de calcul disponible. Ainsi, les incertitudes sur les projections restent fortes malgré l'augmentation du

nombre de modèles utilisés, la meilleure résolution des projections et les améliorations considérables des modèles au cours du temps comme récemment une meilleure représentation de l'effet de la végétation, de la chimie atmosphérique et de la dynamique de la banquise (figure 2). C'est pourquoi le GIEC a construit plusieurs scénarios d'évolution contrastés afin de projeter un ensemble de futurs possibles (Stocker et al., 2013).



Le 5^{ème} rapport du GIEC s'appuie sur de nouveaux scénarios d'émission de gaz à effet de serre (GES). Les SRES¹ ont laissé la place aux RCP². La logique de travail est inversée. Au lieu de partir des projections d'évolutions socio-économiques pour déterminer les émissions de GES on fixe en entrée des scénarios contrastés d'émission de GES desquels on traduit les chemins sociétaux qui amèneront à ces émissions de GES (tableau 1). Cela a abouti à 4 scénarios de forçage radiatif (figure 3) dont le RCP 2.6 qui traduit, fait nouveau, une diminution des émissions de GES susceptible de limiter le réchauffement planétaire à + 2°C. Comme représenté sur la figure 3, les scénarios RCP sont proches des SRES, le nouveau scénario maximal (RCP 8.5) est légèrement plus pessimiste (Guivarch et al., 2013).

Figure 2 : Représentation des composantes prises en compte par les modèles climatiques dans les rapports successifs du GIEC. Plus la taille du cylindre est grande, plus le processus est représenté de façon complexe (Stocker et al., 2013).

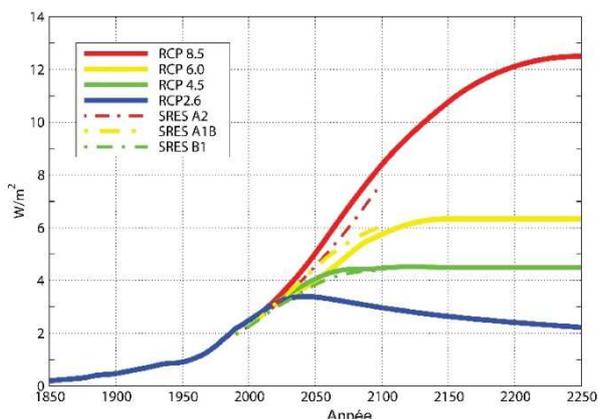


Figure 3 : Les quatre scénarios RCP du 5^{ème} rapport du GIEC, évolution du forçage radiatif et comparaison avec les scénarios SRES antérieurs (Guivarch et al., 2013).

Nom	Forçage radiatif (W/m ²)	Concentration de GES (ppm)	Trajectoire
RCP 8.5	> 8.5 W/m ² en 2100	> à 1370 eq-CO ₂ en 2100	croissante
RCP 6.0	~ 6 W/m ² au niveau de stabilisation après 2100	~ 850 eq-CO ₂ au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP 4.5	~ 4.5 W/m ² au niveau de stabilisation après 2100	~ 660 eq-CO ₂ au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP 2.6	Pic à 3 W/m ² avant 2100 puis déclin	Pic ~ 490 eq-CO ₂ avant 2100 puis déclin	Pic puis déclin

Tableau 1 : Caractéristiques principales des RCP (IPCC, 2013)

¹ Special Report on Emissions Scenarios (SRES) : Traduction de scénarios d'évolution de nos sociétés et modes en émissions de GES. Scénario pessimiste : A2, médian : A1B et optimiste : B1.

² Representative Concentration Pathway (RCP) : nouveaux scénarios d'émission de gaz à effet de serre, fixés avant la réalisation des études économiques

La prise en compte de ces scénarios d'émissions de GES permet de réaliser des études d'impact du changement climatique sur la ressource en eau. Le présent rapport constitue une synthèse de ces études. Il permet de dresser des tendances d'évolutions possibles de la ressource et des milieux aquatiques. Les impacts projetés sont regroupés par secteur : les projections climatiques, la ressource en eau de surface et souterraine, la biodiversité et le littoral. Chaque partie se termine par l'énoncé des incidences clés. Cela représente les points essentiels qui se dégagent de l'analyse de la littérature scientifique qui doivent alerter les gestionnaires.

I EVOLUTION DES VARIABLES CLIMATIQUES - LES TEMPERATURES AUGMENTENT ET LE REGIME DES PRECIPITATIONS CHANGE

L'une des mesures du Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC)³ est de présenter les changements climatiques futurs attendus à l'échelle de la France. Des projections ont été réalisées à partir de deux modèles climatiques régionalisés (Aladin-Climat et WRF) développés respectivement par le CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques de Météo-France) et l'IPSL (Institut Pierre Simon Laplace) en collaboration avec l'INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques). Ces modèles ont une résolution horizontale de 12 km et sont projetés sur une grille de 8x8 km de résolution. Ils font partis de la cinquantaine de modèles du CMIP5 et des modèles du projet Euro-cordex.

Les résultats de ces projections sont en libre accès sur le portail *Drias les futurs du climat*, créé en 2012 (www.drias-climat.fr). Il donne accès à une représentation cartographique ou numérique des paramètres atmosphériques (températures et précipitations) ainsi que des indices dérivés (nombre de jour de vagues de chaleur, de fortes précipitations...) et des indicateurs intégrés issus de modèles d'impacts (indicateur de sécheresse météorologique et agricole). Les résultats des paramètres atmosphériques peuvent être visualisés à partir des scénarios du IV^{ème} (scénarios SRES) ou du Vème rapport du GIEC (scénarios RCP). Les modélisations d'impacts sont obtenues à partir des scénarios SRES.

L'ONERC (Observatoire Nationale sur les Effets du Réchauffement Climatique) a analysé les résultats des modélisations nationales et les a comparés avec des projections du CMIP5 et/ou du projet européen Euro-Cordex afin de rendre compte de la situation à l'échelle nationale et des incertitudes. C'est en partie de ce rapport, que sont extraits les résultats présentés dans cette partie.

A l'échelle européenne, le projet Euro-Cordex s'inscrit dans la continuité des projets PRUDENCE (2004) et ENSEMBLE (2008). Ce programme permet d'intégrer les nouveaux scénarios du GIECC et améliore la résolution horizontale qui passe de 50 à 12 km. Jacob et al. (2013) ont comparé les résultats du projet Euro-Cordex (scénario 4.5 et 8.5) à ceux du projet ENSEMBLE (scénario A1B). Globalement, les résultats confortent les projections obtenues par le projet ENSEMBLE (Figure 4) mais l'augmentation de la résolution a permis de nouveaux résultats sur les précipitations moyennes et les événements extrêmes (précipitations et vagues de chaleurs) présentés dans les parties suivantes (Jacob et al., 2014).

³ Le PNACC, porté par le ministre de l'écologie en 2011, propose des mesures concrètes et opérationnelles, à l'échelle nationale, pour faire face et tirer parti des nouvelles conditions climatiques projetées.

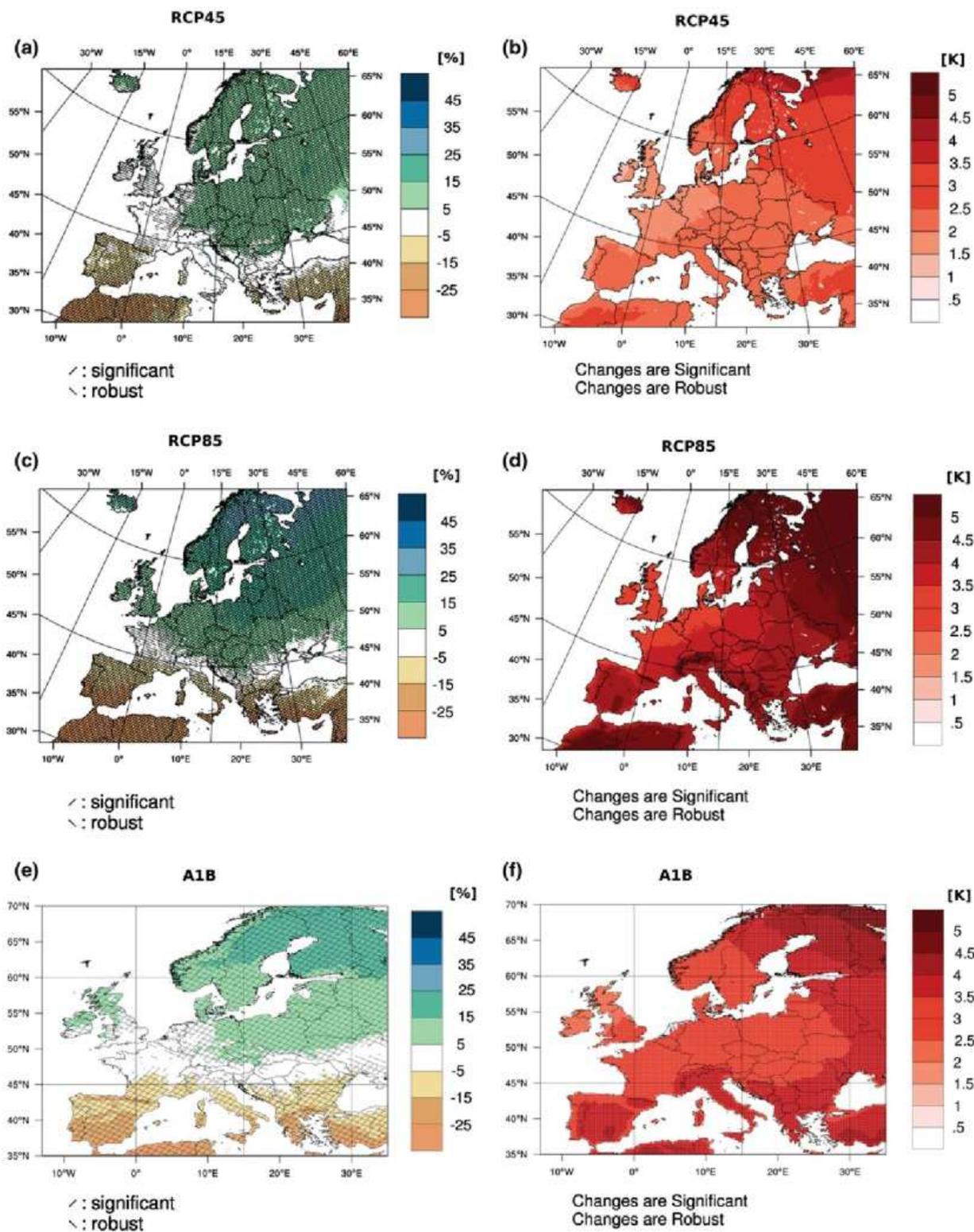


Figure 4 : Changements projetés des précipitations totales annuelles (%) (à gauche) et des température annuelles moyennes (°C) (à droite) à l'horizon 2071-2100 par rapport à 1971-2000, pour les scénario A1B (e,f), RCP8.5 (c,d) et RCP4.5 (a,b). Les zones hachurées représentent les régions avec des changements robustes et/ou statistiquement significatifs (a, c, e). Pour b, d et f, les changements sont robustes et significatifs sur toute l'Europe (Jacob et al., 2014).

1.1 ÉVOLUTION DES TEMPERATURES

Le réchauffement de l'air est constaté en France...

A l'échelle nationale, au cours du XX^{ème} siècle, la tendance moyenne de l'augmentation des températures est de 0.1 °C/décennie. L'analyse d'un nouveau jeu de données homogénéisé sur la période 1959-2009 montre une accélération du phénomène à la fin du XX^{ème} siècle avec un réchauffement moyen sur la période de 0.3 °C par décennie (Figure 5). Cette tendance est principalement expliquée par une augmentation des températures printanières et estivales et une accélération du réchauffement depuis les années 70 (Gibelin et al., 2014).

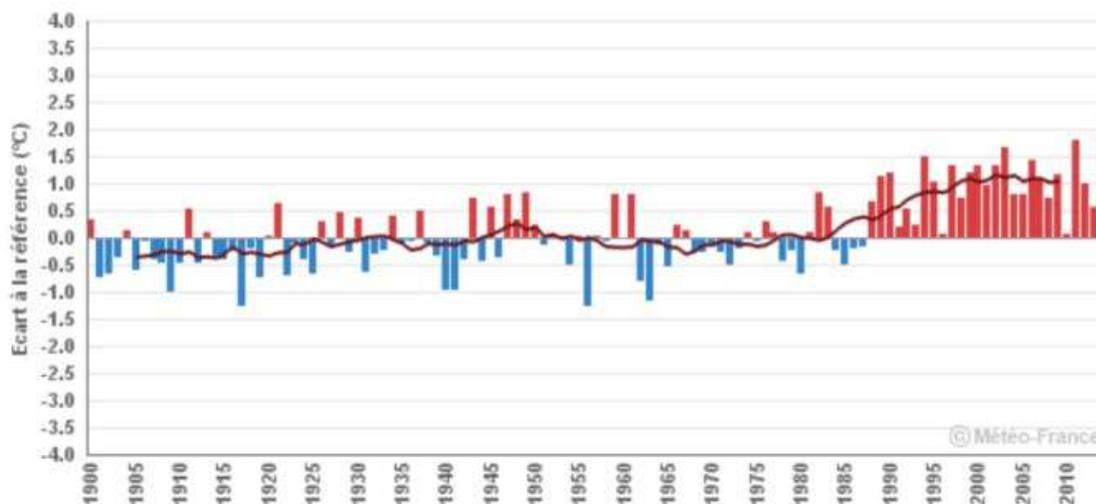


Figure 5 : Ecart de la température moyenne annuelle à la période de référence 1961-1990 à l'échelle de la France. La ligne continue représente la moyenne glissante sur 11 années. (ClimatHD)

Dans les Alpes, l'augmentation des températures depuis 1950 n'est pas homogène spatialement. Elle est plus marquée dans les Préalpes et les Alpes du nord que dans les Alpes du sud avec une augmentation respective moyenne de +2.1, +1.8 et +1.6°C (Einhorn et al., 2015). L'augmentation de la vitesse du réchauffement y est également détectée et semble plus marquée que sur le reste des terres de l'hémisphère Nord (HN). Sur la période 1885 – 2007, la vitesse d'augmentation des températures est d'environ 0.09 °C/décennie (valeur équivalente au reste de l'HN) alors qu'elle est de 0.37 °C/décennie sur la période 1960-2007, contre 0.24 °C/ décennie en moyenne sur l'HN et cela quelle que soit l'altitude. Ce résultat est basé sur l'analyse de 92 chroniques dont 95% sont comprises entre 134 et 2000 m d'altitude (Dumas 2013). D'autres travaux montrent que ces taux sont similaires à très haute altitude où la température a été estimée par inversion, à partir de carottes de glaces (7 échantillons entre 4240 et 4300 m analysés). On peut retenir un taux moyen d'élévation des températures aux très hautes altitudes (supérieures à 3500m) de +0.14 °C/décennie sur la période 1900-2004 ; +0.35 °C/décennie sur la période 1960-2004 et +0.56°/décennie sur 1985-2004 (Gilbert and Vincent, 2013).

Parallèlement, il a été observé une tendance depuis les années 1960 à la diminution des conditions climatiques favorables à la production de neige artificielle. Cette tendance est statistiquement significative à l'échelle des Alpes. Elle est la plus marquée dans les Alpes du nord. Le sud ne montre pas de tendance significative. En revanche elle ne semble pas dépendante de l'altitude puisque l'ordre de grandeur est le même de 1200 à 2100 m d'altitude et est d'environ - 6 à - 8 heures par année de perte de conditions favorables. Pour exemple, en moyenne, 42 % du temps (du 1^{er} octobre au 1^{er} avril) permettait la production de neige de culture à -2 °C dans les Alpes du nord à 1200 m d'altitude de 1961 à 1970 alors qu'il représente 35 % sur la période 2005-2014 (Spandre et al., 2015).

...et devrait continuer au cours du XXI^{ème} siècle.

En utilisant les scénarios RCP, les projections climatiques réalisées sur la France s'accordent sur une augmentation généralisée des températures à tous les horizons par rapport à la période de référence (1976-2005). Le scénario RCP 2.6 (le plus optimiste, intégrant une hypothèse de diminution des GES) se distingue : le réchauffement tendrait à augmenter jusqu'au milieu du siècle puis à se stabiliser voir légèrement diminuer à la fin du siècle. En revanche les

scénarios 4.5 (modéré) et 8.5 (pessimiste) montrent une augmentation continue des températures, quelle que soit la saison (Figure 6 et Figure 7).

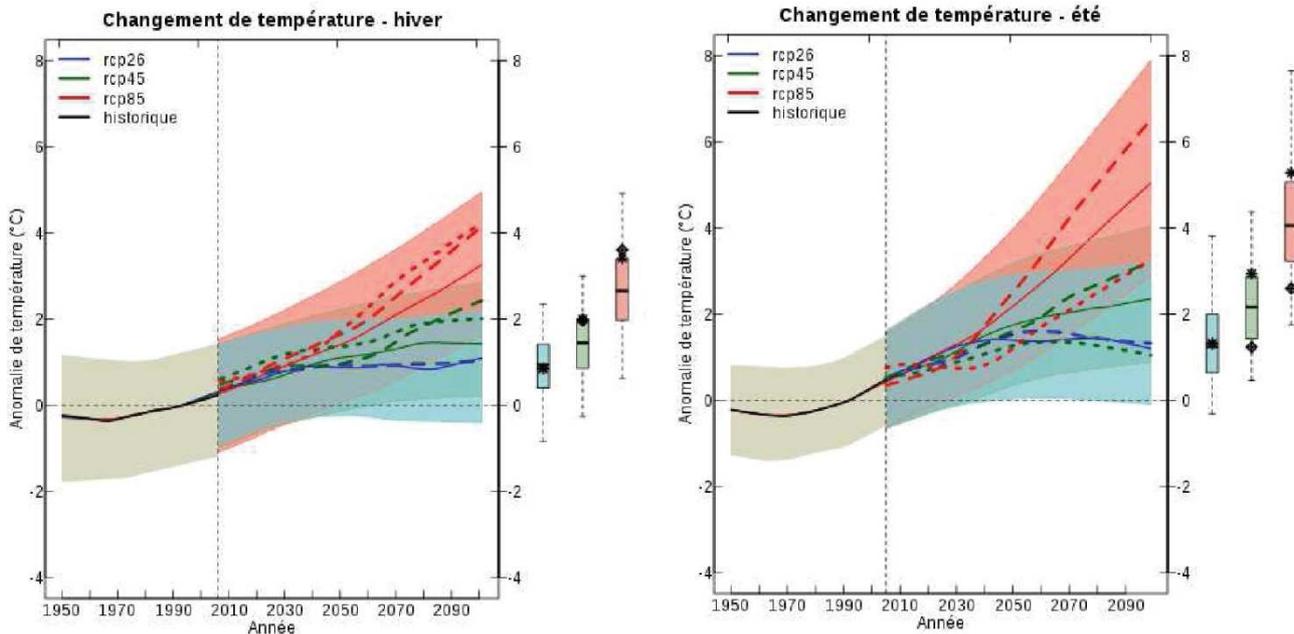


Figure 6 : Evolution de la température en moyenne sur la France (°C) en hiver (à gauche) et en été (à droite), relativement à la référence 1976-2005. Les moyennes d'ensemble de chaque scénario RCP (lignes continues, RCP2.6 en bleu, RCP4.5 en vert et RCP8.5 en rouge) sont accompagnées de leurs dispersions (enveloppes colorées correspondant à l'intervalle 5 %-95 % de l'ensemble). La courbe noire représente la moyenne d'ensemble des simulations « historiques » de CMIP5 (de 1950 à 2005), et l'enveloppe colorée associée la dispersion de cet ensemble. Les lignes discontinues et pointillées correspondent aux évolutions respectives pour les simulations Aladin-Climat et WRF. Les diagrammes en boîte donnent les distributions moyennes sur la période 2071-2100 (minimum, 25e centile, 50e centile, 75e centile et maximum), et sont accompagnés des moyennes 2071-2100 pour le modèle corrigé Aladin-Climat (astérisques noirs) et le modèle corrigé WRF (losanges noirs) (Ouzeau et al., 2014).

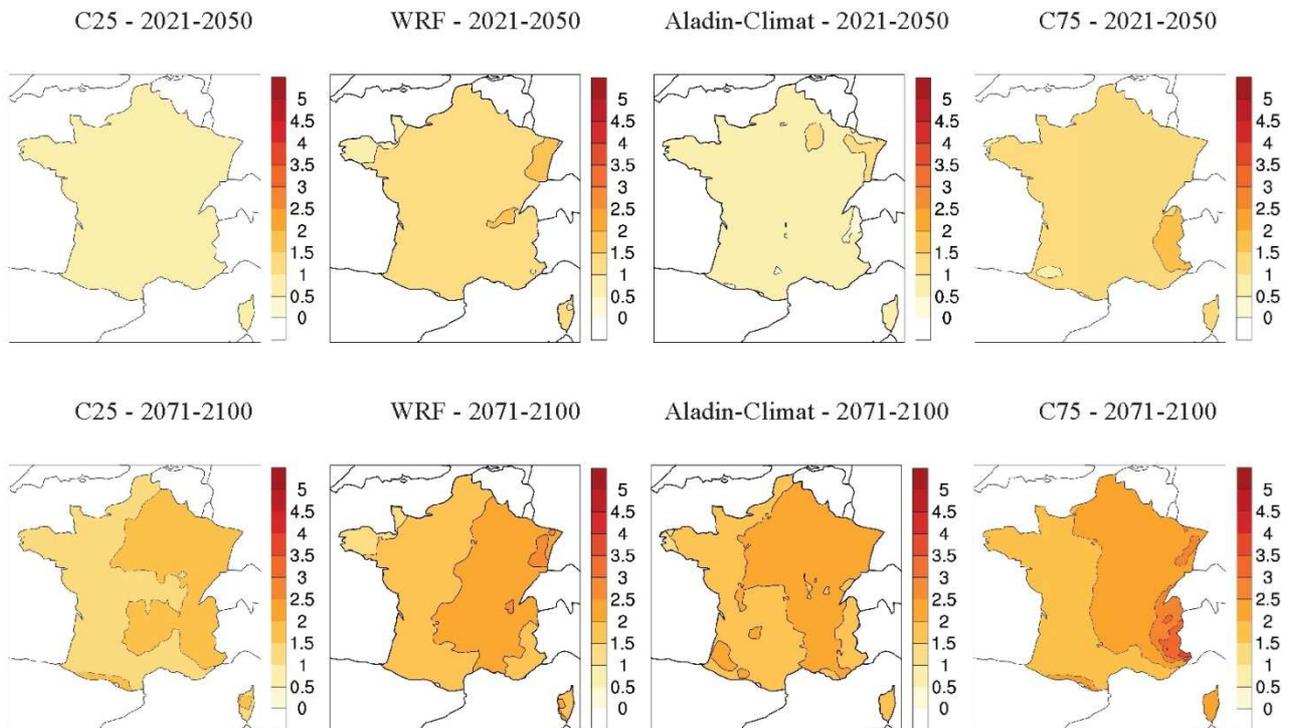


Figure 7 : Ecarts de température hivernale (°C) en France relativement à la référence 1976-2005, pour le scénario RCP4.5, aux horizons 2021-2050 (ligne du haut) et horizons lointains (ligne du bas). Pour chaque ligne, de gauche à droite : 25eme centile de l'ensemble, WRF, Aladin-Climat, 75eme centile de l'ensemble (Ouzeau et al., 2014).

En hiver, l'augmentation des températures serait comprise entre 0.6 et 1.3 °C pour le milieu du siècle par rapport à la période de référence 1976-2005 selon les deux modèles climatiques diffusés par le portail Drias. A la fin du siècle, elle serait de +0.9 à +3.6°C suivant les scénarios. Le tableau 2 et la figure 7 permettent de positionner ces résultats par rapport à un ensemble de projections issues du projet Euro-Cordex. Les valeurs de C25 et C75 correspondant respectivement au 25^{ème} et 75^{ème} centile. Cet intervalle regroupe la moitié de l'ensemble des résultats des projections, centré autour de la valeur médiane.

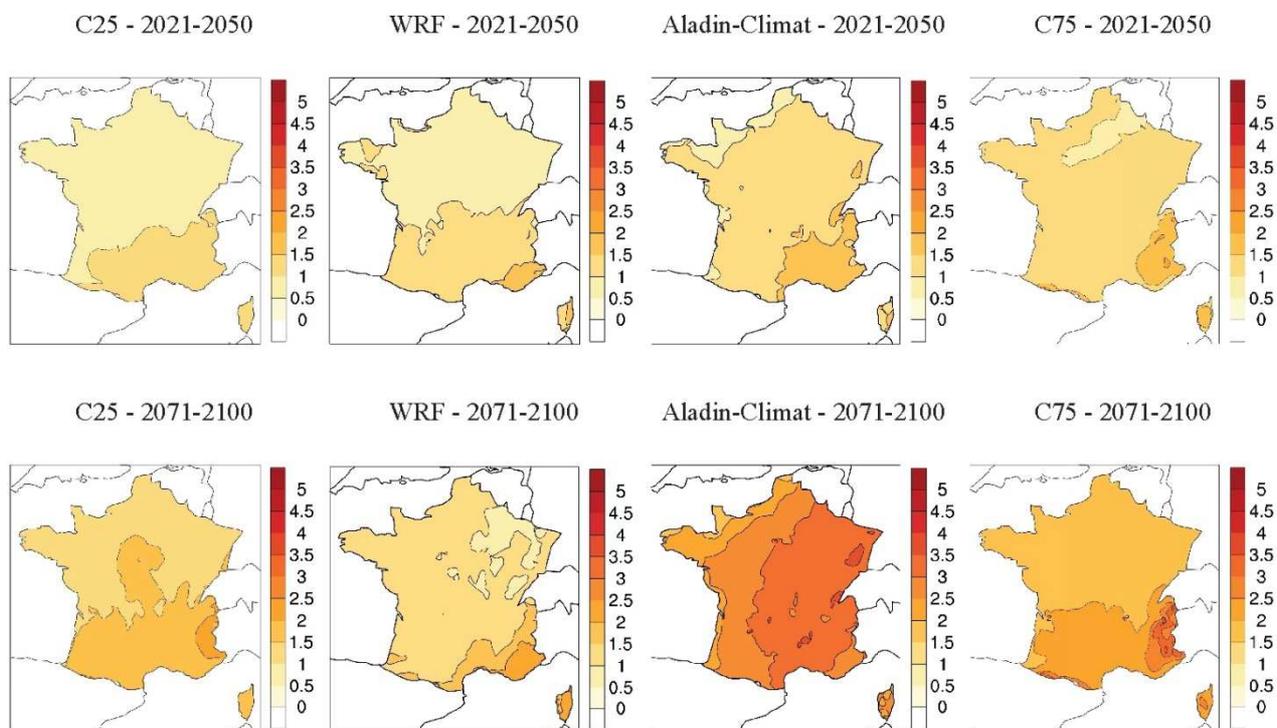


Figure 8 : Ecarts de température estivale (°C) en France relativement à la référence 1976-2005, pour le scénario RCP4.5, aux horizons 2021-2050 (ligne du haut) et horizons lointains (ligne du bas). Pour chaque ligne, de gauche à droite : 25eme centile de l'ensemble, WRF, Aladin-Climat, 75eme centile de l'ensemble (Ouzeau et al., 2014).

En été, l'augmentation sera plus marquée pour la fin du siècle. Elle serait comprise entre +1.3 et +5.3 °C. Ces résultats sont représentatifs de la gamme des possibles, puisque chaque modèle fait partie soit de la fourchette haute de l'ensemble des projections du CMIP5, soit de la fourchette basse. La variabilité en fonction du scénario est plus marquée, dès le milieu du siècle (Figure 8).

Le tableau 2 synthétise à l'échelle nationale les évolutions des températures simulées en hiver et en été suivant les trois scénarios (Ouzeau et al., 2014). Les valeurs C25 et C75 sont toujours le 25^{ème} et 75^{ème} centile de l'ensemble des projections du CMIP5.

TEMPERATURE		C25	WRF	Aladin-Climat	C75
HIVER					
2021-2050	RCP 2.6	+0,4 °C	Indisponible	+0,6 °C	+1,3 °C
	RCP 4.5	+0,3 °C	+1,3 °C	+0,8 °C	+1,4 °C
	RCP 8.5	+0,5 °C	+0,8 °C	+1 °C	+1,6 °C
2071-2100	RCP 2.6	+0,4 °C	Indisponible	+0,9 °C	+1,4 °C
	RCP 4.5	+0,8 °C	+2 °C	+2 °C	+2 °C
	RCP 8.5	+1,9 °C	+3,6 °C	+3,4 °C	+3,4 °C
ETE					
2021-2050	RCP 2.6	+0,7 °C	Indisponible	+1,2 °C	+2 °C
	RCP 4.5	+0,6 °C	+1 °C	+1,3 °C	+1,9 °C
	RCP 8.5	+0,9 °C	+0,6 °C	+1,2 °C	+2 °C
2071-2100	RCP 2.6	+0,6 °C	Indisponible	+1,3 °C	+2 °C
	RCP 4.5	+1,4 °C	+1,2 °C	+2,9 °C	+2,9 °C
	RCP 8.5	+3,2 °C	+2,6 °C	+5,3 °C	+5,1 °C

Tableau 2 : écarts de température par rapport à la moyenne de référence 1976-2005, pour chacun des modèles et scénarios, en moyenne aux horizons 2021-2050 et 2071-2100. Les valeurs C25 et C75 correspondent respectivement au 25^{ème} et 75^{ème} centile d'une partie des projections issues du projet Euro-Cordex (Ouzeau et al., 2014).

Concernant les Alpes, les différentes projections tendent vers une augmentation des températures d'environ +1.5 °C pour le milieu du siècle et de +2 à +4 °C pour la fin du siècle selon les scénarios par rapport à la période 1960/90. Ces augmentations seraient plus marquées en été. Le taux d'élévation serait d'environ 0.25 °C par décennie pour la première moitié du siècle et environ 0.36 °C par décennie pour la seconde moitié du siècle. L'élévation des températures serait plus importante aux hautes altitudes. Ces résultats sont issus de la synthèse du projet ENSEMBLES, sous le scénario A1B (Gobiet et al. 2014).

Les températures extrêmes. Les vagues de chaleurs recensées depuis 1947 montrent qu'elles ont été deux fois plus nombreuses sur la période 1980-2015 que sur la période 1947-1980 (Météo France). Les projections du projet Euro-Cordex montrent que le nombre de vagues de chaleur extrêmes augmentent (les vagues de chaleur extrêmes correspondent à 3 ou 5 jours consécutif avec des températures journalières moyennes supérieures au 99^{ème} centile). La tendance concerne tout le territoire français mais serait plus marquée pour la fin du siècle sur le quart sud-est (Jacob et al., 2014).

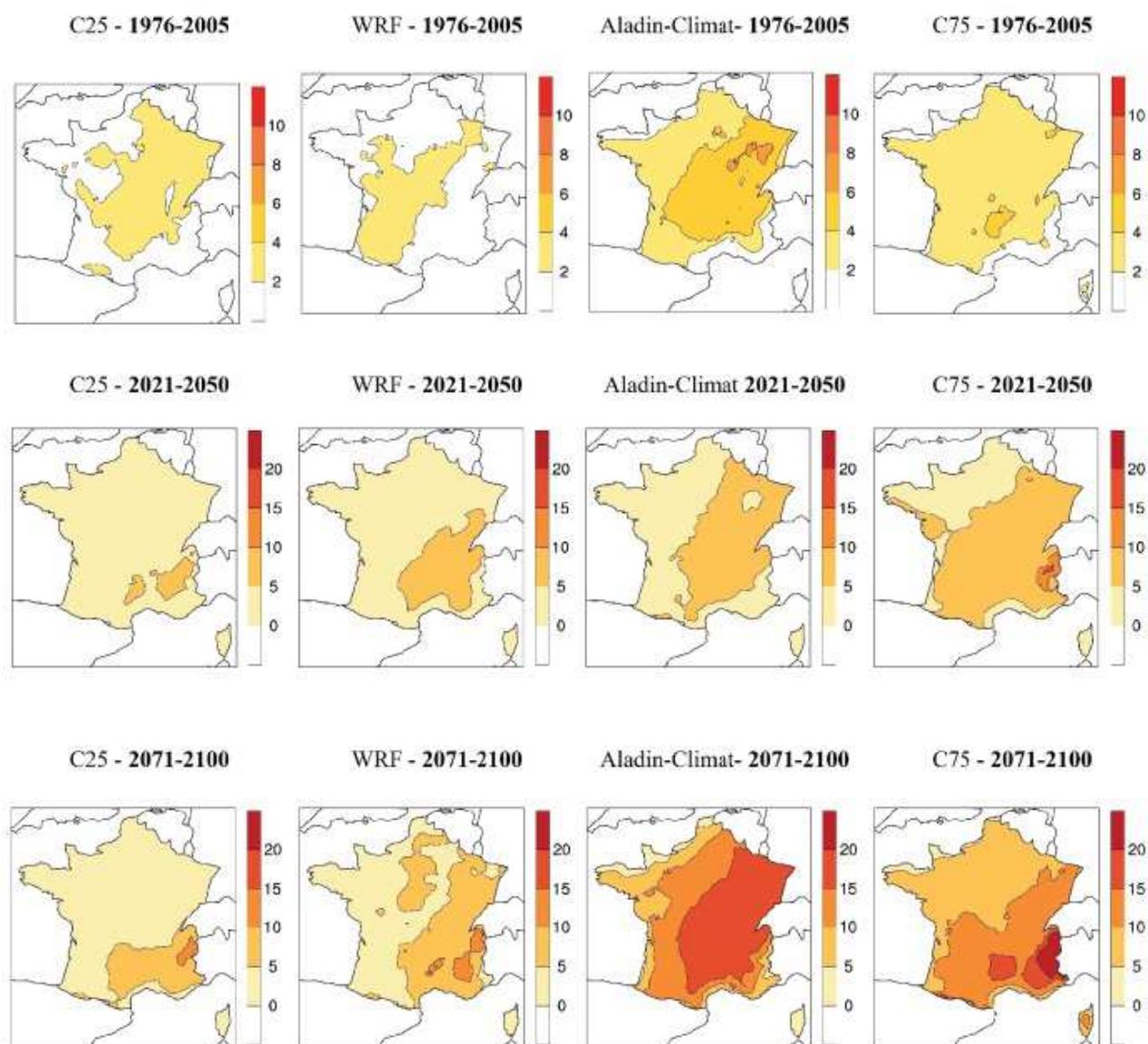


Figure 9 : Nombre de jours de vagues de chaleur en été pour la période de référence 1976-2005 (ligne du haut) et les écarts à cette référence pour le scénario RCP4.5, aux horizons 2021- 2050 (ligne du milieu) et 2071-2100 (ligne du bas). Pour chaque ligne, de gauche à droite : 25^{ème} centile de l'ensemble, WRF, Aladin-Climat, 75^{ème} centile de l'ensemble (Ouzeau et al., 2014).

L'analyse de l'ONERC confirme cette tendance significative à une augmentation généralisée du nombre de vagues de chaleur (plus marqué dans le sud-est) et à une diminution des extrêmes froids (plus marqué à l'est). Dans les deux situations, la tendance est plus marquée à l'horizon 2071-2100. Une vague de chaleur est une période anormalement chaude durant plus de cinq jours consécutifs. Un jour est considéré anormalement chaud lorsque sa température maximale est supérieure de 5°C à la température journalière maximale moyenne sur la période 1976-2005. La détermination des extrêmes froids est obtenue avec la même méthode (Ouzeau et al., 2014).

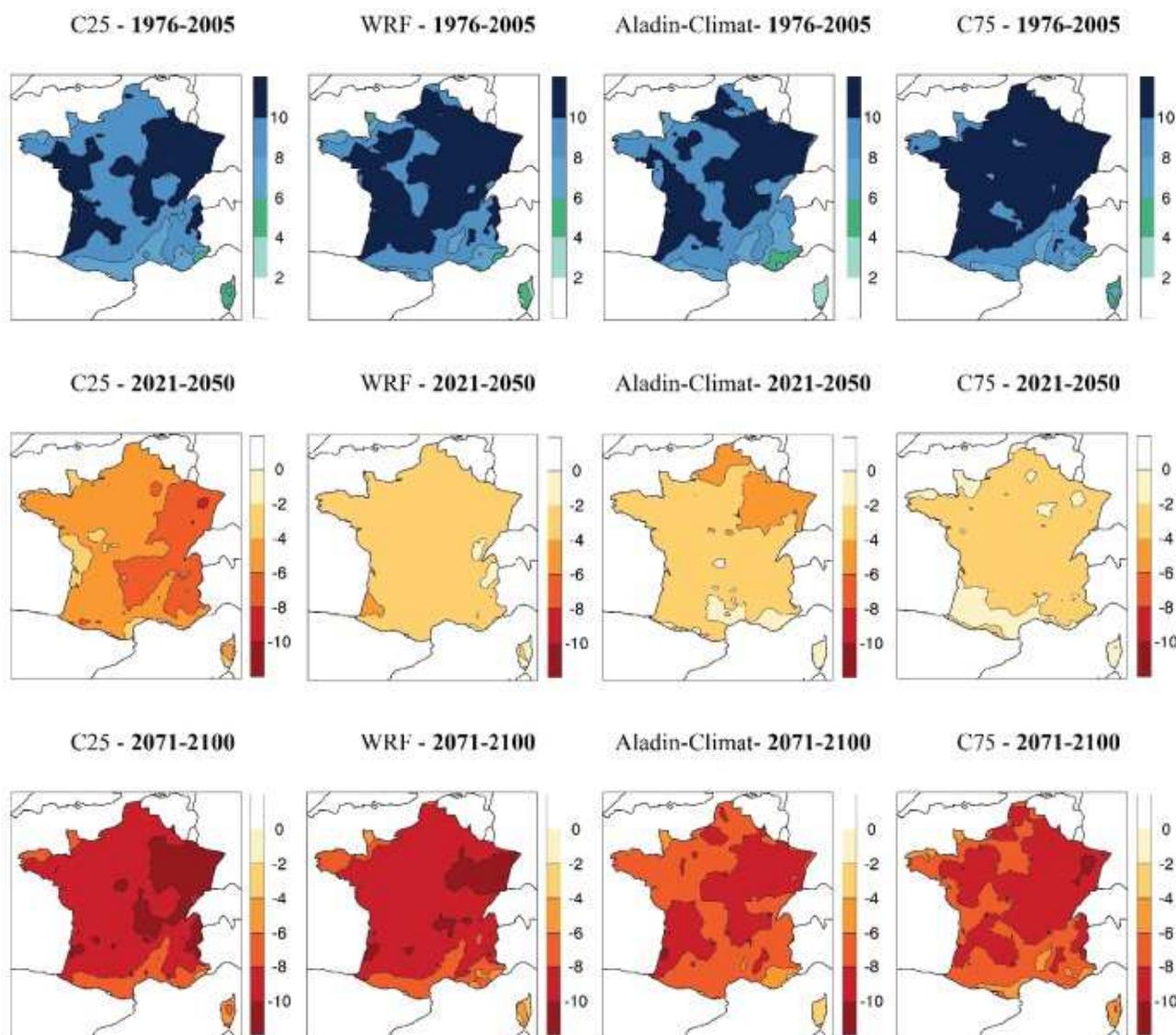


Figure 10 : Nombre de jours hivernaux à température anormalement basse, pour la période de référence 1976-2005 (ligne du haut) et les écarts à cette référence pour le scénario RCP8.5, aux horizons 2021- 2050 (ligne du milieu) et 2071-2100 (ligne du bas). Pour chaque ligne, de gauche à droite : 25^{ème} centile de l'ensemble, WRF, Aladin-Climat, 75^{ème} centile de l'ensemble (Ouzeau et al., 2014).

1.2 ÉVOLUTION DES PRÉCIPITATIONS

Les tendances passées restent difficiles à établir.

L'analyse réalisée par Météo France de données pluviométriques homogénéisées sur la période 1959-2009 ne montre pas de tendance d'évolution des précipitations à l'échelle nationale. Localement on constate une tendance statistiquement significative à une faible augmentation des précipitations dans le quart nord-est et une diminution faible dans le sud-est, en région Provence Alpes Côte d'Azur (Figure 11).

A l'échelle saisonnière, les diminutions des précipitations dans le sud de la France sont principalement marquées en hiver et en été. Les tendances à l'augmentation sur le centre et le nord du bassin Rhône-Méditerranée sont principalement en automne (météo France/climatHD).

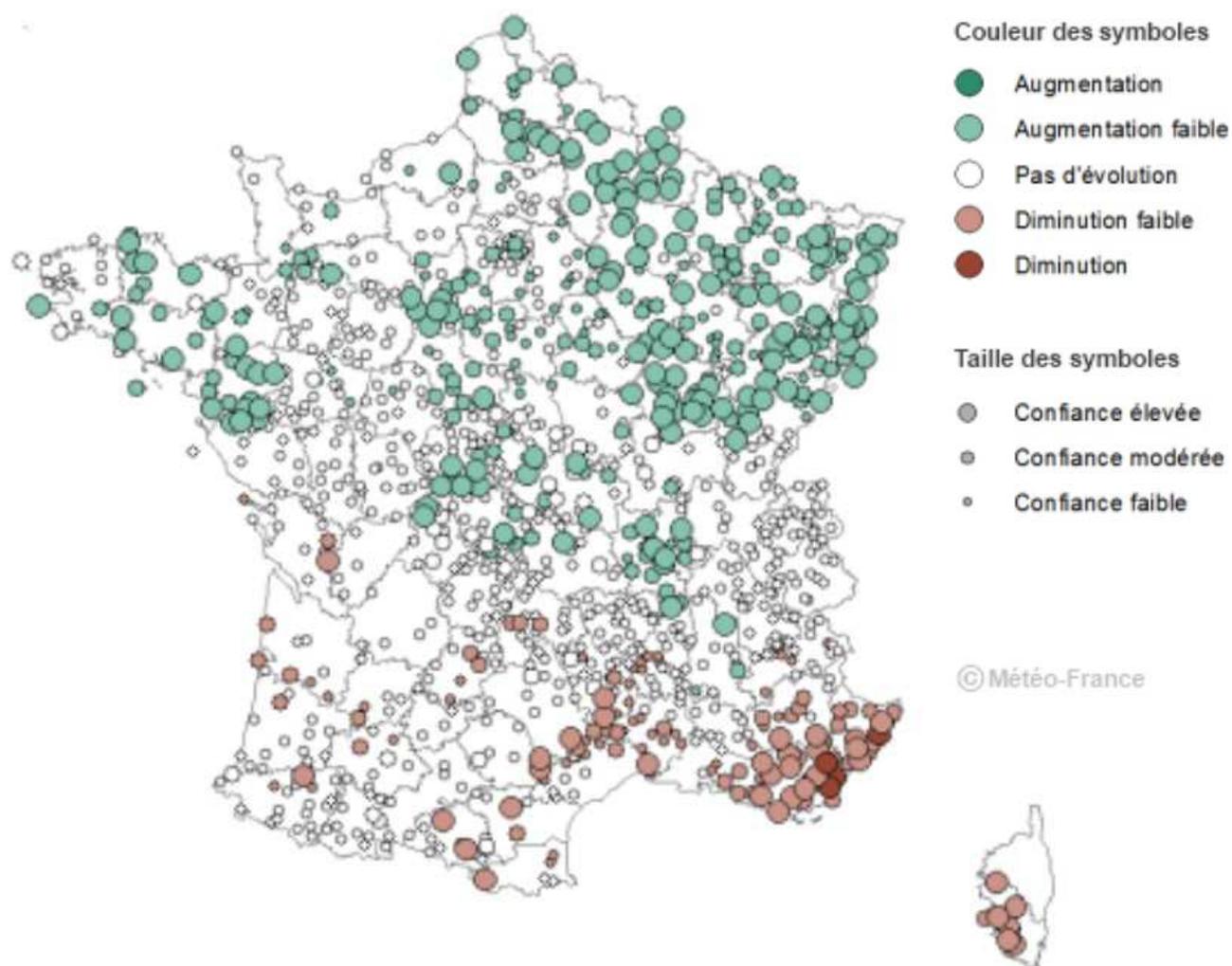


Figure 11 : Observation de tendances ponctuelles d'évolutions des cumuls annuels des précipitations sur la période 1969-2009. En vert : tendance à l'augmentation, en rouge, tendance à la diminution, sans couleur : pas d'évolutions. Plus le cercle est grand, plus le degré de confiance est élevé (Météo France).

Concernant les précipitations extrêmes. A l'échelle européenne, une synthèse des études montre une tendance à l'intensification des phénomènes extrêmes (Madsen et al., 2014). Dans le cadre du projet ExtraFlo, l'évolution du maximum des précipitations journalières annuelles en France a été analysée à partir de 693 séries pluviométriques sur la période 1950-2010. Une étude récente a complété l'analyse par l'ajout de 278 nouvelles chroniques. Il ressort de l'analyse de ces 900 séries qu'une majorité des stations présente une tendance à la hausse, mais que cette tendance générale n'est pas significative statistiquement. La région méditerranéenne présente la plus forte proportion de séries à la hausse due aux nombreux événements extrêmes ces dernières années par rapport au reste de l'échantillon (notamment 1999, 2002 et 2003). (Lang et al., 2014; Soubeyrou et al., 2015).

Les pluies extrêmes dans le sud de la France. D'après Vautard et al. (2015), la région méditerranéenne ressort comme une zone plus marquée par l'intensification des précipitations. Les données pluviométriques sur la période automnale (septembre, octobre et novembre) sur le massif des Cévennes sur la période 1950-2014 a permis d'observer une augmentation des précipitations journalières moyennes maximales d'environ 30% depuis 1950 avec une tendance de l'ordre de 4% par décennie. La période de retour de l'événement pluvieux de 2014 (record d'intensité depuis 1950) serait diminuée d'un facteur trois. Dans ce secteur, les auteurs montrent une corrélation entre l'augmentation des pluies

extrêmes et l'augmentation des températures avec un taux d'environ 7% / °C. Ces résultats donnent des ordres de grandeur d'une tendance significative mais présentent de fortes incertitudes (Vautard et al., 2015)

Une autre étude, centrée sur la région méditerranéenne des Cévennes à la basse vallée du Rhône montre également une tendance à l'augmentation de ces précipitations. De 1958 aux années 80, les maximums annuels des cumuls quotidiens de pluie sont restés stables. Ils ont augmenté de 1980 à 2014. Deux échelles spatiales (ponctuelle à partir de pluviomètres et étendue via la maille SAFRAN de 8x8 km) ont été utilisées permettant de montrer la forte variabilité géographique. Il n'y a pas de tendance significative sur le pourtour méditerranéen et le massif central. L'augmentation est significative, de + 20 à + 40 % (atteignant + 60 % localement) sur les pentes des Cévennes et la basse vallée du Rhône (Blanchet et al., 2016).

Enfin, l'analyse Météo France concernant les pluies diluviennes (nombre de jours de précipitation supérieures à 150 et 190 mm/jour) sur la région méditerranéenne par année sur la période 1958-2014 ne montre pas de tendance. Ce phénomène reste marqué par une forte variabilité (Figure 12).

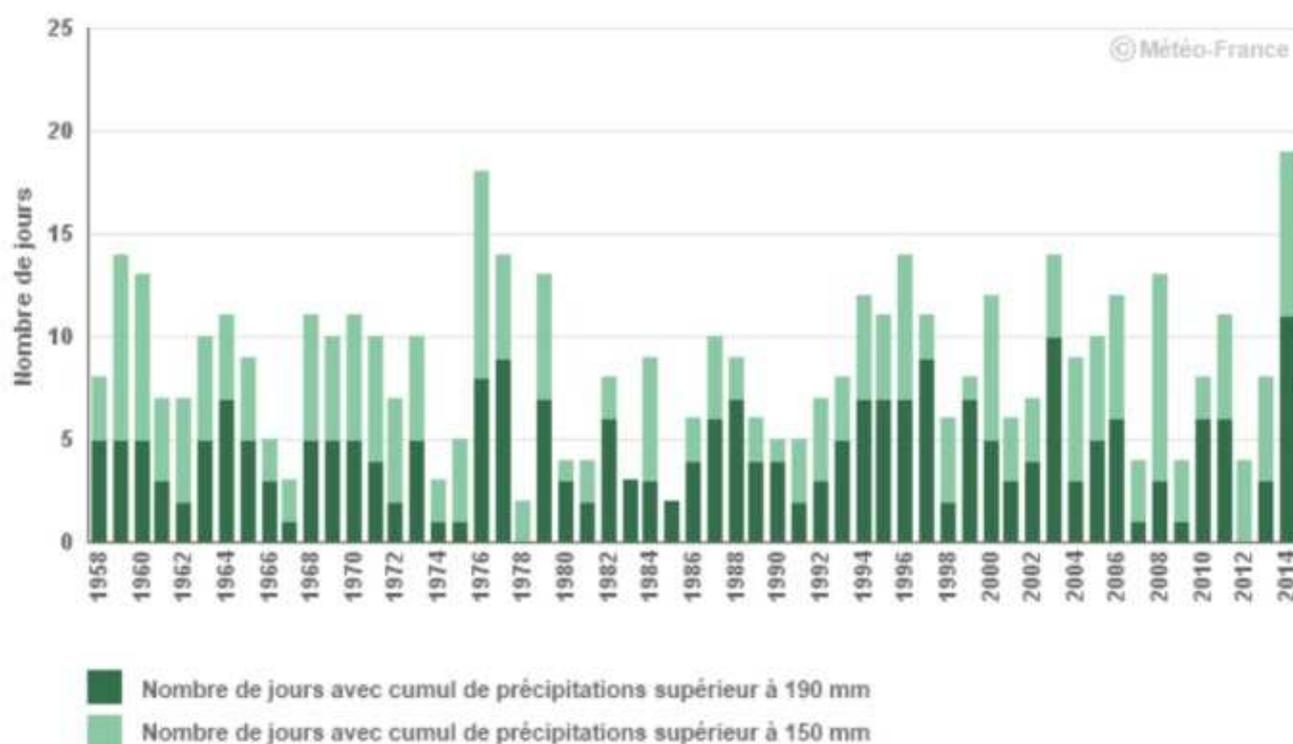


Figure 12 : Pluies diluviennes en région méditerranéenne sur la période 1958-2014. En vert claire, nombre de jours avec cumul de précipitations supérieur à 150 mm. En vert foncé, nombre de jours avec cumul de précipitations supérieur à 190 mm. (Climathd)

On constate qu'il est difficile d'établir un diagnostic sur une augmentation à la hausse des précipitations extrêmes en climat présent et futur car il est fortement dépendant des données, des méthodes utilisées et reste marqué par une forte variabilité. Malgré cela un signal se dégage montrant une augmentation des maximums journaliers dans le sud de la France, notamment en automne dans les Cévennes.

L'été sera le plus impacté par les diminutions des précipitations.

Malgré l'amélioration des modèles dans la représentation des précipitations, notamment par une meilleure prise en compte de la topographie, les incertitudes sur l'évolution des précipitations restent fortes, comme en atteste la dispersion représentée par les boîtes à moustaches de la Figure 13. Cela se traduit par des tendances parfois contradictoires entre les modèles. De façon générale, les résultats concernant l'évolution des précipitations annuelles moyennes du modèle Aladin-Climat sont proches de la médiane des projections Euro-cordex tandis que ceux du modèle WRF font partis de la fourchette haute des projections (Figure 13).

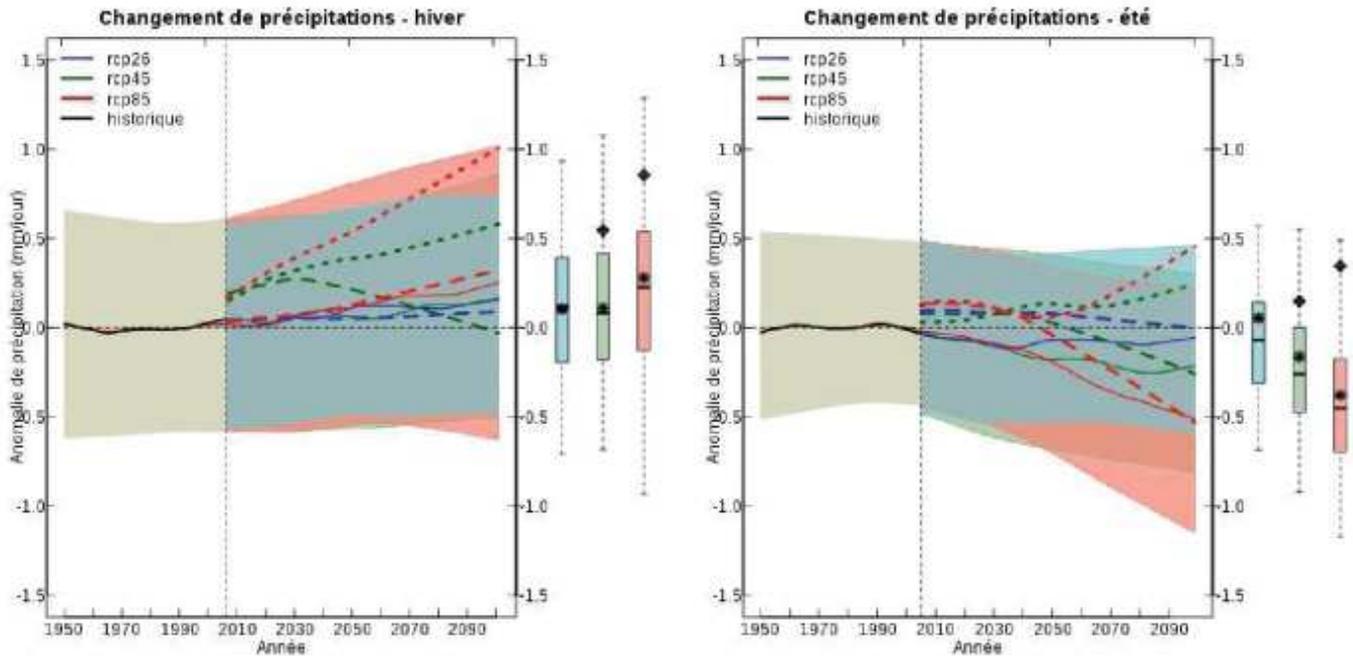


Figure 13 : Evolution des précipitations en moyenne sur la France (mm/jour) en hiver (à gauche) et en été (à droite), relativement à la référence 1976-2005. Les moyennes d'ensemble de chaque scénario RCP (lignes continues, RCP2.6 en bleu, RCP4.5 en vert et RCP8.5 en rouge) sont accompagnées de leurs dispersions (enveloppes colorées correspondant à l'intervalle 5 %-95 % de l'ensemble). La courbe noire représente la moyenne d'ensemble des simulations « historiques » de CMIP5 (de 1950 à 2005), et l'enveloppe colorée associée la dispersion de cet ensemble. Les lignes discontinues et pointillées correspondent aux évolutions respectives pour les simulations Aladin-Climat et WRF. Les diagrammes en boîte donnent les distributions moyennes de l'ensemble sur la période 2071-2100 (minimum, 25e centile, 50e centile, 75e centile et maximum), et sont accompagnés des moyennes 2071- 2100 pour le modèle Aladin-Climat (astérisques noirs) et le modèle WRF (losanges noirs) (Ouzeau et al., 2014).

L'augmentation moyenne des précipitations est légèrement plus importante à l'échelle européenne par rapport aux résultats du projet ENSEMBLE sous scénario A1B. Pour la France, les précipitations moyennes annuelles présentent une tendance significative à l'horizon 2071-2100 sous le scénario le plus pessimiste 8.5 avec une tendance à la diminution dans le sud (entre -5 et -15%) et à une augmentation dans le nord-est (entre +5 et +15 %). Le reste du territoire, centre et nord-ouest, resterait équivalent (entre -5 et +5%). Le scénario 4.5 montre une tendance à la stagnation avec un faible indice de confiance (Jacob et al., 2014).

L'analyse des projections du CMIP5 sur la France réalisée par Terray et Boé (2013) montre une tendance marquée à la diminution des précipitations estivales, surtout dans le Sud, pour la fin du siècle d'environ -0.6 mm/jour sous le scénario RCP 8.5 et une augmentation modérée en hiver de +0.3 mm/jour. Il n'y a pas d'évolution attendue en automne et au printemps. La Figure 14 (haut), issue de la thèse de Dayon (2015) représente les tendances pour la France issue des modèles globaux du V^{ème} rapport du GIEC. L'incertitude due au caractère aléatoire des précipitations est constante au cours du XXI^{ème} siècle et est d'environ +0.33 mm/jour en hiver et +- 0.25 mm/jour en été. L'incertitude épistémique, imputable à la représentativité limitée des modèles induite par le manque de connaissance, tend presque à doubler entre le milieu (+0.19 en hiver et +- 0.29 en été) et la fin du siècle (+0.35 en hiver et 0.47 en été). A noter qu'il existe une autre source d'incertitude qui est liée au choix du scénario RCP (Terray and Boé, 2013 ; Dayon, 2015).

La descente d'échelle réalisée par le projet ENSEMBLE est de type dynamique (modèles régionaux forcés par les résultats des modèles globaux). Avec une désagrégation statistique (attribution de relations entre des variables globales et locales), Dayon montre dans sa thèse les mêmes tendances générales. Une différence sensible en été apparaît, la diminution des précipitations est plus marquée et cela dès aujourd'hui (alors que le début de la diminution est significative à partir de 2030 pour le projet ENSEMBLE) et quel que soit le RCP (pas de tendance pour le RCP2.6 selon ENSEMBLE). Ainsi la diminution des précipitations estivale serait comprise entre -0.3 et -0.8 mm/jour à l'horizon 2080 (Figure 14, bas). Les deux approches sont différentes et bien que la désagrégation statistique diminue l'incertitude liée aux modèles et à la variabilité interne du climat, il n'est pas possible de dire que l'une est plus « juste » que l'autre (Dayon, 2015).

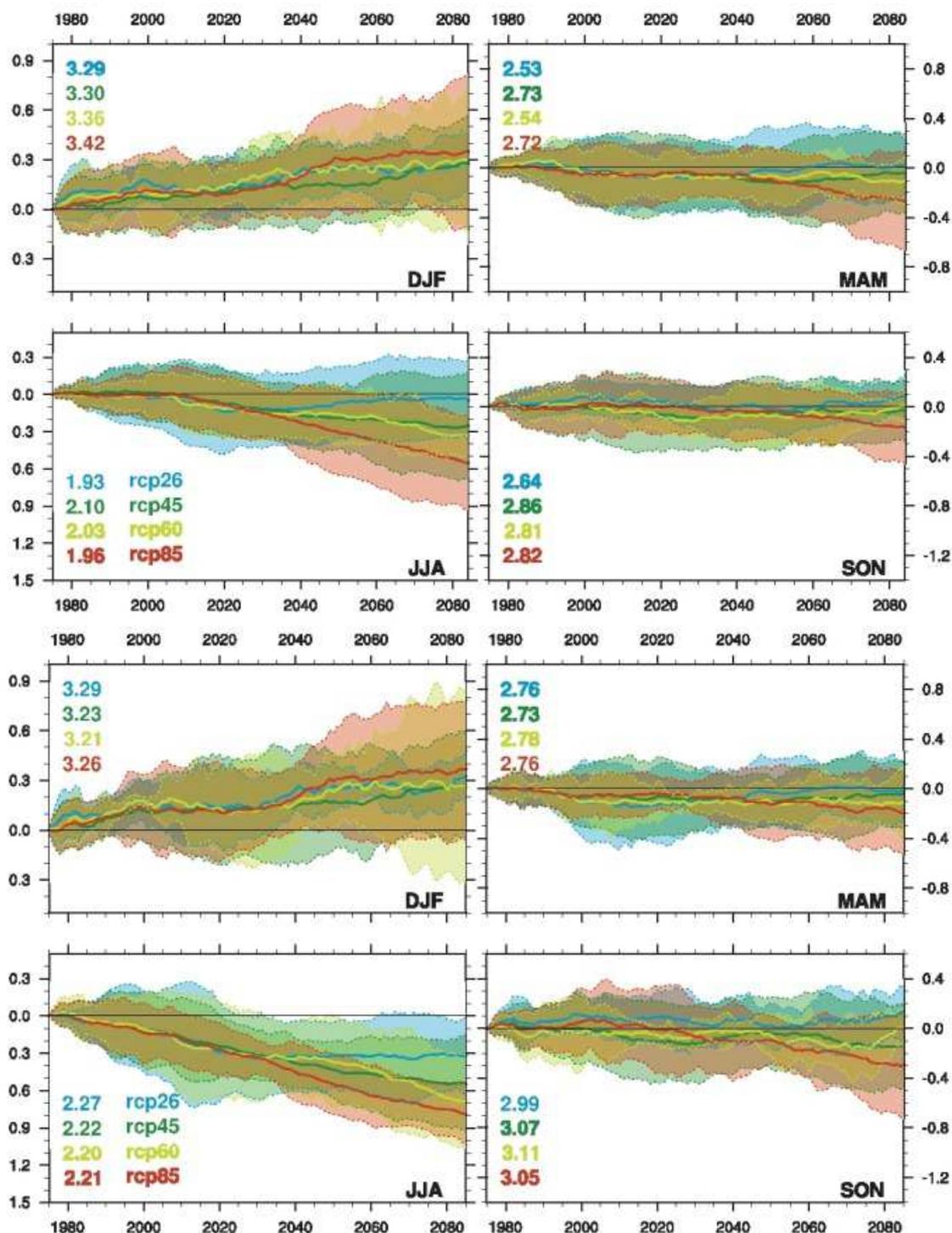
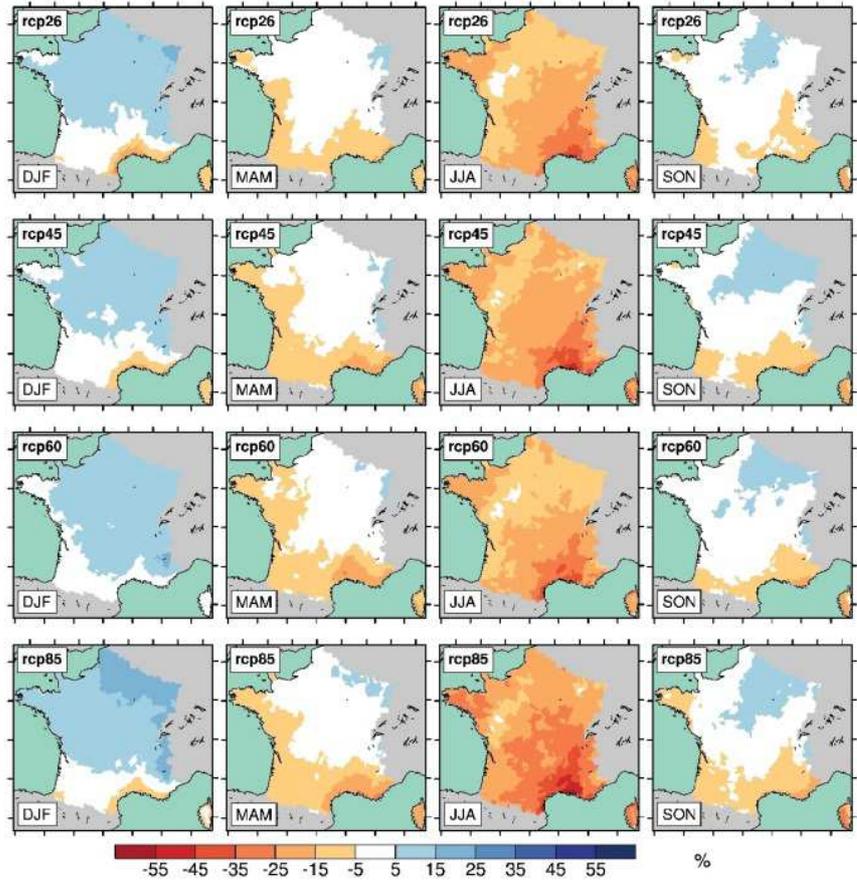


Figure 14 : Moyenne d'ensemble des anomalies de précipitations (mm/jour) saisonnière moyenne sur la France simulées par les Modèles de Circulation Générale (GCM) du Vème rapport du GIEC (haut) et désagrégées à l'échelle de la France (bas) par rapport à la période 1960-1990 pour les quatre scenarios RCP. La moyenne d'ensemble des précipitations de référence (mm/jour) sur la période 1960-1990 est indiquée par les chiffres de couleurs. Les lignes pointillées indiquent l'estimation de l'incertitude climatique totale à [5%-95%]. Les anomalies sont calculées par rapport à la référence de chaque simulation et la moyenne d'ensemble sur les GCM est filtrée avec une moyenne glissante de 31 ans. Les saisons sont indiquées par les premières lettres des mois : DJF : Décembre-Janvier-Février, MAM : Mars-Avril-Mai, JJA : Juin-Juillet-Août, SON : Septembre-Octobre-Novembre (Dayon, 2015).

Les projections à l'échelle mondiale et européenne montrent un gradient Nord-Sud d'évolution des précipitations sous le scénario le plus pessimiste (RCP 8.5) (Terry and Boé, 2013 ; Jacob et al., 2014). Avec une diminution au sud et une augmentation au nord. Les dernières projections réalisées, à l'échelle de la France dans la thèse de Dayon, confirment cette tendance que l'on retrouve quels que soient la saison, l'horizon temporel et le scénario considérés (**Erreur !**



Source du renvoi introuvable.)

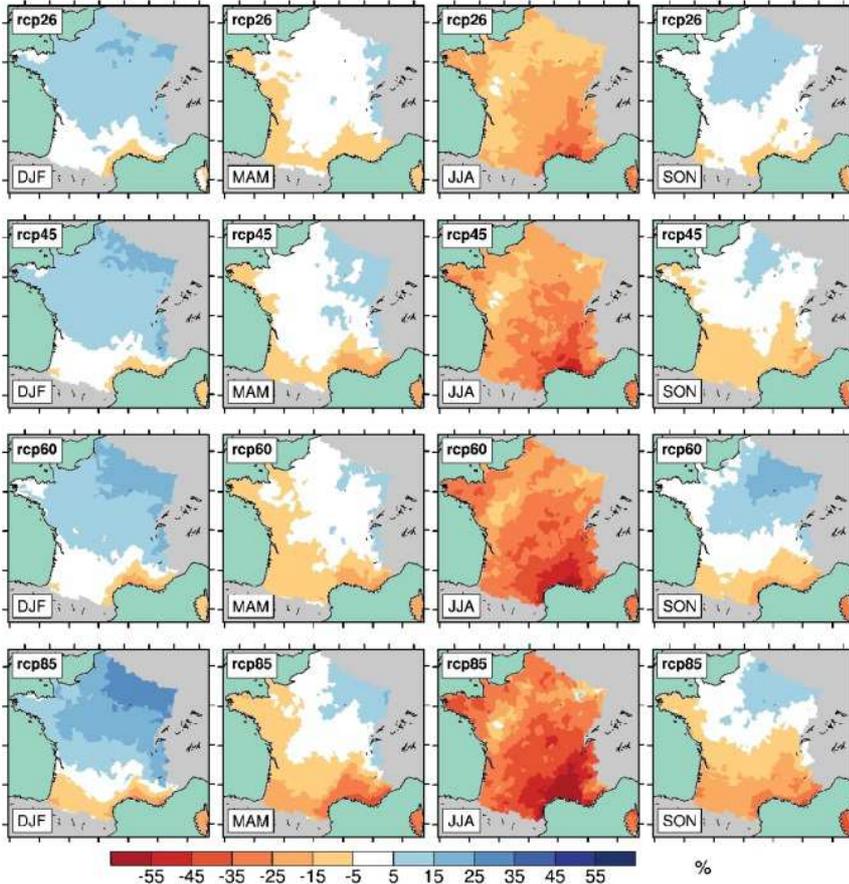


Figure 15 : Moyenne d'ensemble des changements saisonniers relatifs de précipitations désagrégées (%) sur la période 2035-2065 (à gauche) et 2070-2100 (à droite) par rapport à la période 1960-1990 pour les quatre scénarios RCP. Plusieurs modèles par scénario. Les saisons sont indiquées par les premières lettres des mois : DJF : Décembre-Janvier-Février, MAM : Mars-Avril-Mai, JJA : Juin-Juillet-Août, SON : Septembre-Octobre-Novembre (Dayon, 2015).

Les résultats suivants sont issus des deux modèles français comparés à une partie des modèles du Vème rapport du GIEC. On retrouve globalement les tendances évoquées précédemment. Nous présentons ici les cartes obtenues sous le RCP 8.5 car c'est sous ce scénario que les tendances sont les plus marquées. Les incertitudes sont représentées, comme pour les températures, par les boîtes à moustaches de la Figure 13 les valeurs de C25, C75 et par le Tableau 3.

En hiver, les projections montrent une tendance à une augmentation progressive des précipitations au cours du XXI^{ème} siècle pour atteindre +0.1 à +0.28 mm/jour suivant les scénarios. Les projections du modèle Aladin-climat sont proches de la médiane du projet Euro-Cordex. Le modèle WRF montre une augmentation pouvant atteindre 0.85 mm/jour suivant le scénario 8.5 à l'horizon 2071-2100. Il se situe dans la fourchette haute de l'ensemble des projections (Figure 15).

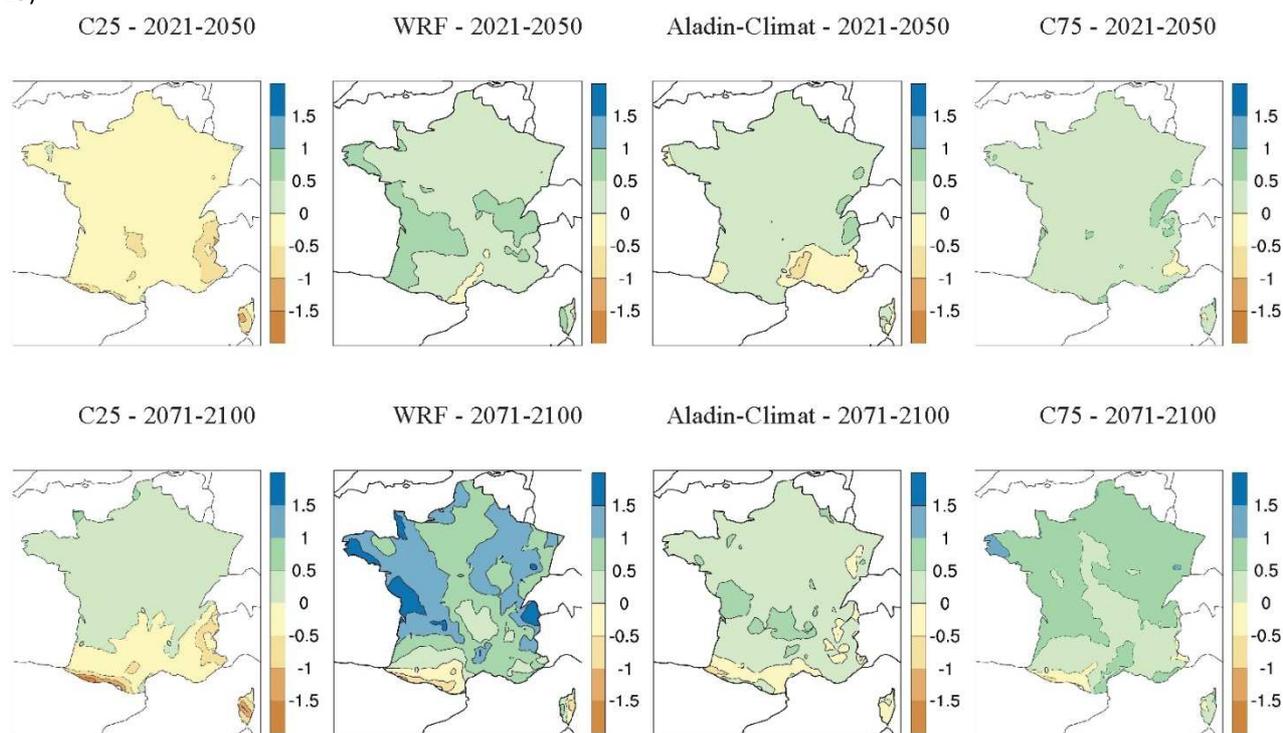


Figure 15 : Écart de précipitations hivernales (mm/jour) en France relativement à la référence 1976-2005, pour le scénario RCP8.5, aux horizons 2021-2050 et 2071-2100. Pour chaque ligne, de gauche à droite : 25e centile de l'ensemble, WRF, Aladin-Climat, 75e centile de l'ensemble (Ouzeau et al., 2014).

En été, les résultats des scénarios 4.5 et 8.5 présentent une tendance à la diminution des précipitations à l'horizon 2071-2100 en considérant l'ensemble des modèles Euro-Cordex (la Figure 16 représente le RCP8.5). Le scénario 2.6 ne montre pas de tendance. A l'horizon 2071-2100, le modèle Aladin-Climat montre une diminution de l'ordre de 0.16 à 0.38 mm/jour. L'augmentation de 0.15 à 0.32 mm/jour projeté par le modèle WRF est jugée peu probable du fait qu'il fait partie des projections extrêmes d'Euro-Cordex. Aux horizons proches et moyens, contrairement au projet Euro-Cordex, les deux modèles projettent une légère augmentation pour tous les scénarios jusqu'à l'horizon 2040 (Ouzeau et al., 2014).

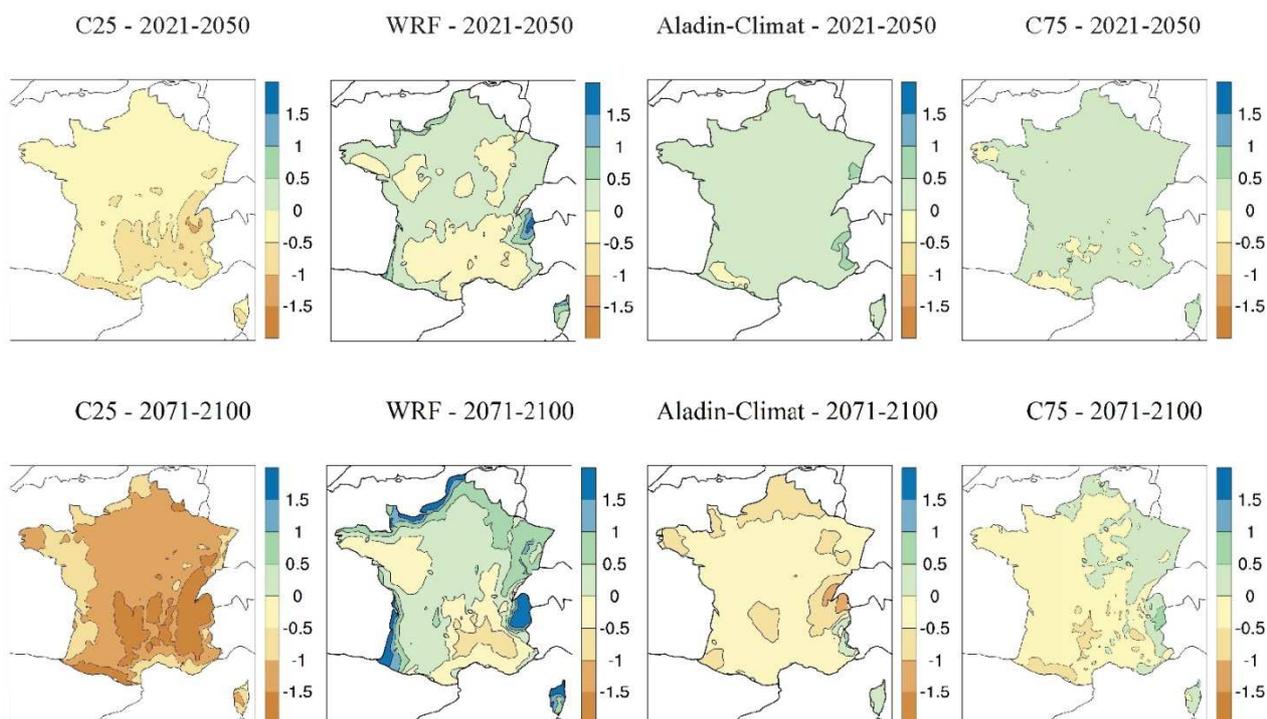


Figure 16 : Écarts de **précipitations estivales** (mm/jour) en France relativement à la référence 1976-2005, pour le scénario RCP8.5, aux horizons 2021-2050 et 2071-2100. Pour chaque ligne, de gauche à droite : 25e centile de l'ensemble, WRF, Aladin-Climat, 75e centile de l'ensemble (Ouzeau et al., 2014).

Le tableau 3 ci-dessous permet de placer les projections issues des deux modèles nationaux par rapport à l'ensemble des projections du projet Euro-Cordex. Cela en fonction de l'horizon temporel et du scénario considéré. Il donne les ordres de grandeur d'évolution des précipitations estivales et hivernales à l'échelle nationale.

PRECIPITATIONS		C25	WRF	Aladin-Climat	C75
HIVER					
2021-2050	RCP 2.6	-0,13	Indisponible	+0,21	+0,34
	RCP 4.5	-0,21	+0,07	+0,01	+0,32
	RCP 8.5	-0,16	+0,41	+0,20	+0,41
2071-2100	RCP 2.6	-0,19	Indisponible	+0,10	+0,39
	RCP 4.5	-0,8	+0,54	+0,11	+0,42
	RCP 8.5	-0,13	+0,85	+0,28	+0,54
ETE					
2021-2050	RCP 2.6	-0,27	Indisponible	~0	+0,11
	RCP 4.5	-0,40	+0,42	+0,36	~0
	RCP 8.5	-0,49	+0,08	+0,15	~0
2071-2100	RCP 2.6	-0,31	Indisponible	+0,05	+0,14
	RCP 4.5	-0,48	+0,15	-0,16	~0
	RCP 8.5	-0,70	+0,32	-0,38	-0,17

Tableau 3 : écarts des précipitations par rapport à la moyenne de référence 1976-2005, pour chacun des modèles et scénarios, en moyenne aux horizons 2021-2050 et 2071-2100. Les valeurs C25 et C75 correspondent respectivement au 25^{ème} et 75^{ème} centile d'une partie des projections issues du projet Euro-Cordex (Ouzeau et al., 2014).

Aucune tendance forte ne se dégage sur les Alpes concernant une évolution des précipitations, éventuellement un léger déficit en automne et en été pour la fin du siècle sous le scénario RCP 8.5, le plus pessimiste.

Les pluies extrêmes. L'augmentation de la résolution améliore les projections d'occurrence d'apparition des pluies extrêmes grâce à une meilleure prise en compte des processus physiques influencés par la topographie et l'intégration de co-variables climatiques par certains modèles. Les résultats du projet Euro-Cordex montrent pour la France une tendance à une augmentation généralisée du nombre de jours de pluie extrêmes (pluie d'intensité journalière supérieure au 95^{ème} centile. Seules les précipitations supérieures à 1mm par jour sont considérées) de +5 à +25% pour les scénarios RCP 4.5 et 8.5 et quelle que soit la saison considérée à l'exception de l'été sous le scénario 8.5 qui prévoit une diminution estivale moyenne de -15% pour le sud de la France. L'augmentation étant plus marquée sur la partie nord du territoire (Jacob et al., 2014).

L'analyse de 44 séries journalières du sud de la région Cévennes-Vivarais a permis d'associer deux co-variables climatiques aux épisodes de pluie extrêmes : la fréquence du type de temps représentant un flux de sud à est et la température mensuelle de l'air. En faisant l'hypothèse d'une persistance de la relation entre ces co-variables et les événements de pluie extrêmes dans le futur, il a été montré à l'horizon 2071-2100, selon le scénario pessimiste A2, une augmentation de 16% des conditions favorables aux événements de pluie extrêmes via l'utilisation d'un modèle fréquentiel non stationnaire basé sur ces co-variables. Cela se traduit par une diminution de la période de retour. Les incertitudes sont fortes car ces projections sont comprises dans la gamme d'incertitude du modèle (Soubeyroux et al., 2015).

L'analyse de l'ONERC montre un faible changement du pourcentage des précipitations extrêmes (part des précipitations supérieure au 90^{ème} centile sur le total des précipitations annuelles) à l'horizon proche (2021-2050). Ces projections étant dans la fourchette basse des projections Euro-Cordex qui prévoient une augmentation atteignant plus de 5% dans le sud-est. A l'horizon 2071-2100, la tendance est plus marquée, comme le projet Euro-Cordex, les résultats nationaux montrent une augmentation généralisée de la part des précipitations extrêmes atteignant les 5 % sur la majorité du territoire sous le scénario 8.5 (Figure 17) (Ouzeau et al., 2014).

On peut donc s'attendre à une légère tendance à l'intensification des précipitations extrêmes sur le territoire. Mais les incertitudes sont fortes du fait de la difficulté de modéliser ces phénomènes et du manque de tendance marquée par le passé (Jacob et al., 2014; Lang et al., 2014 ; Ouzeau et al., 2014).

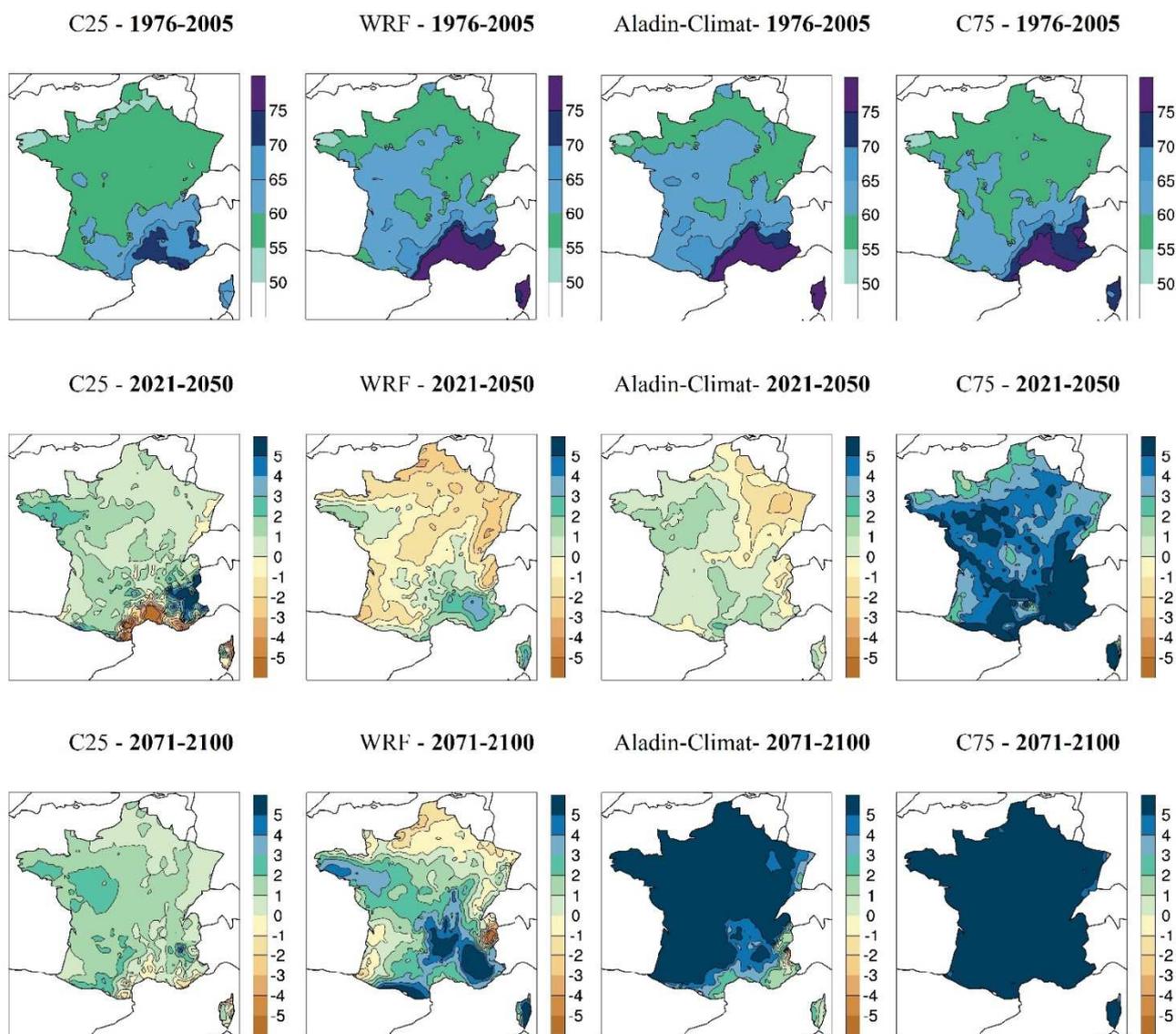


Figure 17 : Pourcentage des précipitations extrêmes annuelles, pour la période de référence 1976-2005 (ligne du haut) et les écarts à cette référence pour le scénario RCP8.5, aux horizons 2021-2050 (ligne du milieu) et 2071-2100 (ligne du bas). Pour chaque ligne, de gauche à droite : 25^{ème} centile de l'ensemble, WRF, Aladin-Climat, 75^{ème} centile de l'ensemble (Ouzeau et al., 2014).

Le couvert neigeux sera impacté en quantité et en qualité

De la température en zone montagneuse dépend principalement les alternances gel/dégel, le ratio pluie/neige, la limite du couvert neigeux ou encore la ligne d'équilibre glaciaire (Einhorn et al., 2015). L'évolution de ces processus impactera les activités économiques, l'hydrologie, les avalanches, le transport sédimentaire et les écosystèmes.

Les mesures de hauteur totale de neige au sol réalisées au col de Porte (1300 m, Isère) sur la période 1961-2015 montrent une diminution de la durée de jours de présence de neige au sol de l'ordre de 5 jours/décennie et une diminution de plus de 10 jours/décennie de nombre de jours avec plus de 1 m au sol (météo France).

La synthèse des projections disponibles sur les Alpes réalisée par Gobiet et al. (2014) confirme les résultats de la 1^{ère} synthèse à savoir une diminution du couvert neigeux et du nombre de jours de précipitation neigeuse. Cela concernerait toutes les altitudes et davantage celles situées en dessous de 2000 m.

Casteb Brunet et al. (2014) ne projettent pas de tendance d'évolution des précipitations moyennes. En revanche ils montrent que la nature des précipitations devrait changer, entraînant :

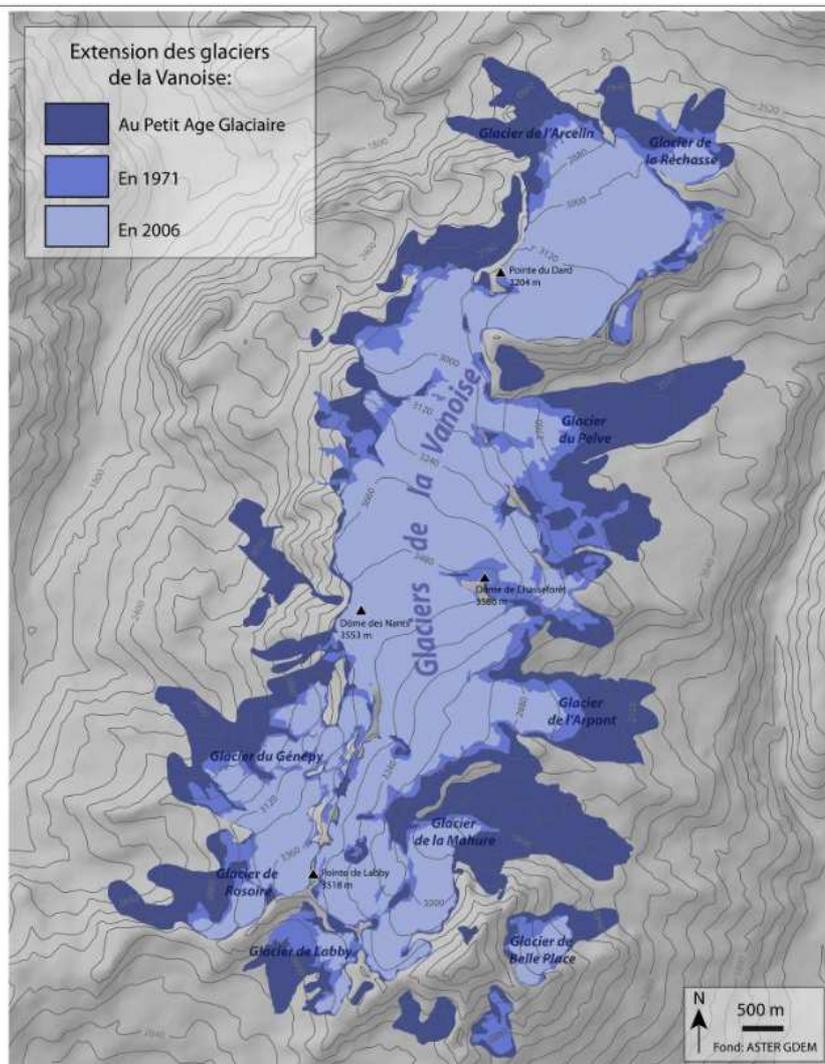
- une diminution de la part des précipitations neigeuses de 30 à 50 % pour le milieu et la fin du siècle respectivement sur toutes les Alpes à 1800 mètres d'altitude sous le scénario A1B par rapport à la période 1960/90. A 3000 m d'altitude, le phénomène est moins marqué et serait d'environ -10% au milieu du siècle et -30% pour la fin du siècle. Ceci se concentre principalement au printemps et aux basses altitudes ;
- la part des précipitations neigeuses humides augmenterait de façon significative et apparaîtrait plus tôt dans la saison, également à haute altitude ;
- l'activité avalancheuse (ainsi que sa variabilité interannuelle) tendrait à diminuer de 20 à 30%, principalement au printemps et aux basses altitudes. Elle pourrait augmenter aux hautes altitudes à cause des chutes de neige humides (Casteb Brunet et al., 2014).

D'autres travaux estiment une diminution de la part des précipitations neigeuses sur les Alpes de -25 % [-20% ; -35%] à l'horizon 2050 sous le scénario A1B à partir de trois modèles climatiques et de deux méthodes de descente d'échelle. Ce résultat est la valeur médiane des projections, l'intervalle représentant respectivement le 20^{ème} et 80^{ème} centile. La valeur médiane d'augmentation des précipitations liquides est de +10% (Piazza et al., 2014).

A partir de 330 projections climatiques régionales obtenues sous le scénario A1B, Magand (2015) a déterminé l'évolution du partage des précipitations liquides et solides sur le bassin versant de la Durance. Les chutes de neige étant directement corrélées à la température, le signal sur l'évolution des précipitations neigeuses est plus clair que les précipitations totales. En fixant de façon empirique la limite pluie neige à 1°C, il ressort une diminution annuelle des précipitations neigeuses comprise entre -44 et +5 % (respectivement -107 et +10 mm/an) avec une moyenne à -23 % soit -51 mm/an. La partie amont du bassin versant est la plus touchée avec une part des précipitations neigeuses sur les précipitations totales annuelles qui passe de 41% pour la période de référence (1980-2009) à 34% à l'horizon 2050 (Sauquet et al., 2014 ; Magand, 2015).

Le projet GLaRiskAlp (2010-2013) montre une accélération du retrait des glaciers des Dômes de la Vanoise (Alpes). Depuis la fin du Petit Age Glaciaire (environ 1850) ils sont passés d'une superficie d'environ 40 à 19.6 km², soit une diminution de 50 %. Entre 1971 et 2006, la diminution est de 13 % soit plus de 5 km² (Figure 18).

Figure 18 : Retrait des glaciers des Dômes de la Vanoise (France) depuis le Petit Âge Glaciaire (glariskalp.eu).



Malgré deux phases de léger accroissement des glaciers Suisses et de la Mer de Glace au cours du XXème siècle (au début du siècle et dans les années 70-80), le bilan est à une diminution significative de la superficie et de l'épaisseur. Les phases de pertes étant très marquées, notamment depuis 1998 (Pellicciotti et al., 2014; Vincent et al., 2014). Concernant les projections dans le futur, l'incertitude reste importante sur les ordres de grandeur et les échéances en fonction, notamment, de la méthode de corrélation avec la température utilisée et du degré de prise en compte du rôle des débris par les modèles (Pellicciotti et al., 2014).

Vincent et al. (2014) projettent un retrait d'environ 1200 mètres de la Mer de Glace à l'horizon 2040 par rapport à 2012.

Sur la base d'une augmentation et d'une stabilisation de l'élévation des températures à + 2°C, la surface et le volume des glaciers Suisses pourrait diminuer respectivement de 35 et 20 % en 2100 par rapport à 2000 et resterait stable jusqu'en 2150. En revanche si l'augmentation des températures n'est pas plafonnée à +2°C, la diminution pourrait être beaucoup plus marquée, -50% en superficie et -75% en volume dès 2050. Cette étude montre également une diminution d'environ 70% du volume ruisselé annuellement à l'horizon 2150 par rapport à 2000, ainsi qu'une diminution de la variabilité interannuelle. Cette diminution commencerait autour de 2050 (Salzmann et al., 2012).

D'après Gardent et al. (2014), en 2006-2009, la surface totale des glaciers alpins français était d'environ 275 km², contre 340 km² en 1985-86 et environ 369 km² en 1967/71. Soit une diminution moyenne de surface de - 0.63 %/an à l'échelle des Alpes. Ce taux est supérieur pour les glaciers des massifs de la Vanoise (- 0.76 %/an), des Ecrins (- 0.84 %/an) et l'ensemble des autres glaciers (-1.14 %/an) à l'inverse des glaciers du massif du Mont Blanc qui présentent le taux le plus faible (-0.26 %/an). L'accélération du phénomène sur la période est mise en avant par l'étude, les glaciers du Mont Blanc étant également les moins impactés (Figure 19). De façon générale, les glaciers qui reculent le plus sont les petits, aux basses altitudes, orientés à l'Est, au Sud/Est ou au Sud et avec les pentes les plus importantes (Gardent et al., 2014).

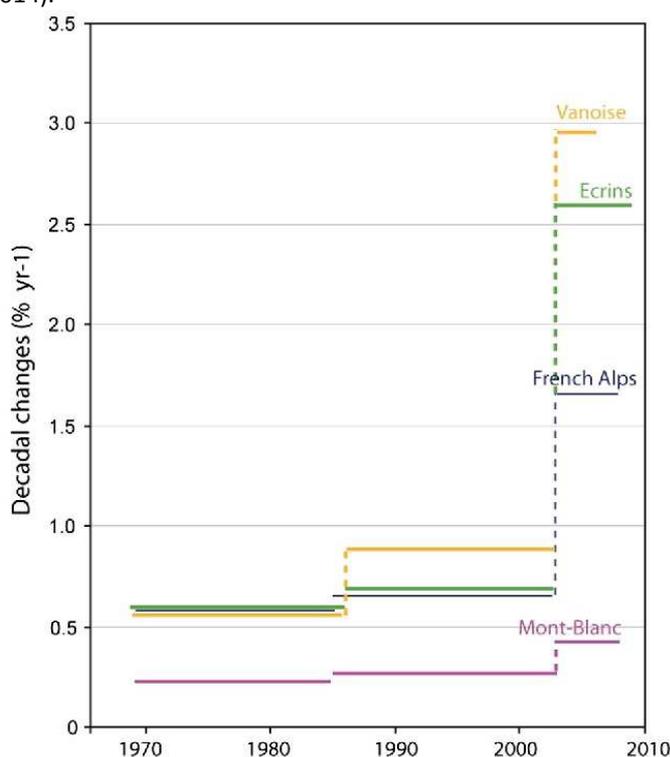


Figure 19 : Changement décennal de la surface des glaciers français du massif des Alpes exprimé en %/an de 1967/71 à 2006/09 (Gardent et al., 2014).

1.3 ÉVOLUTION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION ET DES SECHERESSES

Tendance à l'augmentation de l'évapotranspiration

L'évapotranspiration est une variable clé du cycle hydrologique, elle conditionne l'humidité des sols, facteur régulant le partage des précipitations entre infiltration et ruissellement ainsi que la recharge des eaux souterraines.

Dans un climat théorique plus chaud, il est très probable (90-100 % de probabilité) que l'évapotranspiration de référence augmente sous l'effet d'une augmentation de l'énergie disponible en surface et d'une augmentation de l'humidité spécifique à saturation (un air plus chaud peut contenir plus de vapeur d'eau) (IPCC, 2014 ; Dayon G., 2015). Un nombre important de variables contrôle ce processus incluant le rayonnement (solaire et atmosphérique), le vent, l'humidité, la température, la couverture végétale et l'eau disponible. En plus de ces facteurs de contrôle, l'évapotranspiration serait également dépendante de phénomènes climatiques de grande échelle (Douville et al., 2013; Miralles et al., 2014). Ainsi les incertitudes sont grandes sur l'amplitude des changements et la confiance associée aux projections est jugée faible par le GIEC. Il semblerait que les modèles du CMIP5 tendent à surestimer ce phénomène (Mueller and Seneviratne, 2014).

La connaissance de la variabilité de l'évapotranspiration et des processus la contrôlant est bonne aux échelles journalières et annuelles mais insuffisante à l'échelle pluriannuelle et climatique (Wang and Dickinson, 2012). Le réseau de mesure mondial dédié (FLUXNET) a moins de 20 ans, empêchant de déterminer des tendances (IPCC, 2014). A partir d'autres méthodes (par bilan hydrologique principalement), des travaux récents confirment la tendance à l'augmentation de l'évapotranspiration réelle depuis les années 1980 annoncé dans le 5ème rapport du GIEC. Selon Zeng et al. (2014), elle aurait augmenté à l'échelle mondiale de +1.51 mm/an [1.11 ; 2.06] sur la période 1982-2009. Une étude montre que la tendance à l'augmentation de l'évapotranspiration est bien marquée sur l'hémisphère nord et vaudrait environ + 0.66 mm/an sur la période 1980-2011 (Miralles et al., 2014). Une autre étude montre une tendance de +0.49 mm/an à l'échelle mondiale et de +0.84 mm/an pour l'Europe sur la période 1981-2012. La tendance européenne étant le résultat d'une augmentation forte de la transpiration des végétaux de +1.16 mm/an et d'une augmentation de l'évaporation de l'eau interceptée par les végétaux de +0.19 mm/an. Ces augmentations sont atténuées par une diminution de l'évaporation directe de surface de - 0.5 mm/an (Zeng et al., 2014; Zhang et al., 2015). La transpiration par les végétaux est le processus majoritaire de l'évaporation. Au minimum 65% des flux terrestres transitent par les végétaux (Jasechko et al., 2013). Des expérimentations montrent que l'élévation de la concentration en CO₂ entraîne, par fertilisation, une diminution de la transpiration et l'augmentation de la température diminue les stades phénologiques. Ces deux processus devraient entraîner une meilleure efficacité de l'eau. Cependant la température favorise également la croissance et le développement foliaire ce qui augmente les flux transpirés. Ces phénomènes contradictoires rendent difficile l'établissement d'une tendance (Ukkola and Prentice, 2013). Les travaux présentés plus tôt montrent que la transpiration augmente en Europe. La diminution de l'évaporation de surface (évaporation directe, sans contrôle par les végétaux) évoquée précédemment est également la conclusion d'une étude de synthèse qui l'explique par une diminution de la vitesse du vent pouvant également entraîner une diminution de l'évapotranspiration de référence. Sur l'Europe le nombre de résultats est limité et les tendances contradictoires (McVicar et al., 2012).

Le GIEC montre plutôt des tendances à la diminution de la vitesse moyenne (annuelle et saisonnière) du vent, notamment en Europe mais la confiance est jugée faible du fait des fortes incertitudes sur les données (IPCC, 2013). Les projections du GIEC montrent une augmentation de l'évaporation de surface quasi généralisée à la surface des océans. Le CMIP5 souligne que l'évolution de l'ETR (évapotranspiration réelle) sera en partie corrélée aux changements de précipitation mais que le contrôle réalisé par les végétaux et les feedbacks qu'ils entraînent sur le cycle de l'eau ne sont pas suffisamment représentés par les modèles climatiques globaux, entraînant de fortes incertitudes sur les projections (IPCC, 2014). Pour les bassins où l'eau disponible est le principal facteur limitant, l'évapotranspiration réelle est principalement corrélée aux précipitations. C'est notamment le cas du pourtour méditerranéen. En zone plus humide, le couvert végétal influence également les flux (Ukkola and Prentice, 2013).

Une autre source d'incertitude est le lien encore trop méconnu de l'impact des phénomènes climatiques de grande échelle sur l'ETR (Douville et al., 2013). Déterminer l'ETR à partir d'un ETo (évapotranspiration de référence) projeté

est une source d'incertitude des modèles hydrologiques, le choix de la méthode peut entraîner des biais de plusieurs dizaines de millimètres par an (Bartholomeus et al., 2015).

Vicente-Seranno et al. (2014b) ont recensé l'ensemble des travaux ayant déterminé les tendances passées d'évolution de l'ETo en région méditerranéenne. Il ressort que parmi les 22 études, 15 montrent une tendance à l'augmentation, 3 ne montrent pas de tendances et 4 une tendance à la baisse (Vicente-Serrano et al., 2014b). D'autres études du même auteur montrent des tendances marquées à l'augmentation de l'ETo en Espagne.

L'évapotranspiration potentielle devrait donc augmenter tout au long du XXIème siècle. Le projet Explore 2070 projette sur le bassin RMC une augmentation de l'ETo de l'ordre de 20% à l'horizon 2046-2065 par rapport à 1961-1990 à partir de la formule de Penman Monteith. La faible dispersion autour de cette valeur médiane masque l'incertitude associée aux variables utilisées dans l'estimation comme la vitesse du vent ou l'évolution du couvert nuageux. L'incertitude associée à l'estimation de l'ETo peut être équivalente à celle liée au choix du modèle de circulation générale (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2012(a)).

L'évapotranspiration réelle devrait continuer à augmenter tant que l'eau du sol ou l'énergie disponible ne devient pas limitante. Les projections climatiques dans la thèse de G. Dayon vont dans ce sens. Sur le bassin versant du Rhône l'ETR tend à augmenter à l'horizon 2070-2100 (par rapport à 1960-1990) toute l'année sauf en été où elle diminuerait, l'eau disponible devenant limitante. Autrement dit, les stocks d'eau des sols à la fin du printemps ne permettraient plus de satisfaire la demande évaporatoire estivale. L'augmentation de l'ETR étant d'autant plus forte que le scénario de forçage radiatif est important. Il est par exemple de près de + 0.7 mm/jour sous le RCP 8.5 et d'environ + 0.2 mm/jour sous le RCP 2.6 pour au printemps (figure 21).

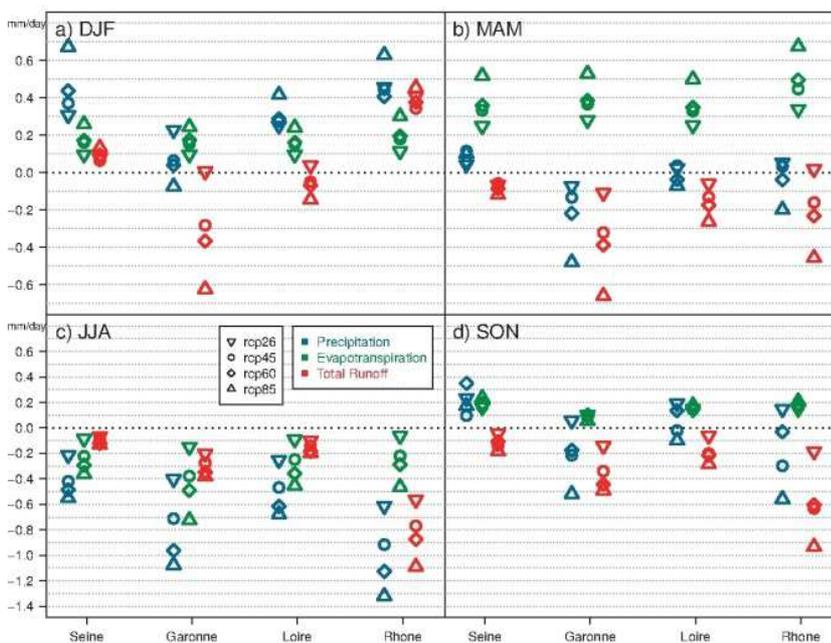


Figure 20 : Moyenne d'ensemble des changements saisonniers (mm/jour) des variables du cycle hydrologique pour les quatre scénarios par rapport à la période 1960-1990 pour la fin du siècle (2070-2100) sur les quatre grands bassins versants français : la Seine à Poses, la Garonne à Tonneins, la Loire à Montjean-sur-Loire et le Rhône à Beaucaire. Les saisons sont indiquées par les premières lettres des mois : DJF : Décembre-Janvier-Février, MAM : Mars-Avril-Mai, JJA : Juin-Juillet-Août SON : Septembre-October-Novembre (Dayon, 2015).

Le secteur agricole premier impacté

Le contexte probable de diminution des précipitations estivales à l'échelle nationale et d'augmentation de l'ETo tend à augmenter l'aridité, diminuer l'humidité des sols et diminuer la pluie efficace (part des précipitations qui ruisselle ou recharge les nappes). Tous ces phénomènes impacteront les cultures, qu'elles soient irriguées ou non.

Une étude de Fader et al. (2015) centrée sur les cultures méditerranéennes montre une augmentation significative des besoins d'irrigation pour la fin de siècle des cultures pérennes de + 5 à + 35 % suivant les scénarios et les cultures considérées. L'augmentation des besoins est la plus forte pour les arbres fruitiers (vigne en tête). L'effet bénéfique de l'élévation de la concentration en CO2 atmosphérique sera principalement pour les plantes ayant un mécanisme de fixation du carbone dit en C3. Leur besoin supplémentaire en eau d'irrigation devrait être plus limité (maximin + 10 %), et pourrait diminuer pour certaines, notamment le tournesol et la pomme de terre de près de 10 % (Fader et al., 2015).

Les flux transpirés par les végétaux évolueront via des changements phénologiques, physiologiques et suite à un changement d'occupation du sol, notamment lors de changements de cultures, des essences composant les forêts ou suite à un développement, ou retrait de la superficie totale des forêts. Ces différentes évolutions joueront un rôle majeur dans le futur mais il est difficile de projeter leur tendance. Il est déjà très difficile d'identifier des tendances passées du fait des incertitudes sur les variables utilisées pour les déterminer (l'ETR, les pluies et les débits principalement) (Gerten, 2013).

Le projet CLIMATOR apporte des éléments sur les réponses possibles des cultures et des forêts au changement climatique. Les projections climatiques (selon le scénario A1B, deux méthodes de descente d'échelles statistiques et le modèle climatique régional ARPEGE) montrent une diminution des précipitations et une augmentation de l'ETo. Cette augmentation de l'aridité est principalement marquée en été. L'impact de ces scénarios sur les cultures a été projeté dans le futur proche, noté FP (2020-2049) et lointain, noté FL (2070-2099) à l'aide de différents modèles agronomiques. Les résultats tendent à montrer, malgré l'amélioration de l'efficacité, un besoin supplémentaire d'eau d'irrigation. La temporalité va également évoluer. La Figure 21 l'illustre pour le maïs en différentes localités et avec différentes variétés. Les besoins arriveront plus tôt dans la saison notamment pour assurer la levée des cultures et s'arrêteront plus tôt, ce qui permettra pour certaines cultures d'éviter les déficits hydriques estivaux. A noter que cela augmentera le temps d'interculture en été, augmentant le risque de lessivage et d'érosion (Brisson et al., 2010).

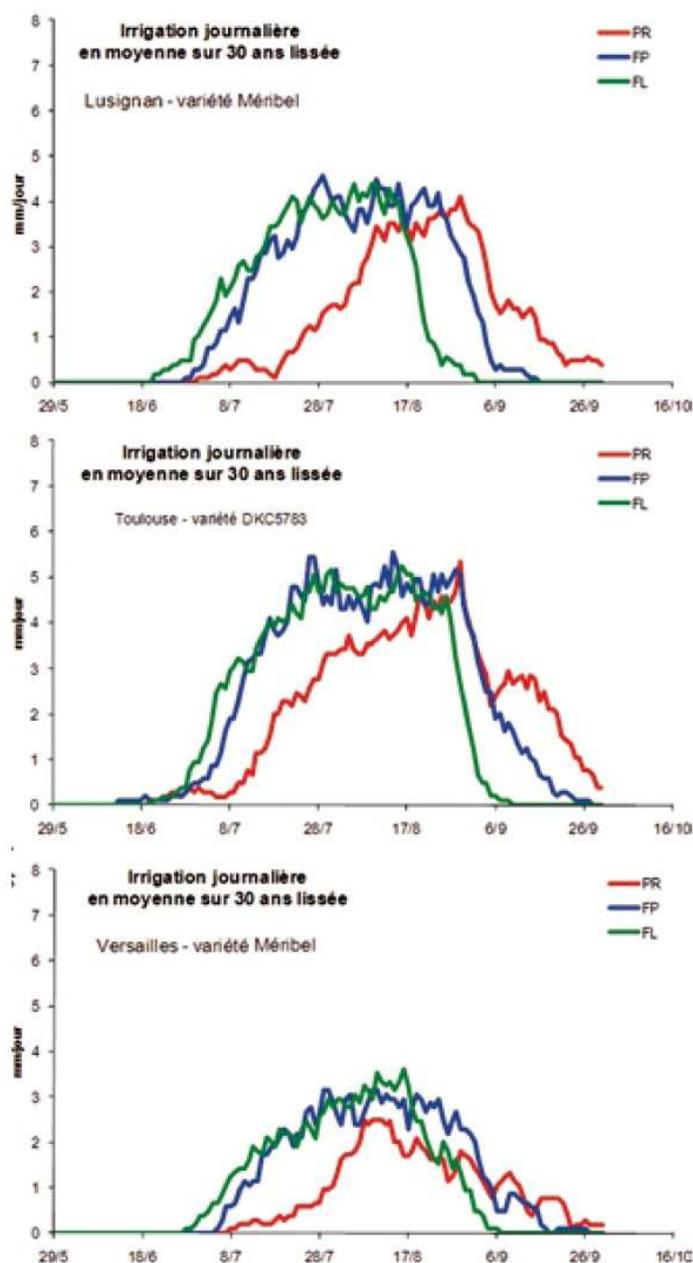


Figure 21 : besoins journaliers en irrigation (moyennes sur trente ans, lissage par pas de 7 jours) d'un maïs irrigué à 0,8 ETM – évapotranspiration maximale (pour Lusignan variété précoce, Toulouse variété tardive et Versailles variété précoce) (Brisson et al., 2010).

Parmi les conclusions de l'étude, il ressort notamment que :

- Le confort hydrique (traduit par le rapport ETR/ETM) des cultures pluviales diminuera sur tous les systèmes considérés ;
- Le besoin virtuel en eau des cultures (ETM-ETR) augmentera dans le futur proche et tendra à décroître dans le futur lointain. Ceci étant dû au raccourcissement attendu des stades phénologiques, principalement pour les cultures de printemps ;
- Les auteurs estiment que la diminution des précipitations entrainera une diminution de l'eau disponible pour les végétaux (« eau verte ») d'environ 1/3 et une diminution de l'eau de surface et souterraine (« eau bleue ») de 2/3. Autrement dit, cela impactera principalement la recharge des eaux souterraines et le ruissellement de surface.

Ces tendances sont peu influencées par la méthode de descente d'échelle et restent cohérentes entre les différents systèmes de culture. Les variations sont induites par les caractéristiques des sols, le choix des cultures et les pratiques culturales. Cette étude met en évidence la nécessité d'adaptation du monde agricole en prenant conscience des opportunités et des risques associés au changement climatique concernant la ressource en eau (Brisson et al., 2010).

Le projet Agriculture, Forêt, Climat (AFClm), porté par le ministère de l'agriculture visait à analyser les effets du changement climatique sur l'agriculture et les forêts françaises et envisager des actions d'adaptation en tenant compte des facteurs socio-économiques, à partir de 14 études de cas sur le territoire et du modèle climatique ARPEGE forcé sous le scénario A1B. Par modélisation, des bilans hydriques des sols ont été réalisés afin de quantifier l'évolution du confort hydrique des végétaux. Les scénarios d'évolution des sécheresses édaphiques sont issus du projet Climsec. Le raccourcissement de la durée des stades phénologiques des cultures a été pris en compte en faisant l'hypothèse volontaire de garder les mêmes itinéraires techniques et de date de semis afin de représenter l'impact et donc la nécessité ou non de s'adapter. Les quatre sites étudiés sur le bassin Rhône-Méditerranée sont : 2 systèmes forestiers (en Haute Saône et en moyenne montagne méditerranéenne) et 2 systèmes de culture (viticulture en Beaujolais et arboriculture dans le Vaucluse).

Concernant les forêts, l'impact est limité et relativement faible en Haute Saône même si l'augmentation de l'intensité et de la durée des sécheresses devrait impacter la croissance des hêtres et le dépérissement des sapins. L'impact des sécheresses est plus significatif dans les forêts méditerranéennes avec un risque accru de dépérissement, de diminution de la régénération naturelle ainsi qu'une plus forte sensibilité aux ravageurs et aux pathogènes. L'essence considérée limite le risque d'augmentation des feux de forêts.

Dans le Vaucluse, la diminution du confort hydrique devrait principalement impacter les pommiers et poiriers. De façon générale, les faibles pluviométries estivales et l'augmentation de l'ETo favoriseront les espèces précoces (pêches, abricots, prunes) ou adaptées au climat sec (amandes, olives). Les cultures de blé sur sols ayant une forte réserve utile ne semblent pas impactées, voire seraient favorisées via l'avancement des stades phénologiques, ce qui limite l'assèchement des sols en été. Sur sol à faible réserve utile, une irrigation de démarrage pourrait devenir une pratique plus souvent envisagée. L'évolution des parasites reste très incertaine. Quelles que soient les cultures, les restitutions au milieu (ruissellement et drainage) diminueront.

Concernant la viticulture dans le Beaujolais, on s'attend à une faible diminution du confort hydrique mais les risques climatiques majoritaires resteront le stress thermique et le gel printanier. Cependant des expressions de besoins en irrigation pourraient ponctuellement apparaître en été. La restitution au milieu devrait fortement diminuer.

Les évolutions du cycle hydrologique ne sont pas les seuls impacts du changement climatique sur le milieu agricole. L'étude souligne que, d'après les conseillers agricoles, la prise de conscience du changement climatique chez les agriculteurs a augmenté ces dernières années. Cependant la majorité ne considère pas l'adaptation au changement climatique comme un enjeu prioritaire pour la viabilité de leurs exploitations (Vert et al., 2013).

Des sécheresses amplifiées par le réchauffement climatique

Une sécheresse est un phénomène aléatoire naturel limité dans le temps et dans l'espace et relative à une période de référence, ou normale. Elle survient toujours à la suite d'un déficit des précipitations (Van Loon, 2015). Il est couramment distingué quatre types de sécheresse (Wilhite and Glantz, 1985) :

- Sécheresse météorologique, elle représente un déficit des précipitations;
- Sécheresse édaphique (ou agricole), elle représente un déficit d'humidité des sols (dans la zone racinaire) impactant le développement des cultures. Elle fait référence à l'eau verte ;
- Sécheresse hydrologique, fait référence à un déficit des débits des rivières et une côte basse des niveaux piézométriques. Elle fait référence à l'eau bleue ;
- Sécheresse socio-économique, elle représente un déficit de la ressource pour satisfaire les usages.

Ces différentes définitions ont conduit le développement de nombreux indicateurs, basés sur des variables différentes. Cependant tous les indicateurs visent à représenter la durée, l'intensité (ou magnitude) et la sévérité d'une sécheresse. Ils représentent également la date de début et de fin des épisodes (Figure 22). Une sécheresse débute lorsque l'indicateur considéré passe sous une valeur seuil, variable suivant les indicateurs (Soubeyroux et al., 2012).

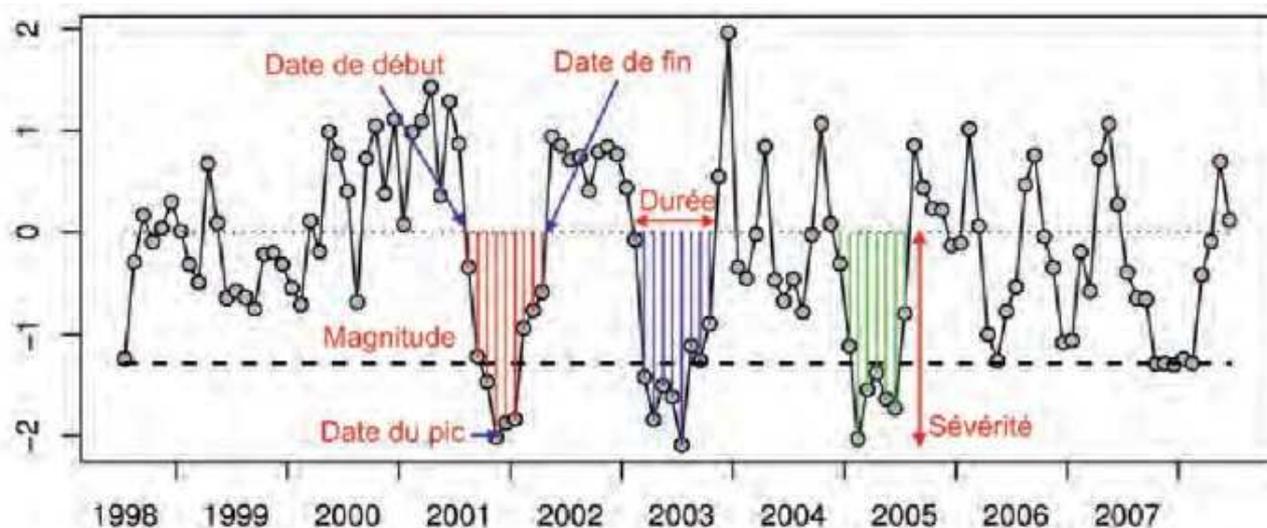


Figure 22 : définition des caractéristiques locales des événements de sécheresse (date de début et de fin, durée, magnitude, date du pic et sévérité). Exemple de l'évolution du SSWI3 de 1998 à 2008 sur une maille située près de Toulouse avec un seuil fixé à 5 % (Soubeyrou et al., 2011).

La caractérisation des sécheresses n'a de sens qu'au regard de l'indicateur utilisé, de la période de référence et des données disponibles pour la définir (Trenberth et al., 2013).

Des travaux récents ont confirmé que les projections climatiques issues de modèles régionaux sont en mesure de représenter les sécheresses agricoles (via le Standardized Soil Wetness Index, noté SSWI) et météorologiques (via le Standardized Precipitation Index, noté SPI) à l'échelle de la France (Vidal et al., 2012). Ces mêmes travaux confirment la tendance dégagée par le projet Climsec (Soubeyrou et al., 2015) en montrant une tendance à l'augmentation au cours du XXIème siècle de toutes les caractéristiques des sécheresses (intensité, durée, fréquence, sévérité) quel que soit le scénario climatique. Une superficie plus importante du territoire sera touchée, ceci étant plus prononcé pour les sécheresses agricoles que pour les sécheresses météorologiques (l'incertitude sur les précipitations étant plus importante). L'ampleur de ces augmentations est fortement dépendante de la considération ou non d'une évolution de la période de référence pour la construction de l'indicateur (Vidal et al., 2012). Ces résultats vont dans le même sens que des travaux réalisés à l'échelle européenne (Spinoni et al., 2015).

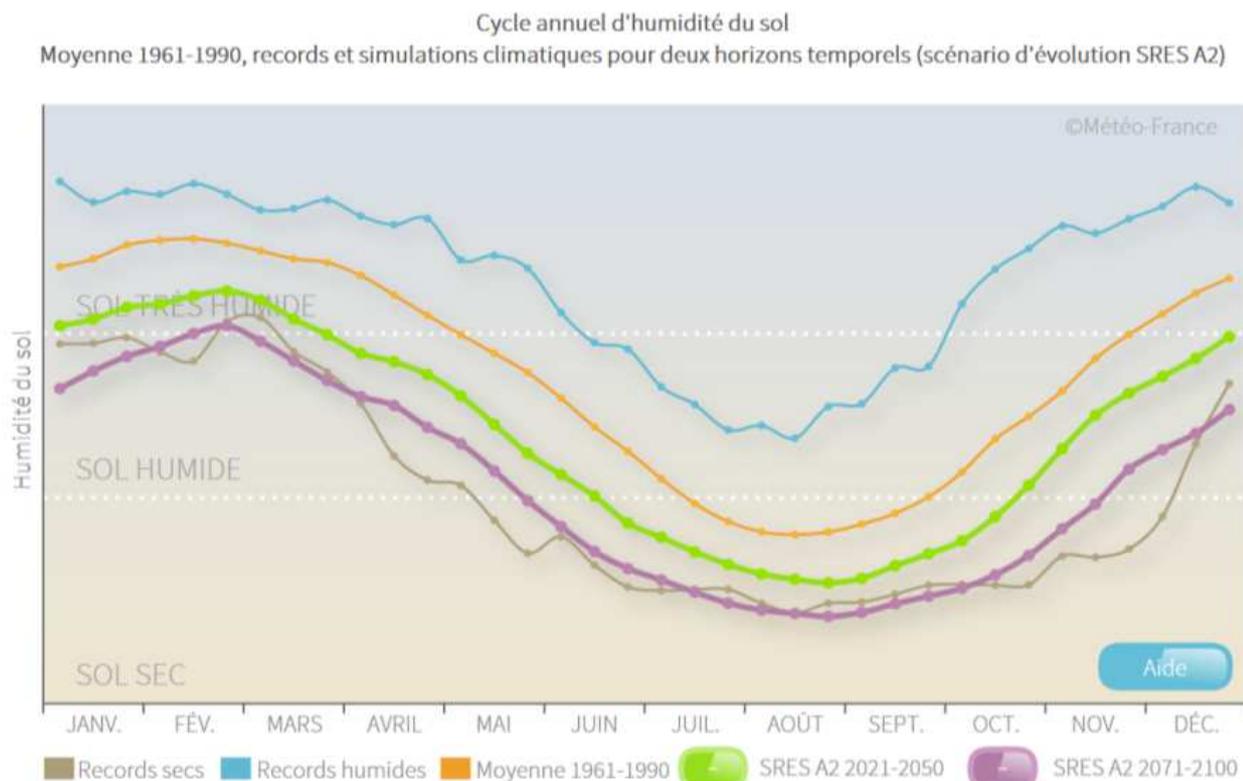


Figure 23 : cycle annuel d'humidité du sol moyenne sur la période 1961-1990, records et simulations climatiques aux horizons 2021-2050 et 2071-2100 sous le scénario SRES A2 (climatHD).

La figure 24 montre la tendance d'évolution du Soil Wetness Index (SWI), à l'échelle nationale, aux horizons proches et lointains. Elle représente l'état d'humidité du sol absolu (sans comparaison à une situation de référence) sous le scénario pessimiste A2, proche du RCP8.5. On constate que sur la période de référence (1961-1990), la période sèche s'étale environ de mi-juillet à mi-septembre. A la fin du siècle, elle s'étalerait de fin mai à mi-novembre, devenant proche des records historiques tout au long de l'année (Météo France ClimatHD).

Spatialement, les dernières projections de l'évolution de l'humidité absolue du sol (représentée par le Soil Wetness Index, noté SWI) montrent une tendance quasi généralisée à l'assèchement des sols à l'horizon 2070-2100 (Figure 24). Les Alpes en hiver et au printemps ne montrent pas de tendances, quel que soit le RCP. L'assèchement des sols est le plus marqué sur le pourtour méditerranéen, où il pourrait augmenter de 10 à 18 % par rapport à 1960-1990 (Dayon 2015).

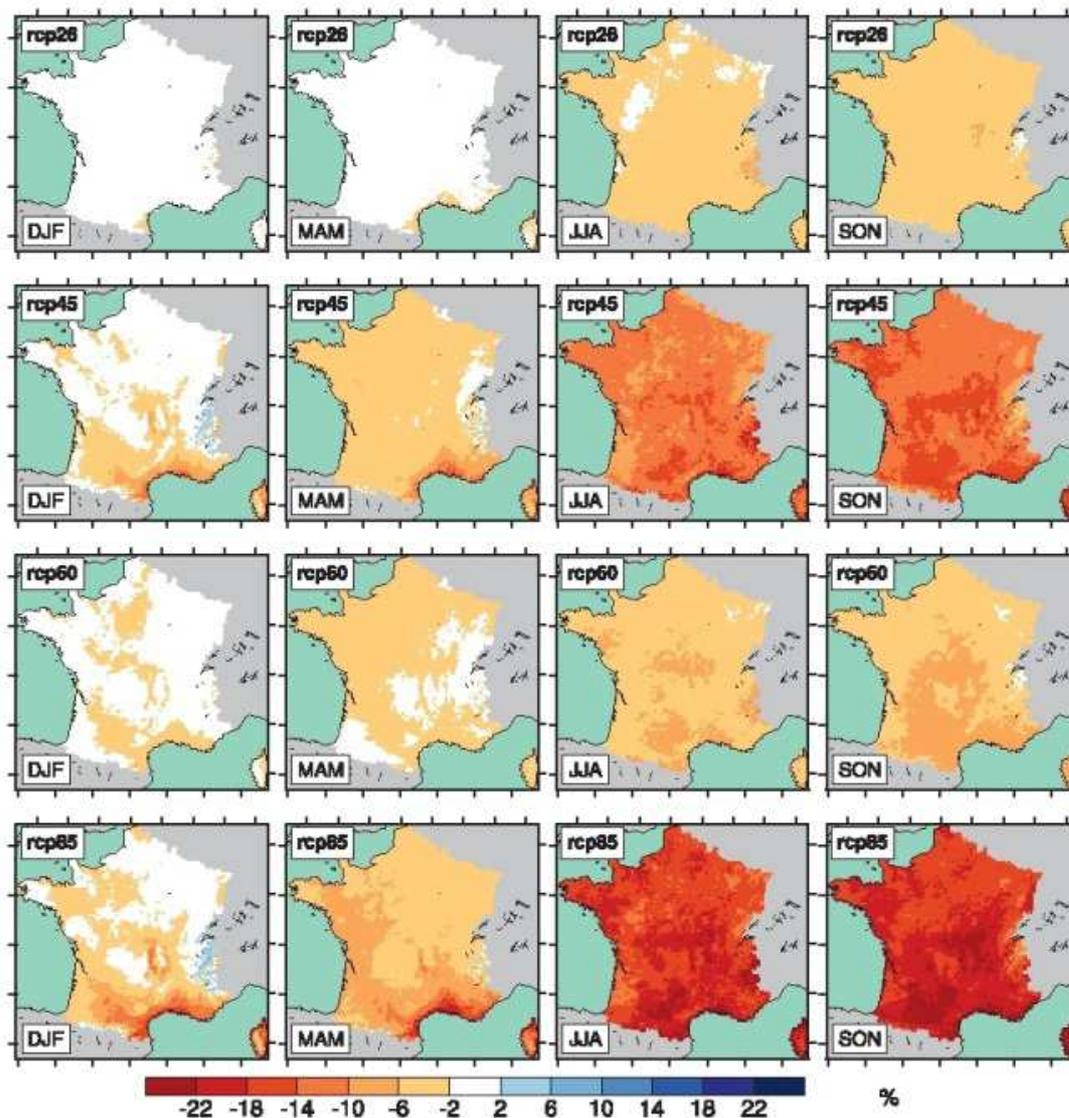


Figure 24 : moyenne d'ensemble des changements saisonniers relatifs (%) de SWI pour les quatre scénarios par rapport à la période 1960-1990 pour la fin du siècle (2070-2100). Les saisons sont indiquées par les premières lettres des mois : DJF : Décembre-Janvier-Février, MAM : Mars-Avril-Mai, JJA : Juin-Juillet-Août SON : Septembre-Octobre-Novembre (Dayon 2015).

1.4 IMPACTS SUR LA TEMPÉRATURE DES COURS D'EAU

La température des cours d'eau joue un rôle prépondérant dans le fonctionnement des écosystèmes aquatiques. Elle impacte également les usages anthropiques (production d'électricité, d'eau potable, pêche et biodiversité) (Hannah and Garner, 2015). La pérennité du Réseau National Thermique mis en place par l'ONEMA en 2008 permettra de dégager à moyen terme des tendances d'évolution des températures.

La température de l'eau du Rhône est mesurée depuis 1977 par EDF pour la surveillance des centrales nucléaires et a été reconstituée par modélisation statistique depuis 1920. L'analyse montre une augmentation de la température annuelle moyenne plus marquée à l'aval qu'à l'amont : + 0.4 °C à Pougny (amont) et + 2.1 °C à Tricastin (aval). La période 1920-1980 montre une variabilité interannuelle mais pas de tendance marquée. L'augmentation des températures est significative depuis les années 80. A l'échelle saisonnière, l'élévation est principalement marquée en été, peu en hiver (EDF, 2016).

Le manque de données historiques nécessite d'aborder la question d'un point de vue théorique, en identifiant les processus impactant la température de l'eau imputables au changement climatique. La température est le résultat d'un

équilibre thermodynamique entre les flux énergétiques et hydrologiques aux interfaces eau-atmosphère et eau-lit du cours d'eau (Figure 25). Ces différents facteurs sont à l'origine de la variabilité des régimes thermiques et interviennent de manière très hétérogène à différentes échelles spatiales (Caissie, 2006).

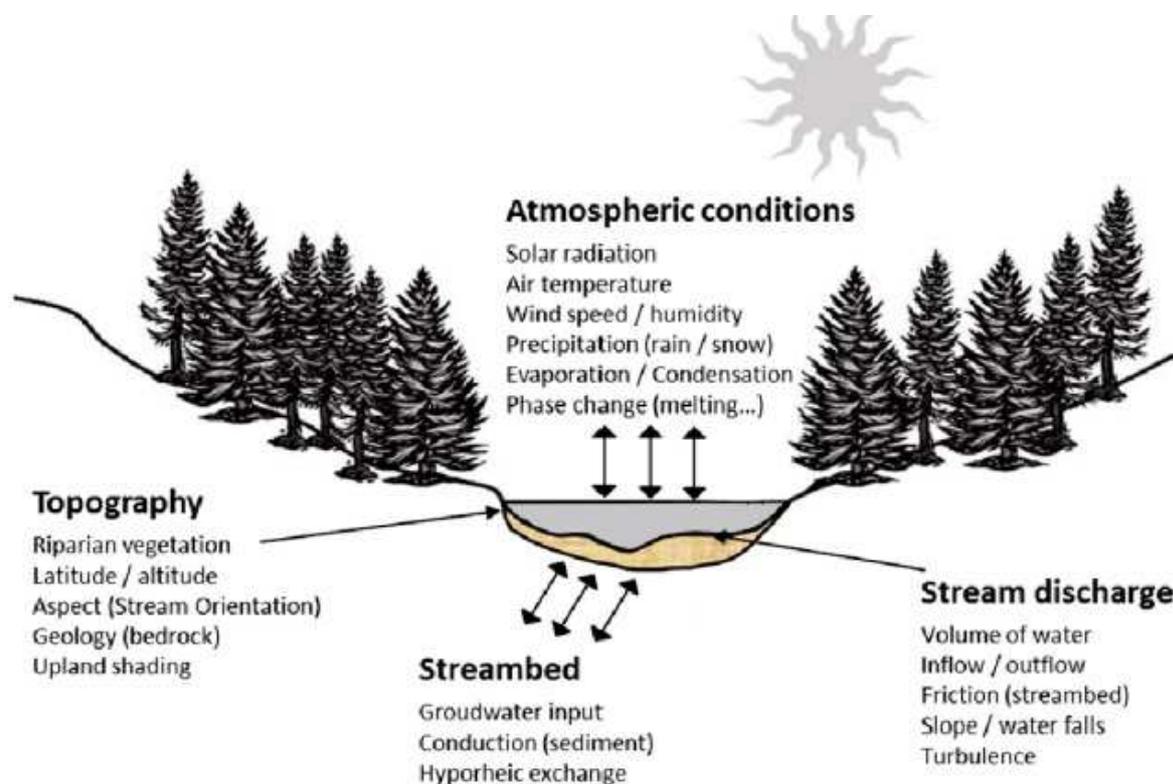


Figure 25 : facteurs de contrôle de la température de l'eau (Caissie, 2006).

A grande échelle, pour les cours d'eau importants (de largeur supérieure à 3m), il est estimé que 80 % des échanges thermiques ont lieu à l'interface eau-atmosphère. L'apport principal d'énergie est le rayonnement solaire (ondes courtes). Les autres facteurs de contrôle étant la température de l'air et le rayonnement atmosphérique (ondes longues).

La relation linéaire entre la température de l'air et celle de l'eau à l'échelle annuelle est particulièrement marquée pour les grands cours d'eau connectés à un grand bassin versant (> à 1000 km²) au substrat peu perméable. Elle est plus difficile à établir pour les cours d'eau à petit bassin versant avec un substrat très perméable. Dans les deux cas cette corrélation diminue pour les températures atmosphériques extrêmes (Beaufort et al., 2015).

A l'échelle locale (tronçon de rivière de quelques km), d'autres facteurs de contrôle opèrent : l'ombre projeté par la ripisylve ou la topographie sur le cours d'eau et les interactions avec les nappes vont fortement influencer la température. L'influence de l'ombrage est fonction de la morphologie du cours d'eau (largeur principalement), de l'orientation du tronçon par rapport au soleil et de l'ombre portée par la ripisylve (fonction de sa hauteur). La température des eaux souterraines sont relativement stables au cours du temps (hors variations saisonnières d'amplitude limitée) impactant fortement la température des cours d'eau en hiver (réchauffement) et en été (refroidissement). La mobilisation des eaux hyporhéiques peut également fortement influencer la température du cours d'eau (Beaufort et al., 2015). Le contrôle par ces facteurs à l'amont des bassins versants se propage vers l'aval et impacte la température des cours d'eau de taille moyenne.

Plusieurs travaux montrent l'impact des corridors boisés sur la température des cours d'eau, principalement sur une diminution des températures maximales journalières estivales (Garner et al., 2015; Simmons et al., 2015). Il ressort également que l'effet est moins marqué lorsque le corridor se trouve à l'aval. Globalement, plus le taux d'ombrage est important plus les températures seront faibles et avec le moins d'amplitude annuelle. Les petits cours d'eau de forêt en

sont l'exemple type : le recouvrement des arbres crée un microclimat isolant le cours d'eau des échanges radiatifs et du vent (Garner et al., 2015 ; Beaufort et al., 2015).

Les stations hydrologiques dont les régimes thermiques sont majoritairement contrôlés par les échanges nappe-rivière sont celles qui présentent les plus faibles variations de température au cours de l'année ainsi que les plus faibles températures en été. Ces zones pourraient devenir des zones refuges pour des espèces piscicoles. Leur préservation passe par une gestion adéquate des prélèvements souterrains afin d'assurer le maintien de ces échanges. Cela souligne également le besoins de mieux appréhender la dynamique et l'amplitude de l'impact du réchauffement climatique sur les eaux souterraines et de subsurfaces en fonction des caractéristiques des aquifères (Kurylyk et al., 2015).

Les projections d'évolution de la température des cours d'eau sont réalisées soit par une approche statistique soit par une approche physique par identification des processus de contrôle et résolution des équations d'équilibre thermodynamique. Les cours d'eau contrôlés majoritairement par les conditions atmosphériques seront les plus vulnérables au changement climatique. Cependant la température de l'eau est également contrôlée par des aménagements anthropiques non ou peu prises en compte par les modélisateurs comme les seuils et étangs artificiels, les barrages, les rejets des eaux de refroidissement des centrales nucléaires, les rejets des stations d'épuration, l'imperméabilisation des sols, les modifications hydromorphologiques ...

Une étude réalisée à l'échelle mondiale à partir d'un modèle à base physique projette une augmentation de la température moyenne du Rhône de 2.1°C et maximale de 2.8 °C (supérieure au 95^{ème} centile). Cela à l'horizon 2071-2100 par rapport à 1971-2000 selon les scénarios SRES A2 et B1. Les auteurs estiment que l'augmentation de la température maximale est due pour 79% à l'augmentation des températures atmosphériques et pour 21% à la diminution du débit. La température moyenne serait quant à elle à plus de 90% due à l'augmentation des températures de l'air (van Vliet et al., 2013).

Le projet Explore 2070 a utilisé deux modèles empiriques basés sur la détermination de relations statistiques entre variables. Les variables principales prises en compte sont : la température de l'air, la température de l'air des jours précédents et les débits. 31 stations (dont 5 sur le bassin Rhône-Méditerranée) ont été modélisées à partir de 7 modèles climatiques (forcés sous le scénario A1b), deux modèles pluie-débit (ISBA-MODCOU et GR4J) et les modèles thermiques (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2012(a)).

L'augmentation à l'échelle nationale entre les périodes 1961-1990 et 2046-2065 serait comprise entre 1.09 et 2.16 °C avec une moyenne de 1.64 °C. La dispersion s'explique plus par la variabilité dans les projections d'évolution de la température de l'air que par les modèles hydrologiques et thermiques. L'évolution des températures annuelles moyennes des 5 points sur le bassin serait comprise au entre + 0.8 °C et + 2.7 °C (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2012(b)).

STATION	Hien	Ardèche	Cèze	Lez	Thoré
Période de référence (1961-1990)	10.4	14.1	13.6	15.3	13.5
Delta médian (futur-présent)	1.5	2.1	2	1.2	1.7
Delta minimum (futur-présent)	1	1.5	1.5	0.8	1.2
Delta maximum (futur-présent)	1.8	2.7	2.6	1.5	2.3

Tableau 4 : Augmentations des températures moyennes annuelles de l'eau (°C) entre la période 1961-1990 et la période 20146-2065 pour les cinq points modélisées sur les bassins Rhône-Méditerranée et de Corse (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2012(b)).

Les auteurs du projet Explore 2070 présentent ces résultats comme la borne inférieure de l'évolution possible. Notamment du fait de la non prise en compte de certains paramètres comme l'augmentation possible de la température des eaux souterraines et les pressions anthropiques.

Les travaux conduits sur le bassin versant de la Loire ont permis de dégager des impacts différents du changement climatique en fonction du positionnement du cours d'eau dans le bassin versant. Les scénarios climatiques proviennent d'une approche similaire à Explore 2070 (plusieurs modèles globaux forcés par le scénario A1b) en revanche c'est un modèle de thermie à base physique distribué qui a été utilisé. Le bassin versant montre une tendance généralisée à l'augmentation de la température (moyennes annuelles et mensuelles maximales) des cours d'eau d'environ +3 °C.

Cependant l'augmentation n'est pas uniforme spatialement. Les zones aval tendent à augmenter davantage que les zones amont avec +3.1 (+- 0.6 °C) et +1.5 (+-0.8 °C) respectivement. Cette atténuation étant expliquée par les auteurs par la contribution des nappes et/ou de l'ombrage. Elle est également variable entre les saisons et serait plus importante en automne et au printemps +3.0 +- 0.9°C qu'en été 2.6 +- 0.7°C (résultats obtenus sur deux sous bassins versants). L'échauffement plus limité en été est expliqué par l'augmentation de la perte énergétique des masses d'eau induite par l'évaporation et par la restitution de chaleur via un rayonnement de grande longueur d'onde (Beaufort et al. 2013). La tendance à l'augmentation des températures est également induite par la diminution des débits qui entraîne une diminution de l'inertie thermique des cours d'eau.

1.5 IMPACTS SUR LA QUALITE DES EAUX

Les effets des activités anthropiques resteront majoritaires sur les risques d'eutrophisation

L'un des impacts attendu du changement climatique sur la qualité de l'eau est le risque d'eutrophisation via l'augmentation de la température et la diminution des débits qui favoriserait la croissance du phytoplancton et des macrophytes ainsi que le développement accru et plus fréquent de cyanobactéries dans les masses d'eau à temps de résidence important (Fabre, 2012).

L'évolution de nombreux paramètres de la qualité de l'eau sur la Loire de 1977 à 2008 a été étudiée. Il en ressort que la diminution des débits d'environ -100 m³/s et l'augmentation de la température moyenne annuelle de l'eau de +1.2 °C (+2°C en été) explique seulement 20% de la variation des paramètres de qualité. Pour ce cours d'eau, dans un contexte d'évolution marquée du phosphore qui contrôlait le développement du phytoplancton, les effets imputables au changement climatique sur la qualité de l'eau sont donc minoritaires d'après les auteurs par rapport aux activités anthropiques (Floury et al., 2012). Les travaux de Minaudo et al. (2015) sur le même fleuve et la même période confirment que l'eutrophisation est majoritairement fonction de la concentration en phosphate.

L'analyse passée de l'évolution de l'eutrophisation côtière suit la même logique. La diminution observée sur le pourtour méditerranéen de la concentration en chlorophylle de 54% entre 1991-1995 et 2001-2005 est majoritairement corrélée à la diminution des apports en phosphore du bassin versant. Le changement climatique n'est donc pas non plus l'élément de contrôle principal. Par contre il tend à favoriser ces phénomènes via la diminution des débits des fleuves principalement (Romero et al., 2013 ; Molina-Navarro et al., 2014).

Partant de l'hypothèse qu'avec l'élévation des températures favorables à la minéralisation des molécules azotées et des précipitations plus concentrées en temps, les eaux de ruissellement seraient plus concentrées, Dunn et al (2012) ont modélisé l'évolution des pollutions diffuses en Ecosse par les nitrates à l'horizon 2050. Il ne ressort pas de tendance significative à grande échelle d'une influence du climat sur les flux de polluants. Les auteurs concluent que c'est le scénario d'évolution des pratiques agricoles qui aura l'impact majoritaire (Dunn et al., 2012). Le projet CLIMATOR aboutit à des conclusions similaires. Il précise que la variabilité interannuelle du climat aura plus d'impact sur la lixiviation que la tendance à l'élévation des températures (Brisson et al., 2010).

Les activités anthropiques resteront donc les facteurs de contrôle majoritaires. Hesse et al. (2016) ont cherché à quantifier l'impact seul du changement climatique sur l'eutrophisation de l'Elbe (Allemagne et République Tchèque). Les projections climatiques montrent une augmentation de la température (+3 °C) et des précipitations (+57 mm). La modélisation hydrologique (SWIMM) projette une augmentation du débit de 20%. Un module permet de modéliser les flux de nutriments et le développement du phytoplancton. De façon générale, les évolutions des concentrations de ces éléments et leurs causes (sans évolution des pratiques anthropiques) sont :

- L'oxygène dissous diminue de 5% en raison de l'augmentation de la température ;
- La concentration des nitrates baisse de 5 %, ce qui est corrélé à l'augmentation des débits (dilution plus forte);
- L'ammonium diminue de 24% (forte variabilité spatiale); cela serait causé par une plus forte minéralisation due à l'augmentation de la température et à une lixiviation plus importante dans les sols ;
- Les phosphates augmentent de +5% probablement du fait d'une plus forte érosion induite par l'augmentation des précipitations (ou bien par une plus faible consommation par le phytoplancton) ;
- La biomasse de phytoplancton baisse de 5% du fait de conditions de croissance non optimales (température trop élevée, moins de rayonnement solaire et moins d'ammonium disponible) (Hesse and Krysanova, 2016).

Un enjeu majeur pour la qualité de l'eau concerne l'évolution des blooms de cyanobactéries dont certaines libèrent des toxines, néfastes pour l'homme et les milieux.

Romo et al. (2013) ont suivi sur trois années dans le lac côtier Albufera (au sud de Valence, Espagne) la dynamique de prolifération des cyanobactéries et la concentration en microcystine (toxine libérée lors des blooms par certaines cyanobactéries) ainsi que les conditions hydrologiques. Les résultats confirment que plus le temps de résidence est long et le brassage faible, plus les colonies de cyanobactéries sont importantes (Romo et al., 2013). Dans un lac peu profond eutrophisé en Grèce, des travaux ont montré que des températures élevées associées à une disponibilité en éléments nutritifs (nitrate, ammonium et phosphates) est positivement corrélée à la production de cyanotoxines (Gkelis et al., 2014).

Le changement climatique devrait donc augmenter les situations permettant l'apparition des blooms par l'élévation des températures et la diminution des débits. Ces deux tendances combinées entraîneront une diminution du brassage et une augmentation de la stratification thermique des masses d'eau.

Les performances des stations d'épuration pourraient diminuer

Le fonctionnement des stations d'épuration sera impacté par le changement climatique.

Les procédés d'épuration tolèrent des fluctuations de température importantes. L'élévation des températures dans les régions tempérées devrait accélérer les réactions cinétiques diminuant les besoins énergétiques des stations. Dans les réseaux, l'augmentation de la température aura des impacts négatifs : cela augmentera la fermentation entraînant plus de nuisances olfactives et cela favorisera la formation de sulfure d'hydrogène qui accélèrera la corrosion des canalisations (Vo et al., 2014).

Si l'intensification des précipitations se confirme, cela diminuera l'efficacité des systèmes d'épuration (surtout des réseaux unitaires) de plusieurs façons :

- La composition de l'effluent changera. Il sera plus dilué et plus chargé en éléments chimiques issus des chaussées. Cela perturbera les phases de nitrification/dénitrification des boues activées et entraînera l'apparition de floccs ;
- L'efficacité du clarificateur diminuera du fait d'une diminution du temps de résidence. Les dépôts de boues dans les milieux récepteurs augmenteront ;
- Les apports de débris et sédiments augmenteront en entrée nécessitant plus d'entretien ;
- L'infiltration d'eaux usées dans les réseaux à l'amont des stations sera augmentée.

Une étude de cas en Angleterre propose que plus que l'intensification, c'est l'augmentation du cumul total des précipitations qui est le plus corrélé à une dégradation de la qualité de l'eau dans le milieu. Cette étude souligne également que la qualité du milieu récepteur restera grandement dépendante de la consommation d'eau par habitant. Plus elle est importante, plus la qualité du milieu sera dégradée, principalement lorsque les débits sont les plus faibles (Astaraié-Imani et al., 2012). Même si les volumes rejetés n'évoluent pas, la capacité d'autoépuration diminuera à cause des diminutions attendues des débits d'étiage.

L'analyse de chroniques passées du niveau de traitement montre que l'impact de phénomènes extrêmes (inondations et sécheresse) sur la qualité du traitement tend à être sous-estimé par les modèles (Langeveld et al., 2013).

L'assainissement est la principale source d'émission de gaz à effet de serre du domaine de l'eau. Il est nécessaire d'optimiser les processus afin de participer à l'atténuation. Des travaux montrent notamment des diminutions possibles des émissions de gaz à effet de serre pour les procédés tertiaires (Mander et al., 2014).

INCIDENCES CLES - LES VARIABLES CLIMATIQUES

- L'élévation des températures atmosphériques s'est amplifiée dans la seconde moitié du XXème siècle. Les projections pour le XXIème siècle s'accordent vers une augmentation généralisée des températures. Elle sera plus marquée en été ou elle pourrait augmenter de +1.3 à +5.3 °C selon les scénarios.
- Les vagues de chaleurs ont été deux fois plus nombreuses en France sur la période 1980-2015 que 1947-1980. Les projections montrent que ces situations devraient continuer d'augmenter.
- Les projections d'évolution des précipitations annuelles moyennes présentent un gradient nord-sud. Elles pourraient diminuer de -5 à -15% sur le sud du bassin et rester stable ou augmenter dans les mêmes proportions sur le nord du bassin à la fin du siècle.
- A l'échelle saisonnière, on retrouve également un gradient nord sud. Les plus fortes modifications projetées se situeraient en été, les diminutions de -15 à -55 % toucheraient tout le territoire, le pourtour méditerranéen subissant les plus fortes diminutions. Une augmentation de 0 à + 15 % pourrait être observée en hiver, sauf dans le sud du bassin.
- Une légère intensification des précipitations est projetée selon les scénarios les plus pessimistes. Ces projections sont incertaines et l'observation du passé ne montre pas de tendance à l'exception de quelques localités notamment autour des Cévennes.
- Les projections montrent une augmentation globale de l'évapotranspiration de référence associée à une augmentation de l'évapotranspiration réelle tant que l'eau ne devient pas limitante, ce qui devrait arriver en été à la fin du siècle.
- Les sécheresses agricoles seront plus intenses, plus fréquentes, plus sévères, plus longues et toucheront davantage de territoire.
- L'élévation de l'évapotranspiration de référence n'étant pas compensée par une élévation des précipitations, le bassin tend à devenir plus aride, surtout le pourtour méditerranéen.
- Si les pratiques restent les mêmes, les besoins en eau de l'agriculture arriveront plus tôt dans la saison et seront supérieurs à ceux actuels.
- Le pourtour méditerranéen ressort comme le territoire où les projections d'évolution sont les plus fortes. Que ce soit au niveau de l'élévation des températures et de l'évapotranspiration que de la diminution des précipitations et de l'humidité des sols. Les tensions, notamment estivales, que cela implique et que l'on rencontre déjà aujourd'hui autour de la ressource en eau devraient augmenter dans le futur.

Besoins connaissances :

- Améliorer la connaissance sur la variabilité de l'évapotranspiration réelle à l'échelle climatique
- Améliorer la connaissance de la réponse des végétaux aux changements globaux
- Progresser sur la quantification des incertitudes associées aux modélisations

2 IMPACTS SUR LA RESSOURCE EN EAU

2.1 LES EAUX DE SURFACE

Les bassins versants Alpains, tendances et projections

Les bassins versants Alpains. Dans le cadre du projet européen AdaptAlp, l'évolution passée des régimes hydrologiques a été étudiée. 177 séries de débits journaliers ayant une chronique supérieure ou égale à 40 ans avec une faible influence anthropique représentant 119 rivières alpines ont été analysées. Cela a permis de représenter l'ensemble des systèmes hydrologiques de montagne (Figure 26). L'intensité et la saisonnalité des basses (période des débits inférieurs au 15^{ème} quantile), moyennes (débit moyen mensuel et Base Flow Index noté BFI) et hautes eaux (représentant le débit induit par la fonte, la part imputable aux précipitations étant retirée), ont été étudiées (Bard et al., 2012).

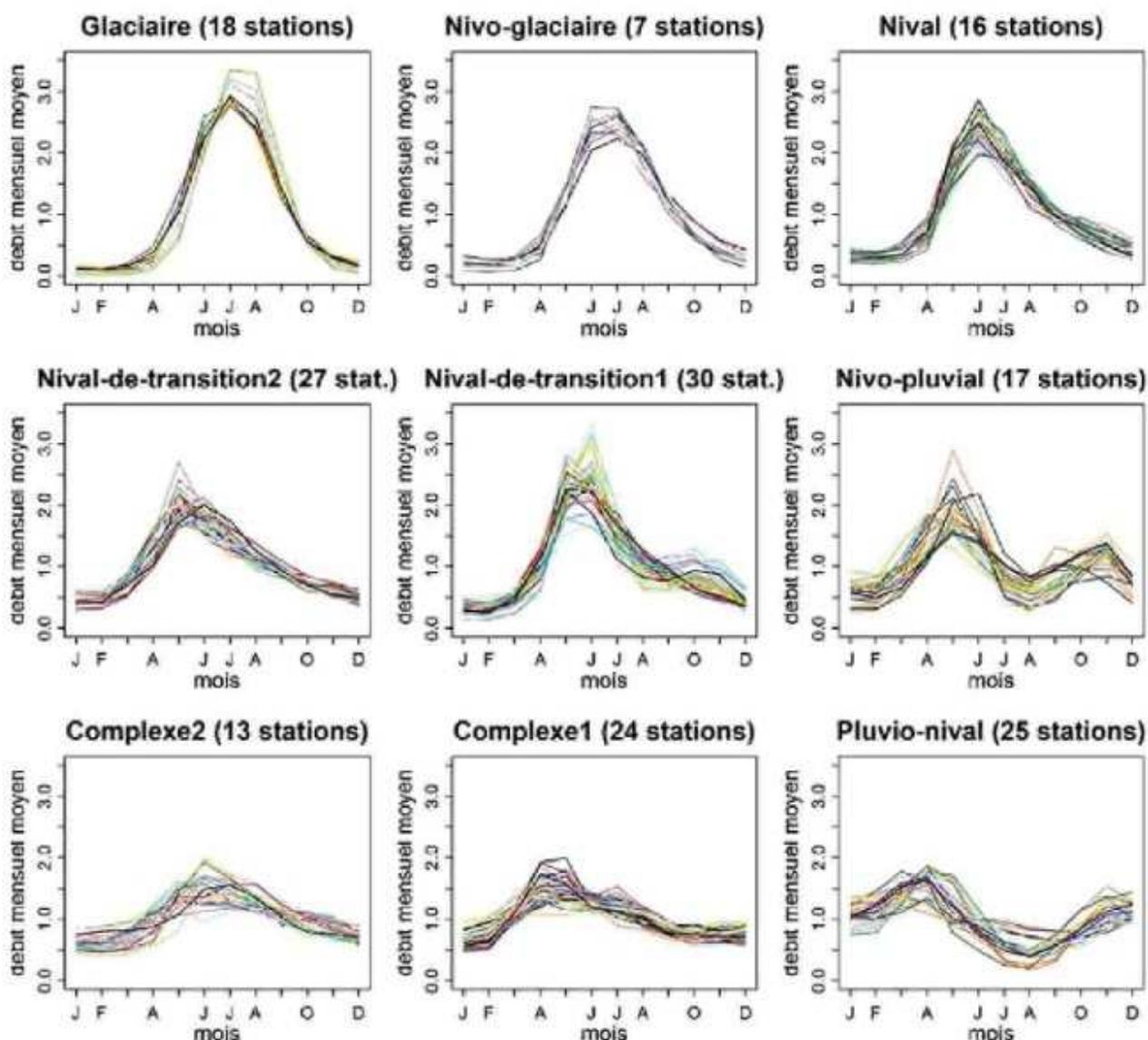


Figure 26 : Débits mensuels moyens des différents régimes hydrologiques étudiés et nombres de stations prises en compte dans l'analyse statistique par régime (Bard et al., 2012).

A l'échelle des Alpes, les changements observés sont très structurés en fonction des régimes hydrologiques. Les auteurs soulignent que la complexité de l'hydrologie de ces cours d'eau ne permet pas de faire des corrélations simples avec le changement climatique. Les principaux résultats de l'étude de Bard et al (2012) sont :

Les étiages hivernaux tendent à être moins sévères. Environ 25 % des rivières montrent une tendance à l'augmentation du débit minimum et/ou une diminution de la durée des étiages et/ou une baisse du déficit de volume écoulé (volume d'écoulement manquant par rapport au seuil fixé). L'évolution de la temporalité est marquée mais fonction des régimes des cours d'eau. La date de fin d'étiage est plus précoce pour les régimes glaciaires, nivo-glaciaires, nivaux et nivaux-de-transition-1 soit 21% des situations. Les dates de début, milieu et fin d'étiage sont plus précoces pour les régimes nival-transition-2 et complexe-1. Elles sont à l'inverse retardées pour les régimes mixtes nivo-pluvial pluvio-nival.

Les étiages estivaux caractérisent les rivières nivo-pluviales et pluvio-nivales du piémont des Alpes soit 28 stations. Les tendances vont dans le sens d'une sévérité accrue mais ces résultats ne sont pas significatifs à l'échelle régionale. Les dates de début, centre et fin sont significativement avancées pour environ 30% des cas en considérant tous les régimes mixtes. Les projections d'Explore 2070 s'accordent sur une légère augmentation de la sévérité des étiages estivaux. Le QMNA5 pourrait diminuer de 0 à -20% (voire augmenter localement).

Les moyennes eaux montrent autant de tendances à la hausse qu'à la baisse pour le BFI, empêchant de dégager une tendance globale. En revanche le BFI et le débit moyen mensuel augmentent significativement pour les régimes glaciaires (62 et 77% respectivement). A l'inverse ces deux indices diminuent significativement pour les régimes nivo-pluviaux (22% des cas pour les deux indices).

Les hautes eaux. A l'échelle des Alpes, il n'y a pas de tendances sur les crues nivales. Les régimes glaciaires sont fortement affectés par une augmentation des crues liées à la fonte. L'augmentation du volume total écoulé est significative dans 93% des cas et celle du débit maximum de fonte dans 47 %. Les régimes glaciaire et pluvio-nival ont leur saison de fonte avancée (sans augmentation de la durée). 49% des autres régimes voient le début de fonte avancé et la fin repoussée augmentant la durée des hautes eaux. Les résultats d'Explore 2070 projettent une baisse des crues décennales de la Durance, de l'Isère et des rivières pyrénéennes de 10 à 30%.

Le bassin versant de la Durance, à l'amont du barrage de Serre-Ponçon a été le sujet d'étude du projet RIWER 2030. Le signal dominant va dans le même sens que les tendances passées, à savoir un changement de saisonnalité des débits via un avancement du début de la période de fonte entraînant un pic printanier plus précoce mais avec une moindre amplitude et une augmentation des débits d'étiage hivernaux. Le signal concernant les débits annuels est en revanche incertain en raison de la dispersion cumulées dans les projections du signal de l'évapotranspiration (de -10 à +40%) et des précipitations (Hingray et al., 2012).

Dans la continuité du projet RIWER2030, le projet R²D² 2050 a caractérisé l'impact hydrologique et socio-économique du changement climatique sur la période 2036-2065 sur l'ensemble du bassin versant de la Durance par rapport à la période de référence 1980-2009. 330 projections climatiques issues du forçage de 4 modèles globaux sous le scénario A1B (projet ENSEMBLES) ont été utilisés en entrée de 6 modèles hydrologiques (GR5J, MORDOR, CEQUEAU, CLSM, J2000 et ORCHIDEE) (Sauquet et al., 2014). Concernant l'évolution du climat :

- Aucune tendance sur les précipitations extrêmes comme moyennes, quelle que soit la saison ;
- Une augmentation globale des températures plus marquée en été (+ 2.2 °C) qu'en hiver (+1.4 °C) ;
- Une augmentation sur tout le territoire de l'ETo significative 10 mois sur 12, plus marquée en été, soit environ +50 à 60 mm/an.

Concernant les projections hydrologiques, le nombre important de modèles hydrologique et de projections climatiques permet de dégager des signaux robustes. On constate globalement une bonne cohérence entre les modèles (Figure 27). La variabilité dépend principalement des projections climatiques.

A Serre-Ponçon, la diminution des débits moyens annuels serait comprise entre -4.4 m³/s et -10 m³/s (valeurs médianes des résultats). La dispersion est en moyenne de 49 m³/s. L'incertitude est plus forte que dans d'autres études comme Explore 2070 mais la tendance est cohérente et s'explique par le plus grand nombre de projections (Figure 28).

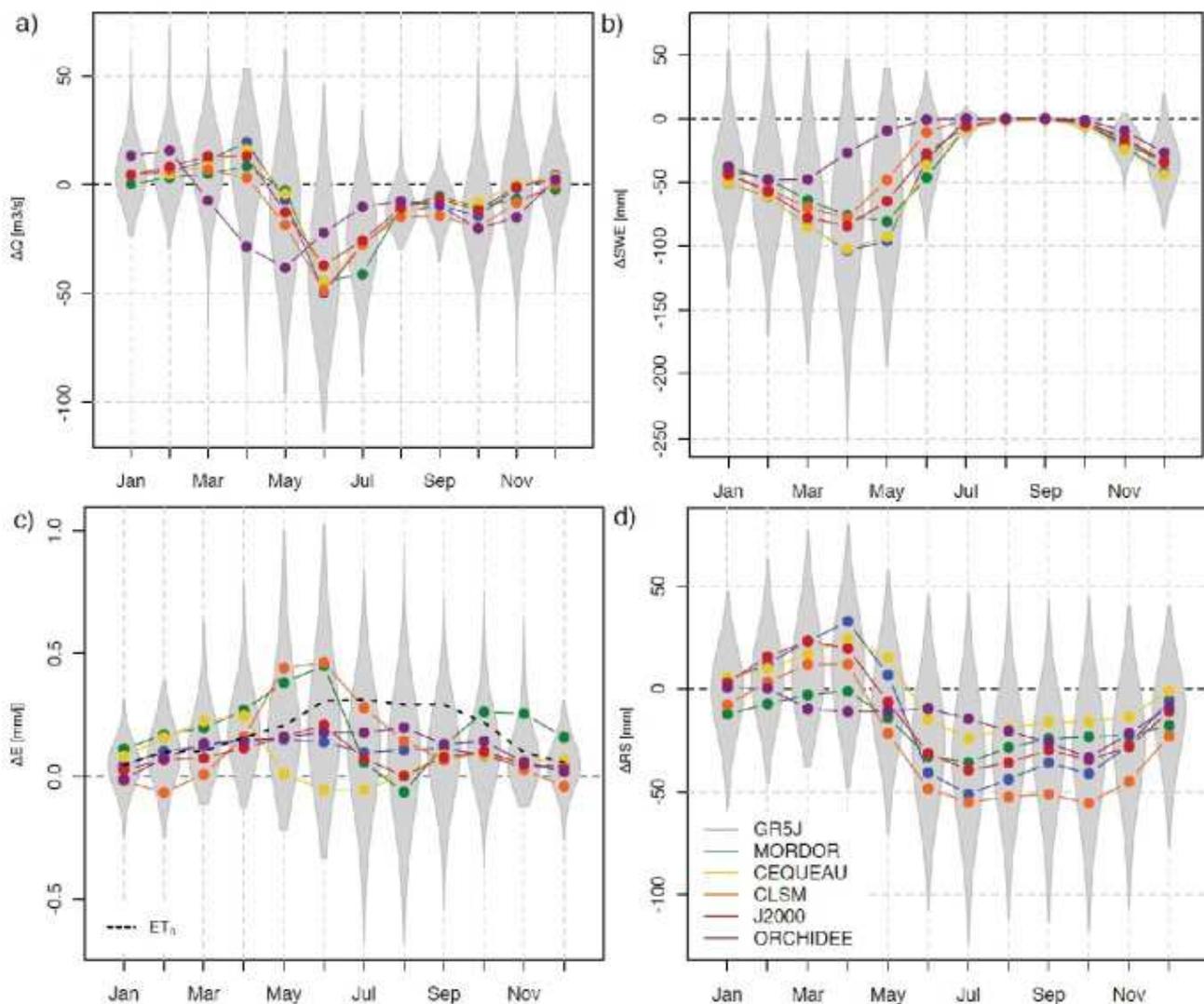


Figure 27 : Comparaison entre modèles hydrologiques des changements mensuels de débits, d'évapotranspiration, de maximum de stock de neige et de stock d'eau souterraine pour le bassin de la Durance à Serre-Ponçon. Les médianes de changements mensuels entre les périodes TF et TP sont représentées par les lignes de couleur. Pour chaque mois, les distributions des changements mensuels tous modèles confondus sont représentées en gris par les diagrammes en violon (Magand, 2015).

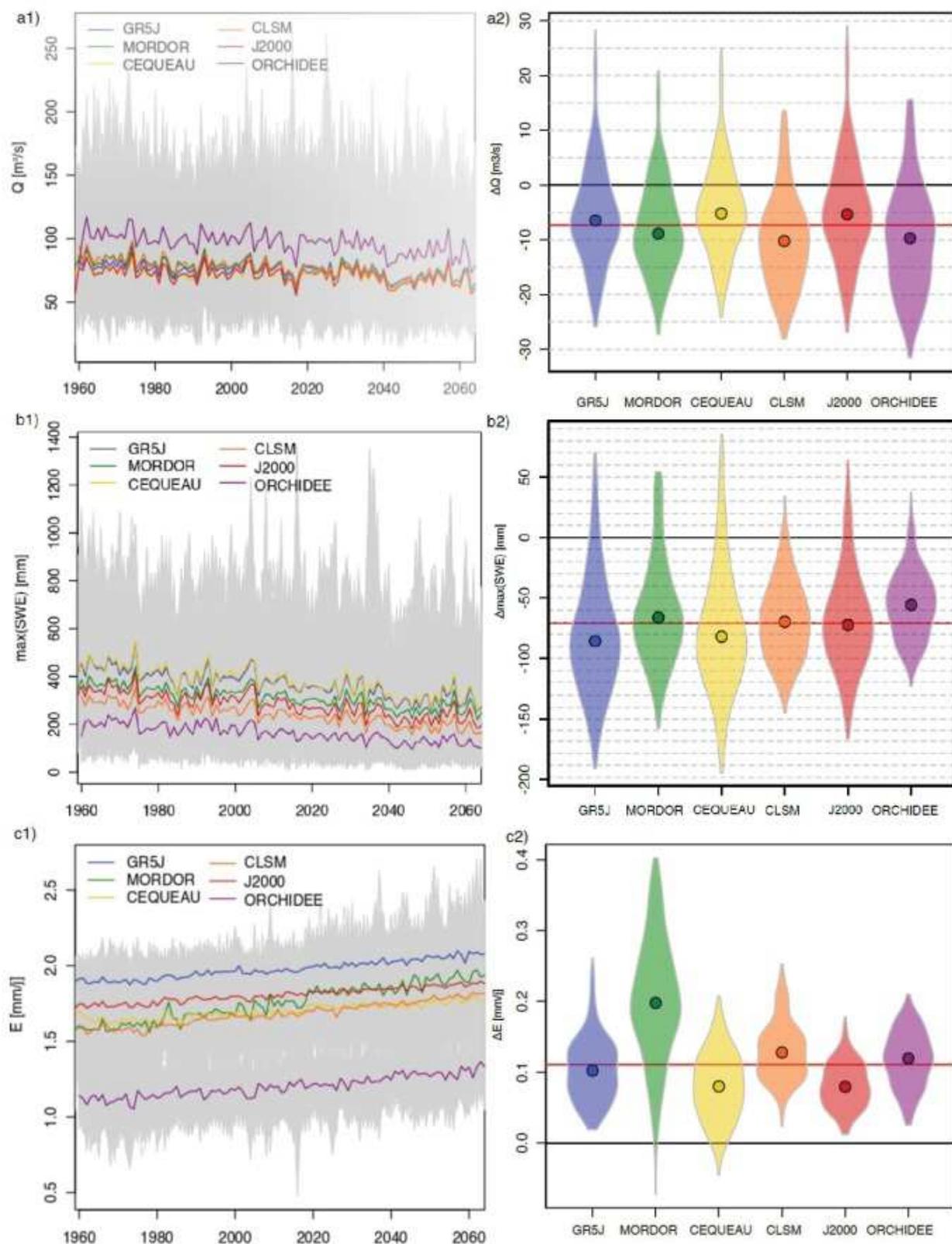


Figure 28 : Synthèse des changements de débits (a), de maximum de stock de neige (b) et d'évapotranspiration (c) sur le bassin de la Durance à Serre-Ponçon. 1) La première colonne présente les évolutions des moyennes annuelles de 1960 à 2065. Toutes les projections hydrologiques (330 par modèle hydrologique) sont tracées en gris et les médianes de chaque modèle sont représentées en couleur. 2) La deuxième colonne compare les distributions de changements annuels entre les cinq modèles hydrologiques. Les changements médians sont représentés par le point central des diagrammes en violon et la moyenne des cinq médianes est représentée par la ligne rouge (Magand, 2015).

Au pas de temps mensuel, les effets du changement climatique au droit du barrage de Serre-Ponçon se traduisent par :

- une réduction des débits d'étiages estivaux, d'environ -20 m³/s en août à Cadarache ;
- Une diminution des débits mensuels de mai à décembre et une augmentation de janvier à avril (bilan déficitaire) ;
- Une diminution du maximum annuel de stock de neige d'environ -20 %;
- pas de tendance claire sur les débits hivernaux (éventuellement une légère augmentation) du fait de la forte variabilité des projections concernant les précipitations ;
- Une baisse de la recharge des eaux souterraines de juin à décembre et une hausse de janvier à mai (bilan déficitaire) (Sauquet et al., 2014).

La thèse de G. Dayon réalisée à l'échelle nationale montre quant à elle une tendance à l'augmentation des débits hivernaux de +7 à +21% aux horizons 2050 comme 2100, cela quel que soit le scénario climatique sous l'effet principalement d'une augmentation de la part des précipitations liquides hivernales (Dayon, 2015). Les travaux de Schneider et al. (2013) projettent également pour 2050 une augmentation des débits hivernaux des cours d'eaux alpins et une diminution le reste de l'année. Ils montrent également une avancée et une diminution du pic printanier.

Concernant les crues (QJXA10), l'analyse au droit de trois stations : la Durance à Serre Ponçon et Cadarache et le Verdon à Sainte Croix montre un avancement d'environ 15 jours de la date moyenne des épisodes à Serre Ponçon. Les grandes crues resteraient printanières. Pour les deux autres stations, les changements de saisonnalité sont moins notables, il y aurait des crues plus tardives en automne et une diminution des crues de fonte. Pour les trois stations, la dispersion des crues serait plus grande au sein de l'année. Il n'y a pas de tendance d'évolution des intensités (Sauquet et al., 2014 ; Magand, 2015).

Les étiages devraient être plus sévères sur l'ensemble du bassin versant. Le débit actuel dépassé en moyenne 95% du temps (Q95) devrait être observé deux à trois fois plus souvent. De façon liée, le Q95 futur sera inférieur à celui présent.

L'étude tend à montrer une augmentation significative du nombre de jours en arrêté sécheresse à l'horizon 2050 de mai à novembre. Pour exemple, le nombre de jours moyen en arrêté sécheresse de niveau maximum pourrait passer de 7 jours actuellement (1980-2009) à 18 jours à l'horizon 2050 pour le Buëch à Serres (Sauquet et al., 2014).

L'étude R²D² 2050 a conduit une analyse prospective avec différents scénarios composant les variables clés : niveau de gouvernance et prérogatives, occupation des sols et urbanisme, croissance économique, dynamique démographique, orientation en matière de développement socio-économique, de politique énergétique et environnementale. Les différents scénarios socio-économiques construits montrent sur le système Serre-Ponçon qu'en gardant les pratiques de l'année 2010, la consommation moyenne pourrait doubler entraînant régulièrement des dépassements de la tranche d'eau mobilisable par le milieu agricole dans le barrage de Serre-Ponçon. Les 5 autres scénarios socio-économiques montrent des situations proche du présent, notamment grâce au maintien ou à l'amélioration des rendements des canaux d'irrigation. Sur le Verdon, la consommation augmenterait dans 4 scénarios sur 6 principalement via l'augmentation de la demande pour l'alimentation en eau potable (Sauquet et al., 2014).

Actuellement, Les projections quantifiées d'évolution de la contribution des glaciers aux débits des cours d'eau sont jugées peu fiables du fait d'une représentation souvent trop simplifiée des processus par les modèles (cryosphere, précipitations à très haute altitude, redistribution de la neige par le vent...). Cela n'empêche pas de dégager une tendance à une augmentation du ruissellement au cours des prochaines décades suivie d'une diminution ainsi qu'un changement de saisonnalité : date de début de fonte avancée et diminution des volumes ruisselés en juillet et août (Pellicciotti et al., 2014).

L'évolution des régimes de crues et des débits moyens tendent à montrer un glissement des régimes à dominante nivale vers des régimes mixtes à dominante nivo-pluviale, ce qui est cohérent avec les tendances passées.

Les tendances passées à l'échelle nationale

Caractériser les tendances du passé permet de mieux appréhender le système étudié et de diminuer l'incertitude des projections. Cela améliore la calibration des modèles, seuls outils capables de projeter l'impact du changement climatique sur l'hydrologie (Hall et al., 2014). L'étude du passé est contrainte par la durée des chroniques de données. A noter que par modélisation, des travaux cherchent à reconstituer les débits depuis 1871 à partir de pluies reconstituées (Caillouet et al., 2016).

Une variabilité multi décennale des débits des rivières a été observée à l'échelle de la France à partir de 38 séries de débits journaliers ayant une chronique supérieure à 70 années. Environ tous les vingt ans, les débits sont alternativement supérieurs puis inférieurs à la moyenne d'environ 15 % (Figure 29). Les auteurs associent la cyclicité printanière aux variations des précipitations et températures qui seraient elles-mêmes induites par les oscillations multi-décennales de l'atlantique. Ces cycles s'observent de façon moins prononcée en été et automne et ils ne sont pas corrélés à des variables climatiques. Sur la base de simulations hydrologiques, les auteurs considèrent que les cycles des précipitations et températures au printemps se répercutent sur l'humidité des sols en été et donc sur le partage infiltration ruissellement des précipitations (Boé and Habets, 2014).

Cette cyclicité naturelle des débits, si elle se confirme, viendra successivement amplifier et atténuer les effets projetés du changement climatique sur les débits des cours d'eau des prochaines décennies (Boé and Habets, 2014).

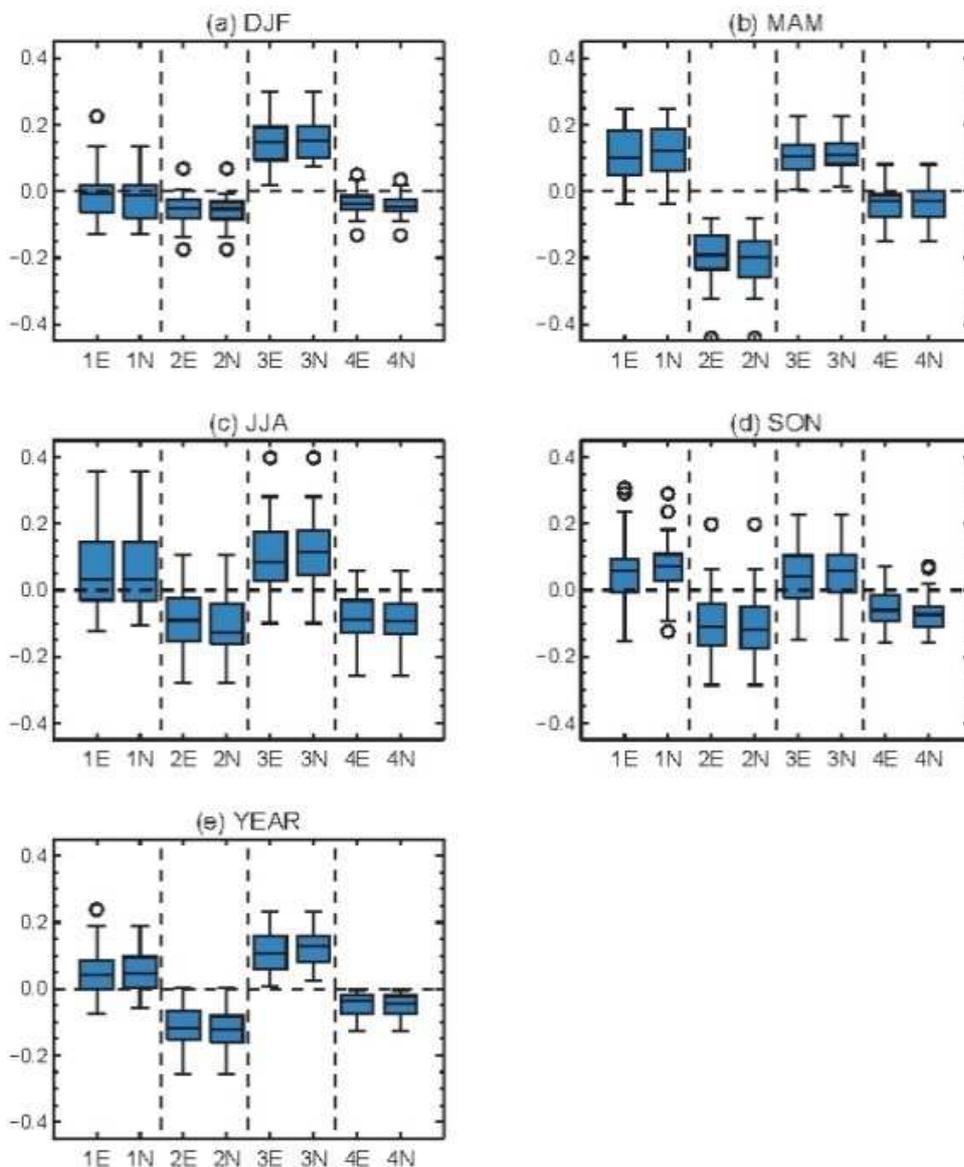


Figure 29 : Anomalies moyennes des débits par rapport au débit moyen calculé sur la plus grande période de temps possible pour chaque station pour quatre périodes : 1910-1930 (1E et 1N), 1938-1958 (2E et 2N), 1965-1985 (3E et 3N) et 1995-2012 (4E et 4N) en (a) hiver, (b) printemps, (c) été, (d) automne et (e) pour la moyenne annuelle. La lettre E signifie que toutes les stations ont été considérées et la lettre N seulement les stations non influencées. Dans les box plots les 25^{ème} et 75^{ème} percentile et la médiane des données sont représentés par les lignes. Les moustaches représentent les valeurs minimales et maximales de l'échantillon ou 1,5 fois le 25^{ème} ou 75^{ème} percentile. Dans tous les cas, les valeurs supérieures à 1,5 fois le 25^{ème} ou 75^{ème} percentile sont représentées par des cercles (Boé and Habets, 2014).

Une tendance d'évolution des crues peut être le résultat indépendant ou combiné de changements de la morphologie de la rivière, des caractéristiques du bassin versant et une évolution du climat. Les phénomènes extrêmes peuvent évoluer en intensité, en fréquence et en répartition temporelle (Hall et al., 2014). A l'échelle européenne, aucun signal majeur sur les crues extrême ne ressort de l'analyse des tendances passées (Madsen et al., 2014).

A l'échelle nationale, Giuntoli et al. (2012) ont réalisé des travaux similaires à ceux de Renard (2006) pour rechercher des tendances d'évolution des phases de hautes eaux de 209 stations hydrologiques disposant d'une chronique de plus

de 40 ans. L'analyse a porté sur les caractéristiques des débits supérieurs au 90^{ème} centile. Les tendances montrées en 2006 sont confirmées. On observe une distinction claire entre le nord-est et le sud-ouest du pays avec au nord une tendance à l'augmentation du débit maximal et du volume total écoulé (Figure 30), les zones blanches n'ont pas été étudiées. La tendance est inverse au Sud du pays. Cette répartition spatiale se retrouve sur les bassins Rhône-Méditerranée et de Corse, même si globalement, les tendances ne sont pas significatives statistiquement. La date du débit maximal et la date du centre du volume total écoulé (jour pour lequel la moitié du volume des débits maximums est écoulé) tendraient à arriver plus tard sur les Alpes du Sud (GIUNTOLI et al., 2012).

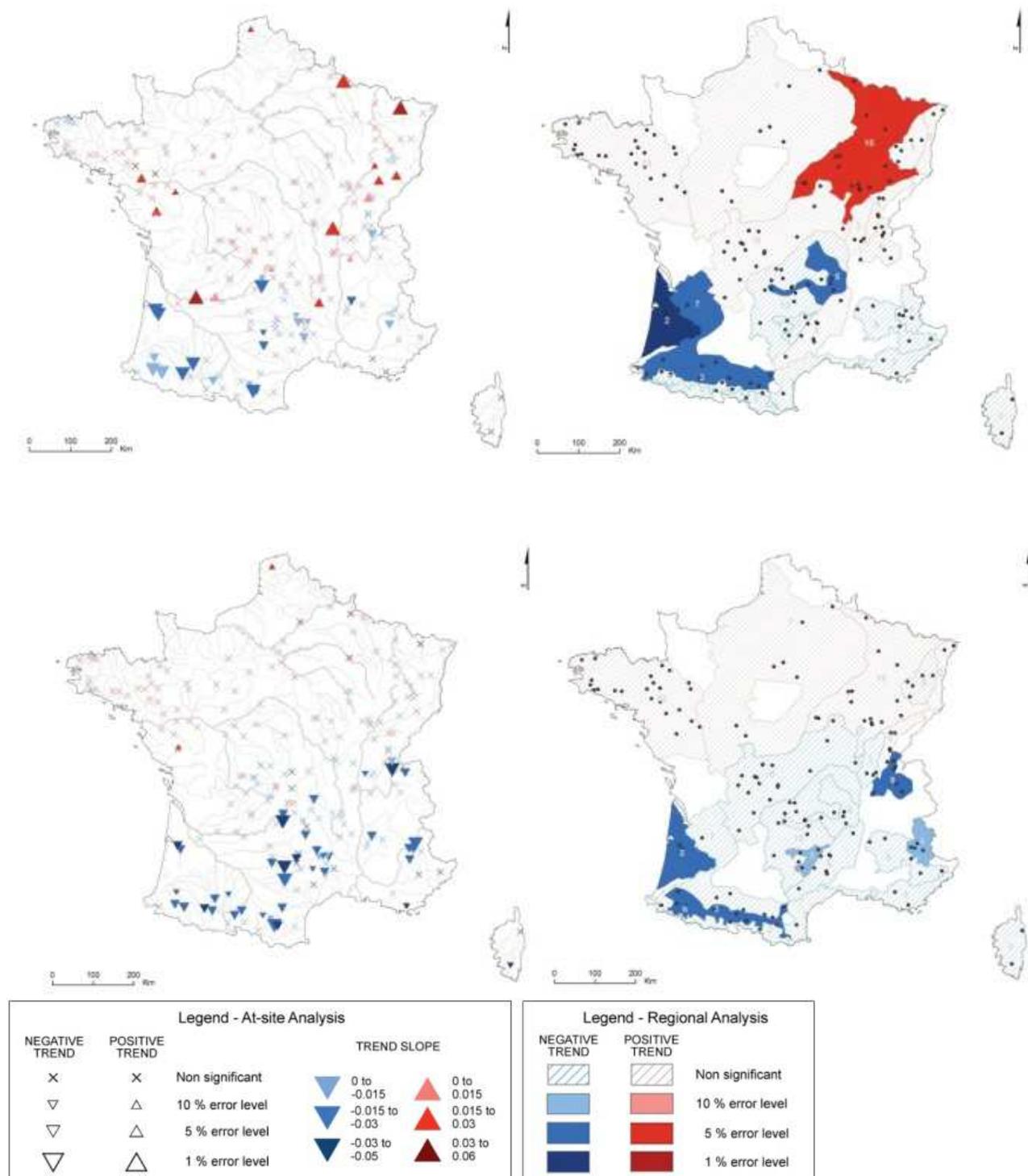


Figure 30 : Tendence d'évolution du débit annuel maximum (en haut) et du volume total écoulé associé (en bas) pour les stations disposant de chroniques de données supérieures à 40 ans (Giuntoli et al., 2012).

Des travaux ont porté sur la recherche de tendances passées d'évolution des caractéristiques des sécheresses hydrologiques (le seuil correspondant au Q15, soit la valeur du débit non dépassé 15% du temps) en France sur la période 1968-2008. Il ressort une augmentation de la sévérité des sécheresses dans le sud de la France. Cette tendance serait principalement corrélée à des variables climatiques de grande échelle (Oscillation Atlantique Nord et Multi Décennale). La variabilité temporelle de la sévérité serait quant à elle fonction des conditions climatiques locales. La date de début des situations de sécheresse tend à arriver plus tôt pour de nombreuses stations. Pour ce point les corrélations avec les variables climatiques sont peu significatives (Giuntoli et al., 2013).

La mise en place de l'Observatoire national des étiages (Onde) en 2012 permet une évaluation qualitative mensuelle de l'écoulement entre mai et septembre. La pérennité de ce réseau permettra d'analyser des tendances d'évolution dans le futur (<http://onde.eafrance.fr/>).

Le Rhône, tendances passées et projections

Module et saisonnalité

Zampieri et al. (2015) ont étudié l'évolution des débits de fleuves européens de 1921 à 2008. Ils en ressortent une tendance à l'avancement du pic du débit printanier d'environ 22 jours (+/- 4 jours) par siècle pour le Rhône à Beaucaire. Cette tendance à long terme serait majoritairement expliquée par une avancée de la date des précipitations printanières et l'augmentation de la part des précipitations liquides. La variabilité temporelle serait corrélée à la date de début de fonte. L'avancement de la date de fonte est estimée à environ 5 jours (+/- 1) par siècle. Par manque de données, l'influence de l'humidité des sols, des eaux souterraines et de la fonte des glaciers n'a pas été prise en compte, l'influence de ces paramètres sur le pic du débit maximal printanier étant jugée minoritaire par les auteurs (Zampieri et al., 2015). Les travaux de Rahman et al. (2015) projettent une avancée de la date du pic du débit printanier sous l'effet du changement climatique à l'horizon 2050 (Figure 32) ainsi qu'une diminution du pic du débit. En revanche cette diminution du débit serait plus fonction de l'évolution de l'usage des sols que du changement climatique (Figure 31) (Rahman et al., 2015). D'autres études projettent également une avancée et une diminution du pic de crue printanier du Rhône sous l'effet du changement climatique (Schneider et al., 2013; Van Vliet et al., 2013).

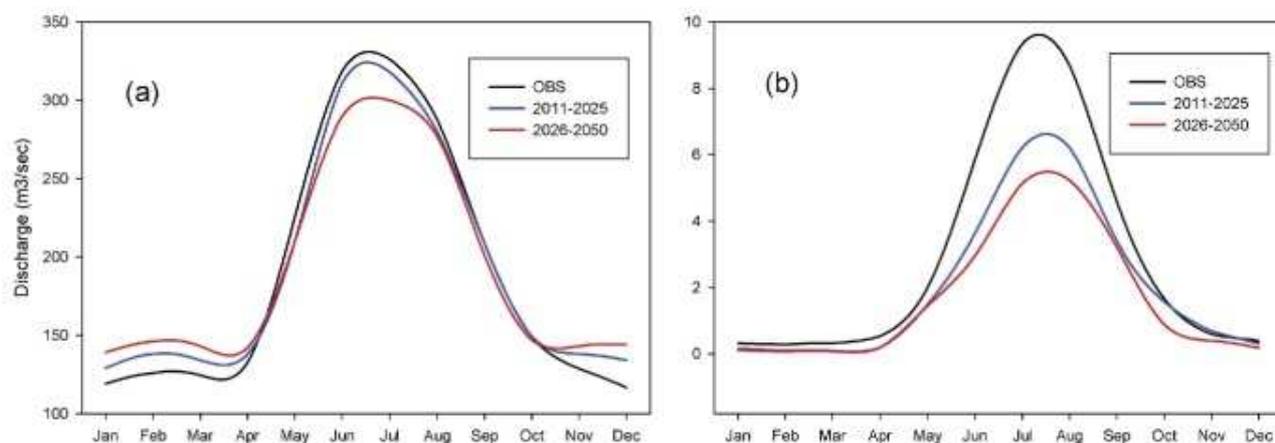


Figure 31 : Hydrographe à Porte du Scex (exutoire du bassin versant étudié, amont du Léman) (a) et à l'exutoire d'un sous bassin versant (b) aux horizons 2011-2025 et 2026-2050 par rapport 1981-2010 selon l'occupation du sol (Rahman et al., 2015).

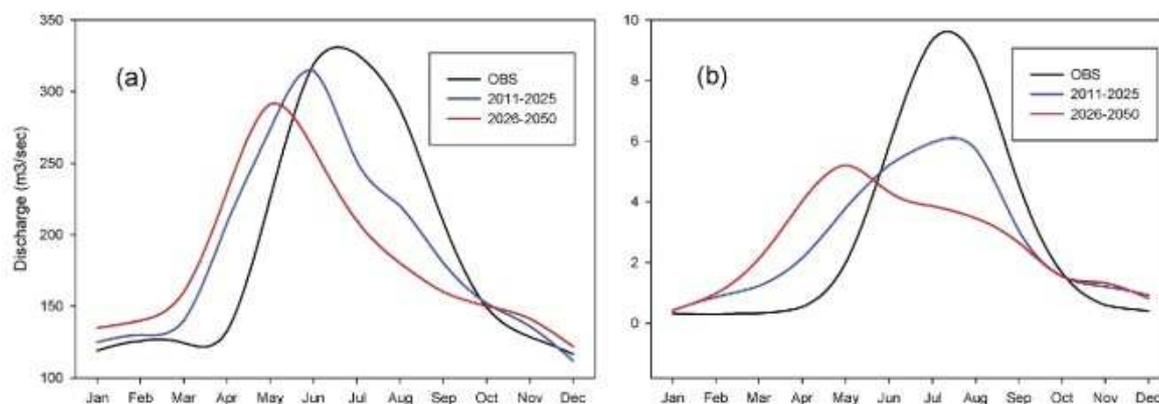


Fig. 5. Hydrograph at [a] downstream sub basin Porte du Scex, [b] upstream sub basin in Gletsch for climate change impact.

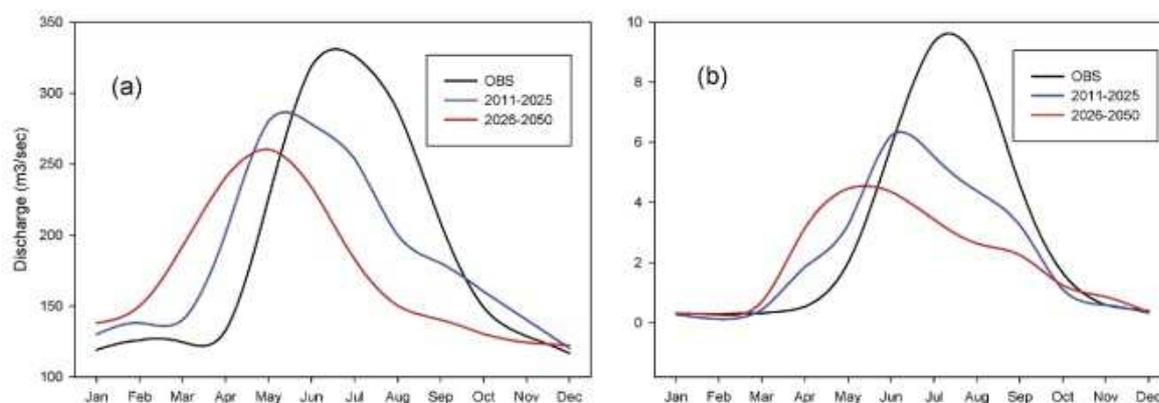


Fig. 6. Hydrograph at [a] downstream sub basin Porte du Scex, [b] upstream sub basin in Gletsch for combined impact.

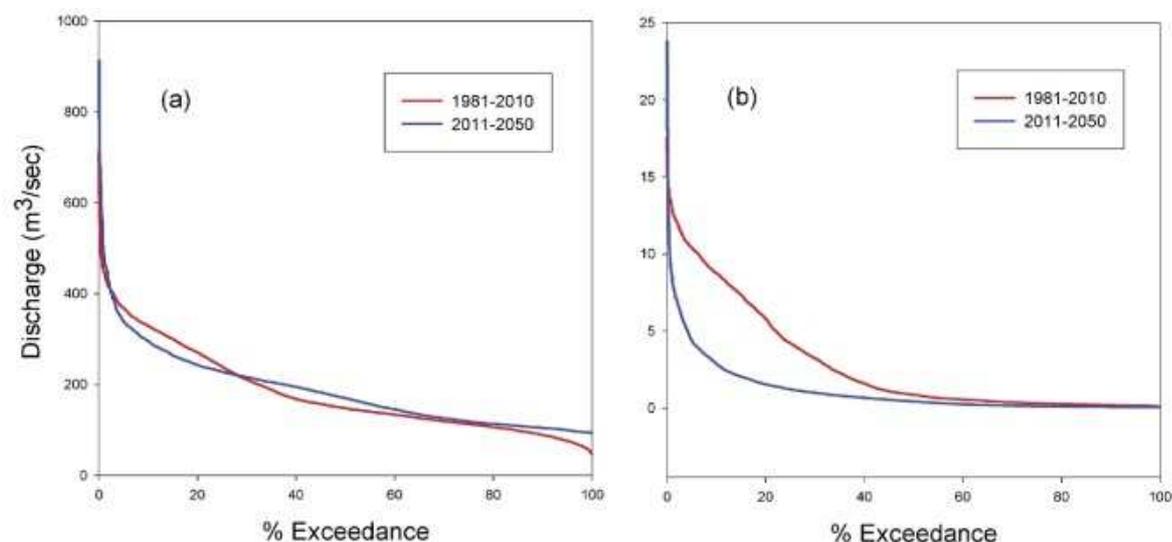


Fig. 7. Flow duration curve [a] downstream sub basin Porte du Scex [b] upstream station: 'Gletsch'.

Figure 32 : (a) hydrographe à porte Porte du Scex (exutoire du bassin versant étudié, amont du Léman) (b) hydrographe à l'exutoire d'un sous bassin versant. (Haut) impact du changement climatique seul aux horizons 2011-2025 et 2026-2050 par rapport 1981-2010 sous le scénario A1B. (Milieu) effets combinés du changement climatique et de l'occupation du sol. (Bas) courbe des débits classés (Rahman et al., 2015).

En amont du Léman, l'impact de la gestion des flux par les ouvrages hydrauliques sur les débits naturels devraient être supérieur aux effets du changement climatique à l'horizon 2050. L'impact du changement climatique serait, d'après les auteurs, limité à la baisse de la contribution des glaciers aux débits. Cela entrainerait une diminution des débits d'août et de septembre et une augmentation des débits de pointe, mais pas avant 40 ans (Fatichi et al., 2015).

D'autres travaux montrent un impact sensible des choix de gestion des ouvrages hydrauliques suisses sur les débits en France. Le débit annuel moyen du Rhône à Lyon pourrait diminuer de -46 à -63 % à l'horizon 2100 si les apports du Léman diminuent de moitié contre -38 à -57% s'ils restent inchangés (Ruiz-Villanueva et al., 2015). Ces résultats obtenus à partir d'un modèle à base physique et de quatre projections climatiques contrastées projettent des diminutions du débit moyen plus fortes que la moyenne des autres études disponibles.

A partir également d'une approche multi-scénario et d'un modèle à base physique, une étude projette une diminution du module du Rhône à son exutoire de -11% pour la fin du siècle (Van Vliet et al., 2013). Le projet Explore 2070 projette une diminution du module du Rhône à Beaucaire de -8 % à - 36 % (Figure 33). Ces résultats sont les projections minimales et maximales de l'ensemble des 14 simulations (valeurs médianes : -14 et -24% selon le modèle considéré) (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2012(a)).

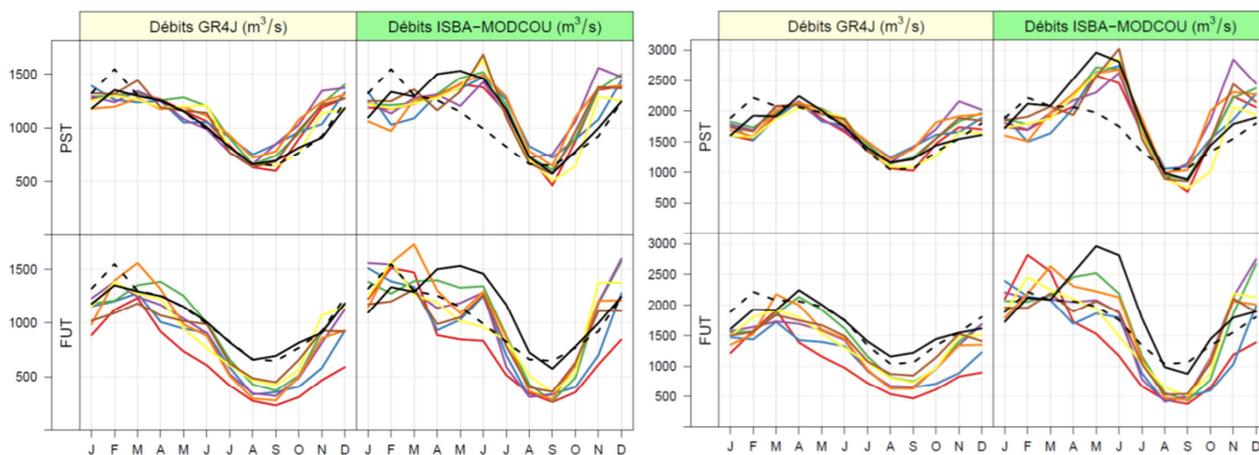


Figure 33 : Débit moyens mensuels modélisés du Rhône à Ternay (à gauche) et à Beaucaire (à droite) sur la période de référence 1961-1990 (première ligne notée PST) et à l'horizon 2046-2065 (ligne du bas, notée FUT) selon deux modèles hydrologiques (GR4J 1^{ère} colonne et ISBA-MODCOU, 2^{ème} colonne). La courbe pointillée noir est la moyenne des données observées à la station sur la période de référence. La courbe noire pleine représente les débits simulés en climat présent. Les courbes de couleurs sont les projections issues des 7 modèles climatiques utilisés forcés sous le scénario A1B (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2012(a)).

Deux études, centrées sur la recherche de tendance sur les crues centennales à l'échelle européenne, projettent des résultats trop contrastés pour dégager une tendance sur les débits annuels moyens du Rhône au cours du XXI^{ème} siècle (Alfieri et al., 2015; Rojas et al., 2012). Une autre étude de Santini & Di Paola (2015), à l'échelle mondiale, basée sur la détermination de corrélations entre les débits moyens et les types de climats (définis par la saisonnalité des précipitations et la température) projette une diminution du module de -10 à -25 % à l'horizon 2050 et une augmentation de 10 à 25% à l'horizon 2100.

De ces résultats parfois contrastés se dégage tout de même une tendance à la diminution du module du Rhône qui serait comprise entre -10 et -40 %.

De fortes incertitudes autour des crues

Les projections sur les crues sont à prendre avec précaution. C'est sur ces phénomènes que les incertitudes sont les plus importantes. En effet les crues extrêmes dépendent fortement des projections des précipitations extrêmes qui à ce jour sont très incertaines (Dumas et al., 2013; Giuntoli et al., 2015).

Réalisés à l'échelle mondiale, les travaux de Giuntoli et al. 2015 ne montrent pas de tendance d'évolution du nombre de jours des débits extrêmes pour la France pour la fin du siècle sous le scénario RCP 8.5. Les résultats sont obtenus à partir de 6 modèles hydrologiques et 5 modèles climatiques globaux. Les débits extrêmes sont représentés par le Q95, soit les débits dépassés 5% du temps sur la période de référence 1972-2005 (Giuntoli et al., 2015). Les travaux de Van Vliet et al. (2015) projettent une augmentation de 1% de la valeur du Q95 du Rhône pour la fin du siècle.

Les travaux réalisés à l'échelle européenne montrent une tendance significative à l'augmentation de la valeur du débit centennal (Q100) du Rhône. Il pourrait augmenter de 50% pour la fin du siècle sous le scénario A1B (Rojas et al., 2012). Les travaux d'Alfieri et al (2015) utilisent le même modèle à base physique (Lisflood) pour modéliser les tendances sur le Q100. Ils montrent également une augmentation de la valeur des crues centennales du Rhône mais plus limitée,

d'environ +30 % pour la fin du siècle sous le RCP 8.5. D'après cette même étude le débit maximal annuel moyen augmenterait également sur le Rhône de 5 à 20 % (Alfieri et al., 2015).

A l'échelle française, l'étude de Dumas et al. (2013) projette également pour le Rhône une probabilité d'occurrence des crues centennales divisée par deux à l'horizon 2050. Ruiz-Villanueva et al. (2015) annoncent une possible augmentation des crues extrêmes du Rhône en amont de Lyon sans le quantifier du fait des trop fortes incertitudes.

Explore 2070 et la thèse de G. Dayon ont étudié l'évolution du débit moyen journalier maximum sur une période de 10 ans (QJAX10). Indépendamment des scénarios climatiques, Dayon projette une légère augmentation de ce paramètre sur le Rhône tandis qu'Explore 2070 projette une possible diminution du QJAX10 à Beaucaire variable en fonction du modèle considéré : de +10 à -20 % selon ISBA MODCOU et de 0 à -50 % selon GR4J. Dans les deux études les auteurs soulignent les fortes incertitudes autour de ces projections (Dayon, 2015; Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2012(a)).

Des étiages plus sévères

Ruiz-Villanueva et al. (2015) projettent une sévérité des étiages principalement dans le scénario où les débits estivaux provenant de la Suisse seraient divisés par deux pour 2100. Ceci est un point important car il a été estimé qu'environ 40% du débit du Rhône à Beaucaire provient de ses apports Suisses (Sivade et al., 2014).

L'étude de Vliet réalisée à l'échelle mondiale projette pour la fin du siècle une diminution de 46% de la valeur du débit dépassé en moyenne 90% du temps pour le Rhône. Autrement dit, il y aurait presque deux fois moins d'eau lors des périodes de basses eaux. Cependant les incertitudes sont fortes sur ces résultats car le modèle tend fortement à sous-estimer les débits d'étiage en période de contrôle. A la même échelle, les travaux de Giuntoli projettent également une diminution des débits estivaux sur les bassins Rhône Méditerranée (Van Vliet et al., 2013; Giuntoli et al., 2015).

Concernant le débit mensuel minimal d'une année hydrologique sur une période de retour de 5 ans (QMNA5), les projections d'Explore 2070 et de Dayon sont cohérentes. Il diminuerait de -20 à -50 % à Beaucaire selon Explore 2070 en fonction du modèle. Selon le RCP, Dayon projette des diminutions allant d'environ -10 à -50% (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2012(a)).

Projections à l'échelle des bassins Rhône-Méditerranée et de Corse

Depuis la synthèse de Fabre (2012), deux travaux à échelle nationale ont projeté l'impact du changement climatique sur l'hydrologie : Explore 2070 porté par le ministère de l'environnement et la thèse de G. Dayon. La différence de méthodes utilisées complique les comparaisons simples. La principale différence est l'utilisation des quatre nouveaux scénarios du GIEC dans la thèse de G. Dayon. Explore 2070 utilisait un seul scénario du précédent rapport du GIEC.

Le projet Explore 2070 a projeté une augmentation de la température annuelle moyenne de +1.4 à +3°C et une tendance à la diminution des précipitations estivales de -16 à -23 %. Les projections d'évolution des débits aux droits de 1522 points sur le réseau hydrographique national montrent de façon générale :

- Une diminution significative globale des débits moyens annuels à l'échelle du territoire de -10 à -40 % (Figure 34) ;
- Une diminution prononcée des débits d'étiages pour une majorité des cours d'eau ;
- Une évolution hétérogène et globalement moins marquée des crues.

Les diminutions les plus marquées des modules se situent sur le bassin de l'Aude et les bassins pyrénéens (Figure 34). Il semblerait que l'augmentation de l'ETo soit la cause principale de cette tendance, la diminution des débits étant plus corrélée à l'augmentation des températures qu'à la diminution des précipitations. Les projections d'augmentation de l'ETo et de stagnation, ou diminution, des précipitations entraineront une augmentation de l'aridité des bassins versants, surtout en été.

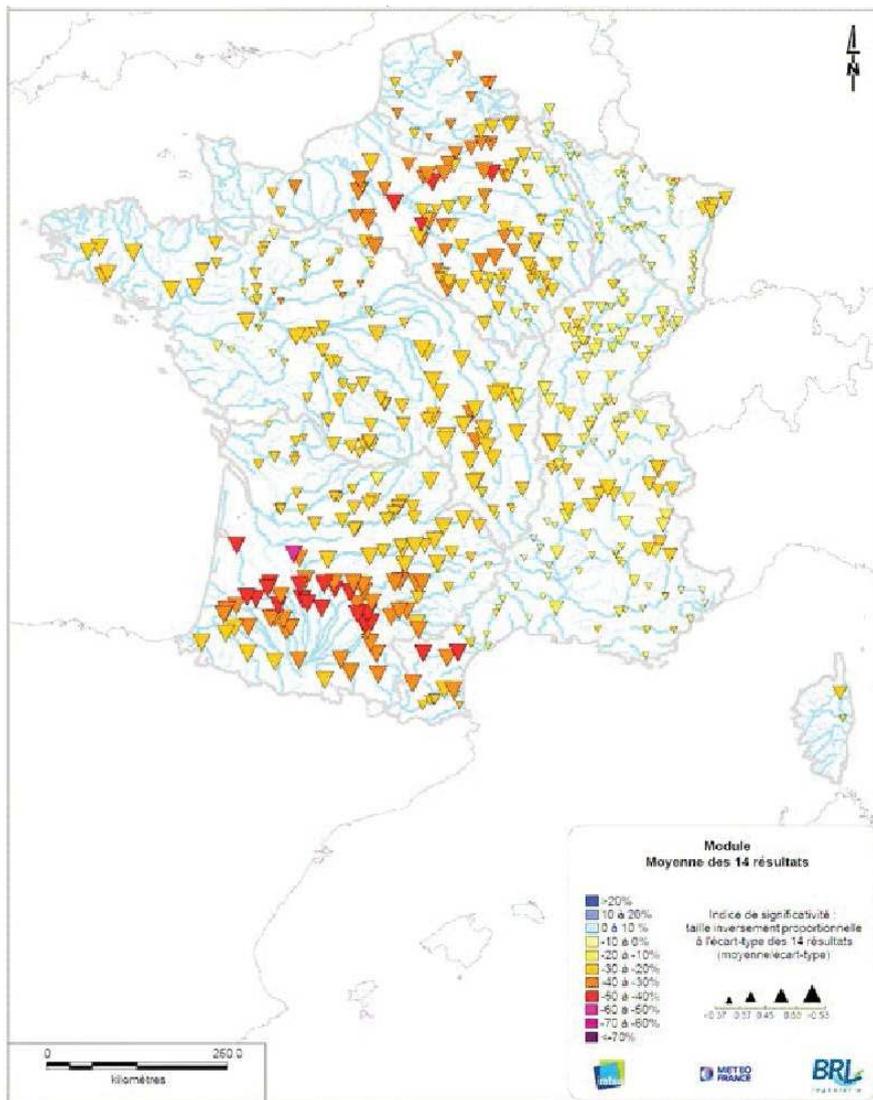


Figure 34 : Evolutions relatives possibles (en %) du débit moyen annuel (module) entre 1961-90 et 2046-65 : Résultats moyens établis sur les 14 simulations (2 modèles hydrologiques x 7 MCG). La couleur des points est fonction de l'intensité du changement et la taille des points est liée à la convergence des 14 simulations (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2012(a)).

Sur le bassin RMC, la diminution des débits moyens correspond à la tendance nationale de l'ordre de -10 à -40%. Les graphiques de la Figure 35 montrent les projections d'évolution des débits moyens issues des deux modèles hydrologiques sur les principaux affluents (et rivières) du bassin RMC.

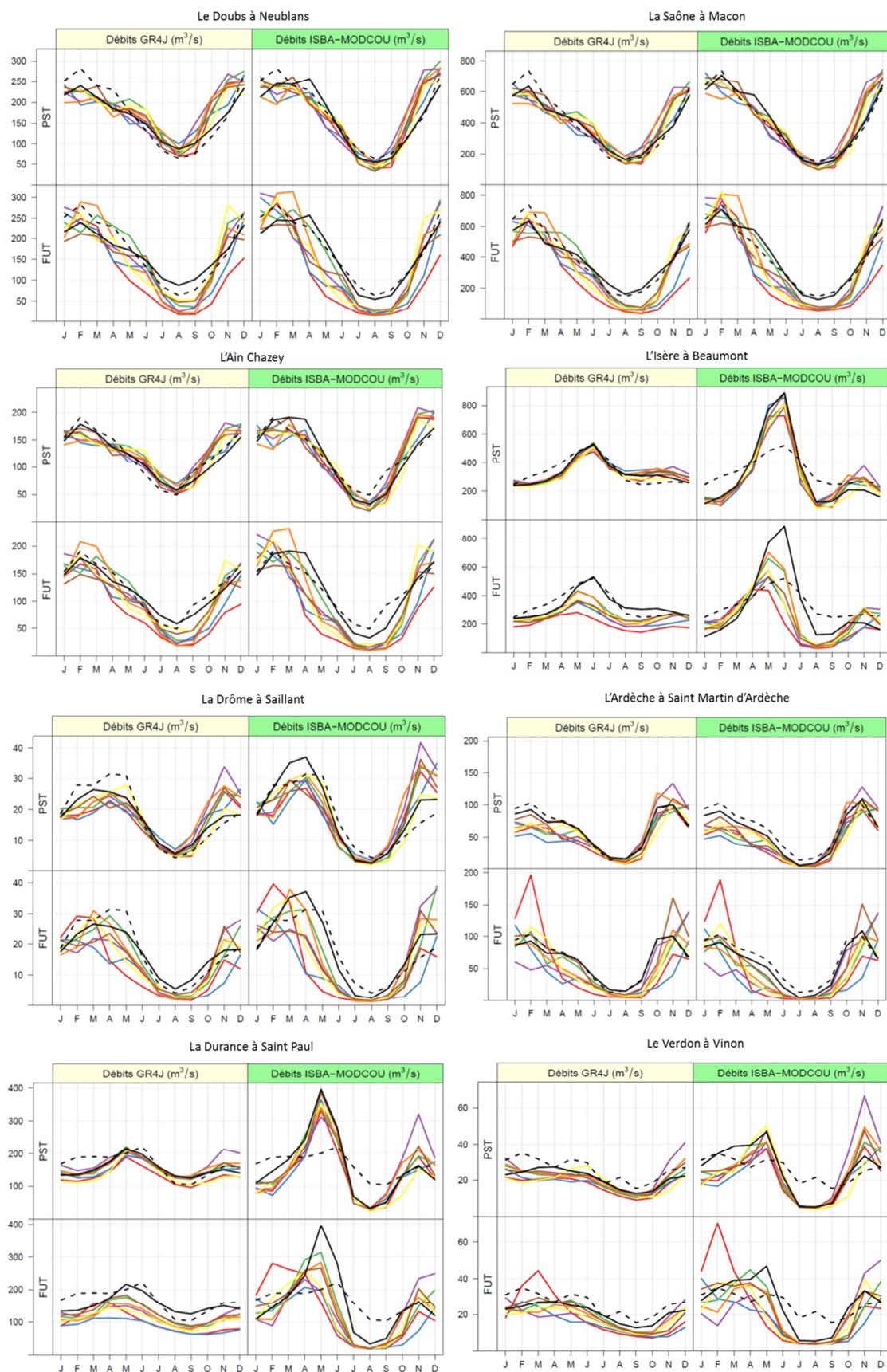


Figure 35 : Débit moyens mensuels modélisés de huit rivières au point le plus proche de leur confluence avec le Rhône sur la période de référence 1961-1990 (première ligne notée PST) et à l'horizon 2046-2065 (ligne du bas, notée FUT) selon deux modèles hydrologiques (GR4J 1^{ère} colonne et ISBA-MODCOU, 2^{ème} colonne). La courbe pointillée noir est la moyenne des données observées à la station sur la période de référence. La courbe noire pleine représente les débits simulés en climat présent. Les courbes de couleurs sont les

projections issues des 7 modèles climatiques utilisés forcés sous le scénario A1B (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2012(a)).

Les résultats du projet Explore 2070 montrent une tendance convergente à la diminution des crues décennales (débit journalier maximal annuel de période de retour 10 ans) pour les fleuves de montagne de 10 à 30% (Durance, Isère et rivières pyrénéennes). La baisse sur les bassins de la Saône et du Doubs est moins marquée (de -5 à -20%). Les bassins cévenols, et de façon plus générale les affluents rive droite du bas Rhône montrent une tendance à la hausse de 5 à 30%. Pour le reste du bassin, il n'y a pas de tendances qui se dégagent (Figure 36).

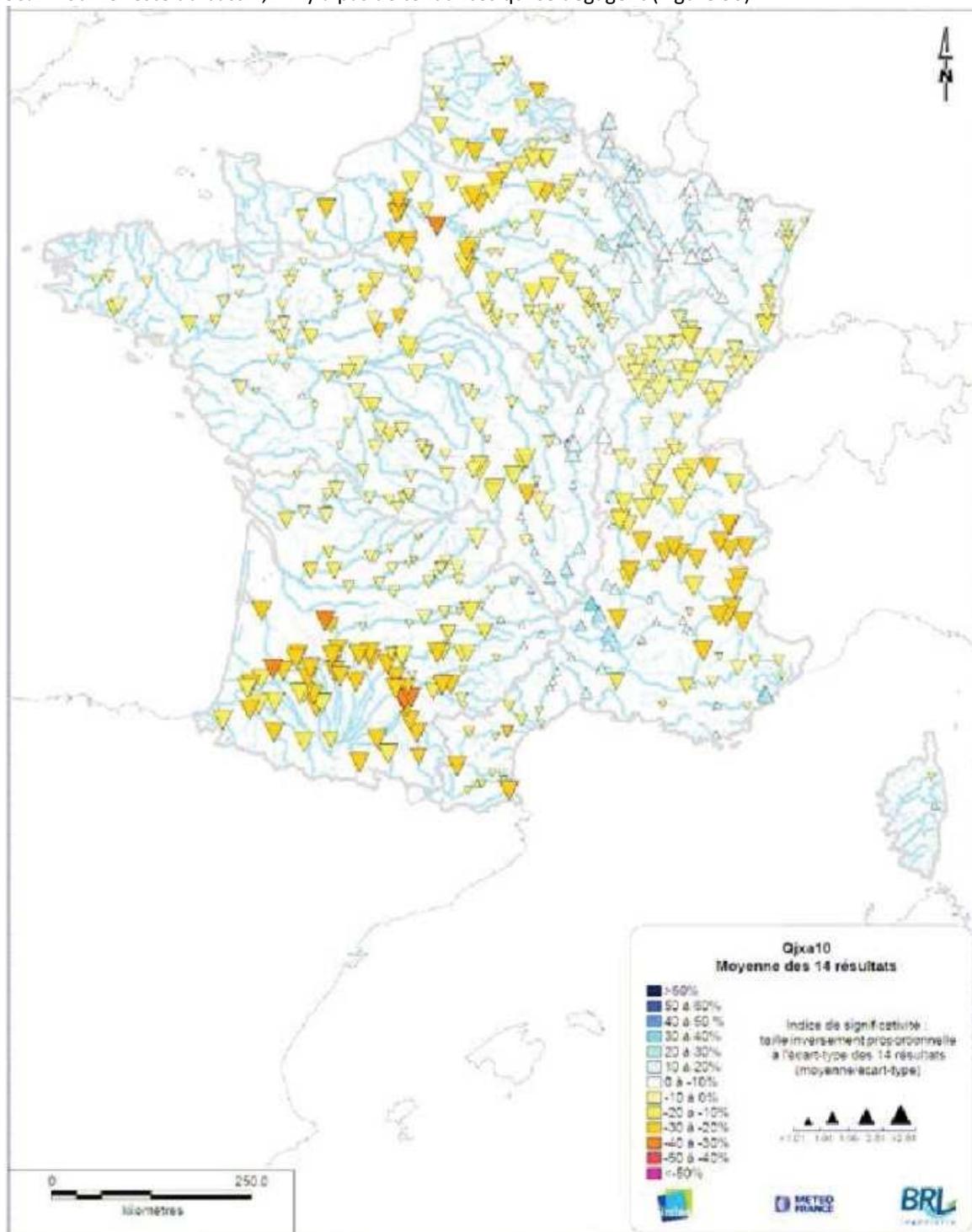


Figure 36 : Evolutions relatives possibles (en %) du débit journalier maximal annuel de période de retour 10 ans (QJXA10) entre 1961-90 et 2046-65 : Résultats moyens établis sur les 14 simulations (2 modèles hydrologiques x 7 MCG). La couleur des points est fonction de l'intensité du changement et la taille des points est liée à la convergence des 14 simulations (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2012(a)).

L'évolution du QMNA5 présente une tendance à la baisse mais avec une forte variabilité en fonction des projections et du modèle hydrologique considéré, il pourrait baisser de 10 à 60%. La tendance la plus marquée étant sur le nord du bassin (Figure 37).

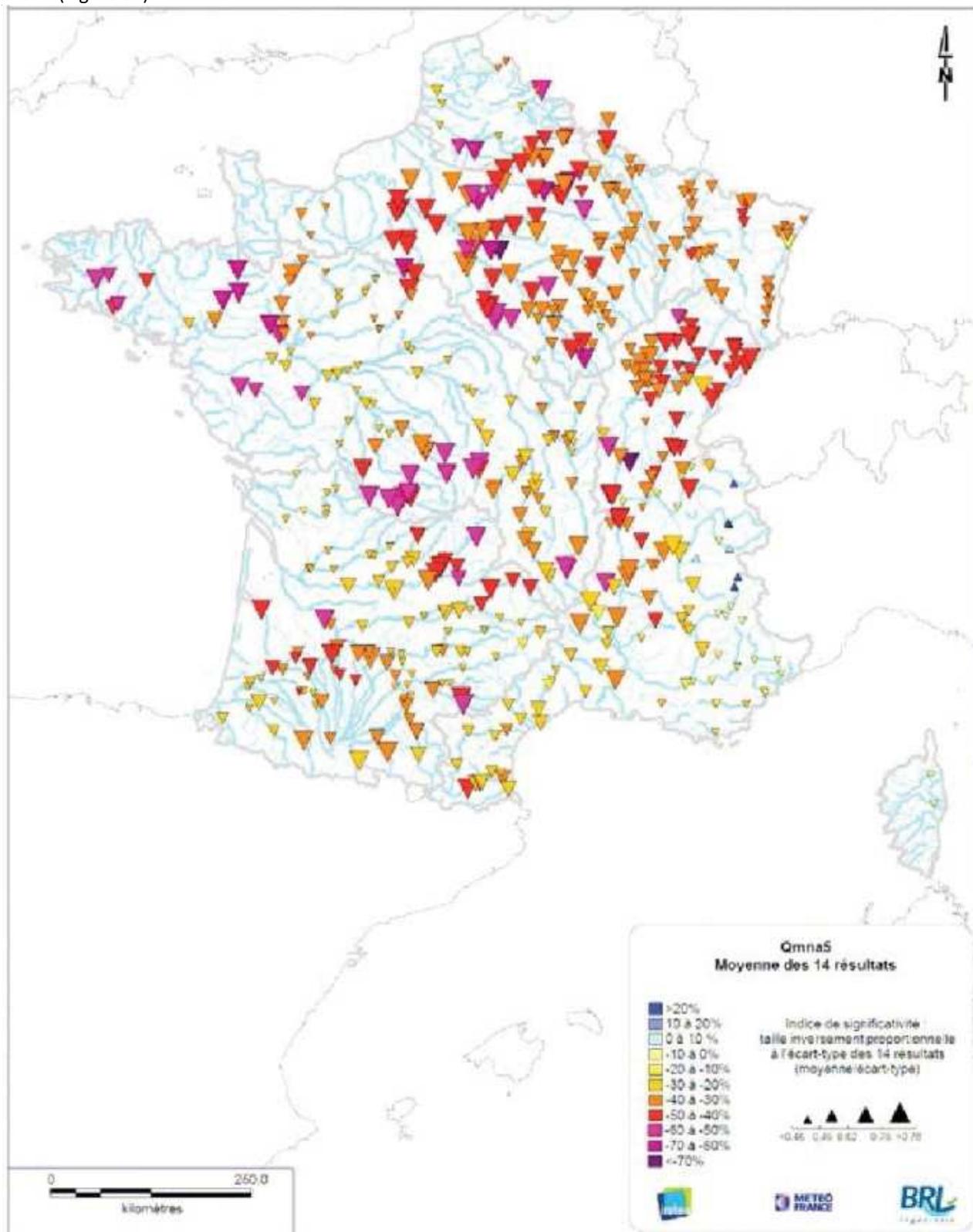


Figure 37 : Evolutions relatives possibles (en %) du débit mensuel minimal annuel de période de retour 5 ans QMNA5) entre 1961-90 et 2046-65 : résultats moyens établis sur les 14 simulations (2 modèles hydrologiques x 7 MCG). La couleur des points est fonction de l'intensité du changement et la taille des points est liée à la convergence des 14 simulations (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2012(a)).

Contrairement aux crues, une tendance générale sur le territoire se dégage concernant les étiages : ils devraient être plus sévères qu’aujourd’hui avec à la fois une augmentation de la durée et une diminution des débits.

Une part importante du projet a été de prendre en compte et de caractériser les incertitudes. Il ressort que la source de l’incertitude (modèle climatique ou hydrologique) varie en fonction de la variable hydrologique considérée. De façon générale, l’incertitude est plus forte pour les extrêmes que pour les moyennes annuelles. La variabilité du module, du QJXA10 et du débit quinquennal sec annuel est principalement causée par les modèles climatiques à l’inverse du QMNA5 dont la variabilité est davantage corrélée au modèle hydrologique. Il faut noter que des sources d’incertitudes n’ont pas été quantifiées. C’est le cas du choix du scénario de GES, de la méthode de descente d’échelle, de la méthode d’estimation de l’ETP, de la transposabilité temporelle des modèles hydrologiques et de leurs capacités d’extrapolation (Chauveau et al., 2013 ; Vidal et al. (2016).

Une conclusion de ce travail, commune de la thèse de G. Dayon, est que c’est en été que les changements seront les plus marqués, avec une diminution générale des débits, sur tout le territoire. Cette étude montre également que la diminution estivale devrait avoir lieu pour tous les RCP. Le constat de changement de régime hydrologique sur les Alpes se retrouve également via l’augmentation des débits hivernaux et printaniers. Les Figure montrent le pourcentage d’évolution des débits moyens saisonniers en fonction du RCP (une ligne par RCP) et de la saison (1 colonne par saison) à l’horizon 2035-2065 et 2070-2100 (Dayon, 2015 ; Ministère de l’Ecologie, du Développement Durable et de l’Energie, 2012(a)).

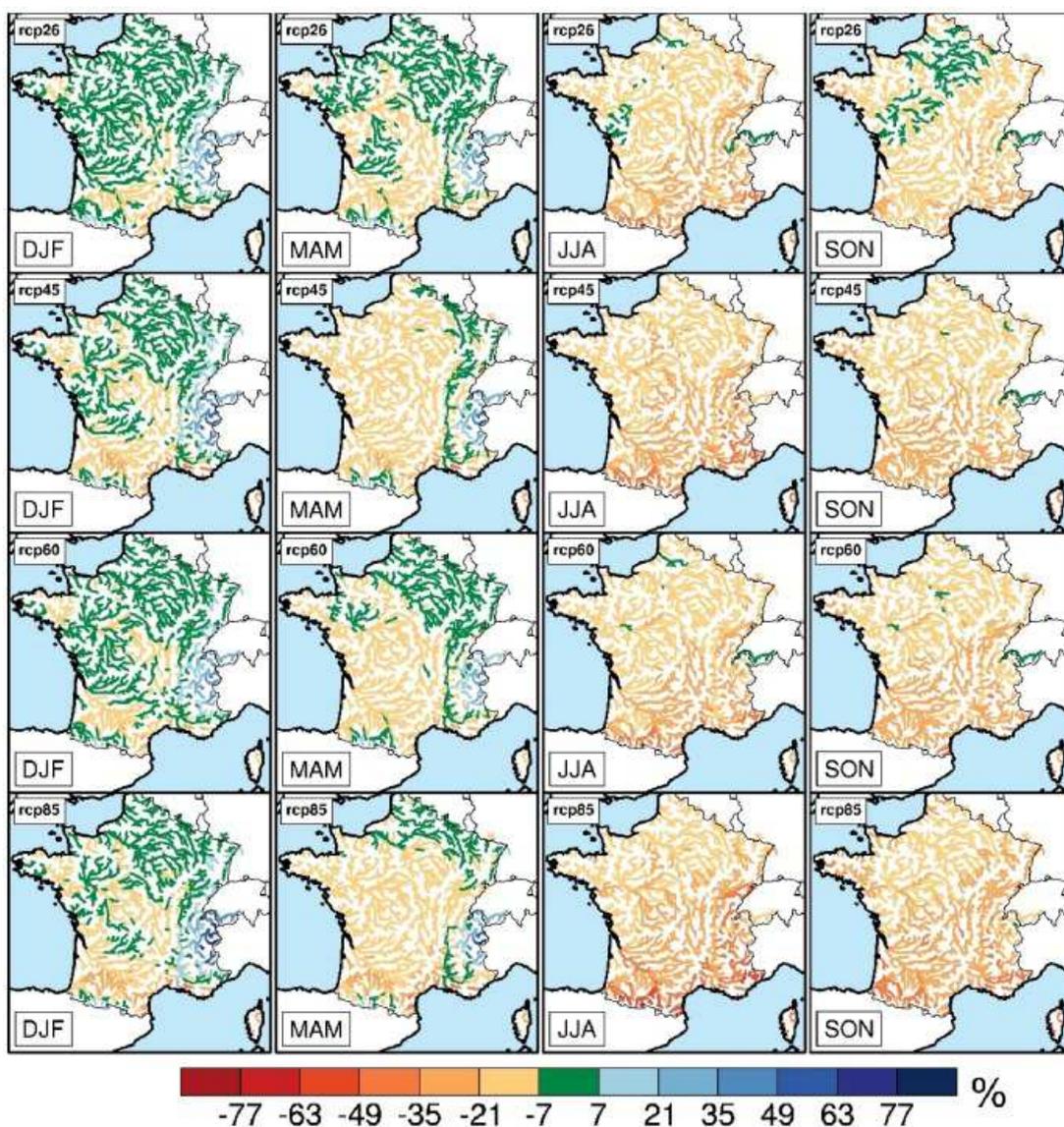


Figure 39 : Moyenne d’ensemble des changements saisonniers relatifs (%) au milieu du siècle 2035-2065 relatifs à la période 1960-1990 pour les quatre scénarios RCP sur le réseau hydrographique de Modcou. Les saisons sont indiquées par les premières lettres des mois : DJF : Décembre-Janvier-Février, MAM : Mars-Avril-Mai, JJA : Juin-Juillet-Août SON : Septembre-October-Novembre (Dayon , 2015).

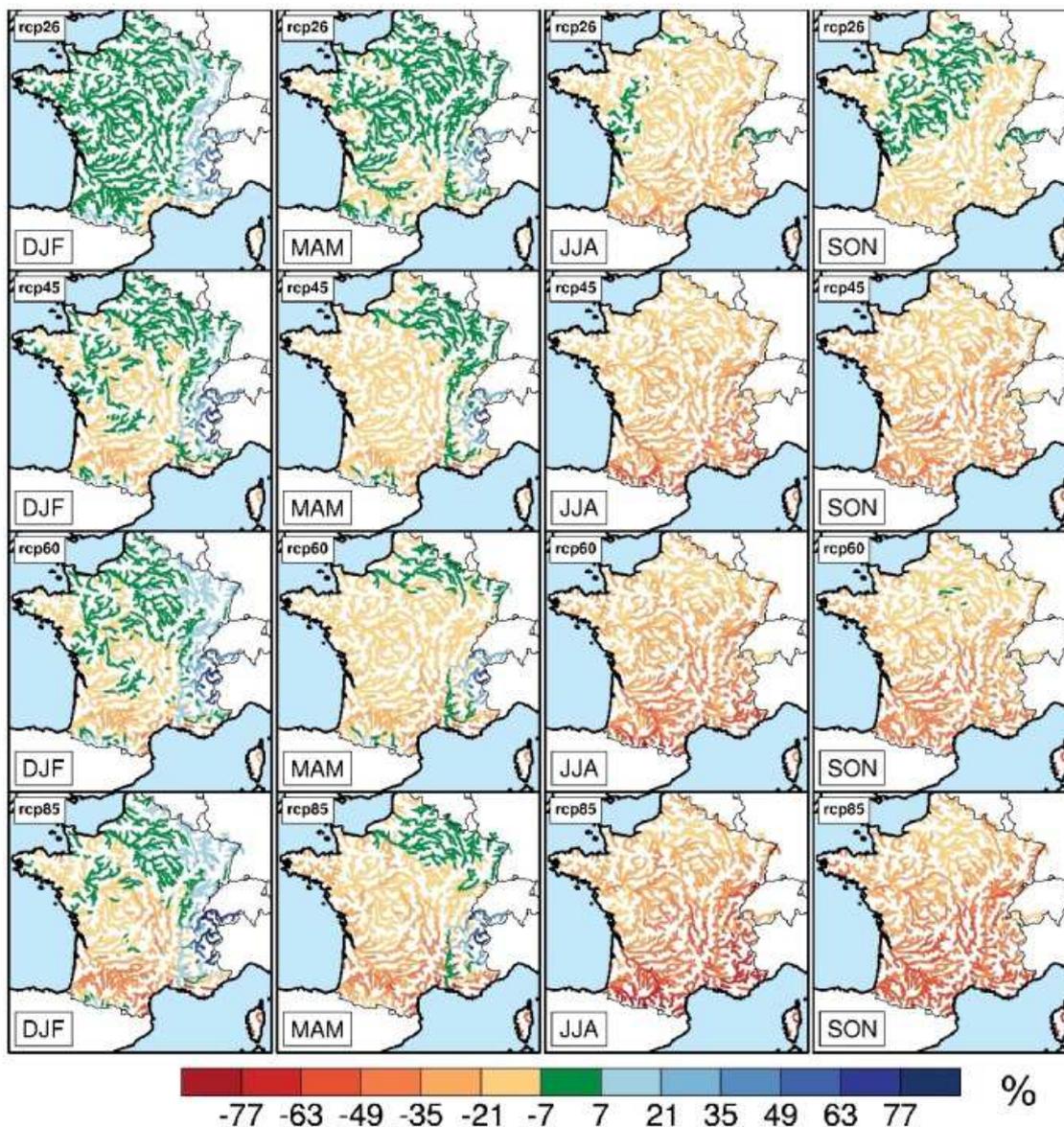


Figure 38 : Moyenne d'ensemble des changements saisonniers relatifs (%) à la fin du siècle 2070-2100 relatifs à la période 1960-1990 pour les quatre scénarios RCP sur le réseau hydrographique de Modcou. Les saisons sont indiquées par les premières lettres des mois : DJF : Décembre-Janvier-Février, MAM : Mars-Avril-Mai, JJA : Juin-Juillet-Août SON : Septembre-Octobre-Novembre (Dayon , 2015).

Concernant le QMNA5 et le QJAX5 (Figure 39 et Figure 40), les incertitudes sont également plus fortes que sur les tendances annuelles et saisonnières. Sur le bassin RM, la tendance à la diminution du QMNA5 est cohérente avec les autres études mais contrairement à Explore 2070, la diminution serait plus marquée sur le sud du bassin que le nord. Les ordres de grandeurs sont proches, de -10 à -50 % environ pour la fin du siècle suivant le RCP. Concernant les QJAX10, seul le RCP8.5 montre éventuellement une légère tendance à la diminution à la fois de la valeur du débit et de la fréquence d'apparition sur la majorité du bassin (environ de 0 à -20%). Il pourrait augmenter sur la Saône et le Rhône de 0 à + 20 % (Dayon 2015).

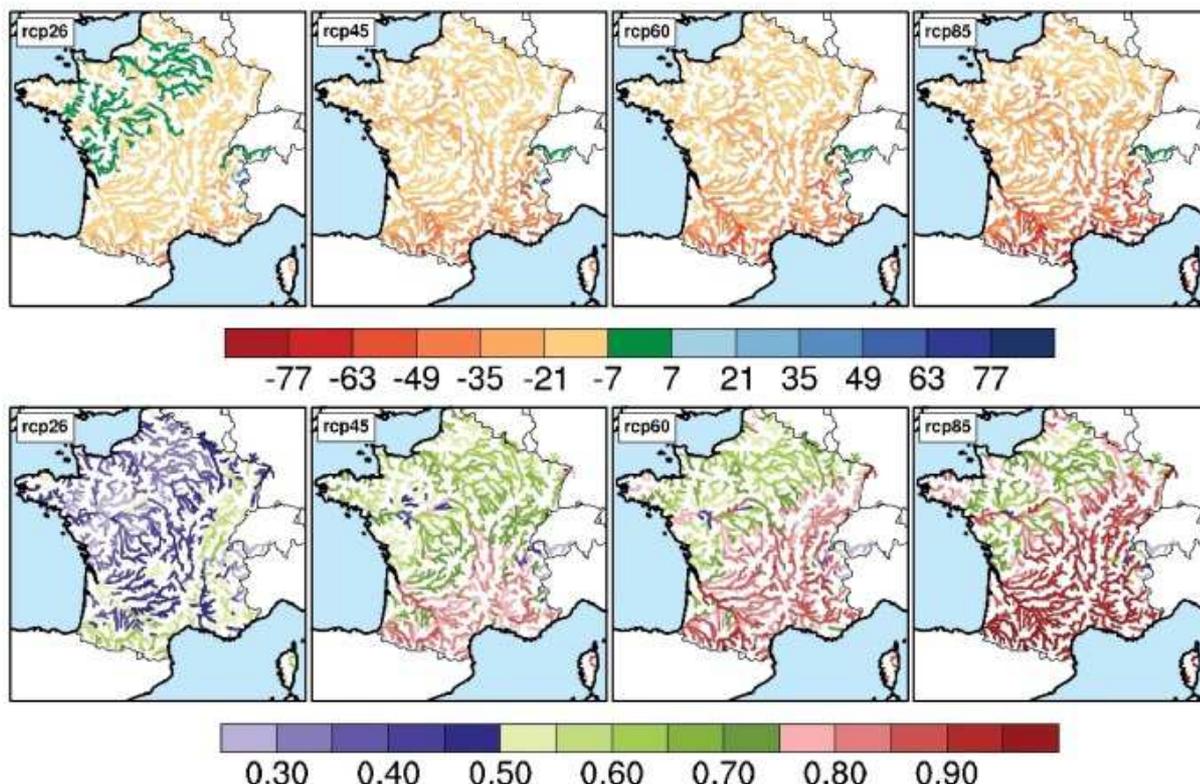


Figure 39 : En haut : Moyenne d'ensemble des changements relatifs du débit mensuel minimal d'une période de retour de 5 ans (QMNA5, %) pour la période 2070-2100 par rapport à la période 1960-1990 pour les quatre scénarios RCP. En bas : Moyenne d'ensemble de la probabilité que le débit mensuel minimal sur la période 2070-2100 soit inférieur ou égale au QMNA5 de la période 1960-1990 pour les quatre scénarios RCP (Dayon 2015).

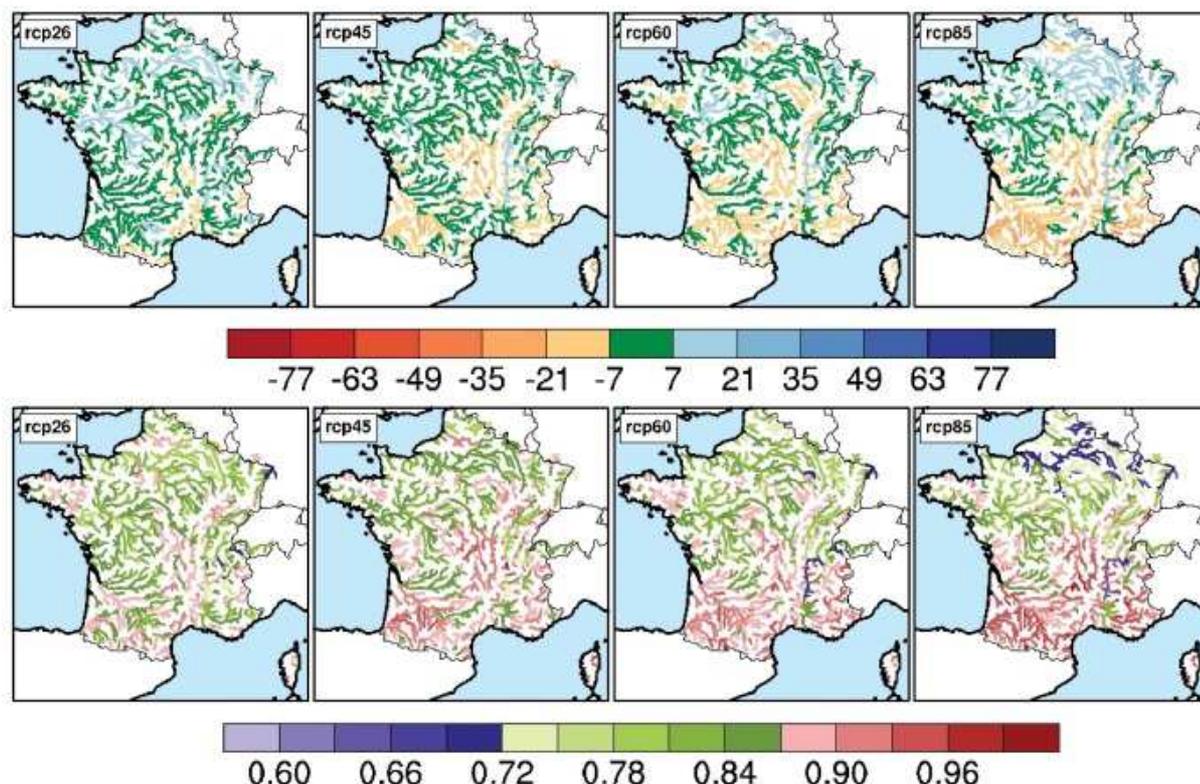


Figure 40 : En haut : Moyenne d'ensemble des changements relatifs du débit journalier maximal d'une période de retour de 10 ans (QJXA10). En bas : Moyenne d'ensemble de la probabilité que le débit journalier maximal sur la période 2070-2100 soit inférieur ou égal au QJXA10 de la période 1960-1990 pour les quatre scénarios RCP (Dayon 2015).

En revanche il se dégage sur toute la France une tendance à l'augmentation du nombre de jours de sécheresse hydrologique (représenté par le Q10, soit la valeur de débit non dépassée 10% du temps). Cette augmentation est plus marquée dans le sud de la France où elle pourrait atteindre +30 à +40%. En considérant uniquement juin/juillet/août, cela pourrait atteindre +50 à +60% (Giuntoli et al., 2015).

Les publications scientifiques déjà évoquées dans la partie consacrée au fleuve Rhône apportent des éléments complémentaires :

- Les travaux de Dumas et al. (2013) montrent que la fréquence des crues centennales pourrait être multiplié par deux sur les bassins versants de l'Hérault, des Cévennes et des Causses ;
- Les cours d'eau méditerranéens deviendraient plus intermittents avec une augmentation des assecs à l'horizon 2050. Ceci serait principalement induit par la diminution des précipitations de -23% (Schneider et al., 2013);
- Toujours selon Schneider, il y a aurait peu de changements sur le nord du bassin excepté une diminution des débits estivaux ;
- Selon Ruiz-Villanueva, l'Ain, la Loue et la Saône verraient leur débit annuel moyen diminuer de -9 à -57% selon la rivière et le scénario climatique. L'Arve verrait en revanche son débit augmenter de -3 à 34%.

Dans le cadre du projet « Ouest Herault 2 », le BRGM a étudié l'impact du changement climatique sur la ressource en eau du bassin versant de l'Orb. A partir des projections issues de 9 modèles forcés sous le scénario A1B, l'étude montre une possible diminution des débits moyens mensuels de - 20 à - 40 % en fonction des sous bassins versants et de la saison. La diminution serait moins marquée en été (environ - 10%) par opposition à l'automne (Caballero et al., 2012). Le projet REMedHe (2012-2015), financé par le ministère en charge de l'écologie, a modélisé l'impact cumulé des changements climatiques et anthropiques sur la gestion quantitative des fleuves Hérault et Ebre (Espagne).

A partir de 9 modèles climatiques globaux forcés sous les scénarios RCP 4.5 et 8.5 et de trois méthodes de descente d'échelle, les projections climatiques obtenues à l'horizon 2050 montrent une tendance claire à l'augmentation des températures annuelles moyennes d'environ +1 à +3.3 °C. L'augmentation est supérieure en été et serait de +1.6 à +4.8 °C. L'évolution des précipitations est plus incertaine. Elle serait comprise à l'échelle annuelle entre -13 et +7% en fonction des scénarios. En revanche les tendances convergent au printemps et en été, avec une valeur de diminution médiane de -20%. L'impact sur les débits de l'Hérault a été obtenu avec le modèle hydrologique conceptuel journalier GR4J. Les résultats divergent pour l'hiver et l'automne empêchant de dégager un signal. En revanche une tendance à la baisse ressort au printemps et en été. Elle serait de -5% à -38% au printemps et de -14 à -57% en été (Figure 41).

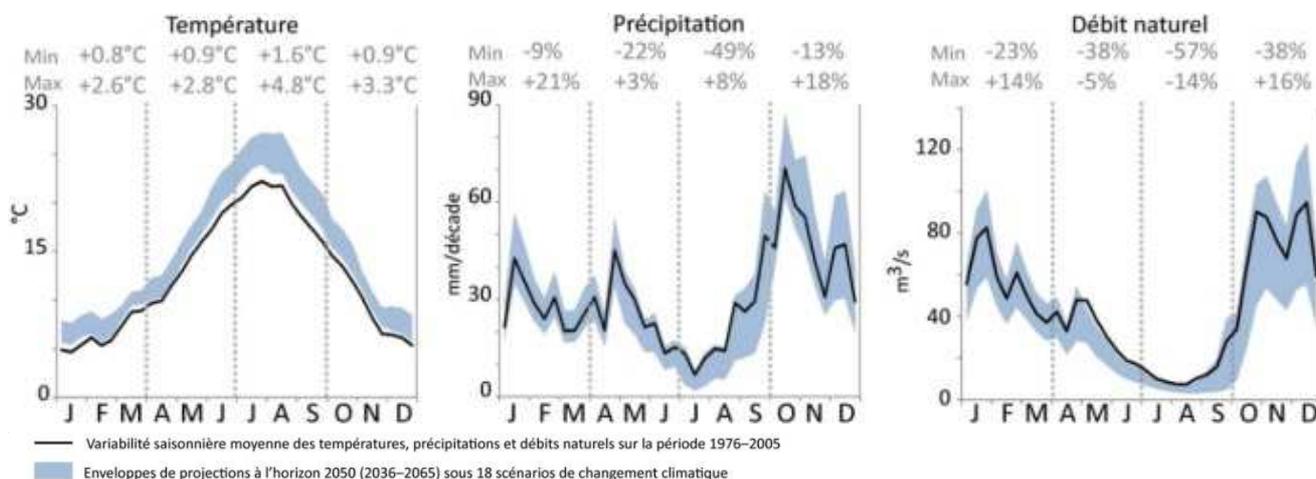


Figure 41 : Enveloppes de projections hydro-climatiques saisonnières moyennes selon 18 scénarios climatiques à l'horizon 2050 en comparaison avec les conditions de référence sur la période 1976-2005 au niveau des bassins (a) de l'Hérault (Ruelland et al., 2016).

L'impact de cette diminution de la ressource couplé à la tendance à l'augmentation des pressions anthropiques devrait entraîner une diminution sensible de la disponibilité de la ressource. Les restrictions de prélèvement pourraient devenir plus fréquentes et la pression anthropique sur les milieux pourrait s'intensifier. En revanche la robustesse des projections intégrant ces choix de gestion est limitée au regard des incertitudes, notamment climatiques (Ruelland et al., 2016).

Les incertitudes associées aux projections

De nombreux efforts ont été réalisés pour prendre en compte les incertitudes liées aux approches modélisées. Elles sont aujourd'hui généralement identifiées et caractérisées dans les études d'impacts. Lafaysse et al. (2014) ont identifié

l'origine et la part relative de l'incertitude imputable aux différentes étapes et variables d'une étude d'impact en zone de montagne : RIWER 2030. Il ressort notamment que :

- Pour les températures, la part imputable aux modèles de circulation générale domine mais celle liée aux méthodes de descentes d'échelles statistiques est non négligeable ;
- Pour les précipitations et les débits, l'incertitude est dominée par la variabilité de grande échelle (moins marqué pour les pluies d'été où la variabilité locale est importante). La part due aux modèles globaux et à la méthode de descente d'échelle statistique est équivalente et augmente avec le temps.

Cette étude souligne le besoin d'utiliser plusieurs méthodes de descente d'échelles dans les études d'impact étant donné que la variabilité qui leur est imputable est non négligeable sur de nombreuses variables jouant un rôle majeur dans le cycle hydrologique comme la température, l'évapotranspiration et le couvert neigeux (Lafaysse et al., 2014).

La variabilité imputable aux modèles hydrologiques et au choix du scénario de GES n'est pas étudiée. Cela ne signifie pas pour autant qu'elle n'est pas présente, d'autres travaux ont montré la variabilité imputable aux choix du modèle hydrologique sur les résultats des projections, ceci étant encore plus marqué pour les débits extrêmes (Karlsson et al., 2016).

Giuntoli et al. (2015) soulignent également qu'il existe une incertitude provenant du choix du modèle hydrologique. Cette dernière étant plus significative pour les périodes de basses eaux que de hautes eaux, dans ce cas elle pourrait être supérieure à l'incertitude liée au choix du modèle climatique (Prudhomme et al., 2014). Les modèles climatiques apportent plus d'incertitudes pour les phénomènes de crue du fait de l'importante contribution des précipitations à ce phénomène. L'étude souligne également le besoin de prendre en compte de façon fine les processus contrôlant le ruissellement et la fonte des neiges dans les modèles hydrologiques pour mieux représenter les situations extrêmes (Giuntoli et al., 2015). Les étiages, et de façon plus générale les sécheresses hydrologiques, dépendent beaucoup des conditions d'humidité des sols et des végétaux en place. Les projections à l'échelle mondiale issues de modèles intégrant ces processus tendent à montrer des augmentations moins prononcées des situations de sécheresse hydrologique (Prudhomme et al., 2014).

Ces résultats traduisent le fait que les incertitudes des projections concernant les précipitations et les débits présentent une plus grande variabilité que les températures car elles sont principalement le résultat de la variabilité naturelle du climat. L'étude des sources d'incertitudes sur les projections hydrologiques du bassin versant de la Durance montre qu'environ 70 % des incertitudes proviennent de la variabilité interne du climat (Sauquet et al., 2014). La majorité des études d'impacts récentes réalisées sur le territoire national présentent la variabilité interne du climat comme source principale d'incertitude (Dayon, 2015 ; Vidal et al., 2016). Cela donne plus de poids aux tendances qui se dégagent, malgré cette variabilité naturelle, comme la diminution des débits d'étiages.

2.2 LES EAUX SOUTERRAINES IMPACTÉES, NOTAMMENT PAR UNE DIMINUTION DE LA RECHARGE PAR LES PRÉCIPITATIONS.

Le dernier rapport du GIEC souligne l'insuffisance des travaux de recherche concernant l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines. De plus les résultats existants sont très dépendants des spécificités locales. Généralement, le manque de données d'observations empêche d'établir des relations de cause à effet entre le changement climatique et les eaux souterraines, les chroniques des piézomètres étant soit trop courtes, soit trop influencées par les prélèvements et/ou les changements d'occupation des sols (Vernoux, 2015).

Peu de tendances observées par le passé

En 2015, le BRGM, sur commande de l'ONEMA a établi un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines.

Les premières phases de l'étude ont cherché à identifier des corrélations entre d'éventuelles tendances à la hausse ou à la baisse des niveaux piézométriques et des variables climatiques (précipitation et température). Les piézomètres analysés disposaient d'une chronique de données de minimum 25 années. **Sur le bassin Rhône Méditerranée, 12 piézomètres présentent une tendance significative.** Sur les 11 présentant une tendance à la baisse, 6 sont influencés par des prélèvements. Un seul présente une tendance à la hausse mais est fortement influencé par des prélèvements.

Ces tendances n'ont pu être corrélées aux variables climatiques, la pluviométrie montrant parfois des tendances opposées (Figure 42) et la température augmentant partout (Vernoux et al., 2012).

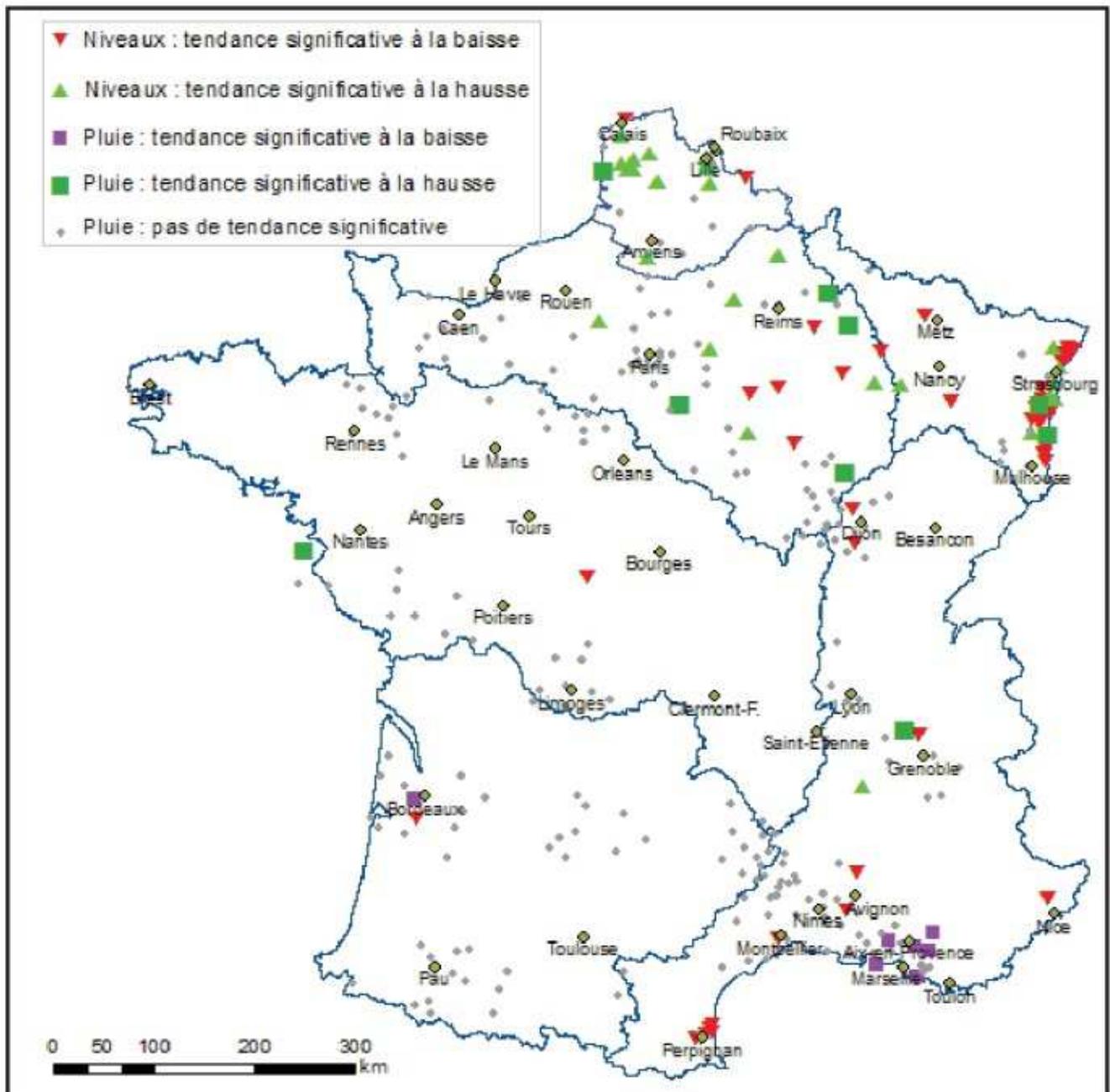


Figure 42 : Séries piézométriques en baisse (triangles rouges) ou hausse significative (triangles verts) et séries de précipitations en baisse (carrés violets) ou hausse (carrés vert) (Vernoux et al., 2012).

Il n'est donc pas possible de dégager un signal direct de l'impact du changement climatique passé sur la diminution ou l'augmentation des niveaux piézométriques des eaux souterraines (Vernoux et al., 2012).

Les tendances observées sur les piézomètres n'ayant pu être corrélées à des variables climatiques, le choix des aquifères pour le suivi de l'impact du changement climatique s'est basé sur des critères hydrogéologiques, d'usages et de sensibilité. Ainsi 39 aquifères ont été sélectionnés en France dont 9 sur les bassins Rhône-Méditerranée et 2 sur le bassin de Corse (Figure 43). Chaque aquifère est ensuite associé à un piézomètre représentatif et disposant d'une longue chronique de données. La pérennité de ce réseau est nécessaire pour acquérir de la donnée afin de caler les modèles et déterminer d'éventuels liens de causalité. Sur ce même réseau, l'ONEMA travaille également à la mise en place d'un dispositif de suivi de la température et un indicateur de suivi de la situation hydrogéologique (Vernoux et al., 2012).

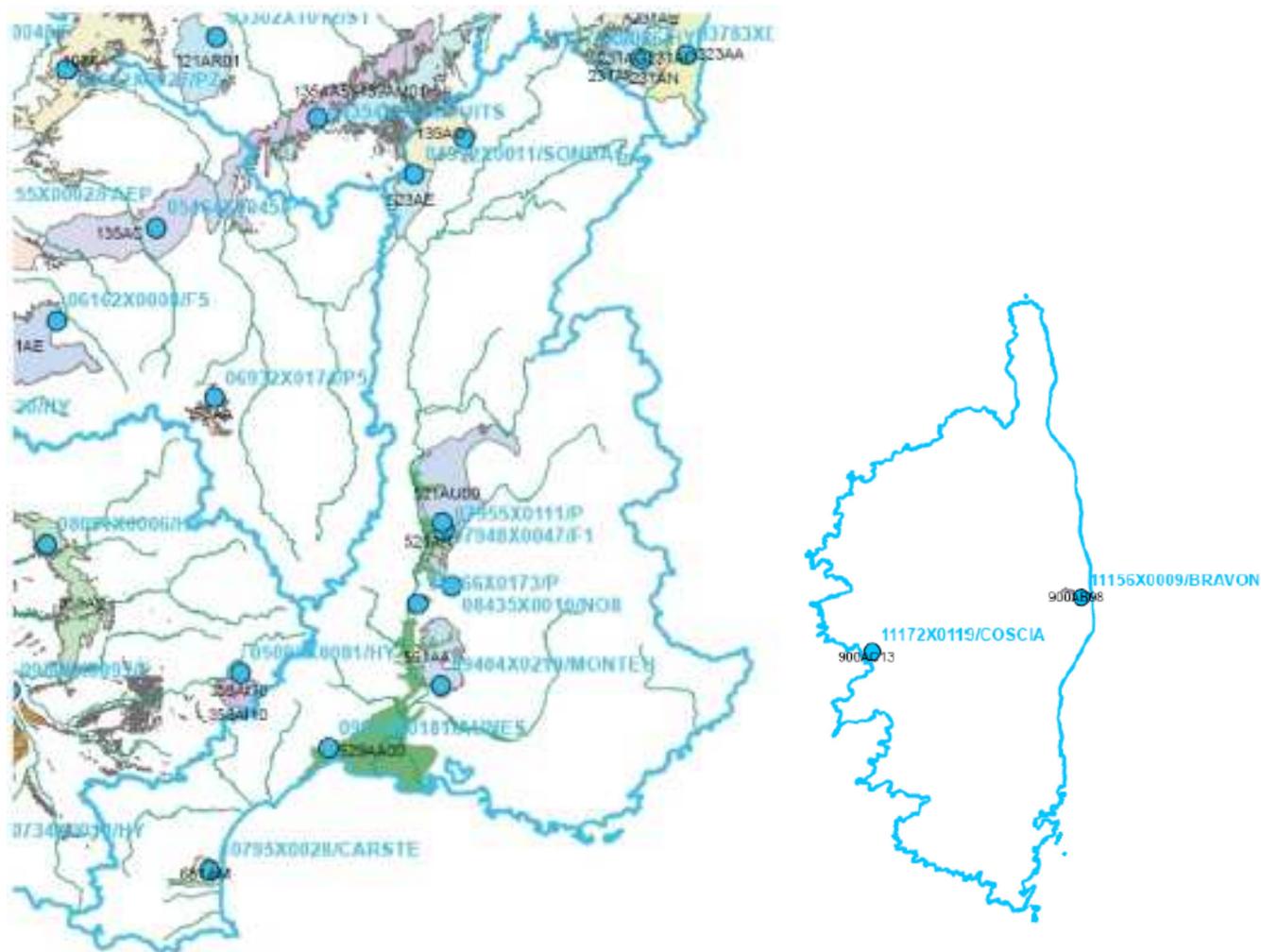


Figure 43 : Aquifères retenus (entité BD LISA) et ouvrages associés (Code BSS) pour le réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines sur les bassins de Rhône-Méditerranée à gauche et de Corse à droite (adapté de Vernoux, 2015).

Les premières études d'impacts montrent une tendance à la diminution de la recharge

Le changement climatique aura un impact direct sur les eaux souterraines par une évolution de la recharge qui est la résultante, notamment, d'un changement de la pluviométrie et de l'évapotranspiration. Cela entraînera, de manière indirecte, des modifications à différentes échelles spatiales et temporelles sur les mécanismes des eaux souterraines que sont la décharge, le stockage et la qualité. Cela impactera les systèmes de surfaces connectés aux systèmes souterrains. En comparaison avec les systèmes de surface, les eaux souterraines tendent à réagir plus lentement (Les Landes et al., 2014).

Plusieurs travaux, à différentes échelles spatiales (du national à l'aquifère) ont projeté l'impact du changement climatique sur la recharge des eaux souterraines. Confortée par la diversité des approches, la tendance qui se dégage est une diminution de la recharge causée principalement par l'augmentation de l'évapotranspiration.

Le projet Explore 2070 a effectué, à l'échelle de la France, une quantification de l'impact du changement climatique sur l'aspect quantitatif des eaux souterraines. La démarche était basée sur la modélisation hydrodynamique de grands aquifères français en utilisant la période 1961-1990 comme référence. Les données climatiques d'entrée, précipitations et ETo sont issues de sept modèles climatiques sur la période 2045-2065 forcés par le scénario d'émission de gaz à effet de serre A1B (Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, 2012(c)).

Aucune modélisation hydrogéologique n'a été réalisée sur les bassins Rhône-Méditerranée et de Corse. Les résultats obtenus sur le bassin l'ont été en utilisant les données issues des modélisations hydrologiques (lame ruisselée) du même projet ainsi que l'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR). Cet indice permet de déterminer le partage entre infiltration et ruissellement de la pluie efficace. L'utilisation de plusieurs modèles climatiques permet de représenter l'incertitude associée. La Figure 44 représente la tendance moyenne, minimale et

maximale de la recharge. Les résultats s'appuient sur des hypothèses d'évolution des usages (diminution des prélèvements : légère pour le milieu agricole et de -50 % pour l'industrie) ; de transférabilité des modèles dans le futur (fonctionnement hydrologique identique dans le futur, capacité des modèles à représenter des situations non rencontrées en phase de calibration, biais constant dans le temps...) (Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, 2012(c)).

Il en ressort que **le bassin RMC s'oriente vers une diminution quasi généralisée de la recharge en eau souterraine. La tendance est autour d'une diminution moyenne de la recharge de -10 à -30 %**. Elle est la plus marquée dans l'Aude et les Pyrénées-Orientales où elle pourrait atteindre près de - 50 % (Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, 2012(c)).

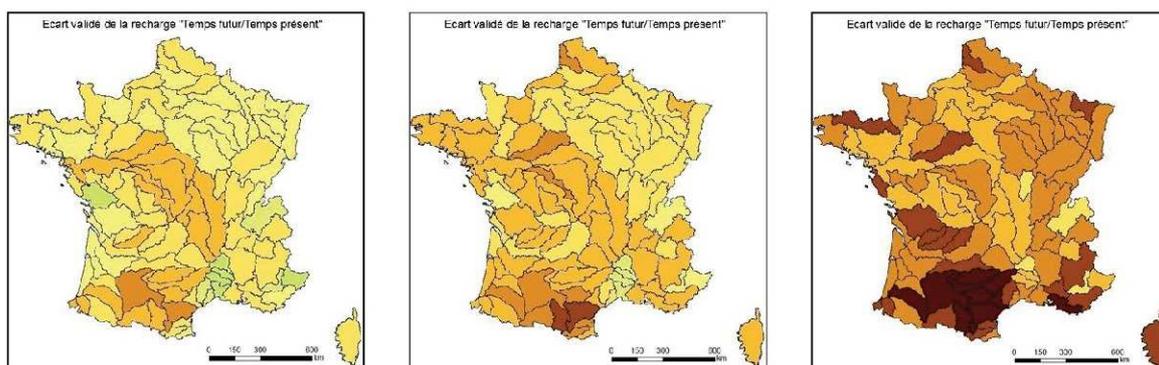


Figure 44 : de gauche à droite : variation moyenne de la recharge (en %) minimale, moyenne et maximale à l'horizon 2045-2065 par rapport à la période de référence 1961-1990 (Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, 2012(c)).

L'étude de l'évolution de la recharge sur les bassins Rhône-Méditerranée et de Corse en contexte de changement climatique réalisé par le BRGM en 2016 montre des résultats globalement similaires. Les projections climatiques utilisées en entrée sont proches d'Explore 2070 (5 modèles climatiques utilisés dont plusieurs commun forcés sous le même scénario, A1B). La caractérisation de la recharge a été réalisée d'une façon différente.

La pluie efficace a été obtenue à partir du modèle de Thornthwaite (réalisation d'un bilan hydrologique). Il ressort que la pluie efficace annuelle diminuerait en moyenne de -15 % sur le bassin, avec une variation allant de -65 à +13% localement. C'est en Languedoc Roussillon et en Corse que la diminution serait la plus marquée (Figure 45).

La recharge a également été déterminée à partir de l'IDPR mais modifiée par rapport à Explore 2070. L'évolution de la recharge de chaque entité hydrogéologique (BDLISA) suit la même tendance que celle de la pluie efficace avec **une diminution moyenne comprise entre -5 et -25% en Rhône Alpes, Franche Comte et au sud de PACA. Les diminutions les plus importantes, supérieures à -25% et atteignant 50% localement, sont localisées en Languedoc Roussillon et en Corse.** Le nord du bassin et la zone allant des Cévennes aux Alpes maritimes ne montrent pas de tendance, contrairement aux résultats d'Explore 2070. A noter que les périodes de référence, l'horizon des projections et la résolution spatiale sont différentes entre ces deux études pouvant expliquer une part des différences.

Il est important de rappeler que cette approche détermine uniquement une tendance d'évolution de la recharge provenant des précipitations. Cela met en avant la vulnérabilité des aquifères dont la recharge se fait principalement par les précipitations (cas des aquifères karstiques ou des formations de socles). Les aquifères alluviaux et sédimentaires sont souvent également rechargés par alimentation latérale et drainance, les rendant moins vulnérables à la diminution de la recharge par les précipitations. Cependant ces apports pourraient également diminuer. De plus ces systèmes sont souvent déjà très exploités et une diminution, même minime de la recharge pourrait impacter les milieux superficiels associés et la gestion quantitative des prélèvements (Caballero et al., 2016).

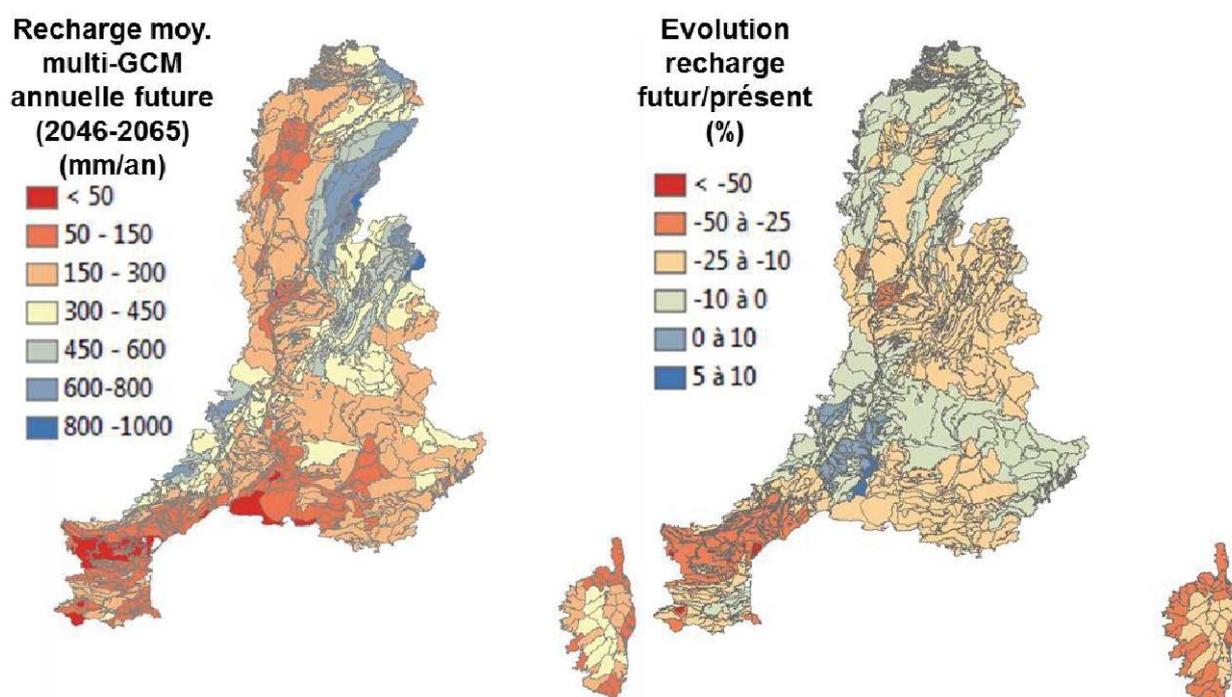


Figure 45 : Gauche : carte de la recharge annuelle moyenne multimodèle calculée sur la grille de 8*8 km sur le bassin RM&C, déduite à partir de 6 scénarios climatiques régionalisés (SCRATCH 2010), pour la période future. Droite : carte de l'évolution de la recharge moyenne multi-modèles annuelle future en proportion de la recharge moyenne annuelle pour la période présente (Caballero et al., 2016).

Les résultats de l'étude de la recharge sur le bassin Rhône-Méditerranée projettent une diminution de la recharge de l'aquifère de Thau d'environ -25 à -50 % (diminution moins forte pour Explore 2070). Hermann et al. (2016) ont modélisé la recharge à partir d'une descente d'échelle dynamique (modèles climatiques régionaux forcés par des modèles globaux) de cet aquifère. Les projections de 4 combinaisons de modèles forcés sous le même scénario A1B ont été utilisées en entrée d'un modèle hydrogéologique à base physique développé pour caractériser la recharge en temps présent et futur (mGROWA). Contrairement aux études précédentes, les auteurs ne concluent pas à une diminution significative de la ressource. Elle pourrait légèrement diminuer mais l'incertitude provenant de la variabilité des projections climatiques est trop importante pour conclure. Les auteurs soulignent que la pression majoritaire sur l'eau souterraine est d'origine anthropique (Herrmann et al., 2016).

A partir du même modèle et de la même démarche, Ehlers et al. (2016) montrent une diminution significative de la recharge d'un aquifère granitique en Sardaigne. Elle baisserait de -17 et -43% à l'horizon 2070-2100 suivant les scénarios. Ces résultats renforcent les projections obtenus pour la Corse par l'étude du BRGM. La convergence des projections climatiques ont permis de tester la sensibilité des projections à l'évapotranspiration en faisant varier le paramètre contrôlant la transpiration des végétaux (le coefficient de culture noté K_c) et à l'estimation de la réserve utile des sols. Il ressort que la recharge en zone naturelle (maquis) est peu influencée par les variations de K_c contrairement aux milieux cultivés. Le scénario de diminution de la transpiration des cultures entraîne une augmentation de la recharge de 1 à 9% dans le maquis contre 23 à 33 % en milieu cultivé par rapport à la situation de référence. La valeur de la réserve utile a un impact beaucoup plus significatif sur l'estimation de la recharge puisqu'une augmentation de 35 % de la RU en zone de maquis entraîne une diminution de la recharge comprise entre -67 et -82 % contre -17 à -43 % dans la situation de référence (Ehlers et al., 2016).

D'autres travaux se sont intéressés à l'impact de l'agriculture sur la recharge, notamment celui du choix des rotations des cultures et du recours ou non à l'irrigation. Ainsi Dakhllalla et al. (2016) ont montré que l'aquifère alluvial du Mississippi pouvait voir sa recharge varier de -10 à +60 % en fonction des rotations des cultures (Dakhllalla et al., 2016). Les résultats des projets Climator et AFClm ont également permis de montrer à l'échelle nationale que les choix d'adaptation du milieu agricole aux changements globaux impacteront de façon plus ou moins significative les processus hydrologiques dont la recharge.

Les travaux du projet CLIMATOR (pour la description voir partie 1.3) ont projeté les tendances d'évolution de la recharge, elle a été estimée par modélisation en fonction de la forêt ou de la culture considérée (blé, tournesol, maïs,

vigne, fétuque, conifères et feuillus) en réalisant une moyenne des sites d'études ayant des sols à réserves utiles variables. En climat présent, pour une pluviométrie annuelle de 700 mm, la recharge varie environ de 100 mm sous du maïs irrigué conduit à 80% de l'ETM à près de 300 mm sous une forêt de feuillus. En période future, l'évolution de la recharge est variable en fonction des cultures considérées mais également pour une même culture, soulignant la variabilité induite par le type de sol et les évolutions climatiques régionales. De façon générale on observera une diminution de la recharge, dont la baisse serait proportionnelle à la diminution des précipitations. La diminution de la recharge équivaldrait à environ 50% de la diminution des précipitations. C'est un ordre de grandeur variable en fonction des cultures et des sols considérés (Brisson et al., 2010).

Les terres agricoles couvrent environ 30 % du territoire du bassin, il est donc nécessaire d'avoir une approche conjointe avec la profession agricole pour que sa démarche propre d'adaptation au changement climatique participe à la préservation de la ressource en eau.

L'évolution de la recharge des aquifères karstiques, dont la recharge est majoritairement effectuée par les précipitations, sont néanmoins difficilement estimables en temps futur du fait des limites de la connaissance du fonctionnement de ces systèmes et de la recharge potentiellement rapide sous l'effet d'évènements pluvieux intenses peu pris en compte dans les projections disponibles. Dans sa thèse, Tissier (2013) a projeté l'évolution des débits à l'exutoire de trois petits aquifères karstiques de montagne. En estimant que le débit est la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration. Sous l'effet combiné d'une diminution des précipitations moyennes et d'une augmentation de l'évapotranspiration moyenne (déterminée par la formule de Turc, dépendant principalement de la température) les débits diminueraient de -18 et -46 % à l'horizon 2030 et 2080 respectivement (Tissier, 2012).

Une étude d'impact, par une approche multi-modèles et multi-scénario, montre une diminution du niveau piézométrique de deux aquifères dans le nord de la France (Seine et Somme). 90 % des piézomètres montrent une tendance à la baisse, l'ordre de grandeur serait d'une diminution du niveau piézométrique d'environ de -2.5 m à l'horizon 2050 (Habets et al., 2013).

A l'échelle nationale, le projet Aquif-Fr initié en 2014 pour une durée totale de 4 ans vise à prévoir l'évolution des eaux souterraines à différentes échelles de temps (analyse historique, suivi en temps réel, projection à court terme, saisonnière et projections climatiques) en regroupant sur une plateforme numérique les modèles hydrogéologiques régionaux existants et en développant de nouveaux pour les zones non couvertes (Habets et al., 2015).

Incertitudes et possibilités d'amélioration

Les incertitudes sont grandes sur l'évolution de la recharge des eaux souterraines, elles sont principalement imputables aux incertitudes sur les projections climatiques et sur la réponse des processus contrôlant la recharge à ces changements.

Les résultats de l'estimation de la recharge sur les bassins de Rhône-Méditerranée et de Corse doivent être utilisés avec précaution du fait d'une combinaison d'incertitudes induites par la méthodologie qui n'ont pas été quantifiées. Cela provient notamment de :

- la considération que le ratio de la pluie efficace qui recharge les nappes est constant au cours du temps alors qu'il est fonction de l'humidité du sol ;
- la résolution spatiale de la donnée sur la réserve utile des sols (10 km) qui n'est pas assez fine pour représenter la recharge des petits aquifères ;
- l'utilisation d'une seule méthode de caractérisation de la recharge.

La première phase de cette même étude a montré l'importance d'utiliser plusieurs méthodes de caractérisation de la recharge car l'incertitude associée à la méthode est significative. Les travaux de Moeck et al. (2016) vont dans le même sens et précisent qu'il est important d'avoir des situations extrêmes dans la phase de calibration car ces situations expliquent une part importante de la variabilité des résultats entre les modèles. Ceci plus particulièrement pour les aquifères à recharge rapide comme les karsts.

A ce jour, malgré les fortes incertitudes qui entourent les projections, toutes les tendances montrent soit une stabilisation, soit une diminution de la recharge. Ces tendances doivent être intégrées aux contextes globaux des aquifères pour en mesurer l'impact possible sur les usages et les milieux naturels associés.

Les eaux souterraines sont sensibles aux changements globaux

L'assèchement des sols et la diminution de la disponibilité des eaux de surface tendront à augmenter les prélèvements sur les eaux souterraines. Cela entraîne un risque de surexploitation pouvant aggraver la diminution des débits des rivières car les eaux souterraines contribuent au débit de la majorité d'entre elles, notamment à l'étiage. Ce constat justifie la mise en œuvre de mesures favorisant l'infiltration de l'eau et donc la recharge (Taylor et al., 2013).

La modification de l'origine des prélèvements et de la part restituée au milieu modifiera la saisonnalité des cycles hydrologiques et hydrogéologiques des aquifères libres et captifs. Des travaux ont montré qu'il est indispensable de prendre en compte les échanges entre les eaux souterraines et de surface pour identifier l'impact de l'usage et des lieux de prélèvement sur les débits d'étiage et les niveaux piézométriques (De Graaf et al., 2014).

Des travaux réalisés au centre de l'Espagne projettent l'effet combiné du changement climatique et des prélèvements sur les processus d'un aquifère : humidité des sols, évapotranspiration, ruissellement, recharge, échanges avec la rivière, alimentation des zones humides, débit des rivières et stockage. Les résultats sont obtenus à partir du scénario RCP 8.5 et projetés à l'horizon 2075. Les impacts des prélèvements sur les différents processus hydrologiques dans le futur resteraient similaires à ceux observés aujourd'hui. Le changement climatique entraînerait une diminution de l'humidité des sols et de l'évapotranspiration de 20% et une diminution de 50 % de la recharge. L'effet cumulé serait une diminution d'environ 60 % du ruissellement et des échanges avec les cours d'eau et les zones humides. Les projections indiquent une inversion des échanges. Contrairement au présent, les flux iraient de la rivière vers la nappe. Cette inversion serait principalement imputable au changement climatique (Sapriza-Azuri et al., 2015).

Le changement climatique devrait donc entraîner une diminution de la recharge. Dans la majorité des cas, les activités anthropiques jouent un rôle majeur dans la régulation des flux, nécessitant de traiter la question en termes de changements globaux. On peut citer en exemple la plaine de la Crau dont la recharge est, dès aujourd'hui, assurée par l'irrigation gravitaire de l'activité agricole et assure la disponibilité de la ressource pour les autres usages (Bailleux et al., 2015). On peut également souligner le rôle de l'évolution du couvert forestier qui influence fortement le cycle de l'eau à l'échelle du territoire en modifiant le partage infiltration/ruissellement ainsi que le taux de recharge, le flux de sédiments, la qualité de l'eau... (Faillat et al., 2015).

Les aquifères littoraux principalement sensibles aux prélèvements anthropiques et à la diminution de la recharge

La majorité des travaux étudiant le lien entre les eaux souterraines et le changement climatique abordent la question par l'aspect quantitatif. L'aspect qualitatif est un enjeu identifié principalement pour les aquifères de bord de mer qui présentent un risque de salinisation. Il est à noter que l'aspect qualitatif concerne également les aquifères continentaux. Les fluctuations de températures se répercutent sur les eaux souterraines jusqu'à 10-15 m de profondeur. La température de l'eau conditionne la teneur en oxygène dissous ainsi que de nombreuses réactions biogéochimiques impactant la qualité de l'eau et le transfert de solutés (Kløve et al., 2014).

Les chroniques de données de suivi de l'interface eau douce - eau salée des aquifères littoraux sont trop récentes (depuis 2000) et insuffisantes pour dégager une tendance passée. La mise en place d'un réseau de suivi du positionnement du biseau est nécessaire également pour la confrontation des modèles qui représentent aujourd'hui des aquifères théoriques (Werner et al., 2013).

L'impact du changement climatique, via l'augmentation du niveau des mers, sur l'évolution du biseau salé est difficile à déterminer du fait de la complexité des processus mis en jeu et des spécificités locales. Il reste donc des défis à relever au niveau de notre compréhension des mécanismes.

Ketabchi et al. (2016) se basent sur une synthèse des études traitant de l'impact de l'élévation du niveau des mers sur la position du biseau salé et une modélisation numérique pour proposer une hiérarchisation de l'impact de l'augmentation du niveau de la mer combiné avec les variations de la recharge, des inondations (induites par l'élévation du niveau de la mer), de la pente de surface et du socle et les conditions d'écoulement aux limites sur le phénomène d'intrusion saline. Il ressort notamment que :

- les phénomènes de submersion jouent un rôle majeur sur la position du biseau salé, particulièrement pour les côtes à faible relief ;
- Les paramètres contrôlant majoritairement la position du biseau salé sont le débit de l'aquifère et le taux de recharge d'eau douce pour une situation à flux constant et à charge constante respectivement ;
- La couche d'eau salée induite par les inondations présente au-dessus de la nappe d'eau douce (« fingering phenomena ») tend à redescendre verticalement entraînant un avancement significatif du biseau salé dans les terres (Ketabchi et al., 2016).

Plusieurs auteurs montrent que l'impact du changement climatique sur les aquifères côtiers sera principalement dû à la diminution de la recharge (via l'augmentation de l'évapotranspiration) et aux modifications des prélèvements anthropiques pour satisfaire les usages. L'élévation du niveau de la mer viendrait amplifier les modifications mais son impact serait secondaire (Stigter et al., 2014; Werner et al., 2013).

La modélisation des processus hydrodynamiques et hydrosalins d'un aquifère superficiel situé en moyenne Camargue va dans le même sens. Les résultats soulignent l'importance du système d'irrigation pour limiter l'intrusion saline dans les nappes superficielles. L'augmentation de l'évapotranspiration projetée amplifierait le caractère endoréique de certaines zones favorisant la salinisation. Dans le cas d'un arrêt de l'irrigation, la zone se retrouvera dans une situation similaire à la basse Camargue actuelle. Les résultats montrent également une évolution de type seuil des équilibres hydrosalins. L'évolution sédimentaire n'a pas été intégrée dans la modélisation mais l'auteur souligne qu'il a un rôle significatif dans les flux d'eau et donc de salinité (Torres-Rondon, 2013).

De façon plus générale, les effets du changement climatique sur les aquifères côtiers induits par l'augmentation du niveau de la mer et une modification de la recharge sont énumérés ci-dessous (extrait du rapport spécial de l'ONERC sur le littoral volume 4).

- « modification des intrusions salines et migration dans des proportions variables de l'interface eau douce – eau salée ;
- inondation des zones basses par de l'eau de mer et infiltration de l'eau de mer vers les aquifères libres ;
- remontée de front salé via les estuaires et infiltration vers les aquifères libres ; phénomène qui pourrait être accentué par la baisse des débits des cours d'eau du fait du changement climatique et/ou l'augmentation des prélèvements ;
- contamination des eaux souterraines par le bore, en plus des chlorures des eaux marines au niveau des plaines d'inondation
- modification de la recharge des aquifères due à une variabilité spatio-temporelle des précipitations et de l'évapotranspiration ainsi que du volume d'eau douce et de la répartition d'eau douce dans les aquifères ;
- modification des zones de décharge des aquifères pouvant impacter les écosystèmes des zones humides ;
- augmentation du niveau piézométrique associée à l'élévation du niveau marin et à la modification du régime des précipitations pouvant occasionner des impacts sur des infrastructures du sous-sol (système d'assainissement, réservoirs enterrés, etc.). »

Un travail spécifique réalisé par le BRGM a visé à caractériser la vulnérabilité des aquifères côtiers à l'intrusion saline induite par l'élévation du niveau marin en réalisant une cartographie à index. Cette démarche vise à superposer des cartes de paramètres de natures différentes : hydrogéologiques, topographique, prélèvements anthropiques (agriculture, industrie, eau potable). La côte orientale de la Corse ressort comme une zone fortement vulnérable ainsi que la côte Languedocienne s'expliquant principalement par la forte demande pour l'alimentation en eau potable (Figure 468) (Dörfliger et al., 2011).

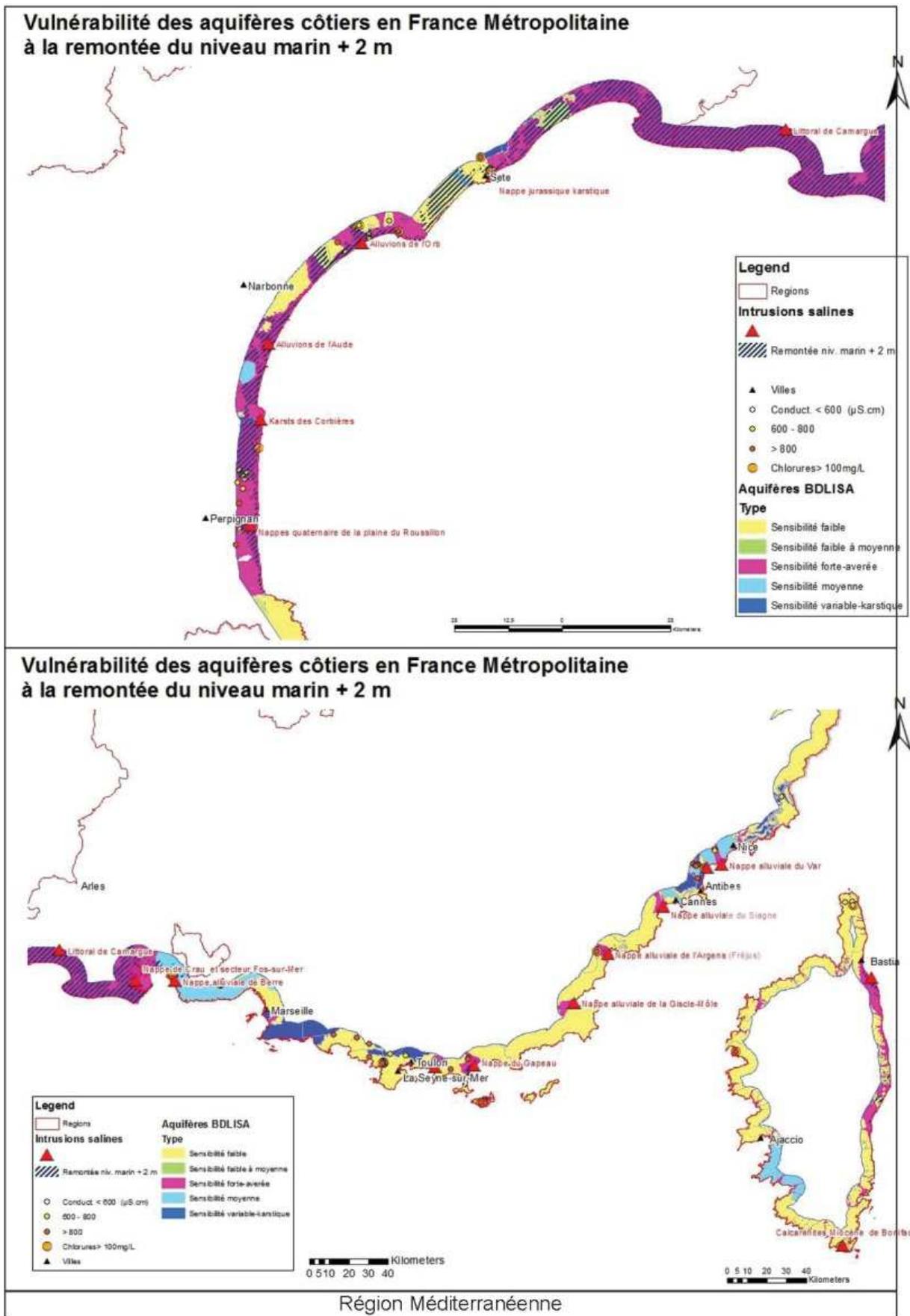


Figure 468 : Vulnérabilité des aquifères côtiers méditerranéens pour une remontée du niveau marin de +2m (Dörfliger et al., 2011).

INCIDENCES CLES - RESSOURCE

- Les projections disponibles sont cohérentes concernant les débits annuels moyens et les débits d'étiage (QMNA5). Ils devraient diminuer respectivement de -10 à -40 % et de -10 à -60 % à l'horizon 2070. Ces diminutions seraient plus marquées dans le sud du bassin que le nord.
- Concernant les débits journaliers maximums annuels de période de retour 10 ans (QJAX10), les projections sont incertaines et parfois contradictoires. Ils pourraient augmenter, rester stables ou diminuer de -20 à +20 % à l'horizon 2050.
- Le Rhône verrait son module diminuer de -10 à -40 % à l'horizon 2070 et son QMNA5 de -10 à -50 %. Les projections contradictoires concernant le QJAX10 empêchent de se prononcer. Les incertitudes sont fortes autour des projections d'évolutions des crues centennales, leur fréquence d'apparition pourrait augmenter, jusqu'à doubler pour la fin du siècle.
- Les nouvelles projections confirment une raréfaction de la ressource en eau, principalement en été via une diminution des débits d'étiage. Le Rhône sera également impacté, soulignant que sa ressource n'est pas inépuisable et sera de plus en plus dépendante en été des apports de la Suisse.
- Les cours d'eau Alpains, de façon similaire à ce qui est observé par le passé, verraient un glissement plus ou moins marqué de leur régime en direction d'un fonctionnement de type pluvial ainsi qu'une avancée du pic de crue printanier ;
- La température des cours d'eau augmentera. Cela sera plus significatif à l'aval des rivières et des fleuves. Les apports par les eaux souterraines, la présence de ripisylves et de zones hyporhéiques sont des éléments qui permettent de limiter le réchauffement.
- La recharge des eaux souterraines par les précipitations devrait diminuer. L'ouest de la région Occitanie serait la plus affectée avec des diminutions pouvant être supérieures à 50% localement à l'horizon 2050. Cela favorisera la diminution des niveaux piézométriques mais ne permet de conclure car d'autres processus non quantifiés influenceront sa position (drainance, alimentation latérale et prélèvements). Il est notamment possible de favoriser la recharge par le choix des végétaux cultivés. L'adaptation globale de l'agriculture aux effets du changement climatique doit intégrer son impact sur la recharge.
- Plus que l'élévation du niveau de la mer, c'est la diminution de la recharge et les prélèvements anthropiques qui devraient impacter le plus la position des biseaux salés.
- La capacité de dilution par les cours d'eau des rejets des stations d'épuration diminuera, notamment en été. Sous un scénario d'intensification des précipitations, les rejets directs dans le milieu, sans traitement par les stations d'épuration devraient augmenter, surtout pour les réseaux unitaires.
- Les phénomènes d'eutrophisation seront favorisés par les effets du changement climatique, mais les activités anthropiques resteront les principaux facteurs de contrôle.

Connaissances :

- Améliorer la connaissance sur la variabilité multi décennale des cours d'eau et la prendre en compte dans les études d'impact.
- Développer une modélisation couplée surface-souterrain pour tester notamment les impacts des modes de prélèvements.
- Acquérir plus de données relatives à la position des biseaux salés.
- Acquérir des scénarios d'évolution des usages à l'échelle du bassin versant RMC à partir d'une approche multi-disciplinaire.

3 LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES ECOSYSTEMES AQUATIQUES ET HUMIDES

Les écosystèmes aquatiques sont considérés comme étant les plus menacés sur la planète. Les rivières, lacs et zones humides sont depuis longtemps fortement impactés par les activités anthropiques. On peut citer parmi ces pressions les ouvrages en travers des rivières, l'urbanisation des lits majeurs, l'assèchement des zones humides, les pollutions domestiques, industrielles et agricoles... Ces différentes pressions ont des impacts significatifs sur le bon état des milieux et réduisent les services écosystémiques associés. D'après le V^{ème} rapport du GIEC, il est très probable (90-100%) que les activités anthropiques restent le principal facteur de pression sur les écosystèmes aquatiques d'eau douce dans l'avenir. Dans un contexte de diminution généralisée des eaux de surfaces dans le futur, ces pressions risquent de s'amplifier. Le changement climatique aura des impacts cumulatifs via la modification des régimes thermiques, pluviométriques et hydrologiques et par l'élévation du niveau de la mer (IPCC, 2014).

3.1 IMPACTS SUR LES POISSONS

Il est difficile de distinguer les effets du changement climatique des pressions anthropiques dans le milieu naturel. Malgré cela, des études montrent que la physiologie, la phénologie et la répartition des espèces de poissons seront impactés directement ou indirectement par le changement climatique par l'augmentation des températures et des conditions hydro-morphologiques principalement.

Effets sur la physiologie

L'ensemble des fonctions vitales sont dépendantes de la température de l'eau. A chaque stade de développement (reproduction et stades embryonnaire, larvaire, juvénile et adulte) est associée une plage de tolérance thermique propre à chaque espèce (Baptist et al., 2014). Souchon et Tissot (2012) ont réalisé une synthèse de la tolérance thermique de 19 espèces de poissons communs en Europe de l'Ouest à partir de 300 références. La Figure 49 présente la gamme optimale et de résistance des juvéniles et adultes à la température ainsi que la gamme optimale pour la reproduction. La limite maximale de résistance est obtenue suite à une phase d'acclimatation de 20 jours.

Une tendance à la diminution de la taille des individus adultes sous l'effet de l'augmentation de la température est observée en milieux contrôlés ainsi qu'en milieu naturel (eau douce et salée). Ceci serait dû à l'augmentation du processus de maturation (stade où la croissance ralentit). La durée de vie tend à diminuer. Ces processus entraînent une diminution de la taille moyenne des individus (Daufresne et al. 2009).

Effets sur la phénologie

La faible disponibilité de chroniques de données limite l'étude de l'évolution de la phénologie. Cependant il a été observé des avancées de la période de ponte de certaines espèces (ombre commun et doré jaune). A noter qu'une évolution de la phénologie peut entraîner une restructuration du réseau trophique et donc une modification des relations proies-prédateurs. Les études sur la phénologie concernent principalement les espèces à fort intérêt commercial comme le saumon atlantique pour lequel a été observée, dans le nord de la France, une diminution de la durée de son cycle biologique entraînant un taux de renouvellement plus rapide (le lien avec le changement climatique n'est pas établi par les auteurs). L'influence du changement climatique sur la phénologie reste à déterminer pour la grande majorité des espèces d'eau douce (Baptist et al., 2014; Chevalier, 2014)

Effets sur la dynamique des populations

La dynamique des populations, autrement dit les fluctuations spatio-temporelles des effectifs des populations est le résultat de l'évolution de la natalité, de la mortalité, de l'émigration et de l'immigration des individus. Les mécanismes à l'origine de changements peuvent être de nature intrinsèque (interactions entre les individus) ou extrinsèque (conditions environnementales). L'identification de la part des changements imputables aux variables climatiques est un enjeu majeur pour estimer la vulnérabilité et le risque d'extinction des espèces. Mathieu Chevalier a montré dans sa thèse que des facteurs environnementaux, comme la température, ont de fortes influences sur les dynamiques des populations notamment via des effets sur le taux d'accroissement. Il a travaillé sur 28 espèces de poissons d'eau

douce disposant d'au moins 17 années de suivi par l'Onema. La température annuelle moyenne de l'eau a plus d'influence sur l'abondance que sa variabilité annuelle. Il note une forte variabilité entre les espèces et ainsi qu'au sein d'une même espèce. La Figure 470 illustre cela. Toutes les variables climatiques étudiées impactent tous les patrons d'abondances de la truite tandis que chez le vairon, l'abondance évolue principalement via une influence des variables climatiques sur le taux d'accroissement (Chevalier, 2014).

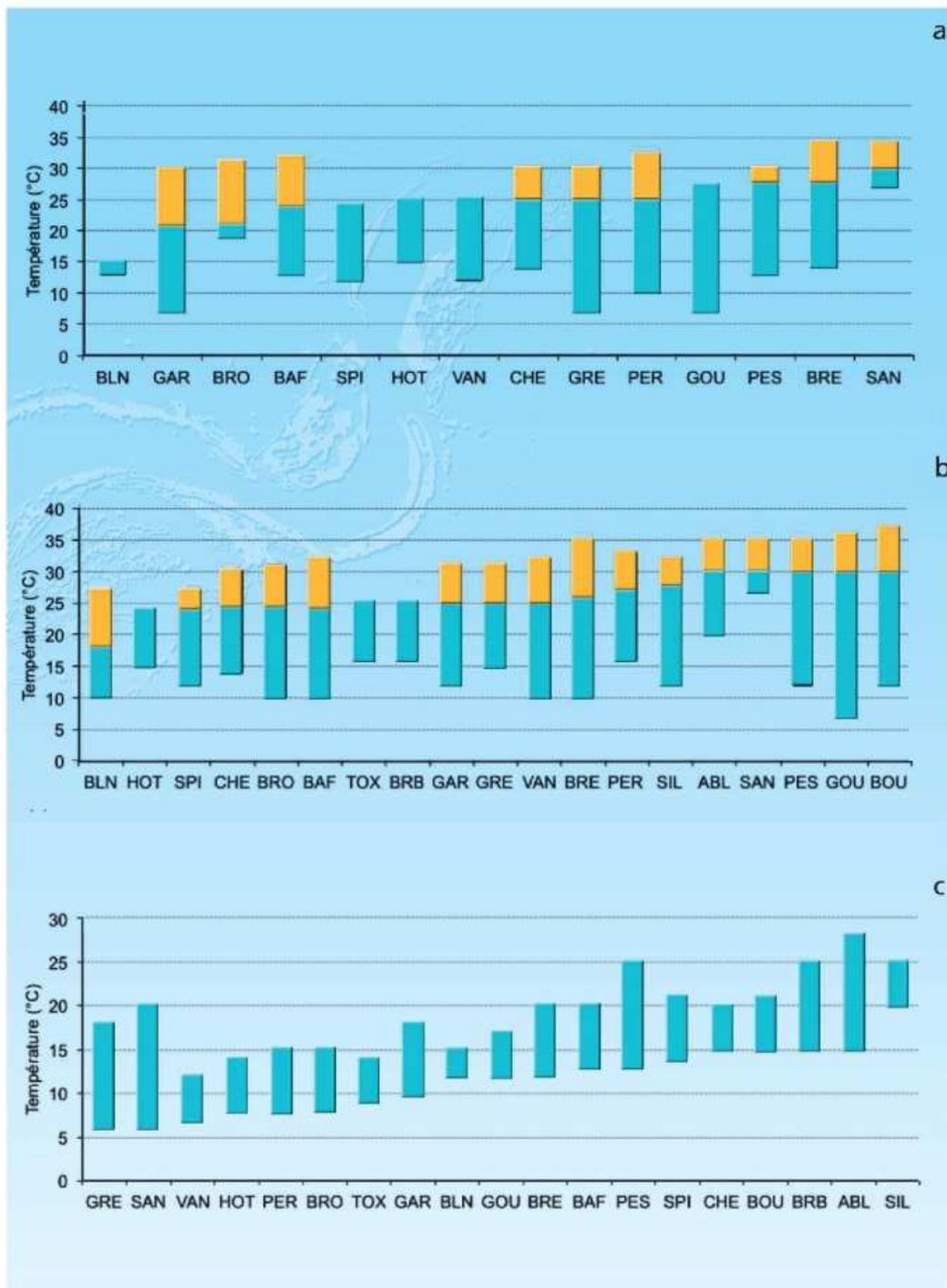


Figure 49 : Gamme optimale des températures (bleu) et zone de résistance (orange (a) des juvéniles et (b) des adultes, (c) gamme optimale des températures pour la reproduction. ABL (Ablette) BAF (Barbeau commun), BLN (Blageon), BOU (Bouvière), BRB (Brème Bordelière), BRE (Brème commune), BRO (Brochet), CHE (Chevesne), GAR (Gardon), GOU (Goujon), GRE (Grémille), HOT (Hotu), PER (Perche fluviatile), PES (Perche soleil), SAN (Sandre), SIL (Silure glane), SPI (Spirin), TOX (Toxostome), VAN (Vandoise) (Souchon and Tissot, 2012).

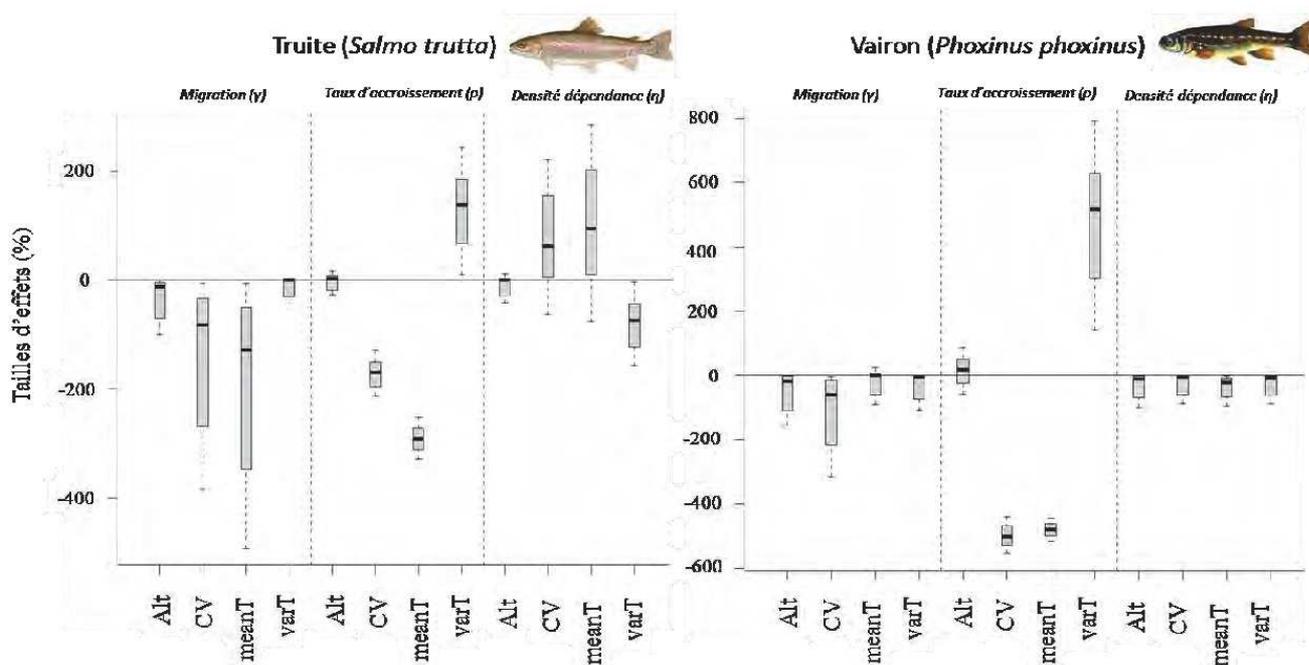


Figure 470 : Exemple d'influence des variables environnementales sur les patrons d'abondance de deux espèces de poisson (la truite et le Vairon) au travers des paramètres de dynamiques de populations. Alt (altitude), CV (stochasticité environnementale soit le coefficient de variation de la température de l'eau sur l'ensemble de la période observée) meanT varT (moyenne et variance annuelle de la température de l'eau) (Chevalier, 2014)

Pletterbauer et al. (2014) ont étudié l'évolution des structures de peuplement piscicole à l'échelle européenne face au changement climatique à partir d'un indicateur de la richesse spécifique le long du gradient amont aval : le Fish Zone Index (FIZI). Il est basé sur l'observation de l'abondance des individus de chaque espèce dans des environnements spécifiques. L'évolution des répartitions des populations est analysée sous trois scénarios de changement climatique (B1, A2 et A1b) aux horizons 2050 et 2080. Les résultats montrent un changement inévitable des peuplements de poissons. Trois mécanismes sont identifiés pour l'expliquer (i) un remplacement de certaines espèces (ii) un changement des aires de répartition et (iii) une disparition de certaines espèces. Ces évolutions sont plus ou moins marquées en fonction des régions et des horizons temporels. La zone méditerranéenne présente les plus forts changements de l'indice quel que soit le scénario considéré suivi par les zones continentales à l'horizon 2050 et alpines à l'horizon 2080. Les impacts sur la zone méditerranéenne s'expliquent par la forte augmentation des températures et des sécheresses hydrologiques (Pletterbauer et al., 2015).

Les bassins Rhône-Méditerranée et de Corse, appartenant à ces trois zones pourraient ainsi être le siège d'une modification des peuplements de leurs rivières sous l'effet seul du changement climatique. L'étude présente la température comme facteur dominant l'explication de la structure des peuplements le long du gradient amont aval à grande échelle.

Effets sur la distribution

Face à une modification des conditions environnementales, les individus ont la possibilité de rester au même endroit et de s'adapter aux nouvelles conditions ou de migrer pour trouver des conditions plus favorables.

Comte et Grenouillet (2013) ont analysé l'évolution de la présence de 32 espèces de poissons sur le réseau hydrographique français entre la période 1980/92 et 2003/09 à partir des données issues des campagnes de pêches des réseaux opérationnels. 16 espèces montrent des gains sur leur aire de répartition allant de +0.7 à +7.5 % (exemple : Loche franche + 7.5 %) ; 14 espèces voient leur aire de répartition diminuer de -0.3 à -9.6% (exemple : la truite commune -9.6 %, Figure 481). Deux espèces ne montrent pas d'évolution.

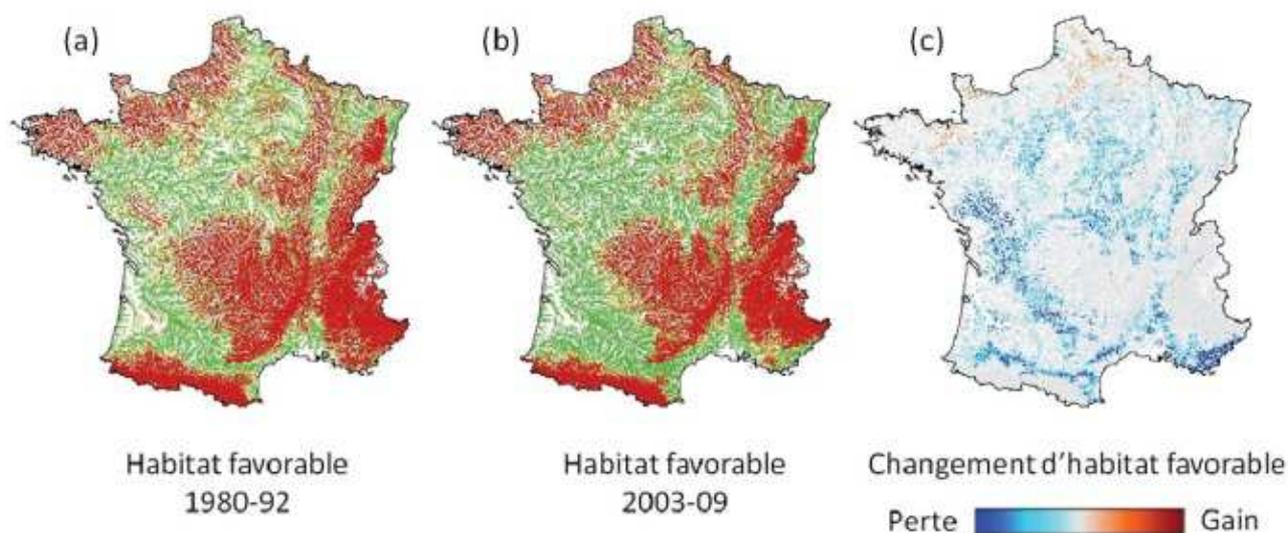


Figure 481 : Carte de distribution. Exemple de la truite (*Salmo trutta*). La modélisation de la distribution spatiale de l'espèce pour les périodes 1980-92 (a) et 2003-09 (b) permet de visualiser les zones de présence (habitat favorable, en rouge) et d'absence (habitat défavorable, en vert) de l'espèce. La différence entre les deux cartes (c) permet de mettre en évidence les changements d'habitat favorable (gains en rouge, pertes en bleu) (Comte et al., 2013).

Par rapport à 1980/92, la limite altitudinale inférieure de présence ou d'absence d'observation des espèces est restée relativement stable. En revanche la limite altitudinale supérieure a été déplacée de 30 m en moyenne pour 80% des espèces sur la période 2003/09. Cela se traduit pour environ 70 % de ces espèces par une expansion de leur aire potentielle de distribution favorable. La zone où le plus grand nombre d'individus est observé (l'optimum) remonte en moyenne d'environ 26 m soit environ 13.7 m/décade (Comte et al., 2013).

Si l'on considère maintenant un gradient amont aval, la majorité des espèces pourraient effectuer un déplacement vers l'amont. Cela se traduit par une contraction de leur aire de distribution, la perte à l'aval n'étant pas compensée par les gains à l'amont. En moyenne la remontée de la limite aval est de 11.9 km et de 1 km à l'amont. La zone où le plus grand nombre d'individus est observé se déplace vers l'amont en moyenne pour toutes les espèces de 1.2 km entre les deux périodes soit environ 0.6 km/décade. A noter que cette contraction de l'habitat n'est pas observée pour les espèces caractéristiques des zones amont, pour lesquelles on observe une expansion de la limite aval (Comte et al., 2013).

En comparant la vitesse de remontée des espèces à celle du déplacement de l'isotherme atmosphérique, les auteurs montrent un retard de déplacement des espèces pour suivre leur condition initiale en moyenne de 46.8 m/décade le long du gradient altitudinal et de 15 km/décade le long du gradient amont-aval (Comte et al., 2013).

Les modèles utilisés pour représenter l'évolution de la distribution des populations sont de type statistique ou mécaniste. Les modèles statistiques permettent de caractériser les zones favorables au développement de certaines espèces en associant leur présence observée à des variables climatiques, hydrologiques ou topographiques mesurées. Ces modèles ne tiennent pas compte des facteurs contrôlant la dynamique des populations ni les interactions entre les espèces et les capacités d'adaptation. Ils permettent d'obtenir une cartographie des zones qui seront favorables aux espèces et non une évolution de la distribution. Les modèles mécanistes quant à eux intègrent des caractéristiques physiologiques propres aux espèces. Ils permettent de réaliser des projections indépendamment d'une répartition observée. Cependant ils nécessitent une connaissance fine de l'écologie et de la physiologie des espèces considérées. Pour les approches de projections climatiques, les modèles statistiques sont plus appropriés.

A partir de modèles statistiques, le projet Explore 2070 a projeté l'évolution des aires de distribution favorables par espèce. Le scénario de dispersion nulle sous-tend que seul les zones favorables aujourd'hui peuvent l'être dans le futur. L'aire favorable peut donc soit rester stable soit diminuer. Le scénario de dispersion illimitée pose l'hypothèse que les espèces peuvent se déplacer sur la totalité du réseau hydrographique, sans contraintes. La comparaison des aires de distribution présentes et futures permet de déterminer les gains et pertes d'habitat potentiel et donc de déterminer la vulnérabilité et le risque d'extinction de chacune des espèces aux changements projetés (Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, 2012(d)).

Les cartes suivantes sont celles de l'anguille, espèce à enjeux pour laquelle des mesures de protection sont prises à l'échelle européenne. Il en ressort une augmentation globale de l'aire de répartition favorable (Figure 2). Aujourd'hui et à l'horizon 2070, l'aire de répartition de l'anguille est et sera majoritairement limitée par les aménagements anthropiques. Sur les critères de l'étude, l'espèce est classée peu vulnérable au changement climatique (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2012(d)).

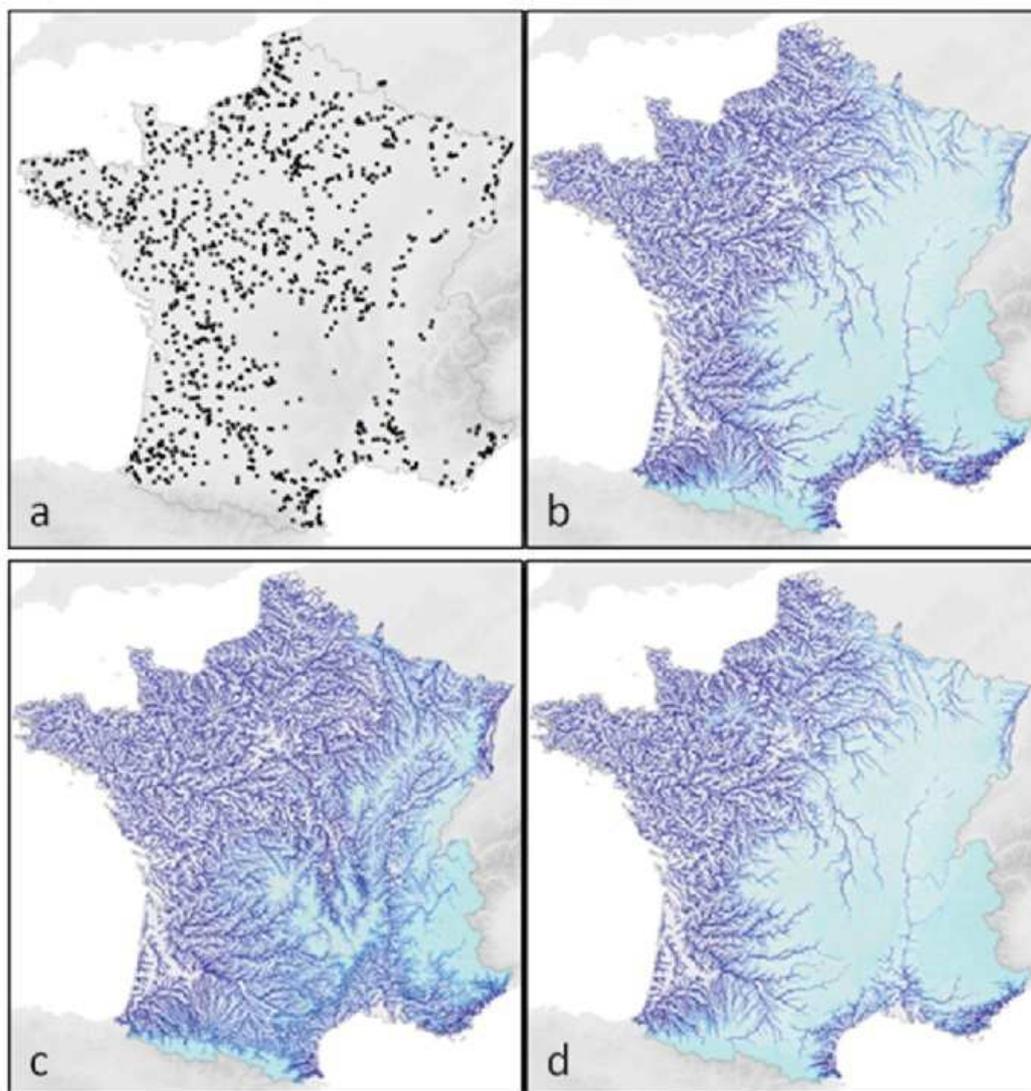


Figure 52 : Présence observée de l'anguille (a), aires favorables projetées en situation actuelle (b), futures selon le scénario de dispersion nulle (c) et futures selon le scénario de dispersion illimitée (d) (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2012(d)).

Les résultats du projet Explore 2070 sont convergents avec les tendances observées actuellement, à savoir un glissement des aires de répartition des espèces vers les zones amont. Ce sont les espèces d'eau froide (truite commune, chabot, saumon atlantique ou encore lamproie de Planer) qui présentent les plus fortes vulnérabilités car elles sont dès aujourd'hui situées en tête de bassin versant. Le risque d'extinction est amplifié pour les bassins de faibles et moyennes altitudes. A l'inverse, les espèces présentes dans les zones intermédiaires ou aval verront leur aire de répartition augmenter. A l'échelle des communautés, la richesse spécifique devrait globalement augmenter sous l'effet d'une colonisation rapide des zones devenues favorables pour les espèces situées en aval. Spatialement elle tendrait à diminuer à l'aval des cours d'eau et augmenter à l'amont (Figure 53). Cela entraînera probablement une plus grande homogénéisation des communautés le long des cours d'eau (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2012(d)).

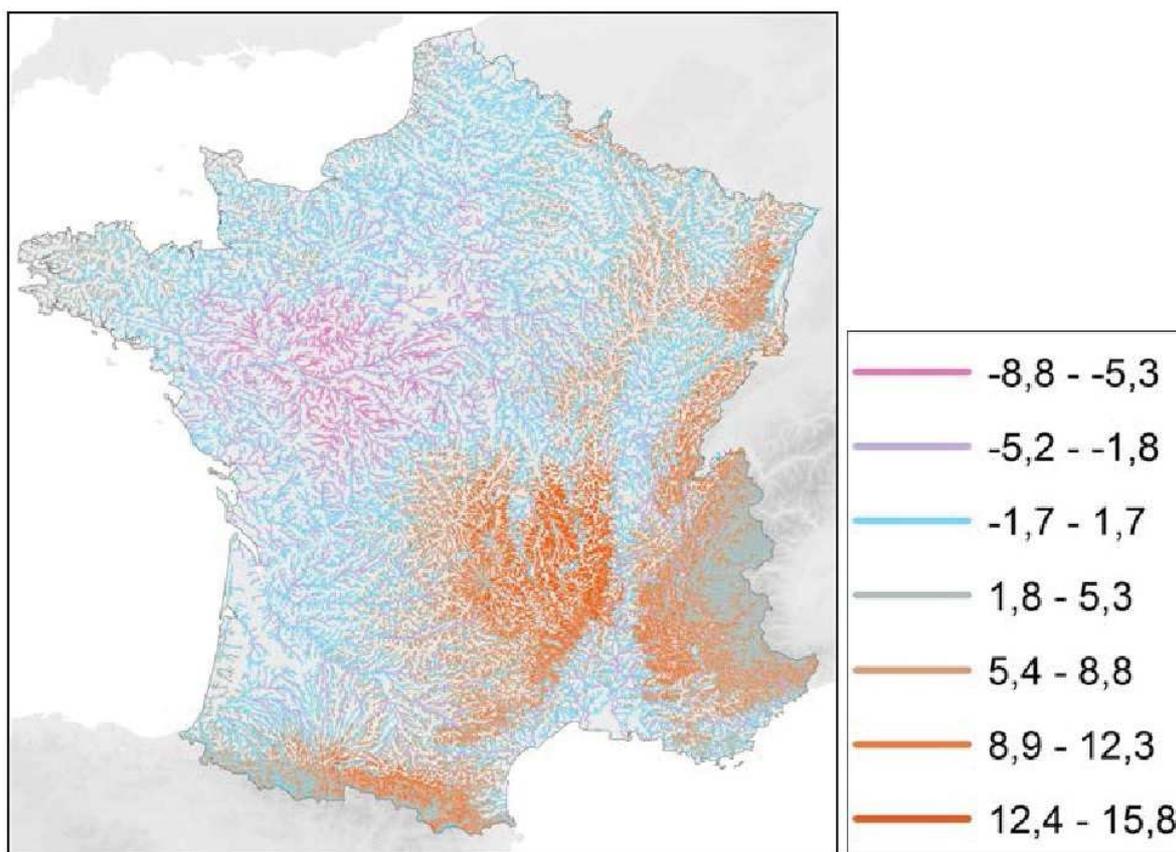


Figure 493 : Représentation cartographique de la différence moyenne de richesse spécifique entre futur et présent pour le scénario de dispersion illimitée (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2012(d)).

Vulnérabilité	Espèces	total
Faible	ablette, anguille, barbeau fluviatile, barbeau méridional, bouvière, brème bordelière, Brème, carassins, carpe commune, chevaine, goujon, hotu, ombre commun, perche soleil, pseudorasbora, sandre, silure glane, spirin, tanche, vairons	20
Moyenne	blageon, epinoche, gardon, grémille, poisson chat, perche, rotengle, toxostome	8
Forte	brochet, chabots, epinochette, loche franche, loche épineuse et loche transalpine, lote de rivière, lamproie de planer, saumon atlantique, truite de rivière, vandoises	10

Tableau 5 : Fréquence des trois classes de vulnérabilité au changement climatique étudiée parmi les 38 espèces étudiées, adapté de Explore 2070 (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2012(d)).

La corrélation entre les projections et les tendances passées sont pour partie inhérentes à la méthode de modélisation, basée sur des relations empiriques. La variabilité des effets observée par le passé est plus importante que celle des projections futures. Cela souligne la présence d'autres facteurs de contrôle, non pris en compte par les modèles, qui interagissent avec les effets du changement climatique (Comte et al., 2013).

L'amélioration de la modélisation passe par la prise en compte des processus écologiques via le couplage des modèles statistiques et mécanistes. Pour cela, il faudrait notamment : améliorer la compréhension des impacts qui découleront des mesures d'adaptation (régimes thermique et hydrologique, structure et composition des paysages des bassins versants, régime sédimentaire...); augmenter l'acquisition de données biologiques et environnementales et affiner les connaissances écologiques, même des espèces les plus communes.

Impacts sur la diversité des assemblages

La diversité des assemblages des espèces d'un site est une des composantes de la biodiversité. L'un des enjeux est de savoir si les zones géographiques de protection actuelles seront toujours pertinentes dans le futur. La diversité d'un assemblage est couramment représentée par la richesse spécifique. Le travail de thèse de Maire A. (2014) a développé une approche multicritères pour la caractériser et la représenter spatialement. Des indicateurs ont été définis par l'auteur (Figure 4) afin de rendre compte de quatre types de la diversité qui sont :

- La diversité taxonomique, basée sur une classification des espèces présentes. Elle est représentée par la richesse en espèces de l'assemblage, la rareté moyenne des espèces présentes et la rareté de l'assemblage d'espèces ;
- La diversité fonctionnelle d'un assemblage. Elle caractérise la diversité des traits biologiques, écologiques et fonctionnels des espèces qui composent l'assemblage. Elle est caractérisée par la diversité de traits, l'originalité et la singularité fonctionnelle ;
- L'intérêt patrimonial d'un assemblage est fonction de la menace caractérisée et de « l'héritage naturel » des espèces qui le constituent. Deux moyens d'en rendre compte sont le statut de conservation de l'assemblage et l'origine biogéographique des espèces ;
- L'intérêt socio-économique, basé sur l'importance des espèces pour la pêche professionnelle ou de loisir.

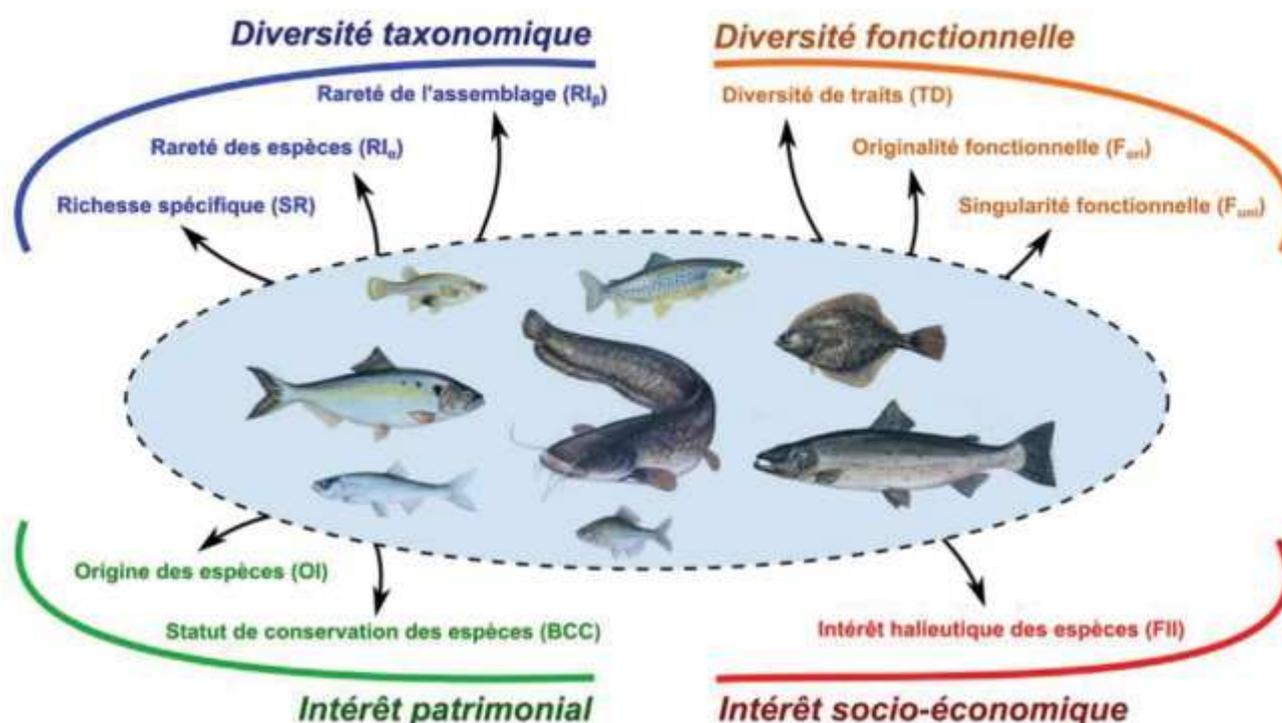


Figure 54 : Synthèse des facettes de la diversité des assemblages de poissons et des différents indices utilisés dans leur évaluation (Maire, 2014).

A partir de modélisations statistiques, l'impact d'un changement climatique faible, moyen et fort (scénarios RCP 2.6, 4.5 et 8.5 respectivement) a été projeté sur tous ces indicateurs à l'horizon 2080-2100. 60 espèces de poissons d'eau douce ont été modélisées. L'évolution des pressions anthropiques a également été prise en compte via le développement démographique, un indice représentant la qualité de l'eau (via l'évolution de l'occupation du sol) et la densité d'ouvrages hydrauliques (estimée constante en l'absence de prédictions disponibles). Le découpage spatial a été réalisé en sous bassins versants homogènes appelés zones hydrographiques (ZH). Le bleu foncé traduit une forte diversité à l'inverse du blanc. L'analyse propose une approche simplifiée de la notion d'habitat via l'évolution des aires de répartition. Le comportement futur des espèces est dépendant de l'évolution simultanée des niches spatiales, thermiques et trophiques mais ces combinaisons sont difficilement modélisables.

La carte de la figure 55 présente les projections d'évolution des quatre facettes de la diversité présentées précédemment.

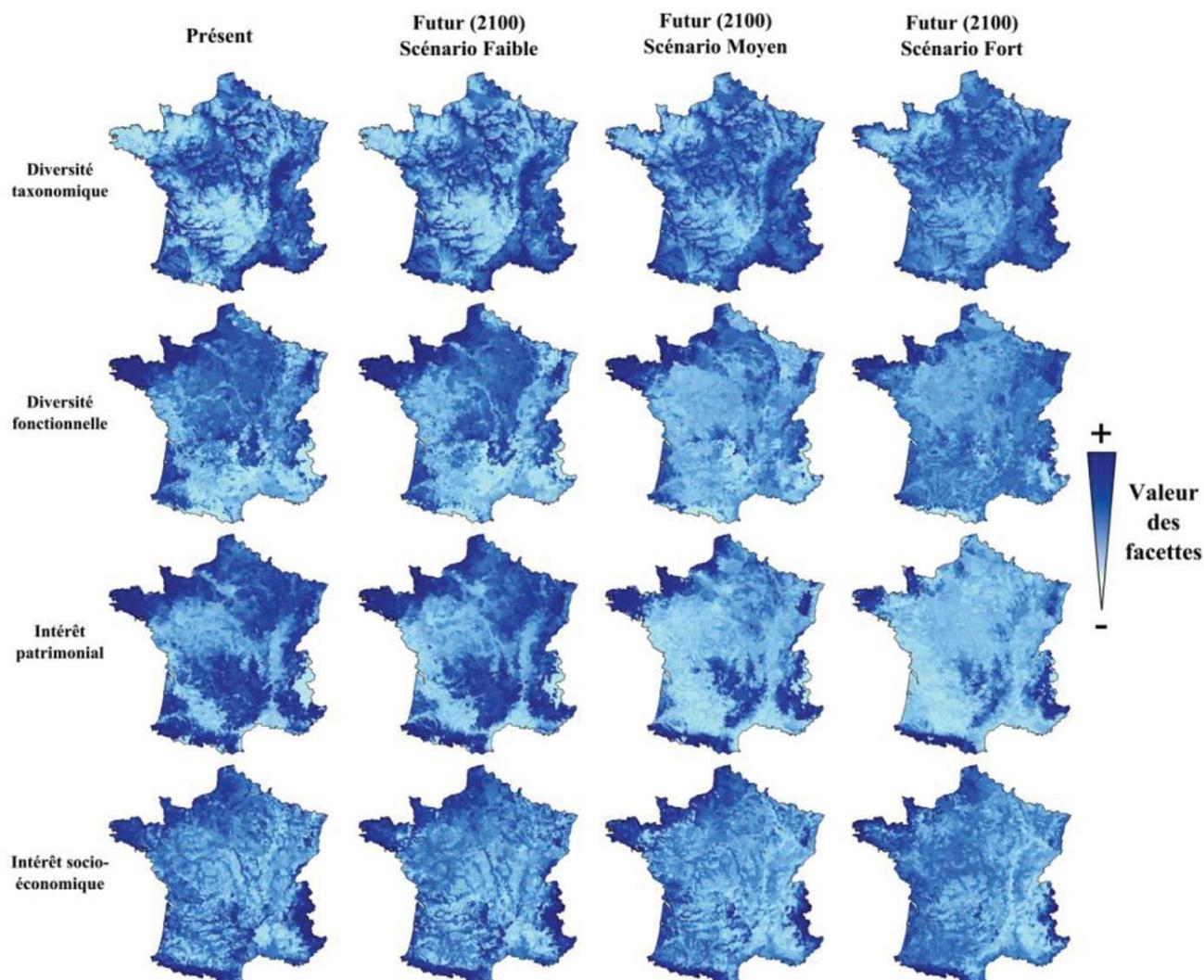


Figure 505 : Modifications des quatre facettes de la diversité des assemblages de poissons entre les conditions environnementales actuelles et futures sous les trois scénarios de changements globaux considérés. Les valeurs de chacune des facettes sont représentées au moyen d'un gradient de couleur allant du bleu clair (faibles valeurs) au bleu foncé (fortes valeurs). Le même gradient de couleur a été utilisé pour l'ensemble des cartes, facilitant ainsi leur comparaison (Maire, 2014).

Plusieurs éléments ressortent de ces projections (Figure 505):

- La différence de diversité taxonomique observée actuellement entre les grands fleuves (et leurs principaux affluents) et le reste des zones hydrographiques tend à s'atténuer quel que soit le scénario. Cette tendance s'explique par la probable forte augmentation de la richesse spécifique ainsi que l'augmentation des aires de répartition ;
- La diversité fonctionnelle des grands fleuves, Rhône compris, devrait diminuer. Ces résultats sont cohérents avec des travaux antérieurs réalisés par Buisson et al. (2013). Ceci serait causé par l'augmentation des aires de répartitions de nombreuses espèces possédant des traits biologiques communs entraînant une homogénéisation des assemblages. C'est le cas des cyprinidés (ablette, aspe, carassin, chevaine, toxostome). Les zones hydrographiques possédant actuellement une forte diversité fonctionnelle devraient la conserver comme les petits bassins versants côtiers et les Vosges ;
- Les intérêts patrimoniaux et halieutiques tendent également à diminuer dans les grands fleuves. Les zones à fort intérêt se contracteraient vers l'amont des rivières et en bord de mer. La diminution observée à l'échelle nationale sous les scénarios moyen et fort est principalement causée par la perte d'aires de répartition des salmonidés. Inversement ces scénarios favorisent des espèces introduites (la gambusie, la perche soleil, le poisson-chat, le pseudorasbora) présentant un faible intérêt patrimonial.

L'agglomération des quatre types de diversité permet de caractériser les zones hydrographiques où la priorité de conservation est la plus forte en temps présent et futur (Figure 51).

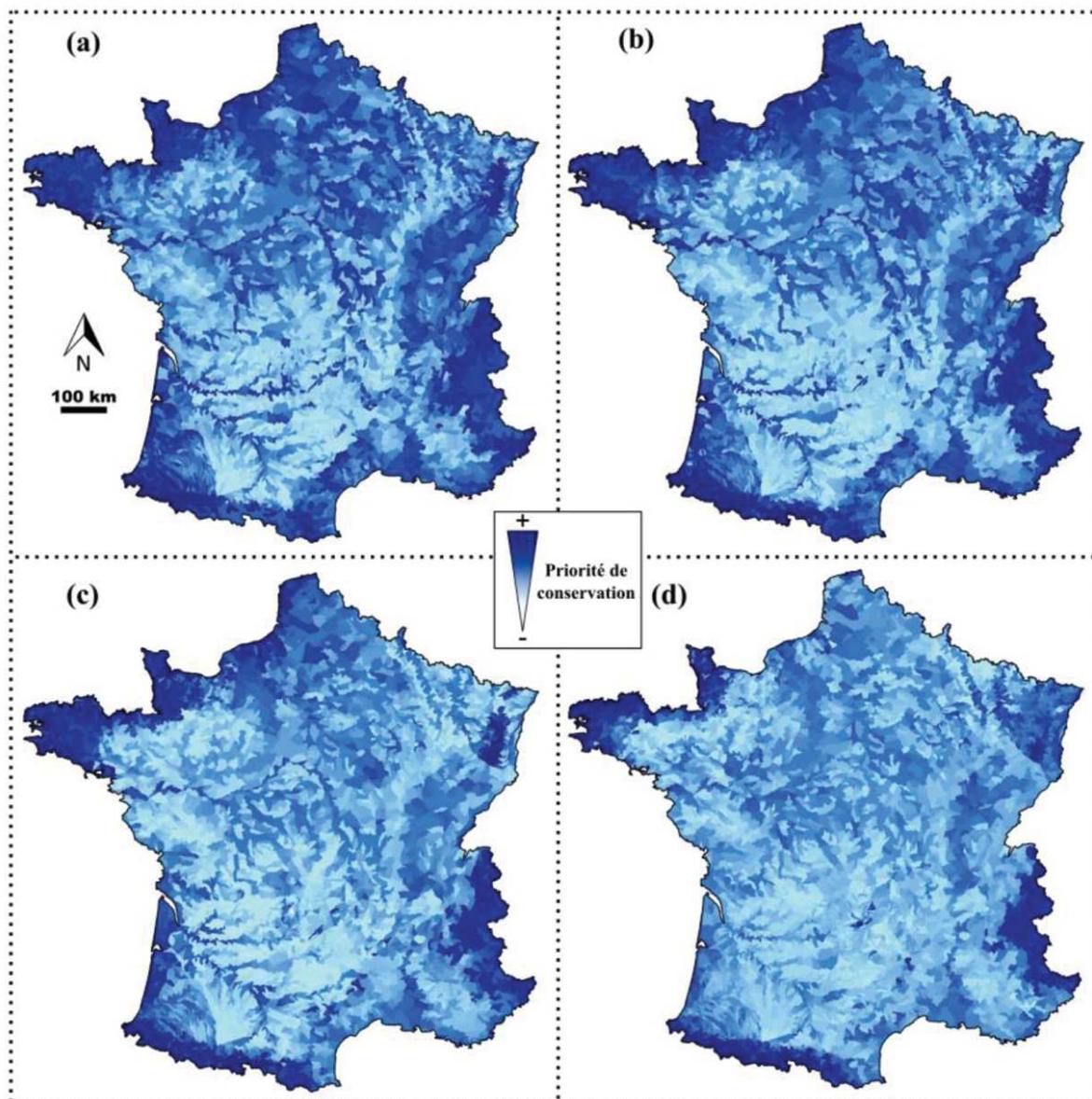


Figure 516 : Priorités de conservation pour les assemblages de poissons de rivière à l'échelle française (a) dans les conditions actuellement observées, et sous les scénarios de changements globaux (b) « faible », (c) « moyen » et (d) « fort ». Le même gradient de bleu, allant du bleu clair (faibles priorités) au bleu foncé (fortes priorités), a été utilisé pour les quatre cartes (Maire, 2014).

Plusieurs éléments ressortent de ces projections (Figure 516) :

- la concentration spatiale des zones prioritaires pour la conservation en fin de siècle sera d'autant plus grande que l'intensité du changement climatique sera forte ;
- les Alpes ont et garderont des enjeux de préservations important ;
- les zones prioritaires se concentrent vers l'amont des cours d'eau ;
- corrélée aux tendances décrites précédemment de diminution des quatre facettes de caractérisation des assemblages, la majorité des zones hydrographiques voient leur intérêt de conservation diminuer à l'horizon 2100.

Par la Figure 527, l'auteur propose une représentation spatiale de l'évolution des zones présentant les plus forts intérêts de conservation entre aujourd'hui et la fin du siècle. Sur le bassin Rhône-Méditerranée, le secteur des Alpes concentre les secteurs prioritaires présents et futurs (zones vertes) ainsi que l'apparition de nouvelles zones à enjeux (zones bleues) (Maire, 2014).

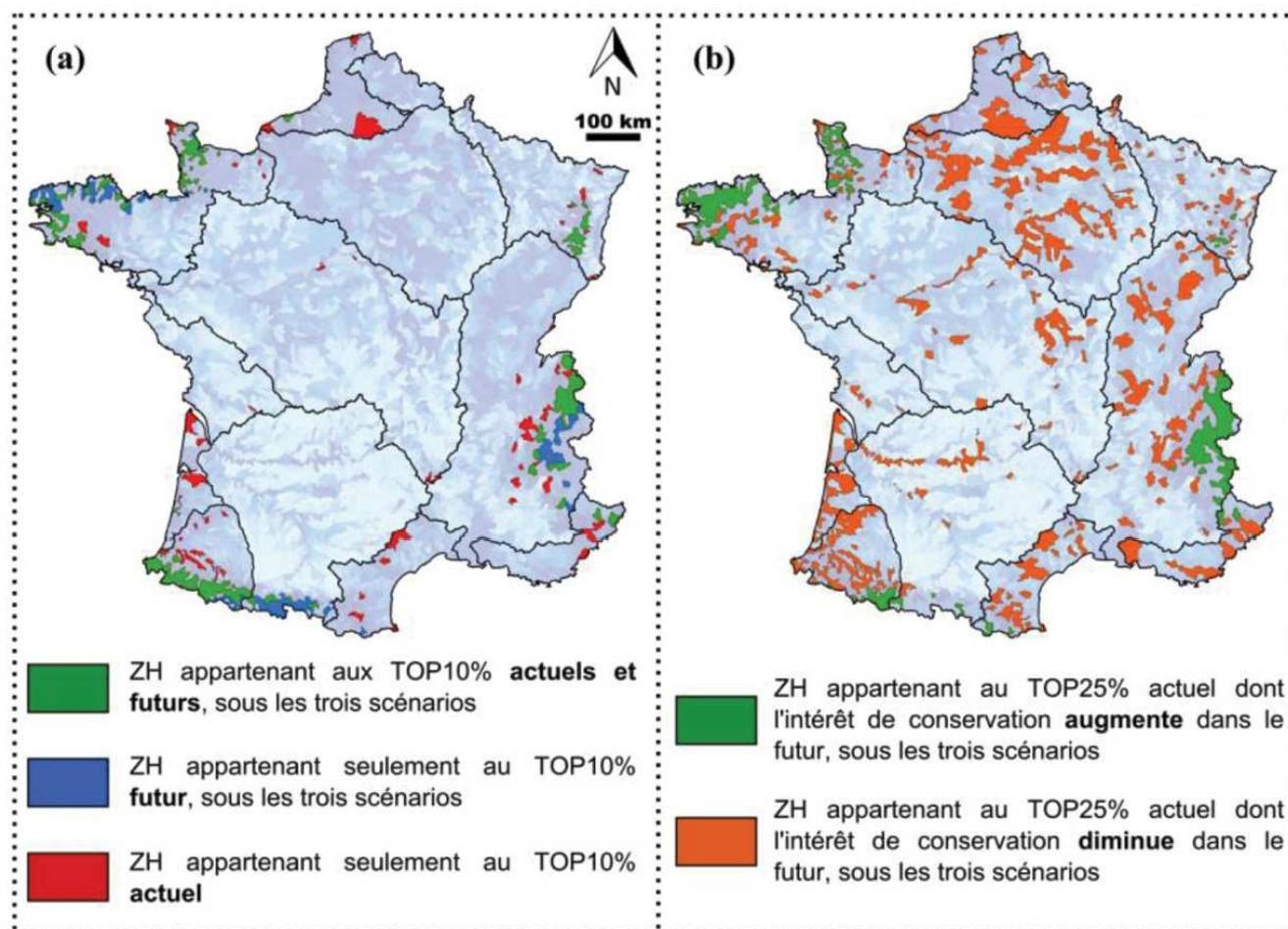


Figure 527 : Congruence spatiale entre priorités de conservation actuelles et futures et évolution de l'intérêt de conservation des ZH présentant actuellement les plus forts intérêts de conservation. (a) La congruence spatiale est ici évaluée sur la base des ZH appartenant aux TOP10% actuels et futurs (communes aux trois scénarios). Les ZH sont colorées différemment suivant si elles appartiennent simultanément aux TOP10% actuels et futurs (en vert ; 242 ZH), seulement futurs (en bleu ; 73 ZH) ou seulement actuels (en rouge ; 91 ZH). (b) Les ZH appartenant au TOP25% actuel (1525 ZH au total) sont représentées en vert lorsque leur intérêt de conservation prédit augmente (216 ZH) ou en orange lorsqu'il diminue (681 ZH) pour les trois scénarios futurs. Les 628 autres ZH (i.e. dont l'évolution de l'intérêt de conservation diffère suivant les scénarios) ne sont pas représentées ici (Maire, 2014).

3.2 IMPACT SUR LES LACS

Jeppesen et al. (2012) ont comparé l'évolution temporelle des assemblages de poissons de 24 lacs européens (principalement en Europe du nord) de superficies allant de 0.04 à 5648 km² et de profondeur comprises entre 1 et 177 m. La tendance générale est à une augmentation de la température de l'eau d'environ 0.15-0.3 °C/décade. Les principales conclusions sont :

- un changement de la composition des assemblages des poissons ;
- une tendance au développement des espèces eurytherme comme la brème commune, le sandre ou l'alose (espèces supportant de larges variations de température).
- à l'inverse, l'omble chevalier, espèce sténotherme froide (espèce d'eau froide ne supportant pas de grandes variations de température) a été particulièrement impacté et a vu son abondance diminuer dans de nombreux lacs ;
- des modifications variables de la taille et/ou de l'âge moyen des communautés ;

Concernant le Léman (chronique de données de 25 ans), cette étude souligne une diminution de l'abondance en eau profonde corrélée avec l'augmentation des températures, une augmentation des prises de cyprinidés ou encore l'arrivée de l'ablette (donnée qualitative).

Le projet IPER-RETRO (2009-2012) a cherché à identifier le poids relatif du changement climatique et des pressions humaines locales sur les processus géochimiques et écologiques de trois lacs (Léman, Annecy et Bourget) à partir de chroniques de données de 150 années. De façon générale, il ressort que tous les compartiments ou processus étudiés répondent à l'augmentation des températures atmosphériques de 2°C observée lors du XXème siècle. Les caractéristiques géomorphologiques et limnologiques du Léman limitent son réchauffement, donc les impacts. En revanche les impacts sont quasiment généralisés dans les lacs d'Annecy et du Bourget avec des variations induites notamment par l'historique des apports en éléments phosphatés imputables aux activités anthropiques (apports limités dans le lac d'Annecy et massifs dans le lac du Bourget depuis les années 1950) (Perga et al., 2015). La cause des impacts n'est pas la même en fonction de la profondeur considérée :

- en surface, les causes des changements dans les processus écologiques et la biodiversité sont majoritairement d'origine anthropique via les apports en nutriments phosphatés (P) et la pêche (qui modifie les équilibres de prédation). Le réchauffement a un effet amplificateur ;
- en profondeur, en situation d'hypoxie (causée par les apports en P depuis le milieu du XXème siècle) les modifications sont désormais principalement imputables au climat via une diminution du taux d'oxygène dissous sous l'effet du réchauffement des eaux.

Cependant, le projet a souligné le rôle régulateur des crues qui permettent des apports significatifs en oxygène en profondeur, limitant les impacts du changement climatique. Cet effet est plus marqué pour les lacs ayant de gros affluents (Jenny, 2013; Perga et al., 2015). Et concernant l'hypoxie en profondeur, Moos et al. (2011) signalent l'exagération du phénomène au-delà de la simple relation température/taux d'oxygène : le réchauffement favorise une production de biomasse algale plus précoce et plus tardive et une stratification plus longue et plus marquée.

La meilleure analyse des relations de cause à effet favorise la mise en place d'une gestion adaptée des lacs. Parmi les défis restants, la question se pose de savoir dans quelle mesure ces résultats sont généralisables à d'autres lacs ? Il faut également caractériser l'évolution conjointe des facteurs de contrôle pour savoir si les impacts du changement climatique observés évolueront de manière linéaire dans le futur ou non (effets seuils, maximum, hystérésis...).

A ce jour, la modélisation ne permet pas de projeter l'évolution de la distribution piscicole des lacs. Notamment à cause d'un manque de chroniques de données passées et de travaux menés à grande échelle. La compréhension actuelle des processus souligne qu'il est dès aujourd'hui possible d'augmenter la capacité d'adaptation de ces milieux en diminuant les apports de nutriments (Jeppesen et al., 2014).

3.3 IMPACTS DES ASSECS SUR LES COMMUNAUTÉS D'INVERTEBRÉS

De nombreux cours d'eau des bassins Rhône-Méditerranée et de Corse présentent un fonctionnement hydrologique naturel de type intermittent, notamment sur le pourtour méditerranéen (Darty et al., 2012). En réponse aux changements globaux, ces situations devraient s'intensifier et de nouveaux cours d'eau devraient être concernés par ce phénomène (Giuntoli et al., 2013).

Des travaux ont pu montrer la relation de cause à effet entre l'augmentation de la durée et de la fréquence des assèchements sur la diminution de la richesse taxonomique des communautés d'invertébrés benthiques et hyporhéiques (Darty et al., 2012). Cependant les variations observées entre les deux rivières étudiées introduisaient l'existence d'autres facteurs de contrôle.

Actuellement, des travaux menés par l'IRSTEA sont en cours sur 11 cours d'eau intermittents du bassin Rhône-Méditerranée. Cette approche multi-sites a pour objectif de caractériser la résistance et la résilience des communautés d'invertébrés de ces milieux au travers de variables abiotiques.

La méthode basée sur un échantillonnage terrain montre une corrélation linéaire entre la richesse taxonomique totale (nombre de taxons) et la permanence d'écoulement (indicateur intégrant les caractéristiques des assecs). Ainsi, une diminution de 10% de la permanence d'écoulement entraînerait la disparition de 1 à 1.5 taxon (Launay & Darty, 2015).

Des situations contrastées apparaissent entre les bassins. La résilience (capacité à revenir à un état initial) des communautés présente un gradient aval amont. Elle est la plus forte et la plus rapide à l'aval tandis qu'à l'amont, la

richesse taxonomique tend à diminuer. Ce gradient s'explique en partie par la « dérive », c'est-à-dire l'apport par l'amont de taxons à l'aval. Ce phénomène est moins marqué à l'amont des cours d'eau. La résilience des taxons à l'amont est donc fonction uniquement de la capacité des taxons en place à résister aux pressions (Launay & Datry, 2015).

La thèse de Vander Vorste (2015) apporte un autre regard sur le facteur explicatif de la résilience. Il ressort que pour les rivières alluviales, la résilience des invertébrés ne provient pas de la dérive mais de la présence ou non de zones hyporhéiques. Ces zones servent de refuge lors des phases d'assecs permettant une recolonisation rapide lors de la remise en eau. Cela souligne la spécificité des communautés des rivières alluviales intermittentes et la nécessité de préserver les zones hyporhéiques car elles assurent une forte résilience (Vander Vorste, 2015).

Les particularités des cours d'eau intermittents, leur abondance sur le territoire et leur probable augmentation nécessite d'adapter la politique de gestion pour ces milieux. Pour cela il faut réaliser un travail d'inventaire, adapter les bio-indicateurs, identifier et chiffrer les services écosystémiques de ces milieux et distinguer les cours d'eau intermittents naturels de ceux induits par les activités anthropiques (Launay & Datry, 2015).

3.4 IMPACTS SUR LA RIPISYLVE

Les zones rivulaires sont soumises à des stress abiotiques. Les crues et les périodes de basses eaux sont les facteurs de contrôle majoritaire de la dynamique de ces milieux (Rivaes et al., 2013). Les principales pressions anthropiques sont la mise en culture, l'artificialisation, la régulation des débits et l'apport de nutriments. L'impact du changement climatique sera principalement indirect sur ces milieux via la modification des régimes des crues et des sécheresses hydrologiques. La complexité des interactions entre les processus rend difficile la détermination de l'impact du changement climatique par rapport aux autres facteurs (Stella et al., 2013).

En posant l'hypothèse que l'évolution spatiale de la végétation est conditionnée par les débits maximum et minimum annuels, Rivaes et al. ont modélisé à l'horizon 2100 avec les scénarios B1 (optimiste) et A2 (pessimiste) l'évolution de trois zones ripariennes contrastées sélectionnées en Europe (Portugal, Espagne et Autriche). Les résultats témoignent de la présence d'autres facteurs de contrôle rendant compliquée la modélisation. En zone méditerranéenne toutefois une tendance se dégage. L'amplification des assecs entraînerait une disparition des premiers stades de développement de la ripisylve (Rivaes et al., 2013).

Politti et al. (2014) ont montré l'impact du changement climatique sur la modification de la distribution quantitative, spatio-temporelle et les stades de succession de la ripisylve d'un tronçon d'une rivière alpine autrichienne en modélisant l'impact de la modification du régime hydrologique. Plusieurs hypothèses déduites du scénario A1B ont été simulées : une réduction (-25%) ou augmentation (+25%) des débits de pointe associée à une diminution plus ou moins importante des débits moyens printaniers (-20 ou -35%). L'augmentation des débits de pointe tend à entraîner une régression de l'emprise de la ripisylve en empêchant le développement des stades de succession supérieurs. A l'inverse, sous le scénario de diminution des débits de pointe, la succession est favorisée et la végétation s'étendrait dans le lit mineur en permettant le développement des espèces supérieures. La diminution des débits estivaux tend également à diminuer le charriage (recrutement) des débris végétaux, éléments impactant la distribution des sédiments (Politti et al., 2014).

3.5 IMPACTS SUR LES ZONES HUMIDES

Les zones humides sont reconnues comme des milieux à forts enjeux, en témoigne les objectifs du SDAGE de non dégradation, de restauration et de mise en place de plans de gestion. Cependant les pressions exercées sur ces milieux restent élevées. Selon une étude du CGDD-SOeS (2012) menée à dire d'experts sur l'évolution des zones humides entre 2000 et 2010, la situation en France s'améliore pour 11 % d'entre elles tandis qu'elle se dégrade pour 48 % (étude menée sur 152 zones humides). C'est principalement une dégradation de la conservation (représentée par l'état écologique) qui en est la cause plutôt qu'une diminution de la superficie (Figure 538).

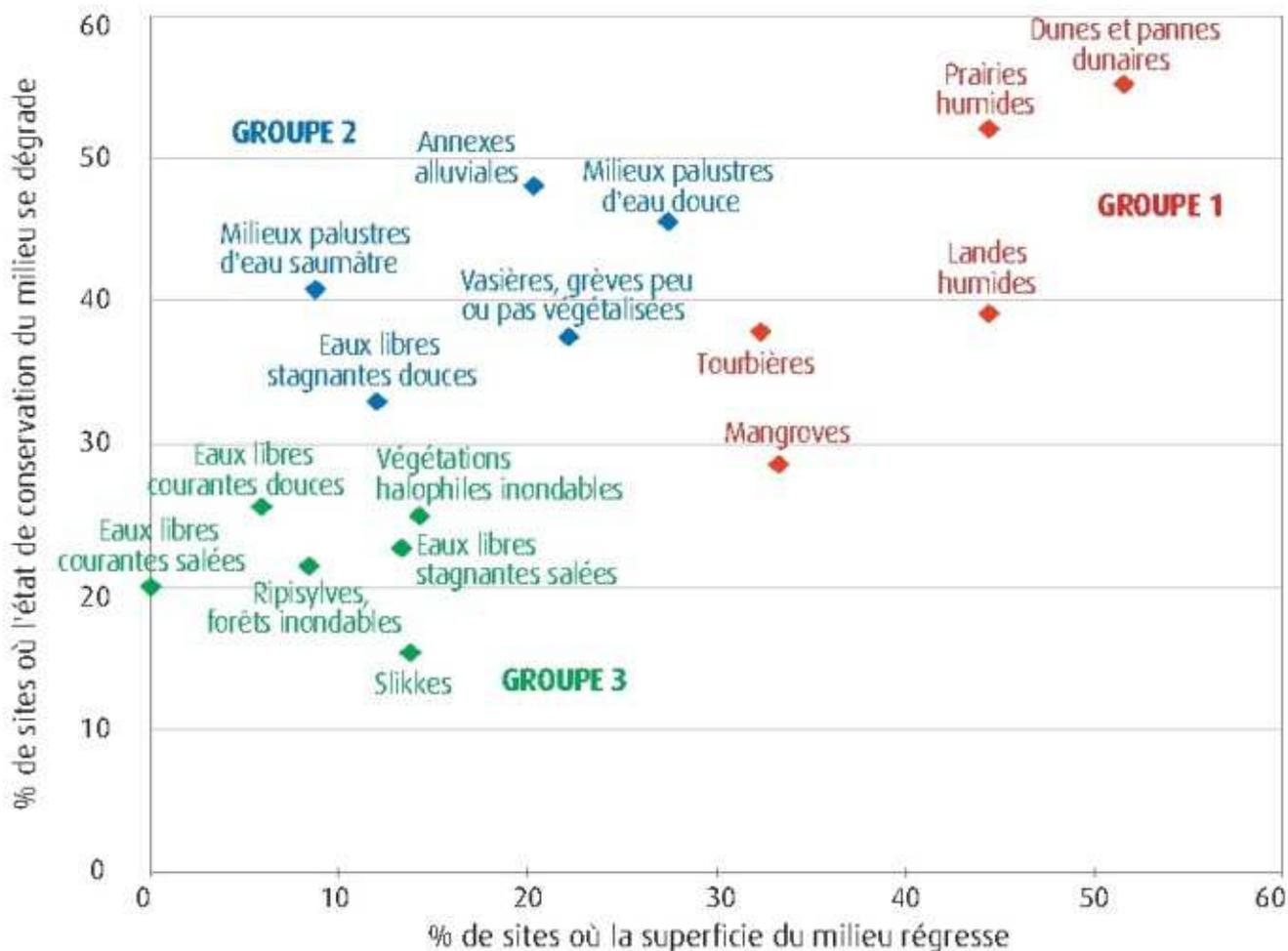


Figure 538 : Pourcentage des zones humides dont la superficie régresse en abscisse et pourcentage des sites dont l'état de conservation se dégrade en ordonné (CGDD-SOeS, 2012).

Le rapport souligne également l'efficacité, en termes d'amélioration de l'état, des mesures et plans de gestion mis en place. Cela permet un retour des services écosystémiques rendus par ces milieux. Une zone humide fluviale recréée a été suivie durant 20 années aux Etats-Unis en réalisant des bilans sur les flux de phosphore, d'azote et de carbone ainsi que le développement des espèces. Il ressort que la zone humide permet une amélioration de la qualité de l'eau (tendance à la baisse avec le temps du fait d'une diminution de la croissance des végétaux) et une séquestration du carbone de l'ordre de 219-267 g-C/m²/an (Mitsch et al., 2014).

Sur la période (2000 – 2010), les experts ont estimé qu'environ 50% des évolutions observées peuvent être en partie induites par des causes imputables au changement climatique. Parmi les principaux phénomènes cités on retrouve des situations climatiques exceptionnelles, des assèchements, des modifications du fonctionnement hydraulique, des évolutions d'espèces envahissantes (indigènes et exotiques, animales comme végétales), des pertes d'habitats ou d'espèces... Il est difficile d'associer le changement climatique à ces phénomènes sur une période de 10 années car ils peuvent être induits par la variabilité naturelle du climat. Cependant cela permet de dégager des situations probables pour le futur. Les tourbières ressortent comme étant le type de site le plus touché et le plus sensible au changement climatique du fait de leur forte dépendance aux conditions climatiques (pluviométrie, température et évapotranspiration).

Des impacts induits par le changement climatique, l'assèchement provoqué par l'augmentation de l'évapotranspiration et la diminution de la pluviométrie devrait être le plus fort (Junk, 2013). A cela s'ajoutent les pressions exercées par les activités anthropiques (urbanisation, conversion en terres agricoles, prélèvement d'eau...). Ces pressions supplémentaires, sur lesquelles il est possible d'agir, amplifieront le risque d'assèchement de façon plus ou moins direct (Figure 59).

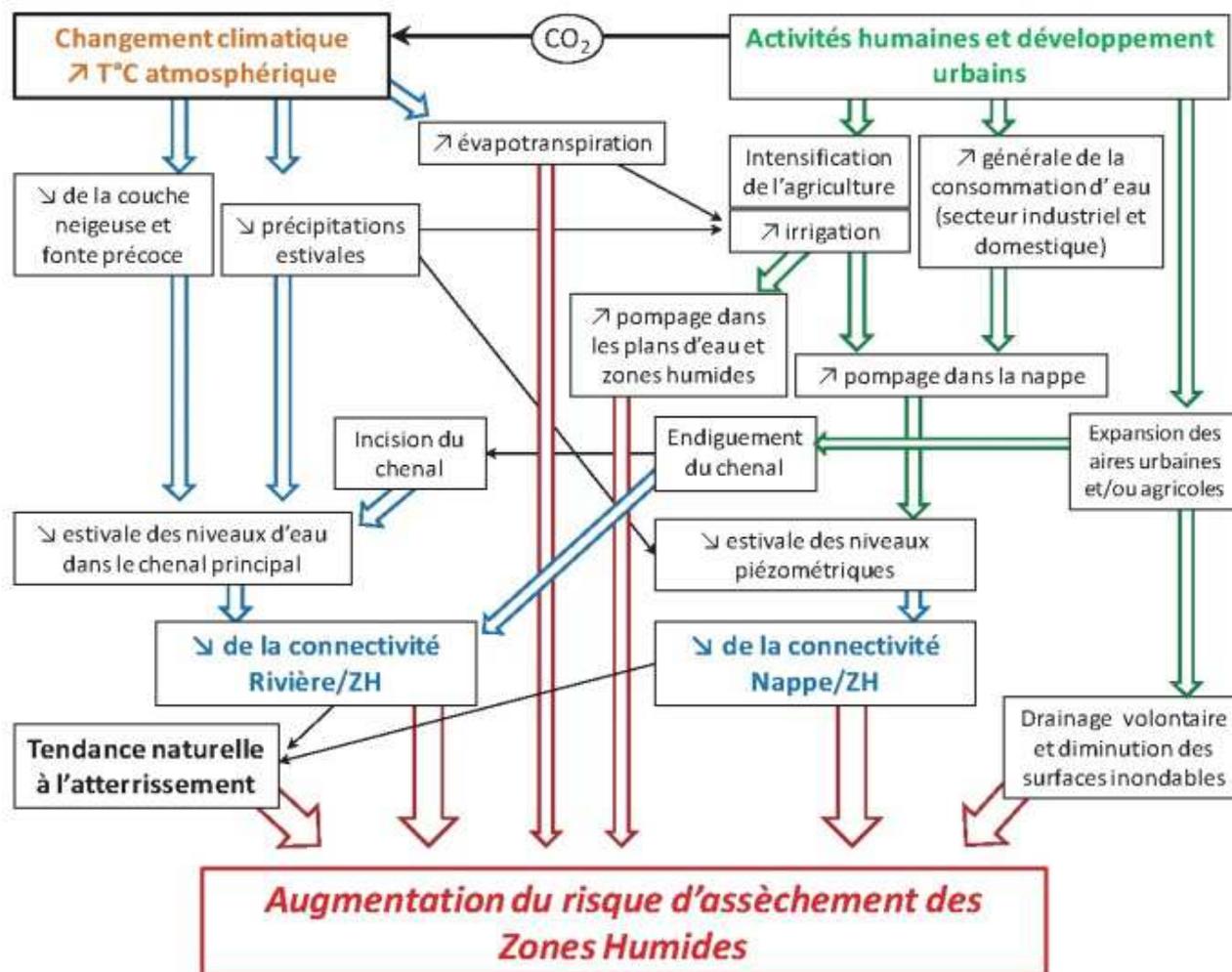


Figure 59 : Origines complexes de l'assèchement des zones humides fluviales : diversité des facteurs et interactions potentielles. Liste non exhaustive, causes naturelles et climatiques à gauche, et pressions anthropiques à droite (Dehédin, 2014).

La réponse des espèces à l'assèchement est très variable mais il semble que cela favorisera les espèces invasives (Explore 2070). Sur la période 2000-2010 les experts constatent une dynamique de colonisation par les espèces invasives (endogènes et exotiques) de nouveaux sites mais pas de multiplication forte dans les sites où elles sont déjà implantées. D'après les auteurs, l'intensité de ces tendances reste difficilement associable aux effets du changement climatique (Moireau et al., 2012). Les modifications de fonctionnement des zones humides impacteront les espèces animales pour lesquelles ces zones sont des lieux de ponte, d'élevage et de nourriture (Explore 2070).

Des travaux ont cherché à représenter l'impact du changement climatique sur les services rendus par les zones humides, indépendamment les uns des autres (séquestration du carbone, atténuation des crues...). L'approche nécessite de définir des traits caractéristiques (la taille de la canopée, sa structure, l'enracinement, la surface foliaire...) et de les associer à chaque service. Ensuite il faut représenter la contribution relative de chaque trait caractéristique à un service et identifier les interactions pouvant avoir des effets synergiques ou antagonistes (Figure 60). Une fois ces relations établies, il faut représenter les effets du changement climatique sur ces facteurs (Moor et al., 2015).

Par cette méthode et des projections d'élévation de la température de +2.85 °C et de diminution des précipitations de -6.7%, les auteurs projettent une meilleure capacité d'atténuation des crues par les zones humides du centre de la Suède sous l'effet d'une augmentation de la croissance, de la production et de la taille de la végétation. La rétention des nutriments pourrait également augmenter (Moor et al 2015). A noter que ces résultats ne sont pas généralisables, chaque zone humide étant spécifique. De plus le climat continental Suédois diffère des climats des bassins Rhône-Méditerranée et de Corse.

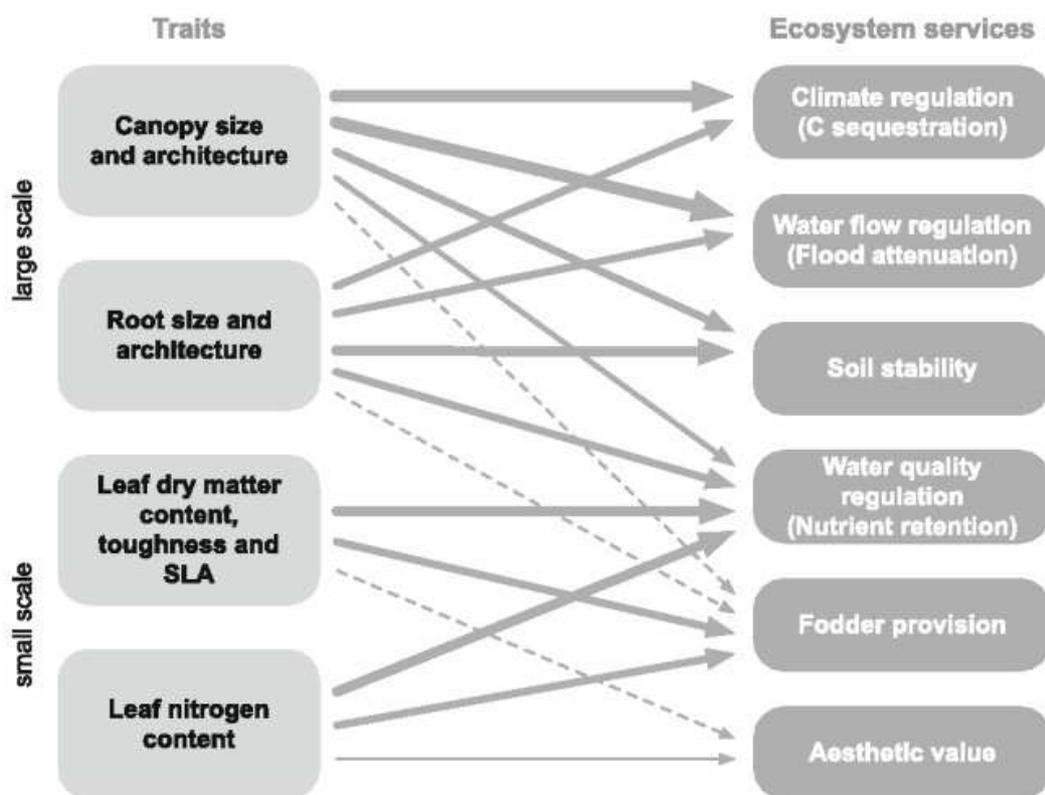


Figure 540 : Relation entre les traits fonctionnels des plantes des zones humides et leur participation relative aux différents services écosystémiques. L'épaisseur des traits est directement proportionnelle à l'importance du lien. SLA pour la surface foliaire spécifique (specific leaf area). La case 'Aesthetic service' inclut différents services d'ordre culturel (Moor et al., 2015).

Le projet Explore 2070 a caractérisé la vulnérabilité de la plaine intérieure de la Dombes. La principale menace identifiée et étudiée est l'assèchement. Les projections climatiques sont regroupées dans le tableau 6 ci-dessous.

La Dombes	Moyenne actuelle (+/- écart type)	Horizon 2070 – delta présent futur (%)		
		Min (+/- écart type)	Med (+/- écart type)	Max (+/- écart type)
Précipitation (mm)	1018.5 (54.4)	-15.5 (0.7)	-4 (0.0)	-0.4 (0.7)
Température (°C)	9.9 (0.7)	1.8 (0.0)	2.4 (0.0)	
ETo (mm)	611 (39.6)	17 (1.4)	24.5 (0.7)	31.5 (2.1)
Débit moyen annuel		-43.5 (9.2)	-23.5 (9.2)	-15.5 (4.9)
Débit sec sur cinq ans		-56 (12.7)	-23 (11.3)	-9 (1.4)

Tableau 6 : Projections climatiques et hydrologiques moyennées à partir des données observées et simulées à la station hydrologique de la Dombes (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2012(e)).

La Dombes a un fonctionnement de type pluvial, les apports proviennent principalement des eaux météoriques et du ruissellement. Les sorties du milieu sont majoritairement induites par l'évapotranspiration (environ 66%). L'interconnexion des étangs de la Dombes entre eux et aux cours d'eaux amplifie la vulnérabilité car elle favorise l'écoulement à surface libre au détriment du stockage et du soutien d'étiage par transfert de subsurface. La forte augmentation de l'évapotranspiration entraînerait :

- une diminution de la qualité de l'eau ;
- l'isolement de certains secteurs ;
- le risque de favoriser des espèces invasives ;

- une diminution des débits moyens annuels de 16 à 30% et de 50 à 70% pendant l'été, augmentant le risque d'apparition de situations d'assec temporaire.

En généralisant le cas de la Dombes aux zones humides des plaines intérieures, l'assèchement serait principalement induit par l'augmentation de l'évapotranspiration qui, si elle n'est pas compensée par une augmentation de la pluviométrie entrainera une diminution de la hauteur d'eau (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2012(e)). Mais il convient de noter que le système Dombes est soumis à un mode de gestion très marqué avec un système de mise en assec régulier des étangs pour alterner mise en culture des sols dénoyés et remise en eaux et empoissonnement.

L'étude de l'impact du changement climatique sur les trois zones humides de **vallées alluviales** (aucune sur les bassins RMC) du projet Explore 2070 montre que les vulnérabilités sont très variables et principalement fonction des régimes hydrologiques et des échanges avec les nappes. Les modifications des précipitations ont un impact moins direct. Le rapport souligne que la vulnérabilité des petites zones humides en tête de bassin versant (non étudiées) est plus importante que les grandes zones humides. Il montre également que malgré le regroupement par mode de fonctionnement hydrologique, les résultats sont difficilement généralisables du fait de l'importance du contexte local et des fortes incertitudes qui entourent les différentes étapes de la démarche (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2012(e)).

L'étude de 9 zones humides (péri-fluviales ou étangs) de l'Ain subissant une diminution sur 15 ans du niveau d'eau en été et un régime d'exondation (phase de disparition de la colonne d'eau) ne conclut pas à une eutrophisation des masses d'eau contrairement à ce qui est généralement rencontré dans la littérature. Les changements observés proviennent plutôt d'une modification du régime d'alimentation en faveur d'une contribution plus importante des eaux souterraines. A l'échelle saisonnière, il ressort que la réponse des communautés végétales à l'exondation diffère selon la nature du sédiment. La résistance et la résilience de ces communautés décroissent avec la capacité de rétention d'eau du sédiment en place (mesures in situ). Les plantes aquatiques seront plus ou moins tolérantes à l'exondation en fonction de leur position phylogénétique et sont capables d'ajustements phénotypiques comme une densification des organes aériens ou une augmentation de la plasticité des feuilles. Les communautés végétales montrent également une résistance à l'assèchement qui augmente avec la richesse spécifique (De Wilde, 2015).

La thèse de Dehédin A. (2014) montre que la morphologie des zones humides fluviales et le mode d'assèchement impactent fortement la structuration des bactéries et des invertébrés. Les étiages sévères tendent à diminuer la richesse spécifique à l'échelle locale du fait de la disparition des espèces les plus sensibles mais à l'augmenter à plus grande échelle du fait du développement d'espèces adaptées à ces milieux. L'hétérogénéité des communautés et l'augmentation de la richesse spécifique tendrait ainsi à augmenter à l'échelle de la plaine alluviale avec une disparition notable des espèces les plus sensibles. Ainsi la biodiversité microbienne sera fortement impactée mais présente une forte résilience. L'assèchement tend également à diminuer le recyclage, entrainant une dégradation de la qualité des eaux (Dehédin, 2014). D'autres travaux montrent qu'une augmentation de la température stimule la dégradation de la litière par les micro-organismes. La vitesse de dégradation est cependant déterminée par la nature des feuilles (Foucreau, 2015).

Amandine Les Landes (2013) a modélisé une zone humide en Normandie et ses interactions avec les eaux souterraines et de subsurfaces. A partir du scénario A1B, de 14 GCMs et d'un modèle de descente d'échelle statistique. Les projections montrent pour la fin du siècle par rapport à 1961-2000 (période de référence) une augmentation de la température annuelle moyenne comprise entre 1.3 et 3.7 °C, une diminution des précipitations comprise entre 1.8 et 21.3% et une diminution de la recharge comprise entre 22 et 61% avec une moyenne de 40%. Avec ces gammes de possibles, trois scénarios de changement climatique associés à plusieurs scénarios d'évolution des volumes prélevés (augmentation de 10, 20, 50 et 100 %) ont été testés. Considérés séparément, c'est le changement climatique qui entrainerait les plus fortes diminutions de surface de la zone humide : de -5.3 à -13.6%. L'impact de l'augmentation des prélèvements seuls serait au maximum une diminution de la surface de -3.7%. Un résultat intéressant montre qu'une gestion adaptée du territoire, par l'abandon de certaines zones de drainage ainsi que certains puits permet d'atténuer, voire de compenser l'impact cumulé du changement climatique et de l'exploitation des eaux souterraines (Les Landes et al., 2014).

Les zones humides littorales. D'après Explore 2070, les dunes fixées à Crucianelle ou Ephedra, les eaux eutrophes à végétation flottante libre et/ou enracinée immergée, les typhaies et les prairies humides améliorées sont les habitats ayant la plus forte sensibilité face au risque de salinisation des sols par remontée du biseau salé et submersions

temporaires. Les dunes embryonnaires, les dunes mobiles, les roselières, les Frênaies, les peupleraies et les formations riveraines de saule présentent une sensibilité forte au risque de salinisation uniquement. L'étude souligne que l'ensemble des habitats naturels humides présente une sensibilité forte au risque de submersion permanente (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2012(e)).

Au regard des milieux présents sur les différentes lagunes il ressort que : la lagune de Mauguio et l'étang de Canet présentent une sensibilité marquée à la salinisation des sols. L'étang de Canet présente la plus forte sensibilité aux submersions temporaires. Pour ces deux critères, l'étang de Thau présente une faible sensibilité.

Pour toutes les lagunes, l'étude souligne que l'impact du changement climatique sur les zones humides littorales sera dépendant de la présence ou non d'une zone de recul pour pouvoir se déplacer au rythme de l'élévation du niveau de la mer (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2012(e)). Les travaux de Kuhfuss et al. (2016) soulignent l'intérêt économique à laisser une zone de retrait pour ces écosystèmes. Des travaux réalisés à l'échelle mondiale montrent que le facteur numéro un augmentant la vulnérabilité des zones humides littorales est le manque d'espace de mobilité induit par l'artificialisation et les ouvrages de protection (Spencer et al., 2016).

Un autre risque pour les lagunes est celui de l'eutrophisation induite par une augmentation des températures de surface et une diminution du brassage qui favorise la concentration des nutriments en surface (Planton et al., 2015). L'emprise des zones humides a régressé de plus de 60% sur la période 1970 – 2000. Même si cette tendance ralentit, elle existe toujours. La gestion, la restauration et la préservation des zones humides sont des leviers d'actions pertinents pour l'adaptation au changement climatique au regard des services écosystémiques associés. Des besoins de connaissances restent à développer pour appréhender de façon plus précise l'impact du changement climatique sur ces milieux. La conservation en bon état de ces milieux passe par une gestion participative à l'échelle du territoire. Cela sera efficace si les attentes et les représentations différentes en fonction des acteurs sont prises en compte (Scholte 2016). A noter que dès aujourd'hui, les ouvrages de régulation des flux d'eau entrants dans les zones humides permettent d'adapter le niveau d'eau présent à la variabilité naturelle du climat. C'est notamment le cas de la Camargue (Lefebvre et al., 2015).

3.6 IMPACTS SUR LES ECOSYSTEMES MARINS

La Méditerranée représente 0.82% de la surface des océans mais dispose de biotopes froids, tempérés et subtropicaux faisant d'elle un hot-spot de la biodiversité : 7% des espèces mondialement connues y vivent. Cette biodiversité représente un patrimoine naturel remarquable et est également le support d'une économie autour du tourisme, de la pêche et de l'aquaculture (Lacoue-Labarthe et al., 2016).

Les écosystèmes littoraux sont le résultat de processus multiples et complexes. Si les conditions climatiques sont l'un des facteurs influençant ces écosystèmes, ils ne sont pas les seuls et n'est pas forcément les plus impactants. Ainsi, l'ONERC considère qu'il est aujourd'hui impossible de dresser un état des lieux de l'impact du changement climatique sur la biodiversité marine (Planton et al., 2015).

La mer Méditerranée est identifiée par le GIEC comme une zone qui sera fortement impactée par le changement climatique. Adloff et al. (2015) ont testé plusieurs scénarios d'émissions de GES (A2, A1B et B1) pour représenter une gamme des possibles de l'évolution de la Méditerranée ainsi que pour identifier les facteurs explicatifs principaux. La modélisation a été réalisée à l'échéance 2070-2090 en comparaison avec la situation de 1961-1990. Tous les scénarios tendent vers une augmentation de la température avec une atténuation en profondeur. L'augmentation moyenne de la température serait de +0.7 à +2.6°C en surface et de +0.4 à +1°C à 600 m de profondeur. La salinité de surface devrait augmenter de +0.48 to +0.89 g/l (Figure 61). Les effets combinés de l'augmentation de la température et de la salinité entraîneront une intensification de la circulation thermoaline de la Méditerranée impactant l'oxygénation et les flux de nutriments. Le choix de l'évolution du niveau de l'Atlantique et de sa salinité, qui présente de fortes incertitudes dans les modèles de circulation générale, est le paramètre qui a le plus d'impact sur l'évolution de la situation de la méditerranée, suivi par le choix du scénario de développement socio-économique et des apports d'eau douce.

Les travaux du GIEC montrent une augmentation de la température de surface de la Méditerranée de +0.5 °C sur la période 1950-2009 soit un échauffement d'environ 0.084 °C/décade (IPCC, 2014).

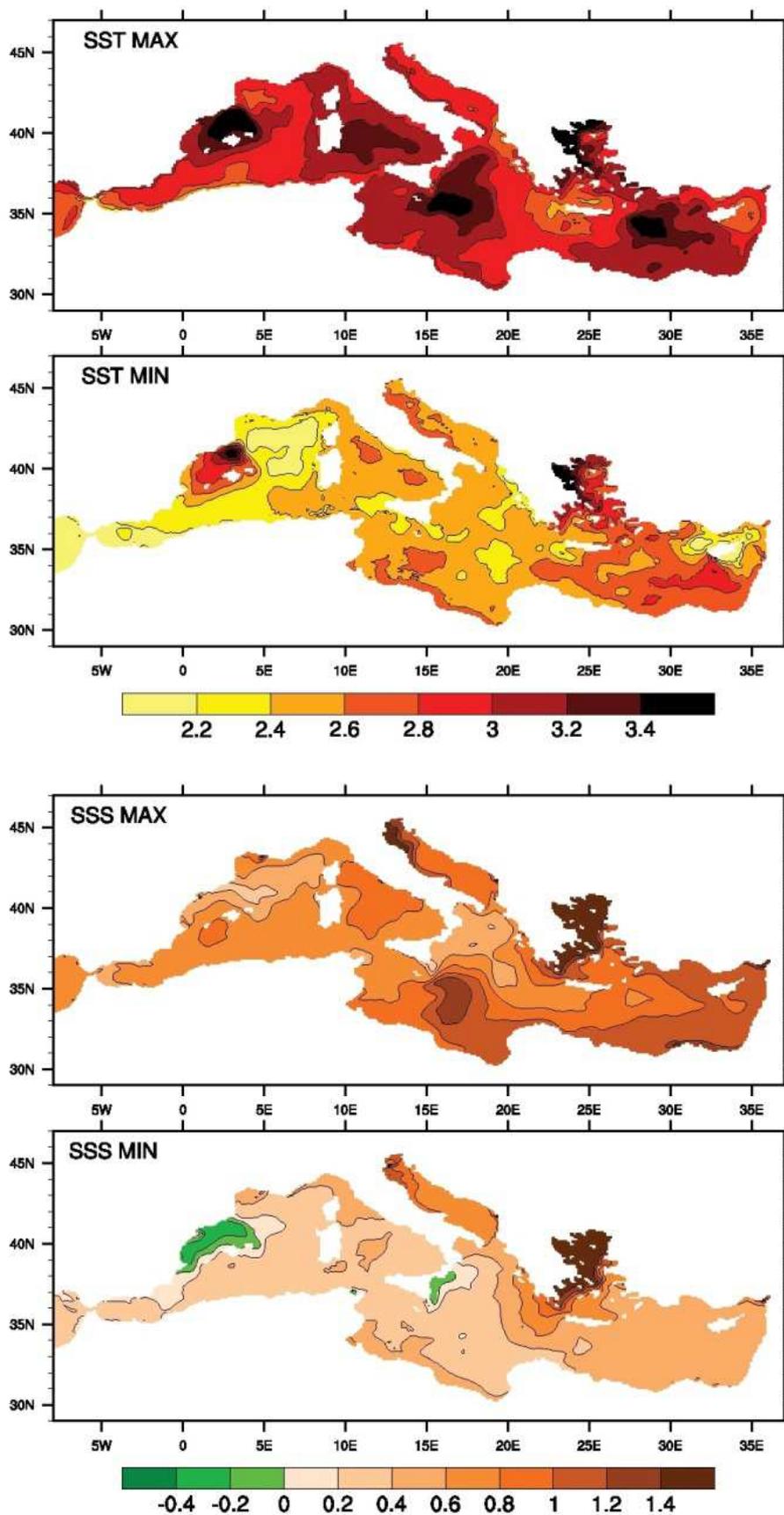


Figure 551 : Deux cartes du haut : évolution de la température maximale (haut) et minimale (bas) de surface de la mer (SST pour Sea Surface Temperature) à l'horizon 2070-2099 par rapport à 1961-1990. Sont représentés en chaque point les résultats d'évolution de la température, en °C, maximums et minimums des six scénarios utilisés. Deux cartes du bas : idem mais pour la salinité de surface (SSS pour Sea Surface Salinity) (Adloff et al., 2015).

Impacts sur les communautés piscicoles

Contrairement aux poissons d'eau douce qui peuvent se déplacer uniquement le long du cours d'eau et de ses annexes, les poissons de mer peuvent changer d'habitat en se déplaçant dans les trois dimensions de l'espace. Cela rend complexe la modélisation de l'évolution des distributions sous l'effet du changement climatique (Albouy et al., 2015).

Les stocks de poisson sont affectés par plusieurs variables parmi lesquels la température de l'eau, la salinité (de surface et de profondeur) et les apports en nutriment par les fleuves. Tzanatos (2013) a étudié les données des 59 espèces les plus pêchées en méditerranée de 1985 à 2007 à partir des données de l'organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). Il a trouvé des corrélations annuelles entre la capture par unité d'effort et la température de surface de l'eau pour 60% des espèces. Pour ces espèces, environ 70% sont affectées négativement avec une réduction moyenne de pêche de 44 % parmi lesquels la sardine, la langoustine, la raie, le requin, la sole, le calmar commun, le merlus. A l'inverse, les espèces à cycle de vie court serait davantage pêchées comme l'anchois, la sériole, le vrai crabe, le calmar, la crevette caramote (Tzanatos et al., 2013).

A partir des résultats des pêches en eau profonde (1000-2200 m) à proximité des Baléares, Cartes et al. (2015) ont observé des modifications de la répartition des communautés de poissons et de crustacés corrélées aux conditions hydroclimatiques entre les années 1985-1992 et 2007-2012. De manière générale ils constatent une concentration de la biomasse aux profondeurs intermédiaires induite par une descente des espèces de surface en réponse à l'augmentation de la salinité et une remontée des espèces des eaux profondes due en partie à une diminution du taux d'oxygène (Cartes et al., 2015). Des travaux du même auteur ont montré une corrélation entre l'abondance du sagre commun (espèce de petit requin) et l'évolution de la salinité et de la température depuis 1952, toujours autour des Baléares (Cartes et al., 2013).

A partir de la projection d'évolution de la température de surface de la Méditerranée obtenue avec le modèle de circulation océanographique NEMOMED8 et le scénario pessimiste A2, Albouy et al. (2012) ont modélisé l'évolution de la richesse spécifique, la diversité phylogénétique et fonctionnelle de 230 espèces côtières de poissons. La modélisation est réalisée à l'horizon 2080-2099. L'augmentation moyenne de la température de surface est de 2.8°C. Dans le Golfe du Lion, la richesse spécifique tend à diminuer avec une perte de 0 à 25 espèces. La diversité phylogénétique et fonctionnelle diminuerait en moyenne de 13.6 et 3 % respectivement à l'échelle de la Méditerranée avec de fortes variabilités locales (Figure 562) (Albouy et al., 2012).

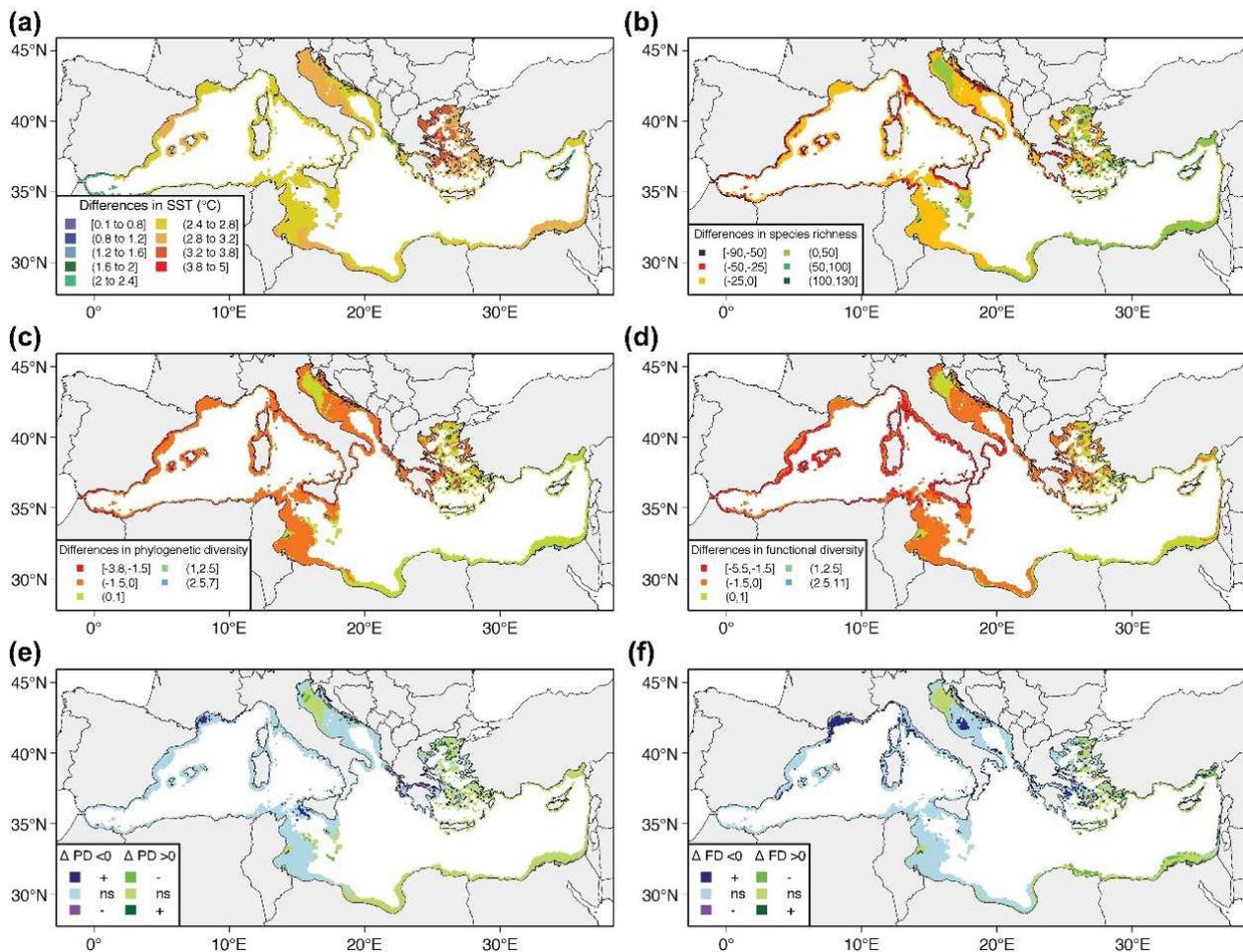


Figure 562 : Cartes de la Méditerranée représentant (a) la température de surface (SST, pour Sea Surface Temperature, en °C) (b) la richesse spécifique piscicole (c) la diversité phylogénétique des poissons (d) la diversité fonctionnelle des poissons à l'horizon 2080-2099 par rapport à 1961-1980. Projections à l'échelle de la méditerranée selon le modèle climatique NEMODED8 forcé sous le scénario A2. La significativité des changements phylogénétiques (e) et de la diversité fonctionnelle (f) est testé en comparaison d'un modèle nul. '+' signifie que les changements sont supérieurs aux projections du modèle nul ($p > 0.975$), '-' indique que les changements sont inférieurs aux projections du modèle nul ($p < 0.025$). ns signifie que les changements ne sont pas significativement différents de ceux issus du modèle nul (Albouy et al., 2015).

Observera-t-on des effets de l'acidification sur la biodiversité ?

L'absorption du CO₂ est supérieure en Méditerranée par rapport à l'océan Atlantique aux mêmes latitudes. Ceci s'explique par la rapide circulation thermohaline induite par une température et une alcalinité relativement élevée. Ainsi, a été observée une diminution du pH sur la période 1994 - 2006 d'environ 0.2 unité pH (soit 0.0018 unité pH/an) à la station de la baie de Villefranche-sur-Mer (Lacoue-Labarthe et al., 2016). Par extrapolation de ces données, la diminution du pH lors des cinquante prochaines années pourrait être de 0.07-0.13 unité pH soit une diminution linéaire de l'ordre de 0.002 +/- 0.0001 unité pH/an. Flecha et al. (2013) ont constaté à la station de Gibraltar sur la période 2012-2015 une diminution moyenne de 0.0044 unité pH/an +/- 0.00006.

Les travaux du GIEC projettent une acidification pour la fin du siècle de 0.065 (0.06 à 0.07) unité pH pour le RCP 2.6 et de 0.31 (0.30 à 0.32) unité pH pour le RCP 8.5 (Stocker et al., 2013).

L'acidification de la mer est un paramètre influençant la biodiversité marine par des effets directs sur la physiologie des individus et indirects comme un changement de biodiversité, des pertes d'habitats et des changements dans le réseau trophique (Lacoue-Labarthe et al., 2016).

Les poissons sont moins sensibles à l'acidification que les mollusques du fait de leur plus forte capacité à se mouvoir et de leur système de régulation du pH sanguin. L'impact de l'acidification domine lors des premiers stades de développement des poissons du fait de la non maturité de leur physiologie et de leur système de régulation du pH dans le sang. De fortes mortalités ont été observées sur les larves de thon jaune ou de *Menidia Beryllina* (Bromhead et al., 2015).

Des travaux récents soulignent que la capacité de régulation du pH sanguin ne sera pas forcément suffisante pour permettre aux poissons de supporter l'acidification attendue, celle-ci ayant des impacts significatifs sur la physiologie des poissons (adultes compris). Des travaux doivent aller dans ce sens pour mieux évaluer la variabilité entre les espèces de cette régulation, la connaissance des mécanismes en jeux et le rôle de la temporalité dans l'acclimatation (Heuer and Grosell, 2014).

L'acidification peut provoquer des déséquilibres de régulation du pH pour de nombreux organismes incluant poissons, invertébrés et faune benthique en impactant le métabolisme, la synthèse de protéines et la santé à long terme des organismes (Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2014).

Gazeau (2013) a réalisé une synthèse des travaux de l'impact de l'acidification sur les mollusques. Il ressort que les effets sur les juvéniles et adultes sont variables entre les espèces ainsi qu'au sein d'une même espèce empêchant de dresser un tableau général. La Figure 573 montre les effets moyens d'une diminution maximale de 0.4 unité pH sur 10 espèces de bivalves et 6 espèces de gastéropodes. A noter que cette diminution est supérieure aux projections les plus pessimistes pour la fin du siècle (-0.31 unité pH). Ces résultats sont issus de 16 publications scientifiques (regroupant 22 expériences). Il ressort un consensus pour les ptéropodes (classe des gastéropodes) pour lesquels toutes les espèces montrent des impacts négatifs. Le pH du sang des mollusques coquillés tendrait à diminuer impactant de nombreux aspects physiologiques (comme la calcification, la respiration, l'excrétion...) avec dans certains cas une augmentation de la mortalité à long terme. Si la reproduction ne semble pas affectée par l'acidification, les stades embryonnaires et juvéniles seraient très sensibles avec une importante diminution de la taille, des déformations et une augmentation de la mortalité des larves (Gazeau et al., 2013).

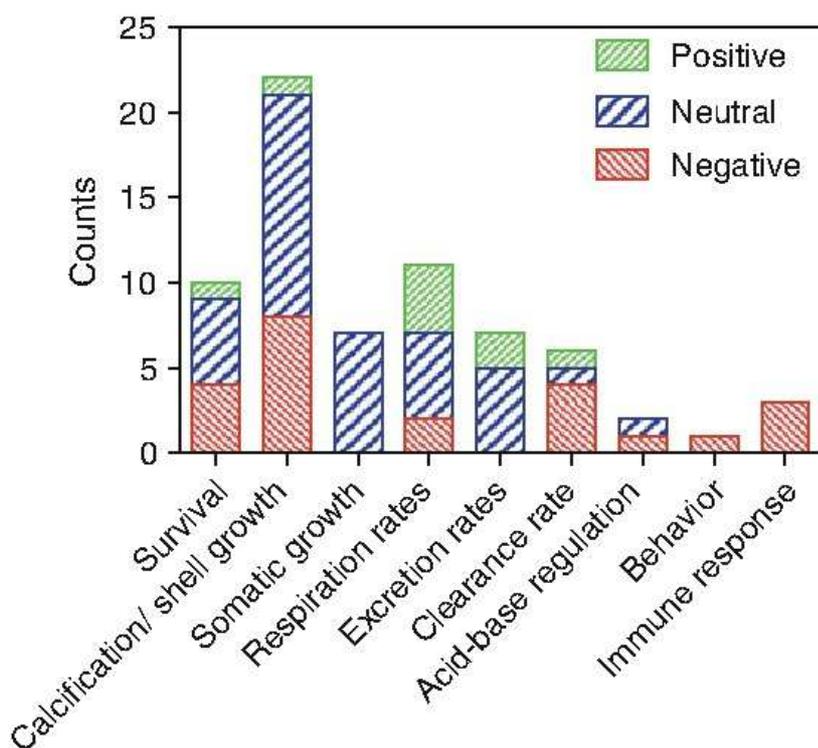


Figure 573 : Résumé des impacts à différents stades de l'acidification des océans sur les jeunes et adultes mollusques coquillés d'après les études considérant une diminution du pH maximale de 0.4 unité pH, soit 16 espèces (Gazeau et al., 2013).

Witmann et al. (2013) ont étudié l'impact de l'acidification des océans projetés sous les différents RCP sur les coraux, les échinodermes, les mollusques, les crustacés et les poissons. Il ressort que les coraux, échinodermes et les mollusques sont plus sensibles à l'acidification que les crustacés (sous le RCP 8.5 soit 936 ppm en 2100). Les larves de poissons pourraient être encore plus sensibles que ces invertébrés, cependant la sensibilité taxonomique sur ces échelles de temps via la capacité d'adaptation est incertaine. La diversité des réponses entre et au sein des taxons (Figure 584) souligne que l'acidification impactera les milieux mais d'une manière complexe (Witmann and Pörtner, 2013).

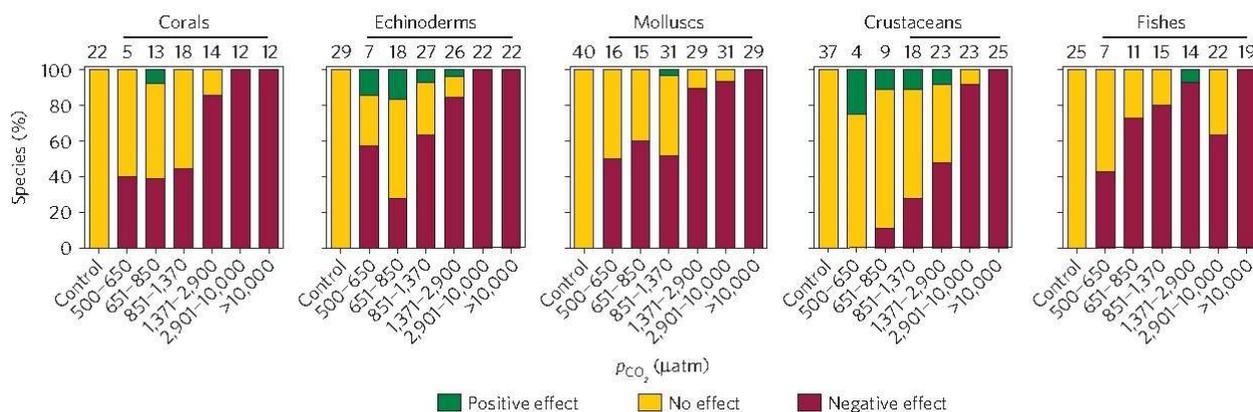


Figure 584 : Sensibilité des espèces à l'acidification. Pourcentage des coraux, Echinodermes, Mollusques, crustacés et poissons montrant des effets négatifs (rouge), positifs (vert) ou pas d'effet (jaune) sur l'indicateur représentant leur santé par tranche de pression partielle en CO₂ (pCO₂, exprimée en µatm) (Wittmann and Pörtner, 2013).

En retenant les espèces pour lesquelles plus de trois études ont analysé l'impact de l'acidification, soit une espèce d'échinoderme (l'oursin violet) et 4 espèces de mollusques (l'huitre creuse, la moule commune, la moule méditerranéenne et la seiche commune), Hilmi et al. 2014 montrent que pour chacune de ces espèces des impacts négatifs sont recensés incluant des retards de croissance, un accroissement de la mortalité et des altérations physiologiques (Hilmi et al., 2014).

Une étude menée sur trois espèces de bivalves (moule, palourde commune et *Chamelea gallina*) en deux localités différentes (Italie et Portugal) montre des réponses parfois contradictoires pour une même espèce à l'acidification sur la croissance et la calcification de la coquille des juvéniles en fonction de la localité ainsi que sur d'autres aspects physiologiques (Range et al., 2014).

D'autres travaux récents montrent que la diminution observée de 0.05 unité pH sur la période 1967-2003 au nord-ouest de la mer de Ligurie n'est pas corrélée à une diminution de l'abondance de trois familles de ptéropodes (Limaciniidae, Cavoliniidae et Creseidae) sur la même période. L'étude montre au contraire un accroissement ponctuel de cette abondance tous les 14 ans environ corrélé à un cycle de variation de la température de surface. Cela traduit le besoin de prendre en compte les autres facteurs de stress et qu'une diminution de 0.05 unité pH n'est pas suffisante pour impacter localement l'abondance (Howes et al., 2015).

Concernant la population benthique il ressort que pour les coraux, la tendance serait à une diminution de la croissance et une augmentation du stress mais les réponses sont variables en fonction des espèces ; la plupart des mollusques adultes semblent impactés négativement par l'acidification et de nombreuses macroalgues sont tolérantes à l'acidification (Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2014).

Les ressources marines incluant les poissons et mollusques sont dépendantes de la structure et du fonctionnement des réseaux trophiques régionaux et seront donc impactées par une modification de l'abondance et de la qualité des niveaux trophiques inférieurs (phyto et zooplancton). Les observations sur les herbiers marins tendent à montrer un effet « bottom-up » de l'acidification sur la biomasse d'herbier qui serait contrôlé par un effet « top-down » consistant en un remplacement des espèces peu tolérantes à l'augmentation de la concentration en carbone dissous par d'autres plus tolérantes (Lacoue-Labarthe et al., 2016). Le phytoplancton verrait sa composition évoluer, les espèces non calcifiées seraient plus favorisées au détriment des espèces calcifiantes. La réponse des communautés bactériennes est incertaine (Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2014).

L'étude de l'impact de l'acidification est récente. Elle a commencé au début des années 2000 par la compréhension des processus physico-chimiques de l'acidification. Par la suite de nombreux travaux ont étudié l'impact sur des individus lors des différents stades phénologiques. La majorité des études a montré des impacts négatifs. Toutefois les diminutions du pH étaient majoritairement supérieures aux tendances observées et aux projections. Ont par la suite émergé des études sur l'impact à long terme sur les espèces, avec des résultats contradictoires. Actuellement, des études en milieu naturel émergent, plus représentatives de la réalité, elles peuvent montrer des résultats en contradiction avec les études centrées uniquement sur l'effet de l'acidification. De nombreux travaux ne montrent pas d'impacts, voire des effets positifs, les effets d'autres facteurs pouvant être dominants. Cela nous conduit à rester vigilants mais empêche de dégager des tendances. Les interactions trophiques, les particularités spatio-temporelles,

l'accroissement de la température, de la salinité et les capacités d'acclimatation, d'adaptation et d'évolution des espèces peuvent contrer les effets néfastes observés en condition particulière (Gazeau et al., 2013). De plus un manque de connaissance existe sur de nombreuses espèces (Hilmi et al., 2014). Il est nécessaire d'effectuer des recherches à différentes échelles spatiales, d'intégrer les pressions anthropiques, de travailler avec une approche multidisciplinaire et de disposer de plus de données issues du terrain (Browman, 2016 ; Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2014).

Les virus influencent de manière directe et indirecte les cycles biogéochimiques des océans, la séquestration du carbone et les échanges de gaz avec l'atmosphère. Le changement climatique aura des impacts sur la fonction, les assemblages et les interactions hôtes-virus. Si l'on sait qu'ils joueront un rôle majeur, on ne peut pas encore prédire si ces changements amplifieront ou atténueront les impacts du changement climatique sur les écosystèmes marins et le rôle des océans dans le fonctionnement du climat. Il est pour cela nécessaire d'acquérir des connaissances sur leur fonctionnement et leur dynamique (Danovaro et al., 2011).

Les écosystèmes méditerranéens sont donc soumis à des pressions cumulées de natures différentes. A l'échelle de la Méditerranée, les contraintes induites par le changement climatique dont l'augmentation de la température, de la salinité, du rayonnement ultraviolet et l'acidification ont un impact majeur. A des échelles spatiales plus fines, et notamment le long des côtes, ce sont les pressions anthropiques qui sont majoritaires via la pêche, les apports de nutriments, l'urbanisation... (Micheli et al., 2013).

INCIDENCES CLES - BIODIVERSITE

- L'impact des activités anthropiques sur la biodiversité aquatique devrait rester supérieur à celui du changement climatique. Le changement climatique apporte une pression supplémentaire, principalement induite par l'augmentation de la température des cours d'eau.
- L'observation de la distribution passée d'espèces de poissons est cohérente avec les projections. Les espèces d'eau froide verront leur aire de distribution diminuer et se déplacer vers l'amont des cours d'eau. Les espèces rencontrées à l'aval, où l'eau est plus chaude, remonteront également, gagnant de nouvelles aires de distribution. Ces déplacements concourront à homogénéiser les communautés le long du gradient amont-aval.
- Les zones amont des cours d'eau deviendront des espaces refuge pour de nombreuses espèces. Les zones hydrographiques des Alpes devraient voir augmenter la diversité des assemblages des espèces piscicoles. Cela renforce le besoin de conservation et d'accessibilité de ces espaces.
- Les zones humides seront principalement affectées par une augmentation du risque d'assèchement. Les réponses de ces milieux aux changements climatiques sont très incertaines. Cela devrait apporter des contraintes à leur bon fonctionnement, entraînant une diminution des services écosystémiques associés à ces milieux.
- Assurer la connectivité latérale et longitudinale des cours d'eau ressort à nouveau comme un moyen d'action majeur face à l'enjeu biodiversité. En ne cherchant pas à contrer les effets du changement climatique mais à lever les pressions anthropiques, on augmente la capacité d'adaptation des milieux.
- Les phases d'assec pourraient s'intensifier et toucher de plus en plus de cours d'eau, notamment sur le pourtour méditerranéen. Ces régimes hydrologiques singuliers s'accompagnent d'une biodiversité spécifique nécessitant d'adapter la gestion de ces milieux. La présence et l'état de zones hyporhéiques ressort comme un facteur de résilience dominant pour les écosystèmes.
- La Méditerranée devrait voir sa température et sa salinité de surface augmenter respectivement de +0.7 à +2.6°C et + 0.48 à +0.89 g/l à la fin du siècle. Cela modifiera la distribution des espèces. Malgré le remplacement de certaines espèces par d'autres, les projections disponibles montrent une tendance à la diminution de la richesse spécifique.
- Si la tendance à l'acidification des mers par le passé et pour le futur fait consensus dans la communauté scientifique, son impact sur la biocénose est encore très mal connu et peu prévisible.

4 IMPACTS SUR LE LITTORAL

Les littoraux sont des milieux dynamiques complexes dont il est difficile de projeter des scénarios d'évolution. Il est nécessaire d'améliorer nos connaissances sur les processus de contrôle qui interagissent à différentes échelles spatiales et temporelles (flux hydro-sédimentaires, changement climatique et aménagements anthropiques principalement). Une gestion intégrée nécessite de continuer et d'augmenter l'acquisition des données représentatives de ces milieux et de diffuser les connaissances aux acteurs concernés (Roche et al., 2016).

4.1 L'ELEVATION DU NIVEAU DES MERS

A l'échelle planétaire, les données marégraphiques indiquent un taux moyen d'élévation du niveau de la mer (ENM) de 1.7 ± 0.2 mm/an sur la période 1901-2014 (Church and White, 2011) confirmée par l'analyse récente de Wenzel and Schröter (2014). Pour comparaison, il a été estimé que depuis les 2-3 derniers millénaires, l'ENM était stabilisé à un taux d'environ 0.5 mm/an (Cazenave and Cozannet, 2014).

La chronique du marégraphe de Marseille dépasse les 120 ans. Sur la période 1849-2012, le taux d'élévation était de 1.08 mm/an ± 0.04 mm (Wöppelmann et al., 2014). Les travaux de Galassi et al. (2014) sont cohérents en montrant un taux d'élévation de 1.26 mm/an ± 0.05 sur la période 1885-2012.

Depuis le début des années 1990, le niveau des océans est suivi par satellites. Cette technologie permet une représentation du niveau des mers avec une précision d'environ 2-3 cm (Cazenave and Cozannet, 2014). A partir de ces données, plusieurs travaux montrent un doublement du taux moyen annuel d'ENM de ces deux dernières décades par rapport au taux du XXème siècle. Sur la période 1993-2014, ce taux serait de 3.2 ± 0.4 mm/an (Cazenave and Cozannet, 2014; Nerem et al., 2010). Rietbroek et al. (2016) montrent une tendance de 2.74 ± 0.58 mm/an sur la période 2002-2014. Avec une contribution majoritaire de l'expansion thermique de $+1.38 \pm 0.16$ mm/an et de la fonte des glaciers (calottes polaires incluses) de 1.37 ± 0.09 mm/an (Figure 65). Ces résultats traduisent notamment la contribution importante de l'expansion thermique, bien supérieure aux estimations passées (Rietbroek et al., 2016).

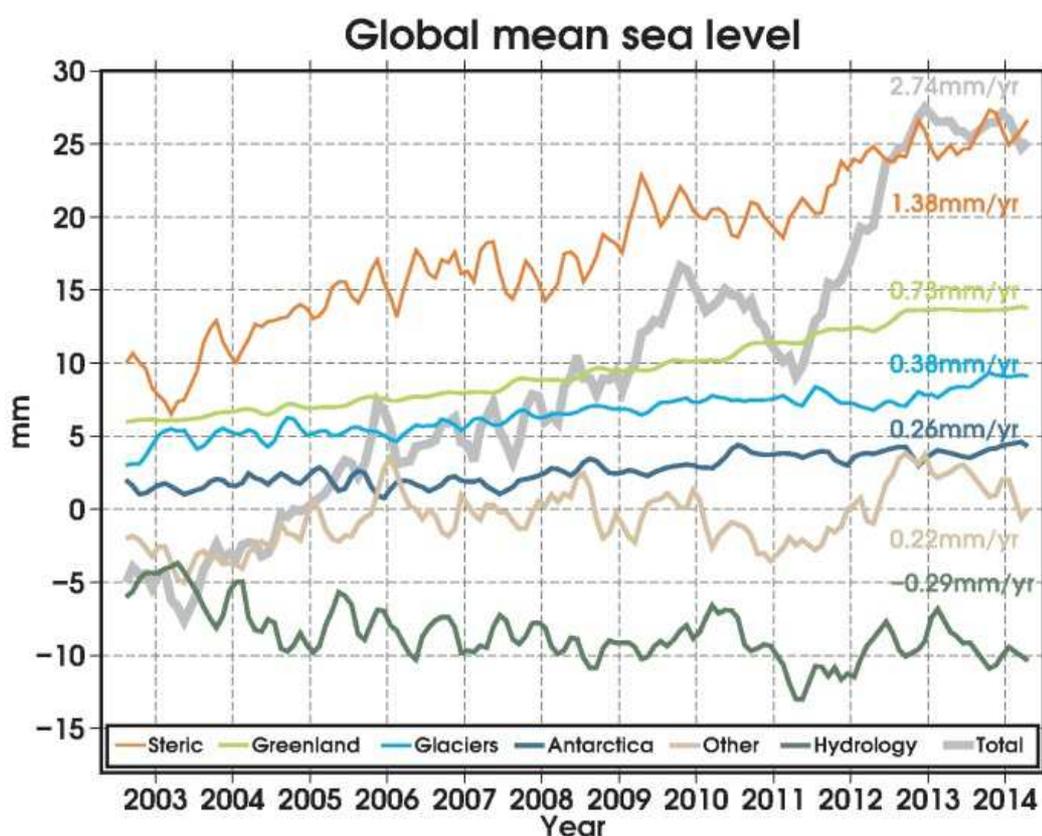


Figure 595 : Moyennes glissantes (sur trois mois) de l'élévation globale du niveau de la mer sur la période 2003-2014 avec la contribution relative des différents processus (courbes de couleur). Les tendances sont dérivées des données non lissées (Rietbroek et al., 2016).

Même si cela est probable, de nombreuses incertitudes empêchent d'affirmer que cette intensification de l'élévation du niveau des mers se poursuivra dans le futur. Ces observations sont réalisées sur une période de temps trop courte. De plus le niveau des mers est fonction de la variabilité multidécennale des cycles des grands courants océaniques dont les projections sont incertaines (Chambers et al., 2012; Ezer et al., 2013; Rietbroek et al., 2016). A souligner également qu'à partir des mêmes données, les résultats des projections peuvent être contradictoires, ajoutant une forte incertitude associée à la méthode utilisée (Visser et al., 2015).

A la variabilité temporelle de l'élévation du niveau des mers s'ajoute une variabilité spatiale. Localement, l'élévation du niveau de la mer peut varier d'environ 30% autour de la moyenne (Slangen et al., 2014). C'est principalement le cas le long des côtes où l'élévation observée est globalement plus importante. Ces variations induites par différents facteurs empêchent de réaliser des projections à des échelles fines (Le Cozannet et al., 2015). Sur la période 1992-2013, les taux d'élévation du niveau des mers en Europe sont représentés par la Figure 606. Les variations de tendances sur cette période sont principalement dues à la variabilité interne du climat (notamment l'Oscillation Pacifique Décennale).

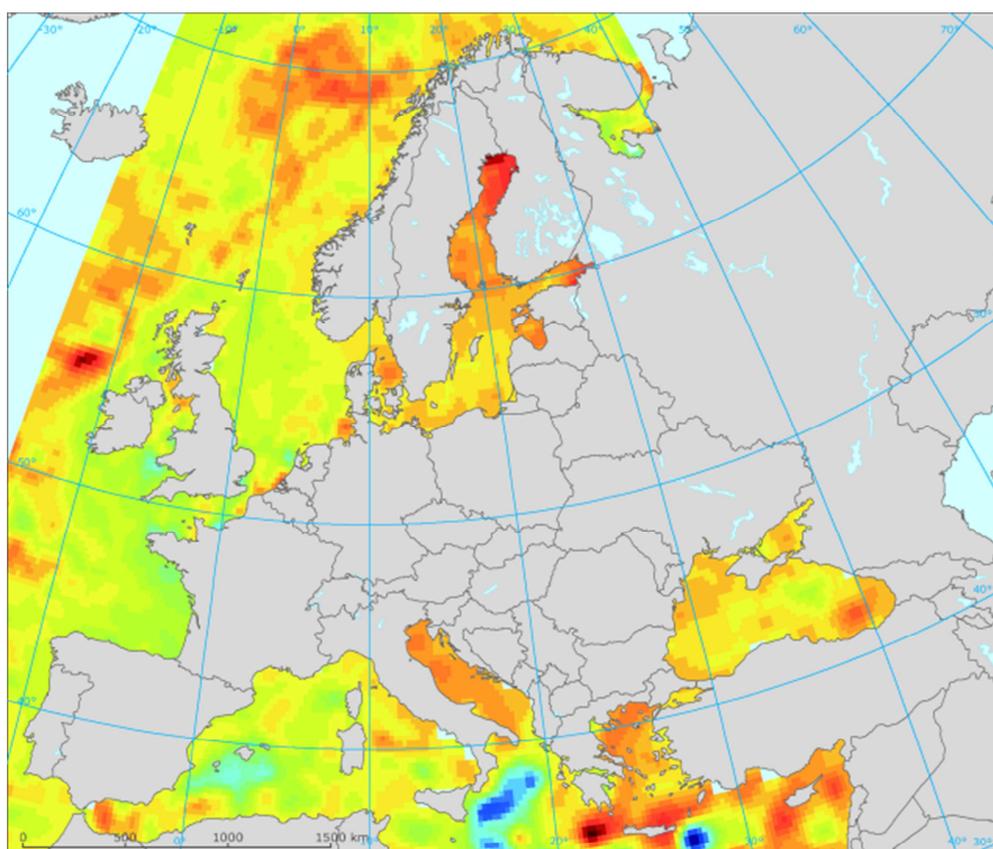
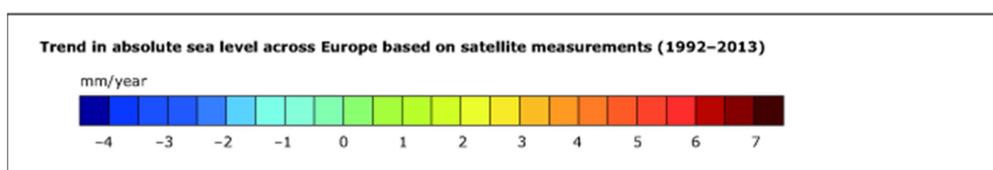


Figure 606 : Taux d'élévation absolu du niveau de la mer méditerranée sur la période 1992-2013 à partir de mesures satellitaires (www.eea.europa.eu).



Hormis les calottes polaires, la seule fonte des glaciers entrainerait une augmentation du niveau moyen des mers de 0.4 m. Mais l'ENM ne s'arrêtera pas avec la fonte des glaciers ni suite à une diminution des émissions des GES. L'expansion thermique des océans continuera pendant les siècles à venir du fait de l'inertie des transferts de chaleur en profondeur des océans. C'est ce processus qui sera le principal moteur de l'élévation des océans (Figure 617). A la fin du siècle, l'expansion thermique devrait représenter 30 à 55 % de l'ENM suivi par la fonte des glaciers pour environ 15 à 35 %. Ainsi les projections à l'horizon 2100 sont d'une élévation de moins de 1 m à plus de 3 m sous le scénario le plus pessimiste (IPCC, 2014).

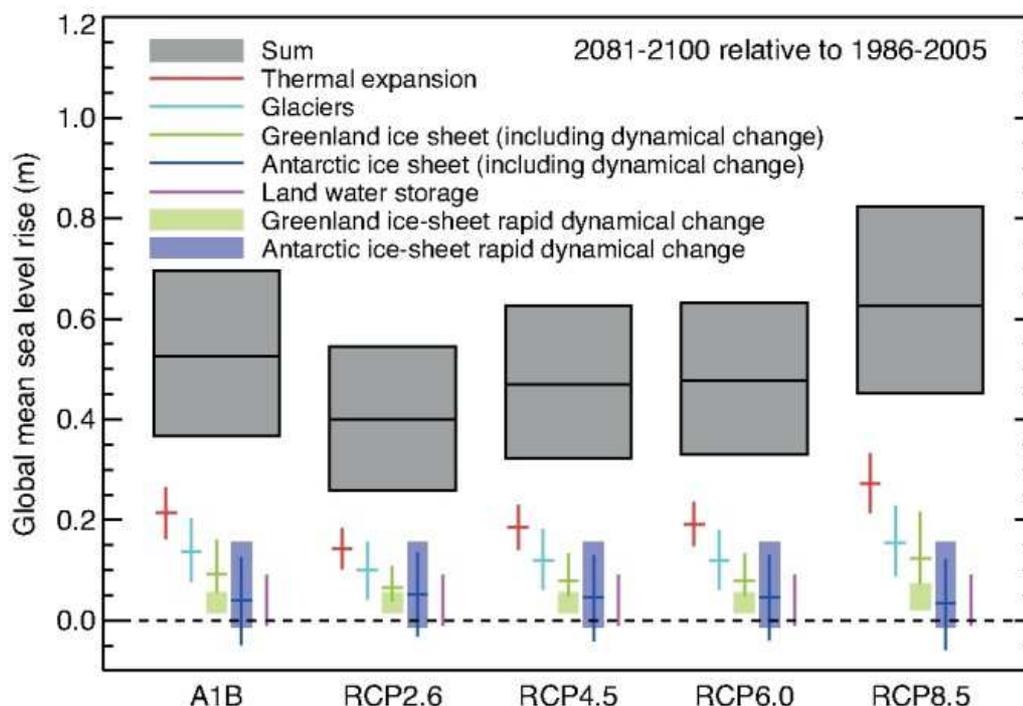


Figure 617 : Projections de l'élévation du niveau moyen global de la mer (en mètres) et détail des différentes sources contributions à cette élévation pour 2081-2100 par rapport à 1986-2005 selon cinq scénarios d'émission.

En réponse au réchauffement des océans, à la fonte des glaciers et des calottes polaires, le Vème rapport du GIECC projette une ENM comprise entre 26 et 55 cm sous le RCP 2.6 et entre 45 et 82 cm pour le RCP 8.5 pour la fin du siècle par rapport à la période 1985-2005 (tableau 7).

Scénarios	Fourchettes pour 2046-2065 / 2081-2100
RCP2.6	0.17 - 0.31 / 0.26 - 0.55
RCP4.5	0.19 - 0.33 / 0.32 - 0.63
RCP6.0	0.18 - 0.32 / 0.33 - 0.63
RCP8.5	0.22 - 0.37 / 0.45 - 0.82

Tableau 7 : Projections de l'élévation du niveau moyen global de la mer à la fin du XXIème siècle (en mètres pour 2046-2065 et 2081-2100 par rapport à 1986-2005). Les fourchettes de valeurs données pour chaque scénario d'émission correspondent à une probabilité de 67 % (changement « probable ») (IPCC, 2014).

Malgré les incertitudes évoquées précédemment, il est probable que le taux d'ENM du XXI^{ème} siècle sera supérieur à celui observé à la fin du XX^{ème} siècle. Les projections d'ENM de l'AR5 sont supérieures à celles de l'AR4. Cela est expliqué principalement par une meilleure représentation de la contribution des calottes polaires.

Des travaux basés sur des méthodes semi-empiriques projettent des augmentations supérieures, de l'ordre du mètre. Si ces résultats sont controversés de par la méthodologie employée, les incertitudes, notamment concernant la contribution de la fonte des calottes de l'Arctique et du Groenland nécessitent de considérer la possibilité d'une augmentation supérieure aux fourchettes établies par le GIEC. Javrejeva et al. (2014), ont réalisé une fonction de probabilité de l'ENM (Figure 68) à partir de modèles à base physique sous le scénario RCP8.5 pour la fin du siècle. En intégrant les incertitudes sur les différents processus et les contributions relatives à l'ENM, il ressort qu'il est probable à 95 % que l'ENM ne dépasse pas 1.80 m à l'horizon 2100. La médiane correspond à une augmentation de 80 cm (Jevrejeva et al., 2014).

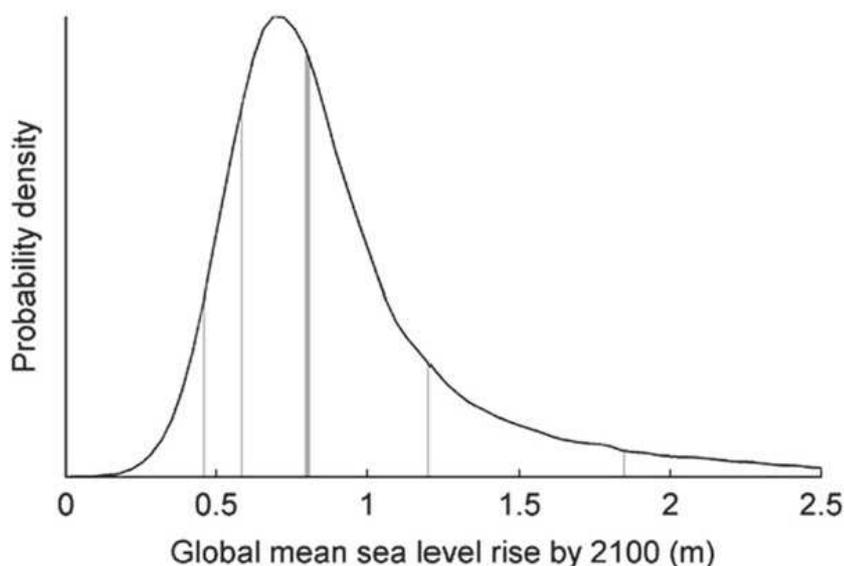


Figure 628 : Projection d'élévation globale de la mer à l'horizon 2100 par rapport à 2000 sous le scénario RCP 8.5 et incertitudes. De gauche à droite, les barres verticales représentent les 5, 17, 50, 83 et 95^{ème} percentiles de la courbe de densité de probabilité (Jevrejeva et al., 2014).

En Méditerranée, l'augmentation du niveau de la mer, seulement sous l'effet de l'expansion thermique, serait comprise entre +34 et +49 cm à l'horizon 2070-2099 par rapport à 1961-1990 en fonction des SRES. L'élévation totale serait de +50 à +80 cm (figure 69, Adloff et al., 2015). Les travaux de Galassi et al. (2014), montrent une augmentation probable de la Méditerranée à l'horizon 2040-2050 comprise entre +9.8 et +25.6 cm (minimum et maximum) dont la cause principale à cet horizon serait la fonte des glaciers terrestres (Galassi and Spada, 2014).

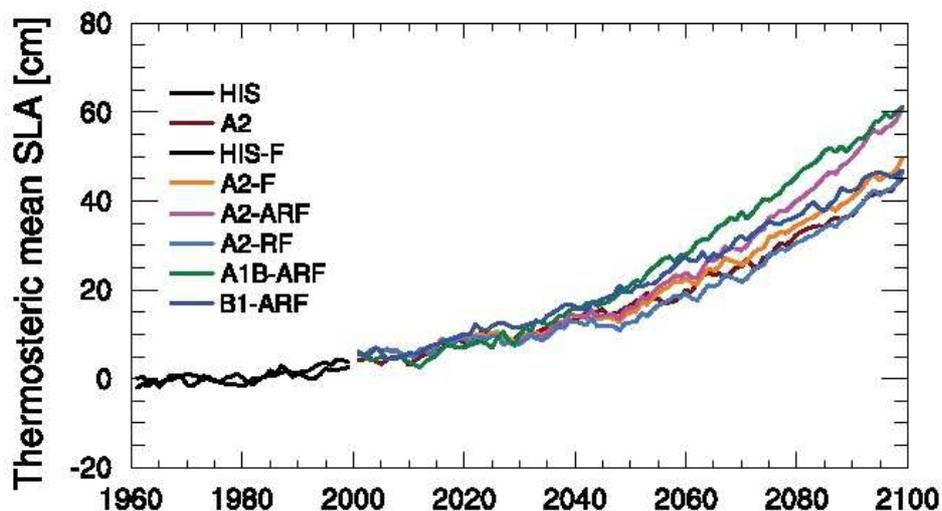


Figure 6963 : anomalies annuelles moyennes du niveau de la mer méditerranée (en cm) sous l'effet seul de l'expansion thermique pour l'ensemble des simulations (courbes colorées) par rapport à 1961-1990 (Adloff et al., 2015).

L'élévation du niveau de la mer tendra à aggraver l'érosion, l'accrétion, les submersions et les intrusions salines. Pour chacun de ces impacts, les incertitudes entourant ces projections sont fortes du fait des particularités locales des côtes et de la combinaison de plusieurs facteurs, l'ENM étant l'un d'eux mais pas forcément le facteur principal (Cazenave and Cozannet, 2014; Cramer et al., 2014).

4.2 IMPACTS SUR LA SUBMERSION MARINE

Les submersions temporaires sont le résultat de deux processus principaux : la surcote atmosphérique (aussi appelée onde de tempête) induite par les conditions de vent et de pression atmosphérique et la surcote liée aux vagues induite par le déferlement des vagues à la côte. Un autre phénomène, le jet de rive, entraîne des submersions temporaires, il représente le flux et le reflux des vagues (considérées individuellement) sur la côte (Figure 70). Les phénomènes extrêmes sont donc imputables à la conjonction de ces différents phénomènes entre eux. En Méditerranée, le marnage induit par la marée n'est pas un facteur dominant les submersions puisqu'il est de l'ordre d'une dizaine de centimètres.

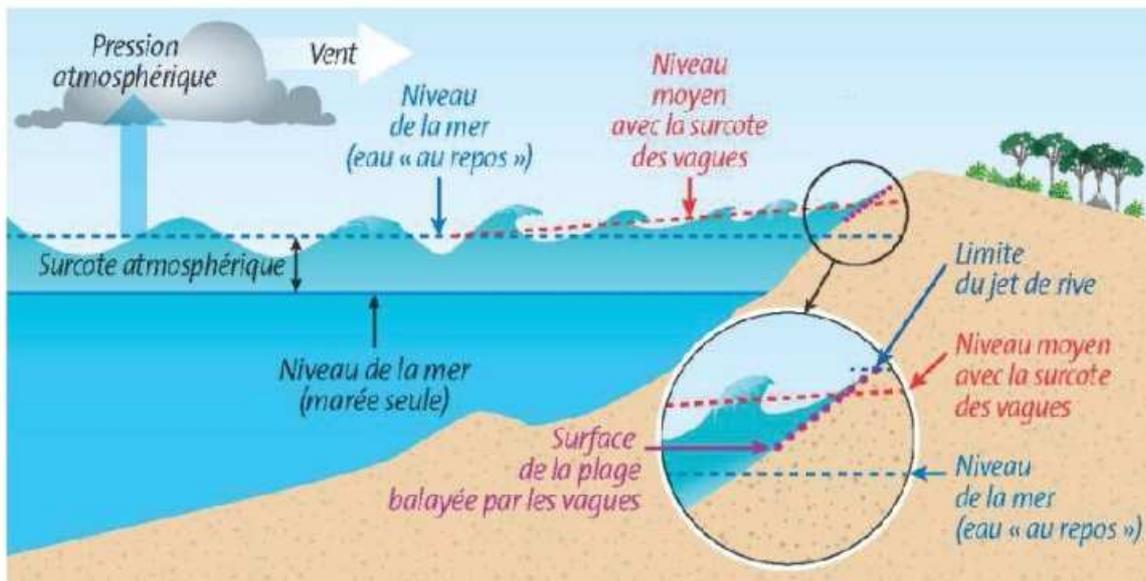


Figure 640 : Principaux phénomènes physiques contrôlant le niveau d'eau ; ce schéma n'est pas à l'échelle. (Planton et al., 2015)

Le V^{ème} rapport du GIEC projette sous les RCP 4.5 et 8.5 une légère diminution de la fréquence des tempêtes dans l'hémisphère nord. L'indice de confiance sur ces projections est cependant faible, notamment en Méditerranée (IPCC, 2013). Les études publiées depuis présentées si dessous montrent une tendance similaire.

A partir des projections climatiques issues de 7 modèles forcés par le scénario A1B et d'un modèle hydrodynamique de surface (HYPSE), Conte et al. (2013) ne montrent pas de tendance claire d'évolution des surcotes atmosphériques à l'horizon 2021-2050 en Méditerranée par rapport à la période de référence 1971-2050. Les résultats des modélisations projettent des modifications des ondes de tempête de plus ou moins 5% (majorité négative). Il est difficile d'en dégager une tendance du fait de résultats contradictoires spatialement et de nombreuses incertitudes. En revanche les auteurs présentent une tendance significative à la baisse de l'amplitude des phénomènes extrêmes (minimum comme maximum) et cela malgré les incertitudes (Conte and Lionello, 2013).

Les travaux d'Androulidakis et al. (2015), également réalisés sous le scénario A1B, projettent peu d'évolutions des tempêtes à l'ouest de la Méditerranée. La fréquence des tempêtes d'hiver pourrait diminuer. La hauteur maximale des surcotes dues aux tempêtes diminuerait légèrement dans le Golfe du Lion de 0 à -4% et augmenterait légèrement sur le littoral PACA de 0 à +4% à l'horizon 2050 par rapport à la période 1951-2000. Les hauteurs maximales à la fin du siècle par rapport à la première moitié du XXI^{ème} siècle diminueraient de -4 à -6%. La durée des événements serait raccourcie (Androulidakis et al., 2015).

A partir du modèle climatique ARPEGE forcé sous trois scénarios (B1, A1B et A2) et du modèle océanique à base physique HAMSON. Šepić et al. (2012) proposent des tendances d'évolution de la variabilité des hauteurs d'eau maximales en Méditerranée à l'horizon 2100. Il ressort une tendance significative, particulièrement d'octobre à décembre pour les scénarios A1B et A2 (moyens et pessimistes) à une diminution de la variabilité (en considérant le 75^{ème} centile). A l'inverse, la variabilité des niveaux extrêmes tendrait à augmenter (Šepić et al., 2012).

On peut retenir de ces travaux que les niveaux d'eau maximums augmenteront sous l'effet de l'élévation du niveau des mers uniquement. L'analyse des niveaux extrêmes passés montre une tendance similaire avec une augmentation des niveaux extrêmes du même ordre de grandeur que l'ENM ainsi qu'une légère diminution de la variabilité (Planton et al., 2015 ; Woodworth and Menéndez, 2015).

Le Cozannet et al. (2015) ont étudié l'origine des incertitudes associées aux projections d'évolution des phénomènes de submersion à Marseille en attribuant des lois de probabilité à chacun des facteurs à l'origine du phénomène sous les quatre RCPs à l'horizon 2200 (Figure 651). Il ressort que les processus locaux, principalement les surcotes liées aux vagues sont les principaux facteurs expliquant la variance jusqu'à environ 2050. A partir de 2080, c'est l'augmentation moyenne du niveau de la mer qui entraîne le plus d'incertitude. L'incertitude associée à la variabilité du niveau de la mer tend vers 0 à l'inverse du choix du RCP qui augmente et devient significatif à partir de 2100 (Le Cozannet et al., 2015).

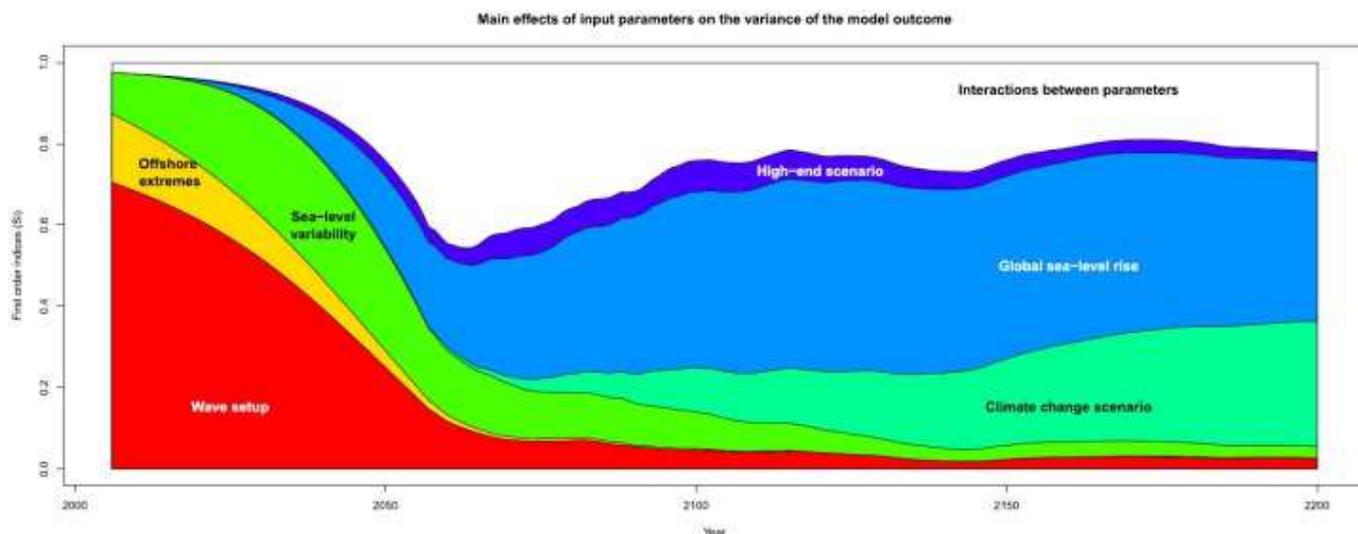


Figure 651 : Evolution de l'indice de Sobol de premier ordre (Si) au cours du temps, pour six paramètres (« wave setup » : surcote liée aux vagues, « offshore extreme » : niveaux niveaux extrêmes aux larges, « sea-level variability » : variabilité du niveau de la mer, « high-end scenario » : scénario d'élévation maximale du niveau de la mer, « global sea-level rise » : élévation du niveau de la mer mondiale, « climate change scénario » : scénario de changement climatique). Ces indices représentent la contribution relative de chaque paramètre d'entrée sur la variance des projections, obtenue en moyennant les effets d'autres paramètres. Plus l'indice est grand, plus il est représentatif de la variance des projections (Le Cozannet et al., 2015).

La position du trait de côte représente l'interface entre la terre et la mer. Il est en constante évolution, contraint par des facteurs endogènes relativement constants (topo-bathymétrie, géologie, type de cote et d'habitat) et exogènes variables à l'origine des évolutions saisonnières et pluriannuelles (hydrodynamique, flux sédimentaire, météorologique). Les littoraux sont des milieux dynamiques.

Le trait de côte des zones basses meubles est la résultante d'un équilibre dynamique à l'échelle annuelle. Des temps d'érosion (perte de sédiments) généralement lors de tempêtes peuvent alterner avec des phases d'accrétion (accumulation de sédiments). Localement, les processus peuvent s'équilibrer ou l'un des deux peut être majoritaire. Ces processus sont naturels, ils sont caractéristiques de ces zones. A l'échelle pluriannuelle, si le bilan des apports fluviaux en sédiment tant à évoluer, une tendance de long terme à l'érosion ou à l'accrétion verra le jour. Les côtes à falaise reculent sous l'effet combiné de la mer et des paramètres atmosphérique (cycles gel/dégel et infiltration des précipitations). Ces phénomènes sont localisés dans le temps et dans l'espace, le recul des falaises dépassent rarement 0.5 m/an en France (Roche et al., 2016).

Les tempêtes jouent un rôle majeur dans l'évolution des plages. Sur le littoral méditerranéen français, des travaux ont montré que l'impact d'un épisode de tempête est principalement fonction de l'état initial de la plage et de la hauteur maximale de la houle lors de l'évènement via sa contribution majoritaire au jet-de-rive avec des effets de seuils pouvant être identifiés. La surcote due au vagues et la durée de la tempête ont une influence secondaire (Gervais, 2012).

Tendances d'évolution du trait de côte et des flux de sédiments

Près de 46 % des côtes méditerranéennes (d'une longueur totale de plus de 46 000 km) ont été formés par des apports de sédiments via les fleuves (Poulos and Collins, 2002). La gestion du trait de côte nécessite donc une approche combinée avec le bassin versant (Anthony et al., 2014).

Les apports de sédiments dans le Delta du Rhône sont principalement conditionnés par les activités anthropiques sur le bassin versant. L'étude sédimentologique du delta a permis de quantifier les apports en sédiment sur les 6000 dernières années. Il ressort qu'ils sont le résultat cumulé de variables climatiques et anthropiques mais que ce sont les activités humaines qui ont le plus d'impact. La période romaine, accompagnée par une forte déforestation est à l'origine d'un apport massif en sédiment. Une seconde phase d'accumulation a eu lieu lors du petit âge glaciaire par une conjonction d'une augmentation des débits et une plus forte mobilisation des sédiments via le développement de l'activité agricole. Ces deux situations ont entraîné un développement du delta. Cela contraste avec la tendance des deux derniers siècles, plus marquée ces 50 dernières années par une déstabilisation des côtes et une diminution des apports en sédiment. Ceci étant la résultante du développement du dragage, de la reforestation des bassins versant, de l'accumulation dans les barrages et de la régulation hydraulique des cours d'eau (Anthony et al., 2014). Les travaux de Provansal et al. (2014) montrent sur le delta du Rhône que la cause principale de la diminution des apports en sédiment lors des 130 dernières années est la déprise agricole qui s'accompagne d'une reforestation et donc d'une diminution de l'érosion des terres suivi par la régulation des cours d'eau. Les barrages et le dragage, contrairement à l'idée établie, auraient un impact relatif moins important (Provansal et al., 2014).

Brunel et al. (2014) ont réalisé des bilans quantitatifs des volumes de sédiment apportés dans le Golfe du Lion en comparant les apports entre 1895 et 2009. Il ressort pendant cette période une diminution globale des apports de -26.1 ± 4.6 Mm³ (Figure 662). Jusqu'en 1984, le bilan était positif ($+4.1$ Mm³ ± 3.5). C'est le déficit des apports depuis 1984 (-30.2 ± 4.2 Mm³) qui est à l'origine du déficit sur la période de 1895 à 2009. L'impact de la diminution des apports est une tendance globale à l'érosion. Elle est imputable selon les auteurs à une faible distribution des sédiments aux estuaires le long des côtes, un gradient le long du transport, des pertes vers le large (zones à plus de 12 m de profondeur) et au dragage. Les auteurs soulignent que la tendance à l'érosion continuera dans le futur si la diminution des apports en sédiment par les cours d'eau se poursuit (Brunel et al., 2014).

A noter que les stratégies de recharges artificielles des plages ne permettent pas de compenser les pertes. Entre 1984 et 2009 les apports ont été de 2.6 Mm³, soit environ 12 fois moins que les pertes. En revanche les activités d'extraction sur les rivières présentent des impacts plus significatifs car entre 1971 et 1992 c'est environ 7 Mm³ de sédiments retirés des cours d'eau soit près d'un tiers du déficit du secteur du Narbonnais et du Roussillon entre 1984 et 2009 (Brunel et al., 2014).

La tendance d'évolution du trait de côte a été réalisée sur l'ensemble des côtes françaises en comparant une orthophotographie historique (datant de 56 à 87 ans sur les côtes méditerranéennes) et une actuelle. Le déplacement du trait de côte entre les deux instants montre une tendance d'évolution à long terme d'érosion, d'accrétion ou de stabilité mais ne permet pas d'analyser la dynamique des processus. La démarche présente des limites dans les zones fortement anthropisées. L'incertitude sur les taux d'évolutions présentés est estimée à ± 0.25 m/an selon les auteurs (Roche et al., 2016).

A l'échelle nationale, tous les départements sont concernés par l'érosion. Le pourcentage des côtes des départements en érosion va de moins de 5% en Côte d'Armor à 75% Gironde. 27 % du littoral méditerranéen est en érosion contre 18 % en accrétion. C'est dans le Gard, les Bouches du Rhône et les Pyrénées Orientales que l'on trouve les taux d'érosion les plus importants, supérieurs à 3 m/an. Des analyses locales sont en cours de réalisation afin de décrire les contextes et processus à l'échelle des territoires (Roche et al., 2016).

A ce jour, on ne peut pas affirmer une relation de cause à effet entre les évolutions du trait de côte constatés et l'élévation du niveau des mers. En effet les chroniques de données de ces deux phénomènes sont le plus souvent insuffisantes temporellement et/ou spatialement pour conclure. Les longues chroniques des marégraphes sont ponctuelles et les dynamiques d'évolution du trait de côte sont souvent manquantes ou ne remontent pas assez loin dans le temps (Le Cozannet et al., 2015).

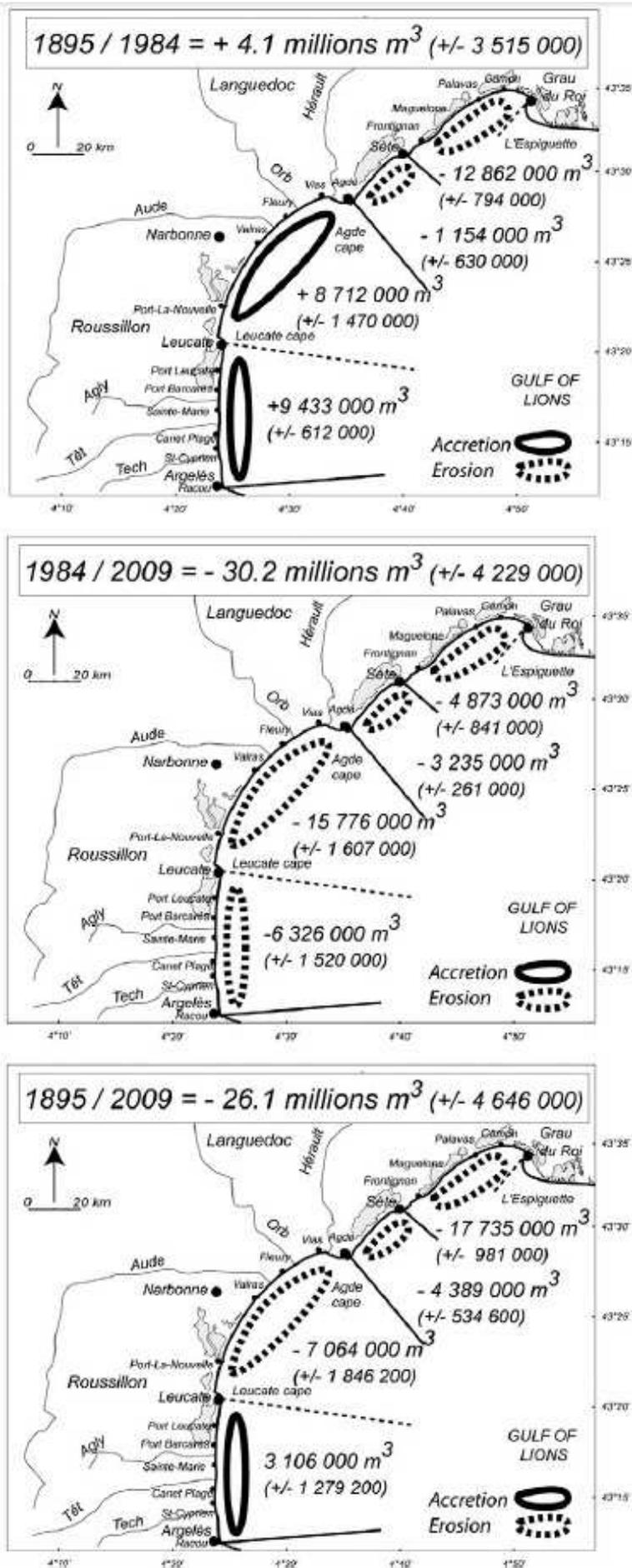


Figure 662 : Bilan sédimentaire (m³) du Golfe du Lion entre 1895/1984 et 1984/2009 par secteur avec les marges d'erreur (Brunel et al., 2014).

Les projections d'évolution

A ce jour, la modélisation ne permet de projeter les dynamiques d'évolution du trait de côte en climat futur. L'exercice est complexe du fait de la superposition de processus intervenant à différentes échelles de temps et d'espace. Leurs dynamiques sont mal connues à ce jour et risquent d'évoluer dans le futur (élévation du niveau des mers, courants, vagues et tempêtes). Ainsi les modèles considèrent souvent une seule échelle spatiale et temporelle et représentent le processus majoritaire. La seconde difficulté est de rendre compte non pas uniquement d'un bilan quantitatif (volumes de sédiments déplacés) mais également de la distribution spatiale des sédiments (French et al., 2015). C'est notamment pourquoi les incertitudes sont fortes sur ces projections et ne permettent pas de dégager des tendances. Une autre difficulté est que la majorité des processus en jeu présente une forte variabilité naturelle (Le Cozannet 2014). Il se développe aujourd'hui des modèles couplés visant à représenter les évolutions à différentes échelles spatiales et temporelles (van Maanen et al., 2015).

Face aux limites de la modélisation, le projet Explore 2070 a non pas caractérisé l'impact du changement climatique sur les côtes mais la vulnérabilité des côtes au changement climatique. Au regard des tendances des études au moment de l'étude et des incertitudes associées, il a été fait l'hypothèse de départ que les régimes des tempêtes, des cyclones, des vagues et des surcotes resteront inchangés à l'horizon 2070 en Méditerranée et que l'ENM serait de 1 m. A partir de données géomorphologiques, géologiques, topographiques, hydrologiques, d'occupation de sols et de zonage des aléas côtiers existant (submersion et érosion), des cartes de vulnérabilité ont été produites à l'échelle 1 :100 000 sur le littoral à partir d'une approche multicritère principalement à dire d'expert. Deux scénarios ont été étudiés, l'un basé sur les tendances observées sans intégrer l'ENM et l'autre en prenant en compte l'ENM de 1 mètre (Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, 2012(f)).

Il ressort de cette analyse que pour les deux scénarios, les vulnérabilités aux aléas physiques de submersion et d'érosion sont les plus fortes pour les zones basses comme les rives des étangs de Sigean ou Leucate, les lidos comme celui de Carnon à Frontignan et les formations deltaïques comme la Camargue. Ces zones sont déjà les plus vulnérables dans le scénario tendanciel, l'ENM vient amplifier leur vulnérabilité. Il ressort également que les lits majeurs des cours d'eau deviendront plus vulnérables aux risques de submersion via l'ENM et les surcotes de tempêtes qui limiteraient l'écoulement des crues en mer (Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, 2012(g)).

L'ONERC propose que l'effet de l'élévation du niveau de la mer sur la dynamique d'évolution du trait de côte sera fonction de l'horizon temporel considéré. Dans les dizaines d'années à venir, l'élévation ne serait pas suffisante pour fortement influencer ce processus qui resterait fonction des dynamiques hydrosédimentaires locales et régionales. A plus long terme, notamment sous les projections les plus pessimistes, il semble cohérent de s'attendre à ce que l'élévation du niveau de la mer impacte fortement la position du trait de côte. Mais il est difficile de projeter une hauteur d'élévation seuil et un horizon temporel (Planton et al., 2015).

Le même rapport souligne que quel que soit le scénario considéré, il sera bénéfique de mettre en place deux mesures :

- limiter voir diminuer l'exposition des biens et des personnes aux risques ;
- laisser ou redonner de l'espace de mobilité aux littoraux pour qu'ils s'ajustent d'eux-mêmes aux nouvelles conditions hydro-sédimentaires (Planton et al., 2015).

4.3 LES DELTAS

Dans les zones deltaïques, les flux de sédiments sont contraints et distribués le long des côtes par les vagues, les courants marins et les débits des fleuves. Cela entraîne des modifications du trait de côtes à différentes échelle de temps et d'espace (Planton et al., 2015). Ce sont des milieux complexes impactés par les activités anthropiques et le changement climatique via une modification des conditions aux limites à l'amont et à l'aval des deltas comme la diminution des débits et l'élévation du niveau de la mer (Figure 73).

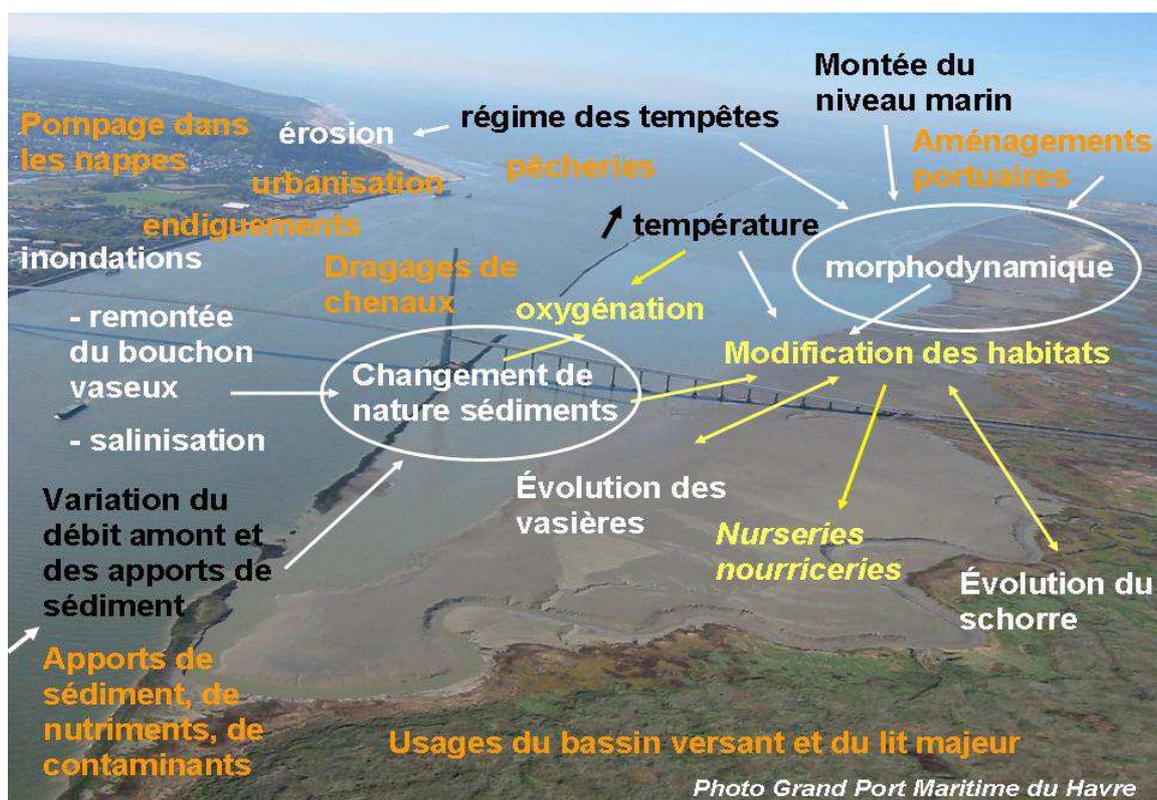


Figure 673 : Manifestations et impacts du changement climatique et des usages anthropiques dans les estuaires. En noir : manifestations du changement climatique, en brun clair : contribution des actions anthropiques, en blanc : conséquences sur les processus morpho-sédimentaires, en jaune : impacts écologiques.

Les interactions de ces différentes pressions rendent complexe la projection d'évolution de ces milieux à forts enjeux. Par modélisation, des travaux de recherche ont représenté l'impact théorique de l'élévation du niveau des mers sur la morphologie d'un estuaire sablo-vaseux court. Cela entraînerait un élargissement du chenal, particulièrement à l'aval de l'estuaire. La partie supérieure de l'estran pourrait s'éroder et être plus souvent submergée si les apports sédimentaires ne compensent pas l'élévation du niveau marin. Ces mêmes travaux montrent un contrôle minoritaire par la végétation sur l'hydrodynamique et l'évolution morpho-sédimentaire de l'estran. Ces résultats diffèrent de la littérature scientifique mais restent cohérents avec les observations sur l'estuaire de la Loire. Ces résultats ne sont pas forcément applicables en Méditerranée car ils prenaient en compte la marée alors que le marnage y est faible (Le Hir et al., 2014).

La Figure 684 représente la dynamique sédimentaire du delta du Rhône. On distingue quatre cellules représentant les directions des principaux flux de sédiments sur la période 1895-1974. On constate une accumulation des sédiments sur les pointes de l'Espiguette, de Beaubuc, de la Gracieuse ainsi qu'à l'exutoire du Grand Rhône. Les restes du territoire voient une perte de sédiment (Anthony, 2015).

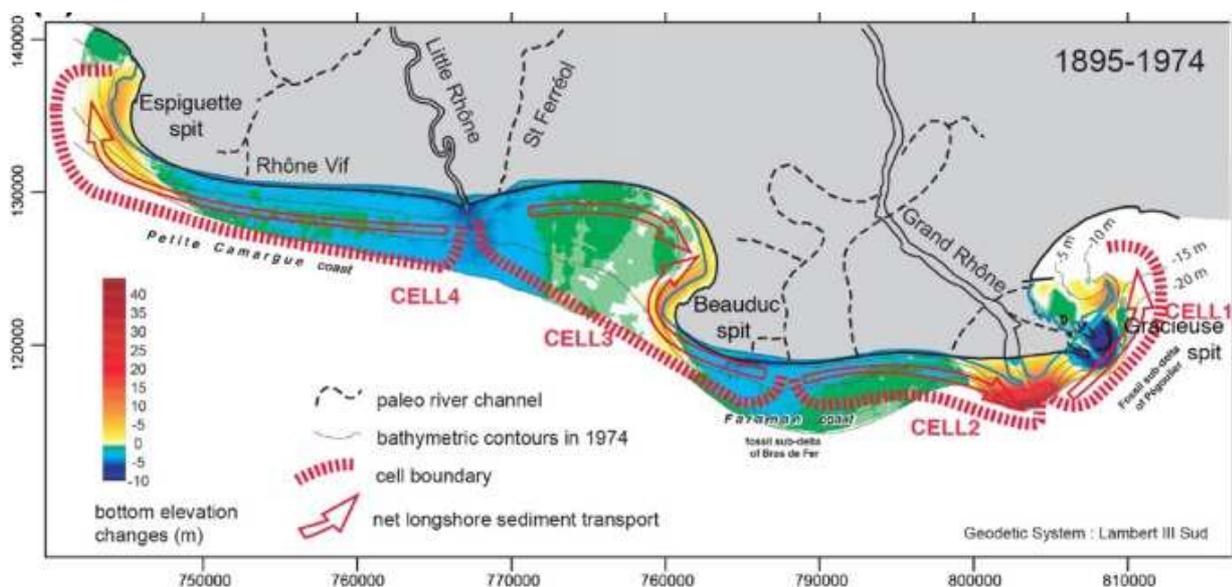


Figure 684 : Les trois principales pointes (Espiguette, Beauduc et Gracieuse) et fonctionnement des quatre cellules sédimentaires (CELL 1 à 4) du delta du Rhône (Anthony, 2015).

4.4 MOYENS DE PROTECTION

La gestion du risque inondation et submersion en zone littorale est un équilibre entre des mesures techniques (moyens de protection) et des mesures institutionnelles (règlements). Les mesures techniques sont historiquement la construction d'ouvrages en « dur ». On observe actuellement à travers le monde un changement de paradigme allant vers des méthodes de gestion « douces » basées sur la notion de « vivre avec » et d'acceptation du risque. L'avantage de cette approche est qu'elle est évolutive et limite les externalités négatives des ouvrages en dur (déplacements des phénomènes d'érosion, perturbation des flux sédimentaires, coût d'entretien, irréversibilité...). La construction d'ouvrage en dur n'est pas une réponse universelle mais un outil parmi d'autres (Wesselink et al., 2015). La gestion intégrée du risque littoral passe donc par la mobilisation de moyens institutionnels, structurels conventionnels et basés sur la nature. Les mesures basées sur la nature répondent aux enjeux d'érosion, de protection des inondations et de dissipation de l'énergie des vagues (van Wesenbeeck et al., 2014).

A titre d'exemple, la végétation sous-marine (herbiers notamment) permet de stabiliser les sédiments car ils augmentent la rugosité du fond marin ce qui diminue l'énergie des vagues, des courants et des marées. La protection est optimale pour les zones à faible profondeur et à faible houle avec une grande surface d'interaction (verticale et horizontale). Cette fonction d'atténuation diminue lorsque l'intensité des vagues augmente, limitant la protection lors des tempêtes. Les herbiers jouent un rôle majeur dans la stabilité quotidienne et la lutte contre l'érosion diffuse (Bouma et al., 2014; Ondiviela et al., 2014).

Ainsi on peut caractériser les services écosystémiques rendus par les milieux littoraux. Ils ne sont plus uniquement considérés comme des milieux vulnérables à protéger mais des milieux permettant d'assurer la protection, de lutter contre l'érosion et les submersions. Le potentiel naturel de protection est fonction de caractéristiques géologiques et écologiques. Liqueste et al. (2013) proposent à dire d'expert une classification de la capacité de protection en fonction de ces critères (tableau 8). On constate que la présence de dunes et de plages bien structurées arrive en tête des moyens de protection.

Géomorphologie de la côte	Habitat du fond marin	Habitat côtier (émergé)
<ul style="list-style-type: none"> ▪ roches ou falaise de roche-dure ▪ côte développée de matériaux grossiers ▪ plage développée de sable ▪ conglomérats ou falaise de roches tendres ▪ petites plages séparées par des caps rocheux ▪ sédiments tendres avec blocs rocheux ▪ sédiments tendres non liés ▪ côtes artificielles ▪ sédiments vaseux ou marais intertidaux ▪ estuaires ▪ cordons végétalisés 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ roche, substrat compact ou récifs biogéniques ▪ sédiments grossiers ou mixtes ▪ sable peu profond ▪ prairies sous-marine ▪ vase peu profonde 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ plages, sables, dunes ▪ forêts ▪ zone humides ▪ estuaires ▪ lagune côtières ▪ broussailles ou végétation herbacée ▪ cultures pérennes ▪ zone agricole hétérogène ▪ terre arable ▪ pâturages ▪ espaces ouvert avec peu ou pas de végétation

Tableau 8 : Principales géomorphologies des côtes et habitats côtiers classés par leur capacité de protection, classement à dire d'expert (Liquete et al., 2013).

En croisant les caractéristiques des milieux avec l'exposition aux aléas, on obtient la capacité intrinsèque de protection des milieux (CPflow). En croisant cette dernière avec l'estimation des besoins en protection des populations, on obtient le taux de couverture des besoins en protection par les écosystèmes littoraux (CPbenefit). Selon cette méthode, Liquet et al. (2013) ont cartographié les côtes européennes (Figure 695). La côte méditerranéenne française se retrouve ainsi divisée en deux secteurs avec une faible capacité de protection dans le Golfe du Lion (résultats cohérents avec les travaux de Brunel montrant une érosion du littoral) et une faible vulnérabilité en PACA et Corse. La couverture des besoins de protection des habitants suit la même tendance : insuffisante à l'ouest et suffisante à l'est (mais pas complètement satisfaisante) (Liquete et al., 2013).

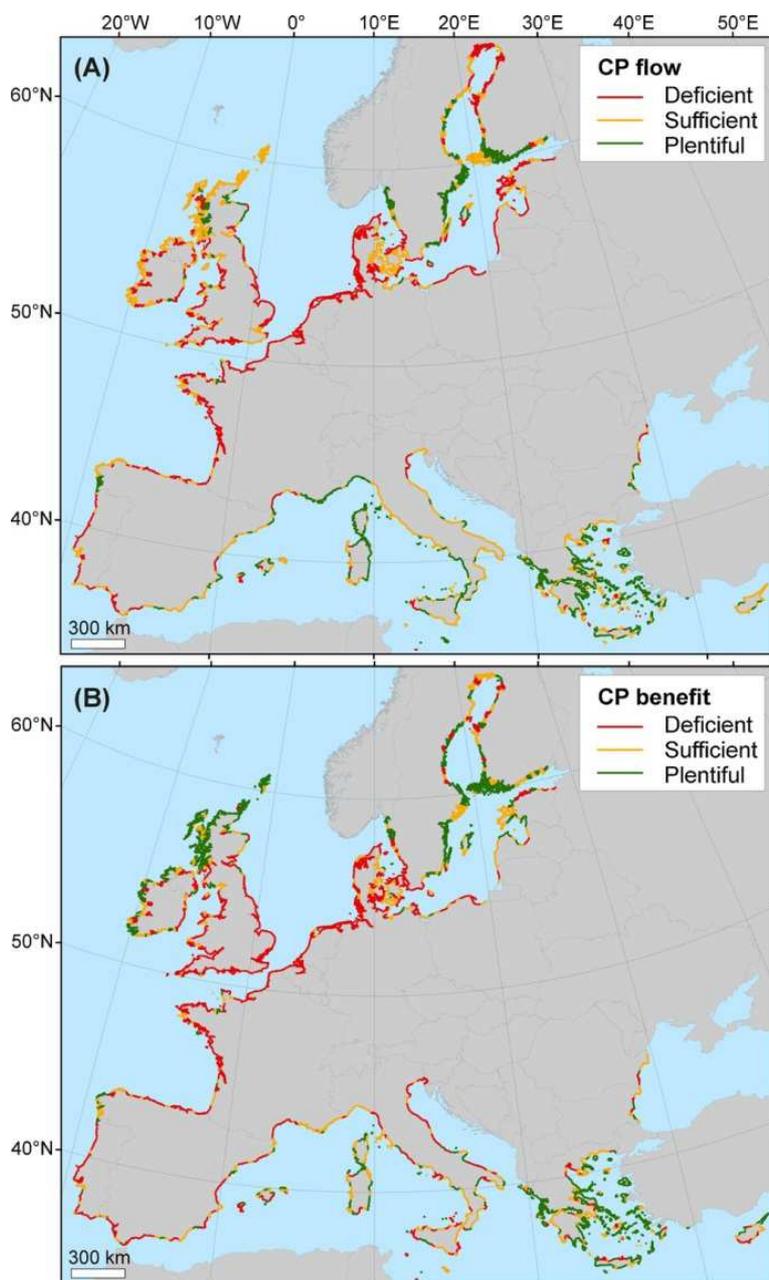


Figure 695 : Estimation de la capacité intrinsèque de protection (CP flow) en croisant les caractéristiques des côtes et leur exposition aux aléas (A) et estimation du service de protection (CP benefit) en croisant la capacité de protection avec les besoins (Liquete et al., 2013).

Le changement de paradigme sur les techniques de protection des littoraux nécessite de développer la connaissance sur les processus géomorphologiques des littoraux et d'intégrer – de reconnaître - les approches écosystémiques comme des outils efficaces d'ingénierie pour la gestion des littoraux (Janssen et al., 2015; van Wesenbeeck et al., 2014). Il est donc nécessaire d'avoir une approche multidisciplinaire entre l'ingénierie des côtes, la géomorphologie et l'écologie afin d'apporter des solutions de gestion adaptés aux situations locales (Hanley et al., 2014).

4.5 IMPACTS SUR LES INFRASTRUCTURES

Les digues sont des ouvrages construits pour plusieurs décennies avec des enjeux sociaux, économiques et patrimoniaux très importants.

Le changement climatique est en partie intégré lors des phases de conception en appliquant un coefficient en fonction des scénarios d'élévations du niveau de la mer. La conception des ouvrages évolue afin de mieux prendre en compte le climat futur et ses incertitudes. D'une conception anciennement très déterministe prenant en compte un niveau d'eau extrême et une houle de projet au droit de l'ouvrage, on voit de plus en plus émerger l'emploi de méthodes probabilistes. Ces deux critères deviennent des variables corrélées associées à des fonctions de distribution. La conception des ouvrages se veut désormais adaptative en prévoyant dès la conception des possibilités de renforcement des ouvrages ou des acceptations de diminution du niveau de protection.

Les fonctions des ouvrages sont à analyser suivant une approche coût-bénéfice. Ainsi quatre actions sont possibles face aux projections de changement climatique : le laisser faire, le renforcement, la reconstruction ou le repli stratégique.

Les principales contraintes hydrauliques imposées aux ouvrages par le milieu sont la houle incidente et le niveau marin. Le programme de recherche SAO POLO a étudié l'impact du changement climatique sur les ouvrages côtiers. Il ressort notamment que pour une hausse d'un mètre du niveau marin, les ouvrages perméables et imperméables implantés en faible profondeur devront être rehaussés respectivement d'environ 2 et 3 mètres. Les ouvrages perméables en enrochements devront voir leurs blocs plus que doubler en masse pour compenser une hausse d'un mètre du niveau de la mer. Les méthodes probabilistes aboutissent à des besoins moindres (rehaussement de 1.4 m au lieu de 2 m pour les ouvrages perméables). Ces calculs partent du principe de reconstruction de ces ouvrages, il est cependant possible de renforcer les ouvrages existants. Cependant, on manque de connaissances physiques sur la réponse à long terme de la détérioration progressive des ouvrages imputable au changement climatique (Sergent et al., 2012 ; Dawson et al., 2015 ; Roche et al., 2016).

INCIDENCES CLES - LITTORAL

- La vitesse annuelle moyenne d'élévation du niveau des mers a augmenté ces dernières décennies. Suite à une meilleure représentation des processus, le dernier rapport du GIEC a revu à la hausse les projections d'élévation du niveau des mers. En Méditerranée, l'élévation devrait être comprise entre + 0.3 et + 0.5 m à l'horizon 2100.
- Les projections disponibles ne montrent pas de tendance d'évolution des niveaux marins extrêmes pour le siècle à venir. Ils devraient augmenter uniquement sous l'effet de l'augmentation du niveau de la mer, c'est ce que l'on observe actuellement.
- L'évolution du trait de côte méditerranéen (érosion et accrétion) devrait rester fonction des flux sédimentaires lors des prochaines décennies. L'élévation du niveau des mers devrait impacter ce processus vers la fin du XXIème siècle.
- La gestion du trait de côte doit se faire à l'échelle des cellules hydro-sédimentaires. Les zones actuellement en érosion devraient le rester si les apports sédimentaires des fleuves continuent de diminuer. Dans de nombreux cas, la présence d'herbiers stabilise le fond marin et diminue l'érosion.
- Le développement d'ouvrages de protection en dur présente un risque de maladaptation face aux risques de submersion. Limiter l'exposition des biens et des personnes, redonner/laisser de l'espace de mobilité aux milieux et mobiliser l'ingénierie écosystémique sont des solutions réversibles et évolutives plus adéquates aux enjeux à long terme du littoral.
- Deux leviers forts d'adaptation ressortent pour la préservation des espaces littoraux : favoriser les apports sédimentaires et laisser un espace de mobilité au trait de côte vers l'intérieur des terres.

Connaissances :

- Mieux caractériser les impacts des activités anthropiques sur les flux de sédiment arrivant aux estuaires.
- Développer le suivi du trait de côte

5 CONCLUSION

DEVELOPPER UNE STRATEGIE D'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les travaux scientifiques menés jusqu'à maintenant sur le changement climatique et ses impacts exploitent deux natures de données : les tendances passées lorsque des chroniques de données existent et les projections par des approches modélisées basées sur des hypothèses de scénarios d'évolutions socio-économiques.

Il est important de bien distinguer l'éclairage apporté par ces deux natures de données :

- les tendances évolutives sont solides sur les phénomènes qu'elles mettent en évidence et l'ampleur de ces phénomènes : elles permettent de les quantifier ; mais leur limite tient à la capacité à distinguer l'influence stricte du changement climatique par rapport aux autres changements globaux liés aux pressions anthropiques. Par ailleurs, ce type d'exploitation étant réservé aux chroniques de données longues, peu de paramètres sont en général disponibles.
- les projections climatiques permettent de traiter une grande diversité de paramètres et de métriques, de manière à caractériser divers types d'impacts du changement climatique. Leur limite tient aux hypothèses faites au départ sur les scénarios socio-économiques et aux incertitudes liées aux modèles climatiques.

A la lumière de ce bilan des connaissances, il est possible de dégager certaines conclusions sur les évolutions à attendre sur les bassins Rhône-Méditerranée et de Corse dans le domaine de l'eau :

Les températures augmentent et continueront d'augmenter, en particulier en période estivale.

L'évapotranspiration augmente déjà et continuera d'augmenter également, ce qui implique une tendance à l'assèchement.

La tendance sur les précipitations est moins nette : les chroniques de données montrent une forte variabilité interannuelle ; les approches modélisées ne s'accordent pas sur la tendance évolutive. On note néanmoins un signal sensible sur la baisse des précipitations d'été et une diminution attendue de l'enneigement.

Concernant l'évolution passée des précipitations extrêmes et les projections futures, il faut rester très prudent. Globalement, les chroniques passées ne montrent pas de tendances d'évolution. Le signal qui se dégage des projections, malgré les fortes incertitudes, est à une légère intensification des précipitations extrêmes. Ces résultats sont principalement issus des scénarios les plus pessimistes (RCP 6.5 et 8.5). La forte incertitude provient de l'absence de tendance passée et du caractère intrinsèquement aléatoire de ces phénomènes.

Le réchauffement et l'assèchement suffiront à induire une diminution des débits, avec en particulier l'aggravation et l'allongement des étiages. La recharge pluviale des nappes tendrait à baisser. La ressource en eau tendra à se raréfier sous l'effet combiné de ces facteurs.

Concernant l'impact du changement climatique sur les écosystèmes aquatiques et humides, là aussi ce sont le réchauffement et l'assèchement qui seront les premiers facteurs de vulnérabilité.

L'élévation du niveau de la mer Méditerranée est constatée et s'est accélérée au cours du XXème siècle. Malgré les fortes incertitudes, la vitesse d'élévation devrait continuer à augmenter entraînant une élévation de la mer Méditerranée de +50 à +80 cm à la fin du siècle. Il reste difficile de préciser à partir de quel niveau d'élévation les impacts se feront sentir sur les phénomènes d'érosion et d'accrétion.

L'adaptation pour cet enjeu passera avant tout par **la restauration fonctionnelle des milieux aquatiques et la préservation de l'habitat**, ceci tant pour les milieux continentaux que marins. Elles mettent également en avant la pertinence des actions visant le décloisonnement des cours d'eau et la limitation du réchauffement des eaux.

Avec cette synthèse, le degré d'impact et la nature des phénomènes induits par le changement climatique peuvent être estimés, mais l'amplitude des changements reste sujette à incertitudes.

Les incidences du changement climatique évoquées dans ce rapport portent sur les phénomènes physiques et les impacts associés pour l'écosystème aquatique. Naturellement, ces évolutions auront également des effets sur les usages et en particulier leur dimension économique : productivité des agrosystèmes, capacité à fournir de l'eau aux populations et aux activités économiques diverses, prix de l'eau, production énergétique,...

Le présent rapport n'a pas traité la littérature scientifique consacrée aux dimensions socio-économiques des effets du changement climatique. Comme constaté par Barraqué et Tassin (2015) dans un rapport produit pour la Banque Mondiale en prévision de la COP 21, il existe peu d'études économiques et sociales de l'impact du changement climatique sur les territoires, ou d'analyse coût-avantage des mesures d'adaptation qui peuvent être prises. Dans un travail d'inventaire réalisé pour la Banque Mondiale en 2015, l'auteur a inventorié quelques études sur les grandes villes (New York, Rotterdam, Copenhague, Barcelone ou Casablanca) et aucune en France. Il convient de considérer que les vulnérabilités « physiques » induites par ces effets génèreront des vulnérabilités économiques et sociales qui seront variées selon les secteurs et les territoires. Les études visant à dimensionner ces coûts sont nécessaires et doivent être envisagées sur les secteurs les plus vulnérables.

Néanmoins, **on en sait assez pour agir et envisager des stratégies d'adaptation** pour réduire les vulnérabilités qui s'annoncent.

Il convient alors de prendre en compte les incertitudes associées à la dispersion des projections climatiques pour mesurer le risque inhérent à la prise de décision en situation de non stationnarité : certaines mesures d'adaptation sont pertinentes pour une large gamme de futurs possibles. D'autres sont davantage structurantes, coûteuses et impactantes et seraient plus « à risque » considérant le fait que les effets in fine du changement climatique peuvent ne pas être ceux attendus, du moins dans leur ampleur, si ce n'est dans leur nature.

BIBLIOGRAPHIE

- Adloff, F., Somot, S., Sevault, F., Jordà, G., Aznar, R., Déqué, M., Herrmann, M., Marcos, M., Dubois, C., Padorno, E., others, 2015. Mediterranean Sea response to climate change in an ensemble of twenty first century scenarios. *Clim. Dyn.* 45, 2775–2802.
- Armandine Les Landes, A., Aquilina, L., Ridder, J.D., Longuevegne, L., Pagé, P., Goderniaux, P., 2014. Investigating the respective impacts of groundwater exploitation and climate change on wetland extension over 150 years. *Journal of Hydrology* 509 (2014) 367–378
- Albouy, C., Guilhaumon, F., Araújo, M.B., Mouillot, D., Leprieur, F., 2012. Combining projected changes in species richness and composition reveals climate change impacts on coastal Mediterranean fish assemblages. *Glob. Change Biol.* 18, 2995–3003.
- Albouy, C., Leprieur, F., Loc'h, L., Mouquet, N., Meynard, C.N., Douzery, E.J., Mouillot, D., others, 2015. Projected impacts of climate warming on the functional and phylogenetic components of coastal Mediterranean fish biodiversity. *Ecography* 38, 681–689.
- Alfieri, L., Burek, P., Feyen, L., Forzieri, G., 2015. Global warming increases the frequency of river floods in Europe. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19, 2247–2260.
- Androulidakis, Y.S., Kombiadou, K.D., Makris, C.V., Baltikas, V.N., Krestenitis, Y.N., 2015. Storm surges in the Mediterranean Sea: Variability and trends under future climatic conditions. *Dyn. Atmospheres Oceans* 71, 56–82.
- Anthony, E.J., 2015. Wave influence in the construction, shaping and destruction of river deltas: A review. *Mar. Geol.* 361, 53–78.
- Anthony, E.J., Marriner, N., Morhange, C., 2014. Human influence and the changing geomorphology of Mediterranean deltas and coasts over the last 6000 years: From progradation to destruction phase? *Earth-Sci. Rev.* 139, 336–361.
- Astaraie-Imani, M., Kapelan, Z., Fu, G., Butler, D., 2012. Assessing the combined effects of urbanisation and climate change on the river water quality in an integrated urban wastewater system in the UK. *J. Environ. Manage.* 112, 1–9.
- Bard, A., Renard, B., Lang, M., 2012. Tendances observées sur les régimes hydrologiques de l'Arc Alpin. *Houille Blanche* 38–43.
- 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 ONEMA. ISBN : 979-10-91047-38-8, 129p.
- Bartholomeus, R.P., Stagge, J.H., Tallaksen, L.M., Witte, J.P.M., 2015. Sensitivity of potential evaporation estimates to 100 years of climate variability. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19, 997–1014.
- Baillieux, A., Oliosio, A., Trolard, F., Chanzy, A., Lecerf, R., Lecharpentier, P., Banton, O., Ruget, F., Ruy, S., 2015. Changements globaux : quels impacts sur l'aquifère de la Crau ? *Géologues*, numéro 187, ISSN 0016.7916, pp 86-90.
- Barraqué, B. and Tassin, B., 2015. Adaptation to Water-related Climate Change in large cities. World Bank report.
- Beaufort, A., Bustillo, V., Curie, F., Moatar, F., Ducharne, A., Thiery, D., 2013. Water temperature sensitivity under climatic change: comparison between mountain and lowland rivers in the Loire basin. *Understanding Freshwater Quality Problems in a Changing World. IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly, Gothenburg, Sweden (IAHS Publ. 359, 2013)*, 8p.
- Blanchet, J., Molinié, G., Touati, J., 2016. Spatial analysis of trend in extreme daily rainfall in southern France. *Clim. Dyn.* 1–14.
- Boé, J., Habets, F., 2014. Multi-decadal river flow variations in France. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18, 691–708.
- Bouma, T.J., van Belzen, J., Balke, T., Zhu, Z., Airolidi, L., Blight, A.J., Davies, A.J., Galvan, C., Hawkins, S.J., Hoggart, S.P., others, 2014. Identifying knowledge gaps hampering application of intertidal habitats in coastal protection: Opportunities & steps to take. *Coast. Eng.* 87, 147–157.
- Brisson, N., Levraut, F., 2010. Changement climatique, agriculture et forêt en France: simulations d'impacts sur les principales espèces. *Le Livre Vert du projet CLIMATOR (2007–2010)*.
- Bromhead, D., Scholey, V., Nicol, S., Margulies, D., Wexler, J., Stein, M., Hoyle, S., Lennert-Cody, C., Williamson, J., Havenhand, J., others, 2015. The potential impact of ocean acidification upon eggs and

- larvae of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*). *Deep Sea Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 113, 268–279.
- Browman, H.I., 2016. Applying organized scepticism to ocean acidification research. *ICES J. Mar. Sci. J. Cons.* 73, 529–536.
- Brunel, C., Certain, R., Sabatier, F., Robin, N., Barousseau, J.P., Aleman, N., Raynal, O., 2014. 20th century sediment budget trends on the Western Gulf of Lions shelf (France): An application of an integrated method for the study of sediment coastal reservoirs. *Geomorphology* 204, 625–637.
- Buisson, L., Grenouillet, G., Villéger, S., Canal, J., Laffaille, P., 2013. Toward a loss of functional diversity in stream fish assemblages under climate change. *Glob. Change Biol.* 19, 387–400.
- Caballero, Y., Girard, C., 2012. Impact du changement climatique sur la ressource en eau du bassin versant de l'Orb. Rapport BRGM/RP-61319-FR. 40 p., 16 ill.
- Caballero, Y., Lanini, S., Zerouali, L., Bailly-Comte, V., 2016. Caractérisation de la recharge des aquifères et évolution future en contexte de changement climatique. Application au bassin Rhône Méditerranée Corse. Rapport final. BRGM/RP-65807-FR, 188 p., 159 ill., 3 CD.
- Caillouet, L., Vidal, J.-P., Sauquet, E., Graff, B., 2016. Probabilistic precipitation and temperature downscaling of the Twentieth Century Reanalysis over France. *Clim. Past* 12, 635–662.
- Caissie, D., 2006. The thermal regime of rivers: a review. *Freshw. Biol.* 51, 1389–1406.
- Cartes, J.E., Fanelli, E., Lloris, D., Matallanas, J., 2013. Effect of environmental variations on sharks and other top predators in the deep Mediterranean Sea over the last 60 years. *Clim Res* 55, 239–251.
- Cartes, J.E., Maynou, F., Fanelli, E., López-Pérez, C., Papiol, V., 2015. Changes in deep-sea fish and crustacean communities at 1000–2200m in the Western Mediterranean after 25 years: Relation to hydro-climatic conditions. *J. Mar. Syst.* 143, 138–153.
- Castebrunet, H., Eckert, N., Giraud, G., Durand, Y., Morin, S., 2014. Projected changes of snow conditions and avalanche activity in a warming climate: the French Alps over the 2020-2050 and 2070-2100 periods. *Cryosphere* 8, 1673–1697.
- Cazenave, A., Cozannet, G.L., 2014. Sea level rise and its coastal impacts. *Earths Future* 2, 15–34. doi:10.1002/2013EF000188
- CGDD-SOeS, 2012. Résultats de l'enquête nationale à dire d'experts sur les zones humides. État en 2010 et évolution entre 2000 et 2010 ». Paris : CGDD-SOeS. 96 p. (collection Études et documents, n° 70).
- Chambers, D.P., Merrifield, M.A., Nerem, R.S., 2012. Is there a 60-year oscillation in global mean sea level? *Geophys. Res. Lett.* 39.
- Chauveau, M., Chazot, S., Perrin, C., Bourgin, P.-Y., Sauquet, E., Vidal, J.-P., Rouchy, N., Martin, E., David, J., Norotte, T., others, 2013. Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070? *Houille Blanche* 5–15.
- Chevalier, M., 2014. Changements globaux et poissons d'eau douce : déterminants et implications de variations démographiques. Thèse de doctorat, Université Toulouse 3 Paul Sabatier, 314 p.
- Church, J.A., White, N.J., 2011. Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century. *Surv. Geophys.* 32, 585–602.
- Comte, L., Buisson, L., Daufresne, M., Grenouillet, G., 2013. Climate-induced changes in the distribution of freshwater fish: observed and predicted trends. *Freshw. Biol.* 58, 625–639.
- Conte, D., Lionello, P., 2013. Characteristics of large positive and negative surges in the Mediterranean Sea and their attenuation in future climate scenarios. *Glob. Planet. Change* 111, 159–173.
- Cramer, W., Yohe, G.W., Auffhammer, M., Huggel, C., Molau, U., Dias, M.S., Leemans, R., 2014. Detection and attribution of observed impacts, in: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge University Press, pp. 979–1038.
- Dakhlalla, A.O., Parajuli, P.B., Ouyang, Y., Schmitz, D.W., 2016. Evaluating the impacts of crop rotations on groundwater storage and recharge in an agricultural watershed. *Agric. Water Manag.* 163, 332–343.
- Danovaro, R., Corinaldesi, C., Dell'Anno, A., Fuhrman, J.A., Middelburg, J.J., Noble, R.T., Suttle, C.A., 2011. Marine viruses and global climate change. *FEMS Microbiol. Rev.* 35, 993–1034.
- Datry, T., Snelder, T., Sauquet, E., Pella, H., Catalogne, C. & Lamouroux, N., 2012. Hydrologie des étiages : typologie des cours d'eau temporaires et cartographie nationale. Rapport final. 44p.

- Daufresne, M., Lendfellner, K and Sommer, U. 2009. Global warming benefits the small in aquatic ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 106(31) : 12788-12793
- Dawson, R., Sayers, P., Walsh, C., 2015. Climate impacts on flood and coastal erosion infrastructure.
- Dayon, G., 2015. Evolution du cycle hydrologique continental en France au cours des prochaines décennies. Thèse de doctorat, Université de Toulouse. 223p.
- De Graaf, I.E.M., van Beek, L.P.H., Wada, Y., Bierkens, M.F.P., 2014. Dynamic attribution of global water demand to surface water and groundwater resources: effects of abstractions and return flows on river discharges. *Adv. Water Resour.* 64, 21–33.
- De Wilde, M., 2015. Conséquences des exondations pour les communautés végétales aquatiques et le fonctionnement des zones humides fluviales. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard - Lyon I, Biodiversité et Ecologie. Français. <NNT : 2014LYO10275>. <tel-01142490>, 195p.
- Dehédin, A., 2014. Changements globaux et assèchement des zones humides fluviales: conséquences sur les processus biogéochimiques et les communautés d'invertébrés. Thèse de doctorat. Sciences agricoles. Université claudes Bernard - Lyon I. 256p.
- Dörfliger, N., Schomburgk, S., Bouzit, M., Petit, V., Caballero, Y., Durst, P., Douez, O., Chatelie, r M., Croiset, N., Surdyk, N., 2011. Montée du niveau marin induite par le changement climatique : conséquences sur l'intrusion saline dans les aquifères côtiers en métropole. Rapport final, RP-60829 dossier littoral.
- Douville, H., Ribes, A., Decharme, B., Alkama, R., Sheffield, J., 2013. Anthropogenic influence on multidecadal changes in reconstructed global evapotranspiration. *Nat. Clim. Change* 3, 59–62.
- Dumas, P., Hallegatte, S., Quintana-Seguí, P., Martin, E., 2013. The influence of climate change on flood risks in France-first estimates and uncertainty analysis. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 13, 809–821.
- Dunn, S.M., Brown, I., Sample, J., Post, H., 2012. Relationships between climate, water resources, land use and diffuse pollution and the significance of uncertainty in climate change. *J. Hydrol.* 434, 19–35.
- EDF, 2016. Synthèse de l'étude thermique du Rhône, rapport de synthèse, 12p.
- Ehlers, L., Herrmann, F., Blaschek, M., Duttmann, R., Wendland, F., 2016. Sensitivity of mGROWA-simulated groundwater recharge to changes in soil and land use parameters in a Mediterranean environment and conclusions in view of ensemble-based climate impact simulations. *Sci. Total Environ.* 543, 937–951.
- Einhorn, B., Eckert, N., Chaix, C., Ravanel, L., Deline, P., Gardent, M., Boudières, V., Richard, D., Vengeon, J.-M., Giraud, G., others, 2015. Changements climatiques et risques naturels dans les Alpes. Impacts observés et potentiels sur les systèmes physiques et socio-économiques. *J. Alp. Res. Rev. Géographie Alp.*
- Ezer, T., Atkinson, L.P., Corlett, W.B., Blanco, J.L., 2013. Gulf Stream's induced sea level rise and variability along the US mid-Atlantic coast. *J. Geophys. Res. Oceans* 118, 685–697.
- Fabre, J., 2012. Impacts du changement climatique dans le domaine de l'eau sur les bassins Rhône-Méditerranée et Corse, bilan des connaissances. Rapport de l'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse. 65p.
- Fader, M., Shi, S., von Bloh, W., Bondeau, A., Cramer, W., 2015. Mediterranean irrigation under climate change: more efficient irrigation needed to compensate increases in irrigation water requirements. *Hydrol Earth Syst Sci Discuss* 12, 8459–8504.
- Faillat, J.P., Didon-Lescot, J.F., Ayrat, P.A., Martin, P., 2015. Effets de la déprise agricole et de la reforestation sur les écoulements et les ressources en eau. Aperçu bibliographique. *Géologues*, numéro 187, ISSN 0016.7916, pp 61-67.
- Fatichi, S., Rimkus, S., Burlando, P., Bordoy, R., Molnar, P., 2015. High-resolution distributed analysis of climate and anthropogenic changes on the hydrology of an Alpine catchment. *J. Hydrol.* 525, 362–382.
- Flecha, S., Pérez, F.F., García-Lafuente, J., Sammartino, S., Ríos, A.F., Huertas, I.E., 2015. Trends of pH decrease in the Mediterranean Sea through high frequency observational data: indication of ocean acidification in the basin. *Sci. Rep.* 5.
- Floury, M., Delattre, C., Ormerod, S.J., Souchon, Y., 2012. Global versus local change effects on a large European river. *Sci. Total Environ.* 441, 220–229.
- Foucreau, N., 2015. Etude des réponses écophysiological et fonctionnelles de populations de l'organisme clé *Gammarus pulex* (crustacea, Amphipoda) dans un contexte de changement climatique, au sein de la

- vallée du Rhône. Thèse de doctorat. Milieux et Changements globaux. Université Claude Bernard - Lyon I, 2013. Français. <NNT : 2013LYO10256>. <tel-01127599>, 208p.
- French, J., Payo, A., Murray, B., Orford, J., Eliot, M., Cowell, P., 2015. Appropriate complexity for the prediction of coastal and estuarine geomorphic behaviour at decadal to centennial scales. *Geomorphology*.
- Galassi, G., Spada, G., 2014. Sea-level rise in the Mediterranean Sea by 2050: Roles of terrestrial ice melt, steric effects and glacial isostatic adjustment. *Glob. Planet. Change* 123, 55–66.
- Gardent, M., Rabatel, A., Dedieu, J.-P., Deline, P., 2014. Multitemporal glacier inventory of the French Alps from the late 1960s to the late 2000s. *Glob. Planet. Change* 120, 24–37.
- Garner, G., Malcolm, I.A., Sadler, J.P., Millar, C.P., Hannah, D.M., 2015. Inter-annual variability in the effects of riparian woodland on micro-climate, energy exchanges and water temperature of an upland Scottish stream. *Hydrol. Process.* 29, 1080–1095.
- Gazeau, F., Parker, L.M., Comeau, S., Gattuso, J.-P., O'Connor, W.A., Martin, S., Pörtner, H.-O., Ross, P.M., 2013. Impacts of ocean acidification on marine shelled molluscs. *Mar. Biol.* 160, 2207–2245.
- Gerten, D., 2013. A vital link: water and vegetation in the Anthropocene. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17, 3841–3852.
- Gervais, M., 2012. Impacts morphologiques des surcotes et vagues de tempêtes sur le littoral méditerranéen. Thèse de doctorat. Océanologie, Université de Perpignan Via Domitia, 401p.
- Gibelin, A.-L., Dubuisson, B., Corre, L., Deaux, N., Jourdain, S., Laval, L., Piquemal, J.-M., Mestre, O., Denetière, D., Desmidt, S., others, 2014. Evolution de la température en France depuis les années 1950: Constitution d'un nouveau jeu de séries homogénéisées de référence. *Rubr. Climatol.*
- Gilbert, A., Vincent, C., 2013. Atmospheric temperature changes over the 20th century at very high elevations in the European Alps from englacial temperatures. *Geophys. Res. Lett.* 40, 2102–2108.
- Giuntoli, I., Renard, B., Lang, M., 2012. Floods in France. in: *Changes in flood risk in Europe*, edited by: Kundzewicz, Z., International Association of Hydrological Sciences – Special Publication 10 (Blue Book series), IAHS Wallingford, 199–211.
- Giuntoli, I., Renard, B., Vidal, J.-P., Bard, A., 2013. Low flows in France and their relationship to large-scale climate indices. *J. Hydrol.* 482, 105–118.
- Giuntoli, I., Vidal, J.-P., Prudhomme, C., Hannah, D.M., 2015. Future hydrological extremes: the uncertainty from multiple global climate and global hydrological models. *Earth Syst. Dyn.* 6, 267.
- Gkelis, S., Papadimitriou, T., Zaoutsos, N., Leonardos, I., 2014. Anthropogenic and climate-induced change favors toxic cyanobacteria blooms: Evidence from monitoring a highly eutrophic, urban Mediterranean lake. *Harmful Algae* 39, 322–333.
- Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., Stoffel, M., 2014. 21st century climate change in the European Alps—a review. *Sci. Total Environ.* 493, 1138–1151.
- Guivarch, C., Rozenberg, J., 2013. Les nouveaux scénarios socio-économiques pour la recherche sur le changement climatique. *Pollution Atmosphérique : climat, santé, société, Le Kremlin Bicêtre : Revue Pollution atmosphérique, Numéro Spécial Climat*, pp.1-9. <halshs-01053730>
- Habets, F., Ackerer, P., Amraoui, N., Augeard, B., Besson, F., Caballero, Y., Dreuz, J.-R.D., Moigne, P.L., Longuevergne, L., Martin, E., Morel, T., Regimbeau, F., Rousseau, M., Rousseau-Gueutin, P., Thiery, D., Soubeyrou, J.-M., Vergnes, J.-P., Viennot, P., 2015. *Aqui-FR, un système multi-modèle hydrogéologique à l'échelle nationale*. *Géologues* 105–109.
- Habets, F., Boé, J., Déqué, M., Ducharme, A., Gascoin, S., Hachour, A., Martin, E., Pagé, C., Sauquet, E., Terray, L., others, 2013. Impact of climate change on the hydrogeology of two basins in Northern France. *Clim. Change* 121, 771–785.
- Hall, J., Arheimer, B., Borga, M., Brázdil, R., Claps, P., Kiss, A., Kjeldsen, T.R., Kriauciuniene, J., Kundzewicz, Z.W., Lang, M., others, 2014. Understanding flood regime changes in Europe: A state of the art assessment. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18, 2735–2772.
- Hanley, M.E., Hoggart, S.P.G., Simmonds, D.J., Bichot, A., Colangelo, M.A., Bozzeda, F., Heurtefeux, H., Ondiviela, B., Ostrowski, R., Recio, M., others, 2014. Shifting sands? Coastal protection by sand banks, beaches and dunes. *Coast. Eng.* 87, 136–146.
- Hannah, D.M., Garner, G., 2015. River water temperature in the United Kingdom Changes over the 20th century and possible changes over the 21st century. *Prog. Phys. Geogr.* 39, 68–92.

- Herrmann, F., Baghdadi, N., Blaschek, M., Deidda, R., Duttmann, R., La Jeunesse, I., Sellami, H., Vereecken, H., Wendland, F., 2016. Simulation of future groundwater recharge using a climate model ensemble and SAR-image based soil parameter distributions—A case study in an intensively-used Mediterranean catchment. *Sci. Total Environ.* 543, 889–905.
- Hesse, C., Krysanova, V., 2016. Modeling Climate and Management Change Impacts on Water Quality and In-Stream Processes in the Elbe River Basin. *Water* 8, 40.
- Heuer, R.M., Grosell, M., 2014. Physiological impacts of elevated carbon dioxide and ocean acidification on fish. *Am. J. Physiol.-Regul. Integr. Comp. Physiol.* ajpregu-00064.
- Hilmi, N., Allemand, D., Cinar, M., Cooley, S., Hall-Spencer, J.M., Haraldsson, G., Hattam, C., Jeffree, R.A., Orr, J.C., Rehdanz, K., others, 2014. Exposure of Mediterranean countries to ocean acidification. *Water* 6, 1719–1744.
- Hingray, B., Hendrickx, F., Bourqui, M., Creutin, J.D., François, B., Gailhard, J., Lafaysse, M., Lemoine, N., Mathevet, T., Mezghani, A., Monteil, C., 2012. Regional Climate, Water, Energy, Ressources and uncertainties from 1960 to 2030. ANR RIWER2030, rapport final, 66p.
- Howes, E.L., Stemann, L., Assailly, C., Irisson, J.O., Dima, M., Bijma, J., Gattuso, J.P., 2015. Pteropod time series from the North Western Mediterranean (1967-2003): impacts of pH and climate variability. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 531, 193.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 688.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O.B., Bouwer, L.M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., others, 2014. EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg. Environ. Change* 14, 563–578.
- Janssen, S.K., van Tatenhove, J.P., Otter, H.S., Mol, A.P., 2015. Greening flood protection—an interactive knowledge arrangement perspective. *J. Environ. Policy Plan.* 17, 309–331.
- Jasechko, S., Sharp, Z.D., Gibson, J.J., Birks, S.J., Yi, Y., Fawcett, P.J., 2013. Terrestrial water fluxes dominated by transpiration. *Nature* 496, 347–350.
- Jenny, J.-P., 2013. Réponses des grands lacs périalpins aux pressions anthropiques et climatiques récentes: reconstitutions spatio-temporelles à partir d'archives sédimentaires. Grenoble.
- Jeppesen, E., Meerhoff, M., Davidson, T.A., Trolle, D., Sondergaard, M., Lauridsen, T.L., Beklioglu, M., Brucet Balmaña, S., Volta, P., González-Bergonzoni, I., others, 2014. Climate change impacts on lakes: an integrated ecological perspective based on a multi-faceted approach, with special focus on shallow lakes.
- Jeppesen, E., Mehner, T., Winfield, I.J., Kangur, K., Sarvala, J., Gerdeaux, D., Rask, M., Malmquist, H.J., Holmgren, K., Volta, P., others, 2012. Impacts of climate warming on the long-term dynamics of key fish species in 24 European lakes. *Hydrobiologia* 694, 1–39.
- Jevrejeva, S., Grinsted, A., Moore, J.C., 2014. Upper limit for sea level projections by 2100. *Environ. Res. Lett.* 9, 104008.
- Karlsson, I.B., Sonnenborg, T.O., Refsgaard, J.C., Trolle, D., Børgesen, C.D., Olesen, J.E., Jeppesen, E., Jensen, K.H., 2016. Combined effects of climate models, hydrological model structures and land use scenarios on hydrological impacts of climate change. *J. Hydrol.* 535, 301–317.
- Ketabchi, H., Mahmoodzadeh, D., Ataie-Ashtiani, B., Simmons, C.T., 2016. Sea-level rise impacts on seawater intrusion in coastal aquifers: Review and integration. *J. Hydrol.* 535, 235–255.
- Kløve, B., Ala-Aho, P., Bertrand, G., Gurdak, J.J., Kupfersberger, H., Kvaerner, J., Muotka, T., Mykrä, H., Preda, E., Rossi, P., others, 2014. Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems. *J. Hydrol.* 518, 250–266.

- Kurylyk, B.L., MacQuarrie, K.T., Caissie, D., McKenzie, J.M., 2015. Shallow groundwater thermal sensitivity to climate change and land cover disturbances: derivation of analytical expressions and implications for stream temperature modeling. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19, 2469–2489.
- Lacoue-Labarthe, T., Nunes, P.A.L.D., Ziveri, P., Cinar, M., Gazeau, F., Hall-Spencer, J.M., Hilmi, N., Moschella, P., Safa, A., Sauzade, D., Turley, C., 2016. Impacts of ocean acidification in a warming Mediterranean Sea: An overview. *Reg. Stud. Mar. Sci.* 5, 1–11. doi:10.1016/j.rsma.2015.12.005
- Lafaysse, M., Hingray, B., Mezghani, A., Gailhard, J., Terray, L., 2014. Internal variability and model uncertainty components in future hydrometeorological projections: The Alpine Durance basin. *Water Resour. Res.* 50, 3317–3341.
- Lang, M., Arnaud, P., Carreau, J., Deaux, N., Dezileau, L., Garavaglia, F., Latapie, A., Neppel, L., Paquet, E., Renard, B., others, 2014. Résultats du projet ExtraFlo (ANR 2009-2013) sur l'estimation des pluies et crues extrêmes. *Houille Blanche* 2, 5–13.
- Langeveld, J.G., Schilperoort, R.P.S., Weijers, S.R., 2013. Climate change and urban wastewater infrastructure: there is more to explore. *J. Hydrol.* 476, 112–119.
- Launay, B. & Datry, T., 2015. Résistance et résilience des communautés d'invertébrés en cours d'eau intermittents : comparaison multi-site dans le bassin RM&C. rapport intermédiaire, 55p.
- Le Cozannet, G., Rohmer, J., Cazenave, A., Idier, D., van De Wal, R., De Winter, R., Pedreros, R., Balouin, Y., Vinchon, C., Oliveros, C., 2015. Evaluating uncertainties of future marine flooding occurrence as sea-level rises. *Environ. Model. Softw.* 73, 44–56.
- Le Hir, P., Cayocca, F., Vareilles, J., Bassoullet, P., Jestin, H., Le Berre, D., Verney, R., Lecornu, F., Bouvier, C., Bioret, F., Sawtschuk, J., Ledez, M., Walther, R., Lediszez, A., Baulin, S., Bayart, E., Prud'homme, B., Saur, N., Cerisier, S., Berthier, C., Bona, P., Schmidt, S., 2014. Conséquences du Changement Climatique sur l'Écogéomorphologie des Estuaires. *Projet C3E2. Rapport final, partie 1*, 104p.
- Lefebvre, G., Germain, C., Poulin, B., 2015. Contribution of rainfall vs. water management to Mediterranean wetland hydrology: Development of an interactive simulation tool to foster adaptation to climate variability. *Environ. Model. Softw.* 74, 39–47.
- Les Landes, A.A., Aquilina, L., De Ridder, J., Longuevergne, L., Pagé, C., Goderniaux, P., 2014. Investigating the respective impacts of groundwater exploitation and climate change on wetland extension over 150 years. *J. Hydrol.* 509, 367–378.
- Liquete, C., Zulian, G., Delgado, I., Stips, A., Maes, J., 2013. Assessment of coastal protection as an ecosystem service in Europe. *Ecol. Indic.* 30, 205–217.
- Madsen, H., Lawrence, D., Lang, M., Martinkova, M., Kjeldsen, T.R., 2014. Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe. *J. Hydrol.* 519, 3634–3650.
- Magand, C., 2015. Influence de la représentation des processus nivaux sur l'hydrologie de la Durance et sa réponse au changement climatique. *Sciences de la Terre. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI*, 2014. Français. <NNT : 2014PA066398>. <tel-01127507>, 350p.
- Maire, A., 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.
- Mander, Ü., Dotro, G., Ebie, Y., Towprayoon, S., Chiemchaisri, C., Nogueira, S.F., Jamsranjav, B., Kasak, K., Truu, J., Tournebize, J., others, 2014. Greenhouse gas emission in constructed wetlands for wastewater treatment: a review. *Ecol. Eng.* 66, 19–35.
- McVicar, T.R., Roderick, M.L., Donohue, R.J., Li, L.T., Van Niel, T.G., Thomas, A., Grieser, J., Jhajharia, D., Himri, Y., Mahowald, N.M., others, 2012. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation. *J. Hydrol.* 416, 182–205.
- Micheli, F., Halpern, B.S., Walbridge, S., Ciriaco, S., Ferretti, F., Frascchetti, S., Lewison, R., Nykjaer, L., Rosenberg, A.A., 2013. Cumulative human impacts on Mediterranean and Black Sea marine ecosystems: assessing current pressures and opportunities. *PLoS One* 8, e79889.
- Minaudo, C., Meybeck, M., Moatar, F., Gassama, N., Curie, F., 2015. Eutrophication mitigation in rivers: 30 years of trends in spatial and seasonal patterns of biogeochemistry of the Loire River (1980–2012). *Biogeosciences* 12, 2549–2563.
- Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2012(a). Hydrologie de surface. *Projet Explore 2070. Rapport de synthèse A1*. 93p.

- Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2012(b). Hydrologie de surface, étude de la thermie des cours d'eau. *Projet Explore 2070. Rapport thématique détaillé B4*. 77p.
- Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2012(c). Hydrologie souterraine. *Projet Explore 2070. Rapport de synthèse*. 184 p.
- Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2012(d). Vulnérabilité des milieux aquatiques et de leurs écosystèmes, étude de la répartition des poissons d'eau douce. *Projet Explore 2070. Rapport de synthèse*. 81 p.
- Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2012(e). Vulnérabilité des milieux aquatiques et de leurs écosystèmes, étude des zones humides. *Projet Explore 2070. Rapport de synthèse*. 144 p.
- Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2012(f). Dynamique des systèmes littoraux et des milieux côtiers, synthèse. *Projet Explore 2070. Rapport final*. 35p.
- Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2012(g). Dynamique des systèmes littoraux et des milieux côtiers, zoom sur le littoral du Languedoc Roussillon. *Projet Explore 2070 Rapport final*. 92p.
- Miralles, D.G., van den Berg, M.J., Gash, J.H., Parinussa, R.M., de Jeu, R.A., Beck, H.E., Holmes, T.R., Jiménez, C., Verhoest, N.E., Dorigo, W.A., others, 2014. El Niño–La Niña cycle and recent trends in continental evaporation. *Nat. Clim. Change* 4, 122–126.
- Mitsch, W.J., Zhang, L., Waletzko, E., Bernal, B., 2014. Validation of the ecosystem services of created wetlands: two decades of plant succession, nutrient retention, and carbon sequestration in experimental riverine marshes. *Ecol. Eng.* 72, 11–24.
- Moeck, C., Brunner, P., Hunkeler, D., 2016. The influence of model structure on groundwater recharge rates in climate-change impact studies. *Hydrogeol. J.* 1–14.
- Molina-Navarro, E., Trolle, D., Martínez-Pérez, S., Sastre-Merlín, A., Jeppesen, E., 2014. Hydrological and water quality impact assessment of a Mediterranean limno-reservoir under climate change and land use management scenarios. *J. Hydrol.* 509, 354–366.
- Moor, H., Hylander, K., Norberg, J., 2015. Predicting climate change effects on wetland ecosystem services using species distribution modeling and plant functional traits. *Ambio* 44, 113–126.
- Moreau S., Bottin A., Genty C., Boitard C., Bird G., 2012. Résultat de l'enquête nationale à dire d'experts sur les zones humides. Etat en 2010 et évolution entre 2000 et 2010. Commissariat général au développement durable, études & documents, N°70 octobre 2012, 100p.
- Moss B., Kosten S., Meerhoff M., Battarbee R.W., Jeppesen E., Mazzeo N., Havens K., Lacerot G., Liu Z., De Meester L., Paerl H. Scheffer M., 2011. Allied attack : climate change and eutrophication. *Inland Waters* 1(2) : 101 - 105.
- Mueller, B., Seneviratne, S.I., 2014. Systematic land climate and evapotranspiration biases in CMIP5 simulations. *Geophys. Res. Lett.* 41, 128–134.
- Nerem, R.S., Chambers, D.P., Choe, C., Mitchum, G.T., 2010. Estimating mean sea level change from the TOPEX and Jason altimeter missions. *Mar. Geod.* 33, 435–446.
- Ondiviela, B., Losada, I.J., Lara, J.L., Maza, M., Galván, C., Bouma, T.J., van Belzen, J., 2014. The role of seagrasses in coastal protection in a changing climate. *Coast. Eng.* 87, 158–168.
- Ouzeau, G., Déqué, M., Jouini, M., Planton, S., Vautard, R., sous la direction de Jouzel J., 2014.. Le climat de la France au XXIème siècle. Volume 4. Scénarios régionalisés : éditions 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer. Rapport direction général de l'énergie et du climat. Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie. 64p.
- Pellicciotti, F., Carenzo, M., Bordoy, R., Stoffel, M., 2014. Changes in glaciers in the Swiss Alps and impact on basin hydrology: current state of the art and future research. *Sci. Total Environ.* 493, 1152–1170.
- Perga, M.-E., Frossard, V., Jenny, J.-P., Alric, B., Arnaud, F., Berthon, V., Black, J., Domaizon, I., Giguët-Covex, C., Kirkham, A., others, 2015. High-resolution paleolimnology opens new management perspectives for lakes adaptation to climate warming. *Front. Ecol. Evol.* 3, 72.
- Piazza, M., Boé, J., Terray, L., Pagé, C., Sanchez-Gomez, E., Déqué, M., 2014. Projected 21st century snowfall changes over the French Alps and related uncertainties. *Clim. Change* 122, 583–594.
- Planton, S., Le Cozannet, G., Cazenave, A., Costa, S., Douez, O., Gaufres, P., Hissel, F., Idier, D., Laborie, V., Petit V., Sergent, P., sous la direction de Jouzel, J., 2015. Changement climatique et niveau de la mer : de la planète aux côtes françaises. Rapport. Le climat de la France au XXIème siècle, volume 5, 71p.

- Planton, S., Bopp, L., Brun, É., Cattiaux, J., Chauvin, F., Chevallier, M., Ciais, P., Douville, H., Giraud, G., Soubeyroux, J.-M., others, 2015. Évolution du climat depuis 1850. *Rubr. Chang. Clim.*
- Pletterbauer, F., Melcher, A.H., Ferreira, T., Schmutz, S., 2015. Impact of climate change on the structure of fish assemblages in European rivers. *Hydrobiologia* 744, 235–254.
- Politti, E., Egger, G., Angermann, K., Rivaes, R., Blamauer, B., Klösch, M., Tritthart, M., Habersack, H., 2014. Evaluating climate change impacts on Alpine floodplain vegetation. *Hydrobiologia* 737, 225–243.
- Poulos, S.E., Collins, M.B., 2002. Fluvial sediment fluxes to the Mediterranean Sea: a quantitative approach and the influence of dams. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 191, 227–245.
- Provansal, M., Dufour, S., Sabatier, F., Anthony, E.J., Raccasi, G., Robresco, S., 2014. The geomorphic evolution and sediment balance of the lower Rhône River (southern France) over the last 130 years: hydropower dams versus other control factors. *Geomorphology* 219, 27–41.
- Prudhomme, C., Giuntoli, I., Robinson, E. L., Clark, D.-B., Arnell, N. W., Dankers, R., Fekete, B. M., Franssen, W., Gerten, D., Gosling, S. N., Hagemann, S., Hanna, D. M., Kim, H., Masaki, Y., Satoh, Y., Stacke, T., Wada, Y., Wisser, D., 2014. Hydrological droughts in the 21st century, hotspots and uncertainties from a global multimodel ensemble experiment. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 111, 3262–3267, doi:10.1073/pnas.1222473110, 6p.
- Rahman, K., da Silva, A.G., Tejada, E.M., Gobiet, A., Beniston, M., Lehmann, A., 2015. An independent and combined effect analysis of land use and climate change in the upper Rhone River watershed, Switzerland. *Appl. Geogr.* 63, 264–272.
- Range, P., Chicharo, M. A., Ben-Hamadou, R., Piló, D., Fernandez-Reiriz, M. J., Labarta, U., 2014. Impacts of CO₂-induced seawater acidification on coastal Mediterranean bivalves and interactions with other climatic stressors. *Reg. Environ. Change* 14, 19–30. doi: 10.1007/s10113-013-0478-7
- Renard, B., 2006. Détection et prise en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques en France. PhD Thesis, INPG/Cemagref, Lyon, France.
- Rietbroek, R., Brunnabend, S.-E., Kusche, J., Schröter, J., Dahle, C., 2016. Revisiting the contemporary sea-level budget on global and regional scales. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 113, 1504–1509.
- Rivaes, R., Rodríguez-González, P.M., Albuquerque, A., Pinheiro, A.N., Egger, G., Ferreira, M.T., 2013. Riparian vegetation responses to altered flow regimes driven by climate change in Mediterranean rivers. *Ecohydrology* 6, 413–424. doi:10.1002/eco.1287
- Roche, A., Costa, S., Colas, S., Garnier, E., Vigné, P., Jouatet, J., 2016. Développer la connaissance et l'observation du trait de côte, contribution nationale pour une gestion intégrée. Rapport du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, réalisé par le CEREMA, 25p.
- Rojas, R., Feyen, L., Bianchi, A., Dosio, A., 2012. Assessment of future flood hazard in Europe using a large ensemble of bias-corrected regional climate simulations. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 117.
- Romero, E., Garnier, J., Lassaletta, L., Billen, G., Le Gendre, R., Riou, P., Cugier, P., 2013. Large-scale patterns of river inputs in southwestern Europe: seasonal and interannual variations and potential eutrophication effects at the coastal zone. *Biogeochemistry* 113, 481–505.
- Romo, S., Soria, J., Fernandez, F., Ouahid, Y., BARÓN-SOLÁ, Á., 2013. Water residence time and the dynamics of toxic cyanobacteria. *Freshw. Biol.* 58, 513–522.
- Ruelland, D., Fabre, J., Grouillet, B., Dezetter, A., Vrac, M., Lassonde, S., Ardoin-Bardin, S., Boyer, J.-F., Collet, L., Vivier, C., Galvan, R., 2016. Impacts des changements climatiques et anthropiques sur la gestion quantitative des ressources en eau en méditerranée : évaluation Hérault-Ebre. Rapport final, programme GICC du MEDDE, 127p.
- Ruiz-Villanueva, V., Stoffel, M., Bussi, G., Francés, F., Bréthaut, C., 2015. Climate change impacts on discharges of the Rhone River in Lyon by the end of the twenty-first century: model results and implications. *Reg. Environ. Change* 15, 505–515.
- Salzmann, N., Machguth, H., Linsbauer, A., 2012. The Swiss Alpine glaciers' response to the global "2 C air temperature target." *Environ. Res. Lett.* 7, 44001.
- Santini, M., di Paola, A., 2015. Changes in the world rivers' discharge projected from an updated high resolution dataset of current and future climate zones. *J. Hydrol.* 531, 768–780.
- Sapriza-Azuri, G., Jódar, J., Carrera, J., Gupta, H.V., 2015. Toward a comprehensive assessment of the combined impacts of climate change and groundwater pumping on catchment dynamics. *J. Hydrol.* 529, 1701–1712.

- Sauquet, E., Arama, Y., Blanc-Coutagne, E., Bouscasse, H., Branger, F., Braud, I., Brun, J-F., Cherel, J., Cipriani, T., Datry, T., Ducharme, A., Hendrickx, F., Hingray, B., Krowicki, F., Le Goff, I., Le Lay, M., Magand, C., Malerbe, F., Mathevet, T., Monteil, C., Perrin, C., Poulhe, P., Rossi, A., Samie, R., Strosser, P., Thirel, G., Tilmant, F., Vidal, J-P., 2014. Risque, Ressource en eau et gestion Durable de la Durance en 2050. Projet R²D²2050, rapport final, 243p.
- Schneider, C., Laizé, C.L.R., Acreman, M.C., Florke, M., 2013. How will climate change modify river flow regimes in Europe? *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17, 325–339.
- Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2014. An Updated Synthesis of the Impacts of Ocean Acidification on Marine Biodiversity (Eds: S. Hennige, J.M. Roberts & P. Williamson). Montreal, Technical Series No. 75, 99 pages
- Šepić, J., Vilibić, I., Jordà, G., Marcos, M., 2012. Mediterranean Sea level forced by atmospheric pressure and wind: Variability of the present climate and future projections for several period bands. *Glob. Planet. Change* 86, 20–30.
- Sergent, P., Ropert, F., Prévot, G., Borssard, J., Mattaralo, G., Morel, G., Trmal, C., Perherin, C., Guillou, N., Luck, M., Benoît, M., Bouttes, F., Kergadallan, X., Sergent, P., Tichet, J-J., Nguyen, D.T., Benoît, M., Delisle, J-R., Mar, N-F, Mallet, P., Voyneau, N., Lam, M., Le Banner, G., 2012. Stratégies d'adaptation des ouvrages de protection marine ou des modes d'occupation du littoral vis-à-vis de la montée du niveau des mers et des océans. Projet SAO POLO, rapport final, 119p.
- Simmons, J.A., Anderson, M., Dress, W., Hanna, C., Hornbach, D.J., Janmaat, A., Kuserk, F., March, J.G., Murray, T., Niedzwiecki, J., others, 2015. A Comparison of the Temperature Regime of Short Stream Segments under Forested and Non-Forested Riparian Zones at Eleven Sites Across North America. *River Res. Appl.* 31, 964–974.
- Sivade, E., Clottes, L., Delhaye, H., 2014. Etude de la gestion quantitative du fleuve Rhône à l'étiage, constats et recommandations. Rapport final, Agence de l'eau Rhône Méditerranée et de Corse, DREAL délégation du bassin Rhône Méditerrané, 23p.
- Slangen, A.B.A., Carson, M., Katsman, C.A., van de Wal, R.S.W., Köhl, A., Vermeersen, L.L.A., Stammer, D., 2014. Projecting twenty-first century regional sea-level changes. *Clim. Change* 124, 317–332.
- Soubeyrou, J.-M., Kitova, N., Blanchard, M., Vidal, J.-P., Martin, E., Dandin, P., 2012. Characterization of soil droughts in France and climate change: The ClimSec project: results and applications [WWW Document]. URL <http://hdl.handle.net/2042/47512>
- Soubeyrou, J.-M., Neppel, L., Veyssière, J.-M., Tramblay, Y., Carreau, J., Gouget, V., 2015. Evolution des précipitations extrêmes en France en contexte de changement climatique. *Houille Blanche* 27–33.
- Soubeyrou, J.M., Vidal, J.P., Najac, J., Kitova, N., 2011. Projet ClimSec Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol. Rapp. Final Proj. Dir. Climatol. Météo Fr.
- Souchon, Y., Tissot, L., 2012. Synthesis of thermal tolerances of the common freshwater fish species in large Western Europe rivers. *Knowl. Manag. Aquat. Ecosyst.* 3.
- Spandre, P., François, H., Morin, S., George-Marcelpoil, E., 2015. Dynamique de la neige de culture dans les Alpes Françaises. Contexte climatique et état des lieux. *J. Alp. Res. Rev. Géographie Alp.*
- Spencer, T., Schürch, M., Nicholls, R.J., Hinkel, J., Lincke, D., Vafeidis, A.T., Reef, R., McFadden, L., Brown, S., 2016. Global coastal wetland change under sea-level rise and related stresses: The DIVA Wetland Change Model. *Glob. Planet. Change.*
- Spinoni, J., Naumann, G., Vogt, J., Barbosa, P., 2015. European drought climatologies and trends based on a multi-indicator approach. *Glob. Planet. Change* 127, 50–57.
- Stella, J.C., Rodríguez-González, P.M., Dufour, S., Bendix, J., 2013. Riparian vegetation research in Mediterranean-climate regions: common patterns, ecological processes, and considerations for management. *Hydrobiologia* 719, 291–315.
- Stigter, T.Y., Nunes, J.P., Pisani, B., Fakir, Y., Hugman, R., Li, Y., Tomé, S., Ribeiro, L., Samper, J., Oliveira, R., others, 2014. Comparative assessment of climate change and its impacts on three coastal aquifers in the Mediterranean. *Reg. Environ. Change* 14, 41–56.
- Stocker, T.F., Qin, G.-K., Plattner, L.V., Alexander, S.K., Allen, N.L., Bindoff, F.-M., Bréon, J.A., Church, U., Cubasch, S., Emori, P., Forster, P., Friedlingstein, N., Gillett, J.M., Gregory, D.L., Hartmann, E., Jansen, B., Kirtman, R., Knutti, K., Krishna Kumar, P., Lemke, J., Marotzke, V., Masson-Delmotte, G.A., Meehl, I.I., Mokhov, S., Piao, V., Ramaswamy, D., Randall, M., Rhein, M., Rojas, C., Sabine, D., Shindell, L.D., Talley, D.G., Vaughan, D.G., Xie, S.-P., 2013: Technical Summary. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental*

- Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Taylor, R.G., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., Van Beek, R., Wada, Y., Longuevergne, L., Leblanc, M., Famiglietti, J.S., Edmunds, M., others, 2013. Ground water and climate change. *Nat. Clim. Change* 3, 322–329.
- Terray, L., Boé, J., 2013. Quantifying 21st-century France climate change and related uncertainties. *Comptes Rendus Geosci.* 345, 136–149.
- Tissier, G., 2012. Ressource et gestion intégrée des eaux karstiques de montagne : analyse des impacts du changement climatique et de l'anthropisation des bassins versants. Thèse de doctorat. Sciences de la Terre. Université Grenoble Alpes, 2012. Français. <NNT : 2012GRENA030>. <tel-00808614>, 284p.
- Torres Rondon, L., 2013. Etude et modélisation des transferts d'eau et de sel en milieu deltaïque agricole (Camargue-France). Thèse de doctorat. Université d'Avignon. French. <NNT: 2013AVIG0048>. <tel-01057792>, 203p.s
- Tzanatos, E., Raitos, D.E., Triantafyllou, G., Somarakis, S., Tsonis, A.A., 2013. Indications of a climate effect on Mediterranean fisheries. *Clim. Change* 122, 41–54. doi:10.1007/s10584-013-0972-4
- Ukkola, A.M., Prentice, I.C., 2013. A worldwide analysis of trends in water-balance evapotranspiration. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17, 4177–4187.
- Van Loon, A.F., 2015. Hydrological drought explained. *Wiley Interdiscip. Rev. Water* 2, 359–392.
- van Maanen, B., Nicholls, R.J., French, J.R., Barkwith, A., Bonaldo, D., Burningham, H., Murray, A.B., Payo, A., Sutherland, J., Thornhill, G., others, 2015. Simulating mesoscale coastal evolution for decadal coastal management: A new framework integrating multiple, complementary modelling approaches. *Geomorphology*.
- van Vliet, M.T., Franssen, W.H., Yearsley, J.R., Ludwig, F., Haddeland, I., Lettenmaier, D.P., Kabat, P., 2013. Global river discharge and water temperature under climate change. *Glob. Environ. Change* 23, 450–464.
- van Wesenbeeck, B.K., Mulder, J.P., Marchand, M., Reed, D.J., de Vries, M.B., de Vriend, H.J., Herman, P.M., 2014. Damming deltas: A practice of the past? Towards nature-based flood defenses. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 140, 1–6.
- Vander Vorste, R., 2015. La zone hyporhéique favorise la résilience des communautés d'invertébrés dans les rivières alluviales intermittentes : expériences de terrain et mésocosmes en laboratoire. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard - Lyon I, <NNT : 2015LYO10259>. <tel-01266415>
- Vautard, R., Yiou, P., van Oldenborgh, G.-J., Lenderink, G., Thao, S., Ribes, A., Planton, S., Dubuisson, B., Soubeyrou, J.-M., 2015. Extreme Fall 2014 Precipitation in the Cévennes Mountains. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 96, S56–S60.
- Vernoux, J.F., Seguin, J.J., 2012. Etablissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines – année 2, rapport BRGM/RP-61020-FR, 143 pages, 40 illustrations, 11 tableaux, 4 annexes.
- Vernoux, J.F., 2015. Réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines. Rapport final. BRGM/RP-64858-FR, 51 p., 18 fig., 7 tabl., 1 ann.
- Vert, J., Schaller, N., Villien, C. (coord.), 2013. Agriculture Forêt Climat : vers des stratégies d'adaptation, Centre d'études et de prospective, Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 234p.
- Vicente-Serrano, S.M., Azorin-Molina, C., Sanchez-Lorenzo, A., Revuelto, J., López-Moreno, J.I., González-Hidalgo, J.C., Moran-Tejeda, E., Espejo, F., 2014a. Reference evapotranspiration variability and trends in Spain, 1961–2011. *Glob. Planet. Change* 121, 26–40.
- Vicente-Serrano, S.M., Lopez-Moreno, J.-I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Sanchez-Lorenzo, A., García-Ruiz, J.M., Azorin-Molina, C., Morán-Tejeda, E., Revuelto, J., Trigo, R., others, 2014b. Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe. *Environ. Res. Lett.* 9, 44001.
- Vidal, J.-P., Martin, E., Kitova, N., Najac, J., Soubeyrou, J.-M., 2012. Evolution of spatio-temporal drought characteristics: validation, projections and effect of adaptation scenarios. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16, 2935–2955.

- Vidal, J.P., Hingray, B., Magand, C., Sauquet, E., Ducharne, A., 2016. Hierarchy of climate and hydrological uncertainties in transient low-flow projections. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(9): 3651-3672.
- Vincent, C., Harter, M., Gilbert, A., Berthier, E., Six, D., 2014. Future fluctuations of Mer de Glace, French Alps, assessed using a parameterized model calibrated with past thickness changes. *Ann. Glaciol.* 55, 15–24.
- Visser, H., Dangendorf, S., Petersen, A.C., 2015. A review of trend models applied to sea level data with reference to the “acceleration-deceleration debate.” *J. Geophys. Res. Oceans* 120, 3873–3895.
- Vo, P.T., Ngo, H.H., Guo, W., Zhou, J.L., Nguyen, P.D., Listowski, A., Wang, X.C., 2014. A mini-review on the impacts of climate change on wastewater reclamation and reuse. *Sci. Total Environ.* 494, 9–17.
- Wang, K., Dickinson, R.E., 2012. A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability. *Rev. Geophys.* 50.
- Wenzel, M., Schröter, J., 2014. Global and regional sea level change during the 20th century. *J. Geophys. Res. Oceans* 119, 7493–7508.
- Werner, A.D., Bakker, M., Post, V.E., Vandenbohede, A., Lu, C., Ataie-Ashtiani, B., Simmons, C.T., Barry, D.A., 2013. Seawater intrusion processes, investigation and management: recent advances and future challenges. *Adv. Water Resour.* 51, 3–26.
- Wesselink, A., Warner, J., Syed, M.A., Chan, F., Tran, D.D., Huq, H., Huthoff, F., Le Thuy, N., Pinter, N., Van Staveren, M., others, 2015. Trends in flood risk management in deltas around the world: Are we going 'soft'? *Int. J. Water Gov.* 3, 25–46.
- Wilhite, D.A., Glantz, M.H., 1985. Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions. *Water Int.* 10, 111–120.
- Wittmann, A.C., Pörtner, H.-O., 2013. Sensitivities of extant animal taxa to ocean acidification. *Nat. Clim. Change* 3, 995–1001.
- Woodworth, P.L., Menéndez, M., 2015. Changes in the mesoscale variability and in extreme sea levels over two decades as observed by satellite altimetry. *J. Geophys. Res. Oceans* 120, 64–77.
- Wöppelmann, G., Marcos, M., Coulomb, A., Míguez, B.M., Bonnetain, P., Boucher, C., Gravelle, M., Simon, B., Tiphaneau, P., 2014. Rescue of the historical sea level record of Marseille (France) from 1885 to 1988 and its extension back to 1849–1851. *J. Geod.* 88, 869–885.
- Zampieri, M., Scocimarro, E., Gualdi, S., Navarra, A., 2015. Observed shift towards earlier spring discharge in the main Alpine rivers. *Sci. Total Environ.* 503, 222–232.
- Zeng, Z., Wang, T., Zhou, F., Ciais, P., Mao, J., Shi, X., Piao, S., 2014. A worldwide analysis of spatiotemporal changes in water balance-based evapotranspiration from 1982 to 2009. *J. Geophys. Res. Atmospheres* 119, 1186–1202.
- Zhang, K., Kimball, J.S., Nemani, R.R., Running, S.W., Hong, Y., Gourley, J.J., Yu, Z., 2015. Vegetation greening and climate change promote multidecadal rises of global land evapotranspiration. *Sci. Rep.* 5.

IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LE DOMAINE DE L'EAU

sur les bassins Rhône-Méditerranée et Corse.

Bilan actualisé des connaissances.

Ce document est une actualisation du bilan des connaissances scientifiques et techniques sur l'impact du changement climatique sur la ressource en eau et les milieux aquatiques. Il s'appuie sur des travaux publiés depuis 2012, date de réalisation de la première synthèse (Fabre, 2012).

Il répond à l'une des mesures du Plan de Bassin d'Adaptation au Changement Climatique (PBACC) qui vise à produire, tous les 4 ans, une synthèse des connaissances disponibles. Enrichir la connaissance et prendre en compte les nouveautés de la recherche permet d'adapter et de conforter la politique d'adaptation permettant de faire face aux effets attendus du changement climatique.
