



Impacts du changement climatique
dans le domaine de l'eau
sur les bassins
Rhône-Méditerranée et Corse

.....

BILAN DES CONNAISSANCES

Septembre 2012

Version de consultation



Remerciements

Ce document a été réalisé par l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée et Corse.

Rédaction : Julie Fabre.

Des remerciements sont adressés aux membres du Conseil scientifique du comité de bassin Rhône-Méditerranée, au bureau des risques météorologiques de la DGPR et aux personnels des DREAL de Bourgogne, Franche-Comté, Languedoc Roussillon, PACA, Rhône-Alpes et de la délégation de bassin Rhône-Méditerranée, qui ont apporté leurs remarques et amendements au rapport.

Ce document est soumis à consultation : il a notamment été présenté au comité de bassin du 14 septembre 2012 et est soumis à l'avis d'un collège scientifique présidé par Hervé Le Treut, climatologue directeur de l'Institut Pierre Simon Laplace et contributeur du GIEC. Au terme de cette consultation, son contenu pourra être révisé. La version finale fera l'objet d'une publication dans le cadre du Plan d'adaptation au changement climatique des bassins Rhône-Méditerranée et Corse.

Table des matières

Introduction	3
1. Les méthodes d'étude des impacts du changement climatique sur le cycle de l'eau	6
1.1. Les étapes d'une étude d'impacts	6
1.2. Les scénarios d'émission de gaz à effet de serre	8
1.3. Construction des scénarios climatiques	10
1.4. La cascade d'incertitudes	10
1.5. Quelques clés de lecture	12
2. Les projections de changement climatique	15
2.1. Evolution des températures	15
2.2. Evolution des précipitations	18
2.3. Evolution des extrêmes	21
2.4. Évolution du manteau neigeux	24
2.5. Évolution de l'évapotranspiration et de l'humidité des sols	24
3. Les impacts du changement climatique sur la ressource et la demande en eau	28
3.1. Typologie des impacts possibles sur la ressource en eau	28
3.2. Projections hydrologiques disponibles	28
3.3. Impacts du changement climatique sur les eaux souterraines	37
3.4. Impacts sur la qualité de l'eau	38
3.5. Impacts sur les usages de l'eau	39
4. Les impacts du changement climatique sur les écosystèmes aquatiques et humides	42
4.1. Impacts sur les écosystèmes d'eau douce	42
4.2. Impacts sur les écosystèmes marins	45
4.3. Impacts sur les zones humides	47
5. Les impacts du changement climatique sur le littoral – aléas submersion et érosion	51
5.1. Phénomènes en cause et impacts possibles	51
5.2. Projections d'élévation du niveau de la mer	52
5.3. Impacts sur le littoral français méditerranéen	53
Conclusion : vers des stratégies d'adaptation au changement climatique	56
Références bibliographiques	58

Introduction

Le GIEC¹ (Groupement d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) définit un changement climatique comme « tout changement du climat dû à sa variabilité naturelle ou résultant de l'activité humaine ».

La Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) restreint cette définition en parlant de « changements qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables ».

Aujourd'hui il est sans équivoque que des changements climatiques dus au moins en partie aux émissions anthropiques de gaz à effet de serre sont en cours, et qu'ils se traduisent par une hausse globale des températures.

L'analyse des observations météorologiques du 20^e siècle montre une nette tendance à un réchauffement global. La Figure 1 représente l'évolution des températures moyennes mondiales mesurées entre 1850 et 2000. La tendance à l'augmentation des températures est largement visible, avec une accélération nette du réchauffement à partir des années 1980.

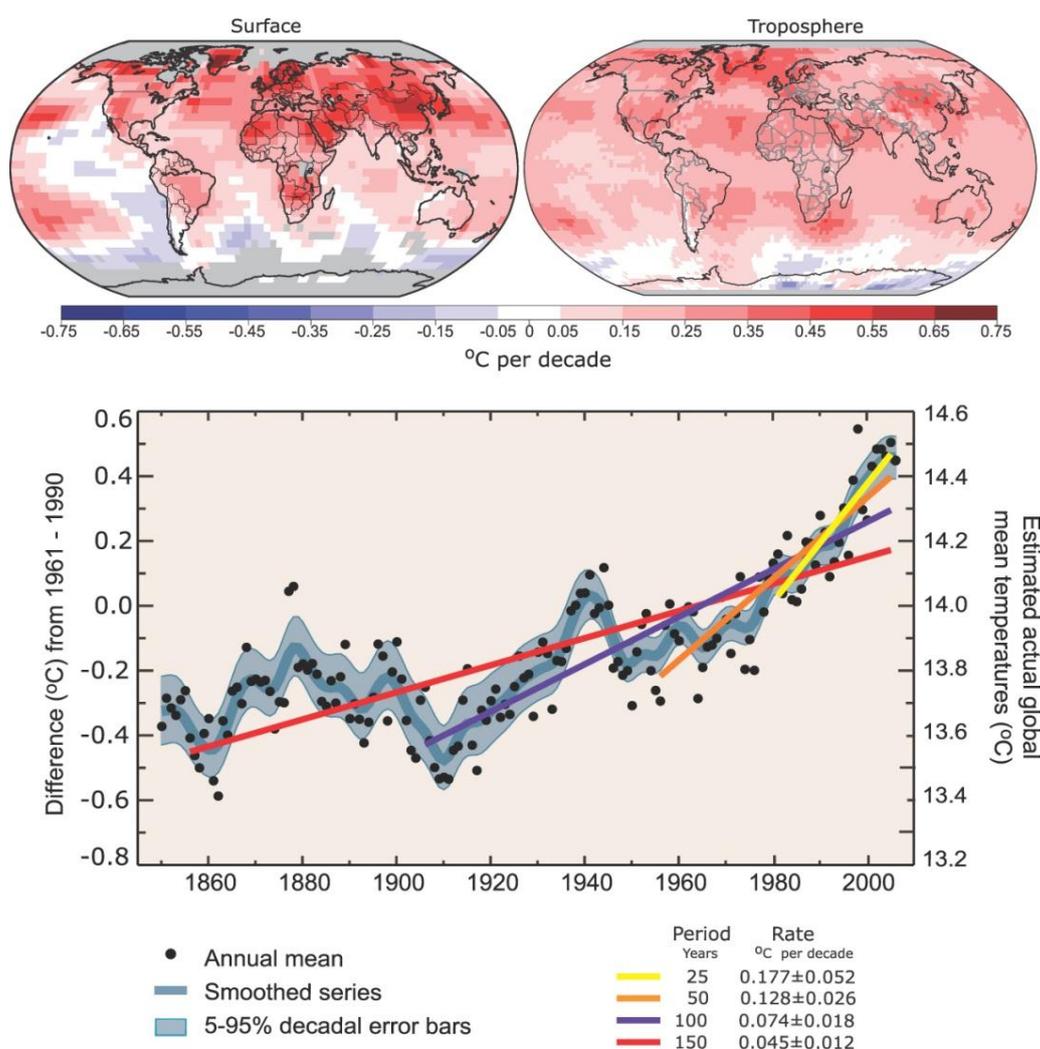


Figure 1. Evolution des températures moyennes mondiales mesurées entre 1850 et 2000, en anomalie par rapport à la moyenne de 1961 à 1990. Source : Solomon et al., 2007.

¹ Le GIEC a pour mission « d'évaluer (...) les informations d'ordre scientifique, technique et socio - économique qui nous sont nécessaires pour mieux comprendre les fondements scientifiques des risques liés au changement climatique d'origine humaine, cerner plus précisément les conséquences possibles de ce changement et envisager d'éventuelles stratégies d'adaptation et d'atténuation. » (www.ipcc.ch)

Ainsi, il est aujourd'hui largement admis qu'un réchauffement global est amorcé. L'attribution de ces évolutions climatiques aux émissions anthropiques de gaz à effet de serre est elle aussi admise, comme le montre la Figure 2 : sans l'introduction des forçages anthropiques (gaz à effet de serre), les modèles climatiques ne parviennent pas à simuler l'élévation des températures observée depuis 1960. Le réchauffement climatique devrait donc être d'autant plus amplifié que les émissions anthropiques de gaz à effet de serre seront élevées.

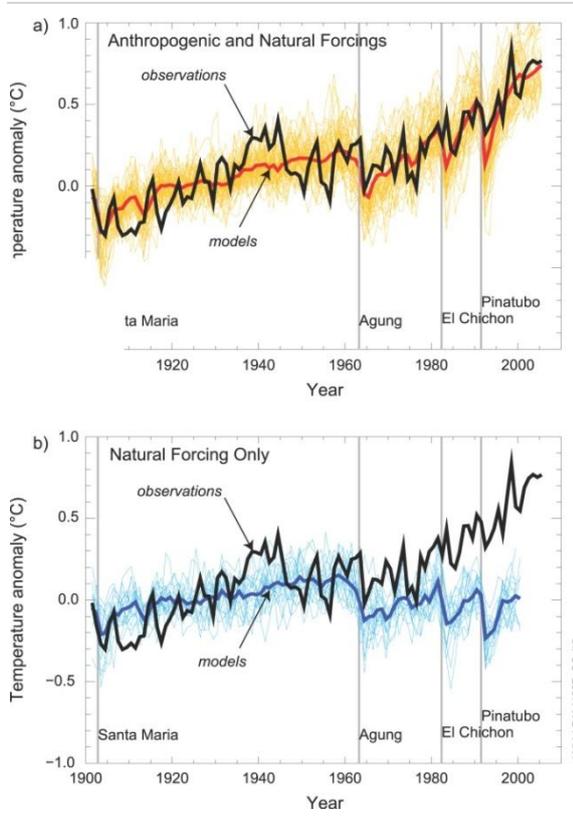


Figure 2. Anomalies de la température mondiale par rapport à la période 1901 - 1950. La courbe noire représente les anomalies mesurées. La courbe rouge (bleue) épaisse correspond à la moyenne multi-modèles des simulations climatiques avec une prise en compte des forçages naturels et anthropiques (naturels seuls). Source : Solomon et al., 2007.

D'après le quatrième rapport d'évaluation du GIEC, en fonction du scénario d'émissions de gaz à effet de serre considéré, la température mondiale pourrait s'élever de 1 à 6 °C en 2100 (Solomon et al., 2007). En plus de l'élévation des températures, le changement climatique impliquera très probablement une intensification du cycle de l'eau, et donc des impacts importants sur les régimes de précipitations et sur les ressources en eau.

Les moyennes globales de réchauffement cachent des disparités régionales fortes. Dans certaines régions l'élévation de la température moyenne pourrait être plus forte que la moyenne mondiale et, alors que les précipitations pourraient augmenter globalement, dans certaines zones elles pourraient baisser, particulièrement en été. C'est le cas de l'Europe du Sud et plus particulièrement du bassin méditerranéen, qui est considéré comme un « point chaud » du changement climatique (Giorgi, 2006).

Les « points chauds » sont définis comme les régions du monde les plus sensibles au réchauffement global, c'est-à-dire celles qui devraient connaître les évolutions les plus marquées en termes de températures et de précipitations moyennes et de variabilité climatique interannuelle.

En plus de leur exposition plus ou moins forte à l'aléa (réchauffement, baisse des précipitations, évolution des ressources en eau, risques climatiques), certains territoires paraissent particulièrement vulnérables au changement climatique du fait des enjeux présents et de la situation déjà plus ou moins tendue du bilan ressources-demandes en eau.

Enfin, d'après la Cinquième communication nationale de la France à la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique, le bassin Rhône-Méditerranée apparaît déjà comme moyennement à fortement vulnérable aux aléas climatiques actuels (voir carte ci-dessous).

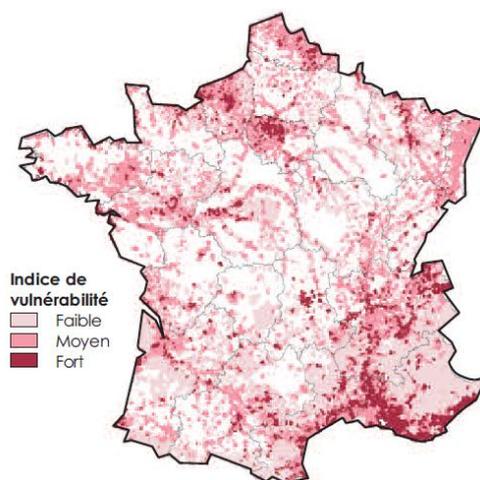


Figure 3. Vulnérabilité actuelle aux aléas climatiques en France. Source : Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer, 2009

Le territoire présente déjà des tensions sur l'eau, et des enjeux démographiques et économiques importants (Comité de Bassin Rhône-Méditerranée et Corse, 2009). Les impacts du changement climatique devraient être variés en fonction des territoires (alpins, méditerranéens, plaines du nord du bassin...). Un premier bilan s'impose donc pour dégager les incidences prévisibles du changement climatique sur la gestion de l'eau dans le bassin.

Ce rapport constitue une synthèse des travaux scientifiques concernant le changement climatique et ses impacts dans le domaine de l'eau dans les bassins Rhône-Méditerranée et Corse.

Une première partie est dédiée aux méthodes utilisées pour étudier ces impacts, et expose des notions de base qui doivent donner au lecteur des clés pour lire et analyser les résultats présentés.

Les impacts sont ensuite déclinés par secteur : les projections climatiques, puis les impacts sur la ressource et la demande en eau, sur la biodiversité et les milieux aquatiques, et enfin sur le littoral.

À la fin de chaque partie, les incidences clés que l'on aura pu dégager de ces impacts sont listées, ainsi que les connaissances scientifiques dont l'approfondissement paraît nécessaire.

1. Les méthodes d'étude des impacts du changement climatique sur le cycle de l'eau

1.1. Les étapes d'une étude d'impacts

Afin d'anticiper les impacts possibles d'évolutions climatiques sur un territoire, une démarche descendante, dite « top-down », est généralement menée, basée sur une série de modélisations. La Figure 4 résume par exemple les étapes d'une évaluation des impacts du changement climatique sur les ressources en eau et leurs usages.

Les modèles climatiques intègrent des scénarios d'émission de gaz à effet de serre, définis selon des hypothèses contrastées d'ordre social, économique, technologique et démographique.

Les variables climatiques issues des simulations par les modèles sont utilisées en données d'entrée de modèles qui schématisent le cycle hydrologique et établissent notamment un bilan intégrant les eaux de surface et/ou les eaux souterraines.

Ces résultats peuvent ensuite être comparés à des scénarios d'évolution des demandes en eau, suivant des hypothèses sur les évolutions socio-économiques, démographiques et climatiques. Ces scénarios peuvent également prendre en compte des stratégies d'adaptation envisagées sur le territoire concerné.

Les événements extrêmes (sécheresses, tempêtes, inondations) peuvent éventuellement être intégrés dans les modélisations et contribuer à définir le risque lié au changement climatique sur un territoire.

Les variations de débit des cours d'eau, et par extension l'évolution des ressources en eau, sont influencées par des facteurs climatiques mais aussi par des facteurs anthropiques comme l'occupation du sol ou les aménagements hydrauliques (voir Figure 5). Ainsi, le bassin Rhône-Méditerranée est soumis depuis des siècles à des pressions anthropiques comme la croissance démographique, l'agriculture ou la déforestation, qui ont pu largement influencer les écoulements (Fabre, 2010).

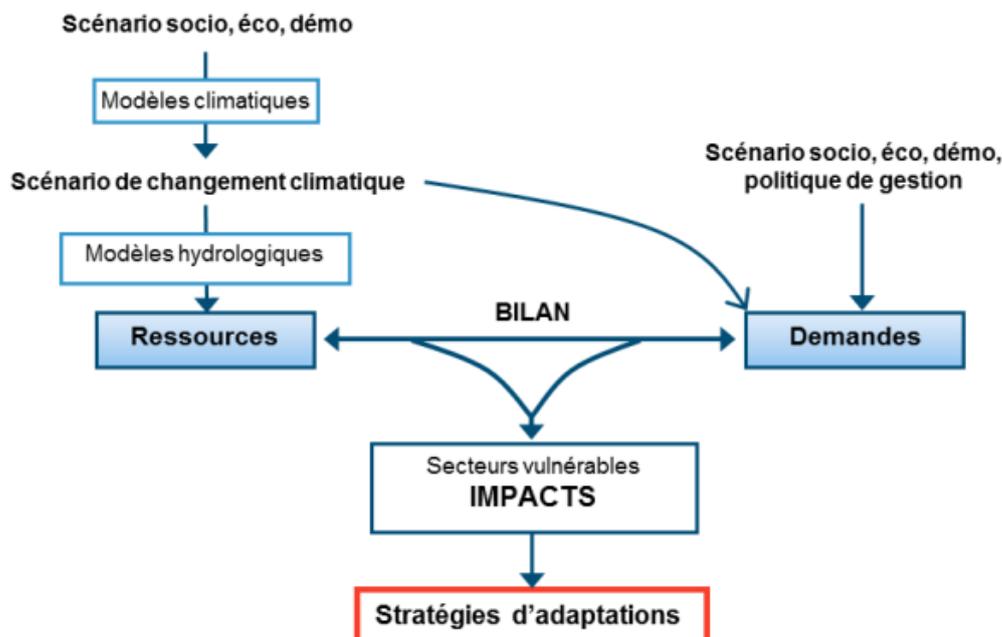


Figure 4. Les étapes d'une étude d'impacts du changement climatique. Adapté de Fabre, 2010.

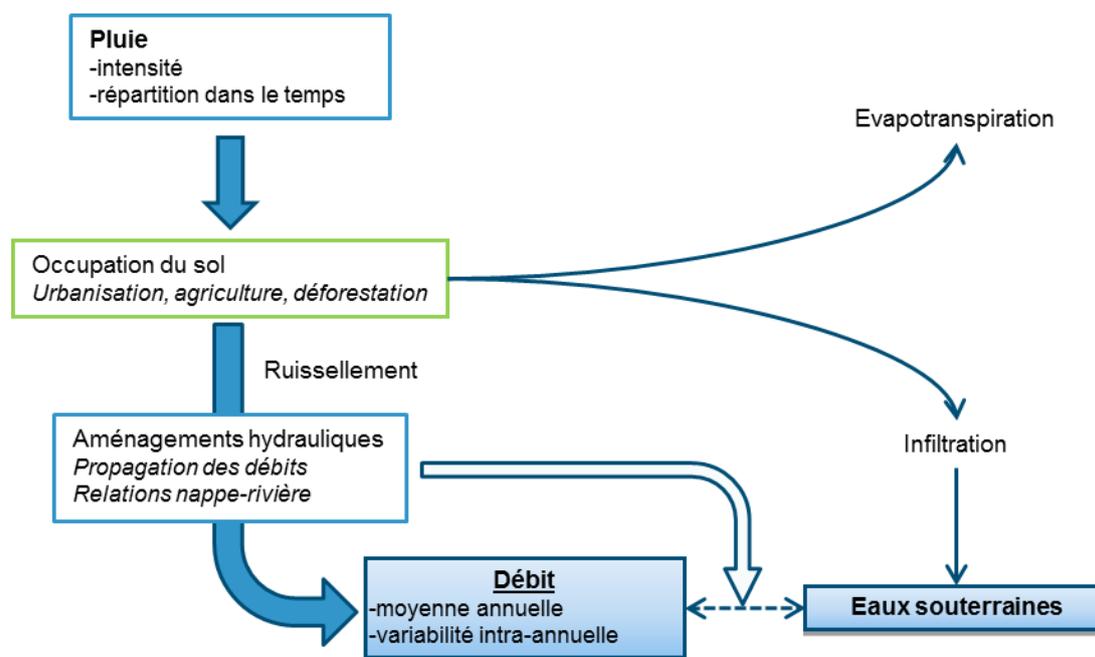


Figure 5. Facteurs influençant les variations des débits (moyenne annuelle et variabilité intra - annuelle). Adapté de Fabre, 2010.

Ce schéma illustre la difficulté que peuvent rencontrer les modèles hydrologiques dans la représentation des débits, selon leur capacité à prendre en compte les différents facteurs explicatifs.

Ces modèles diffèrent par leur nature :

- les modèles conceptuels ne cherchent pas à représenter les phénomènes physiques impliqués dans la transformation pluie-débit. Ils considèrent différents réservoirs avec des fonctions de transfert entre ces réservoirs, qui sont optimisées à l'aide d'un nombre variable de paramètres afin de reproduire au mieux les écoulements sur un territoire donné (une maille ou un bassin versant, par exemple).
- les modèles physiques prennent en compte les caractéristiques du territoire modélisé (occupation du sol, végétation...) pour simuler la transformation de la pluie en débits.

Le calage est la procédure d'ajustement des paramètres qui permet d'obtenir une meilleure représentation des débits. Il s'effectue en confrontant les sorties des modèles à des données hydrométriques et piézométriques. Afin d'améliorer la confiance dans les résultats des modèles sous des conditions de changement climatique, ceux-ci sont souvent calés sur des périodes longues, qui comportent une grande variabilité.

Le calage peut également être suivi d'une validation du choix des paramètres sur une période différente. On peut, par exemple, caler un modèle sur une période plutôt humide, et valider les choix des paramètres sur une période plus sèche, pour s'assurer que le modèle reproduise correctement les débits indépendamment des conditions climatiques.

Les modèles physiques ne sont pas calés et validés comme les modèles conceptuels, mais il est possible d'ajuster au mieux les équations du modèle pour chaque territoire représenté. Les modèles conceptuels sont donc le plus souvent plus facilement optimisés pour reproduire des débits observés. Cependant les modèles physiques permettent d'étudier les phénomènes physiques en jeu dans la formation des écoulements et notamment de mesurer leur influence sur la transformation de la pluie en débits (impacts de changements d'occupation du sol, du type de végétation ou de son comportement...).

Les deux types de modèles constituent ainsi des approches différentes qui peuvent être utilisées selon l'objectif recherché.

Nous avons décrit ici les étapes d'une évaluation des impacts du changement climatique sur les ressources en eau. La même démarche de modélisation peut être utilisée pour simuler différents types d'impacts.

Les scénarios de changement climatique issus des simulations peuvent servir de données d'entrée pour la modélisation de divers processus tels que :

- les processus hydrologiques ;
- l'évolution des conditions hydrauliques (fréquence d'inondation de certaines zones, rôle d'ouvrages d'art...);
- les processus agronomiques (croissance et rendement des cultures, besoins en eau...)
- l'évolution de la température de l'eau ;
- la réponse des écosystèmes aux variations climatiques (aires de répartition des espèces, modification des cycles de croissance ou de reproduction...);
- l'élévation du niveau de la mer, la submersion et l'érosion du littoral.

1.2. Les scénarios d'émission de gaz à effet de serre

Les émissions de gaz à effet de serre (GES) sont une donnée d'entrée des modèles climatiques globaux. Elles sont influencées par des forces motrices complexes dont les évolutions futures sont incertaines.

Afin de représenter les évolutions possibles de ces forces motrices et donc des émissions et pour que les modélisations climatiques soient comparables entre elles, le GIEC a choisi de créer des scénarios d'émissions, utilisés en entrée des simulations climatiques qui sont ensuite analysées dans les rapports d'évaluation.

Dans les deux premiers rapports d'évaluation du GIEC, les scénarios d'émission utilisés étaient les scénarios IS92, et le plus souvent IS92a (qui prévoyait une augmentation de 1 % par an des émissions de CO₂ à partir de 1990).

Avant la production du troisième rapport d'évaluation, le GIEC a produit le Rapport Spécial sur les Scénarios d'Emission (Nakicenovic et Swart, 2000). Ce travail a permis de mettre à jour les scénarios d'émissions en intégrant de nouveaux éléments tels que :

- les différences entre pays en développement et pays développés ;
- l'intensité carbone des énergies (progrès technologiques) ;
- les changements politiques majeurs (comme la chute de l'Union Soviétique, qui a entraîné une forte baisse des émissions) ;
- la mise en cohérence des différentes forces motrices.

Les scénarios du Rapport Spécial (généralement appelés scénarios SRES) sont au nombre de 40 et correspondent à des évolutions contrastées des forces motrices qui influencent les émissions de GES : la démographie, l'économie, les dimensions sociales et politiques, et les progrès technologiques.

Ils décrivent tous des futurs plus prospères qu'aujourd'hui, et ils supposent que ni la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques, ni les objectifs du protocole de Kyoto ne sont appliqués.

Ils ont été déclinés en quatre familles : A1, A2, B1, et B2 dont les principales caractéristiques sont détaillées dans le Tableau 1. Chaque famille comporte un scénario de base (les scénarios A1, A2, B1, B2) et des variantes de ces scénarios.

Les scénarios SRES sont tous aussi probables les uns que les autres. Ils correspondent à des futurs possibles et possèdent une cohérence interne.

Scénarios	A1	A2	B1	B2
Croissance démographique	Lente avec maximum au milieu du XXI ^e siècle	Lente et continue	Lente avec maximum au milieu du XXI ^e	Plus lente que les scénarios A2 mais continue
Croissance économique	Très rapide	La plus hétérogène et plus faible de tous les scénarios	Rapide	Modérée
Evolution technologique	Introduction rapide de nouvelles technologies avec solutions alternatives	La plus hétérogène et plus faible de tous les scénarios	Rapide avec introduction de technologies « propres »	Modérée, solutions locales ou régionales

Tableau 1. Principales caractéristiques des quatre grandes familles de scénarios SRES.
Adapté de Sauquet et al., 2007.

Lorsque des projections climatiques sont conduites, il est donc important d'utiliser plusieurs scénarios, qui couvrent un intervalle assez large d'émissions de GES (voir Figure 6).

Les scénarios les plus couramment exploités dans les études d'impacts sont les quatre scénarios représentatifs des grandes familles de SRES, et les scénarios A1B (développement économique rapide, avec une réduction des écarts entre pays riches et pays pauvres, et utilisation équilibrée des différentes sources d'énergie) et A1FI (forte intensité de combustibles fossiles)².

Pour le cinquième rapport d'évaluation du GIEC, qui doit être publié en 2013, de nouveaux scénarios d'émissions ont été produits. Des informations sur ces scénarios ont été présentées le 23 novembre 2011 dans le cadre d'une conférence organisée par le GICC³.

Tout comme les scénarios SRES, ils ont été produits pour prendre en compte de nouvelles évolutions socio-économiques. De plus, aucun scénario de réduction volontaire des émissions n'avait été envisagé dans les précédents travaux.

Les nouveaux scénarios doivent aider à estimer les bénéfices de la mise en place de politiques climatiques. Ils devront aussi être plus adaptés aux études d'impacts et d'adaptation. Enfin, l'échelle de temps a été rallongée, avec des scénarios qui se prolongent jusqu'en 2300 (les scénarios SRES s'arrêtaient en 2100).

La démarche de création des scénarios SRES partait d'hypothèses de base sur les évolutions socio-économiques possibles du monde, qui servaient d'entrée à des modèles estimant les émissions de GES correspondantes. A l'inverse, le point de départ des nouveaux scénarios est constitué par des concentrations de gaz à effet de serre : les RCP (Representative Concentration Pathways). Des scénarios socio-économiques cohérents avec les RCP sont produits par la suite.

Les RCP sont au nombre de quatre. Chacun est caractérisé par sa trajectoire d'émissions, la variation de radiation en 2100 par rapport au niveau préindustriel, et la concentration en GES en ppm équivalent CO₂ (la concentration atmosphérique actuelle en GES est de 390ppm eq. CO₂). Ils sont décrits dans le Tableau 2.

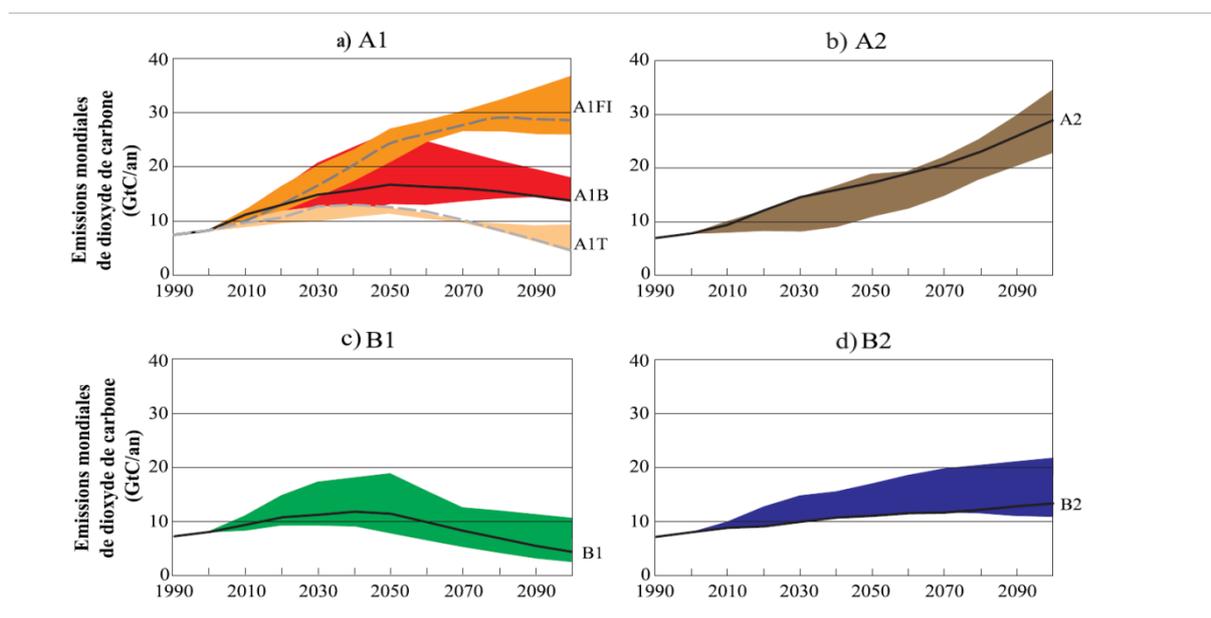


Figure 6. Emissions mondiales annuelles totales de CO₂ entre 1990 et 2100 en gigatonnes de carbone (GtC/an) pour les familles de scénarios SRES. Source : Nakicenovic et Swart, 2000.

² Le scénario le plus pessimiste en ce qui concerne les émissions est A1FI, suivi par A2. Le scénario A1B est considéré comme étant médian, et B1 le plus optimiste. Il convient de noter que les émissions de GES suivent actuellement une trajectoire proche des scénarios les plus pessimistes.

³ Le programme « Gestion des Impacts du Changement Climatique » (GICC) est un programme de recherche financé par la Direction de la Recherche et de l'Innovation (DRI) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD), dont l'objectif est de développer les connaissances en appui aux politiques publiques en considérant le changement climatique sous l'angle de ses impacts, de l'adaptation et des mesures d'atténuation.

Variation de radiation (W/m ²)	Trajectoire	Concentration en GES (en ppm équivalent CO ₂)
8.5	Croissance continue	1379
6.0	Stabilisation vers 2150, sans dépassement	850
4.5	Stabilisation vers 2150, sans dépassement	660
2.6	Pic puis déclin	490

Tableau 2. Les quatre nouveaux scénarios de forçage radiatif et de concentration en GES du GIEC.

1.3. Construction des scénarios climatiques

Les modèles climatiques présentent des biais, qui peuvent être mesurés en comparant les simulations sur des périodes passées, pour lesquelles on dispose de données d'observations.

Ainsi, pour construire des scénarios climatiques à un horizon donné, il est d'abord nécessaire de considérer la différence entre les variables (température, précipitation) simulées sur la période présente et celles simulées sur la période future étudiée. On peut ensuite appliquer ces variations à des valeurs observées (Figure 7).

Cette méthode sous-tend donc l'hypothèse que les biais des modèles climatiques sont indépendants du climat, ce qui peut être vérifié par leur application sur des paléoclimats.

Par la suite, on considèrera simplement les variations de température (en °C) et de précipitations (en %) entre une période de référence représentant le climat présent, et la période future étudiée.

1.4. La cascade d'incertitudes

A chaque étape des études d'impact « top-down » (voir Figure 8), des incertitudes, liées soit à la modélisation soit au caractère imprévisible des évolutions démographiques et socio-économiques, doivent être prises en compte.

Les scénarios d'émissions

Les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre sont tous aussi probables les uns que les autres. Leur utilisation permet de tester l'impact sur le climat de différents modes de développement, mais aussi l'effet du climat ainsi modifié sur un monde donné (de façon caricaturale, un réchauffement donné n'aura pas le même effet sur une population dense et aux richesses inégalement réparties que sur une population moins dense et riche). Du fait même du choix de ces scénarios d'émissions, les projections climatiques ne peuvent pas être comprises comme une prédiction du futur, mais comme une image de ce que pourrait être le climat si le monde suivait certains modes de développement.

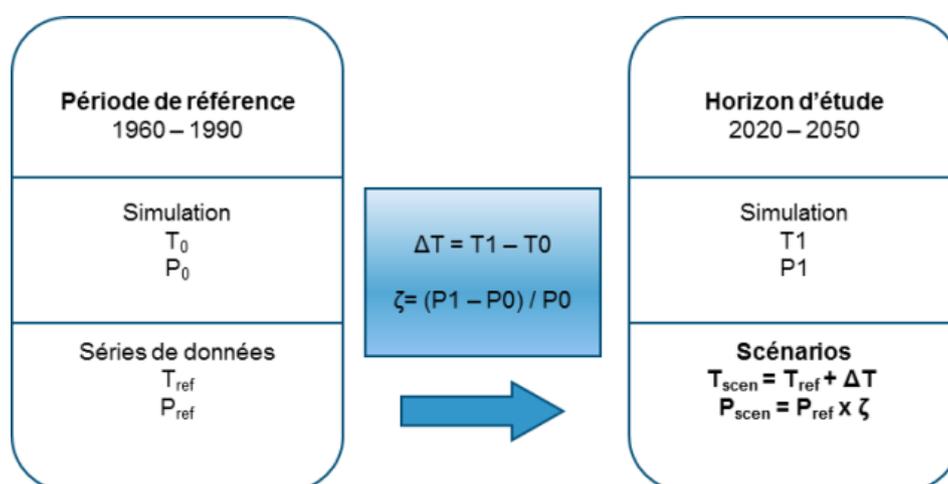


Figure 7. Schéma explicatif de la correction des biais des modèles climatiques. Source : Fabre, 2010.

Il faut aussi considérer les incertitudes inhérentes à la modélisation dans ces scénarios : ils sont produits à partir de scénarios d'évolution des forces motrices des émissions, qui mêlent la narration et la modélisation. D'autres modèles traduisent ensuite ces évolutions de forces motrices en émissions et en concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre.

Les modèles climatiques

Les modèles climatiques présentent des biais, que l'on peut repérer en comparant des simulations sur des périodes passées avec les observations. Ces biais sont variables selon le modèle, la région et le phénomène (ou la saison) considérés.

Bakalowicz (2009) a comparé quatre modèles climatiques sur le bassin méditerranéen : HADCM3, ECHAM4/OPYC, NCAR-PCM et CSIRO-MK2. Ces modèles reproduisent correctement la répartition spatiale des précipitations annuelles sur la région, mais :

- HadCM3 reproduit mal les années de pluviométrie extrême (déficitaire ou excédentaire) ; il simule correctement les précipitations sur toute l'année sur l'est de la Méditerranée (Libye, Egypte, Turquie, Grèce), mais les résultats sur le Maghreb sont insatisfaisants pour l'automne, l'hiver et le printemps. La période sèche estivale est celle qui est la mieux modélisée ;
- ECHAM4 a tendance à surestimer les précipitations sur le Maghreb, et à les sous-estimer dans le sud-est du bassin méditerranéen (Egypte, Liban, Syrie) ;
- quelque soit le modèle utilisé, les données de pluviométrie ne semblent pas assez fiables pour être utilisées sans correction.

Les modèles diffèrent aussi entre eux par leur sensibilité aux concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre. Bou-Zeid et El-Fadel (2002) ont ainsi comparé la sensibilité des modèles ECHAM4, HadCM2, CGCM1 et GFDL à un doublement de la concentration atmosphérique de CO₂ (voir Tableau 3).

Pour faire face à ces incertitudes, la plupart des études utilisent les simulations de plusieurs modèles climatiques.

Ceci permet de donner une fourchette des évolutions possibles du climat sous un scénario d'émissions donné. Bien que biaisées, les simulations climatiques possèdent en effet une cohérence physique interne. Elles représentent des combinaisons physiquement réalistes entre les différentes variables climatiques (températures, vitesse du vent, humidité, précipitations, etc.).

Les méthodes de descente d'échelle

La résolution des modèles globaux est relativement faible (100 km environ) par comparaison à l'échelle du bassin versant, maille à laquelle s'étudient les impacts des évolutions climatiques sur les ressources en eau. **Les projections climatiques doivent donc être régionalisées.** C'est particulièrement le cas dans un climat de montagne ou méditerranéen, où la topographie joue un rôle déterminant notamment dans la répartition des précipitations.

Différentes méthodes de descente d'échelle sont utilisées, elles peuvent être statistiques ou dynamiques :

- Les méthodes statistiques se fondent sur l'hypothèse que les relations entre climat global et climat local sont stationnaires. Ces relations sont déterminées à partir de climats observés et sont appliquées aux sorties des simulations de modèles globaux.
- La descente d'échelle dynamique est basée sur la conception de modèles régionaux. Ceux-ci peuvent être soit couplés à des modèles globaux, qui fournissent les conditions aux limites pour une région donnée, soit être des modèles globaux à maille variable. Les mailles plus grosses sur l'ensemble du globe permettent alors de déterminer les conditions aux limites d'une zone particulière, où les mailles deviennent plus fines et le modèle peut simuler des processus climatiques locaux.

Souvent, les deux types de méthode sont utilisés : la résolution des modèles régionaux (aux alentours de 25 km) peut être trop faible pour la détermination des impacts sur l'hydrologie, ainsi des méthodes statistiques sont appliquées aux sorties des modèles régionaux.

Modèle	ECHAM4	HadCM2	CGCM1	GFDL
Sensibilité à un doublement de [CO ₂]*	2,6 °C	2,5 °C	3,5 °C	3,7 °C

*Réchauffement global à l'équilibre pour un doublement de la concentration de CO₂

Tableau 3. Sensibilité de quatre modèles climatiques aux variations de concentration en CO₂.
Source : Bou-Zeid et El-Fadel, 2002. Adapté de Fabre, 2010.

Quintana Segui et al. (2010) ont comparé trois méthodes statistiques de descente d'échelle sur le bassin Rhône-Méditerranée :

- La méthode des anomalies :
Les anomalies moyennes entre la période de référence et la période future étudiée sont calculées par maille du modèle climatique et sont ensuite appliquées aux observations sur les mailles plus fines correspondantes. Basée sur l'évolution des moyennes mensuelles, cette méthode ne prend pas en compte les changements de variabilité climatique et ne peut donc pas être utilisée pour évaluer l'impact du changement climatique sur les événements extrêmes.
- La méthode des quantiles :
Elle repose sur le même principe que la méthode des anomalies, mais elle inclut une correction de la fonction de distribution des variables climatiques.
- La méthode des types de temps :
Cette méthode a été développée et appliquée sur toute la France (Boé, 2007). Différentes combinaisons de variables de grande échelle sont mises en relation, en climat présent, avec un certain nombre de types de temps. Ainsi les sorties de modèles climatiques sur des périodes futures sont traduites en types de temps à partir des relations établies sur la période de référence. La base de données des types de temps a été établie pour la France entière et, au vu des particularités du climat dans le bassin Rhône-Méditerranée, les résultats ne sont pas optimaux sur le sud-est du pays.

Il ressort de cette étude que la méthode de descente d'échelle est une source d'incertitudes non négligeable, qui peut être comparable avec celle des modèles d'impacts.

Les modèles d'impacts

Quelque soit le type d'impact étudié, les modèles comportent des biais, repérables sur les simulations de périodes de référence passées. Ces biais peuvent être minimisés grâce au processus de calage validation, mais les simulations ne sont jamais optimales.

Ainsi pour les modèles hydrologiques par exemple, certains phénomènes sont peu ou pas pris en compte par les modèles comme :

- l'impact de l'occupation du sol sur l'évapotranspiration et les mécanismes de transformation pluie-débit. En effet, la végétation est le plus souvent faiblement différenciée même dans les modèles à base physique ;

- l'influence de l'anthropisation des territoires sur les débits. Les chroniques de débits mesurés sont influencées (par les prélèvements et par les barrages) et il est souvent difficile de reconstituer les débits désinfluencés, qui permettraient de distinguer davantage les impacts du changement climatique de ceux de l'anthropisation des territoires ;
- l'impact sur les ressources en eau des scénarios d'évolution des demandes en eau, dont les situations de tension projetées dépendent fortement (Arnell, 2004).

Enfin, les sorties des modèles sont des lames d'eau, écoulements ou débits. La traduction de ces écoulements en ressources disponibles ou mobilisables demande une expertise supplémentaire et dépend de facteurs socio-économiques propres à chaque territoire.

L'utilisation sous des scénarios de changement climatique de modèles d'impacts calés en climat actuel repose sur l'hypothèse que les relations entre le climat et les variables étudiées (débits, niveau de la mer, rendements...) varient peu avec le climat.

En considérant ces différentes sources d'incertitude, on comprend aisément que les projections de climat et d'impacts ne peuvent être lues sans certaines précautions.

1.5. Quelques clés de lecture

Tendances observées et projections

Les études menées sur le changement climatique peuvent porter sur les tendances observées, que l'on pense pouvoir attribuer à un réchauffement global en cours, ou sur des projections climatiques, issues des simulations de modèles numériques.

Pour établir une tendance sur des observations passées, des tests statistiques doivent être effectués sur des longues séries de mesures. Ceux-ci déterminent si la tendance suspectée est significative, c'est-à-dire si les variations mesurées sortent de la variabilité « normale » de l'échantillon. Cependant ces tendances détectées relèvent uniquement de la constatation. On peut émettre des hypothèses sur leurs causes, mais il faut ensuite faire des études d'attribution (études statistiques également) pour s'assurer de la validité de ces hypothèses.

Les projections de changement climatique, par contre, ne sont pas établies par prolongement des tendances observées. On a vu que ces projections étaient construites à partir de données d'entrée (les scénarios d'émissions), qui proviennent d'hypothèses sur nos modes de développement.

Les études d'impacts illustrent la sensibilité d'un système (hydrologie, littoral, production agricole, etc.) à des variations du climat, qui résultent elles-mêmes des émissions anthropiques de gaz à effet de serre.

Lecture et analyse des projections

Du fait de l'inertie du système climatique et du temps de résidence des différents gaz à effet de serre dans l'atmosphère, les projections climatiques jusqu'à un horizon de moyen terme (2040, 2050 environ) diffèrent plus entre modèles climatiques qu'entre scénarios d'émissions. Dans un futur plus lointain (horizons 2080, 2100) le climat dépend davantage de nos trajectoires de développement et de grandes différences existent entre les projections pour différents scénarios d'émissions.

Le changement climatique devrait être plus rapide que les évolutions climatiques enregistrées par le passé. Il est néanmoins progressif et à des horizons de court ou moyen terme, il est difficile de distinguer les effets de la variabilité interannuelle de ceux du changement climatique. Les projections à des horizons plus lointains donnent des directions plus claires d'évolution des variables climatiques.

Selon le glossaire du GIEC (Parry et al., 2007), le climat « se réfère à une description statistique fondée sur la moyenne et la variabilité de grandeurs pertinentes sur des périodes allant de quelques mois à des milliers, voire des millions d'années. » La période type de définition d'un climat est de 30 ans.

Lorsque des projections de changement climatique sont effectuées à un horizon donné, par exemple 2050, il s'agit donc d'une description statistique de la simulation de 20 à 30 années fictives centrées sur les années 2050.

Ainsi, une projection climatique donnée « à l'horizon 2050 » n'illustrerait en aucun cas la valeur des températures, précipitations et autres variables climatiques de l'année 2050.

Enfin, le point 1.4 s'est attaché à décrire la cascade d'incertitudes liée aux études d'impacts du changement climatique. Ainsi, il est important de lire toute projection au regard des incertitudes associées. Dans une perspective d'adaptation au changement climatique, les incertitudes constituent un nouvel élément de risque, qui peut certes être réduit dans le temps grâce aux avancées de la recherche, mais qui persistera nécessairement.

Les études multi-modèles permettent d'approcher le niveau d'incertitude : en évaluant la dispersion des résultats entre les différents modèles, on peut mesurer la robustesse des projections ou, au contraire, leur caractère incertain. Afin de faciliter la restitution des résultats, des moyennes des projections multi-modèles sont parfois données.

Ces moyennes donnent une indication sur la direction et l'amplitude des changements attendus, cependant il est plus prudent de les accompagner de la dispersion inter-modèles : une évolution positive en moyenne peut cacher des résultats négatifs de certains modèles, dont les simulations n'ont pas plus de probabilité d'être fausses que celles des autres modèles donnant des évolutions positives.

Dans le cadre de la définition d'une politique d'adaptation, la prise en compte de cette dispersion entre modèles est indispensable afin d'éviter le risque de « maladaptation ».

Les projections issues des différents scénarios et modèles peuvent être considérées comme un ensemble de futurs possibles (Figure 8), qui permettent d'encadrer les stratégies d'adaptation.

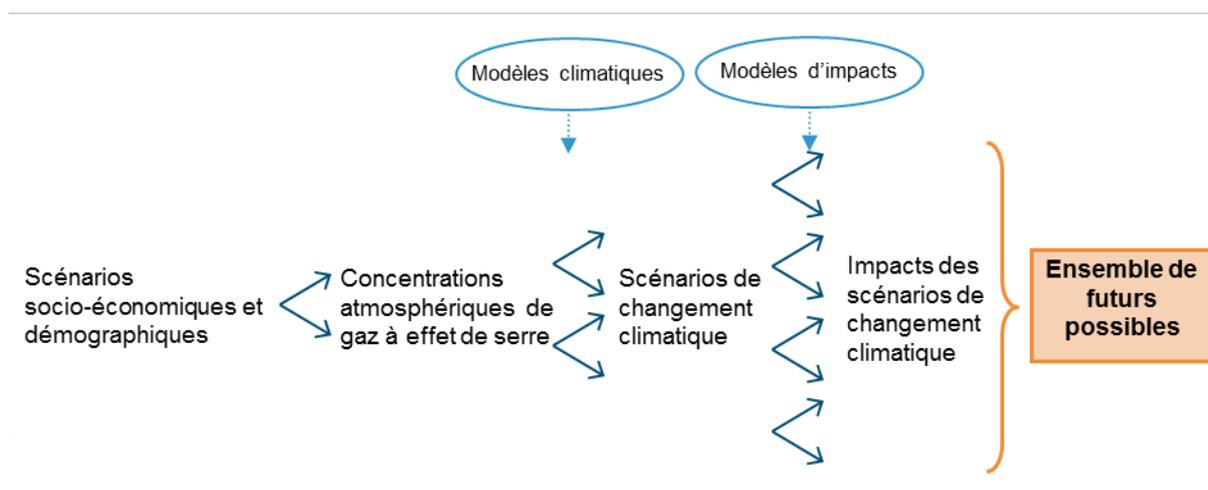


Figure 8. Schéma de détermination des futurs possibles sous changement climatique

Les méthodes d'étude des impacts du changement climatique sur le cycle de l'eau

Incidences clés :

- **Le schéma scénarios d'émissions – projections climatiques – modèles d'impacts est celui qui s'impose.** La notion d'incertitude est ainsi ancrée comme partie intégrante du raisonnement sur l'adaptation. Les incertitudes dues aux projections et la démarche de création de scénarios représentatifs de futurs possibles appuient l'idée ne pas se baser sur un seul scénario pour bâtir des stratégies d'adaptation.
- **Les informations apportées par la science en termes de changement climatique concernent des projections et non des prédictions :** les projections climatiques fournissent des futurs possibles qui offrent des scénarios pour des réflexions prospectives. Ce ne sont pas des prolongements de situations observées actuellement, y compris de tendances évolutives.
- **Le climat n'est plus stationnaire :** il n'évolue pas vers un nouvel équilibre mais vers des changements qui se poursuivent à très long terme. Ces évolutions rendent nécessaires un raisonnement à long terme et une gestion adaptative, c'est-à-dire flexible et réversible.
- Les changements climatiques à venir devraient être plus rapides que toutes les évolutions passées étudiées.

2. Les projections de changement climatique

De nombreuses simulations de changement climatique sont effectuées au niveau global, européen et national. Au niveau mondial, les simulations avec les modèles globaux sont coordonnées dans le cadre du programme CMIP (Coupled Model Intercomparison Project). Pour le quatrième rapport d'évaluation du GIEC, 23 modèles ont été utilisés. En vue de la préparation du cinquième rapport d'évaluation, plus de 50 modèles participent au programme CMIP5. Au niveau européen, des projections régionalisées ont été coordonnées dans les projets PRUDENCE (fini en 2004), puis ENSEMBLES (terminé en 2009). Ce dernier a abouti à la création d'une base de données de projections climatiques à une résolution de 25 km aux horizons 2050 et 2100 selon le scénario médian A1B (voir cartes de la Figure 9). Le projet CORDEX, en cours, devra aussi produire une base de données de projections climatiques régionalisées.

Les modèles s'accordent sur une hausse généralisée des températures, sur tout le pays et à toutes les saisons. Les précipitations estivales baisseraient, pour les autres saisons le signal est moins clair et les divers travaux de recherche donnent des résultats différents.

Les événements de pluviométrie extrême pourraient devenir plus fréquents et plus intenses en automne et en hiver, notamment dans les régions méditerranéennes où ils sont déjà régulièrement à l'origine de dommages matériels et humains.

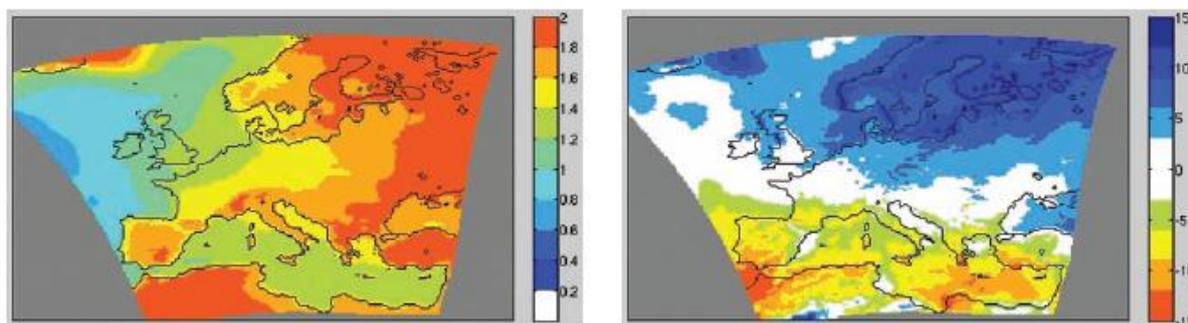


Figure 9. Evolution des températures (en °C, à gauche) et des précipitations (en %, à droite) annuelles à l'horizon 2021 - 2050 par rapport à la période 1961 - 1990 en Europe. Moyenne multi-modèles des résultats du projet ENSEMBLES. Source : projet Ensembles, rapport final (Goodess et al., 2009).

2.1. Evolution des températures

Moisselin et al. (2002) ont étudié sur l'ensemble du pays l'évolution des températures au 20^e siècle d'après des données mesurées.

Cette étude montre que **la température moyenne a augmenté de 1 °C environ entre 1901 et 2000** (de + 0,7 °C dans le Nord-Est à + 1,1 °C dans le Sud-Ouest), et que les températures minimales ont eu tendance à augmenter plus rapidement que les températures maximales.

Concernant les projections, les résultats des différents modèles climatiques présentent une bonne cohérence entre eux sur l'évolution des températures.

D'après les projections du modèle SAMM, développé spécialement pour la région méditerranéenne (Somot et al., 2008), **la température moyenne annuelle sur le bassin Rhône-Méditerranée pourrait s'élever de 3 à 5 °C à l'horizon 2080**. Les incertitudes sont légèrement plus élevées sur les anomalies saisonnières. Ainsi selon la méthode de descente d'échelle choisie les températures

estivales pourraient augmenter entre 3 et 6 °C à l'horizon 2080 dans le scénario pessimiste A2 (Quintana Segui, 2008 ; Figure 10).

Certains projets de recherche ont abouti à la création de scénarios climatiques régionalisés sur un ou plusieurs bassins versants inclus dans le territoire Rhône-Méditerranée.

C'est notamment le cas du projet Vulcain, qui a couvert les bassins versants de la Têt, de l'Agly et du Tech dans les Pyrénées-Orientales. Sur cette zone, l'étude des tendances climatiques passées sur la période 1971-2006 montre une hausse significative des températures moyennes annuelles, à raison de 0,3 °C tous les 10 ans (Chaouche et al., 2010). Cette hausse concerne principalement les températures de printemps et d'été (+ 0,7 à 0,8 °C tous les 10 ans), aucune tendance significative n'ayant été détectée pour les températures hivernales.

Sous des scénarios de changement climatique, les températures annuelles pourraient augmenter de 1 à 2 °C à l'horizon 2030 et de 1,5 à 3,5 °C à l'horizon 2050 (Martin et Salas y Melia, 2010). Les hausses de température seraient plus marquées en été (+ 2 à + 4 °C en août à l'horizon 2050), comme le montre la Figure 11.

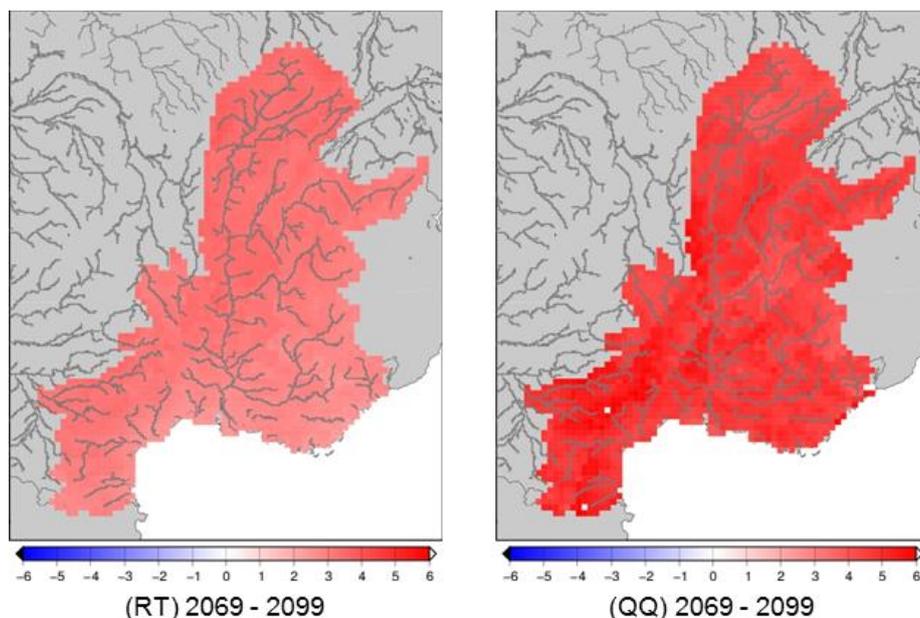


Figure 10. Évolution des températures moyennes estivales à l'horizon 2080 par rapport à la période 1970-2000 sur le bassin Rhône-Méditerranée et les Cévennes avec la méthode des types de temps (RT) et la méthode des quantiles (QQ). Source : Quintana Seguí, 2008.

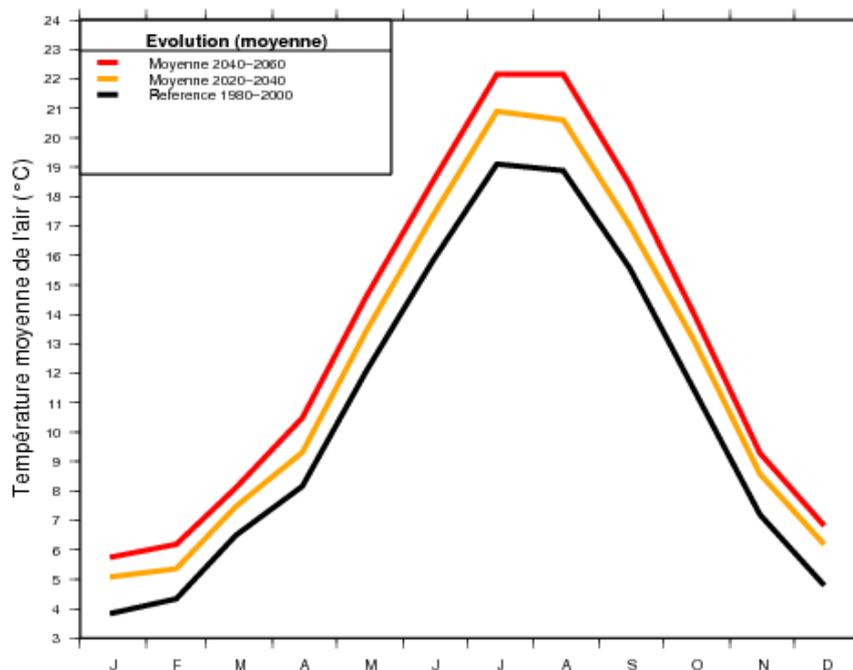


Figure 11. Températures moyennes mensuelles dans les Pyrénées - Orientales entre 1980 et 2000 (en noir) et projection aux horizons 2030 (en orange) et 2050 (en rouge), selon le scénario A1B et en moyenne sur 5 modèles climatiques. Source : Martin et Salas y Melia, 2010.

A l'horizon 2080, la température augmenterait encore fortement sur les bassins côtiers méditerranéens, qui ont été étudiés dans la thèse de Lespinas (voir Tableau 4). Sur les Pyrénées-Orientales (bassins de la Têt, du Tech et de l'Agly) elles pourraient augmenter de 4,4 °C en moyenne selon le scénario pessimiste A2, et de 3,3 °C selon le scénario optimiste B2 (Lespinas, 2008).

Sur tous les bassins côtiers du Languedoc-Roussillon (de la Têt à l'Hérault), l'évolution des températures serait contrastée selon les saisons, avec, selon le scénario A2, une hausse de 6 à 7 °C au mois d'août (moyenne de simulations issues de 8 modèles climatiques). L'un des modèles climatiques simule jusqu'à 10 °C d'augmentation pour le mois d'août (Lespinas, 2008, voir Figure 12).

Scénario	Statistique	Hérault	Orb	Aude	Agly	Têt	Tech
A2	Moy.	+ 4,3	+ 4,3	+ 4,5	+ 4,4	+ 4,4	+ 4,3
	Min.	+ 3,5	+ 3,6	+ 3,6	+ 3,5	+ 3,6	+ 3,5
	Max.	+ 5,8	+ 6,0	+ 6,3	+ 6,1	+ 6,0	+ 5,8
B2	Moy.	+ 3,1	+ 3,1	+ 3,2	+ 3,2	+ 3,2	+ 3,2
	Min.	+ 2,3	+ 2,3	+ 2,3	+ 2,3	+ 2,3	+ 2,3
	Max.	+ 4,4	+ 4,6	+ 4,7	+ 4,6	+ 4,5	+ 4,4

Tableau 4. Évolution des températures moyennes (en °C) à l'horizon 2080 selon 2 scénarios SRES et 8 modèles climatiques. Adapté de Lespinas, 2008.

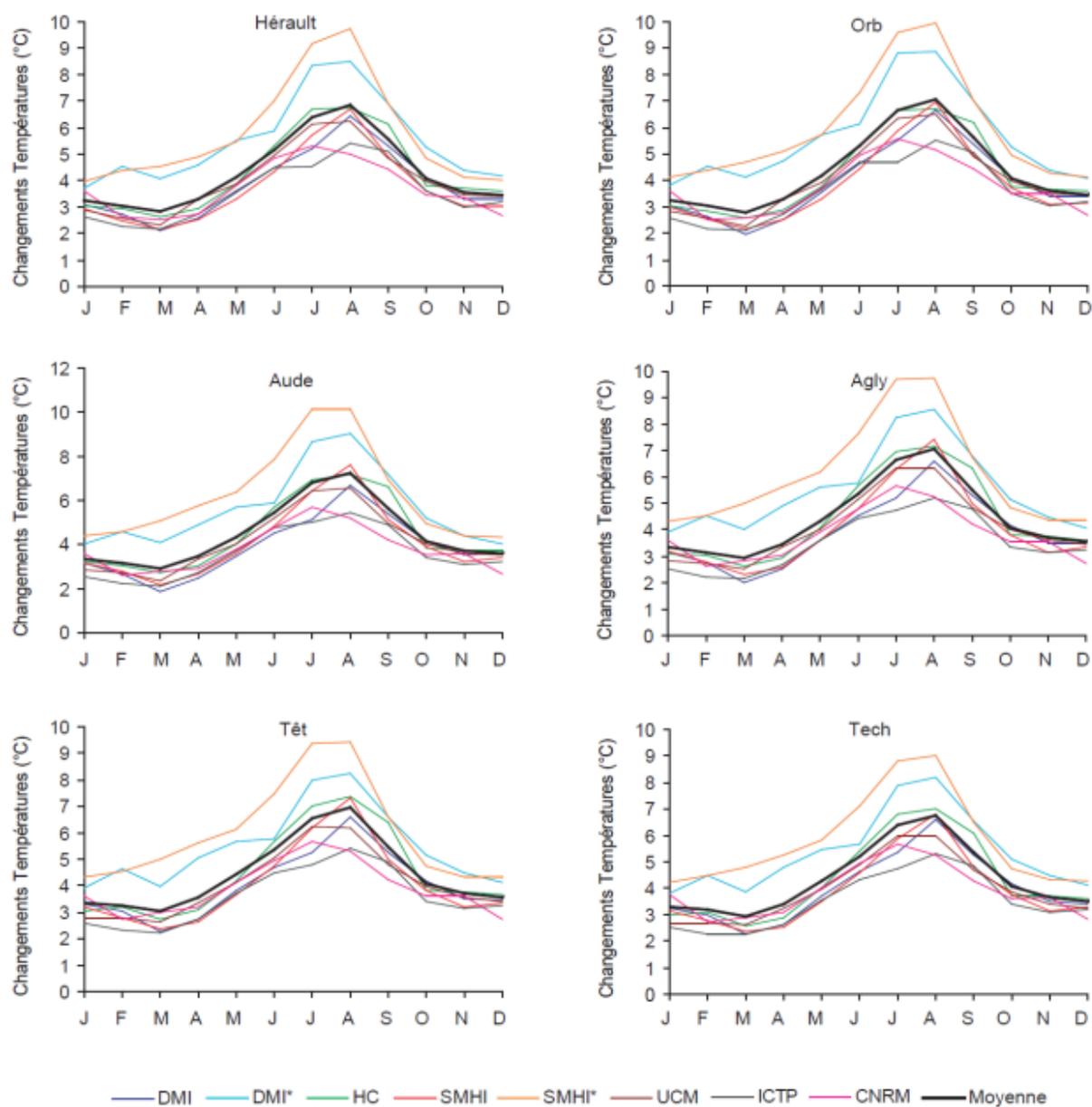


Figure 12. . Évolution des températures mensuelles (en °C) dans les bassins côtiers du Languedoc-Roussillon entre 1961-1990 et 2071-2100 sous le scénario SRES A2 avec 8 modèles climatiques. Source : Lespinas, 2008.

2.2. Evolution des précipitations

Les modèles climatiques sont moins cohérents entre eux en ce qui concerne les précipitations que pour les températures. La méthode de descente d'échelle est, pour les précipitations, une source importante d'incertitudes. Ainsi pour un même modèle climatique la méthode des quantiles et la méthode des types de temps peuvent donner des évolutions de signe contraire sur les bassins versants méditerranéens (Figure 13).

À plus long terme (horizon 2080) les projections s'accordent sur une baisse généralisée des précipitations.

Le projet Vulcain a étudié les tendances passées et des projections de précipitations aux horizons 2030 et 2050 dans les Pyrénées-Orientales.

Entre 1970 et 2006, aucune tendance significative n'apparaît en moyenne annuelle. Par contre les précipitations de juin ont baissé, alors que celles de novembre sont en hausse (Chaouche et al., 2010).

En ce qui concerne les projections, les précipitations ne montrent pas d'évolution significative pour 2030 (Martin et Salas y Melia, 2010). La dispersion des résultats selon le modèle climatique utilisé, et donc l'incertitude sur l'évolution des précipitations, sont fortes. On peut néanmoins noter qu'à l'horizon 2050 les différents modèles convergent plutôt vers une baisse des précipitations moyennes annuelles (de - 2 à - 25 %).

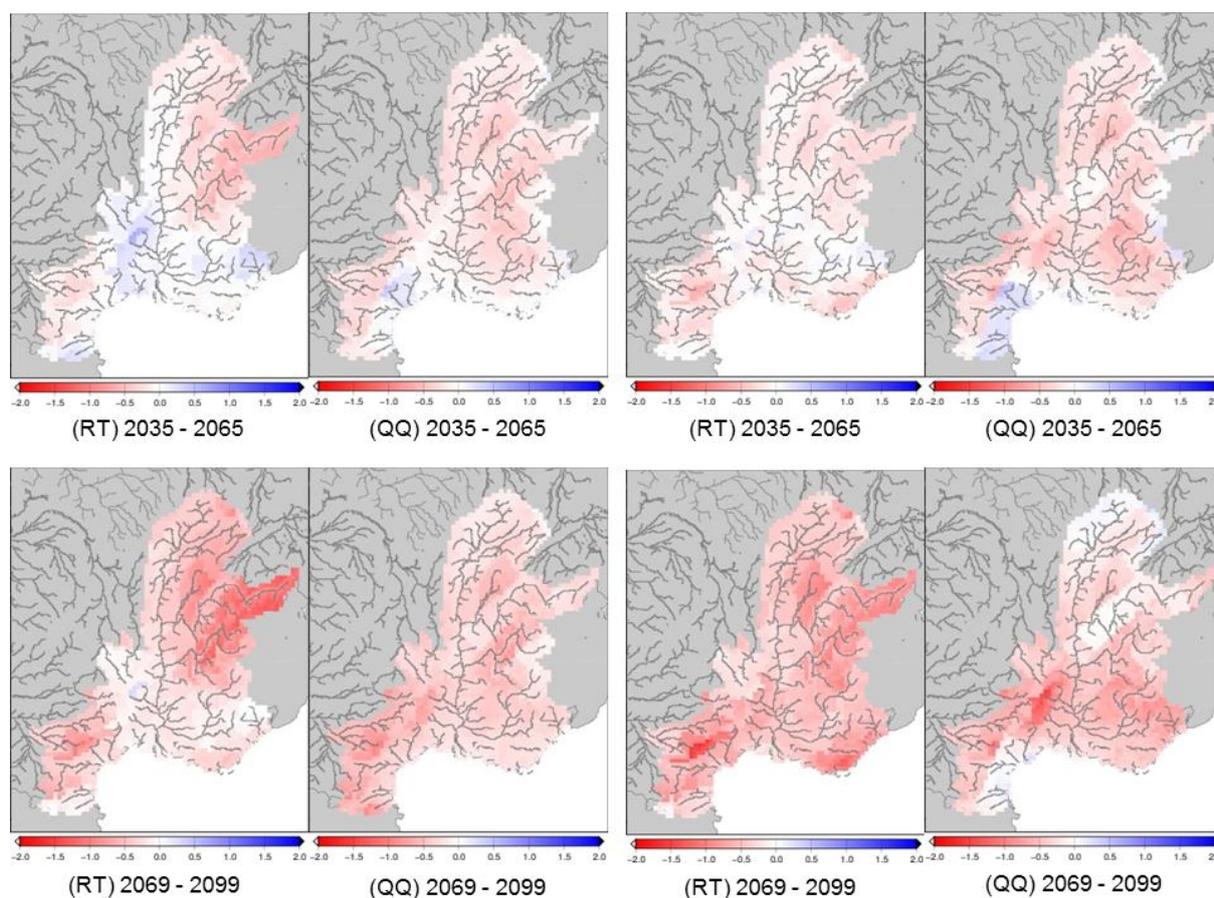


Figure 13. Évolution des précipitations (mm/jour) moyennes annuelles (à gauche) et d'automne (à droite) par rapport à la période 1970-2000 sur le bassin Rhône - Méditerranée et les Cévennes avec la méthode des types de temps (RT) et la méthode des quantiles (QQ). Source : Quintana Segui, 2008

De même que pour les températures, la thèse de Lespinas (2008) comporte des projections de précipitations à l'horizon 2080 selon 8 modèles climatiques.

Dans le scénario A2 tous les modèles simulent une baisse des précipitations annuelles. Le signal est moins clair dans le scénario B2 notamment sur l'Hérault et l'Agly, toutefois aucun modèle ne simule de hausse significative des précipitations (Tableau 5).

Comme le montrent les graphiques de la Figure 14, les précipitations baisseraient nettement pendant les mois d'été (de mai à août) : au mois de juillet elles pourraient baisser entre 60 et 80 % pour les modèles les plus pessimistes, et de 20 % pour les plus optimistes.

Le comportement des modèles est plus divergeant en automne et en hiver, avec la plus grosse incertitude sur le mois de septembre, où l'un des modèles simule une très forte augmentation des précipitations.

Le projet ClimChAlp (Castellari, 2008) a produit des projections climatiques pour la période 2071-2100 sur les Alpes, avec un zoom sur certaines zones dont les Alpes françaises du sud.

Les projections sur cette dernière zone sont résumées dans le Tableau 6. En plus de l'évolution des valeurs moyennes de précipitations, on peut noter une augmentation des précipitations intenses en hiver et un accroissement du nombre de jours secs en été.

Scénario	Statistique	Hérault	Orb	Aude	Agly	Têt	Tech
A2	Moy.	- 10,0	- 11,9	- 15,5	- 14,6	- 15,6	- 14,9
	Min.	- 20,9	- 22,9	- 25,9	- 25,7	- 27,8	- 28,9
	Max.	- 3,1	- 3,2	- 6,6	- 6,9	- 8,7	- 5,6
B2	Moy.	- 6,1	- 7,9	- 11,0	- 10,9	- 11,6	- 10,7
	Min.	- 13,9	- 17,4	- 25,1	- 22,6	- 23,0	- 21,9
	Max.	+ 1,5	- 1,2	- 0,1	+ 0,4	- 1,6	- 1,4

Tableau 5. Évolution des précipitations annuelles moyennes (en %) à l'horizon 2080 selon 2 scénarios SRES et 8 modèles climatiques. Adapté de Lespinas, 2008.

Variable	Evolution	Référence	Horizon	Saison	Modèle/scénario
Température moyenne	+ 4,1 °C	1961-1990	2070-2099	Été	Moyenne HIRHAM – RegCM/A2
	+ 2,8 °C			Hiver	
	+ 2,7 °C			Printemps	
	+ 3,2 °C			Automne	
Précipitations moyennes	- 30 %	1961-1990	2070-2099	Été	Moyenne HIRHAM – RegCM/A2
	+ 30 %			Hiver	
	0 %			Printemps	
	- 10 %			Automne	

Tableau 6. Évolutions possibles des températures et des précipitations moyennes saisonnières sur les Alpes françaises d'après le projet ClimChAlp. Source : Castellari, 2008.

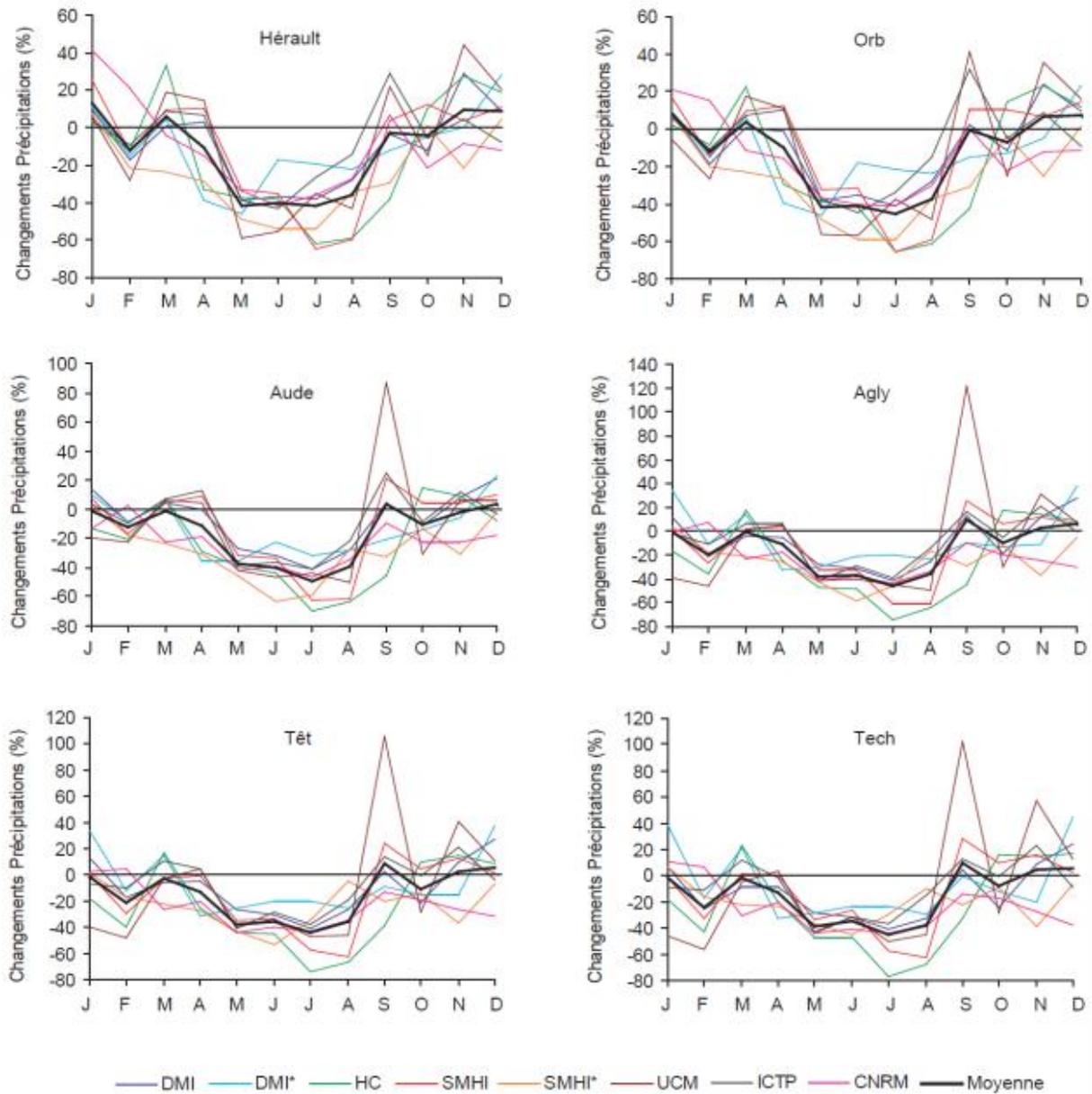


Figure 14 Évolution des précipitations mensuelles (en %) dans les bassins côtiers du Languedoc-Roussillon entre 1961-1990 et 2071-2100 sous le scénario SRES A2 avec 8 modèles climatiques.
Source : Lespinas, 2008.

2.3. Evolution des extrêmes

On parle d'événements extrêmes lorsque des variables climatiques dépassent un seuil proche des valeurs observées les plus hautes ou les plus basses. Ce seuil peut être défini à partir d'une intensité (températures supérieures à 40 °C par exemple) ou d'une fréquence d'occurrence (événements ayant une période de retour de 10, 20 ou 30 ans par exemple).

L'étude de l'évolution des événements extrêmes sous changement climatique est délicate. En effet, les événements extrêmes se produisent, par définition, relativement rarement. On ne dispose donc que de peu de séries d'observations assez longues pour étudier statistiquement l'évolution des événements les plus extrêmes (Goodess, 2005).

Le GIEC a publié en 2012 un rapport spécial sur les événements extrêmes (IPCC, 2012). **Au niveau mondial, il est considéré comme quasiment certain que la fréquence et l'intensité des températures extrêmes chaudes augmenteront, et que celles des températures extrêmes froides baisseront.** Des températures extrêmes chaudes ayant en climat actuel une période de retour 20 ans pourraient avoir une période de retour de 2 à 10 ans dans les années 2050, et de 1 à 7 ans dans les années 2081 - 2100, selon le scénario et le modèle considérés.

En été, le nombre de jours caniculaires devrait fortement augmenter, d'après les résultats des simulations Ensembles (Figure 15).

Les résultats du projet IMFREX (IMpact des changements anthropiques sur la FRéquence des phénomènes EXtrêmes de vent, de température et de précipitations) selon le scénario A2 suggèrent

également une multiplication par 10 du nombre de jours de canicule à l'horizon 2080. Les épisodes de sécheresse estivale pourraient être 1,5 fois plus longs (Déqué, 2007).

A l'image des projections de précipitations moyennes, l'évolution des précipitations extrêmes est plus incertaine. Globalement, les pluies pourraient être moins fréquentes mais plus intenses : la pression de vapeur saturante augmente avec la température de l'air, ce qui signifie qu'un air plus chaud peut contenir plus d'eau. Ainsi, chaque goutte d'eau peut résider plus longtemps dans l'air. Lors d'un événement pluvieux, plus de pluie serait donc susceptible de tomber.

Le GIEC (IPCC, 2012) considère probable une intensification des précipitations au niveau global.

La Figure 16 montre les projections d'évolution de précipitations intenses selon les simulations de 14 modèles climatiques globaux sous les scénarios d'émissions B1 (optimiste), A1B (médiante) et A2 (pessimiste), et leur dispersion. La variable étudiée ici est la période de retour d'événements pluvieux (précipitations journalières) ayant une période de retour de 20 ans en climat actuel. Une baisse de la période de retour de ces éléments signifie une hausse de la fréquence des pluies intenses.

Aux deux horizons temporels considérés (2046 - 2065 et 2081 - 2100), les résultats sont plus incertains sur la zone méditerranéenne. En effet pour tous les scénarios, 50 % des modèles simulent une augmentation de fréquence des pluies intenses, mais la dispersion entre modèles est forte et certains simulent une baisse de fréquence de ces événements. Par contre sur la zone Europe centrale, on peut voir un signal assez net de hausse de fréquence des pluies intenses.

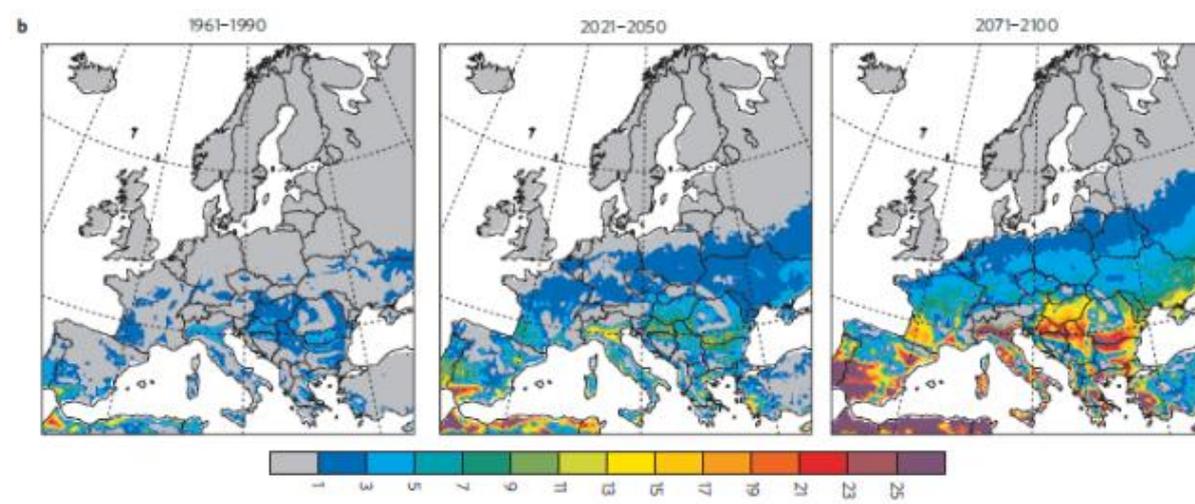


Figure 15. Nombre de jours avec une température supérieure à 40,7 °C, en climat actuel (1961-1990, à gauche) et aux horizons 2030 (2021-2050, au milieu) et 2080 (2071-2100, à droite). Moyenne des simulations climatiques du projet Ensembles. Source : Fischer et Schär, 2010.

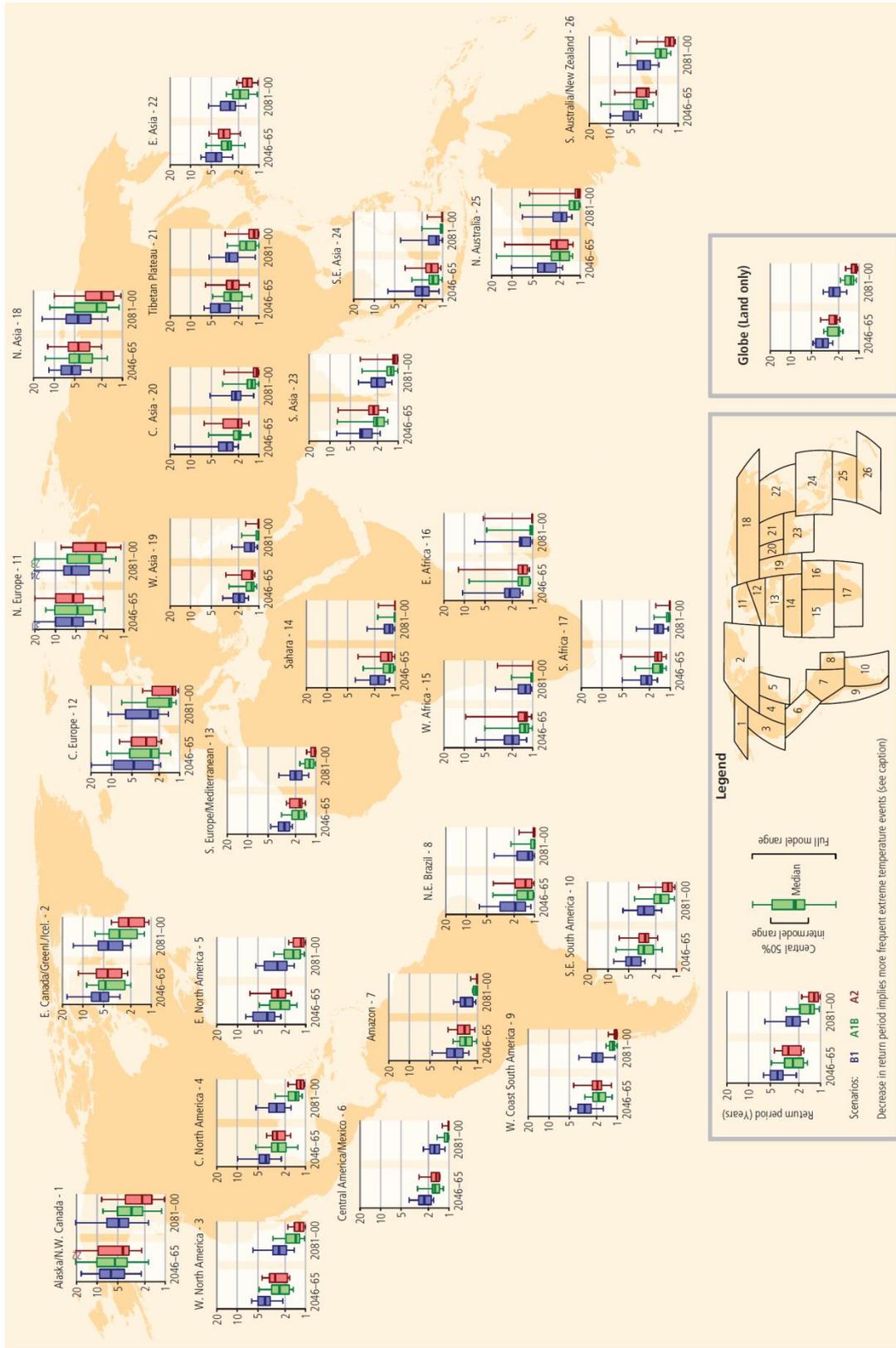


Figure SPM.4A | Projected return periods for the maximum daily temperature that was exceeded on average once during a 20-year period in the late 20th century (1981–2000). A decrease in return period implies more frequent extreme temperature events (i.e., less time between events on average). The box plots show results for regionally averaged projections for two time horizons, 2046 to 2065 and 2081 to 2100, as compared to the late 20th century, and for three different SRES emissions scenarios (B1, A1B, A2) (see legend). Results are based on 12 global climate models (GCMs) contributing to the third phase of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP3). The level of agreement among the models is indicated by the size of the colored boxes (in which 50% of the model projections are contained), and the length of the whiskers (indicating the maximum and minimum projections from all models). See legend for defined extent of regions. Values are computed for land points only. The 'Globe' inset displays the values computed using all land grid points. [3.3.1, Figure 3-1, Figure 3-5]

Figure 16. Évolution de la période de retour d'événements pluvieux extrêmes ayant aujourd'hui une période de retour de 20 ans. Résultats pour 14 modèles et les scénarios SRES B1 (violet), A1B (vert), et A2 (rouge).
Source : IPCC, 2012.

Selon Ricard et al. (2009) le maximum des cumuls devrait augmenter, ainsi que les surfaces impactées par des pluies extrêmes. La variabilité spatiale des pluies intenses pourrait devenir plus forte.

En climat présent les maxima de pluies intenses se situent en effet sur les reliefs du Massif Central et des Alpes, alors que les simulations à long terme montrent une répartition plus dispersée de ces maxima. Ainsi les pluies extrêmes pourraient davantage affecter le Languedoc-Roussillon.

Quintana Segui et al. (2011) ont utilisé un modèle climatique (SAMM) et trois méthodes de descente d'échelle pour évaluer l'évolution des extrêmes pluviométriques sur le bassin Rhône-Méditerranée et les Cévennes sous changement climatique. L'intensité des événements extrêmes ne montre pas d'évolution significative à l'horizon 2050, et la variabilité spatiale des résultats est très différente entre les méthodes de descente d'échelle (Figure 17). **Il est donc difficile pour le moment de conclure quant à l'évolution des extrêmes pluviométriques.**

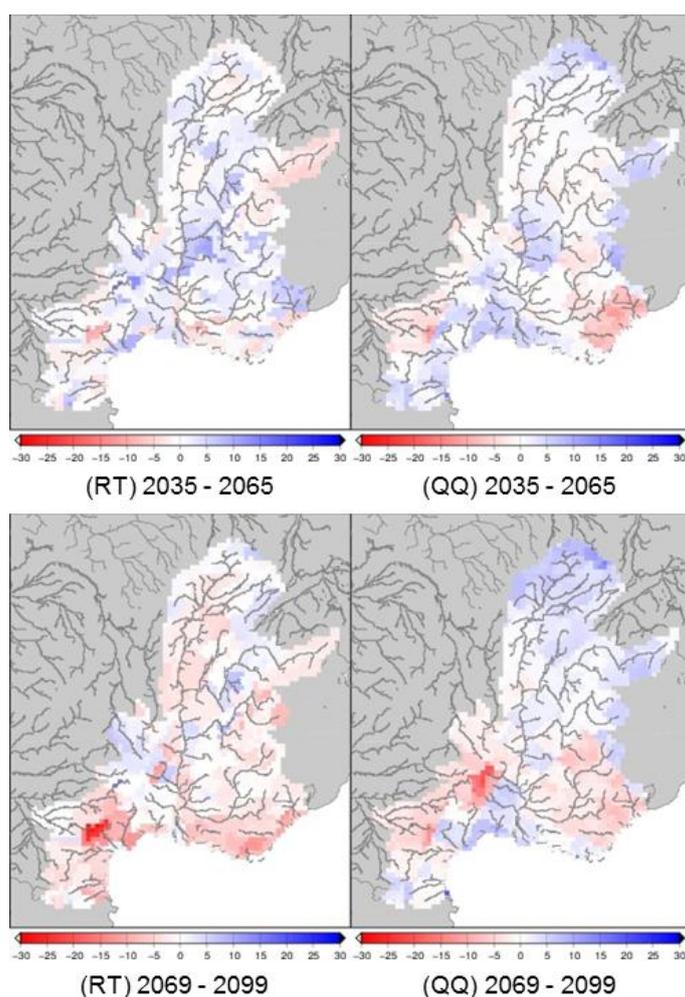


Figure 17. Quantile 99 des précipitations d'automne, anomalies par rapport à la période 1970-2000 selon le modèle SAMM et deux méthodes de descente d'échelle (méthodes des régimes de temps et des quantiles).
Source : Quintana Segui, 2008.

2.4. Évolution du manteau neigeux

Le manteau neigeux devrait également subir des modifications en conséquence du changement climatique. Le couvert neigeux devrait diminuer, en volume et en durée (Leblois, 2003). Cette diminution serait prononcée aux basses altitudes et de moins en moins marquée vers les hautes altitudes. La quantité d'eau dans le manteau neigeux devrait donc baisser, avec un pic avancé d'environ un mois en haute altitude (Boé, 2007).

Des recherches spécifiques sur l'évolution des précipitations neigeuses et du couvert neigeux dans les Alpes françaises ont été menées dans le cadre du projet Scampeï. Les simulations ont été effectuées avec trois modèles climatiques (ALADIN, LMDZ, et MAR) et trois scénarios d'émissions (A2, A1B et B1). Des projections fines d'évolution d'indices météorologiques variés sont disponibles par massif des Alpes, à trois altitudes : 1200 m, 1800 m, et 2400 m.

La durée annuelle d'enneigement devrait baisser dès les années 2030 à 1200 m. La baisse est plus forte au sud (entre - 40 et - 60 %), avec un bon accord entre modèles et scénarios. Au nord l'indice baisserait entre 15 et 30 %.

La baisse s'accentuerait au sud en 2080, allant de - 55 à - 80 %. Dans le scénario A2 (le plus pessimiste en matière d'émissions) de fortes baisses sont simulées partout sur les Alpes (de - 62 % au nord à - 85 % au sud). Les impacts sur le nord des Alpes sont incertains : les modèles LMDZ et MAR sont moins pessimistes que le modèle ALADIN pour le même scénario (A1B).

A 1800 m à l'horizon 2030 la durée d'enneigement baisserait surtout au sud des Alpes (- 20 à - 50 %). Les modèles LMDZ et MAR sont plus pessimistes sur les Alpes du Sud avec des baisses allant de - 40 à - 50 %. Sur le nord des Alpes les modèles et les scénarios convergent vers une faible diminution de la durée annuelle d'enneigement (- 10 à - 15 %).

A l'horizon 2080 les différences entre scénarios sont plus fortes que les différences entre modèles. Le sud serait toujours la partie la plus impactée, avec une diminution de 50 à 65 % (60 à 75 %) de l'indice dans le scénario A1B (A2). Dans le scénario A2 la durée annuelle d'enneigement pourrait baisser de 40 à 50 % dans la moitié nord des Alpes.

A 2400 m l'impact sur la durée d'enneigement serait beaucoup moins marqué. Le sud des Alpes se démarque dès l'horizon 2030, les baisses simulées sont comprises entre - 10 et - 25 %.

Au nord, les modèles et les scénarios diffèrent peu, avec une baisse de l'indice aux alentours de - 10 %.

Dans les années 2080 la durée d'enneigement pourrait baisser jusqu'à - 45 % au sud. Au nord, la baisse serait moindre et comprise entre - 10 et - 25 %.

2.5. Évolution de l'évapotranspiration et de l'humidité des sols

L'évapotranspiration est une variable importante à prendre en compte, puisqu'elle influe sur l'humidité des sols (et donc sur la recharge des nappes) et sur la transformation de la pluie en écoulements et donc en débits.

L'évapotranspiration potentielle (ETP) correspond à la quantité d'eau totale évaporée et transpirée (donc consommée) par un couvert végétal de référence (gazon) couvrant suffisamment le sol, en croissance active, sur lequel l'eau n'est pas limitante.

L'évapotranspiration potentielle dépend donc uniquement de l'énergie disponible (rayonnement, température, vent) au niveau du couvert. Des travaux de Milano (2010) montrent que **l'évapotranspiration potentielle (ETP) pourrait augmenter de façon significative sur le bassin du Rhône à l'horizon 2100 (jusqu'à + 4 mm/jr en juillet et août) mais également dès les années 2050.**

D'après l'étude GICC Rhône cette hausse de l'ETP annuelle pourrait être plus faible au sud du bassin qu'au nord (Leblois, 2003).

Boé (2007) a simulé l'évolution de l'évaporation réelle, qui augmenterait à toutes les saisons sauf en été où elle baisserait du fait d'une moindre humidité des sols.

Ainsi d'après Boé (2007) l'humidité des sols baisserait partout en France à l'horizon 2050, à l'exception des Alpes au printemps, probablement en conséquence de la fonte précoce des neiges. Les baisses les plus marquées sont projetées dans le nord des Alpes en été, et sur quasiment tout le bassin en automne (Figure 18). L'humidité des sols est ici représentée par l'index SWI (Soil Wetness Index), défini par le rapport entre l'eau effectivement contenue dans le sol utilisable par le couvert végétal et le maximum d'eau utilisable par le couvert que le sol peut contenir.

La Figure 18 représente la moyenne d'ensemble des résultats de plusieurs modèles climatiques ; le sens d'évolution est cohérent entre les différents modèles.

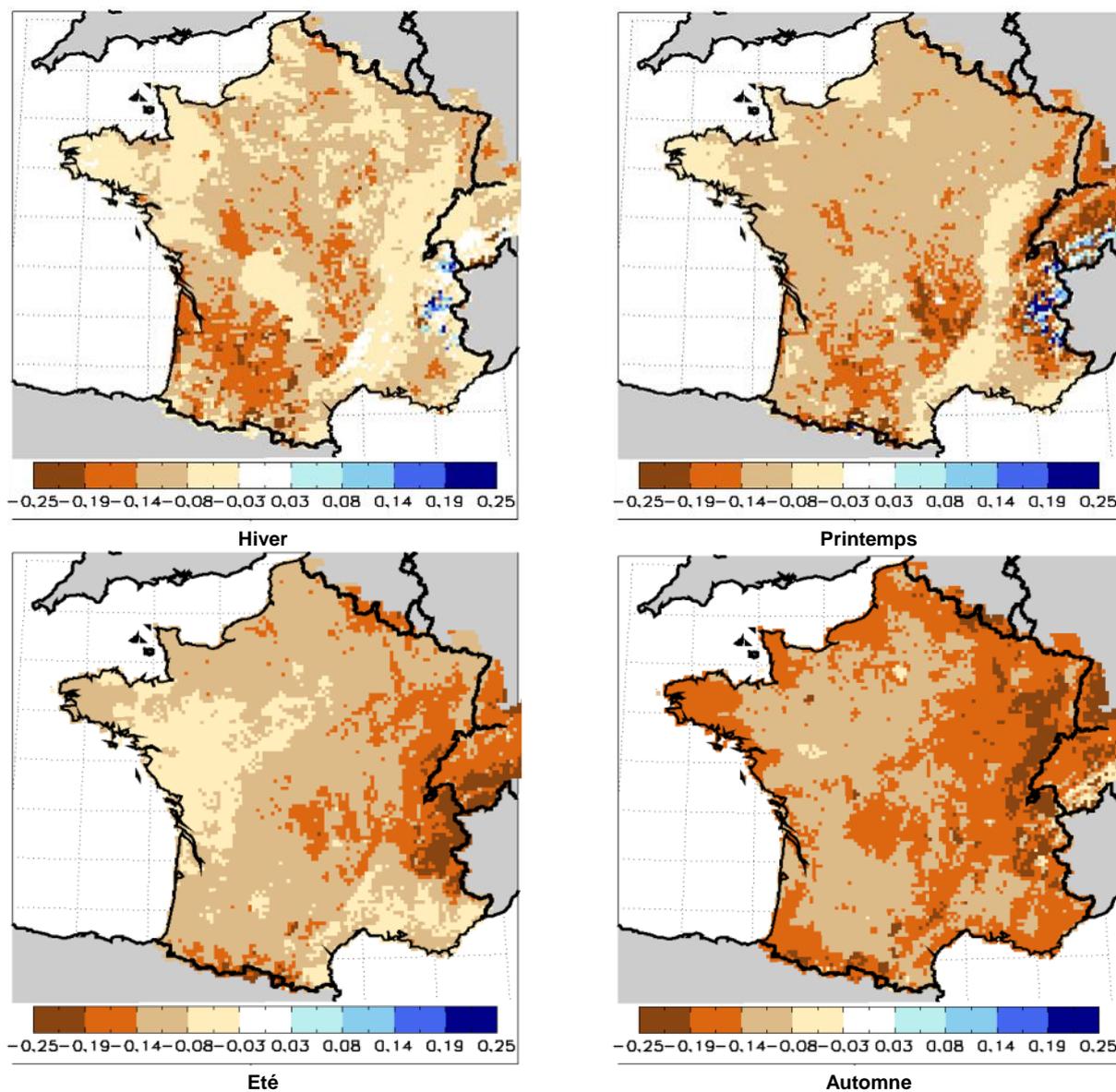


Figure 18. Moyenne d'ensemble des changements de l'indice d'humidité des sols (SWI) entre 2046-2065 et 1970-1999, par saison. Tiré de Boé, 2007.

Dans les Pyrénées-Orientales, l'évolution de l'évapotranspiration entre 1971 et 2006 a fait l'objet d'une étude de tendances dans le cadre du projet Vulcain (Neppel, 2010).

Elle a augmenté de façon significative de février à juin, aucune évolution significative n'est notée pour les mois d'été. A l'échelle annuelle l'évapotranspiration a augmenté de 1 à 4 mm/an, surtout à l'ouest du secteur d'étude.

Des projections ont également été effectuées sur la même zone : aux horizons 2030 et 2050 l'évapotranspiration pourrait augmenter de 7 % et de 10 % respectivement, en moyenne annuelle (Martin et Salas y Melia, 2010).

Le projet ClimSec (Soubeyroux et al., 2011) s'est attaché à produire des projections aux horizons 2020, 2050 et 2080 sur l'évolution des sécheresses météorologiques et agricoles en France. Une sécheresse météorologique est définie comme un déficit de pluviométrie, alors qu'une sécheresse agricole concerne l'humidité des sols. Les indices utilisés pour décrire ces sécheresses sont le SPI (Standardized Precipitation Index) et le SSWI (Standardized Soil Wetness Index).

A l'horizon 2020, peu de changements sont envisagés : seule une aggravation des sécheresses agricoles est simulée, mais celle-ci est considérée comme incertaine. Les sécheresses longues (12 mois) connaîtraient une évolution plus rapide que les sécheresses courtes (3 mois).

A partir des années 2050, des sécheresses agricoles inhabituelles par leur expansion géographique et par leur intensité pourraient apparaître (voir Figure 19). Ces mêmes sécheresses pourraient être plus longues dans certaines régions notamment dans les zones montagneuses. L'évolution des sécheresses courtes paraît nette par rapport aux sécheresses longues.

Enfin à l'horizon 2080 des sécheresses météorologiques plus fortes pourront sévir en été et en automne. **De longues sécheresses agricoles sont probables sur la quasi-totalité du pays, sans retour à la normale définie en climat actuel.**

Ces évolutions projetées présentent un caractère non linéaire, avec une accentuation rapide des sécheresses dans la seconde moitié du siècle, et une augmentation de la variabilité interannuelle. L'aggravation serait plus marquée dans les régions ayant actuellement des sols plus humides en moyenne (Nord et zones de montagnes).

Les sécheresses agricoles évolueraient plus rapidement que les sécheresses météorologiques, ce qui souligne le fait que **la seule prise en compte des évolutions de pluviométrie ne suffit pas pour décrire l'évolution des sécheresses sous des scénarios de changement climatique.**

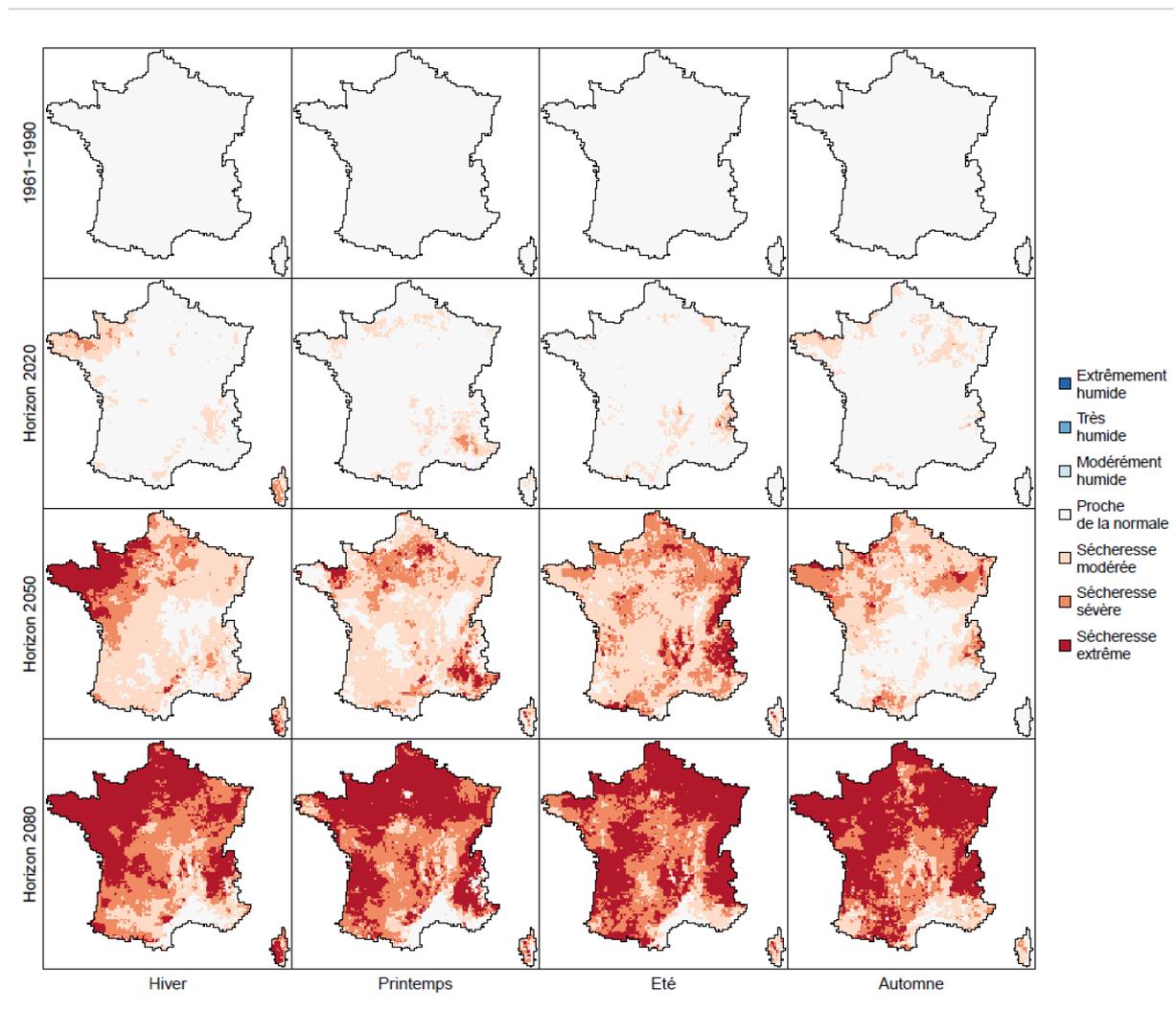


Figure 19. Évolution des sécheresses agricoles (indice d'humidité des sols) selon les saisons, d'après le scénario A2 et le modèle climatique ARPEGE avec une descente d'échelle types de temps.
Source: Soubeyroux, 2011.

Les projections de changement climatique

Incidences clés :

- Malgré les incertitudes et toutes les précautions à prendre dans la lecture des résultats, des directions fortes se dégagent des projections, qui vont globalement dans le même sens (réchauffement et assèchement). Il faut s'attendre à :
 - Une hausse généralisée des températures ;
 - Une baisse des précipitations estivales ;
 - Une réduction du couvert neigeux ;
 - Une augmentation du nombre de jours caniculaires ;
 - Des sécheresses plus fréquentes et plus intenses.
- Les trois paramètres température, évapotranspiration et neige montrent des signes très nets qui annoncent un problème de raréfaction de la ressource sur le bassin.
- Lorsque des tendances évolutives peuvent être mises en évidence, sur la base de chroniques de données suffisantes, le signal qu'elles donnent est généralement cohérent avec les projections modélisées.
- La production et la capitalisation de données d'observations deviennent incontournables pour être en mesure de caractériser les tendances évolutives et caler correctement les modèles climatiques et les modèles d'impact.
- Dès l'étape des projections climatiques, on peut prévoir que certains usages seront directement impactés (sports d'hiver et neige, agriculture et humidité des sols), leur viabilité pourrait être remise en cause.

Connaissance scientifique à investir ou approfondir :

- Améliorer les projections sur l'enneigement (quantité, durée) et l'impact sur les ressources en eau.
- Modéliser l'évolution sous changement climatique des aptitudes agronomiques des sols.

3. Les impacts du changement climatique sur la ressource et la demande en eau

Les évolutions des variables climatiques présentées dans le point précédent auront nécessairement un impact sur la quantité d'eau disponible et sur sa répartition dans le temps et dans l'espace. Les modèles hydrologiques pluie-débit permettent d'évaluer les impacts sur les eaux de surface. Ces modèles sont appliqués à une période de référence, après avoir été calés sur les débits observés. La simulation sur la période future étudiée est ensuite effectuée, avec en entrée les données climatiques issues des projections. Comme pour les simulations climatiques, on considère ensuite la différence entre les débits simulés en période future et les débits simulés sur la période de référence. Les eaux souterraines, qui peuvent faire l'objet d'une modélisation avec un calage sur la piézométrie observée, devraient aussi être impactées par les évolutions climatiques, qui influenceront sur les facteurs de recharge des nappes par exemple. Enfin le changement climatique devrait influencer sur les usages de l'eau. Peu de résultats d'études scientifiques sont disponibles, le point 3.5 détaille certains impacts envisageables.

3.1. Typologie des impacts possibles sur la ressource en eau

Les impacts sur les ressources en eau pourront se manifester sous plusieurs formes (Fabre, 2010) :

- le décalage dans le temps, le changement de type de ressources ;
- le déficit moyen ressources/prélèvements ;
- les pénuries ponctuelles ;
- les risques accrus (orages, glissements de terrain).

Une typologie des impacts des changements climatiques sur les ressources en eau peut ainsi être dégagée :

- Diminution prononcée des précipitations annuelles

Une diminution prononcée des précipitations, couplée à de fortes augmentations de température donc d'évapotranspiration, peut avoir pour impacts des fortes baisses des débits moyens et d'étiage.

- Baisse modérée des précipitations mais effet de l'augmentation de température

Même couplée à une baisse modérée des précipitations, l'augmentation des températures a pour conséquence une hausse de l'évapotranspiration et donc la diminution des ressources en eau.

- Impacts sur les stocks de neige

La hausse des températures en hiver cause une diminution de l'enneigement. Dans les zones qui reçoivent un fort enneigement en hiver, les débits au printemps et au début de l'été sont largement soutenus par la fonte lente des neiges. Si cette fonte est accélérée, les débits sont plus forts en fin d'hiver, et les périodes d'étiage sont avancées. De plus si en hiver les précipitations arrivent davantage sous forme de pluie que de neige, moins d'eau sera stockée de manière saisonnière et les crues d'hiver seront plus importantes.

A ceci peut s'ajouter une baisse moyenne de pluviométrie, qui accentue l'effet sur les débits d'étiage.

- Accentuation de la variabilité saisonnière

Les étiages sévères et les crues s'accroissent. Des tensions ponctuelles apparaissent ou sont amplifiées et la fréquence des événements extrêmes augmente.

- Impacts sur la qualité de l'eau induisant une baisse des ressources utilisables

Les impacts se présentent sous forme d'intrusions salines dans les aquifères côtiers, et de hausse des taux de pollution dans les cours d'eau du fait notamment d'une moindre dilution.

- Impact sur la morphologie des cours d'eau

Cet impact reste pour le moment peu connu. Néanmoins on peut considérer qu'avec la fonte des glaciers, une charge solide plus abondante pourrait être disponible sur les versants, contribuant à une augmentation du transport par charriage et au maintien du tressage de certaines rivières. Une éventuelle intensification des crues pourrait également mener à des modifications dans la morphologie des cours d'eau.

3.2. Projections hydrologiques disponibles

Il existe des projections réalisées au niveau national sur l'évolution des débits sous l'influence du changement climatique. On peut citer dans un premier temps le programme GICC (Gestion des Impacts du Changement Climatique) qui a donné lieu à des études particulières sur les grands fleuves français, dont une sur le Rhône (Leblais, 2003). Plus récemment, la thèse de Boé (2007) a porté sur les méthodes de régionalisation des projections climatiques sur la France, incluant une modélisation des impacts sur le cycle hydrologique des grands fleuves.

Evolution de la ressource Rhône sous changement climatique

Etchvers (2000) a étudié la modélisation hydrologique du bassin versant du Rhône avec la chaîne de modèles CIM (Crocus-Isba-Modcou), Crocus étant un module permettant de calculer l'évolution interne du manteau neigeux à partir de variables météorologiques.

Jusqu'à Lyon, le Rhône possède une dominante nivo-glaciaire et est peu modifié par ses affluents. La Saône est son principal affluent, elle apporte une forte composante pluviale avec d'importantes crues hivernales. L'Isère, à régime nivo-glaciaire, est fortement anthropisée. L'Ardèche est un affluent torrentiel, avec des crues intenses à l'automne et au printemps. La Durance, bien que nivo-glaciaire en amont du barrage de Serre-Ponçon, apporte par sa partie aval une composante pluviale au Rhône.

Le régime du Rhône est donc complexe avec des affluents à régimes très divers, et de fortes crues peuvent se produire en automne, en hiver, et au printemps.

L'étude d'Etchevers est basée sur un scénario de doublement de la concentration atmosphérique de CO₂ et sur une simulation climatique avec le modèle Arpege-Climat. Dans les bassins de montagne, les précipitations neigeuses pourraient baisser de 23 à 36 % ce qui, combiné avec l'avancée de la date de fonte, renforcerait très nettement l'évapotranspiration (+ 20 % environ).

La conséquence de ces phénomènes sur les débits des cours d'eau dépend des situations, en particulier de l'évolution des pluies. Ainsi sur le bassin du Drac les pluies resteraient constantes, les écoulements moyens baisseraient donc jusqu'à - 13 %. Sur l'Isère grâce à des pluies qui pourraient augmenter de 10 % environ, le débit moyen se maintiendrait à son niveau actuel. En revanche, sur la Durance amont, les précipitations pourraient baisser, avec pour conséquence une baisse de 20 % environ des écoulements.

Mais les évolutions des débits moyens annuels peuvent cacher des évolutions saisonnières contrastées :

- le Doubs à Courclavon pourrait voir son débit augmenter de 50 % en hiver et au printemps, alors qu'il baisserait de 20 à 40 % en été et en automne ;
- la Durance à la Clapière aurait un débit hivernal maintenu à son niveau actuel. La crue nivale apparaîtrait un mois plus tôt (en mai), avec une amplitude maximale en baisse (- 30 %). La hausse de l'évapotranspiration entraînerait une baisse du débit jusqu'à - 50 % entre juin et octobre ;
- le Buech pourrait perdre sa dominante nivale, avec des débits en baisse de - 20 à - 50 % en été et en automne ;
- l'Isère aurait une évolution similaire au Doubs : hausse de 40 % des débits hivernaux, baisse de

30 % en été et en automne. Un pic très marqué interviendrait au printemps, un mois plus tôt qu'actuellement, du fait de la fonte plus précoce de la neige et de l'arrivée de pluies printanières sur des sols saturés.

Hendrickx (2001) trouve des résultats similaires sur l'Isère pour un doublement de CO₂, avec des étiages hivernaux moins marqués et des étiages plus sévères en automne. Selon cette étude les débits entre février et juin pourraient s'accroître de 17 à 57 % (selon le modèle climatique utilisé) alors qu'ils baisseraient de 43 à 50 % en septembre.

Le projet GICC Rhône (Leblois, 2003) a abouti à des conclusions comparables sur le bassin versant du Rhône. Ainsi les hauts débits de la Saône, de l'Ardèche et du Rhône pourraient augmenter, alors que les eaux moyennes et les étiages baisseraient. Dans ce projet 6 modèles climatiques et 5 modèles hydrologiques ont été appliqués, tous pour un scénario de doublement de la concentration atmosphérique de CO₂. On remarque que les projections dépendent ici plus du scénario climatique que du modèle hydrologique utilisé.

Avec le même scénario d'émissions, Hendrickx (2001) simule avec 3 scénarios climatiques et le modèle hydrologique CEQUEAU une baisse des débits de 32 à 39 % en septembre sur le Rhône à Viviers.

Les débits d'été et d'automne du Rhône pourraient donc fortement baisser. Selon Boé (2007) cette baisse serait plus rapide jusqu'aux années 2050, et ralentirait pendant la deuxième moitié du siècle dans le scénario d'émissions médian A1B (voir Figure 20). Les étiages devraient être plus fréquents et plus longs, mais les impacts des inondations ne faibliraient pas.

Des travaux du Plan Bleu (Milano, 2010) ont porté sur l'évaluation de l'impact des changements climatiques sur les débits de quatre grands fleuves méditerranéens, dont le Rhône, aux horizons 2050 et 2100. Selon ces travaux, les écoulements du Rhône pourraient baisser de 15 à 30 % en moyenne, et de 30 à 40 % en été, les étiages étant rallongés d'un mois environ. Les débits ne devraient pas être affectés en hiver. Une autre modélisation (Milano et al., 2011) montre que les écoulements moyens annuels pourraient diminuer de 10 à 30 % dans les bassins côtiers méditerranéens et sur le sud-ouest du bassin du Rhône à l'horizon 2025. A l'horizon 2050 sur ces mêmes zones ils pourraient baisser de 30 à 50 %.

Les projections de Boé (2007) selon le scénario A1B à l'horizon 2050 (présentées dans la Figure 21) montrent l'évolution possible des débits mensuels du Rhône en trois points, d'amont en aval. Ces projections sont issues des simulations d'un modèle hydrologique et de 14 modèles climatiques du GIEC, avec une descente d'échelle statistique. Les débits baisseraient entre 25 et 50 % de mai à octobre sur toute la longueur du fleuve, ils augmenteraient ou resteraient stables en hiver, avec plus d'amplitude possible à l'amont mais aussi plus d'incertitudes.

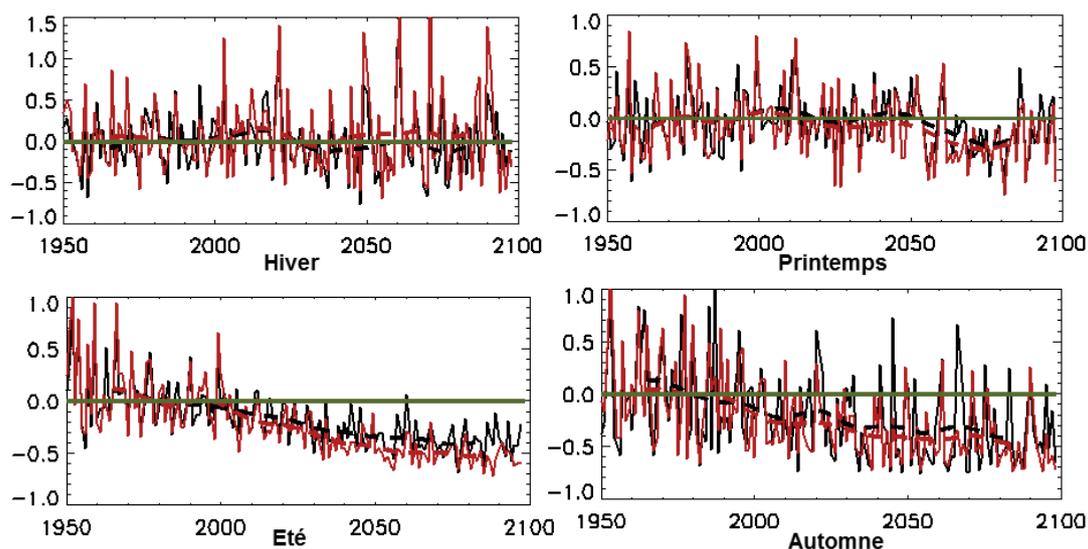


Figure 20. Variabilité interannuelle des débits saisonniers (anomalies par rapport à la moyenne sur la période 1970-1999) entre 1950 et 2099 pour le Rhône à Beaucaire. Les traits pointillés correspondent aux séries filtrées passe-bas. Les courbes rouges et noires correspondent à deux méthodes de désagrégation différentes. Tiré de Boé, 2007.

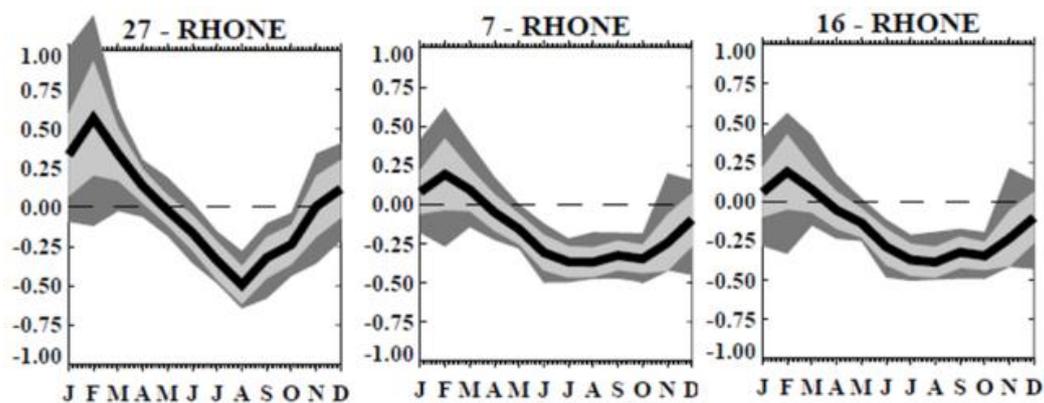


Figure 21. Évolution des débits mensuels du Rhône en trois points à l'horizon 2046-2065 par rapport à la période 1970-1999 (sur une échelle de -1 à +1, +1 signifiant par exemple une hausse de 100 %). De gauche à droite : à l'aval du Léman, après la confluence avec la Drôme, et à Beaucaire. Le trait noir est la moyenne d'ensemble, la zone gris clair est délimitée par la moyenne d'ensemble plus ou moins un écart-type inter-modèle, la zone gris foncé est délimitée par les valeurs maximums et minimums parmi les 14 modèles. Source : Boé, 2007.

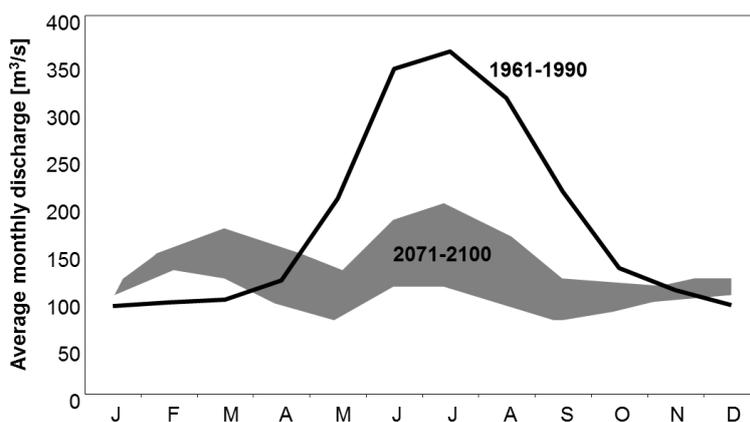


Figure 22. Débits mensuels du Rhône en amont du Lac Léman en climat actuel (1961-1990) et à l'horizon 2080 (2071-2100) selon le scénario A2. La zone grisée représente les incertitudes associées à la projection. Source : Beniston, 2012.

Les impacts du changement climatique sont différenciés selon les processus dominants dans les bassins, mais **la plus nette conclusion sur le bassin versant du Rhône est la forte diminution de la composante nivale dans les écoulements et la réduction des débits estivaux** (Leblois, 2003 ; Hendrickx, 2001 ; Boé, 2007).

Le recul des glaciers et la fonte du permafrost auront également des impacts sur le bassin du Rhône. À court et moyen terme, la fonte accélérée des glaciers peut mener à une hausse des écoulements et des débits maximums, associés à un allongement de la période de fonte. Sur le long terme, si le volume d'eau stocké annuellement dans les glaciers baisse voire disparaît, les débits estivaux pourraient baisser (Rosenzweig et al., 2007). Cependant, la contribution glaciaire française aux débits du Rhône est, en volume, relativement faible (de l'ordre de 4 % des écoulements totaux) (Sauquet, 2011).

Les apports du Lac Léman au Rhône pourraient être affectés par les évolutions du couvert neigeux et des glaciers. Les glaciers alpins suisses ont perdu entre 30 et 40 % de leur surface et près de 50 % de leur volume depuis 1900 (Beniston, 2012).

A l'horizon 2080 les débits du Rhône en amont du lac pourraient être profondément modifiés, avec un premier pic du débit avancé de 2 à 3 mois (en février-mars) du fait de la fonte plus précoce de la neige. Un deuxième pic pourrait apparaître en été : il proviendrait de la fonte des glaciers, qui se poursuivrait alors que le couvert neigeux aurait déjà cessé d'alimenter les écoulements (Figure 22). Les incertitudes sur l'amplitude de ce deuxième pic de débits sont dues notamment à l'état des glaciers et donc au volume qu'ils pourraient stocker pendant l'hiver. Les débits maximums seraient fortement réduits (- 50 à - 75 % selon le scénario pessimiste A2) (Beniston, 2012).

En cas de fort recul ou de disparition des glaciers, la variabilité interannuelle des écoulements augmenterait. En effet la fonte estivale des glaciers alimente les débits dans les périodes particulièrement sèches. Beniston (2012) fait ainsi état d'un possible assèchement (partiel ou total) du Rhône en Suisse à la fin de certains étés à l'horizon 2080.

Enfin, la fonte des glaciers et du permafrost peut mener à l'apparition de nouvelles zones humides et de nouveaux lacs en altitude. La fonte du permafrost pourrait aussi déstabiliser les moraines du petit âge glaciaire, augmentant ainsi le risque d'inondations brutales (Rosenzweig et al., 2007).

L'impact des évolutions d'enneigement

Les impacts de l'évolution d'enneigement sur les ressources en eau du Rhône constituent une question majeure. Des projets au niveau des Alpes

entières ont été menés (ClimChAlp, AdaptAlp), ainsi que le projet Scampeï sur la France, et des projections sur l'enneigement (quantité, durée, dates de début et de fin...) sont disponibles.

Sous des scénarios de changement climatique, il faudrait s'attendre à une diminution générale des hauteurs de neige, de l'accumulation maximale et de la durée d'enneigement. Ces impacts seraient forts à basse et moyenne altitude, et moins importants en haute montagne (Leblois, 2003 ; Scampeï, 2011).

Le projet Scampeï fournit des projections sur l'équivalent en eau de la hauteur de neige par massif des Alpes françaises. Même si cette donnée ne peut pas être directement traduite en évolution de débits des cours d'eau à influence nivale, elle donne une idée de l'ampleur de l'impact.

- A 1200 mètres

En hiver, à l'horizon 2030 tous les scénarios envisagent une baisse de l'équivalent en eau. Des différences significatives sont à noter entre les modèles. Les baisses peuvent cependant **aller jusqu'à - 75 % dans les Alpes du Sud**, dans le scénario A2. La baisse est minimale (- 25 %) au nord-est dans le scénario A1B. Les diminutions les plus importantes se trouvent au sud-ouest des Alpes. A l'horizon 2080 on retrouve de fortes baisses partout et pour tous les scénarios. Les tendances simulées pour 2030 se poursuivent, avec peu de différences entre les scénarios. Le nord-est est un peu moins touché et c'est là que les modèles divergent le plus (- 40 à - 85 %). Dans les scénarios A1B et A2 **l'équivalent en eau de la hauteur de neige pourrait baisser entre 85 et 95 % dans toute la moitié sud des Alpes Françaises**.

Au printemps, dès 2030 de très fortes baisses (- 50 à - 96 %) sont simulées sur tous les massifs, pour tous les scénarios et tous les modèles. Le gradient nord-sud n'est pas visible. A l'horizon 2080 tous les modèles et scénarios convergent vers une très forte baisse de l'équivalent en eau de la hauteur de neige, qui va jusqu'à une **disparition sur toutes les Alpes françaises dans le scénario A2** (- 92 à - 98 % dans le scénario B1, - 81 à - 98 % pour A1B avec cependant une plus grande divergence entre les modèles).

- A 1800 mètres

A l'horizon 2030 l'indice baisserait en hiver dans tous les scénarios mais avec des amplitudes très variées. On peut noter un gradient nord-sud de la réponse, le nord-est reste la région la moins touchée mais avec des grandes différences entre scénarios (- 4 à - 35 %). Dans le scénario B1 l'impact est limité dans le nord (- 4 à - 15 %). L'indice peut perdre jusqu'à 70 % dans le sud. A l'horizon 2080 on retrouve le même gradient nord-sud de la réponse, avec une diminution qui peut aller jusqu'à - 90 % dans le sud sous le scénario A2 (- 60 % pour B1, - 80 % pour A1B). LMDZ est beaucoup plus optimiste que les deux autres modèles sur les massifs du nord des Alpes.

Au printemps, dès l'horizon 2030 on constate un gradient nord-sud de la réponse, qui se retrouve pour tous les modèles et tous les scénarios. Au nord les différences entre modèles et scénarios sont relativement faibles. Au sud la baisse va de - 70 à - 90 %. A l'horizon 2080 on constate des différences d'amplitude de changement au nord entre modèles et entre scénarios.

Sous le scénario A2 à 1800 mètres d'altitude la neige disparaît presque entièrement au printemps sur toutes les Alpes, et tous les modèles et tous les scénarios montrent une quasi-disparition de la neige au sud.

- A 2400 mètres

A l'horizon 2030 l'impact est moindre par rapport aux moyennes altitudes, mais il est tout de même significatif dans le sud des Alpes. En hiver on peut noter de grandes différences d'amplitude d'évolution entre les modèles et entre les scénarios. Le scénario B1 se démarque, avec une situation quasi-stable au nord et des baisses beaucoup moins marquées au sud (- 10 à - 20 %). Pour les années 2080 le signal n'est pas clair sur les Alpes du Nord, il ne prolonge même pas forcément les tendances de 2030. Dans le sud des Alpes on note moins de divergences entre les modèles pour le scénario A1B, avec de fortes baisses qui vont de - 40 à - 70 %.

Au printemps à l'horizon 2030 on note un gradient nord-sud avec des amplitudes d'évolution variables selon le modèle utilisé. L'indice baisserait de 15 à 30 % au nord, 30 à 50 % au centre, et de 40 à 65 % au sud. **A l'horizon 2080 on constate de fortes baisses de l'équivalent en eau, même à des hautes altitudes.** Au nord les modèles divergent fortement sur l'amplitude du changement mais l'indice baisserait au minimum de 25 %. Au sud des Alpes la baisse est marquée, avec, au mieux, - 50 à - 60 % dans le scénario B1, et jusqu'à - 90 % dans le scénario A2.

Impacts sur les cours d'eau non méditerranéens

Les résultats présentés ci-après sont issus de la thèse de Boé (2007). Pour tous les graphiques, il s'agit de projections issues de la modélisation hydrologique SIM pour 14 modèles climatiques du GIEC avec une descente d'échelle statistique, selon le scénario A1B à l'horizon 2050. Les graphiques représentent les évolutions simulées de débits mensuels moyens par rapport à la période 1970-1999. Le trait noir est la moyenne d'ensemble, la zone gris clair est délimitée par la moyenne d'ensemble plus ou moins un écart-type inter-modèles, la zone gris foncé est délimitée par les valeurs maximums et minimums parmi les 14 modèles.

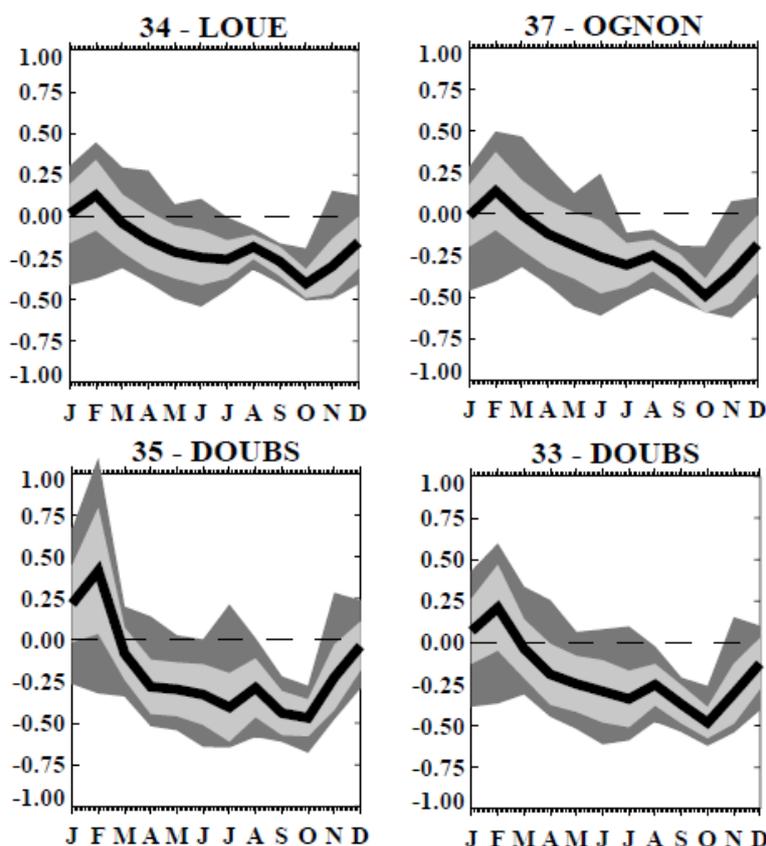


Figure 23. Evolution des débits mensuels de la Loue, de l'Ognon, du Doubs amont (35) et aval (33) à l'horizon 2050. Source: Boé, 2007.

La Loue et l'Ognon (Figure 23) présentent des évolutions similaires, caractérisées par une baisse des débits d'été et de début d'automne (- 25 à - 50 % en moyenne), et une évolution moins claire des débits hivernaux, pour lesquels la réponse des différents modèles varie en signe.

Sur le Doubs (Figure 23), on note une baisse claire des débits à la fin de l'été et au début de l'automne. En moyenne les débits baisseraient également au printemps et au début de l'été, mais certains modèles sont invariants. En hiver les incertitudes sont plus fortes, en moyenne les débits augmenteraient fortement en amont (+ 25 à 50 % en moyenne, jusqu'à + 100 % pour un modèle) ; en aval la réponse serait plus modérée.

La Saône (Figure 24) présente une réponse similaire en amont et en aval. En valeur moyenne inter-modèles les débits augmenteraient très légèrement à la fin de l'hiver et baisseraient de 25 à 40 % environ sur le reste de l'année. Cependant les différents modèles ne convergent sur le signe d'évolution qu'entre juillet et septembre, où les débits pourraient baisser de 10 à 50 % selon le modèle et le mois.

Entre avril et novembre les modèles s'accordent sur une baisse des débits de l'Ain, en moyenne de

25 % en avril à quasiment 50 % en octobre, avec une amplitude variable (0 à - 50 %) selon les modèles. En hiver des divergences de signes de variation apparaissent entre les modèles, avec en moyenne une légère hausse des débits.

Sur l'Isère, on retrouve l'évolution de débits caractéristique des cours d'eau à influence nivale, avec une très forte baisse entre mai et octobre, qui témoigne de l'aggravation en intensité et en durée des étiages. L'écart entre les modèles est faible et les évolutions en amont et en aval sont quasiment identiques. Ainsi au mois de juillet les débits pourraient baisser entre 50 et 75 %. Entre janvier et mars les débits semblent augmenter (+ 25 % en moyenne) mais l'incertitude est plus élevée ; une faible minorité de modèles simule une légère baisse ou une stabilité des débits.

Les projections sur les cours d'eau présentés dans cette section sont donc comparables, même si elles divergent par leur amplitude et/ou par leur niveau d'incertitude : **une baisse des débits est à prévoir sur une période plus ou moins longue entre la fin du printemps et le début de l'automne, avec un bon accord entre les modèles sur le signe de variation. Les débits hivernaux pourraient connaître une légère hausse, voire rester stables.**

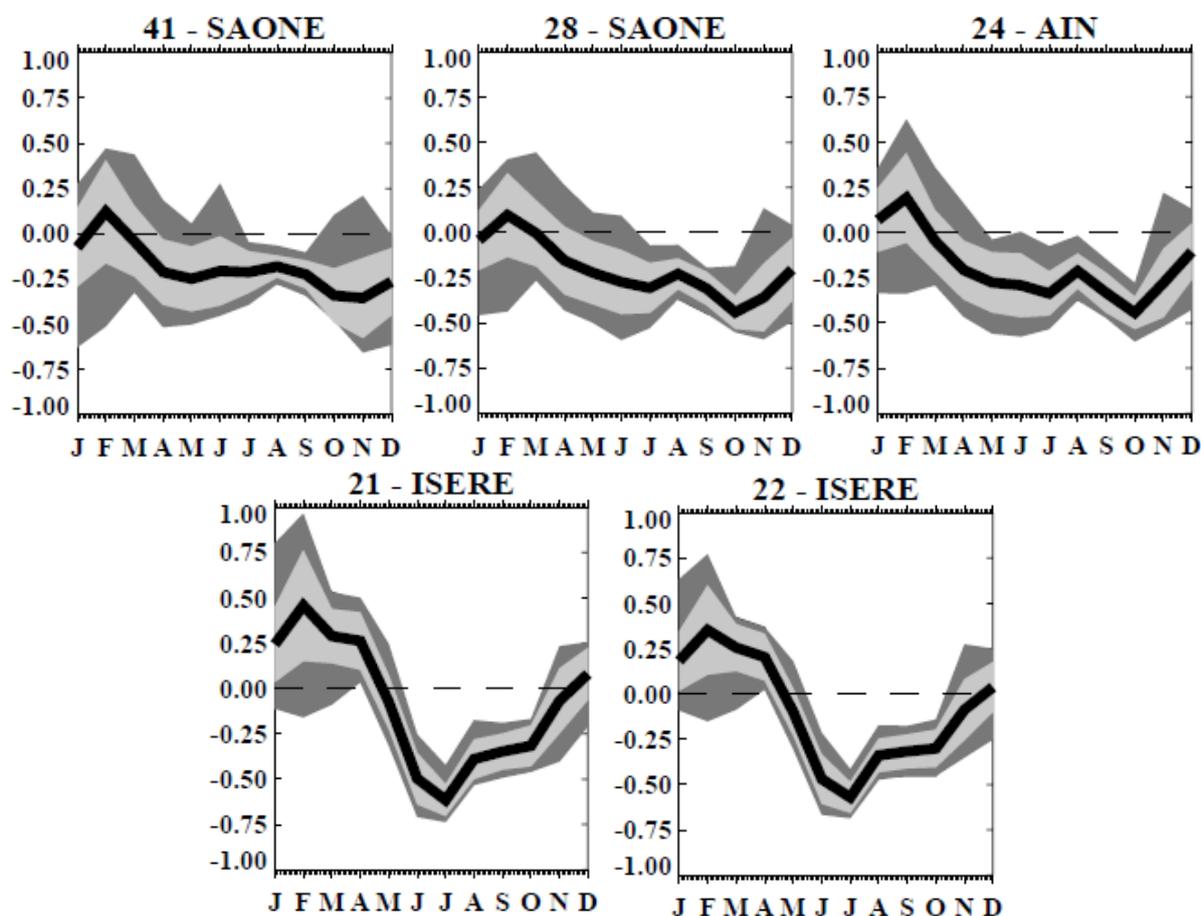


Figure 24. Evolution mensuelle des débits de la Saône amont (41) et aval (28), de l'Ain et de l'Isère amont (21) et aval (22) à l'horizon 2050. Source: Boé, 2007.

Les bassins versants méditerranéens

La majeure partie des bassins méditerranéens se situe aujourd'hui en situation de déficit quantitatif (Comité de bassin Rhône-Méditerranée et Corse, 2009). Les bassins méditerranéens présentent donc déjà aujourd'hui des vulnérabilités importantes aux risques climatiques. Le régime des cours d'eau est caractérisé par des étiages sévères en été et des crues importantes et souvent rapides et dévastatrices en automne et au printemps. La demande en eau sur ces territoires présente une forte saisonnalité due à la fréquentation touristique et à des besoins en eau d'irrigation qui atteignent leur maximum en été. Ce pic dans les prélèvements intervient au moment même où les débits sont au plus bas.

Les projections de Boé (2007) donnent un premier aperçu de la situation des bassins versants méditerranéens vis-à-vis du changement climatique. Ces projections sont issues de la modélisation hydrologique SIM pour 14 modèles climatiques du GIEC, avec une désagrégation statistique selon le scénario A1B. L'horizon d'étude est la période 2046-2065, par rapport à la période de référence 1970-1999. Sur les graphiques ci-dessous, le trait représente la moyenne d'ensemble des simulations, et la zone gris clair est délimitée par la moyenne

d'ensemble plus ou moins un écart-type inter-modèles. Enfin la zone gris foncé est délimitée par les valeurs maximums et minimums parmi les 14 modèles.

Les incertitudes sur l'évolution des débits de ces cours d'eau méditerranéens sont fortes (voir Figure 25).

Seule l'Aude présente des résultats robustes, avec des baisses de débits en toutes saisons, allant de -10% en moyenne en mars et en septembre, jusqu'à près de -50% en mai et en juin. Pour la Drôme une baisse des débits au printemps et en été apparaît assez nettement. Les débits d'hiver du Var pourraient augmenter très fortement (jusqu'à plus de 150%) mais les incertitudes associées sont élevées ; on assisterait à une baisse marquée des ressources au printemps et en été (avec une baisse plus nette au printemps).

Sur la Durance (Figure 26), à l'amont comme à l'aval, les débits baisseraient entre mai et octobre. Ils pourraient augmenter fortement en hiver à l'amont (en moyenne, +50 à +75%), avec néanmoins une très forte amplitude de réponse entre les différents modèles (de 0 à +150% de variation pour le mois de mars). A l'aval, la réponse est similaire mais paraît atténuée en intensité et en incertitude.

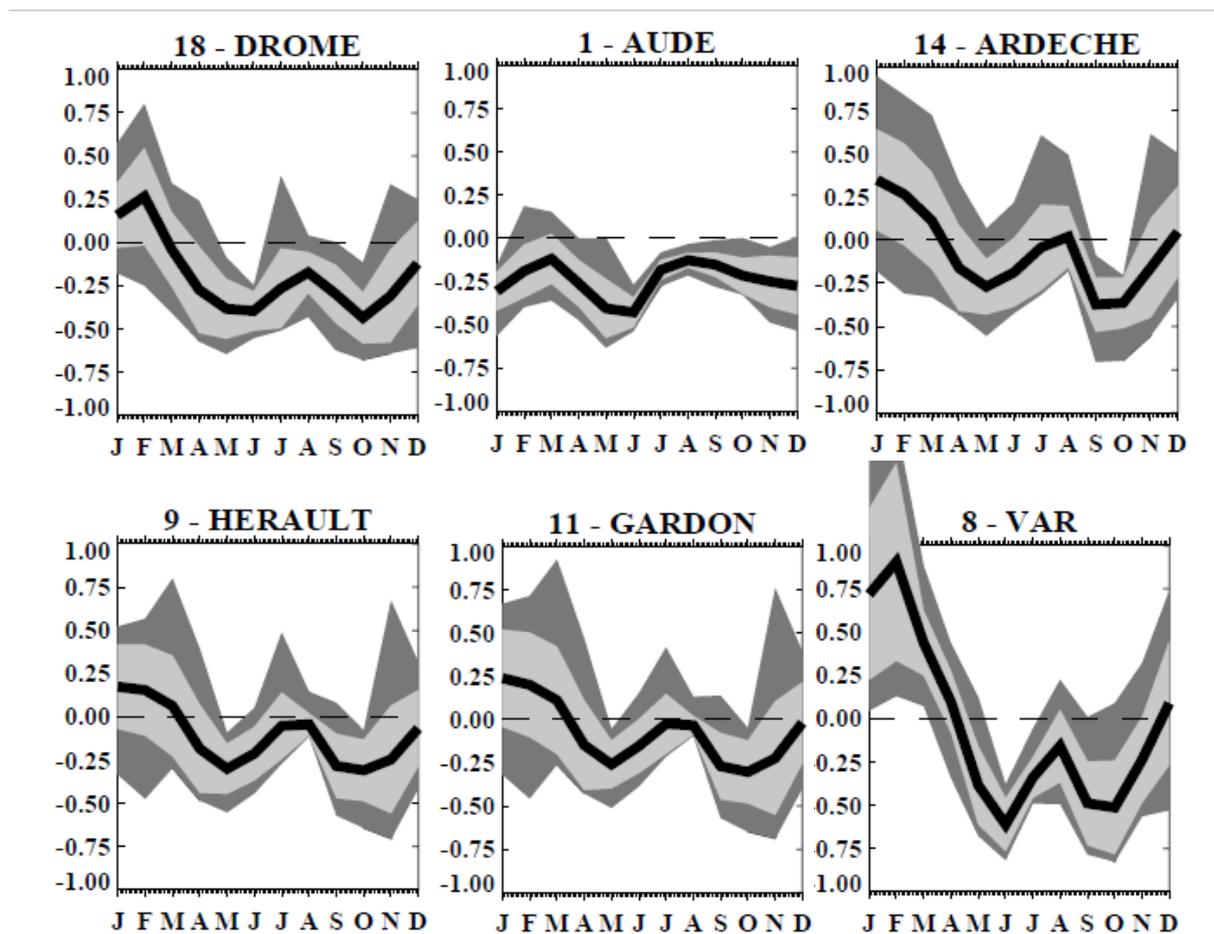


Figure 25. Evolution mensuelle de cours d'eau méditerranéens à l'horizon 2050.
Source: Boé, 2007.

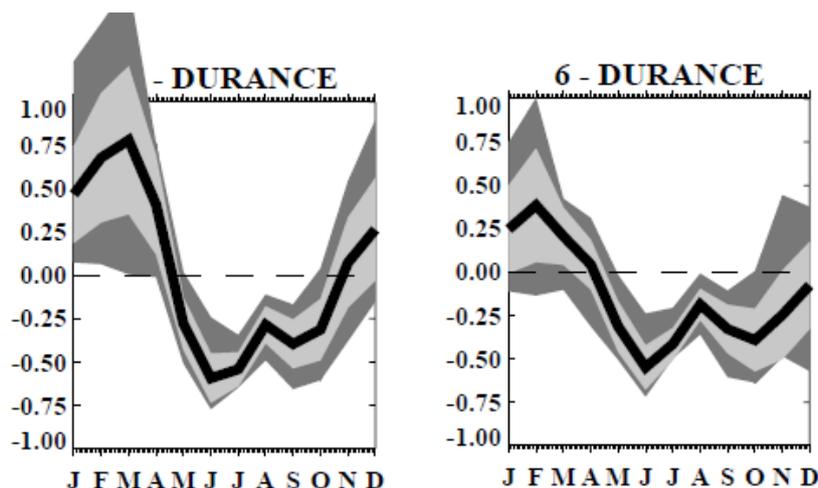


Figure 26. Evolution mensuelle des débits de la Durance amont (à gauche) et aval (à droite) à l'horizon 2050.
Source: Boé, 2007.

Une modélisation des débits aux horizons 2030 et 2050 a été conduite dans le cadre du projet Vulcain sur la Têt, le Tech et l'Agly (Dagneaux et al., 2010 ; Ladouche et Caballero, 2010a).

Les débits pourraient baisser de manière significative sur ces bassins des Pyrénées-Orientales (jusqu'à - 30 % en 2030 et - 45 % en 2050 en moyenne annuelle sur l'Agly), et plus particulièrement en été (de mai à août en 2030 et de mars à octobre en 2050). Sur le Tech le caractère nival des écoulements disparaîtrait, et le débit moyen annuel pourrait baisser de 10 % en 2030 et de 20 % en 2050.

Lespinas (2008) a modélisé les évolutions possibles sous changement climatique des ressources en eau des bassins versants méditerranéens du Languedoc-Roussillon, à l'horizon 2080 (période 2071 - 2100). La Figure 27 montre la forte dispersion des résultats en fonction des scénarios climatiques.

Néanmoins le signal moyen est assez net, puisque la plupart des scénarios simulent une baisse du débit annuel. L'Aude, l'Agly, la Têt et le Tech seraient plus touchés par les baisses de débits que l'Hérault et l'Orb.

Si on examine les résultats à l'échelle saisonnière, on voit que la quasi-totalité des modèles simulent une forte baisse des débits en été (- 58 % en moyenne pour A2), ainsi qu'une baisse importante (- 34 %) des débits au printemps et en automne. En hiver une baisse de moindre amplitude pourrait se produire, voire une légère hausse pour l'Hérault, la Têt et le Tech. Ces résultats proviennent de simulations avec le scénario SRES pessimiste A2. Avec le scénario plus optimiste B2, les évolutions sont cohérentes en signe mais de différentes intensités. Seuls l'Hérault et la Têt pourraient voir leurs débits hivernaux augmenter (Lespinas, 2008).

Cette étude montre que les étiages deviendraient plus longs et plus sévères dans les bassins côtiers méditerranéens du Languedoc-Roussillon.

C'est entre les mois de juin et août que le signal paraît le plus clair : la dispersion entre les résultats des différents modèles climatiques est en effet la moins importante pour ces trois mois sur les six bassins étudiés. La cohérence entre les modèles est donc forte et le signal est clair, bien que variable en intensité sur l'Hérault, l'Orb et l'Aude. Les bassins pyrénéens semblent plus vulnérables du fait de baisses de précipitations plus importantes.

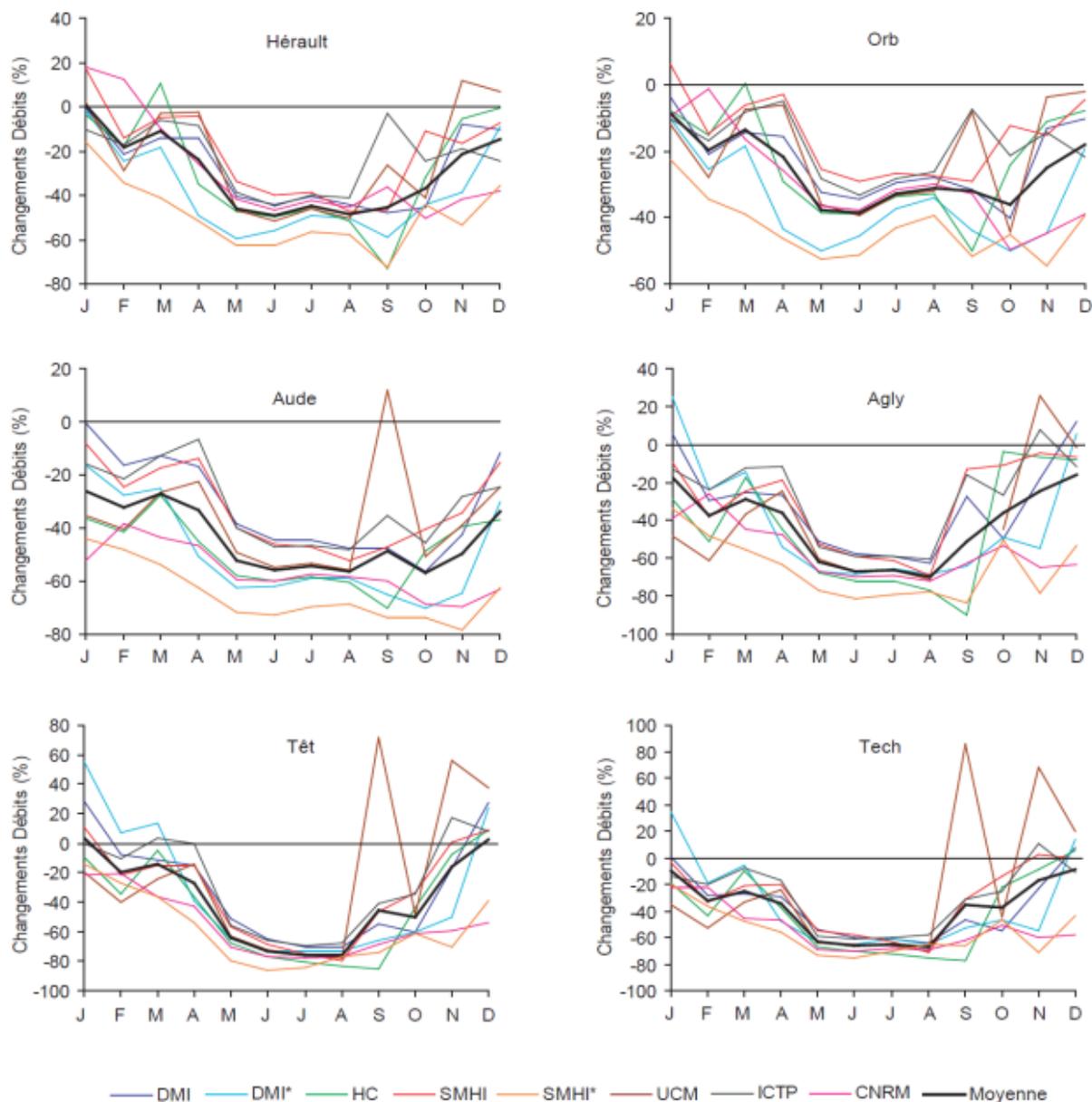


Figure 27. Évolution des débits mensuels (en %) entre 1961-1990 et 2071-2100 sous le scénario SRES A2 avec 8 modèles climatiques et le modèle hydrologique GR2M.
Source : Lespinas, 2008.

3.3. Impacts du changement climatique sur les eaux souterraines

Les principales questions qui se posent face au changement climatique sont l'évolution de la recharge, des lignes d'eau, et la salinisation des aquifères littoraux du fait de l'élévation du niveau marin.

L'infiltration de l'eau dans le sol et donc la recharge des nappes dépendent directement des précipitations et de l'évapotranspiration. D'autres paramètres influent également sur l'infiltration, comme l'intensité des précipitations, la couverture végétale, le type de sol, et les prélèvements anthropiques dans les nappes (Vernoux et Seguin, 2011).

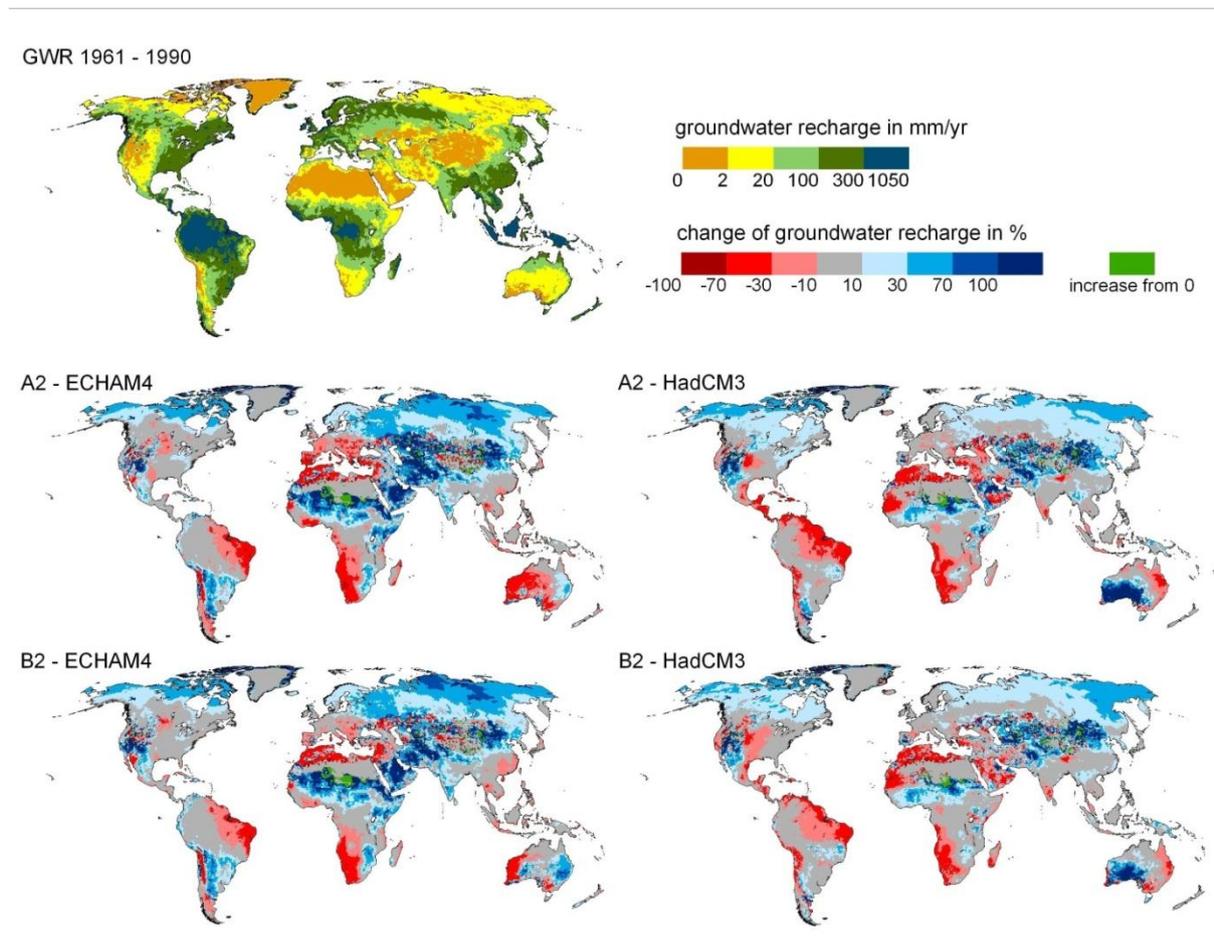
Les eaux souterraines paraissent donc sensibles au changement climatique. Elles sont particulièrement vulnérables aux sécheresses, aussi bien directement qu'indirectement (Treidel et al., 2011).

En effet la moindre disponibilité des eaux de surface induirait une multiplication des forages et une augmentation des volumes prélevés dans les aquifères.

Le GIEC a signalé un déficit d'études sur les incidences du changement climatique sur les eaux souterraines ; quelques modélisations ont néanmoins été menées à l'échelle globale.

Le modèle hydrologique WaterGAP a été appliqué à l'échelle mondiale, sous 4 scénarios de changement climatique (Döll, 2009). Les résultats (illustrés sur les cartes de la Figure 28) montrent des variations géographiques importantes, et le bassin méditerranéen ressort comme une des régions où la recharge baisserait nettement. Cependant l'impact est beaucoup moins net sur la France, avec des évolutions allant de - 30 à + 10 %.

Selon Hiscock et al. (2011) la recharge des nappes évoluerait vers une hausse au nord de l'Europe et une baisse au sud.



Pour étudier les évolutions de recharge sous changement climatique, la désagrégation statistique des projections climatiques par la méthode des anomalies ne semble pas suffire. **En effet les changements de variabilité et d'intensité des précipitations pourraient avoir une influence significative sur la recharge.** Taylor et Tindimugaya (2011) ont montré qu'en Ouganda (en climat aride), avec des projections climatiques régionalisées par la méthode des anomalies la recharge pourrait baisser de l'ordre de 50 %, alors qu'elle pourrait augmenter de 50 % avec une méthode de régionalisation prenant en compte une intensification des épisodes pluvieux.

En France, la recharge se fait principalement entre les mois de novembre et mars, période pendant laquelle l'évapotranspiration réelle est faible. Pour certains types de nappes comme les nappes alluviales ou karstiques, le décalage entre les événements de pluie et la hausse des niveaux piézométriques est relativement court, en général de quelques mois (voire moins d'un mois dans certains cas). D'autres nappes sont caractérisées par une plus forte inertie, de plusieurs mois à quelques années. Quelques études ont été menées à l'échelle du pays et de certains aquifères.

D'après les simulations de Boé et al. (2009) sur toute la France avec un modèle hydrologique et 14 modèles climatiques, **la recharge baisserait sur tout le bassin Rhône-Méditerranée**, sauf dans certaines zones au sud de la vallée du Rhône où les différents modèles donnent des évolutions de signe contraire. La baisse serait particulièrement marquée dans les Alpes et en Corse, et dans une moindre mesure au sud-est du bassin (Vernoux et Seguin, 2011).

L'aquifère de la Plaine du Roussillon a fait l'objet de recherches dans le cadre des projets Aquimed et Vulcain (Ladouche et Caballero, 2010b). Les simulations conduites aboutissent à une baisse probable de la recharge de la nappe, mais l'impact du changement climatique resterait négligeable par rapport à celui des prélèvements, particulièrement fort dans cette zone.

Les modélisations du projet Rexhyss (Ducharme et al., 2009) sur les bassins de la Seine et de la Somme font état d'une possible baisse de 30 % en moyenne de la recharge des nappes.

Enfin on peut citer les projections de Goderniaux et al. (2009) sur le bassin de Geer en Belgique à l'horizon 2071-2100. Les projections de changement climatique pour cette région sont une hausse des températures, particulièrement marquée en été, et une baisse des précipitations moyennes (avec une baisse conséquente en été et une augmentation en hiver). Sous ces conditions, avec des prélèvements constants, le niveau des nappes pourrait baisser de 2 à 8 mètres.

Les études menées jusqu'à maintenant sont basées principalement sur la modélisation de la recharge des nappes. Vernoux et Seguin (2011) suggèrent la possibilité d'effectuer des études statistiques, basées sur des observations, qui testeraient des corrélations entre niveaux piézométriques et variables climatiques, et permettraient vraisemblablement d'attribuer les variations de recharge constatées à des variations climatiques, aux prélèvements dans la nappe, ou à d'autres facteurs jouant sur la recharge comme l'usage du sol.

Un réseau de référence piézométrique spécifique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines est en cours de développement en France (Vernoux et Seguin, 2011).

Un autre impact probable du changement climatique sur les eaux souterraines est la salinisation des aquifères côtiers du fait de la remontée du niveau de la mer, associée éventuellement à la baisse du niveau des nappes. Différents types d'aquifères littoraux peuvent être distingués en France :

- superficiels sédimentaires : particulièrement vulnérables en cas de surexploitation ;
- profonds : la salinisation peut provenir de la drainance des aquifères supérieurs de forages mal conçus ou mal entretenus ;
- karstiques avec exutoires en mer : les intrusions salines sont complexes et variables dans le temps et dans l'espace ;
- aquifère de milieu fissuré : intrusions localisées.

Dans le cas des aquifères méditerranéens, **les conditions de prélèvements ont un impact très important sur la salinisation**, particulièrement si la recharge ne permet pas de faire remonter le niveau des nappes en hiver. Yechieli et al. (2011) ont montré que pour les aquifères côtiers israéliens, l'impact de l'élévation du niveau marin sur la salinisation dépend largement de la topographie des côtes. Les impacts anthropiques (prélèvements ou recharge artificielle), très marqués dans cette région, peuvent également masquer tout effet de l'élévation du niveau de la mer.

La vulnérabilité des aquifères côtiers français face à la montée du niveau marin fait l'objet d'une étude en cours par le BRGM.

3.4. Impacts sur la qualité de l'eau

Les impacts du changement climatique sur la qualité de l'eau ne semblent pas avoir fait l'objet de modélisations à ce jour. De ce fait les impacts développés ci-dessous relèvent d'hypothèses basées sur l'expertise des auteurs cités.

Whitehead et al. (2009) ont établi une synthèse des impacts potentiels du changement climatique sur la qualité des eaux de surface en Grande Bretagne, où les projections climatiques suggèrent également une hausse des précipitations hivernales associée à une occurrence accrue d'événements extrêmes, et une baisse des précipitations estivales. On s'attend également à une hausse des températures de l'eau.

Les forts débits occasionnés par les pluies intenses en hiver peuvent mener à une **augmentation de la charge sédimentaire, altérant la morphologie des rivières et impactant les habitats hydrobiologiques**. Les événements pluviaux brutaux accentuent aussi le problème de gestion des eaux pluviales dans les zones imperméabilisées. Ainsi en milieu urbain les problèmes de qualité de l'eau liés au changement climatique seraient largement dus aux événements de précipitations intenses et à la **gestion des eaux pluviales**.

Les débits réduits auraient pour conséquence le rallongement des temps de résidence, une moindre dilution et un accroissement de la demande biologique en oxygène avec la possibilité de blooms algaux.

En ce qui concerne les concentrations en nutriments, le cas des nitrates est cité : une hausse de la température pourrait encourager la minéralisation et ceci, associé à une occurrence plus fréquente d'événements de lessivage, pourrait causer une hausse des concentrations en nitrates dans les cours d'eau.

L'augmentation des températures de l'eau affecte la cinétique des réactions chimiques et l'état écologique des hydrosystèmes. Les réactions biochimiques pourraient être accélérées, et les taux de croissance du phytoplancton et des macrophytes affectés. Les plans d'eau peu profonds seront particulièrement sensibles à la hausse de températures. Si les températures augmentent à un rythme rapide, les impacts pourraient être d'autant plus importants.

Enfin pour les substances toxiques, la question majeure posée par le changement climatique serait la mobilisation éventuellement accrue de ces substances par l'érosion.

Hédout et al. (2007) ont examiné les conséquences possibles du changement climatique (plus de sécheresses, des inondations, moins de précipitations en été, et une hausse des températures) sur la conception, le dimensionnement et l'exploitation des systèmes d'assainissement. Trois scénarios ont été envisagés : une vague de forte chaleur associée à l'absence de précipitations, des précipitations de forte intensité et de courte durée, et une vague de froid intense. Nous n'examinerons ici que les deux premiers scénarios.

Dans le cas d'une vague de chaleur associée à une sécheresse, la baisse des volumes d'eau transités favorise la formation de dépôts. Les concentrations se trouvent accrues, ainsi que le temps de séjour.

Avec la hausse des températures des eaux usées, des réactions de sulfato-réduction peuvent se produire, menant à la production d'hydrogène sulfuré (H₂S) et de S₂. Les conditions d'anaérobiose favorables à la production de méthane (CH₄) et de CO₂ sont également plus susceptibles d'apparaître. Les principales conséquences de ces phénomènes seraient les odeurs et la corrosion des réseaux d'assainissement. Des systèmes de traitement du H₂S et une minimisation des temps de séjour peuvent permettre de faire face à ces phénomènes.

Les vagues de chaleur mènent aussi à des problèmes d'odeurs au niveau des prétraitements, et à une perte d'efficacité des dégraisseurs. Au niveau de l'épuration, la hausse de la vitesse de dégradation peut mener à optimiser la fourniture d'oxygène pour un meilleur fonctionnement. Enfin les compresseurs peuvent se trouver en situation de surchauffe, menant à leur renouvellement prématuré.

Les impacts des événements de précipitation intense concernent principalement les réseaux unitaires, avec des risques de rejets directs et de débordements. Les stations d'épuration pourraient nécessiter un redimensionnement si les fortes précipitations devaient augmenter en fréquence et en intensité.

Les auteurs concluent sur les avantages du réseau séparatif pour faire face aux conséquences possibles des évolutions climatiques. Dans le cas de l'occurrence de canicules, la nuisance principale viendrait des odeurs. Il faudrait aussi optimiser la gestion de l'assainissement face à l'accélération des processus. Enfin, les équipements pourraient subir un vieillissement prématuré. **Globalement, les coûts de l'assainissement seront probablement accrus.**

3.5. Impacts sur les usages de l'eau

Les prélèvements pour l'eau potable dépendent surtout de paramètres démographiques. La consommation unitaire ne dépend que faiblement du climat et est surtout fonction de l'efficacité des réseaux de distribution et des équipements des ménages. Certains paramètres comme la fréquentation touristique ou les usages domestiques extérieurs (arrosage, piscines) peuvent cependant être influencés par le climat.

Pour l'eau industrielle plusieurs types d'impacts semblent être envisageables :

- l'augmentation de la demande énergétique en été du fait de la hausse des températures (climatisation), associée à de plus faibles débits ;
- la baisse des débits et la hausse de la température de l'eau en été pourraient poser problème pour le refroidissement ;
- la baisse de la demande énergétique en hiver (moins de chauffage). Ceci pourrait faciliter le stockage de plus d'eau pour l'été, pour

l'agriculture par exemple (actuellement l'hydroélectricité est indispensable en hiver pour couvrir le pic de consommation).

L'eau agricole est l'usage qui semble être le plus sensible aux évolutions climatiques. De par l'évapotranspiration des plantes cultivées, c'est aussi l'usage qui consomme le plus d'eau, c'est-à-dire dont les retours au milieu sont les plus faibles par rapport aux prélèvements : l'irrigation représente 50 % de l'eau consommée au niveau national (Amigues et al., 2006).

Afin d'évaluer l'incidence du climat sur les prélèvements et la consommation d'eau agricole, trois variables peuvent être étudiées : l'évapotranspiration potentielle (ETP), maximale (ETM), et réelle (ETR).

L'ETP correspond à la quantité d'eau totale évaporée et transpirée par un couvert végétal de référence (gazon) couvrant suffisamment le sol, en croissance active, sur lequel l'eau n'est pas limitante. L'ETP est uniquement dépendante du climat : elle augmente avec la température, la radiation et le vent.

L'ETM dépend du couvert considéré : pour une culture et des conditions pédoclimatiques données, c'est l'évapotranspiration du couvert sous des conditions de culture optimales (disponibilité de l'eau et des nutriments, sans problèmes phytosanitaires).

Enfin, l'ETR est l'évapotranspiration effectivement mesurée.

Si l'alimentation en eau est limitante pour la croissance des cultures, on considérera en première approximation que le rapport ETR / ETM est représentatif du confort hydrique du couvert végétal pendant son cycle de croissance. Par conséquent la différence entre l'ETM et l'ETR représente le besoin potentiel en eau d'irrigation. Ce besoin peut également être évalué par la différence entre l'ETM (et donc la quantité d'eau dont une culture aurait besoin pour atteindre un rendement maximal) et l'apport pluviométrique d'une période donnée. Les composantes des bilans hydriques peuvent être calculées avec une marge d'incertitude de l'ordre de 10 % (Amigues et al., 2006).

La hausse de l'évapotranspiration potentielle que l'on trouve dans les projections climatiques induirait nécessairement une hausse de l'évapotranspiration des plantes cultivées. Des études ont quantifié les évolutions de l'évapotranspiration maximale des cultures irriguées et estiment par cette méthode l'évolution des prélèvements pour l'irrigation (projet Vulcain, thèse de Milano).

Ainsi la hausse des températures et la baisse des précipitations pourraient induire une hausse de la demande en eau d'irrigation de 10 % dans les Pyrénées Orientales à l'horizon 2030 (Maton, 2010). L'impact sur l'évapotranspiration maximale des cultures qui sont actuellement irriguées dans les bassins Rhône-Méditerranée et

Corse pourrait être très important, et tout particulièrement sur le bassin du Rhône (Milano, communication personnelle sur des travaux en cours).

L'irrigation n'est pas le seul paramètre à prendre en compte ici. L'expertise de l'Inra sur les sécheresses (Amigues et al., 2006) montre qu'il est important d'inclure l'agriculture pluviale et l'agriculture irriguée dans un même système d'étude. Le rôle de l'agriculture dans le cycle de l'eau, notamment dans la régulation de la restitution au milieu, reste assez peu étudié mais semble être majeur. La quantité d'eau restituée au milieu par une surface cultivée peut être approchée, sur de longues périodes, par la différence entre la pluie et l'ETR.

Ainsi, toute baisse de précipitations se répartira entre une baisse de la restitution au milieu (impact hydrologique) et une baisse de l'évapotranspiration réelle (impact agricole) ; la baisse de restitution au milieu est toujours supérieure de l'ordre de 50 % à la baisse de précipitations (Itier, 2010).

Sous le climat actuel, les cultures d'hiver restituent plus d'eau au milieu que les cultures de printemps. En effet les cultures d'hivers ne sollicitent pas les réserves en eau du sol en été et permettent ainsi une reprise du drainage plus précoce par les pluies d'automne (Amigues et al., 2006). Cet « avantage » des cultures d'hiver sur les cultures d'été risque de disparaître dans des conditions de changement climatique, les cycles des cultures d'été se raccourcissant et la demande des cultures d'hiver augmentant face à des sols plus secs au printemps (Itier, 2010).

Il faut également prendre en compte l'impact des changements de température sur la durée des cycles de croissance des cultures, ce qui influe sur leurs besoins en eau (Amigues et al., 2006 ; Levraut, 2010). Ainsi certaines cultures dont le cycle serait raccourci pourraient devenir moins consommatrices d'eau, par exemple. Toutefois cette réduction de la durée des cycles de croissance pourrait conduire à un doublement des cultures, annulant alors l'effet de réduction de la demande en eau.

L'impact sur les rendements des cultures pluviales doit également être considéré car s'il est trop fort de nouvelles demandes pourraient apparaître pour l'irrigation. Une forte baisse du confort hydrique est prévue pour la vigne dans les zones de culture les plus au nord, et pour le tournesol au sud (Itier, 2010 ; Brisson et Levraut, 2010).

Au vu de ces impacts envisagés du changement climatique sur les usages de l'eau, il est important de noter que **les projections sur les ressources en eau ne peuvent se faire du seul point de vue hydrologique ou hydrogéologique, vue l'importance de l'occupation du sol et des prélèvements dans la formation des débits et l'évolution des niveaux phréatiques.**

Les impacts du changement climatique sur la ressource et la demande en eau

Incidences clés :

- Le signal net de baisse généralisée des débits moyens se traduira par des déséquilibres croissants entre ressources et demandes en eau. Des bassins versants ou aquifères considérés comme non déficitaires pourraient le devenir.
- La baisse nette d'enneigement aura un impact marqué sur les régimes des cours d'eau, y compris sur le Rhône.
- Les projections sur la sévérité des étiages montrent que l'apparition de conflits d'usages est très probable, ce qui met en avant l'importance d'une gouvernance spécifique dédiée à la gestion des crises.
- L'augmentation de la sévérité et de la longueur des étiages pose de façon plus aigüe la question de la forte saisonnalité de la demande sur certains territoires, puisque la demande estivale pourrait encore s'accroître (pour l'irrigation et le refroidissement par exemple), posant un problème supplémentaire d'adéquation entre besoins et ressources disponibles.
- Au vu des impacts envisagés, les stockages naturels (zones humides, recharge des nappes...) et l'amélioration de leur capacité et des conditions de leur alimentation prennent une importance considérable.
- Face aux étiages renforcés sur les cours d'eau et à la multiplication des sécheresses, le report des prélèvements sur les eaux souterraines pourrait être important. Dans la mesure où les nappes, elles-mêmes, pourraient voir leur recharge diminuer du fait des impacts du changement climatique, il devient essentiel d'être en mesure de quantifier ces prélèvements pour assurer une gestion durable des aquifères.
- Le lien entre la quantité et la qualité de l'eau est renforcé. La question des rejets polluants dans les cours d'eau se posera avec acuité face à des débits d'étiage fortement diminués et à l'augmentation des températures de l'eau. Le problème devrait se poser en termes de capacité de dilution des contaminants et de recrudescence des phénomènes d'eutrophisation.
- En favorisant leur résilience, le bon état des milieux aquatiques devient un pré requis indispensable pour faire face aux impacts projetés du changement climatique.
- Les valeurs de débits élevés ainsi que l'amplitude et la fréquence des crues ne devraient pas baisser ; on note même parfois des signes d'aggravation. Ceci aura une incidence sur le dimensionnement des ouvrages, avec des contrastes plus forts à gérer.
- Concernant l'impact du changement climatique sur les usages, les activités agricoles sont en première ligne en raison d'une demande en eau qui devrait croître fortement mais aussi en termes de viabilité de certaines pratiques culturales.

Connaissance scientifique à investir ou approfondir :

- Développer une modélisation intégrée de l'hydrologie du Rhône, prenant en compte les projections d'enneigement.
- Etudier les impacts du changement climatique sur l'évolution des demandes en eau et mettre en perspective les évolutions des ressources par rapport aux prélèvements futurs.
- Anticiper la modification des flux d'eau (répartition spatio-temporelle) dans les bassins. Développer une meilleure connaissance de ces flux afin de déterminer objectivement les impacts des différents usages sur la ressource en eau. Notamment une compréhension du fonctionnement à l'échelle de bassins versants des agro-hydrosystèmes (consommation nette, évolution de l'ETR et influence sur les débits...) paraît importante.
- Approfondir la connaissance des échanges nappes-rivières pour mieux comprendre l'impact sur les ressources en eau et anticiper la présence de refuges thermiques favorisant la résilience des milieux.
- Etudier les impacts sur la recharge des nappes et la salinisation des aquifères côtiers.
- Anticiper l'évolution des pressions climatiques et anthropiques sur les nappes alluviales.

4. Les impacts du changement climatique sur les écosystèmes aquatiques et humides

Le changement climatique aura des conséquences sur la température, les précipitations, l'évaporation, et la disponibilité des eaux de surface et souterraines, autant de paramètres qui influent sur le fonctionnement des écosystèmes aquatiques. Au-delà de la gestion quantitative, les évolutions climatiques impacteront donc aussi les efforts d'atteinte et de maintien du bon état des eaux et des milieux.

4.1. Impacts sur les écosystèmes d'eau douce

Les évolutions de la température de l'eau, de l'hydrologie et de la morphologie auront des impacts sur les écosystèmes aquatiques.

Le principal impact étudié à ce jour est celui de l'évolution de la température de l'eau sur les populations de poissons. Les autres paramètres pourront avoir des impacts considérables, notamment la baisse des débits qui pourrait avoir des conséquences sur la capacité des espèces à migrer pour retrouver des conditions plus favorables. De plus de nouveaux conflits pourraient apparaître entre les prélèvements anthropiques et le respect des débits minimums biologiques.

Les poissons sont des animaux ectothermes, la température influence donc fortement leur métabolisme (Buisson, 2009) mais aussi des fonctions clés comme la reproduction, l'alimentation ou la migration.

L'impact de l'élévation de la température de l'air sur celle de l'eau n'est pas aisément modélisé, mais une certaine corrélation positive existe et a pu être observée sur les dernières décennies entre l'évolution de la température de l'air et celle de l'eau.

Poirel et al. (2008) ont étudié l'évolution de la température du Rhône entre 1977 et 2006. Cette étude a montré que **la température a augmenté sur tout le fleuve, l'évolution étant plus marquée sur le Rhône aval (+ 2 °C depuis 1977)**. La même observation peut être faite pour tous les affluents. Les rivières les plus proches de l'équilibre avec les conditions atmosphériques, soient l'Ain et la Saône, démontrent les évolutions les plus marquées. Les cours d'eau comprenant une composante glacio-nivale sont moins affectés, comme l'Isère, l'Arve et le Rhône amont. La température augmente surtout au printemps et en été.

En ce qui concerne les évolutions possibles de la température du Rhône sous des scénarios de changement climatique, les projections sont difficiles à effectuer. En effet le Rhône n'est pas en équilibre thermique avec l'air, sa température étant influencée par divers facteurs comme :

- le lac Léman qui fait remonter la température de 5 °C en moyenne mais qui peut aussi créer une onde thermique froide (effet « goutte froide ») lorsque la couche froide, inférieure, du lac est mobilisée par le vent l'été ;
- deux affluents froids majeurs : l'Arve et l'Isère. En été, ces affluents sont une source d'apports importants d'eaux froides provenant de la fonte nivale et glaciaire ;
- la Saône qui accentue légèrement l'amplitude du cycle annuel (plus froide en hiver, plus chaude en été). En effet la Saône est proche de l'équilibre avec les conditions hydroclimatiques.

Comme le montre la Figure 29, la température de l'eau a des impacts sur des leviers physiques (oxygène dissous, viscosité, diffusivité, etc., qui sont des facteurs d'influence de la disponibilité en oxygène), et des leviers biologiques (métabolisme général). Le métabolisme général et la disponibilité en oxygène déterminent la localisation des habitats des différentes espèces, leurs déplacements et leurs migrations (Dumont et al., 2007).

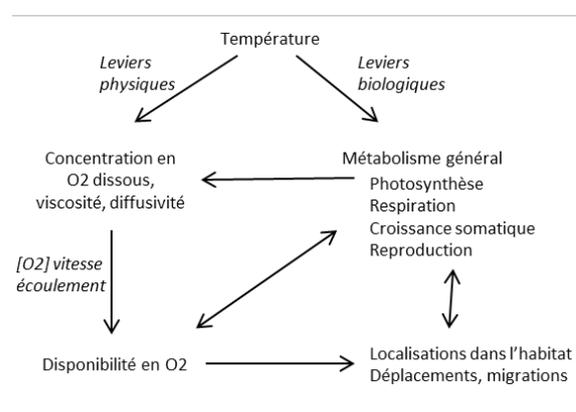


Figure 29. Schéma d'actions de la température en cours d'eau. Source : Dumont, 2007.

Les poissons sont très sensibles aux températures, ils peuvent détecter des écarts de l'ordre de 0,001 °C (Brown, 2003, cité dans Tissot et Souchon, 2010). Pour chaque stade de développement (larvaire, juvénile, adulte) et selon les fonctions considérées (nourriture, reproduction, survie), chaque espèce possède une gamme de températures définissant sa tolérance thermique, au sein de laquelle chaque fonction peut s'accomplir. Les poissons ont tendance à sélectionner des habitats thermiques qui maximisent leur taux de croissance. La température létale peut être augmentée dans une certaine limite suite à une acclimatation progressive, mais les temps d'acclimatation sont relativement longs (de l'ordre de 20 jours). (Tissot et Souchon, 2010)

Les réponses et adaptations aux variations de température sont complexes et variées et il existe une aptitude à l'acclimatation sur le long terme (modifications graduelles et réversibles) (Dumont, 2007). Par contre, on a pu noter que les préférences thermiques des espèces sont souvent proches de la température létale supérieure (Buisson, 2009).

Les évolutions de température peuvent avoir des effets sur les relations de prédation dans le réseau trophique, elles peuvent également mener à des modifications des cycles biologiques. En effet **chaque composante d'un cycle biologique est associée à un domaine thermique optimal** ; ainsi l'augmentation de la température au printemps et en été associée aux basses eaux sur le Rhône semblent favoriser la reproduction du gardon (Dumont et al., 2007).

Les modifications les plus observées face à des variations climatiques sont des changements de distribution. D'autres impacts possibles sont une altération du comportement migratoire, des mortalités accrues des juvéniles et des larves, des déclinés de populations et d'abondances, et l'isolement spatial de certaines populations (Buisson, 2009).

Les effets de la hausse de température dépendent des durées des cycles biologiques, des modalités d'utilisation du milieu aquatique, et des degrés de liberté dans l'espace aquatique impacté.

Une hausse de courte durée des maxima peut mener à des extinctions rapides et ciblées, tandis qu'une hausse durable des maxima peut être la cause de modifications dans la composition des peuplements, encourageant les taxons eurythermes (adaptés aux grandes variations de température) et compétiteurs. Une hausse des températures minimales ferait augmenter les risques de disparition des populations d'eau froide (Dumont, 2007).

Buisson (2009) a distingué trois types de réponses écologiques observées face aux changements récents dans les cours d'eau français :

- des changements phénologiques et physiologiques : les phénomènes printaniers sont plus précoces qu'avant ;
- des changements de distribution des espèces (« climate tracking ») : on constate des glissements de distribution vers des latitudes et altitudes plus élevées, ce qui peut dans certains cas réduire les aires de distribution voire mener à des extinctions d'espèces ;
- des changements dans la composition et la structure des communautés : une perturbation des associations spatiales et temporelles entre espèces et une éventuelle perte de synchronie trophique peuvent être observées.

Cependant peu de chroniques de long terme associant des températures et des données biologiques sont disponibles, ce qui limite les connaissances sur la réponse des populations aux évolutions hydroclimatiques.

Dumont et al. (2007) proposent quelques exemples de réponses biologiques observées :

- dans le secteur de Bugey, entre 1979 et 1999 on a pu observer une extinction progressive de taxons invertébrés d'eau froide, et une expansion de taxons lénotophiles (eau stagnante). Les espèces de poissons plus méridionales (chevesnes et barbeaux) se sont développées tandis que les espèces plus septentrionales comme les vandoises et les ablettes ont vu leur occurrence baisser ;
- dans les cours d'eau alpins suisses une corrélation a été trouvée entre l'augmentation des températures et la baisse des captures de truites ;
- la canicule de 2003 a eu un très fort impact (immédiat et sur le moyen terme) sur les mollusques. Si ce type d'événement venait à se répéter fréquemment, plus de 50 % des espèces de mollusques de la Saône inférieure pourraient disparaître.

Les approches permettant d'évaluer les effets du changement climatique sont la paléocéologie, les observations récentes, les expérimentations, et la modélisation (modèles mécanistiques/empiriques) (Buisson, 2009).

Rochard (2007) a étudié l'évolution possible des aires de répartition de différents poissons migrateurs en Europe sous changement climatique. Par exemple sous le scénario A2 et à l'horizon 2080, le nombre de bassins versants favorables au saumon atlantique diminuerait (Rochard et Lasalle, 2010). En particulier le bassin versant de la Garonne ne lui serait plus favorable. Ainsi les aires de distribution potentielles de la plupart des poissons migrateurs européens seraient diminuées, sauf pour le mulot porc et l'aloise feinte, pour lesquels elle pourrait s'agrandir. Le Rhône resterait favorable au mulot porc, mais deviendrait défavorable au flet (Rochard, 2007).

Ces résultats ne sont issus que d'un seul modèle climatique, on ne peut donc pas se prononcer sur leur robustesse. Néanmoins ils permettent de mesurer l'amplitude possible des changements de distribution des espèces sous changement climatique et montrent que **les références pour la restauration de la biodiversité devront certainement être modifiées, certains états antérieurs ne pouvant, de toute façon, plus être atteints.**

Dans le cadre de l'étude Aquabio (Pont, 2003) des modèles probabilistes ont été utilisés pour simuler les probabilités d'occurrence de 22 espèces riveraines françaises en fonction de la température saisonnière de l'air, sous 5 scénarios de variabilité climatique (+ 1,53 à 3,66 °C) et sans considérer l'impact du renforcement des étiages.

Quatre espèces d'eau froide voient leur occurrence fortement diminuer (truite, chabot, loche franche, lamproie de Planer). Au contraire les scénarios mènent à une plus forte occurrence de nombreuses espèces de cyprinidés plus thermophiles : chevesne, ablette, perche, hotu, barbeau commun.

On assisterait donc à une raréfaction des espèces actuellement caractéristiques des zones amont, à la faveur de cyprinidés rhéophiles, avec une augmentation possible de la compétition dans les zones intermédiaires.

Buisson (2009) a étudié l'évolution de la « favorabilité » de tronçons de cours d'eau français sous changement climatique à l'horizon 2050 - 2080, pour 35 espèces de poissons d'eau douce. Les changements de diversité, de composition et de similarité entre les assemblages ont été étudiés. Les scénarios climatiques sont issus des simulations de 3 modèles globaux (HadCM3, CGCM2, CSIRO2), sous 4 scénarios SRES (A1FI, A2, B1, B2). Le choix du modèle climatique et du scénario d'émissions influencent faiblement les projections par rapport au choix des modèles statistiques. Un seul scénario climatique a donc été présenté (HadCM3 x A1FI).

Les résultats sont détaillés ci-dessous :

- Impacts sur la distribution des espèces :

Seules cinq espèces pourraient voir leur aire de distribution diminuer : le chabot, la lamproie de Planer, la perche, le vairon et la truite fario. Le blageon se maintiendrait dans le Rhône et s'étendrait ailleurs. Quatre groupes de réponses de la probabilité d'occurrence ont été distingués à l'échelle de la France :

- augmentation moyenne de la probabilité d'occurrence : 8 espèces (blageon, chevesne, anguille, barbeau, toxostome, spirin, perche-soleil, saumon atlantique) ;
- augmentation moyenne de 10 % : 15 espèces. La plupart des stations deviennent plus favorables pour ces espèces, certaines stations deviennent moins favorables ;

- réponse faible ou très contrastée selon les stations : brochet, épinoche, brème, lote, grémille, épinocchette ;
- le chabot et la truite fario voient leur probabilité d'occurrence baisser de 33 % en moyenne. La probabilité d'occurrence du chabot connaît une hausse restreinte sur quelques stations, l'occurrence de la truite baisse dans tous les cas.

La truite fario et le chabot apparaissent donc particulièrement vulnérables au changement climatique.

- Impacts sur la diversité, la composition et la similarité des assemblages de poissons :

La richesse spécifique augmenterait. Les résultats sont hétérogènes selon les stations : la richesse baisserait en Bretagne, elle augmenterait dans le sud du Massif Central et les Pyrénées. On constate une légère hausse de la diversité de traits biologiques, avec notamment des augmentations conséquentes dans le sud des Alpes, le Massif Central et les Pyrénées-Orientales.

En ce qui concerne la composition des assemblages, de profonds réarrangements pourraient avoir lieu, et ce de manière plus prononcée du point de vue taxonomique que des traits biologiques, particulièrement dans les zones de montagne et les zones amont. **On pourrait assister à une réorganisation complète des communautés de poissons et à une homogénéisation probable des assemblages.**

Ces études sont axées sur l'évolution des distributions potentielles de poissons. Elles ne tiennent pas compte d'autres facteurs qui pourraient influencer sur la présence ou l'absence de certaines espèces, comme les risques de raréfaction de la nourriture et de sensibilité accrue à la toxicité aux plus hautes températures tolérées. En effet la consommation supplémentaire d'énergie chez les poissons en stress thermique est souvent soustraite à la croissance ou à la reproduction. La durée d'exposition à de fortes températures ainsi que la température de rémission nocturne vont aussi jouer sur la capacité de l'organisme à tolérer le stress. Enfin, l'adaptation des espèces sera facilitée si elles disposent de refuges thermiques au sein de leur milieu (Tissot et Souchon, 2010).



V. Rossi

Les lacs d'altitude constituent des écosystèmes particuliers, sur lesquels certains impacts de l'élévation de la température de l'air se font déjà ressentir.

Ainsi la température moyenne annuelle du Lac Léman à 5 mètres de profondeur a augmenté de plus de 1 °C depuis le début des années 1970 (Perroud et Goyette, 2010). Cette hausse de la température de l'eau du lac serait notamment une des causes du fort développement de la population de corégones depuis les années 1990 : celle-ci favorise le développement larvaire et induit une meilleure synchronisation avec le développement du zooplancton (Anneville et al., 2009).

Les évolutions climatiques à venir pourront avoir un impact sur la température des lacs, leur stratification, la fréquence des brassages et sur les espèces.

Perroud et Goyette (2010) ont mené une modélisation à l'horizon 2100 de l'évolution de la température des eaux du Lac Léman sous le scénario d'émissions pessimiste A2. La température augmenterait de 2,3 à 3,8 °C en surface et de 2,2 à 2,3 °C en profondeur, accentuant ainsi la stratification thermique.

L'impact sur la stratification et le brassage des lacs peut être modélisé sous des scénarios de changement climatique. Aucun impact type n'a pu être défini, les évolutions étant très spécifiques aux conditions de chaque lac (morphologie et transparence notamment).

Ainsi, à l'horizon 2080 et sous le scénario d'émissions B2, la température des eaux profondes du Lac d'Annecy pourrait augmenter de plus de 2 °C, mais le lac continuerait de connaître un brassage par an. En revanche dans le cas du Lac d'Ammer en Allemagne, la température des eaux profondes ne serait pas affectée, mais le lac perdrait son caractère dimictique (lacs où les eaux se mélangent deux fois par an). Dans le scénario A2 à l'horizon 2100 le régime de brassage du Lac Léman persisterait, mais la durée de l'homogénéisation se réduirait (Perroud et Goyette, 2010).

Les écosystèmes seront affectés par les évolutions de température et par les éventuels changements de régime de brassage, qui modifieraient les conditions d'oxygénation du milieu. Ainsi l'ombre chevalier, en limite sud de son aire de répartition dans les Alpes, sera probablement fortement défavorisé par un réchauffement de l'eau, son ovogenèse ne pouvant se produire à plus de 7 °C (Danis et al., 2004).

4.2. Impacts sur les écosystèmes marins

Au niveau planétaire, les eaux océaniques absorbent la plus grande part de l'apport d'énergie dû au réchauffement climatique. Ainsi les océans auraient stocké plus de 90 % de l'augmentation de la quantité de chaleur reçue depuis 1950 (Gros, 2011). Le changement climatique devrait donc avoir un impact significatif sur les écosystèmes marins.

Au cours des 30 dernières années la température moyenne des eaux superficielles marines de France métropolitaine a augmenté de plus de 1 °C (Gros, 2011). En Méditerranée, l'isotherme des 15 °C s'est déplacée vers le nord. C'est également le cas de l'isotherme clé des 14 °C au mois de février (mois le plus froid en Méditerranée), qui semble constituer une barrière nord à la dispersion des espèces. **On assiste donc à un processus de « méridionalisation » du secteur nord de la Méditerranée** (Coll et al., 2010).

Dans un scénario pessimiste la température de l'eau de surface en Méditerranée augmenterait de 3,1 °C en moyenne à l'horizon 2080. Actuellement le Golfe du Lion est la zone la plus froide de la Méditerranée ; ceci resterait le cas sous changement climatique, puisque d'après les projections, la température de l'eau de surface de cette zone s'élèverait moins que la moyenne et atteindrait 18 °C à l'horizon 2080. Le Golfe du Lion et la mer Adriatique seraient alors les deux seules enclaves fraîches restantes au sein de la mer Méditerranée (Coll et al., 2010).

L'augmentation de la température de l'air renforce la stratification des eaux de surface en réchauffant la couche superficielle, limitant ainsi les mélanges avec les couches plus profondes. Ce phénomène confinerait le phytoplancton à la surface et augmenterait ainsi la quantité de lumière reçue par celui-ci, ce qui pourrait stimuler la photosynthèse. Cependant il conduirait également à une baisse des apports de nutriments à la couche de surface et pourrait limiter la production primaire. Les observations et modélisations disponibles suggèrent plutôt une diminution globale de la production primaire phytoplanctonique (Gros, 2011).

Les tendances observées dans les dernières décennies sont marquées par un déplacement des limites des aires de distribution géographiques, vers le nord et/ou en profondeur. Ces tendances résultent néanmoins de causes variées, et ne peuvent être attribuées uniquement au changement climatique (Gros, 2011). La pêche est notamment un facteur de pression déterminant sur la biodiversité marine ; en Méditerranée, les premiers éléments témoins de la surpêche de certaines espèces datent du début de l'empire romain (Coll et al., 2010).

L'introduction d'espèces allochtones en Méditerranée, qui se fait actuellement au rythme d'une espèce toutes les 4 à 5 semaines en moyenne, est un phénomène d'une importance croissante. En particulier l'immigration d'espèces par le canal de Suez augmente avec le réchauffement.

Depuis les années 1980 la répartition des espèces endémiques est restée stable, alors que les allochtones sont remontés de 300 km vers le nord, augmentant ainsi considérablement l'aire de recouvrement spatial entre ces deux catégories d'espèces (Gros, 2011).

En ce qui concerne la réponse des espèces au réchauffement d'un point de vue physiologique et phénologique, elle devrait être variée, allant du remplacement de certaines espèces par d'autres plus tolérantes, jusqu'à l'acclimatation progressive ou à l'adaptation locale. Les modifications des différents stades phénologiques pourront différer selon les espèces. On s'attend notamment à des avancées moindres chez les consommateurs secondaires que chez les producteurs et consommateurs primaires, **ce qui entraînerait un risque de désynchronisation des interactions biologiques** (Gros, 2011).

D'après Coll et al. (2010), un réchauffement de 3,1 °C en moyenne des eaux méditerranéennes de surface aurait pour conséquences, sur 75 espèces de poissons endémiques étudiées:

- la réduction des habitats de 50 espèces ;
- la fragmentation des habitats de 23 espèces ;
- la disparition probable de 14 espèces ;
- l'extension de l'habitat potentiel de 25 espèces.

La carte de la Figure 30 montre la répartition à l'horizon 2080 des espèces potentiellement menacées en Méditerranée. **On peut noter que ce sont les espaces côtiers, peu profonds, qui paraissent les plus à risque.**

En effet c'est près des côtes que se concentrerait la plus grande biodiversité marine méditerranéenne. Sans être un des points chauds les plus marquants du bassin, les côtes françaises rassembleraient un nombre relativement important d'espèces menacées. Notamment les espèces boréo-atlantiques (entrées en Méditerranée pendant les périodes glaciaires passées et qui se sont établies dans les zones les plus froides du bassin) paraissent menacées d'un fort déclin puisqu'elles ne pourront, évidemment, pas migrer plus au nord.

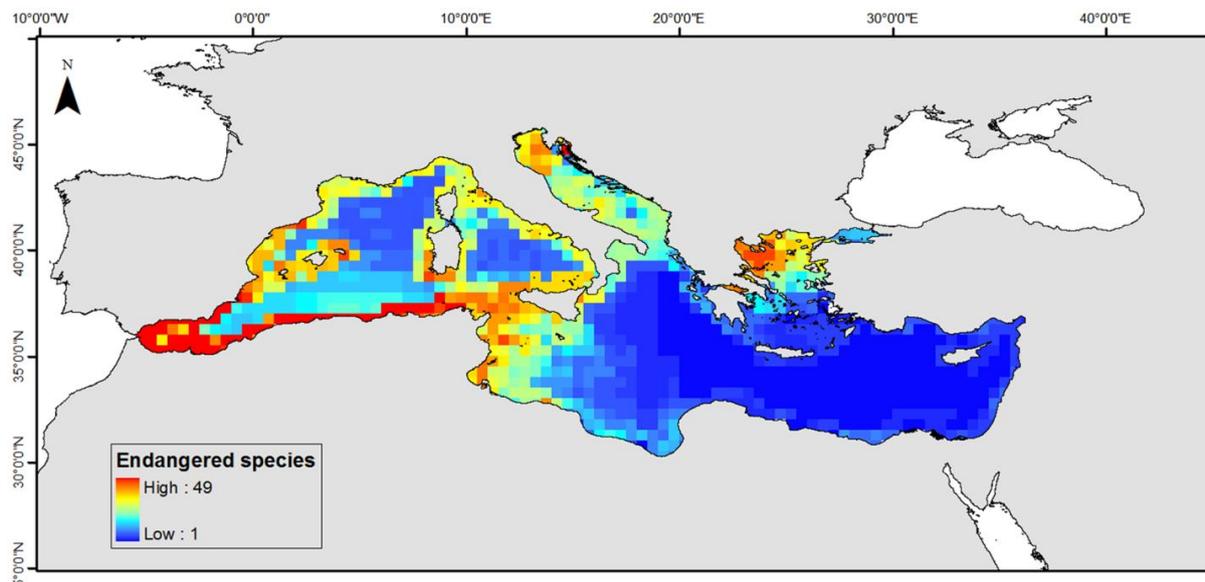


Figure 30. Nombre d'espèces marines menacées à l'horizon 2080 selon le scénario A2.
Source : Coll et al., 2010.

A l'impact du réchauffement des eaux de surface s'ajouterait celui de l'acidification des eaux du fait de la plus forte concentration en CO₂. Les eaux marines superficielles ont actuellement un pH de 8,1 en moyenne ; dans un scénario tendanciel d'émissions de gaz à effet de serre, le pH pourrait baisser jusqu'à 7,7 à l'horizon 2100, ce qui constituerait une baisse trois fois plus importante que les perturbations enregistrées dans les océans depuis 2 millions d'années. L'acidification des eaux marines induirait une réduction de la disponibilité en ions carbonates pour les organismes constructeurs de structures calcifiées (Gros, 2011).

La compréhension de la réponse des écosystèmes marins à cette acidification reste pour l'instant assez limitée, mais les recherches sur le sujet sont en développement (Gros, 2011) notamment sur l'impact de l'acidification sur les poissons.

Coll et al. (2010) ont proposé, à dire d'experts, une liste hiérarchisée des menaces anthropiques sur la biodiversité marine en Méditerranée. Les menaces répertoriées sont, dans l'ordre :

- la perte et la dégradation des habitats ;
- l'exploitation ;
- la pollution ;
- le changement climatique ;
- l'eutrophisation ;
- les espèces invasives.

Dans les dix prochaines années, les impacts de la perte et la dégradation d'habitats ainsi que de l'exploitation des ressources devraient rester dominants. Les impacts de la pollution et du changement climatique devraient s'accroître, le changement climatique étant la menace qui se développerait le plus.

4.3. Impacts sur les zones humides

Les zones humides sont des zones de transition qui présentent une biodiversité remarquable mais soumise aujourd'hui à de fortes pressions d'origine anthropique. Ce sont donc des milieux dont la fragilité pourrait s'accroître face aux évolutions climatiques (évaporation, pluviométrie).

De par leur nature même les zones humides évoluent constamment avec le climat, à des échelles de temps variées allant de la saison pour les zones alluviales à plusieurs siècles pour certaines tourbières. **Cependant la rapidité des changements climatiques attendus, cumulée à d'autres stress et à des effets rétroactifs envisagés, risquent d'impacter profondément le fonctionnement des zones humides et la biodiversité qu'elles accueillent.**

Les zones humides devraient être affectées par les variations de température et d'évapotranspiration (risques d'assèchement ou d'eutrophisation) et par

les variations de pluviométrie ou de débits, selon leur fonctionnement hydrologique (assèchement ou risque d'inondation voire de submersion).

Les communautés végétales en bordure de plans d'eau sont modélées par les variations saisonnières de niveaux d'eau et disposent de peu d'espace pour se mouvoir. Face au stress climatique les espèces disposent de deux stratégies principales :

- l'adaptation : avancement de la reproduction, ou de la migration par exemple. Les organismes opportunistes ou ubiquistes devraient s'adapter, les changements risquent d'être trop rapides pour permettre à d'autres types d'espèces de s'adapter ;
- le déplacement : un réchauffement moyen de 1 °C en France pourrait provoquer la remontée des espèces de 180 km vers le nord et 150 m en altitude. Ce déplacement peut être limité par un paysage morcelé et pauvre en refuges (Barnaud, 2008b).

Le problème des espèces invasives pourrait devenir de plus en plus difficile à gérer, puisque la conquête d'un milieu par un invasif est d'autant plus aisée que ce milieu est stressé.

Les différents types de zones humides réagiront différemment selon la vitesse et l'envergure des changements de température et de disponibilité en eau (Barnaud, 2008a).

Impacts sur les zones humides alluviales et internes

Les zones humides internes et alluviales seraient sensibles à une baisse des niveaux d'eau qui pourrait être causée par le changement climatique. Cet impact sera vraisemblablement variable en fonction de la source d'alimentation en eau des zones humides (cours d'eau, nappes, précipitations). La baisse des niveaux d'eau dans les zones humides peut se traduire par des assecs plus fréquents et plus prolongés, voire par un assèchement total de ces zones. Cependant à ce jour aucune modélisation ne vient appuyer ces propos.

Le projet Wetchange, qui doit se terminer à la fin de l'année 2012, tente de modéliser les impacts du changement global (pressions climatiques et anthropiques menant à des conditions d'étiages sévères) sur la biodiversité et sur les fonctions des systèmes alluviaux dans le bassin versant de l'Ain (Paran, 2011). Le volet hydraulique (sur le fonctionnement des systèmes alluviaux) du projet inclut une modélisation pluie-débit sous des scénarios de changement climatique. Elle doit être suivie de l'application d'un modèle hydraulique permettant de passer des débits aux lignes d'eau, afin d'évaluer les niveaux d'eau dans les lînes et d'estimer le nombre de jours où ces bassins seraient asséchés. Les bassins à étudier ont été choisis pour représenter une diversité de types de fonctionnement (en fonction du rôle relatif des précipitations, des cours d'eau ou des nappes alluviales pour leur alimentation en eau).

Richoux et Lebreton (2008) ont décrit les impacts possibles du changement climatique en Dombes, une zone constituée d'étangs alimentés par les eaux pluviales, créés et entretenus par l'homme. L'étude du rapport des pluies sur la température, appelé quotient pluviothermique, permet de repérer les périodes où l'eau, trop chaude ou trop rare, devient un facteur limitant pour le fonctionnement des étangs. Cependant cette étude n'utilise aucune projection climatique pour simuler l'évolution de ce quotient.

La hausse des températures associée à une baisse de précipitations entraînerait une baisse des niveaux d'eau et un échauffement des étangs peu profonds. La concentration en oxygène dissous s'en trouverait diminuée. L'activation du métabolisme par la hausse des températures stimulerait la production d'oxygène mais aussi sa consommation par la respiration. En cas d'augmentation trop importante de la température, cet équilibre mouvant de l'écosystème entre consommation et production d'oxygène risquerait de se rompre, avec comme conséquences possibles la désoxygénation de l'eau, la dystrophisation, et des risques sanitaires (Richoux et Lebreton, 2008).

En ce qui concerne un assèchement éventuel de ces étangs, il dépend certainement davantage de la gestion anthropique du système, déjà entièrement artificialisé, que des variations de précipitations.

Les ripisylves constituent également un point d'intérêt pour l'étude des impacts du changement climatique sur les écosystèmes aquatiques et humides. D'une part, ces milieux forment des écosystèmes intéressants dont le fonctionnement pourrait être modifié du fait du stress hydrique et des évolutions de température et d'ensoleillement. D'autre part, les ripisylves via le couvert influencent les écosystèmes aquatiques. Enfin la croissance plus ou moins forte de la végétation riveraine aura un impact sur la disponibilité en sédiments et sur la morphologie des cours d'eau.

Impacts sur les zones humides littorales

Les principaux impacts attendus du changement climatique sur les zones humides littorales sont l'accroissement de la salinité et les submersions temporaires et permanentes.

Par l'élargissement des graus existants et la formation de nouveaux graus (Verger, 2008 ; Romani et al., 2008), la salinité des lagunes méditerranéennes pourrait se rapprocher de celle de la mer, menant à une perturbation de la végétation des marges des étangs. Cependant ces modifications seraient faibles sur les grandes lagunes comme l'étang de Thau (Romani et al., 2008). L'accroissement de la salinité mènerait à une extension des espèces halophytes véritables aux dépens des espèces halotolérantes (Verger, 2008).

L'élévation du niveau de la mer associée à l'éventuelle augmentation de l'intensité ou de la fréquence des tempêtes mèneraient à une aggravation de l'érosion des dunes et à une migration vers l'intérieur ou au morcellement des lidos. Du point de vue du fonctionnement des zones humides littorales, ces phénomènes pourraient relancer la dynamique naturelle de recolonisation du milieu. De plus, si les lagunes disposent d'un espace suffisant pour migrer vers l'intérieur des terres, les submersions n'auraient pour conséquence qu'une nouvelle répartition de la profondeur des lagunes (Romani et al., 2008).

Le delta du Rhône paraît particulièrement vulnérable à des événements de submersion dus à des ruptures soit du cordon dunaire soit des levées latérales du Rhône (Verger, 2008 ; Chauvelon, 2008). La dynamique naturelle du delta a été entravée par l'action humaine, et celui-ci ne dispose donc plus d'une grande marge de mouvement pour s'adapter aux variations du niveau de la mer et des apports de sédiments. Le risque principal auquel est soumise la Camargue face au changement climatique semble donc être la submersion. D'après Chauvelon (2008), **dans les décennies à venir il ne sera plus possible de maintenir la Camargue dans son état de fonctionnement actuel.**

Enfin, les zones humides sont abondantes dans la région méditerranéenne. Elles sont adaptées à l'alternance de phases sèches et inondées, en favorisant les espèces à cycle court. Pour les zones littorales, la salinité joue un rôle important dans leur fonctionnement. Les dynamiques de mise en eau et d'assèchement représentent un facteur clé dans la composition des peuplements, et les précipitations jouent souvent un rôle dominant dans le fonctionnement hydrologique de ces zones (Grillas, 2008). Les mares temporaires paraissent donc fortement vulnérables aux évolutions climatiques attendues en Méditerranée. **En effet les variations de précipitations pourraient exposer certaines espèces à des échecs répétés de reproduction et augmenter ainsi leur risque d'extinction.**

Impacts sur les tourbières

Les tourbières sont des écosystèmes très anciens, dont la répartition ne peut s'expliquer uniquement par des facteurs climatiques, mais plutôt par une combinaison complexe de différents facteurs, qui varie selon l'échelle considérée.

A l'échelle planétaire, on peut considérer que leur répartition dépend de l'équilibre entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle. En France, les tourbières se situent en limite sud de leur répartition principale dans l'hémisphère nord, et les facteurs expliquant leur distribution dépassent les variations climatiques. En particulier les tourbières de basse altitude tendent à avoir une origine anthropique, telle que des obstacles en pierre ou en terre d'origine souvent agricole, qui ont limité depuis des siècles les écoulements d'eau et ont ainsi créé des conditions favorables à l'apparition de ces tourbières (Cholet et al., 2010).

Cholet et al. (2010) distinguent trois catégories de menaces qui pèsent sur les tourbières :

- les menaces bien connues comme le drainage ou l'extraction ;
- les menaces suspectées mais mal caractérisées comme le changement climatique ;
- les menaces méconnues des gestionnaires comme l'arrêt de l'entretien des aménagements à leur origine (abandon de l'agriculture de montagne par exemple).

Ainsi le changement climatique risque de perturber rapidement l'équilibre entre précipitations et évapotranspiration qui a permis la formation des tourbières. Le fonctionnement de ces milieux pourrait donc se trouver déséquilibré.

En plus de la menace que ce déséquilibre représente sur la biodiversité abritée par ces milieux anciens, leur rôle de puits ou de sources de carbone préoccupe actuellement la communauté scientifique.

Les tourbières couvrent 3 % de la surface émergée à l'échelle mondiale, et comptent pour 62 % des zones humides terrestres (Cholet et al., 2010). Depuis la dernière déglaciation environ 450 gigatonnes de carbone auraient été accumulées dans les tourbières boréales.

Selon Joosten (2009) (cité dans Cholet et al., 2010) le stock de carbone dans les tourbières françaises aurait été de 150 millions de tonnes en 1990, il serait de 137 millions de tonnes en 2008.

La réponse des tourbières au changement climatique pourrait donc être amplificatrice (libération du carbone stocké du fait d'une rupture d'équilibre de leur fonctionnement) ou atténuatrice (fonction de stockage de carbone limitant ainsi les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre).

Cette rétroaction positive ou négative des tourbières sur le changement climatique n'est pas encore connue, cependant il est admis qu'une hausse de température et d'évapotranspiration mèneront à une baisse des niveaux d'eau et à une plus grande disponibilité en oxygène dans le sol, qui sont des paramètres plutôt favorables à un dégagement de CO₂. La hausse des températures entraîne une augmentation de l'activité microbienne, une forte décomposition de la matière organique et donc un dégagement important de CO₂ par respiration des microorganismes, mais aussi une fixation conséquente du carbone par photosynthèse (Laggoun-Défarge et Muller, 2008).

Le projet Peatwarm étudie l'effet du réchauffement climatique sur le fonctionnement des tourbières à sphaignes et leur fonction de puits de carbone. Un réchauffement modéré censé représenter les changements climatiques à l'horizon 2030 est simulé in situ afin de suivre les bilans de CO₂ et de CH₄ en surface et en profondeur, la biodiversité microbienne dans les sphaignes et la tourbe, la structure des communautés végétales, etc., dans le but de construire un modèle biogéochimique du devenir du carbone dans les tourbières à l'horizon 2030 (Laggoun-Défarge et Muller, 2008 ; Cholet et al., 2010).

Les impacts du changement climatique sur les écosystèmes aquatiques et humides

Incidences clés :

- Les incidences du changement climatique ne concernent pas uniquement la gestion quantitative de l'eau, **la biodiversité représente un enjeu considérable.**
- La fragilité accrue des écosystèmes, la baisse de la capacité de dilution, la hausse probable du risque d'eutrophisation et la baisse des services écosystémiques renvoient au degré d'effort à consentir sur la maîtrise des rejets, l'épuration ou les débits réservés.
- Les impacts projetés soulignent l'importance de la continuité et de la connectivité des milieux pour les écosystèmes (zones humides, poissons...) afin d'améliorer leur résilience au changement climatique.
- Les zones humides seraient a priori très vulnérables notamment en raison des élévations de température et d'évapotranspiration attendues ainsi que de l'aggravation des étiages. Les pressions anthropiques qu'elles subissent actuellement limitent fortement leur capacité d'adaptation. A l'inverse, la résilience des zones humides au changement climatique pourra être améliorée si un maximum de contraintes est levé dès à présent.
- Il sera nécessaire d'analyser les conséquences de l'évolution des cortèges d'espèces causée par le climat sur les référentiels des indicateurs d'état des milieux.

Connaissance scientifique à investir ou approfondir :

- Améliorer la compréhension du fonctionnement des zones humides afin de pouvoir caractériser leur vulnérabilité au changement climatique et les facteurs de cette vulnérabilité.
- Chercher des indicateurs d'état qui permettraient de dissocier les pressions dues strictement au changement climatique de celles liées aux activités humaines.
- Analyser l'évolution du régime hydrique des sols afin d'estimer l'évolution des zones humides sous changement climatique.
- Anticiper l'évolution des invasions par des espèces exotiques qui pourraient modifier les cortèges d'espèces.
- Etudier la vulnérabilité des espèces marines à l'élévation de la température et à l'acidification de l'eau.

5. Les impacts du changement climatique sur le littoral – aléas submersion et érosion

Les impacts du changement climatique sur le littoral sont principalement dus à l'élévation du niveau de la mer, et à l'évolution des événements extrêmes comme les tempêtes. Ces phénomènes sont très complexes et la confiance dans les projections reste relativement faible. On s'attachera donc principalement dans cette partie à décrire les processus en cause, puis les résultats et projections disponibles seront présentés.

5.1. Phénomènes en cause et impacts possibles

Les impacts du changement climatique sur le littoral dépendent de l'évolution de phénomènes physiques comme les tempêtes, les vagues, ou l'élévation du niveau de la mer, qui sont encore difficilement modélisables.

Dans le projet Vulsaco, qui a visé à étudier la vulnérabilité de plages sableuses françaises face aux changements globaux, l'étude sur les scénarios de changement climatique a conclu qu'« (...) une étude pleinement déterministe des effets du changement climatique sur un système côtier n'est pas envisageable dans l'état des connaissances actuelles » (Le Cozannet et al., 2009).

A l'horizon 2030 les évolutions de ces aléas est davantage due à la variabilité climatique décennale qu'au changement climatique lui-même et l'horizon 2100 est une échéance plus facile pour l'étude de ces phénomènes (Le Cozannet et al., 2009).

La Délégation au Développement Durable du Commissariat Général au Développement Durable a lancé en 2011 une étude visant à rassembler les connaissances sur les impacts à long terme du changement climatique sur le littoral métropolitain. Le rapport (Spohr, 2011) décrit les phénomènes impliqués et les impacts envisageables sur les côtes françaises. Très peu de projections d'évolution de ces phénomènes sous changement climatique sont présentées.

Le changement climatique pourra avoir des impacts sur certains phénomènes physiques, qui induiront des modifications des systèmes marins, côtiers et littoraux.

Les phénomènes physiques concernés sont la modification du régime des tempêtes, l'élévation du niveau moyen de la mer, la modification des vagues à la côte et les surcotes.

La modification du régime des tempêtes peut avoir un impact sur les côtes basses par la modification des phénomènes d'érosion et/ou de submersion (ce sont les grandes tempêtes qui font évoluer les rivages marins). Les effets possibles sur les côtes basses et les zones humides sont l'incursion d'eaux marines et la salinisation des sols, qui pourraient modifier les conditions d'équilibre des écosystèmes.

De nouvelles zones humides pourraient aussi apparaître. Une éventuelle intensification du régime des tempêtes pourrait impacter le tourisme, l'urbanisation, et l'agriculture, avec des pertes de surfaces émergées et une modification des services rendus par les écosystèmes. Enfin les dégradations sur le bâti littoral pourraient être accentuées.

Entre 1870 et 2004 le niveau moyen de la mer est monté de +1,7 mm/an en moyenne, la tendance n'étant pas linéaire (accélération et ralentissements). Les causes de cette élévation sont la dilatation thermique et les échanges de masses (fonte des glaciers et des calottes polaires). Une forte variabilité spatiale dans ces changements a été observée : le niveau marin a baissé dans le Pacifique Est, alors qu'il est fortement monté dans le Pacifique Ouest (5 fois plus que la moyenne globale).

Les effets d'une élévation plus ou moins importante du niveau de la mer concernent les aléas érosion, submersion permanente et temporaire, et intrusions salines dans les aquifères côtiers. Elle pourrait aussi causer une élévation du niveau moyen de l'eau dans les estuaires.

Les impacts sur les activités humaines incluent une hausse du coût de protection, une modification des zones affectées par les aléas côtiers, la perte de plages, et la submersion d'infrastructures touristiques.

L'impact le plus important sur les houles vient de l'élévation du niveau de la mer qui cause des modifications de la profondeur, ce qui impacte leur propagation. Des houles plus importantes en période et en hauteur pourraient atteindre les côtes et l'énergie dissipée au niveau du trait de côte pourrait augmenter.



J. Fabre

Les impacts les plus importants pourront se produire dans les fonds peu profonds, avec plus d'érosion, une récession générale du trait de côte, et d'importants dégâts sur les ouvrages en faible profondeur. Le nombre de phénomènes de franchissement pourrait augmenter.

L'origine des surcotes, parfois appelées marées de tempête, est surtout météorologique (dépressions et vents forts). L'apparition des surcotes ou des décotes pourrait être impactée par le changement climatique de par l'éventuelle modification des régimes de tempête. L'élévation du niveau de la mer pourrait modifier leur propagation. Cette évolution est cependant encore difficile à estimer.

L'ensemble de ces phénomènes physiques globaux peut être la cause de submersions marines, d'une érosion accrue, d'une accentuation de la salinisation des eaux souterraines littorales, et de risques sanitaires.

- Les submersions marines :

La Figure 31 décrit l'ensemble des phénomènes contribuant à la submersion marine. Sur les littoraux bas le franchissement des cordons dunaires pourrait devenir plus fréquent et le risque de rupture pourrait être aggravé. La nouvelle spatialisation de l'aléa est difficile à déterminer de façon précise. La pénétration des eaux salées dans les estuaires pourrait s'accroître, augmentant le risque de submersion si les débits des fleuves côtiers restent constants ou baissent (ce qui correspond aux évolutions probables selon les projections disponibles).

- L'érosion :

A l'échelle de la France métropolitaine certaines zones paraissent particulièrement exposées à l'érosion, comme le Nord Pas de Calais et l'Aquitaine.

- L'accroissement de la salinisation des eaux souterraines littorales :

Cet impact a été détaillé dans le point 3.3.

- Les risques sanitaires – toxicité :

Des risques sanitaires et des problèmes de toxicité pourraient apparaître et fortement impacter les activités humaines du littoral. Par exemple si la conchyliculture était touchée par des problèmes sanitaires (dus notamment aux submersions), les impacts de sa disparition seraient forts : envasement, érosion accélérée, eutrophisation accrue et hypoxies associées. L'économie locale pourrait être profondément modifiée.

5.2. Projections d'élévation du niveau de la mer

L'élévation du niveau de la mer (ENM) est liée à deux types d'effets du réchauffement :

- les effets stériques que sont la dilatation thermique et les variations de salinité ;
- les effets non stériques, soient ceux liés aux échanges avec les masses d'eau et de glaces.

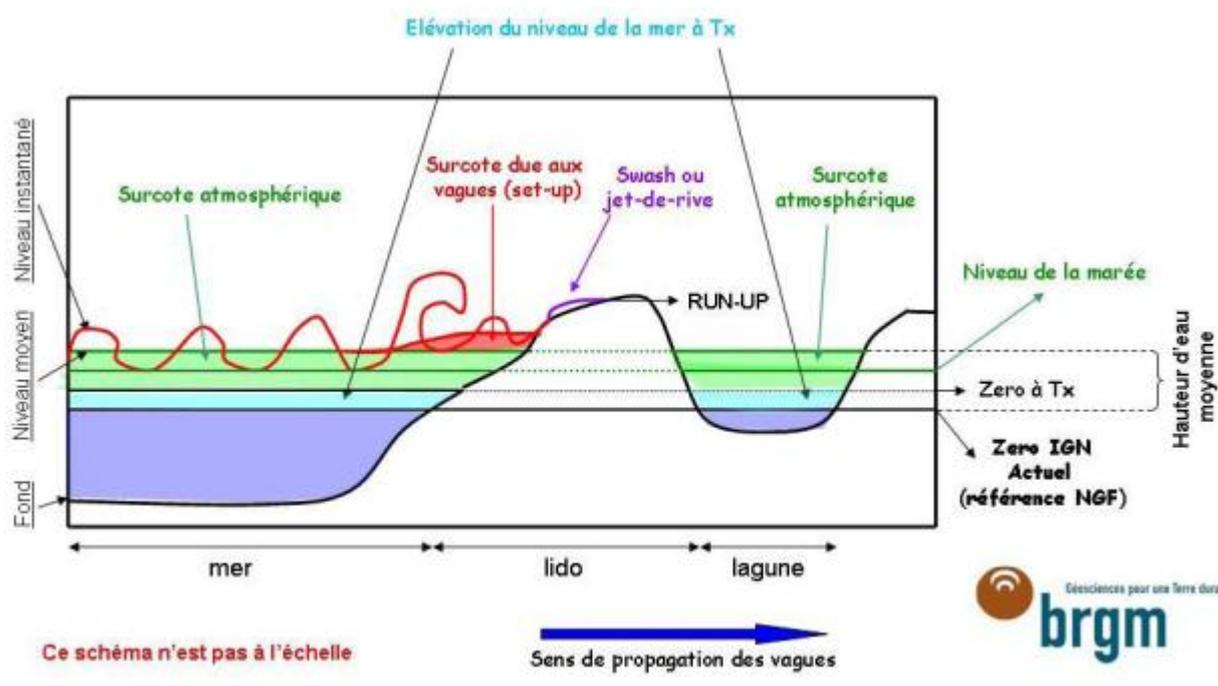


Figure 31. Schéma des phénomènes contribuant à la submersion marine. Source : BRGM.

Aujourd'hui les effets stériques semblent être la cause d'environ la moitié de l'ENM constatée. Les effets non stériques peuvent mener à des variations plus importantes mais ils sont plus difficiles à prévoir (processus non linéaire de fonte des glaces avec de possibles rétroactions). **En prenant en compte les effets stériques et en supposant une évolution linéaire des effets non stériques, le GIEC propose des projections d'élévation du niveau marin allant de 18 à 59 cm en 2100** (GIEC, 2007). Cependant dans ces scénarios la fonte des calottes polaires du Groenland et de l'Antarctique n'est pas pleinement considérée.

Nicholls et al. (2011) estiment que **pour une hausse globale de 4 °C de la température moyenne en 2100, le niveau de la mer pourrait s'élever de 0,5 à 2 mètres**. La plus grande incertitude sur les projections vient de la réponse du Groenland et de l'ouest de l'Antarctique. Ainsi Rahmstorf propose une élévation comprise entre 50 cm et 1,4 m en 2100 et propose de considérer une élévation de 1 m en 2100 pour les études d'impact. Hansen estime que la fonte des calottes glaciaires pourra s'accélérer par des phénomènes de rétroaction, et aboutit à des projections de l'ordre de + 5 m en 2100 (Hansen, 2007).

5.3. Impacts sur le littoral français méditerranéen

Entre 1993 et 2006 le niveau de la mer se serait élevé de 2,5 mm/an dans le Golfe du Lion selon Yates Michelin (2010), et de 1 mm/an sur le lido de Sète selon Le Cozannet et al. (2009). A l'horizon 2100 la hausse stérique pourrait être inférieure à la moyenne globale, l'effet renforcé de l'évaporation venant compenser la dilatation thermique (Spohr, 2011 ; Le Cozannet et al., 2009). Dans le cadre de l'ANR MISEEVA les projections ont été jugées trop peu fiables et deux scénarios ont été proposés pour l'étude : + 20 mm ou + 70 mm en 2030, + 35 cm ou + 1 m en 2100.

Dans le delta du Rhône il existe un phénomène de subsidence dû à la compaction des sédiments, qui pourrait accentuer l'effet de l'ENM.

Le littoral du Languedoc-Roussillon est déjà très exposé aux aléas d'érosion et de submersion, et la vulnérabilité de cette zone est exacerbée par l'usage de la zone côtière (Yates Michelin et al., 2010). En effet dans l'Hérault 21 % du linéaire est déjà en situation d'érosion, et 11 % en érosion forte. De plus Moron et Sabatier (2007) ont montré **qu'une tempête du type de celle de 1997 (tempête vingtennale) suffirait pour détruire la majorité des dunes encore présentes sur les secteurs en érosion de Camargue**.

Les forçages les plus déterminants pour les aléas d'érosion et de submersion sur le littoral méditerranéen sont les vagues, le niveau de l'eau, et les apports sédimentaires.

En Méditerranée le régime des tempêtes devrait rester à peu près inchangé, cependant le climat

méditerranéen est encore mal modélisé (Le Cozannet et al., 2009). Plusieurs études ont suggéré une décroissance du nombre total de tempêtes (- 38 % selon le projet IMFREX). D'après le GIEC, il est « plus probable que non » que les vents deviennent moins intenses en Méditerranée. Le BRGM évoque par contre une possible (légère) augmentation de l'intensité et de la durée des tempêtes (Yates Michelin et al., 2010).

Le régime des surcotes devrait lui aussi demeurer stationnaire, mais leur impact pourrait être amplifié du fait de l'élévation du niveau marin (Yates Michelin et al., 2010). Ainsi d'après Lenôtre et Pedreros (2006), si le niveau de la mer montait de 50 cm d'ici la fin du 21^e siècle en Camargue, la période de retour d'une surcote de 1 mètre pourrait passer de une tous les dix ans à une par an.

Les évolutions du régime des vagues et de la houle comportent de grandes incertitudes. Des simulations à l'horizon 2071 - 2100 selon les scénarios SRES A2 et B2 ont montré une baisse de la hauteur extrême des vagues, et une baisse de fréquence des événements extrêmes (Lionello et al., 2008, cité dans Yates Michelin, 2010).

Enfin, l'évolution des précipitations continentales pourrait avoir un impact fort sur l'érosion des côtes sableuses méditerranéennes, les fleuves côtiers représentant un apport important de sédiments (Yates Michelin et al., 2010). D'après les points 2.2 et 3.2 sur les impacts climatiques et hydrologiques, les fleuves méditerranéens devraient voir leur débit diminuer, particulièrement en été, ce qui aurait comme conséquence une diminution des apports sédimentaires vers les plages.

L'aléa érosion, déjà très préoccupant sur le littoral du Languedoc-Roussillon, devrait donc s'aggraver sous changement climatique. Les principaux facteurs en cause seraient la hausse du niveau de la mer, la modification des paramètres de tempêtes, et la baisse des précipitations continentales (et donc des apports sédimentaires). En Camargue, la houle aurait un rôle plus important que le niveau de l'eau dans l'érosion des dunes (Yates Michelin et al., 2010).

La principale cause d'un éventuel changement de l'aléa submersion sous changement climatique est la hausse du niveau marin, le climat de vagues et le régime des surcotes variant peu. Cependant la durée des tempêtes pourrait augmenter, amplifiant ainsi l'impact de la submersion marine temporaire dans les zones urbaines et agricoles (Yates Michelin et al., 2010).

Les étangs et lagunes seraient menacés par la submersion permanente. En ce qui concerne les submersions temporaires, elles sont dues principalement aux surcotes et au run-up (voir Figure 31) ; les forçages ne devraient pas changer mais les surfaces affectées devraient s'accroître (Yates Michelin et al., 2010).

D'après les résultats du projet RESPONSE (Vinchon et al., 2008), avec une élévation du niveau de la mer de 88 cm et des hautes marées de 0,24 m, associées à une plus haute surcote de 1,5 m, l'inondation marine potentielle se situerait à 2,64 m au-dessus du zéro IGN. Le littoral sableux serait très exposé et les plages des criques de pied de falaise dans le Roussillon seraient amenées à disparaître. La côte rocheuse du Roussillon est peu aménagée, cependant les rares enjeux touristiques et urbains de cette zone sont situés autour de ces criques.

Le projet MISEEVA a étudié l'exposition du littoral languedocien aux submersions marines dans un contexte de changement climatique, aux horizons 2030 et 2100. En 2030 les zones potentiellement inondées sont à peu près similaires aux zones actuelles. A l'horizon 2100, selon les scénarios, 2 000 à 4 000 hectares sont concernés par la submersion permanente, 1 000 à 14 000 hectares par la submersion récurrente (Vinchon et al., 2010). Les submersions exceptionnelles atteindraient la bordure nord des étangs (voir Figure 32).

Si le niveau de la mer montait d'un mètre à l'horizon 2100 plus de 180 km² de terrains pourraient être submergés au moins deux fois par an. L'évolution serait assez lente jusqu'en 2080 puis plus rapide vers 2100.

De 80 000 à 100 000 personnes pourraient être localisées en zone de submersion (Hérivaux et al., 2010). La population peut être soit directement affectée par la submersion s'il n'y a pas eu d'anticipation, soit déplacée par anticipation, soit protégée par des digues.

L'élévation du niveau de la mer pourrait aussi causer le déplacement des habitats des zones humides, qui seraient alors menacés si des obstacles s'opposent à leur translation vers des zones plus élevées (Hérivaux et al., 2010).

La nappe de Mauguio-Lunel, la nappe des calcaires de la Gardiole, les nappes du plio-quatenaire du Roussillon et les nappes des sables astiens pourraient être affectées par un phénomène de salinisation, soit par submersion directe des captages soit par la progression du biseau salé ; 7,4 millions de m³ par an pourraient être menacés.

Enfin les impacts d'une tempête centennale (référence 1982) avec une prise en compte de l'ENM ont été évalués: les superficies impactées seraient supérieures (+ 55 %) et différentes de celles impactées en 1982, en l'absence de protections. Si une stratégie de protection intégrale était choisie et que la tempête menait à une défaillance de ces protections, les superficies affectées pourraient atteindre 390 km² soit le triple de surfaces affectées en 1982.

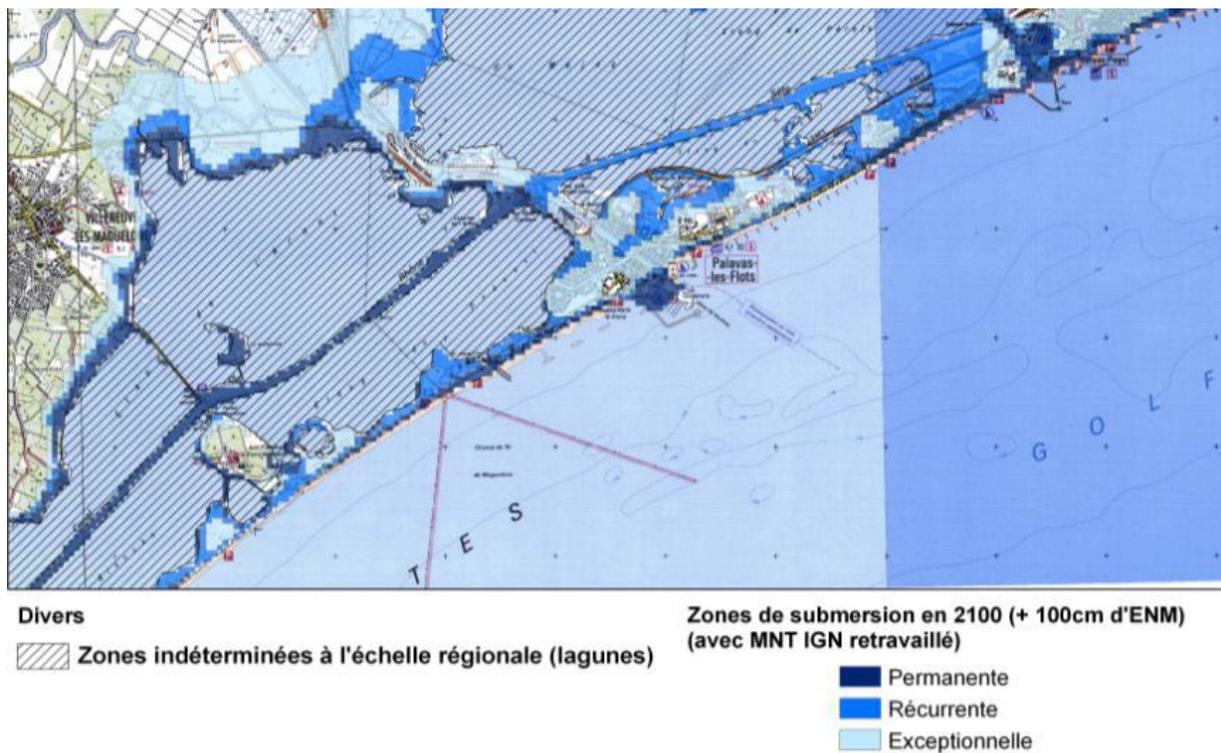


Figure 32. Carte des zones de submersion sur le littoral de Palavas-les-Flots (Hérault) en 2100 avec une élévation du niveau de la mer de 1 mètre. Source : projet ANR MISEEVA.

Les impacts du changement climatique sur le littoral – aléas submersion et érosion

Incidences clés :

- Les incertitudes sont très élevées sur l'évolution des facteurs d'érosion et de submersion mais, quelque soit l'amplitude de l'élévation du niveau de la mer, celle-ci provoque l'aggravation des impacts des aléas, même à leur niveau actuel.
- **L'espace de liberté du littoral est un enjeu fort pour l'adaptation des écosystèmes au changement climatique.** En l'absence de contraintes physiques en arrière du trait de côte, de nouveaux écosystèmes littoraux pourront se former, suivant le nouveau niveau d'élévation de la mer. Une contrainte forte liée à l'aménagement et l'urbanisation du littoral pourrait vouer ces écosystèmes à la disparition.
- L'élévation du niveau de la mer favorisera la progression du biseau salé, provoquant des incidences sur les milieux et les usages des sols.

Connaissance scientifique à investir ou approfondir :

- Suivre et étudier les modifications de l'équilibre eau douce/eau salée dans les lagunes littorales.

Conclusion : vers des stratégies d'adaptation au changement climatique

Les travaux scientifiques réalisés à ce jour portant sur le changement climatique à venir et ses impacts sont basés sur une méthodologie commune, ayant pour point de départ la modélisation numérique globale du climat sous des concentrations modifiées de gaz à effet de serre. Ils permettent d'ores et déjà de dégager certaines conclusions sur les évolutions que l'on peut attendre sur les bassins Rhône-Méditerranée et Corse. Les projections considérées comme robustes (sur lesquelles plusieurs études et/ou plusieurs scénarios s'accordent) sont résumées en Annexe 1.

Les projections d'évolution des paramètres de température, d'évapotranspiration et de neige sont des signes très nets d'une tendance vers la raréfaction de la ressource en eau, ce que les résultats des études d'impacts sur les débits confirment.

Au-delà du problème des ressources moyennes annuelles, **la tension en période d'étiage risque de s'aggraver fortement là où elle existe déjà, voire d'apparaître sur des territoires aujourd'hui en situation de confort hydrique**. En effet les impacts d'un moindre enneigement, d'une fonte accélérée et de conditions estivales asséchantes apparaissent très nettement dans les projections, qui montrent des étiages plus intenses, plus longs, débutant plus tôt dans l'année.

Avec une baisse généralisée des débits moyens à long terme, la gestion quantitative par l'augmentation de l'offre (stockage, ressources de substitution) ne sera certainement plus durable dans la plupart des cas. **Le déficit de ressources et de précipitations devrait en effet toucher tous les territoires, même ceux dont la ressource est aujourd'hui considérée comme abondante**.

De plus, la viabilité de certains usages pourrait être mise en cause par les évolutions climatiques. La question notamment de la forte saisonnalité de la demande en eau sur certains territoires, qui fait souvent correspondre un pic de demande en eau avec la période de moindre disponibilité de la ressource, se posera très probablement de façon plus aiguë qu'actuellement.

La gestion quantitative par la maîtrise de la demande en eau devrait donc certainement prendre une importance croissante. Dans ce contexte il apparaît indispensable d'acquérir une meilleure connaissance des prélèvements et des consommations nettes (volumes en jeu, localisation, délais de retour au milieu, etc.) afin de cibler de manière efficace et objective les mesures à prendre.

Enfin, les projections sur l'accroissement de la sévérité des étiages mais aussi de la fréquence et de l'intensité des sécheresses soulignent l'importance de développer une gouvernance

dédiée à la gestion des crises afin de faire face aux conflits d'usage qui apparaîtront suite à ces impacts.

Malgré ces projections de baisse généralisée de la ressource en eau, on a pu noter que **les débits élevés et l'impact des crues ne devraient pas baisser, et pourraient même s'aggraver**. La gestion de ce risque ne doit donc pas être oubliée, et un suivi attentif du développement des connaissances sur ce sujet est nécessaire.

Les incidences du changement climatique ne concernent pas uniquement la gestion quantitative de l'eau. A la lecture des impacts possibles sur l'hydrologie, **le lien entre la quantité et la qualité de l'eau apparaît renforcé**, et la question des rejets devra certainement être réévaluée face à des débits d'étiage fortement diminués et à des milieux dont la capacité d'autoépuration pourrait baisser.

La biodiversité représente aussi un enjeu considérable à prendre en compte. Les zones humides constituent notamment des milieux particulièrement vulnérables au changement climatique, même si les connaissances au sujet des impacts possibles restent modestes. Enfin, les projections de modification des aires de répartition des espèces aquatiques montrent qu'il sera nécessaire de considérer l'évolution des cortèges d'espèces causée par le climat et ses conséquences sur les référentiels des indicateurs de bon état.

Il ressort également de cette synthèse que le bon état des eaux s'impose comme un pré requis indispensable pour faire face aux impacts du changement climatique. Toute mesure qui permettrait d'améliorer la résilience des milieux aux pressions va dans le sens d'une adaptation au changement climatique.

Enfin, bien que les incertitudes soient très élevées sur l'évolution des facteurs d'érosion et de submersion marine, on peut avancer que les risques devraient s'aggraver sur le littoral.

L'espace de liberté du littoral apparaît clairement comme un enjeu fort face à l'élévation du niveau de la mer causée par le réchauffement global, afin de permettre une adaptation et un déplacement des écosystèmes, dont certains pourraient disparaître s'ils se trouvaient contraints par des ruptures dans le milieu liées à l'urbanisation des côtes.

Les impacts du changement climatique seront donc marqués, et nécessiteront une adaptation des politiques de gestion de l'eau afin de réduire la vulnérabilité des territoires.

Un impact collatéral et néanmoins central du changement climatique est l'entrée dans un régime climatique qui n'est plus stationnaire, et dont les évolutions sont et resteront incertaines.

En effet alors que certaines tendances fortes et des projections robustes se dégagent de cette synthèse, l'amplitude des changements à venir n'est pas connue. Pour certains impacts, les différentes projections ne s'accordent même pas sur le sens probable d'évolution.

L'incertitude ne peut cependant plus être considérée comme un facteur de blocage à l'adaptation au changement climatique.

Malgré la dispersion de certaines projections, les connaissances actuelles permettent dès à présent d'entamer la réflexion sur une politique d'adaptation. L'incertitude doit être intégrée dans cette politique, elle peut être considérée comme un risque inhérent à la prise de décision en situation de non stationnarité. Les projections issues des modèles climatiques et d'impacts permettent d'encadrer l'ensemble des futurs possibles sous changement climatique, il s'agit ensuite de s'orienter vers des mesures résilientes et robustes.

En prenant en compte l'incertitude, un seuil de risque acceptable peut être défini collectivement, et différentes options d'adaptation peuvent être évaluées pour trouver des alternatives robustes, c'est-à-dire qui se comportent bien dans une large gamme des futurs possibles, plutôt que de manière optimale dans un scénario donné.

Les mesures structurantes et impactantes sur le long terme devront être évaluées avec prudence afin d'éviter le risque de « maladaptation », qui aboutirait à terme à une vulnérabilité accrue au changement climatique.

Le changement climatique implique des évolutions qui pourraient se poursuivre sur le long voire le très long terme.

L'adaptation va donc au-delà d'un ajustement à une tendance évaluée ou à un nouvel équilibre du système climatique, il s'agit d'évoluer vers une gestion plus adaptative de la ressource et des usages de l'eau, qui privilégie des systèmes résilients et des solutions robustes.

Références bibliographiques

- Scampeï (Scénarios Climatiques Adaptés aux zones de Montagne : Phénomènes extrêmes, Enneigement et Incertitudes), Indices issus de la régionalisation sur les Alpes (Neige et Avalanches). Disponible sur : www.cnrm.meteo.fr/scampeï/ (page consultée le 28/11/2011).
- Amigues J.P., B. Debaeke, G. Lemaire, et al. (éd), 2006. Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport. INRA (France), 72 p.
- Anneville, O., S. Souissi, J. C. Molinero et al., 2009. Influences of human activity and climate on the stock - recruitment dynamics of whitefish, *Coregonus lavaretus*, in Lake Geneva. *Fisheries Management and Ecology* **16**, 492–500.
- Arnell, N.W., 2004. Climate change and global water resources: SRES emissions and socio - economic scenarios. *Global Environmental Change* **14**, 31–52.
- Bakalowicz, M., 2009. National Policy Dialogue on Integrated Water Resources Management Planning in the Republic of Lebanon. MED EUWI.
- Barnaud, G., 2008(a). Des marais plus secs ou plus mouillés? *Zones Humides Infos* **59–60**.
- Barnaud, G., 2008(b). Réactions prévisibles et imprévisibles des espèces des marais au changement climatique. *Zones Humides Infos* **59–60**.
- Beniston, M., 2012. Impacts of climatic change on water and associated economic activities in the Swiss Alps. *Journal of Hydrology* **412 - 413**, 291–296.
- Boé, J., 2007. Changement global et cycle hydrologique: Une étude de régionalisation sur la France. Thèse de Doctorat. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 278p.
- Boé, J., L. Terray, E. Martin et al., 2009. Projected changes in components of the hydrological cycle in French river basins during the 21st century. *Water Resources Research* **45**.
- Bou - Zeid, E. et M. El - Fadel, 2002. Climate Change and Water Resources in Lebanon and the Middle East. *Journal of water resources planning and management* **128** (5), 343–355.
- Brisson, N. et F. Levraut, 2010. Synthèse du projet Climator. Ademe.
- Brown, B.R., 2003. « Sensing temperature without ion channels », *Nature* **421**.
- Buisson, L., 2009. Poissons des rivières françaises et changement climatique: impacts sur la distribution des espèces et incertitudes des projections. Thèse de Doctorat. Université de Toulouse, 282 p.
- Caballero, Y., D. Dagneaux, L. Maton et al., 2010. Vulnérabilité de la ressource en eau des Pyrénées Orientales au Changement Global. Présenté à : Réunion de clôture du projet VULCAIN (9 novembre 2010, Collioure).
- Castellari, S., 2008. ClimChAlp. Work Package 5: Climate change assessment report.
- Chaouche, K., L. Neppel, C. Dieulin et al., 2010. Analyses of precipitation, temperature and evapotranspiration in a French Mediterranean region in the context of climate change. *Comptes Rendus Géoscience* **342** (3), 234–243.
- Chauvelon, P., 2008. Histoires d'eau, de sel, et de sable... Quel avenir pour la Camargue? *Zones Humides Infos* **59–60**, 13–15.
- Cholet, J., H. Cubizolle, F. Laggoun - Défarge, 2010. Tourbières et climat, in *Tourbières des montagnes françaises -Nouveaux éléments de connaissance, de réflexion & de gestion*. Pôle relais Tourbières, 2010.
- Coll, M., C. Piroddi, J. Steenbeek, K. Kaschner et al., 2010. The Biodiversity of the Mediterranean Sea: Estimates, Patterns, and Threats. *PLoS ONE* **5** (8).
- Comité de bassin Rhône-Méditerranée et Corse, 2009. « Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux ».
- Dagneaux, D., Y. Caballero, B. Ladouche et al., 2010. Ressource en eau du bassin versant du Tech. Présenté à : Réunion de clôture du projet VULCAIN (9 novembre 2010, Collioure).
- Danis, P.A., U. von Grafenstein, V. Masson - Delmotte, et al., 2004. Vulnerability of two European lakes in response to future climatic changes. *Geophysical Research Letters* **31**.
- Déqué, M., 2007. Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change* **57**, 16–26.

- DMI, 2005. « Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects: PRUDENCE, Final Report. »
- Döll, P., 2009. Vulnerability to the impact of climate change on renewable groundwater resources: a global - scale assessment. *Environmental Research Letters* **4** (3).
- Ducharne et al. , 2009. « Projet RExHySS -Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme », Rapport de fin de contrat.
- Dumont, B., D. Pont, G. Carrel, 2007. Quelles sensibilités biologiques face au réchauffement dans les cours d'eau français métropolitains? in *Congrès 2007 de l'ASTEE: Compte rendu*. 86ème Congrès de l'ASTEE (2007, Barcelone).
- Etchevers, P., 2000. Modélisation du cycle continental de l'eau à l'échelle régionale. Impact de la modélisation de la neige sur l'hydrologie du Rhône. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III. 373 p.
- Fabre, J., 2010. Les relations entre changement climatique, ressources et demande en eau en Méditerranée - Etude de la demande en eau agricole. Mémoire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur agronome. AgroParisTech, Plan Bleu.
- Fischer, E.M. et C. Schär, 2010. Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves. *Nature Geoscience* **3**, 398 – 403.
- GIEC, 2007. *Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. Genève, Suisse.
- Giorgi, F., 2006. Climate change hot – spots. *Geophysical Research Letters* **23**.
- Goderniaux, P., S. Brouyère, H.J. Fowler, et al., 2009. Large scale surface - subsurface hydrological model to assess climate change impacts on groundwater reserves. *Journal of Hydrology* **373** (1-2), 122–138.
- Goodess, C.M., 2005. « Stardex -downscaling climate extremes. Statistical and regional dynamic downscaling of extremes for European regions. STARDEX final report. »
- Goodess, C.M., D. Jacob, M. Déqué et al., 2009. Downscaling methods, data and tools for input to impact assessments, in van der Linden P., and J.F.B. Mitchell (eds.) 2009: *ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project*. Met Office Hadley Centre, UK. 160pp.
- Grillas, P., 2008. Les zones humides temporaires méditerranéennes et les changements climatiques. *Zones Humides Infos* **59–60**.
- Gros, P., 2011. Ecosystèmes marins, chapitre 5, in *Connaissance des impacts du changement climatique sur la biodiversité en France métropolitaine -synthèse de la bibliographie*, Ecofor.
- Hansen, J.E., 2007. Scientific reticence and sea level rise. *Environmental Research Letters* **2**.
- Héduit, A., R. Pujol, B. Tisserand et al., 2007. Conséquences des changements climatiques sur les systèmes d'assainissement. *Techniques - Science - Méthodes* **12**, 85–92.
- Hendrickx, F., 2001. Impact hydrologique d'un changement climatique sur le bassin du Rhône. *Hydroécologie Appliquée* **1** (13), 77–100.
- Hérivaux, C., L. Maton, A.L. Agenais et al., 2010. Evaluation économique des dommages liés à l'élévation du niveau de la mer: démarche générale et application à la région Languedoc - Roussillon, in *Journées « Impacts du changement climatique sur les risques côtiers » -Recueil des actes*, BRGM, Orléans, France, 2010, 214 p.
- Hiscock, K., R. Sparkes, A. Hodgson, 2011. Evaluation of future climate change impacts on European groundwater resources, in *Climate change effects on groundwater resources, a global synthesis of findings and recommendations*, H. Treidel, J. L. Martin - Bordes, J. J. Gurdak (eds), 2011.
- IPCC, 2012. Summary for Policymakers, in *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation*, Cambridge University Press., C. B. Field et al. , éd. Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 19 p.
- Itier, B., 2010. Confort hydrique et restitution d'eau aux nappes, in *Changement climatique, agriculture et forêt en France: simulations d'impacts sur les principales espèces. Le Livre Vert du projet CLIMATOR (2007 - 2010)*, ADEME., N. Brisson et F. Levraut, p. 79–92.
- Joosten, H., 2009. The Global Peatland CO2 Picture -Peatland status and drainage related emissions in all countries of the world. Copenhagen.
- Ladouche, B. et Y. Caballero, 2010(a). Ressource en eau du bassin versant de l'Agly. Présenté à : Réunion de clôture du projet VULCAIN (9 novembre 2010, Collioure).
- Ladouche, B. et Y. Caballero, 2010(b). Ressource en eau souterraine dans le Pliocène de la Plaine du Roussillon. Présenté à : Réunion de clôture du projet VULCAIN (9 novembre 2010, Collioure).

- Laggoun – Défarge, F. et F. Muller, 2008. Les tourbières et leur rôle de stockage de carbone face aux changements climatiques. *Zones Humides Infos* **59-60**.
- Leblois, E., 2003. Projet GICC Rhône. Rapport final.
- Le Cozannet, G., O. Brivois, E. Delvallée et al., 2009. Projet VULSACO -Changements climatiques et scénarios de climats côtiers des sites Vulsaco. Module 2 - 2: Scénarios de changements climatiques. Rapport final, BRGM/RP - 57 305 - FR.
- Lenôtre, N. et R. Pedreros, 2006. Impact du changement climatique sur le littoral. *Géosciences* **3**, 36–43.
- Lespinas, F., 2008. Impacts du changement climatique sur l'hydrologie des fleuves côtiers en région Languedoc – Roussillon. Thèse de Doctorat, Université de Perpignan, 334 p.
- Levrault, F., 2010. Changement climatique et irrigation, in *Présentation des méthodes et des résultats du projet Climator* (17-18 juin 2010, INRA Versailles), 73 p.
- Lionello, P., S. Cogo, M. B. Galati et al., 2008. The Mediterranean surface wave climate inferred from future scenario simulations. *Global and Planetary Change* **63**, 152–162.
- Martin, E. et D. Salas y Méliá, 2010. Scénarios de changement climatique -De l'échelle globale aux Pyrénées – Orientales. Présenté à : Réunion de clôture du projet VULCAIN (9 novembre 2010, Collioure).
- Maton, L., J. D. Rinaudo, I. Terrasson, S. Chazot, 2010. Demande en eau agricole -Impact du changement climatique et adaptation. Présenté à : Réunion de clôture du projet VULCAIN (9 novembre 2010, Collioure).
- Milano, M., 2010. Les impacts prévisibles du changement climatique sur les ressources en eau de quatre grands bassins versants Méditerranéens. Plan Bleu, Valbonne.
- Milano, M., D. Ruelland, S. Fernandez et al., 2011. Assessing the impacts of global changes on the water resources of the Mediterranean basin, in *Risk in Water Resources Management* (Symposium H03, 2011, Melbourne, Australia). IUGG2011, IAHS, **347**, 165–172.
- Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer, 2009. Cinquième Communication Nationale à la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques. France.
- Moisselin, J.M., M. Schneider, C. Canellas et al., 2002. Les changements climatiques en France au XXe siècle. *La Météorologie* **38**, 45–56.
- Moron, V. et F. Sabatier, 2007. IMPLIT -Impact des événements extrêmes (tempêtes et surcotes) sur les hydrosystèmes du littoral méditerranéen dans le cadre du changement climatique. Rapport final de recherche, partie scientifique.
- Nakicenovic N, Swart R (eds). 2000. Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press: Cambridge, UK and New York. 570 p.
- Neppel, L., 2010. Détecte-t-on des changements dans les séries de pluies, température et évapotranspiration, mesurées ces dernières années? Présenté à : Réunion de clôture du projet VULCAIN (9 novembre 2010, Collioure).
- Nicholls R.J., N. Marinova, J.A. Lowe et al., 2011. Sea - level rise and its possible impacts given a "beyond 4 °C world" in the twenty - first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* **369**, 1–21.
- Paran, F., D. Mimoun, D. Graillot, 2011. Biodiversité et fonctions des systèmes alluviaux face aux étiages sévères induits par le changement global. 2010 - 2012 -Volet hydraulique du projet Wetchange, in 7^e journée thématique de la ZABR. Changement climatique, biodiversité, invasion. Lyon : 2011.
- Parry, M.L., O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden, C. E. Hanson (eds), 2007. Glossaire, in *Bilan 2007 des changements climatiques – Conséquences, adaptations et vulnérabilité. Contribution du Groupe de travail II au quatrième rapport d'évaluation du GIEC*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Pedreros, R., S. Lecacheux, E. Delvallée et al., 2010. Mise en place d'une approche multi - modèles pour évaluer l'exposition du littoral languedocien aux submersions marines dans un contexte de changement climatique (Projet MISEEVA), in *Journées « Impacts du changement climatique sur les risques côtiers » – Recueil des actes*, BRGM, Orléans, France, 2010, 214 p.
- Perroud, M. et S. Goyette, 2010. Impacts of warmer climate on Lake Geneva water - temperature profiles. *Boreal Environment Research* **15**, 255–278.
- Poirel, A., F. Lauters, B. Desaint, 2008. 1977 - 2006: Trente années de mesures des températures de l'eau dans le Bassin du Rhône. *Hydroécologie Appliquée* **16**, 191–213.

- Pont, D., 2003. Conséquences potentielles du changement climatique sur les biocénoses aquatiques riveraines françaises. Rapport Final du Programme de Recherche GICC - Aquabio. Ministère de l'Environnement et du Développement Durable, Paris.
- Quintana Segui, P., 2008. Simulation hydrologique en région méditerranéenne avec SAFRAN - ISBA - MODCOU. Amélioration de la physique et évaluation des risques dans le cadre du changement climatique. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 210p.
- Quintana Segui, P., A. Ribes, E. Marti et al., 2010. Comparison of three downscaling methods in simulating the impact of climate change on the hydrology of Mediterranean basins. *Journal of Hydrology* **383** (1-2), 112–124.
- Quintana Segui, P., F. Habets, E. Martin, 2011. Comparison of past and future Mediterranean high and low extremes of precipitation and river flow projected using different statistical downscaling methods. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **11**, 1411–1432.
- Ricard, D. A.-L. Beaulant, J. Boé et al., 2009. Projet Cyprim, partie II : Impact du changement climatique sur les événements de pluie intense du bassin méditerranéen. *La Météorologie* **67**, 19–30.
- Richoux, P. et P. Lebreton, 2008. L'évolution climatique et son impact en Dombes. *Les cahiers de la Fondation Pierre Vérots* **1**.
- Rochard, E., 2007. Changement climatique, poissons migrateurs et milieux estuariens. Présenté à : Changements globaux : les enjeux pour l'eau (7 novembre 2007, Toulouse).
- Rochard, E. et G. Lassale, 2010. Conservation de la biodiversité et changement climatique, un nécessaire changement de paradigme -Le cas des poissons migrateurs amphihalins. *Sciences Eaux & Territoires* **3**, 104–109.
- Romani, M., C. Belair, M. Carreno, 2008. Répondre à l'élévation du niveau de la mer en Languedoc – Roussillon. *Zones Humides Infos* **59-60**, 15–18.
- Rosenzweig, C. et al., 2007. Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems, in *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press., M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden, et C. E. Hanson (eds). Cambridge, UK, 79–131.
- Sauquet, E., M. H. Ramos, Y. Souchon, 2007. Quelles incidences des hypothèses de changement climatique à prendre en compte dans la révision du SDAGE du bassin Rhône - Méditerranée? Cemagref.
- Sauquet, E., 2011. Contribution glaciaire française aux débits du Rhône.
- Solomon, S. et al., 2007. Résumé technique, in *Changements climatiques 2007: Les éléments scientifiques. Contribution du groupe de travail I au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur les changements climatiques*, Cambridge University Press., Cambridge, Royaume - Uni et New - York, Etats - Unis d'Amérique: Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller.
- Somot, S., F. Sevault, M. Déqué et al., 2008. 21st century climate change scenario for the Mediterranean using a coupled atmosphere - ocean regional climate model. *Global and Planetary Change* **63** (2-3), 112–126.
- Soubeyrou, J.M, J.-P. Vidal, J. Najac et al., 2011. Projet ClimSec: Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol. Rapport final du projet. Direction de la climatologie de Météo France.
- Spohr, C., 2011. Impacts à long terme du changement climatique sur le littoral métropolitain. Délégation au Développement Durable du Commissariat Général au Développement Durable, 55.
- Taylor, R. et C. Tindimugaya, 2011. The impacts of climate change and rapid development on weathered crystalline rock aquifer systems in the humid tropics of sub - Saharan Africa: evidence from south - western Uganda, in *Climate change effects on groundwater resources, a global synthesis of findings and recommendations*, H. Treidel, J. L. Martin - Bordes, J. J. Gurdak, (eds), 2011.
- Tissot, L. et Y. Souchon, 2010. Synthèse des tolérances thermiques des principales espèces de poissons des rivières et fleuves de plaine de l'ouest européen. *Hydroécologie Appliquée* **17**, 17–76.
- Treidel, H., J. L. Martin - Bordes, J. J. Gurdak (eds.), 2011. Major science findings, policy recommendations, and future works, in *Climate change effects on groundwater resources, a global synthesis of findings and recommendations*, H. Treidel, J. L. Martin - Bordes, J. J. Gurdak, (eds), 2011.
- Verger, F., 2008. Elévation du niveau de la mer et terres basses du littoral. *Zones Humides Infos* **59-60**, 11–13.
- Vernoux, J.F. et J. J. Seguin, 2011. Etablissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines -année 1. BRGM, rapport BRGM/RP-59286-FR.

- Vinchon, C., A.L. Agenais, Y. Balouin et al. , 2010. MISEEVA: Vulnérabilité du système côtier à la submersion marine -Hypothèses et scénarios transdisciplinaires pour évaluer une vulnérabilité future dans le cadre d'un changement global, in *Journées « Impacts du changement climatique sur les risques côtiers » -Recueil des actes*, BRGM, Orléans, France, 2010, 214 p.
- Vinchon, C., Y. Balouin, D. Idier et al., 2008. La réponse du trait de côte au changement climatique: évolution des risques côtiers en Aquitaine et en Languedoc - Roussillon dans le siècle à venir, in *Actes du colloque international pluridisciplinaire « Le littoral: subir, dire, agir »*, Lille, France (16-18 janvier 2008).
- Whitehead, P.G., R. L. Wilby, R. W. Battarbee et al., 2009. A review of the potential impacts of climate change on surface water quality. *Hydrological Sciences Journal* **54** (1), 101–123.
- Yates Michelin, M., G. Le Cozannet, Y. Balouin, 2010. Etat des connaissances sur les effets potentiels du changement climatique sur les aléas côtiers en Languedoc-Roussillon. BRGM, Janvier 2011. 86 p.
- Yechieli, Y., U. Kafri, F. Shalev, 2011. The effect of climate and anthropogenic sea level changes on Israeli coastal aquifers, in *Climate change effects on groundwater resources, a global synthesis of findings and recommendations*, H. Treidel, J. L. Martin - Bordes, J. J. Gurdak (eds), 2011.

Annexe 1

Tableau récapitulatif des projections robustes et des projections incertaines

Type d'impacts	Projections robustes	Projections incertaines
Climat	<ul style="list-style-type: none"> -Hausse généralisée des températures annuelles <i>+ 3 à 5 °C en 2080</i> -Baisse des précipitations estivales -Baisse des précipitations moyennes sur Rhône - Méditerranée à long terme <i>- 5 à - 20 %</i> -Baisse conséquente des précipitations estivales en Méditerranée <i>- 20 à - 60 % en 2080</i> -Forte augmentation du nombre de jours caniculaires <i>10 à 25 jours/an en 2080</i> -Hausse de l'ETP -Intensification et hausse de la fréquence des sécheresses estivales -Augmentation de la fréquence des sécheresses agricoles courtes en 2050. -Augmentation de la fréquence et intensification des sécheresses météorologiques d'été et d'automne à long terme. -Forte baisse du couvert neigeux à basses et moyennes altitudes. Baisse particulièrement marquée au sud des Alpes, dès l'horizon 2030 et qui s'accroît à long terme. <i>Durée d'enneigement - 40 à - 60 % dans le sud des Alpes en 2030, - 15 à - 30 % dans le nord des Alpes.</i> -Baisse modérée de l'enneigement en haute altitude, plus marquée au sud. <i>Durée d'enneigement - 10 à - 25 % en 2030 et jusqu'à - 45 % en 2080 au sud. - 10 à - 25 % au nord en 2080.</i> 	<ul style="list-style-type: none"> -Plus d'incertitudes sur les évolutions saisonnières de températures -Hausse des précipitations hivernales -Intensification des événements pluviométriques en hiver -Aggravation des sécheresses agricoles à l'horizon 2020 -Plus de sécheresses longues -Faible baisse de la durée d'enneigement dans les Alpes du Nord à long terme

Type d'impacts	Projections robustes	Projections incertaines
Débits et ressources en eau	<p>-Baisse des débits en été et en automne <i>- 20 à - 50 %</i></p> <p>-Changement de régime des cours d'eau à influence nivale <i>Pic de fonte avancé d'un à deux mois</i></p> <p>-Etiages plus sévères, plus longs</p> <p>-Baisse de l'équivalent en eau de la neige à 1200 m dès l'horizon 2030. Projection plus robuste pour 2080 avec une très forte baisse au sud des Alpes. <i>Quasi - disparition de la neige au printemps à 1200m</i></p> <p>-Baisse des débits d'été et d'automne des affluents non méditerranéens du Rhône (Loue, Ognon, Saône, Isère...) <i>- 20 à - 50 % en 2050</i></p> <p>-Forte baisse des débits estivaux de l'Isère et de la Durance <i>Jusqu'à - 75 % en juin - juillet en 2050</i></p> <p>-Baisse des modules des fleuves du Languedoc - Roussillon à long terme</p> <p>-Forte baisse des débits d'été des fleuves du Languedoc Roussillon à long terme <i>-30 à - 80 % en 2080 selon le scénario A2</i></p>	<p>-Hausse des débits en hiver</p> <p>-Modules plutôt en baisse mais incertitudes en fonction des contrastes saisonniers</p> <p>-Stabilité voir hausse des débits d'hiver du Rhône</p> <p>-Baisse de l'équivalent en eau de la neige au nord - est des Alpes : fortes incertitudes sur l'amplitude de la baisse</p> <p>-Incertitudes sur l'équivalent en eau de la neige en haute altitude Stabilité ou baisse dans le nord des Alpes, baisse significative au sud.</p> <p>-Stabilité ou hausse des débits d'hiver des affluents non méditerranéens du Rhône</p> <p>-Hausse des débits d'hiver de l'Isère et de la Durance</p> <p>-Hausse possible des précipitations et des débits en hiver dans le Sud - Est (Var, Côte d'Azur) mais fortes incertitudes</p> <p>-Incertitudes sur l'évolution des débits d'hiver des cours d'eau méditerranéens</p> <p>-Baisse de la recharge des nappes incertaine, pourrait être plus marquée dans les Alpes et en Corse</p>
Demandes en eau	<p>-Hausse du déficit hydrique des plantes cultivées</p>	<p>-Hausse des besoins en eau d'irrigation (variable selon les cultures et la localisation)</p> <p>-Hausse des besoins en eau de refroidissement (impact déduit mais non modélisé)</p>

Type d'impacts	Projections robustes	Projections incertaines
Hydrobiologie - qualité	<ul style="list-style-type: none"> -Hausse de la température de l'eau des cours d'eau -Modifications des aires de répartition des poissons (déplacement vers le nord et en altitude) -Forte diminution de l'aire de distribution potentielle des truites 	<ul style="list-style-type: none"> -Charges sédimentaires plus fortes si intensification des pluies -Hausse du risque d'eutrophisation -Diminution des aires de distribution de la plupart des poissons migrateurs (à regarder par espèces et par bassin) -Hausse des coûts de l'assainissement
Ecosystèmes marins	<ul style="list-style-type: none"> -Hausse de la température de l'eau de mer <i>+ 3 °C en 2080 dans un scénario pessimiste</i> -Déplacement vers le nord des espèces de la mer Méditerranée -Acidification de la mer <i>pH à 7,7 en 2100 dans un scénario tendanciel</i> 	<ul style="list-style-type: none"> -Hausse du nombre d'espèces menacées sur les côtes méditerranéennes -Baisse de la production primaire phytoplanctonique
Zones humides et plans d'eau	<ul style="list-style-type: none"> -Elargissement et formation de nouveaux graus (étangs littoraux) -Migration des étangs littoraux vers l'intérieur 	<ul style="list-style-type: none"> -Hausse de la salinité des étangs littoraux (dépend notamment de la taille des étangs) -Assecs plus fréquents et plus longs dans les zones humides alluviales et internes -Risque d'eutrophisation dans les étangs -Assecs plus fréquents et plus longs des mares temporaires menant à des extinctions d'espèces Perturbation du fonctionnement des tourbières
Littoral	<ul style="list-style-type: none"> -Elévation du niveau de la mer, menant à des submersions permanentes et à l'augmentation et au changement de répartition des surfaces affectées par des submersions temporaires -Hausse de l'érosion sur le littoral Languedocien -Baisse des apports sédimentaires des fleuves méditerranéens 	<ul style="list-style-type: none"> -Fortes incertitudes sur l'amplitude de l'élévation du niveau marin : + 18 cm à + 5 m -Modification du régime de tempêtes sur les côtes : légère baisse d'intensité ? -Surcotes et décotes plus fréquentes -Evolution incertaine du régime des vagues et de la houle