



Synthèse des connaissances sur les
**IMPACTS DU CHANGEMENT
CLIMATIQUE DANS LE DOMAINE DE
L'EAU**
sur le bassin de **CORSE**

septembre 2017

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

juin 2017

Rédaction : Thomas Pelte

avec la contribution d'Audrey Honorez (OEHC), Christine PERGENT (conseil scientifique Parc Naturel Régional de Corse), Nicolas FRISSANT et Rémi BELLON (BRGM), Pierre LEJEUNE (STARESO), Christophe MORI (Université de Corse), Jean-Christophe PAOLI (INRA), Patrick REBILLOUT (Météo France) et Pierre SANTUCCI (conseil scientifique Parc Naturel Régional de Corse)

Objet du rapport.....	1
Introduction.....	1
I Evolution des variables climatiques en Corse - Les températures augmentent et le régime des précipitations change	2
1.1 évolution des températures	3
Le réchauffement de l'air est constaté	3
...et devrait continuer au cours du XXIème siècle	3
1.2 évolution des précipitations	6
Les tendances passées montrent une diminution sensible des précipitations.	8
L'été sera le plus impacté par les diminutions des précipitations.	9
1.3 Évolution de l'évapotranspiration et des sécheresses	11
Tendance à l'augmentation de l'évapotranspiration	11
incidences clés - variables climatiques	13
<hr/>	
2 Impacts sur la ressource et la demande en eau	14
2.1 Les eaux de surface	14
L'évolution tendancielle de l'hydrologie.....	14
Projections à l'échelle de la France et à l'échelle de la Corse	16
2.2 Les eaux souterraines impactées, notamment par une diminution de la recharge par les précipitations.....	18
Peu de tendances observées par le passé.....	18
Les premières études d'impacts montrent une tendance à la diminution de la recharge.....	19
Incertitudes et possibilités d'amélioration	21
Les eaux souterraines sont sensibles aux changements globaux.....	22
Les aquifères littoraux principalement sensibles aux prélèvements anthropiques et à la diminution de la recharge	22
Impact du changement climatique sur le débit des sources.....	22
Impact du changement climatique sur la distribution des eaux	23
Incidences clés - Ressource	24
<hr/>	
3 Les impacts du changement climatique sur les écosystèmes aquatiques et humides	25
3.1 Impacts sur la qualité des eaux de surface	25
Les effets des activités anthropiques resteront majoritaires sur les risques d'eutrophisation	25
3.2 Impacts sur les poissons	25
Effets sur la physiologie	25
Effets sur la dynamique des populations	26
Effets sur la distribution	26
3.3 Impacts des assecs sur les communautés d'invertébrés	26
3.4 Impacts sur les zones humides.....	27

3.5	Impacts sur les écosystèmes marins	27
	Impacts sur les communautés planctoniques	29
	Impacts sur les communautés piscicoles	29
	Impacts sur les herbiers de posidonies	30
	Impacts sur les macroalgues <i>Lithophyllum byssoides</i>	31
	Incidences clés - Biodiversité	32

4 Impacts sur le littoral.....33

4.1	L'Élévation du niveau des mers.....	33
	Une élévation du niveau de la mer déjà observée et qui s'accélère.....	33
	Un phénomène confirmé pour l'avenir mais dont l'ampleur est difficile à caractériser.....	34
4.2	Impacts sur la submersion marine et l'érosion côtière	36
	Incidences clés - Littoral	37

5 conclusion.....38

	Développer une stratégie d'adaptation au changement climatique	38
--	--	----

bibliographie.....40

OBJET DU RAPPORT

Ce document est une synthèse des connaissances scientifiques et techniques sur l'impact du changement climatique sur la ressource en eau et les milieux aquatiques pour le bassin de Corse.

Il s'appuie sur des travaux scientifiques publiés, en particulier ceux exploités dans les deux rapports de bilan des connaissances produits par l'agence de l'eau, Fabre (2012) et Aubé (2017), ainsi que les éléments produits lors des assises de l'eau organisées en 2014-2015 par la Collectivité Territoriale de Corse dont la restitution a été livrée le 5 juin 2015 à Corte (<http://www.oehc.corsica/L-eau-notre-metier/Les-assises-de-l-eau>).

Le présent travail exploite également les données produites par Météo France et mises à disposition par le biais de la plateforme DRIAS (portail internet dont la maintenance est assurée par Météo France sous l'autorité de l'Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique, ONERC) ou de communications faites par Météo France en particulier sur le territoire corse.

Enfin, les publications scientifiques, rapports techniques ou produits d'interventions en séminaires sont exploités pour éclairer la présente synthèse.

Ce document ne peut prétendre couvrir et rendre compte de manière exhaustive des connaissances scientifiques et techniques disponibles sur le sujet des incidences du changement climatique sur l'eau. Il vise un niveau de précision suffisant pour livrer un aperçu de ce qui est connu et ce qui l'est moins, de manière à dégager les phénomènes méritant une réponse en termes de gestion de l'eau.

INTRODUCTION

Le cinquième rapport du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) constate 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.

Le GIEC estime également 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 : seule la considération d'un forçage radiatif d'origine anthropique permet de reproduire les températures observées depuis les années 1960.

Depuis 1998, la vitesse de l'augmentation des températures de surface tend à diminuer. Elle était de 0.11°/décennie sur la période 1951-2012 et est de 0.04°/décennie sur la période 1998-2012. Cette diminution non attendue de la vitesse du réchauffement, appelée « hiatus », peut provenir (i) de la variabilité interne naturelle du climat, (ii) d'un oubli ou d'une mauvaise représentation de forçages, (iii) d'erreurs 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).

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. 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

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

les chemins sociétaux qui amèneront à ces émissions de GES. Cela a abouti à 4 scénarios de forçage radiatif (figure 1) 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 1, les scénarios RCP sont proches des SRES, le nouveau scénario maximal (RCP 8.5) est légèrement plus pessimiste que le scénario maximal SRES A2 (Guivarch et al., 2013).

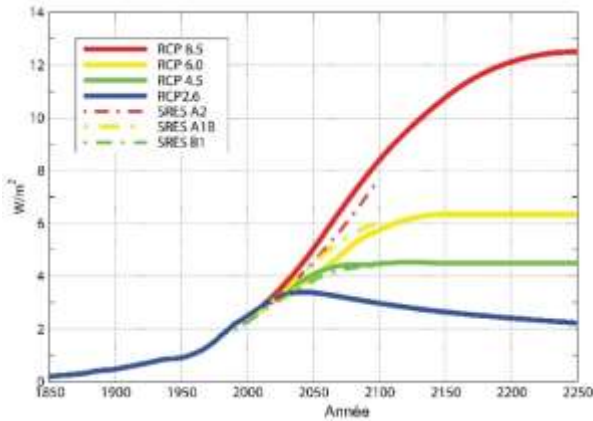


Figure 1 : Les quatre scénarios RCP du 5^{ème} rapport du GIEC, évolution du forçage radiatif et comparaison avec les scénarios SRES antérieurs (Guivarch et al., 2013).

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)

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

Des projections ont été réalisées dans le cadre du plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC) 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). Ces modèles ont une résolution horizontale de 12 km et sont projetés sur une grille de 8x8 km² de résolution. 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 jours de vagues de chaleur, de fortes précipitations...) et des indicateurs intégrés issus de modèles d'impacts (indicateurs de sécheresses météorologique et agricoles).

1.1 EVOLUTION DES TEMPERATURES

Le réchauffement de l'air est constaté ...

La tendance moyenne à l'augmentation des températures a été observée au cours du XX^{ème} siècle. **En Corse**, l'augmentation des températures depuis 1950 est confirmée par Météo France (Météo France / climatHD) qui observe sur la période 1959-2009, une tendance des températures moyennes annuelles proche de +0,2°C par décennie. C'est en été que le réchauffement est le plus marqué sur les cinquante dernières années avec une moyenne estivale comprise entre +0,3°C et +0,4°C par décennie. Lors des assises de l'eau en Corse, Burno et al. (2015) de Météo France ont présenté une courbe tendancielle des températures mesurées à Ajaccio et à Bastia entre 1951 et 2010. Ils observent une augmentation des températures de +0,9°C entre les normales 1951-1980 et 1981-2010 (figure 2).

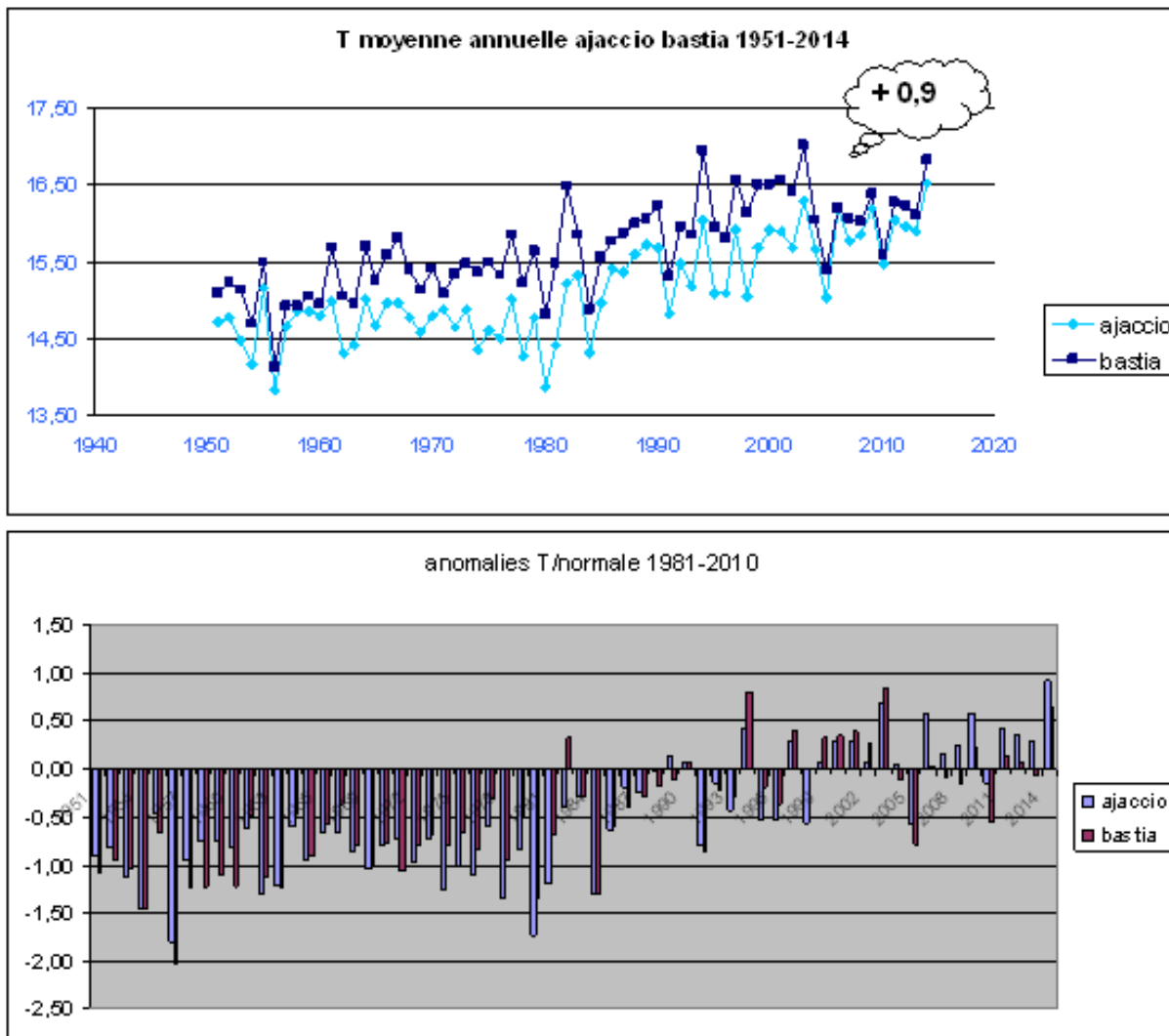


Figure 2 : évolution des températures de l'air en °C aux stations de Bastia et Ajaccio – en haut : évolution de la température moyenne annuelle de 1951 à 2014 – en bas, évolution des anomalies par rapport à la normale 1981-2010 (Bruno et al., 2015).

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

Concernant les horizons futurs, étudiés à travers des approches modélisées, les projections climatiques réalisées s'accordent vers 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 3).

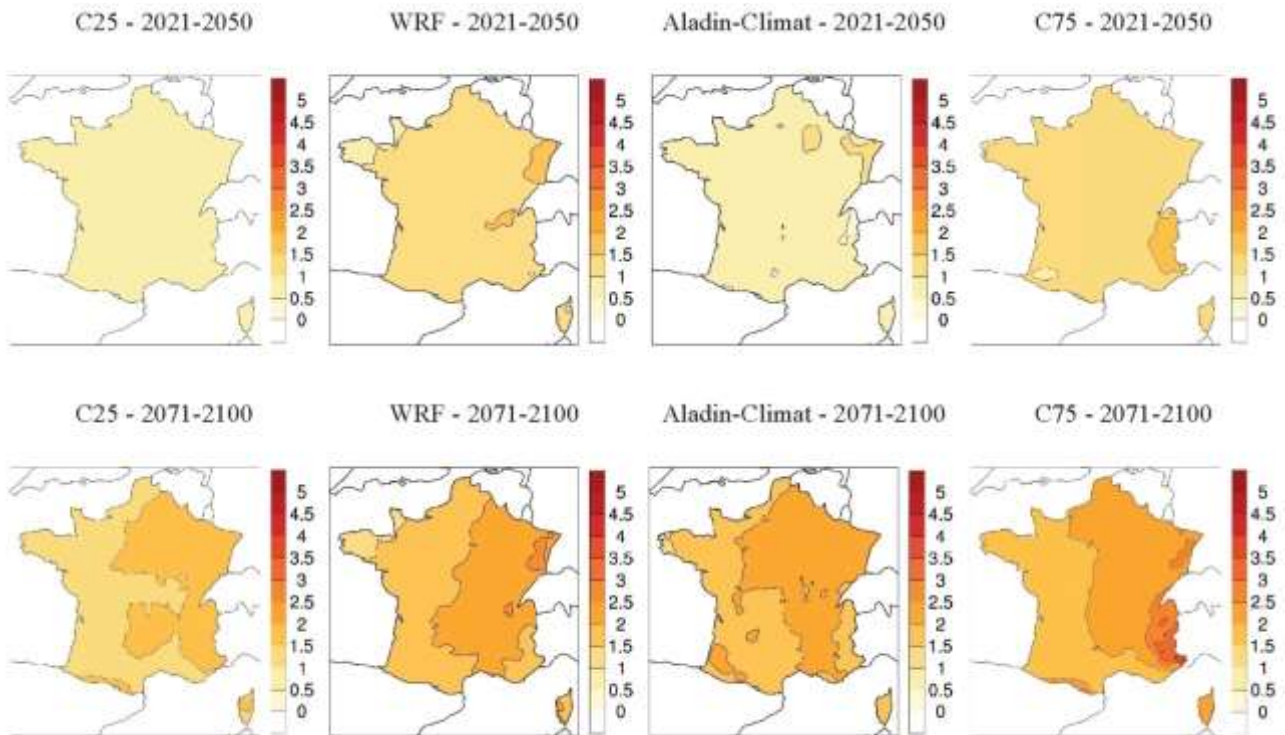


Figure 3 : Ecart de température hivernale (°C) en France relativement à la référence 1976-2005, pour le scénario RCP4.5, aux horizons 2021-2050 (ligne du haut). Pour chaque ligne, de gauche à droite : 25eme centile de l'ensemble, WRF, Aladin-Climat, 75eme centile de l'ensemble (Ouzeau et al., 2014).

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 utilisés par le portail Drias. A la fin du siècle, elle serait de +0.9 à +3.6 suivant les scénarios.

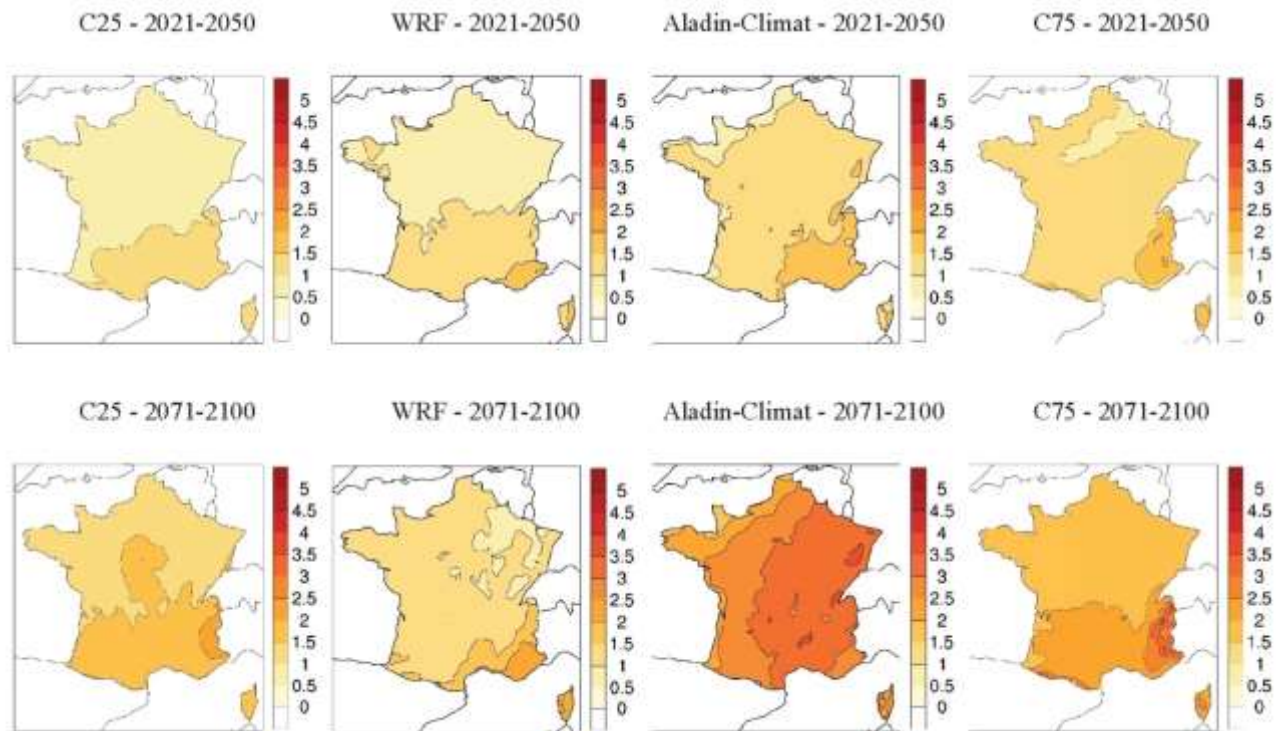


Figure 4 : Ecart de température estivale (°C) en France relativement à la référence 1976-2005, pour le scénario RCP4.5, aux horizons 2021-2050 (ligne du haut). Pour chaque ligne, de gauche à droite : 25eme centile de l'ensemble, WRF, Aladin-Climat, 75eme centile de l'ensemble (Ouzeau et al., 2014).

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 4).

Si l'on zoome sur la Corse, l'évolution annoncée par les approches modélisées est semblable à ce qui est annoncé par Ouzeau et al. (2014) à l'échelle française : tendance globale au réchauffement en particulier en été. Avec le scénario médian (RCP 4.5), l'ordre de grandeur serait une augmentation de 1 à 1,5°C de la température moyenne annuelle à un horizon proche (2021-2050) et de 1,5 à 2,5°C à un horizon lointain (2071-2100) (figure 5).

Sur la saison strictement estivale (figure 6), l'augmentation attendue serait de l'ordre de 1,5 à 2°C en horizon proche et 2 à 3,5°C en horizon lointain (Drias). Ces résultats sont obtenus avec les modèles Aladin et WRF.

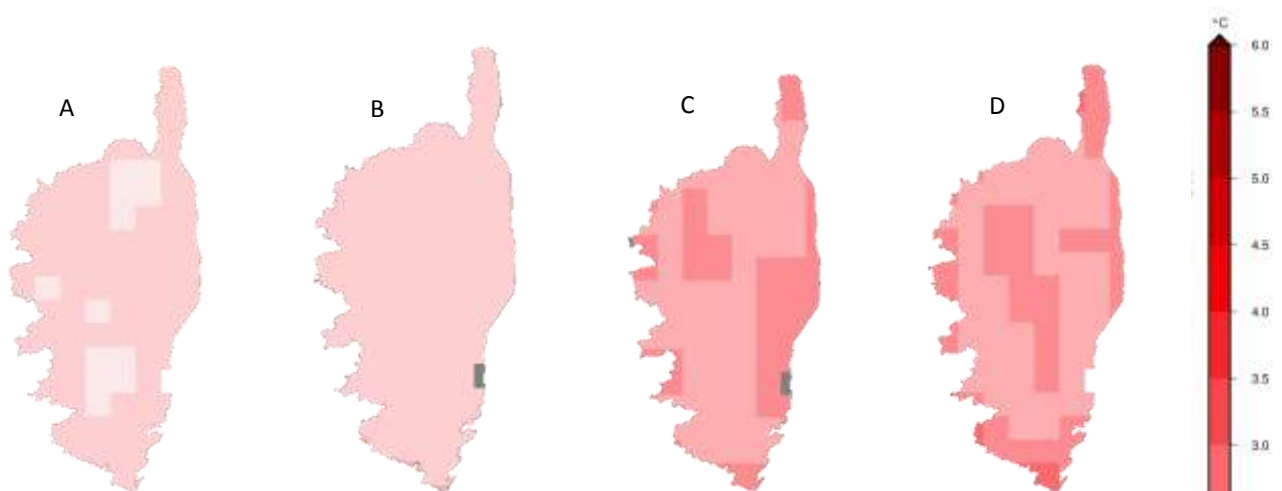


Figure 5 : Ecart de température moyenne **annuelle** (°C) en Corse relativement à la référence, pour le scénario RCP4.5, aux horizons proches 2021-2050 avec le modèle Aladin (A) ou WRF (B) et aux horizons lointains 2071-2100 avec le modèle Aladin (C) ou WRF (D). Extraits de la plateforme DRIAS.

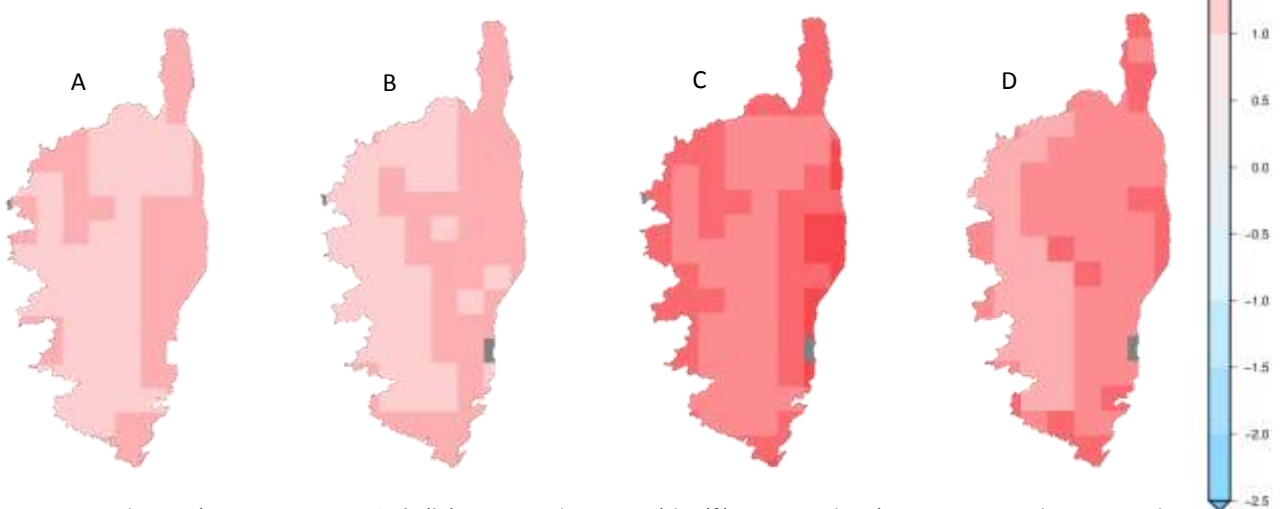


Figure 6 : Ecart de température moyenne **estivale** (°C) en Corse relativement à la référence, pour le scénario RCP4.5, aux horizons proches 2021-2050 avec le modèle Aladin (A) ou WRF (B) et aux horizons lointains 2071-2100 avec le modèle Aladin (C) ou WRF (D). Extraits de la plateforme DRIAS.

Les températures extrêmes. Au niveau de la France, les vagues de chaleur 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 (Jacob et al., 2014) et l'analyse de l'Onerc montrent une tendance significative à une augmentation généralisée du nombre de vagues de chaleur (plus marquée dans le sud-est) et à une diminution des extrêmes froids (plus marquée 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).

Sur la Corse, les projections issues des modèles Aladin et WRF fournies par Drias ne montrent pas d'augmentation des vagues de chaleur, mais les simulations montrent une augmentation du nombre de journées chaudes (température moyenne > 25°).

1.2 EVOLUTION DES PRECIPITATIONS

La Corse reçoit actuellement environ 8 milliards de m³ d'eau par an. Ce volume n'est qu'une estimation, laquelle varie en fonction des années. Ces précipitations sont inégalement réparties sur le territoire en fonction du relief (façade ouest/est - zone littorale) mais aussi en fonction des saisons (été/hiver-printemps/automne).

Ainsi les montagnes exposées à l'ouest reçoivent une plus grande quantité d'eau, à l'exception de juillet où ce sont les montagnes en versant tyrrhénien qui sont les plus humides (cf. figure 7).

Le seuil de sécheresse est atteint, lorsque les précipitations annuelles sont inférieures à 500 mm. C'est le cas des deux extrémités de l'île qui font partie des régions les plus sèches.

Moyenne annuelle de référence 1981-2010 des précipitations Corse

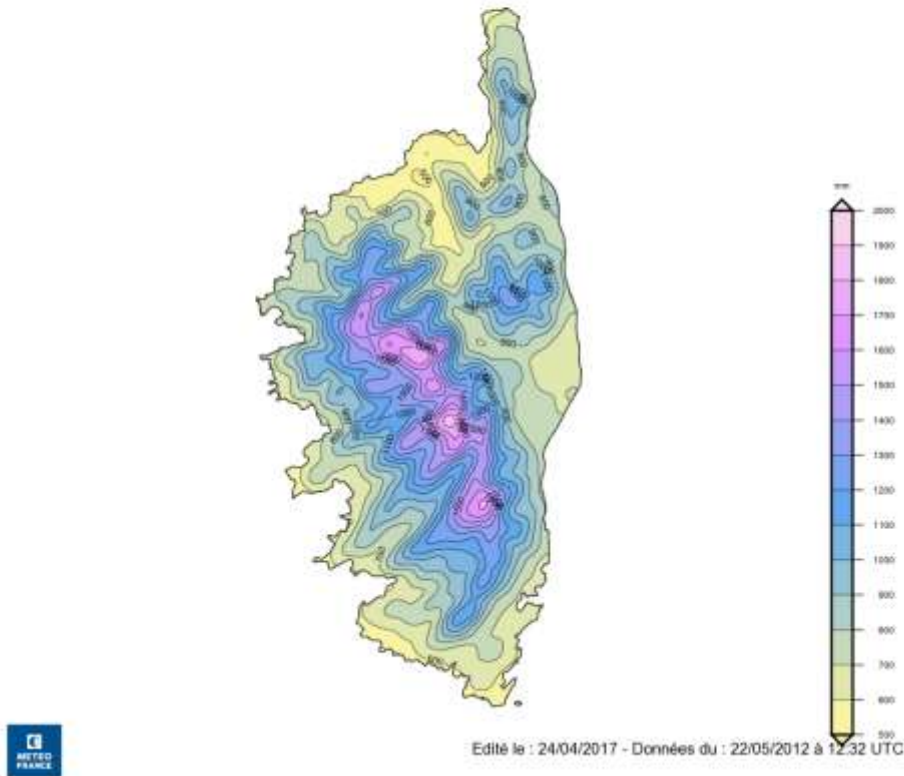


Figure 7 : précipitations en Corse (en mm) – moyenne annuelle de référence 1981-2010 (Météo France)

L'automne et l'hiver totalisent la majeure partie des précipitations de l'année avec une dominante prononcée sur les reliefs des versants occidentaux qui s'explique par l'affluence des perturbations atmosphériques venues d'Atlantique mais aussi par la barrière naturelle qu'oppose le relief de l'île, protégeant ainsi les versants orientaux. Le printemps et l'été sont naturellement moins pluvieux et les pluies se concentrent davantage sur l'intérieur de la Corse.

Le littoral de manière générale est beaucoup moins arrosé.

La variabilité saisonnière marquée des précipitations se traduit sur l'hydrologie : la Corse comporte des spécificités, notamment avec des débits hivernaux exceptionnellement élevés et des débits d'étiage particulièrement faibles (Honorez, 2015).

D'après la synthèse livrée lors des assises de l'eau (Honorez, 2015), l'enneigement est important en Corse mais également sujet comme les précipitations à une grande variabilité interannuelle et se traduit par un manteau neigeux permanent de novembre à avril sur le relief. L'enneigement maximal annuel se situe généralement au cours de la première décennie du mois de mars. Cette neige joue un rôle important de réserve potentielle par l'apport d'eau de fonte à partir des mois d'avril-mai. La médiane de l'équivalent en eau du manteau neigeux dans la première décennie de mars est de 50 mm (cf. figure 8).

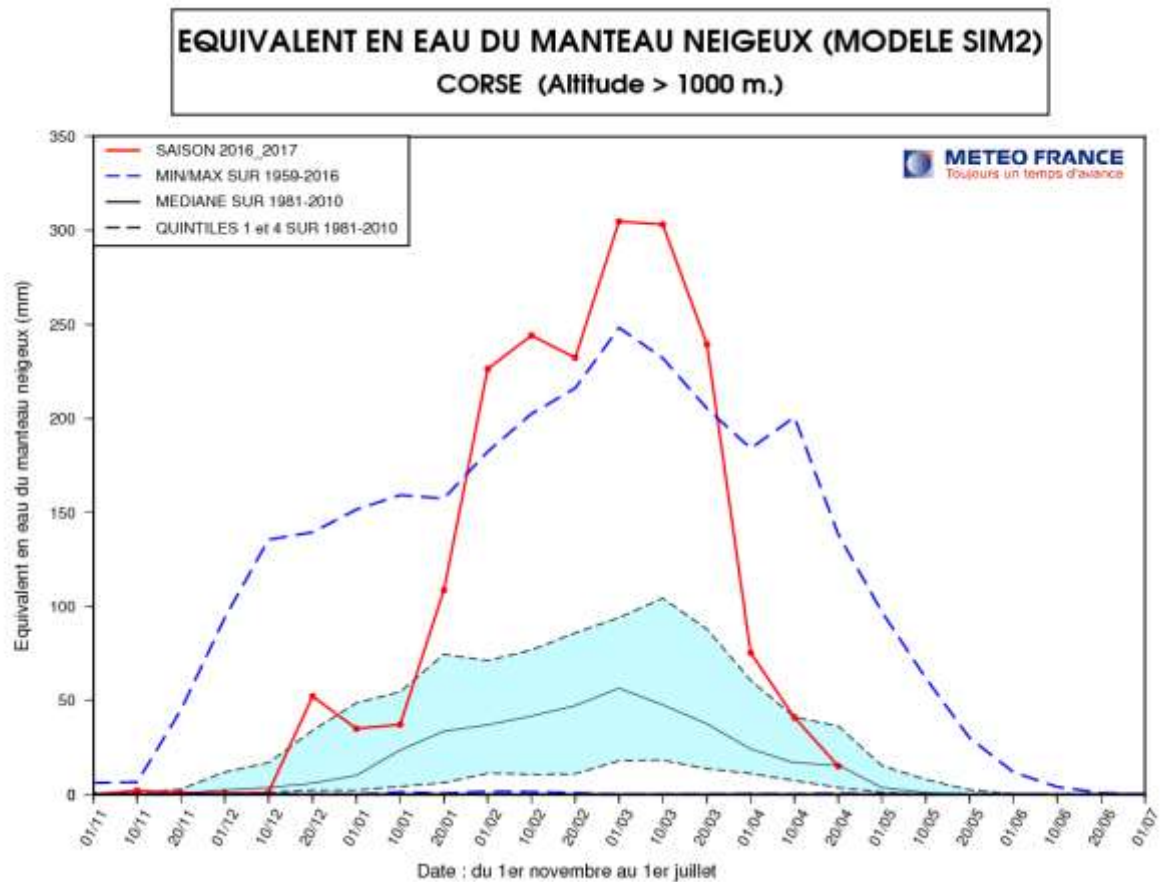


Figure 8 : équivalent en eau du manteau neigeux en Corse (Météo France)

Les tendances passées montrent une diminution sensible des précipitations.

En Corse, Météo France constate sur son site climatHD une grande variabilité des précipitations d'une année à l'autre. Une tendance à une diminution faible des précipitations annuelles peut néanmoins être observée sur la période 1959-2009, tendance qui reste très sensible à l'échantillonnage statistique. Elle correspond en fait à une diminution des cumuls hivernaux, alors qu'aucune tendance n'a été observée pour les autres saisons (météo France/climatHD).

La figure 9, produite par Météo France lors des assises de l'eau (Bruno et al., 2015) illustre cette variabilité interannuelle et la difficulté à dégager une tendance significative. Ils qualifient la décennie 1971-1980 de globalement «humide», la décennie 1981-1990 comme étant « très sèche ». La décennie 1991-2000 est caractérisée par une succession d'excédents et de déficits significatifs. La décennie 2001-2010 est caractérisée par une période sèche suivie d'une période plus humide.

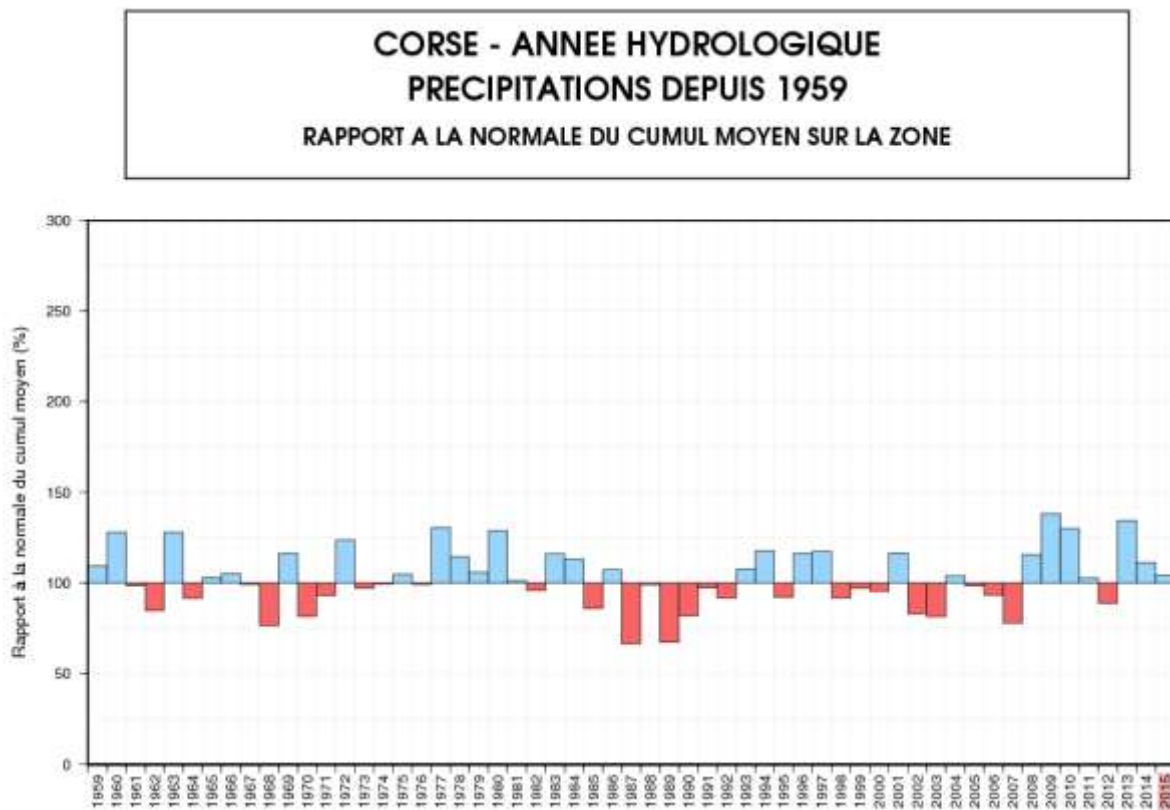


Figure 9 : rapport à la normale 1959-2015 du cumul moyen de précipitation sur la Corse (Bruno et al., 2015).

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). A l'échelle française, dans le cadre du projet ExtraFlo, l'évolution du maximum des précipitations journalières annuelles en France a été analysée à partir d'environ 900 séries pluviométriques sur la période 1950-2010. Il ressort qu'une majorité des stations présente une tendance à la hausse, mais que cette tendance générale n'est pas significative statistiquement (Lang et al., 2014; Soubeyroux et al., 2015).

Par ailleurs, l'analyse Météo France concernant les pluies diluviennes (nombre de jours de précipitations 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.

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. Cela se traduit par des tendances parfois contradictoires entre les modèles.

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.

En Corse, les projections donnent des résultats sensiblement différents. A l'horizon proche (2051-2070) les résultats des modèles Aladin et WRF fournis par DRIAS ne donnent pas d'évolution marquée. Une très légère augmentation au nord-ouest en Balagne et une légère diminution des cumuls moyens annuels pour le reste de l'île. A horizon lointain (2071-2100), les deux modèles ne s'accordent pas sur la tendance : Aladin confirmerait la diminution, plus marquée au centre-ouest de l'île alors que WRF propose une augmentation des cumuls moyens annuels sur l'ensemble du territoire. Cf. figure 10.

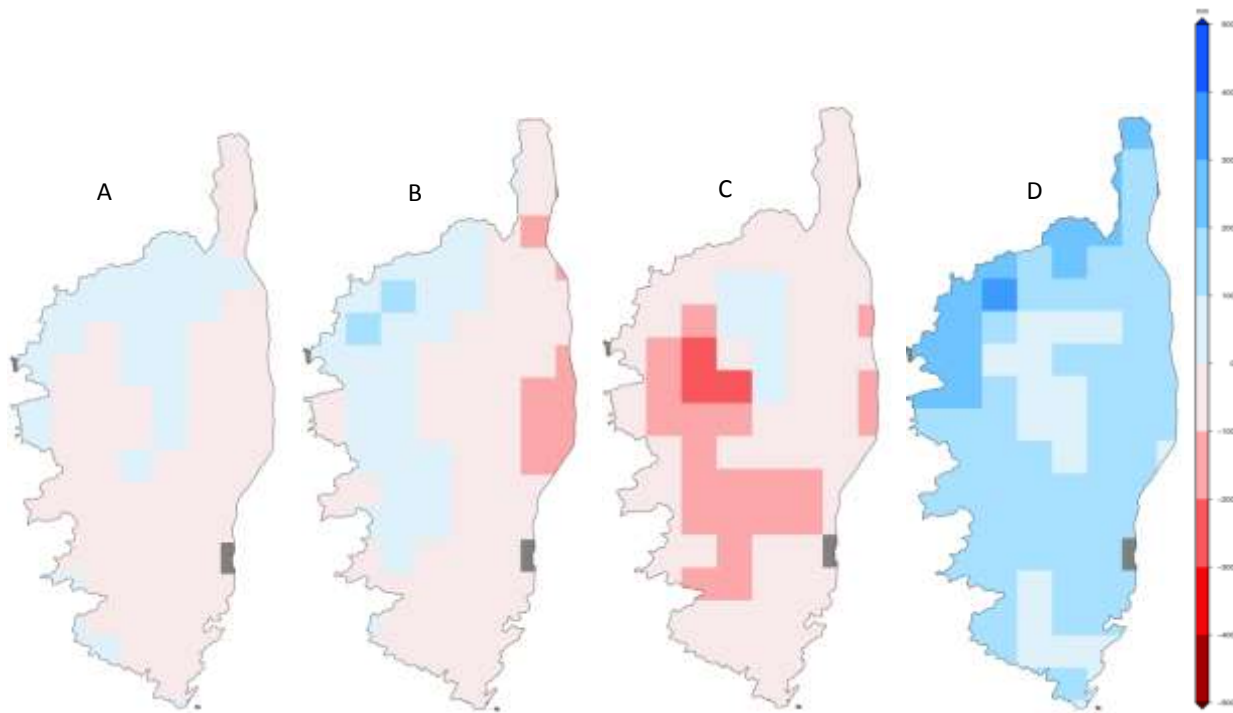


Figure 10 : Ecart de cumuls de précipitations moyens **annuels** (mm) en Corse relativement à la référence, pour le scénario RCP4.5, aux horizons proches 2021-2050 avec le modèle Aladin (A) ou WRF (B) et aux horizons lointains 2071-2100 avec le modèle Aladin (C) ou WRF (D). Extraits de la plateforme DRIAS.

Il est important de noter que la descente d'échelle des modèles climatiques augmente les incertitudes et ce niveau de détails est à prendre avec prudence. La médiane de la simulation Eurocordex montre une diminution de précipitations (cumuls annuels) sensible pour le scénario 8.5 et plus particulièrement à l'horizon lointain.

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.

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). A l'horizon 2071-2100, la tendance est plus marquée, 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 (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 (Lang et al., 2014 ; Jacob et al., 2014 ; Ouzeau et al., 2014).

Si le diagnostic sur les précipitations extrêmes reste incertain, les projections du projet Eurocordex (<http://www.euro-cordex.net/>) montrent pour les scénarios 4.5 et 8.5 une tendance détectable dès l'horizon proche à une l'augmentation des précipitations intenses (>20 mm) (Jacob et al., 2014).

Par ailleurs, le projet SCAMPEI (<http://www.umr-cnrm.fr/scampe/>) a conclu qu'il fallait s'attendre à une diminution du nombre de jours d'enneigement par an (>5 cm) notamment à 1500m d'altitude avec -60% à l'horizon 2050 et jusqu'à -80% à l'horizon lointain. A haute altitude (2400 m) la diminution attendue est de -30% à l'horizon 2050 à 40% à l'horizon 2080.

1.3 ÉVOLUTION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION ET DES SECHERESSES

Tendance à l'augmentation de l'évapotranspiration

La sécheresse est un élément à part entière du climat méditerranéen ; elle est un élément naturel d'un déficit en eau au cours de la période estivale. Cependant il s'agit là d'un phénomène complexe combiné de plusieurs facteurs, notamment le régime pluviométrique, la nature du sol, et le stade de développement phénologique.

En Corse, d'après le site climatHD de MétéoFrance consacré aux tendances évolutives sur les années passées, l'analyse de l'extension moyenne des sécheresses des sols en Corse depuis 1959 rappelle l'importance de l'événement récent de 2003, et des épisodes anciens des années 1997, 1989, 1970 et 1961. L'évolution de la moyenne décennale ne montre pas d'évolution nette dans la fréquence des sécheresses. Bruno et al. (2015) précisent néanmoins que la sécheresse peut soit se prolonger vers les saisons automnales voire hivernales, soit être précoce dès les saisons printanières.

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.

Mori et al. (2017) ont observé une augmentation de l'évapotranspiration (moyennes annuelles) à Ajaccio et à Bastia entre le milieu des années 70 et 2016 (figure 11). Ils constatent également qu'au niveau de ces deux villes l'évapotranspiration dépasse les précipitations, en moyennes annuelles, alimentant la tendance à l'assèchement.

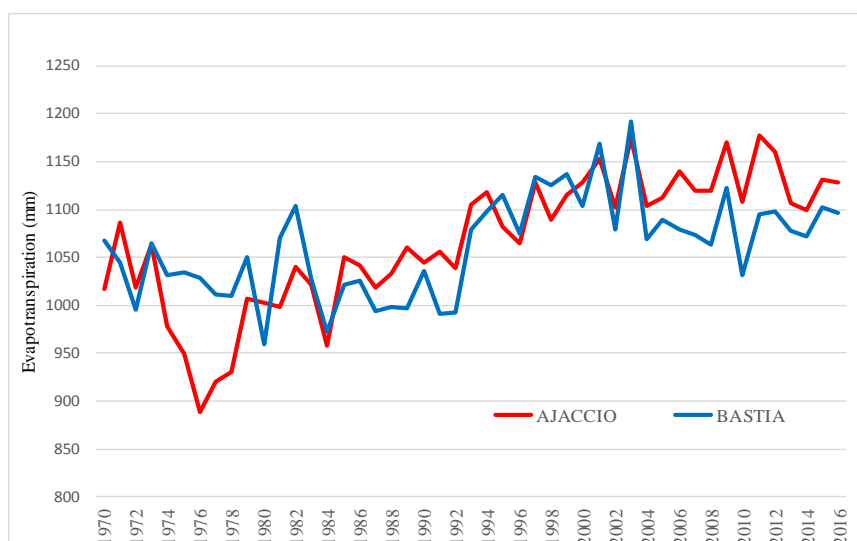


Figure 11 : évapotranspiration (en mm) à Ajaccio et Bastia depuis 1970 (Mori et al., 2017)

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, le contrôle par les végétaux et l'eau disponible.

D'après la présentation de Bruno et al. (2015) et les synthèses bibliographiques de Fabre (2012) et Aubé (2017), les travaux scientifiques s'accordent pour confirmer la tendance à l'augmentation de l'évapotranspiration réelle depuis les années 1980 annoncée dans le 5ème rapport du GIEC. **En Corse**, les produits fournis par Météo-France via la plateforme DRIAS vont dans le même sens avec un assèchement généralisé sur l'île, et plus marqué en secteur ouest. Le signal est renforcé entre l'horizon moyen (autour de 2055) et l'horizon lointain (autour de 2085). Cf. figure 12

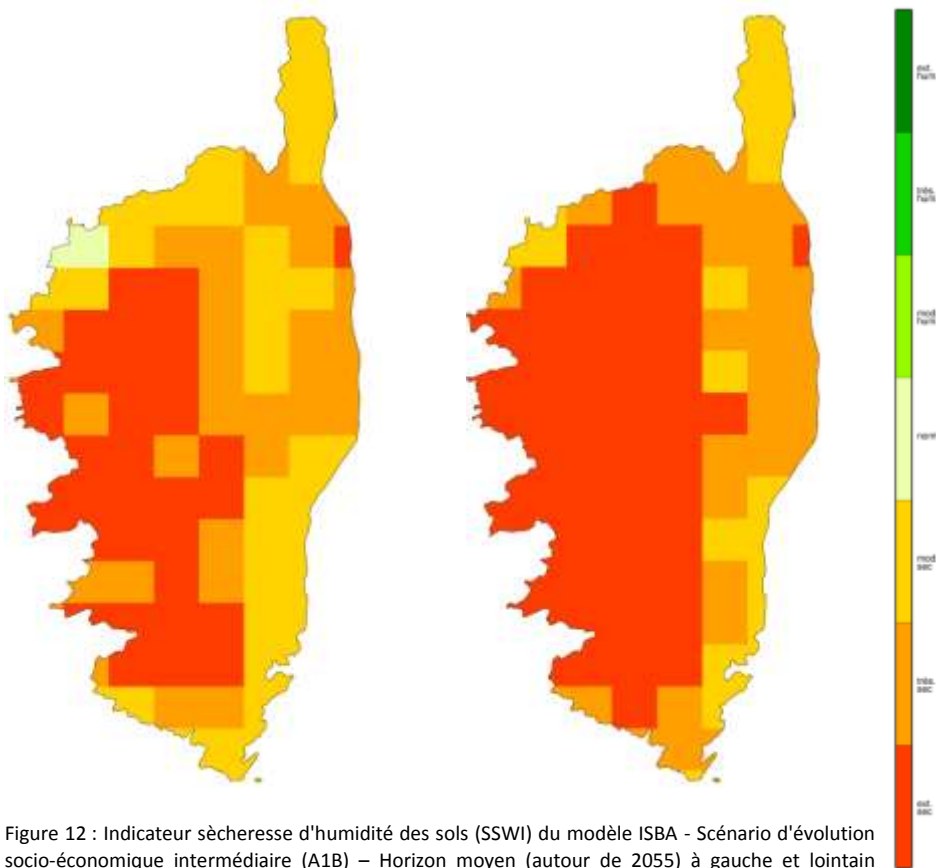


Figure 12 : Indicateur sécheresse d'humidité des sols (SSWI) du modèle ISBA - Scénario d'évolution socio-économique intermédiaire (A1B) – Horizon moyen (autour de 2055) à gauche et lointain (autour de 2085) à droite - Moyenne annuelle. Extraits de la plateforme DRIAS.

INCIDENCES CLES - VARIABLES CLIMATIQUES

- L'élévation des températures atmosphériques s'est amplifiée dans la seconde moitié du XX^{ème} siècle. Les projections pour le XXI^{ème} siècle s'accordent vers une augmentation généralisée des températures. Elle sera plus marquée en été où elle pourrait atteindre +1,5 à +3,5 °C selon l'horizon temporel de la projection.
- Les variations interannuelles des précipitations sont marquées mais présentent une tendance sensible à la baisse. Si les projections futures sont assez incertaines sur l'évolution à attendre aux horizons lointains, le cycle hydrologique sera lui modifié : si la baisse des cumuls annuels est peu marquée, le climat futur alternera des périodes de sécheresse météorologiques et des épisodes de précipitations intenses.
- Les précipitations neigeuses vont diminuer notamment aux altitudes supérieures à 1500 m.
- L'évapotranspiration augmente et va continuer d'augmenter. Les sécheresses agricoles seront plus intenses, plus fréquentes, plus sévères et plus longues.
- En analysant à plus large échelle au niveau français, voire mondial, la Corse se situe dans le secteur où les projections d'évolution sont les plus marquées, au niveau de l'élévation des températures et de l'évapotranspiration et de la diminution de l'humidité des sols. Les tensions, notamment estivales, qui en découlent et que l'on peut déjà observer aujourd'hui autour de la ressource en eau devraient augmenter dans le futur.

2 IMPACTS SUR LA RESSOURCE ET LA DEMANDE EN EAU

2.1 LES EAUX DE SURFACE

L'évolution tendancielle de l'hydrologie

D'une manière générale, l'hydrologie des cours d'eau dans le bassin de Corse montre naturellement une variabilité importante avec des étiages sévères et des périodes de hautes eaux élevées (Honorez, 2015).

Ces caractéristiques spécifiques sont notamment :

- une variabilité hydrologique saisonnière très importante avec des étiages sévères, des crues brutales et des débits hivernaux élevés,
- le caractère torrentiel des cours d'eau,
- une absence de grands fleuves et l'abondance de bassins versants de faibles superficies,
- une disparité spatiale importante sur le territoire, 76% des débits se concentrent sur seulement 7 bassins versants,
- des caractéristiques géologiques entraînant une réponse hydrologique immédiate aux précipitations,
- des modules élevés et des débits d'étiage très faibles sur des durées relativement longues, la période d'étiage en Corse variant de 4 à 5 mois.

Les débits mensuels d'étiage (minimum annuel) ne représentent que 3 à 11% seulement des débits mensuels hivernaux (maximum annuel). La variabilité saisonnière est donc aussi très importante.

En exploitant les suivis hydrologiques assurés sur les cours d'eau de Corse, Honorez (2015) a constaté (figure 13) :

- un prolongement de la période d'étiage qui commence plus tôt (en juin) et se prolonge au mois d'octobre pour certains cours d'eau,
- un fort abaissement des débits d'étiage, illustré par une baisse de 16% en moyenne sur 8 stations de suivi hydrologiques disposant de 40 ans de données : Barchetta, Bivincu, Vechju, Fium'altu, Liamone, Taravu, Rizzanese (avant la mise en service du barrage) et Fangu,
- une diminution significative des modules, illustrée par une baisse de 6% en moyenne sur les 8 stations précitées.

Au-delà du constat d'évolution sur les données passées, à noter toutefois les travaux de Boé et Habets (2014) qui ont mis en évidence une cyclicité naturelle des débits : environ tous les vingt ans, les débits sont alternativement supérieurs puis inférieurs à la moyenne d'environ 15 %. 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.

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

Des travaux de Giuntoli et al. (2013) ont mis en évidence que l'augmentation de la sévérité de la sécheresse serait principalement corrélée à des variables climatiques de grande échelle (Oscillation Atlantique Nord et Multi Décennal). La variabilité temporelle de la sévérité serait quant à elle fonction des conditions climatiques locales (Giuntoli et al., 2013).

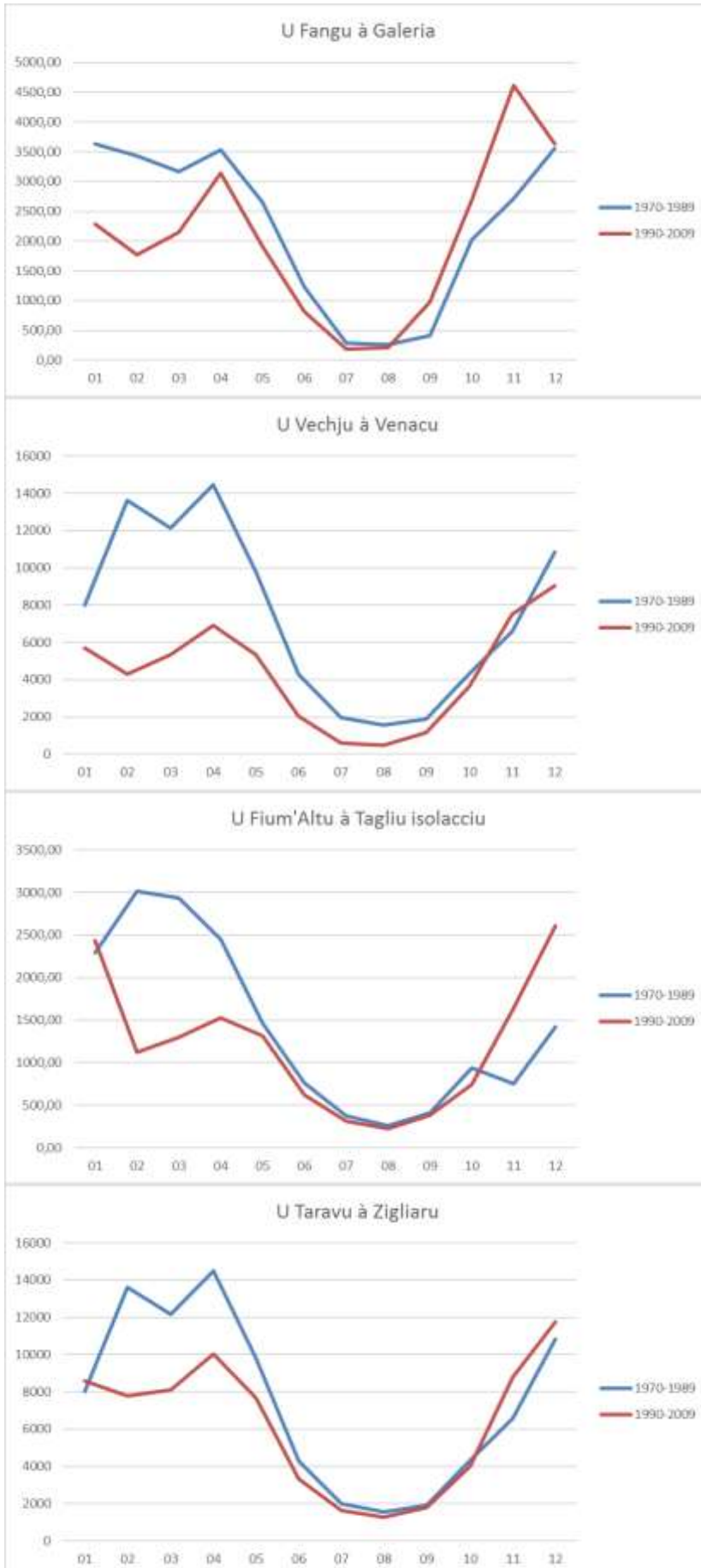


Figure 13 : comparaison des débits (ordonnées en l/s) entre la période 1970-1989 et la période 1990-2010 pour 4 cours d'eau de Corse – l'abscisse correspond aux mois de l'année (Honorez, 2015)

Projections à l'échelle de la France et à l'échelle de la Corse

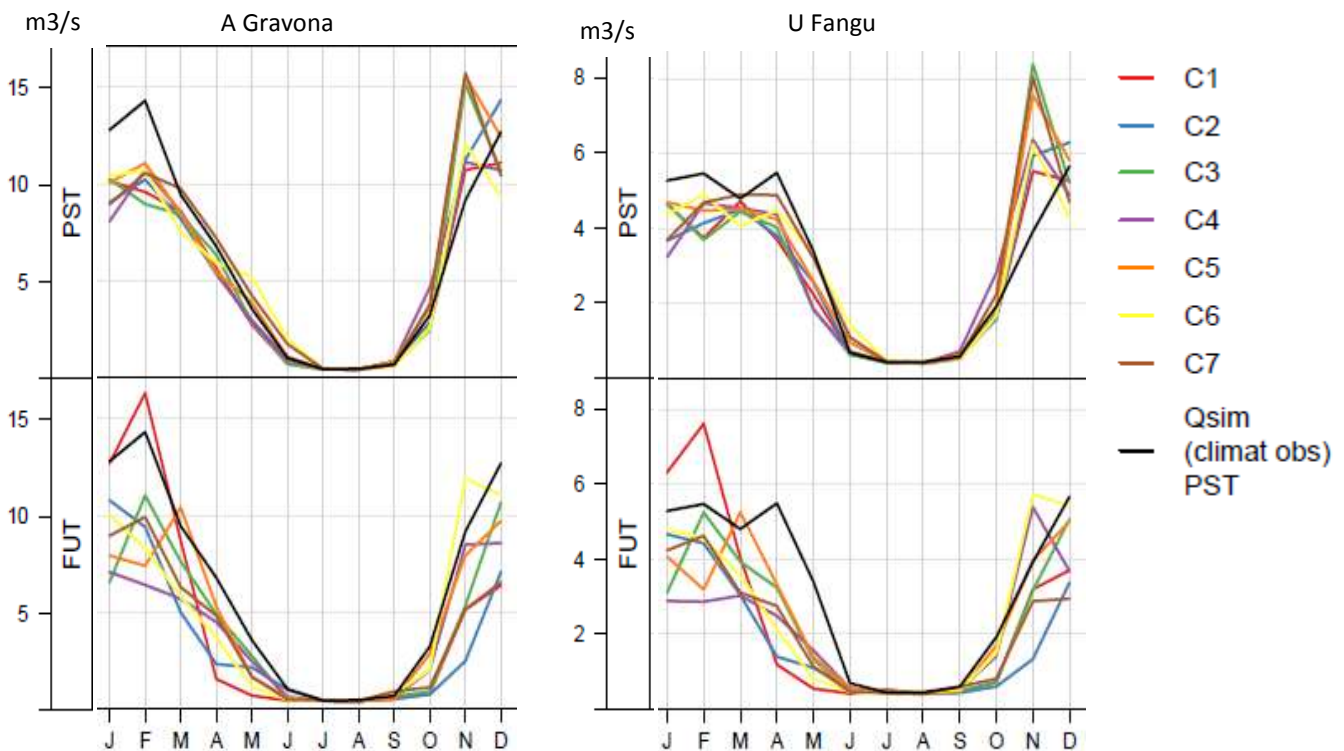
Depuis la synthèse de Fabre (2012), deux travaux à échelle nationale ont projeté l'impact du changement climatique sur l'hydrologie : Explore 2070 porté par le ministère de l'environnement et la thèse de G. Dayon (2015).

Le projet Explore 2070 conclut à 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 % ;
- une diminution prononcée des débits d'été 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. Il semblerait que l'augmentation de l'évapotranspiration 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.

Sur le bassin de Corse, la diminution des débits moyens correspond à la tendance nationale de l'ordre de -10 à -40%. Les graphiques de la figure 14 montrent les projections d'évolution des débits moyens issues du modèle hydrologique ISBA-MDOCOU sur quelques rivières de Corse. Ce modèle est basé sur une approche systémique qui transforme les précipitations en équivalent débits.



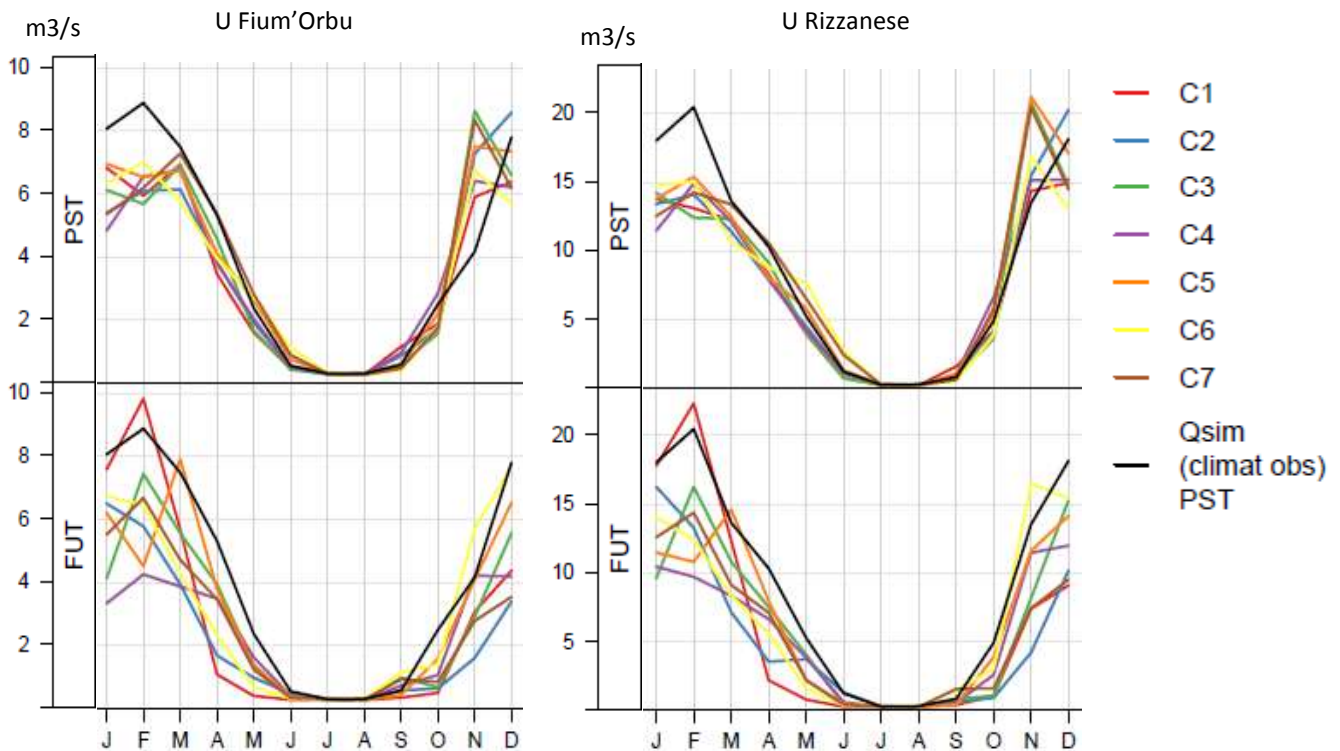


Figure 14 : Débit moyens mensuels en m³/s modélisés de 4 rivières sur la période de référence 1961-1990 (première ligne notée PST) et à l'horizon 2046-2065 (ligne du bas, notée FUT) selon le modèle hydrologique ISBA-MODCOU. La courbe noire pleine représente les débits simulés en climat présent. Les courbes de couleurs sont les projections issues des 7 modèles climatiques utilisés forcés sous le scénario A1B (Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, 2012(a)).

Les résultats présentés dans la figure 13 correspondent à des débits renaturalisés théoriques car uniquement expliqués par le modèle pluies-débits. Ils permettent d'observer la dispersion des résultats issus de différents modèles climatiques, notamment en période hivernale. En termes de projection future, les exemples présentés montrent une tendance à la diminution des modules, potentiellement assez marquée, selon les modèles de l'ordre de -10% pour les valeurs les plus modérées à -40% pour les plus fortes (cf. tableau 2).

	ARPV3	CCCMA	ECHAM5	GFDL20	GFDL21	GISS	MRI
A Gravona	-15	-37	-23	-27	-25	-17	-37
U Fangu	-14	-37	-24	-28	-22	-16	-37
U Tavignanu	-19	-38	-21	-32	-12	-9	-29
U Fium'Orbu	-18	-39	-23	-33	-18	-11	-32
U Rizzanese	-16	-34	-21	-26	-24	-16	-35
U Golu	-16	-40	-22	-33	-13	-12	-33

Tableau 2 : évolution en pourcentage des débits moyens annuels de 6 rivières entre les valeurs simulées en temps présent (la période de référence 1961-1990) et futur (horizon 2046-2065) selon le modèle hydrologique ISBA-MODCOU avec des projections issues des 7 modèles climatiques utilisés par le projet Explore 2070 forcés sous le scénario A1B (Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, 2012(a)).

L'analyse plus fine des résultats fait ressortir que les diminutions de débits seraient plus marquées en période printanière et automnale, la période estivale présentant déjà des débits très faibles. La conséquence en serait une extension de la période de basses eaux qui démarrerait plus tôt et finirait plus tard.

Une part importante du projet a porté sur la prise en compte et la caractérisation des 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).

La thèse de Dayon (2015) a récemment permis de retravailler à l'échelle de la France entière la question des débits sous climat futur. Ce travail confirme qu'au niveau français 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.

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).

En Corse, plus de 50% des eaux destinées à l'alimentation en eau potable sont d'origine souterraine, du fait d'une facilité à la potabilisation et de leur qualité (voir l'eau et le développement durable). Sur l'ensemble des volumes 32 à 39 Mm³ prélevés dans les eaux souterraines, 80% sont destinées à l'alimentation en eau potable. Les aquifères les plus exploités sont globalement les nappes alluviales littorales (Bivincu, Golu, Ficarella, Gravona ...) et ce sont aussi les plus vulnérables du fait de leur faible capacité et de leur surexploitation estivale (BRGM, 2015).

Peu de tendances observées par le passé

En 2015, le BRGM a établi au niveau français un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines. Dans ce travail de Vernoux et al. (2012), des aquifères ont été choisis pour suivre l'impact du changement climatique. 39 aquifères ont été sélectionnés en France sur des critères hydrogéologiques, d'usages et de sensibilité. Deux sont situés sur le bassin de Corse (figure 15). 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 d'un indicateur de suivi de la situation hydrogéologique (Vernoux et al., 2012).

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). 377 piézomètres ont été analysés, disposant d'une chronique de données de minimum 25 années. **Sur la Corse deux piézomètres répondaient aux critères pour que l'analyse de tendance puisse être traitée. L'analyse n'a pas révélé de tendance d'évolution significative** sur ces deux piézomètres, comme pour 306 autres sites en France (Vernoux et al., 2012).

D'après Vernoux et al. (2012), il n'est 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. Ce constat a été rappelé et confirmé par le BRGM lors des assises de l'eau en 2015.



Figure 15 : 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 le bassin de Corse (adapté de Vernoux, 2015).

	Entité BD LISA	Code BSS de l'ouvrage	Nom usuel de l'ouvrage	Début de la chronique
Alluvions récentes du Liamone	900AC13	11172X0119/COSCIA	Coggia	26/04/1988
Alluvions récentes de la Bravona	900AB98	11156X0009/BRAVON	Linguizetta	02/01/1984

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 entrainera, 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 surface connectés aux systèmes souterrains. En comparaison avec les systèmes de surface, les eaux souterraines tendent à réagir plus lentement (Armandine 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. Conforté 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'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2012(c)).

Aucune modélisation hydrogéologique n'a été réalisée sur le bassin 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 16 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) et 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 de Corse s'oriente vers une diminution de la recharge en eau souterraine. La tendance est autour d'une diminution moyenne de la recharge de -20 à -30 %.** (Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, 2012(c)).

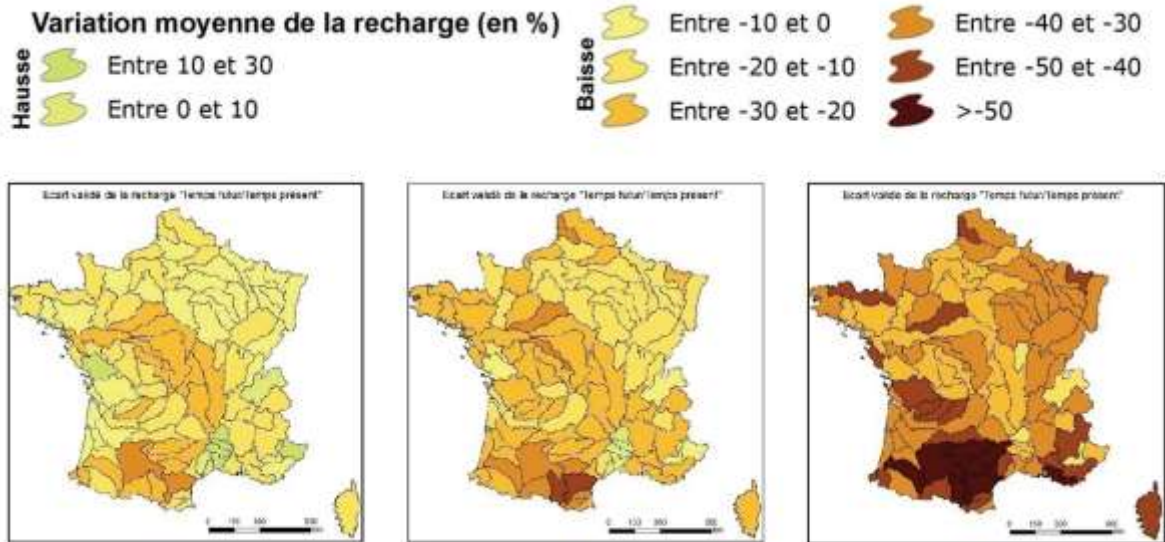


Figure 16 : de gauche à droite : variation moyenne de la recharge (en %) minimale, moyenne et maximale à l'horizon 2045-2065 par rapport à la période de référence 1961-1990 (Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, 2012(c)).

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 (cinq modèles climatiques utilisés dont plusieurs communs 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 en Corse diminuerait en moyenne de l'ordre de -20% avec des diminutions de plus de 40% localement sur le littoral nord-ouest et la pointe sud. La Corse aurait la diminution la plus marquée du sud-est de la France (figure 17).

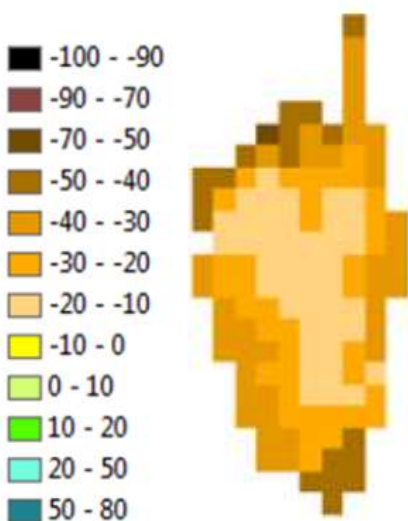


Figure 17 : carte des anomalies multi-scénario (en %) des pluies efficaces entre présent (2071-2000) et futur (2046-2065) (Caballero et al. 2016)

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 -10 et -50% en Corse (figure 18)**.

Il est important de rappeler que cette approche détermine uniquement une tendance d'évolution de la recharge provenant des précipitations. Les nappes alluviales sont pour leur part essentiellement alimentées par les rivières. La diminution du débit des rivières, notamment à l'étiage, entrainera également une diminution de la recharge des nappes d'accompagnement.

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).

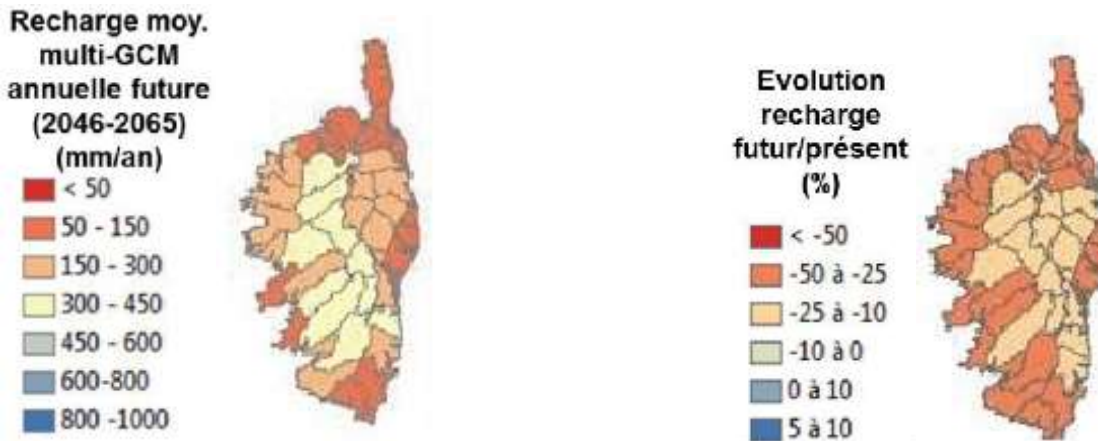


Figure 18 : Gauche : carte de la recharge annuelle moyenne multimodèle calculée sur la grille de 8*8 km sur le de Corse, déduite à partir de 6 scénarios climatiques régionalisés (SCRATCH 2010), pour la période future. Droite : carte de l'évolution de la recharge moyenne multi-modèles annuelle future en proportion de la recharge moyenne annuelle pour la période présente (Caballero et al., 2016).

A partir d'un modèle hydrogéologique à base physique développé pour caractériser la recharge en temps présent et futur (mGROWA), 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 obtenues 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 Kc) 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 Kc 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).

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 le bassin 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 non prise en compte de la recharge effectuée directement par les cours d'eau.

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.

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 l'augmentation de la température ambiante tendront à augmenter la demande en eau. Compte tenu de la diminution de la disponibilité des eaux de surface, les prélèvements dans les eaux souterraines devraient s'accroître.

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).

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

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).

- « 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.).

La sensibilité des aquifères aux intrusions salines a fait l'objet d'une cartographie par le BRGM en 2007 (figure 19).

Impact du changement climatique sur le débit des sources

De nombreux villages en Corse sont alimentés en eau grâce au captage des eaux de source. Ces eaux sont issues de la vidange d'aquifères de formation granitique (Corse Hercynienne) ou métamorphique (Corse Alpine). Ces aquifères sont généralement hétérogènes, cloisonnés et de faibles extensions. De ce fait, leur débit est la plupart du temps modeste et très dépendant de la recharge de la nappe par les précipitations ou le manteau neigeux (faible inertie du système). Une diminution de la recharge de ces aquifères sous l'effet du changement climatique entraînerait une baisse des débits pouvant aboutir au tarissement de certaines sources durant les périodes d'étiage.

Impact du changement climatique sur la distribution des eaux

L'accroissement de l'intensité et de la fréquence des épisodes de fortes précipitations entrainera mécaniquement un accroissement des mouvements de terrain gravitaires au droit des terrains les plus vulnérables. Ces mouvements de terrain (glissement, éboulement, chute de blocs) sont de nature à endommager les infrastructures de distribution de l'eau (canalisation) et à perturber plus ou moins fortement la distribution de celle-ci. Cette problématique est d'ores et déjà prégnante en Outre-mer sous l'effet des pluies tropicales.

Sensibilité aux intrusions salines des masses d'eau souterraines modifiées et des aquifères littoraux en Corse

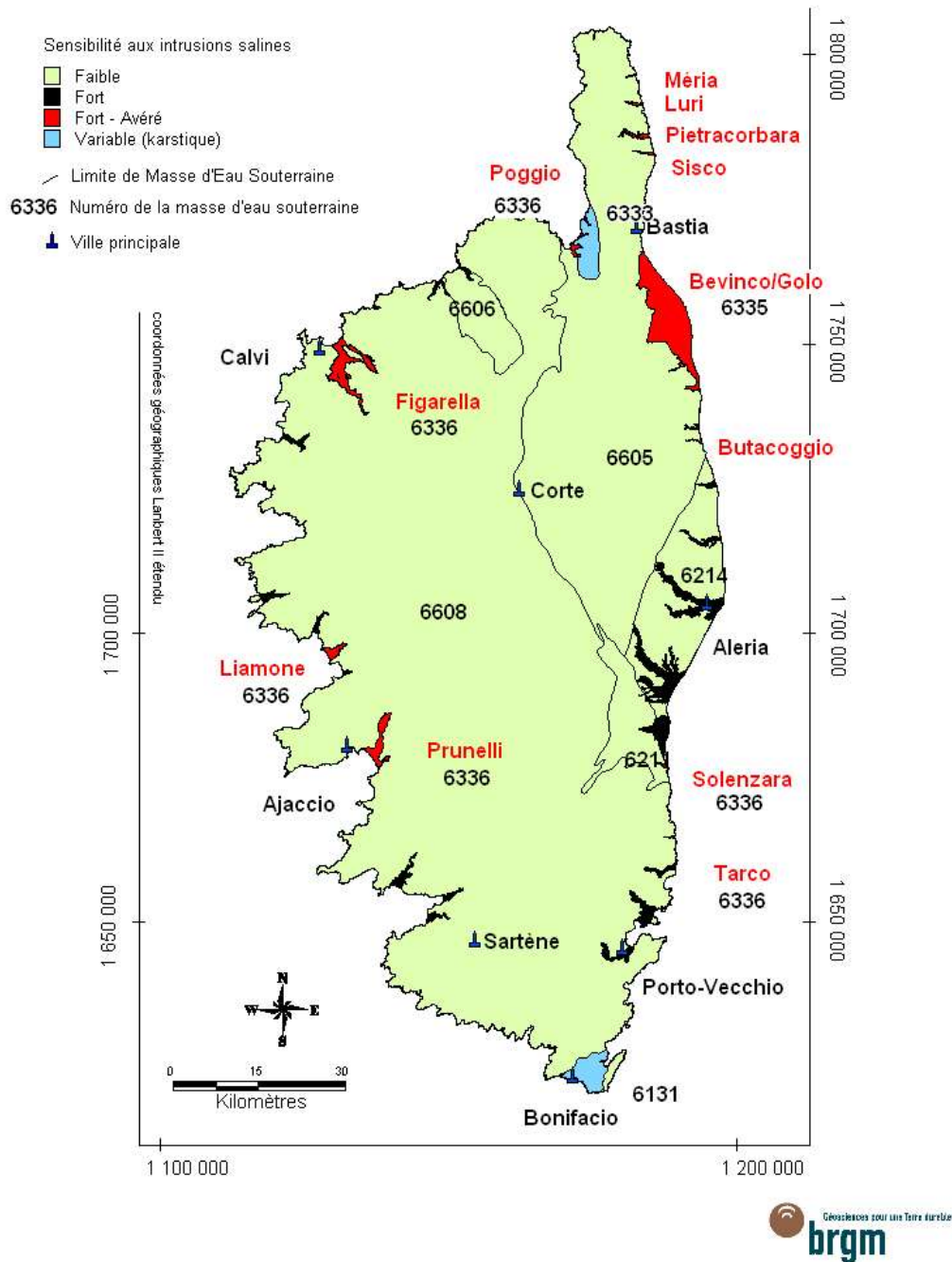


Figure 19 : sensibilité aux intrusions salines des masses d'eau souterraine en Corse

INCIDENCES CLES - RESSOURCE

- Les projections disponibles sont cohérentes concernant les débits annuels moyens : ils devraient diminuer de -10 à -40 % à l'horizon 2070. Les baisses de débits seraient plus marquées en période printanière et automnale, la période estivale présentant déjà des débits très faibles. La conséquence en serait une extension de la période de basses eaux qui démarrerait plus tôt et finirait plus tard.
- Les nouvelles projections confirment une raréfaction de la ressource en eau, principalement en été via une diminution des débits d'étiage.
- La recharge des eaux souterraines par les précipitations et l'infiltration des cours d'eau devrait diminuer.
- Plus que l'élévation du niveau de la mer, c'est la diminution de la recharge et l'accroissement des prélèvements anthropiques qui devraient impacter le plus les intrusions salines.

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 5^{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 surface dans le futur, ces pressions risquent de s'amplifier. Le changement climatique aura des impacts cumulatifs via la modification des régimes thermique, pluviométrique et hydrologique et par l'élévation du niveau de la mer. (IPCC, 2014).

3.1 IMPACTS SUR LA QUALITE DES EAUX DE SURFACE

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

L'un des impacts attendus 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 favoriseraient la croissance du phytoplancton et des macrophytes (Fabre, 2012).

Aubé (2017) a réalisé une synthèse des travaux scientifiques qui se sont attachés à déterminer la part du changement climatique dans les risques d'eutrophisation. Le changement climatique n'est donc pas non plus l'élément de contrôle principal et ses effets sur la qualité de l'eau sont minoritaires d'après les auteurs par rapport aux activités anthropiques en eaux continentales ou en eaux côtières.

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. Les travaux scientifiques sur des lacs ont montré que plus le temps de résidence est long et le brassage faible, plus les colonies de cyanobactéries sont importantes (Romo et al., 2013). S'ajoutent en effets aggravant, les températures élevées associées à une disponibilité en éléments nutritifs (nitrate, ammonium et phosphates) (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, laquelle entraîne la diminution du brassage dans les lacs ou les zones lentes des rivières.

3.2 IMPACTS SUR LES POISSONS

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

Effets sur la physiologie

Une tendance à la diminution de la taille des individus adultes sous l'effet de l'augmentation de la température est observée en milieux contrôlé 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 (Souchon and Tissot, 2012).

Effets sur la dynamique des populations

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 répartitions 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. Les impacts sur la zone méditerranéenne s'expliquent par la forte augmentation des températures et des sécheresses hydrologiques (Pletterbauer et al., 2015).

L'étude présente la température comme facteur principal expliquant 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. Différents travaux ont porté sur l'évolution de la présence des espèces de poissons sur le réseau hydrographique, notamment Comte et al. (2013). D'après leur étude, qui a porté sur la partie continentale de la France, la majorité des espèces montrent un déplacement vers l'amont. Cela se traduit par une contraction de leur habitat, la perte d'habitat favorable à l'aval n'étant pas compensée par les gains à l'amont.

A partir de modèles statistiques, le projet Explore 2070 a projeté l'évolution des habitats favorables par espèce. Le scénario de dispersion nulle sous-tend que seules 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 attendus (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2012(d)).

Les résultats du projet Explore 2070 convergent vers 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 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 faible et moyenne altitudes. A l'inverse, les espèces présentes dans les zones intermédiaires ou aval verront leur aire de répartition augmenter.

3.3 IMPACTS DES ASSECS SUR LES COMMUNAUTES D'INVERTEBRES

De nombreux cours d'eau de Corse présentent un fonctionnement hydrologique naturel de type intermittent. 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 ; Launay & Datry, 2015). Ils observent qu'une diminution de 10% de la permanence d'écoulement entraînerait la disparition de 1 à 1,5 taxons.

3.4 IMPACTS SUR LES ZONES HUMIDES

Selon une étude menée à dire d'experts sur l'évolution des zones humides entre 2000 et 2010, environ 50% des évolutions observées sur les zones humides 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. (Mitsch et al., 2014).

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).

Pour les zones humides littorales, les principaux risques associés au changement climatique sont liés à la salinisation des sols par remontée du biseau salé et la submersion (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2012(e)). L'étude explore 2070 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).

3.5 IMPACTS SUR LES ECOSYSTEMES MARINS

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 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 a 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 à +0.89 g/l (figure 20). (Adloff et al., 2015).

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).

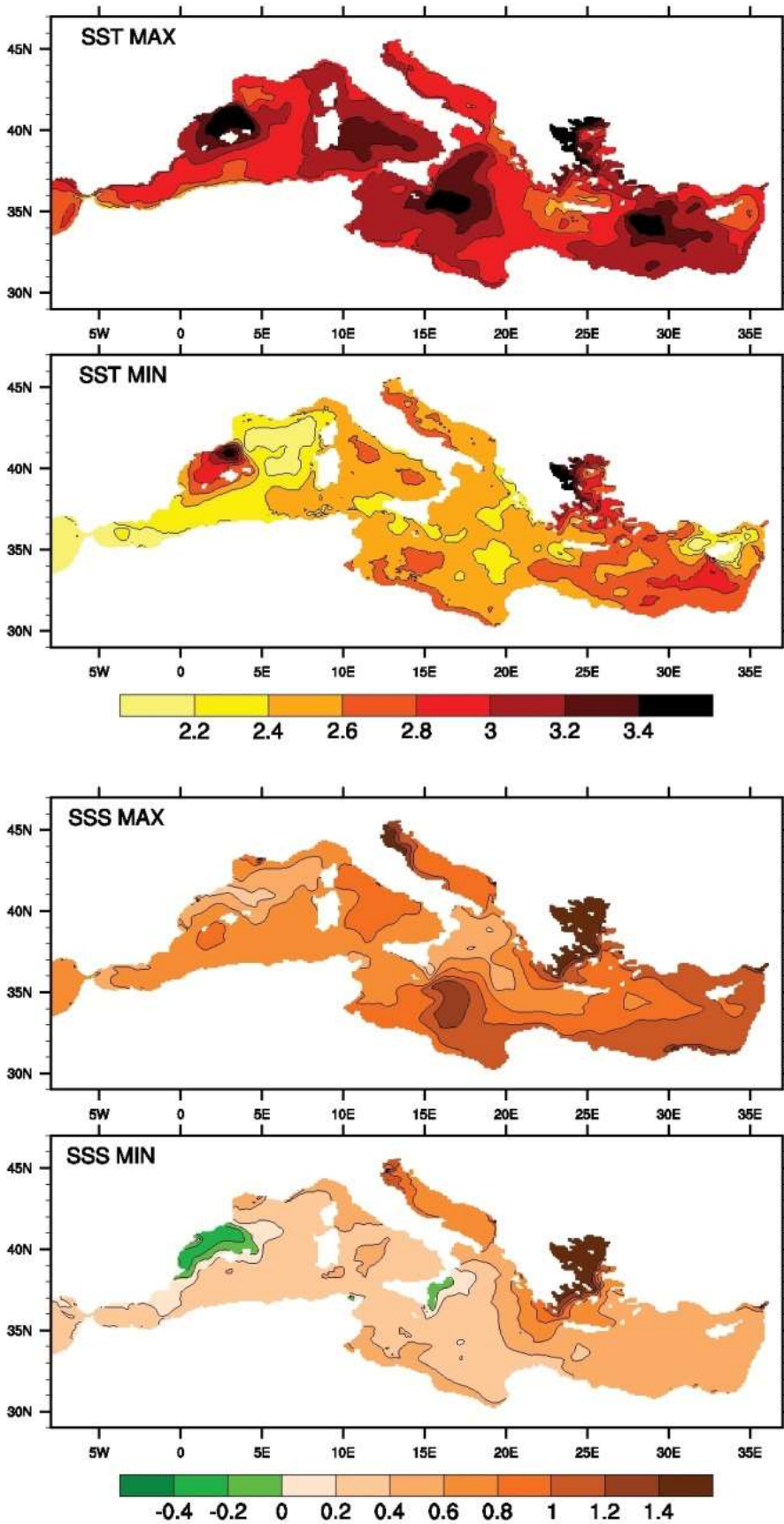


Figure 20 : Deux cartes du haut : évolution de la température maximale (haut) et minimale (bas) de surface de la mer (SST pour Sea Surface Temperature) à l'horizon 2070-2099 par rapport à 1961-1990. Sont représentés en chaque point les résultats d'évolution de la température, en °C, maximums et minimums 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 planctoniques

Le programme STARECAPMED (**ST**ation of **R**eference and **r**esearch on **C**hange of local and global **A**nthropogenic **P**ressures on **M**editerranean **E**cosystems **D**rifts) s'appuie sur la base de données acquises par STARESO depuis plus de 40 années afin de mieux comprendre l'évolution des écosystèmes méditerranéens soumis aux pressions des activités humaines locales et globales (changement climatique). Les acteurs du programme STARECAPMED rapportent les phénomènes possibles qui seraient induits sur les mélanges de la masse d'eau côtière et l'établissement ou non de stratification de la colonne par les variations de température de l'eau et du régime des vents liés au changement climatique :

- l'absence de mélange ou le blocage des eaux profondes riches en nutriments sous une thermocline, en milieu oligotrophe (ce qui est le cas des eaux côtières de surface en Corse) peut enrayer plus ou moins la production phytoplanctonique puis la production zooplanctonique qui suit, en particulièrement si ce phénomène intervient en hivers et au printemps. Cette situation a déjà été observée certaines années en Baie de Calvi dans le cadre du programme STARECAPMED. Ceci peut avoir des conséquences importantes sur l'ensemble de la biodiversité côtière dont les larves sont produites majoritairement au printemps pour profiter du fourrage phytoplanctonique et zooplanctonique normalement produit à cette époque.
- un mélange de la masse d'eau en été, lié au changement des régimes estivaux de vent, pourrait apporter en surface des nutriments par mélange de la colonne (laquelle est normalement stratifiée à cette époque) et ainsi favoriser la survie de larves d'origine exogène ou le développement d'algues notamment de type filamenteuses qui ne devraient pas survivre en été dans une situation normale d'oligotrophie.
- une élévation de la température des eaux de surface en régime de vents faibles peut générer un abaissement de la profondeur de la thermocline en été, exposant, notamment au niveau du coralligène, des organismes qui supportent mal cette élévation de la température (par exemple Corail rouge ou Gorgones) avec des mortalités importantes. Les proliférations de méduses notamment en été pourraient aussi trouver leur origine dans les perturbations de la colonne d'eau.

Impacts sur les communautés piscicoles

Les stocks de poissons sont affectés par plusieurs variables parmi lesquelles la température de l'eau, la salinité (de surface et de profondeur) et les apports en nutriments par les fleuves. Tzanatos et al. (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 lesquelles la sardine, langoustine, raie, requin, sole, le calmar commun, merlu. A l'inverse, les espèces à cycle de vie court seraient davantage pêchées comme l'anchois, la sériole, le vrai crabe, le calmar, la crevette caramote (Tzanatos 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 21) (Albouy et al., 2012).

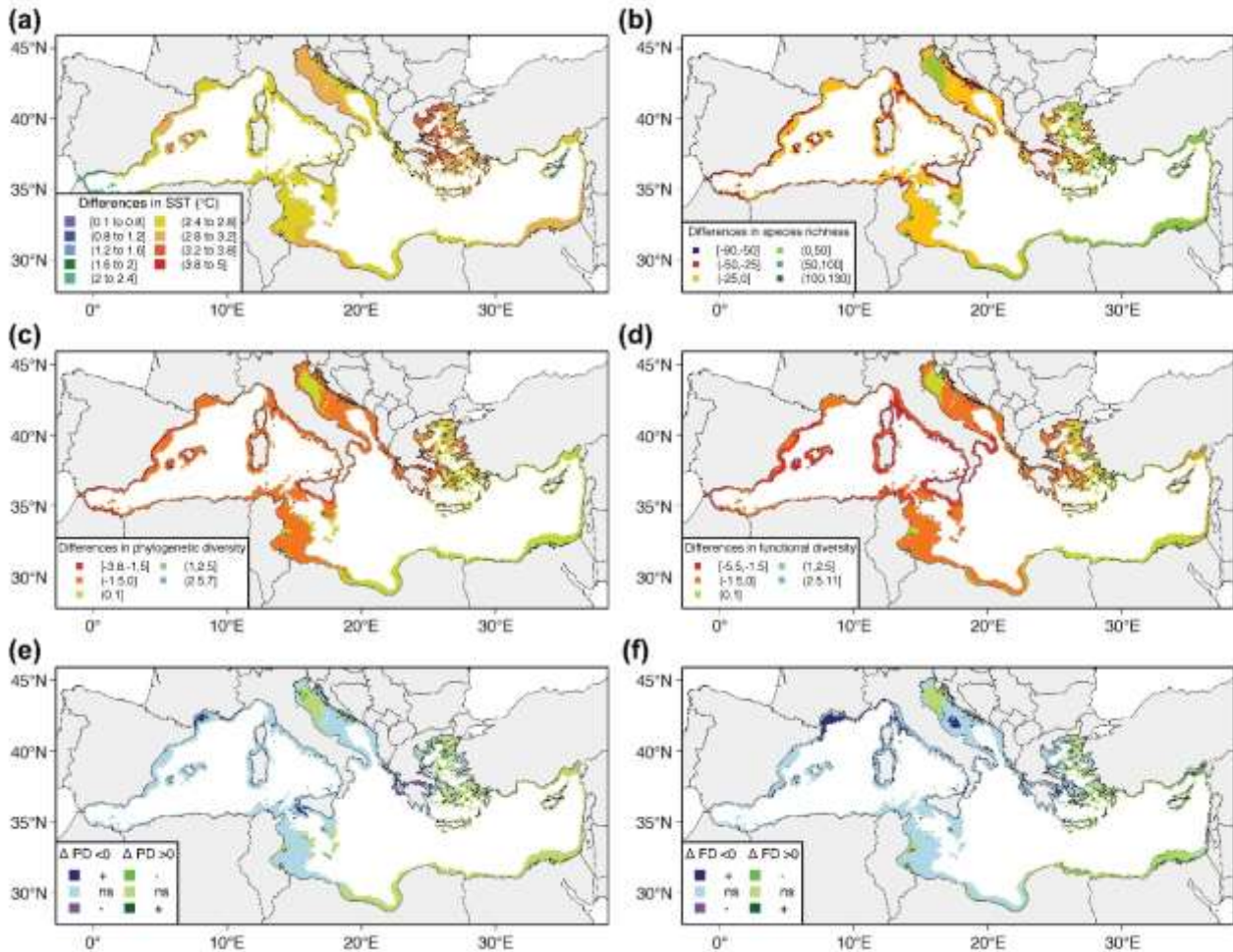


Figure 21 : Cartes de la méditerranée représentant (a) la température de surface (SST, pour Sea Surface Temperature, en °C) (b) la richesse spécifique piscicole (c) la diversité phylogénétique des poissons (d) la diversité fonctionnelle des poissons à l'horizon 2080-2099 par rapport à 1961-1980. Projections à l'échelle de la méditerranée selon le modèle climatique NEMODED8 forcé sous le scénario A2. La significativité des changements phylogénétique (e) et de la diversité fonctionnel (f) est testée 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 inférieures aux projections du modèles nulles ($p < 0.025$). ns signifie que les changements ne sont pas significativement différents de ceux issus du modèle nul (Albouy et al., 2012).

Impacts sur les herbiers de posidonies

Les herbiers de posidonies ont un rôle écologique majeur : production primaire benthique, production d'oxygène, transparence des eaux par le piégeage des particules en suspension, base de nombreuses chaînes alimentaires, lieu de frayère, nurserie, abris vis-à-vis des prédateurs ou encore habitat permanent pour des milliers d'espèces animales et végétales (Boudouresque *et al.*, 2006).

La présence de cet habitat permet de casser la houle et les vagues qui peuvent éroder les côtes. Aussi, un herbier en mauvaise santé amplifie les phénomènes d'érosion provoqués par les tempêtes et la houle.

Les herbiers sont notamment particulièrement sensibles à la dessalure, à la turbidité des eaux, aux fortes températures et à certaines activités humaines (comme l'ancrage de gros navires ou l'utilisation de certains engins de pêche, en particulier les chaluts qui sont extrêmement destructeurs).

Le rôle des herbiers de posidonies est majeur, vis-à-vis du changement climatique, également par la capacité de la matre à stocker le carbone. La part du carbone qui rejoint les puits à long terme (séquestration) est estimée à 10 à 25 % du carbone total fixé par la plante, ce qui représente pour la Méditerranée plus d'un million de tonnes séquestré chaque année ; le stock de carbone présent dans la matre est 4 à 10 fois plus important que celui des forêts terrestres.

La sensibilité de l'herbier de posidonies aux températures élevées risque de se traduire par une fragilisation ou par un remplacement de cette espèce par des espèces à affinité plus « chaude ». Ces nouveaux herbiers sont plus complexes d'un point de vue structural et favorise les espèces allochtones plus opportunistes.

Ces modifications sont de nature à entraîner des changements profonds dans les communautés ou dans le rôle joué par l'herbier de posidonies. Ainsi le remplacement de l'herbier de posidonies par toute autre formation végétale pourrait fortement réduire la capacité de protection du littoral, et sa destruction pourrait entraîner une remise en circulation du carbone stocké dans sa matre (Pergent et al.,2014).

En outre, Pergent et al. (2015) rapportent que l'élévation du niveau de la mer, par la diminution de la lumière qui lui est associée, est responsable de la régression des herbiers profonds (limite inférieure). Ce phénomène, mis en évidence pour la première fois le long du littoral de la Corse dans le cadre du réseau de surveillance Posidonies, s'observe également dans les autres secteurs de Méditerranée et constitue une menace significative. Ces pertes ne sont pas compensées par une progression des herbiers superficiels du fait d'une pente plus importante et de conditions hydrodynamiques limitantes.

Impacts sur les macroalgues *Lithophyllum byssoïdes*

Sur la façade maritime corse, l'espèce *Lithophyllum byssoïdes* est largement distribuée sur les côtes rocheuses et parfois en forme d'encorbellement dans des sites favorables en termes d'exposition et d'humectation.

Blanfuné *et al.* (2015) ont analysé l'état écologique de ces encorbellements dans la réserve naturelle de Scandola et évalué leur taux de vitalité en comparaison à ceux observés en 1995. Ils ont constaté une régression quasi-générale des encorbellements de la région de Scandola qui peut être expliquée par plusieurs hypothèses liées soit aux activités humaines (agressions mécaniques, agressions chimiques), soit relevant du changement global.

Les auteurs rapportent que l'élévation du niveau de la mer, de l'ordre de +5 cm sur les 20 dernières années, contribue à dégrader les encorbellements. Si cette élévation devait s'intensifier, elle pourrait compromettre leur viabilité.

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.
- Les zones amont des cours d'eau deviendront des espaces refuge pour de nombreuses espèces. 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.
- Assurer les connectivités latérale et longitudinale des cours d'eau ressort 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 s'intensifieront et toucheront de plus en plus de cours d'eau. Ces régimes hydrologiques présentent une biodiversité spécifique nécessitant d'adapter la gestion de ces milieux.
- L'impact des changements climatiques sur la température et le régime des vents devrait perturber le mélange des eaux côtières de surface et impacter la production phytoplanctonique, zooplanctonique et potentiellement exposer le coralligène.
- Les herbiers de posidonies sont fragilisés et tendent à régresser. Compte tenu de leur importance sur le territoire de Corse et de leur rôle de frayère et nurserie de nombreuses espèces piscicoles, cette régression peut avoir des conséquences importantes sur le maintien de la productivité marine.
- L'élévation du niveau de la mer pourrait altérer les encorbellements de *Lithophyllum byssoïdes*.

4 IMPACTS SUR LE LITTORAL

Les littoraux sont des milieux dynamiques complexes dont il est difficile de projeter des scénarios d'évolution. 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

Une élévation du niveau de la mer déjà observée et qui s'accélère

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) confirmé 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 (figure 22). 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.

La figure 22 illustre bien cette augmentation et en particulier l'accélération observée depuis le début des années 90, avec de l'ordre de 4 mm/an sur la période 1990-2016.

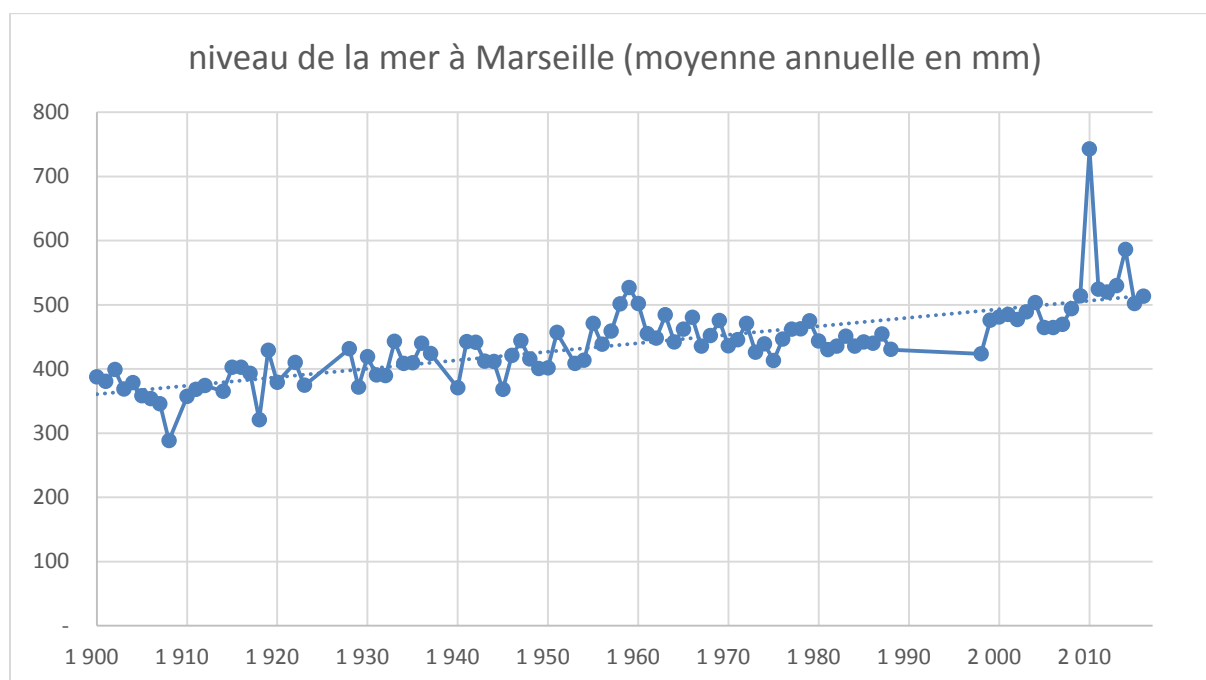


Figure 22 : élévation du niveau de la mer mesurée au marégraphe de Marseille

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 XX^{ème} 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. Ces résultats traduisent notamment la contribution importante de l'expansion thermique, bien supérieure aux estimations passées (Rietbroek et al., 2016).

Un phénomène confirmé pour l'avenir mais dont l'ampleur est difficile à caractériser

Même si la montée du niveau de la mer est un phénomène auquel il faut se préparer, il est important de noter que les scientifiques gardent une certaine réserve sur le fait que l'élévation du niveau des mers s'intensifiera dans le futur, compte tenu des nombreuses incertitudes (Chambers et al., 2012; Ezer et al., 2013; Rietbroek et al., 2016). D'après eux, ces observations sont réalisées sur une période de temps trop courte. De plus le niveau des mers est fonction de la variabilité multi décennale des cycles des grands courants océaniques dont les projections sont incertaines. Visser et al. (2015) ont souligné également qu'à partir des mêmes données, les résultats des projections peuvent être contradictoires, ajoutant une forte incertitude associée à la méthode utilisée.

Pour autant, dans le rapport collectif remis à l'ONERC par Jean Jouzel (Planton et al., 2015), les scientifiques rapportent que d'après les estimations du GIEC il est très probable que le taux d'augmentation du niveau moyen global de la mer au XXI^e siècle sera supérieur au taux observé au cours de la période 1971-2010 pour tous les scénarios RCP. Sur le niveau d'ampleur du phénomène à l'avenir pour les côtes françaises et en particulier méditerranéennes, ce rapport n'affiche pas d'ordre de grandeur mais précise que la distribution régionale des variations futures du niveau de la mer dépend d'un ensemble de processus (changement du volume des océans du à la température et la salinité, effets des échanges océan-glace-atmosphère-continents sur les masses, changements du niveau du fond de l'océan,...) et donc de l'évolution de plusieurs facteurs : en premier lieu de la distribution 3-D de la température et la salinité de l'océan, de la circulation océanique et de la pression atmosphérique de surface. Elle dépend aussi de la déformation des bassins océaniques, et des effets gravitationnels associés, en réponse aux redistributions des masses de glace et d'eau en lien avec la dernière déglaciation et la fonte actuelle des glaces continentales. En conclusion, Jean Jouzel et les co-auteurs de ce rapport concluent qu'une étude de l'évolution du niveau de la mer au niveau des côtes françaises, prenant en compte l'ensemble des processus, reste à réaliser.

Concernant les processus en jeu, le GIEC livre un certain nombre de précisions : 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. A la fin du siècle, l'expansion thermique devrait représenter 30 à 55 % de l'ENM suivie par la fonte des glaciers pour environ 15 à 35 %. Ainsi les projections à l'horizon 2300 sont une élévation de moins de 1 m à plus de 3 m sous le scénario le plus pessimiste (IPCC, 2014).

En réponse au réchauffement des océans, à la fonte des glaciers et des calottes polaires, le V^e^{ème} 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 3).

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 3 : Projections de l'élévation du niveau moyen global de la mer à la fin du XXI^e 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)

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.

Jevrejeva et al. (2014), ont réalisé une fonction de probabilité de l'ENM (figure 22) 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.

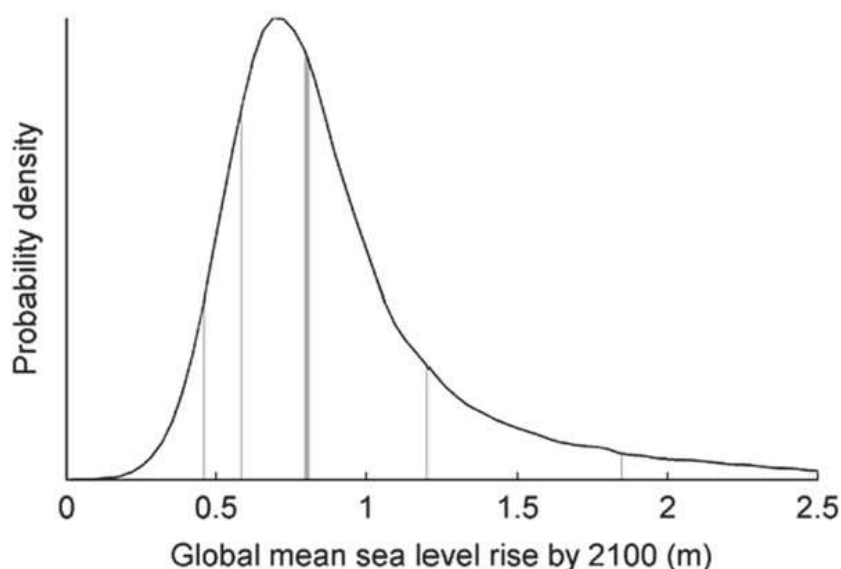


Figure 22 : Projection d'élévation globale de la mer à l'horizon 2100 par rapport à 2000 sous le scénario RCP 8.5 et incertitudes. De gauche à droite, les barres verticales représentent les 5, 17, 50, 83 et 95^{ème} percentiles de la courbe de densité de probabilité (Jevrejeva et al., 2014).

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 (Adloff et al., 2015).

Les travaux de Galassi et Spada (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.

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).

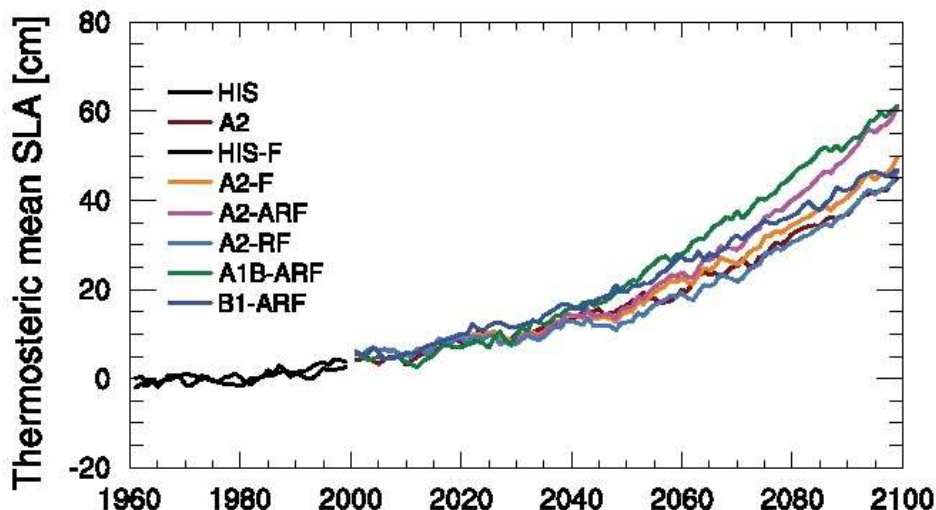


Figure 23 : anomalies annuelles moyennes du niveau de la mer Méditerranée (en cm) sous l'effet seul de l'expansion thermique pour l'ensemble des simulations (courbes colorées) par rapport à 1961-1990 (Adloff et al., 2015).

4.2 IMPACTS SUR LA SUBMERSION MARINE ET L'ÉROSION CÔTIÈRE

La **submersion marine** est définie comme une inondation temporaire de la zone côtière par la mer dans des conditions météorologiques et marégraphiques sévères (MATE, 1997).

Ce phénomène résulte de l'association de plusieurs processus (figure 24) :

- la marée ;
- le phénomène de « surcote atmosphérique » qui est l'addition de l'effet baromètre inverse et de l'élévation du niveau du plan d'eau sous l'effet du vent ;
- la surélévation du niveau de la mer due au déferlement des vagues, appelé aussi « set-up » ;
- l'effet du battement des vagues sur la côte appelé « jet de rive » ou « swash ».

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 et présentées ci-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 Lionello (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.

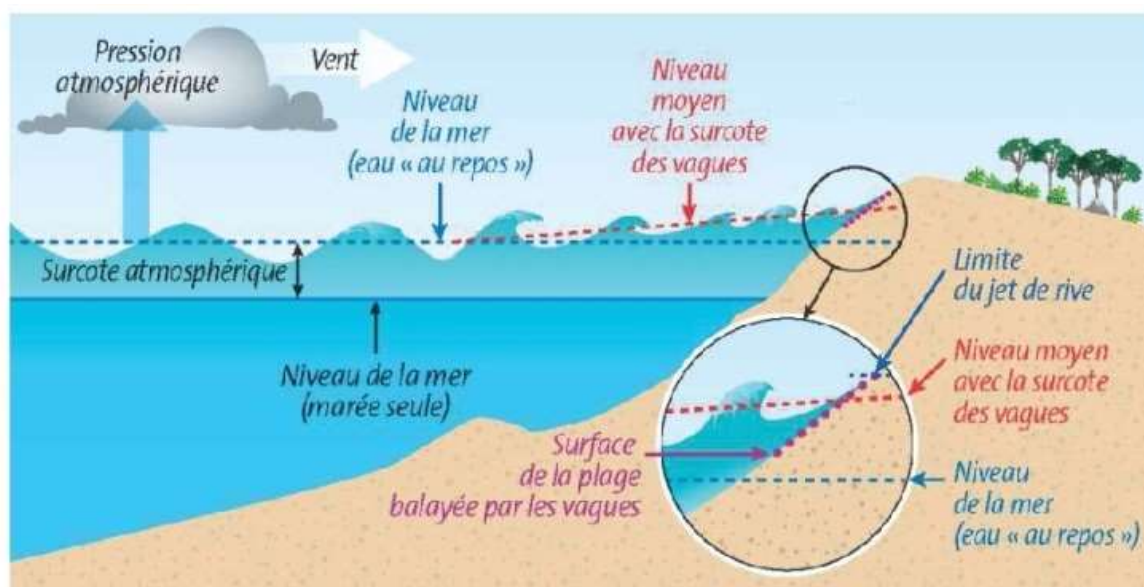


Figure 24 : Principaux phénomènes physiques contrôlant le niveau d'eau ; ce schéma n'est pas à l'échelle. (Planton et al., 2015)

Les travaux d'Androulidakis et al (2015), également réalisés sous le scénario A1B, projettent peu d'évolution 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 75eme 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 maximum 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).

Cette augmentation du niveau de la mer aura donc des effets sur les phénomènes de submersion marine.

L'érosion côtière est quant à elle également influencée par la combinaison de différents facteurs qui seront eux-mêmes impactés par le changement climatique : hausse du niveau de la mer, modification des forçages marins tels que la houle ou même la baisse des précipitations (comme cités précédemment). La multiplicité de ces facteurs et la complexité de leurs interactions n'entraînera toutefois probablement pas les mêmes effets sur l'ensemble du littoral.

INCIDENCES CLES - LITTORAL

- Le niveau de la Méditerranée monte depuis plusieurs décennies et ce phénomène tend à s'accélérer ces 20 dernières années.
- En Méditerranée, l'élévation devrait être comprise entre + 0.3 et + 0.5 m à l'horizon 2100. Mais l'ampleur du phénomène à l'avenir reste à préciser compte tenu des multiples processus qui peuvent entrer en jeu.
- L'évolution du trait de côte méditerranéen (érosion et accrétion) vers la fin du XXI^{ème} siècle serait liée essentiellement à l'impact de l'élévation du niveau des mers.

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 le bassin 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 généralisé sur l'île.

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.

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.

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, mais il convient de considérer que les vulnérabilités « physiques » induites par ces effets généreront des vulnérabilités économiques et sociales qui seront variées selon les secteurs et les territoires.

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., Longuevergne, 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.
- 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.
- Aubé, D., 2017. Impact du changement climatique dans le domaine de l'eau sur les bassins Rhône-Méditerranée et Corse. bilan actualisé des connaissances - rapport de l'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse.
- Blanfuné A., Dominici J.M., Noisette F., Thibaut T., Verlaque M., 2015. Analyse de l'état écologique des encorbellements de *Lithophyllum byssoides* soumis aux activités humaines dans la réserve naturelle de Scandola. Contrat Parc Naturel Régional de Corse et GIS Posidonies; GIS Posidonies Publ. 44p.
- Boé, J., Habets, F., 2014. Multi-decadal river flow variations in France. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18, 691–708.
- Boudouresque C.F., Bernard G., Bonhomme P., Charbonnel E., Diviacco G., Meinesz A., Pergent G., Pergent-Martini C., Ruitton S., Tunesi L. 2006. Préservation et conservation des herbiers à *Posidonia oceanica*. RAMOGE & GIS Posidonie pub. : 202p
- 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.
- Cazenave, A., Cozannet, G.L., 2014. Sea level rise and its coastal impacts. *Earths Future* 2, 15–34. doi:10.1002/2013EF000188
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Gkelis, S., Papadimitriou, T., Zauotsos, 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.
- 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>
- Honorez A., 2015. Assises de l'eau 2015. Synthèse des ateliers techniques. Document de la Collectivité Territoriale de Corse, 17 p. <http://www.oehc.corsica/L-eau-notre-metier/Les-assises-de-l-eau>
- 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.
- Jevrejeva, S., Grinsted, A., Moore, J.C., 2014. Upper limit for sea level projections by 2100. *Environ. Res. Lett.* 9, 104008.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Mori C., Orsini E., Colonna F., Orsini S., Faggianelli J., 2017. The consequences of climate change for the mountain environment in Corsica. Interdisciplinary Symposium, topic global change, 5-6-7 July 2017, University of Corsica, Corti (France)
- 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.
- 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.
- Pergent G., Bazairi H., Bianchi C.N., Boudouresque C.F., Buia M.C., Calvo S., Clabaut P., Harmelin-Vivien M., Mateo, M.A., Montefalcone M., Morri C., Orfanidis S., Pergent-Martini C., Semroud R., Serrano O., Thibaut T., Tomasello T., Verlaque M., 2014. Climate change and Mediterranean seagrass meadows: a synopsis for environmental managers. *Mediterranean Marine Science*, 15/2
- Pergent G. Pergent-Martini C., Bein A., Dedeken M., Oberti P., Orsini A., Santucci J.F., Short F., 2015. Dynamic of *Posidonia oceanica* seagrass meadows in the northwestern Mediterranean: Could climate change be to blame? *Comptes rendus biologiques*, 338 (7) : 484-93.
- Planton, S., Le Cozannet, G., Cazenave, A., Costa, S., Douez, O., Gaufrès, 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.
- 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.
- Roche, A., Costa, S., Colas, S., Garnier, E., Vigné, P., Jouatel, J., 2016. Développer la connaissance et l'observation du trait de côte, contribution nationale pour une gestion intégrée. Rapport du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, réalisé par le CEREMA, 25p.
- 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.
- 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.
- Soubeyroux, J.-M., Neppel, L., Veysseire, J.-M., Tramblay, Y., Carreau, J., Gouget, V., 2015. Evolution des précipitations extrêmes en France en contexte de changement climatique. *Houille Blanche* 27–33.
- 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.

- 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., D. 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 and S.-P. Xie, 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.
- Tzanatos, E., Raitsos, 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
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.