GREC-PACA

Groupe régional d'experts sur le climat en Provence-Alpes-Côte d'Azur

Cahier thématique du groupe de travail « Ressources en eau »

Les ressources en eau et le changement climatique en Provence-Alpes-Côte d'Azur

Juillet 2017

air

Préfet de la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur

Région Provence-Alpes-Côte d'Azur

ADEME Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

PLAN CLIMAT AGENDA 21 Région Provence-Alpes-Côte d'Azur

Ce cahier thématique a été réalisé par le Groupe régional d'experts sur le climat en Provence-Alpes-Côte d'Azur (GREC-PACA).

Il a été coordonné par l'association A.I.R. Climat (Marie Lootvoet et Antoine Nicault), qui a pour mission d'animer le GREC-PACA, avec la contribution éditoriale d'Aurore Aubail.

Le projet bénéficie d'un financement au titre de la Convention État - Région Provence-Alpes-Côte d'Azur - ADEME.

Un soin tout particulier a été apporté au choix des polices et à la mise en page dans le respect des principes d'éco-conception.

Avertissement : ce cahier thématique approfondit les notions abordées dans la première publication du GREC-PACA intitulée *Provence-Alpes-Côte d'Azur, une région face au changement climatique*.

Réalisation : La Sud Compagnie – Juillet 2017

Crédits photos et dessins
Couverture : ©Maud Naulier / photo 1 : ©Antoine Nicault / photo 2 : ©EP / photo 3 : ©Nicolas Maughan / photo 4 : ©Bruno Wilhelm / photo 5 : ©BRGM - J. Casanova / photo 6 : ©MRE - Georges Olivari / photo 7 : ©MRE - Georges Olivari / photo 8 : ©MRE - Georges Olivari / photo 9 : ©MRE - Georges Olivari / photos 10 et 11: ©Tour du Valat - Patrick grillas / photo 12 : ©LPED – Romain Cailliau / photo 13 : ©Patrice Estachy / photo 14 : ©LPED -Marie Jacqué / pages intercalaires - pages 4, 25 : ©Antoine Nicault / dessins - pages 15, 17, 34, 41 : ©the noun project / page 49 : ©waterfootprint.org

Table des matières

Avant-propos 6

Introduction générale 7

1. Les eaux de surface : leur sensibilité vis-à-vis du climat et de ses changements 8

1.1. L'intérêt du suivi instrumental : 50 ans d'observations sur le Real Collobrier 9

1.2. Les évolutions possibles de la ressource en eau dans un contexte de changement climatique : exemple d'une étude d'impact, le projet R^2D^2 2050 11

1.3. L'influence du changement climatique sur la température des cours et des plans d'eau 13

1.4. L'influence du changement climatique sur l'évolution de l'humidité du sol et des sécheresses 14

1.5. L'influence du changement climatique sur l'évolution du manteau neigeux dans les Alpes du Sud 15

2. La variabilité historique des ressources en eau 18

2.1. Apport des archives textuelles et des premières données instrumentales dans la connaissance des sécheresses régionales passées 18

2.2. Reconstitution historique des séries hydrologiques 20

2.3. Les sédiments lacustres : 1300 ans d'histoire des crues dans les Alpes du sud 22

2.4. Lien climat - glacier - ressource en eau 24

3. Les influences du changement climatique sur les eaux souterraines 26

3.1. Les aquifères en PACA 26

3.2. Impact du changement climatique sur les aquifères 27

3.3. L'analyse du passé 27

3.4. Les projections climatiques sur la recharge naturelle 28

3.5. L'intrusion saline, pollution des eaux continentales 29

4. Les écosystèmes aquatiques sont-ils menacés par le changement climatique ? 30

4.1. Changement climatique, pression anthropique et manque de connaissances scientifiques participent à la vulnérabilité des écosystèmes aquatiques 30

4.2. L'étiage estival : une phase critique des milieux aquatiques face aux changements climatiques 32
4.3. Les zones humides et le changement climatique 34

5. Les conséquences du changement climatique sur les usages de l'eau 36
5.1. Les multiples facettes de l'eau agricole au prisme du changement climatique 36
5.2. Les plantes auront-elles besoin de plus d'eau ? 38
5.3. Les conséquences sur la production électrique 39

6. La Durance, lieu d'une gouvernance multi-niveaux adaptée aux défis futurs 42
6.1. Un territoire de l'eau méditerranéen, contrasté et sous pression 42
6.2. Un territoire de l'eau historiquement façonné par les transferts d'eau 43
6.3. Vers une gouvernance intégrée et multi-niveaux pour coordonner la gestion de l'eau à différentes échelles territoriales et entre les secteurs d'usage 45

7. La gestion de l'eau face au changement climatique : un pas vers l'adaptation 46
7.1. Caractérisation des bénéfices économiques liés à la préservation des eaux souterraines 46
7.2. Les ressources non conventionnelles peuvent-elles constituer une piste d'adaptation ? 47
7.3. L'eau virtuelle, un moyen d'évaluer l'impact des activités humaines sur la ressource en eau 49

Conclusion générale 50

Les contributeurs 51

Avant-propos

Le Groupe régional d'experts sur le climat en Provence-Alpes-Côte d'Azur (GREC-PACA), animé par l'Association pour l'innovation et la recherche au service du climat (A.I.R. Climat), est composé de spécialistes du climat et de chercheurs de toutes les disciplines. Il a pour vocation de décrypter les résultats scientifiques et les enjeux liés au changement climatique avec l'objectif d'informer et de sensibiliser le public visé à l'échelle régionale et locale. Afin d'apporter des réponses spécifiques, le Comité régional d'orientations (CRO) a constitué des groupes de travail thématiques (GTT) composés de chercheurs de plusieurs disciplines et travaillant sur des sujets en lien avec le climat. Après une première publication générale[1], rédigée à l'occasion de la COP21, ces groupes ont contribué à la rédaction de cahiers[2] (climat, agriculture et forêt, mer et littoral, ville) destinés aux décideurs et gestionnaires de territoires de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur : élus, ingénieurs et techniciens des collectivités locales, des espaces protégés et des grands équipements, associations, entreprises...

Ce cahier aborde la ressource en eau au regard de sa sensibilité au climat et à ses changements. L'eau revêt une importance capitale dans les régions méditerranéennes. Les problématiques liées à l'eau sont caractérisées par l'importance vitale de cette ressource pour le développement des sociétés, par la multiplicité des usages (alimentation en eau potable, irrigation, énergie ...) et donc des acteurs concernés, mais aussi par l'équilibre à trouver entre son utilisation et les besoins des milieux naturels (qualité des eaux, biodiversité). Cette ressource est fragile. Les experts du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) prévoient, au cours du siècle à venir, une modification des précipitations, une diminution de la couverture neigeuse et de l'eau stockée dans les glaciers, ainsi qu'une altération de la qualité des eaux. En région Provence-Alpes-Côte d'Azur, ces prévisions viennent s'ajouter à une forte pression liée à la période de sècheresse estivale qui caractérise notre climat méditerranéen, mais aussi à l'évolution démographique, économique et urbaine qui conduit à un partage en tension de la ressource.

Face à ces changements, qui auraient des conséquences graves sur les plans socioéconomiques et environnementaux, les premières mesures d'adaptation ont déjà été mises en œuvre. En région PACA, à la suite d'une démarche partenariale pour l'élaboration d'un schéma régional de la ressource en eau, il a notamment été décidé de créer un lieu d'échanges et de concertation sur les politiques de gestion de l'eau : l'AGORA (Assemblée pour une Gouvernance Opérationnelle de la Ressource en eau et des Aquifères). Son but est de créer les conditions optimales pour anticiper au mieux la gestion de la ressource en eau, améliorer le partage d'informations et permettre les conditions d'un partage durable. Ce cahier, qui a pour objectif de faire un bilan des connaissances actuelles sur les effets du changement climatique sur la ressource en eau en région PACA, puis de le diffuser vers les gestionnaires et aménageurs, s'inscrit directement dans le cadre de cette initiative.

Le champ est vaste et ce cahier qui ne peut être exhaustif livre un panorama régional. Même si des problématiques principalement locales n'ont pas été traitées, la trentaine de contributeurs a réalisé un riche cahier thématique. Ainsi, la gouvernance, les approches historiques, les scénarios sur l'évolution future de la ressource (eaux de surface et eaux souterraines), les conséquences attendues sur les écosystèmes aquatiques et les usages sont abordés. Des solutions et des projets en faveur de l'adaptation sont également présentés.

Photo 1. La Bévéra (Sospel, 06)

[1] *Provence-Alpes-Côte d'Azur, une région face au changement climatique*, juin 2015 : http://www.air-climat.org/publications/la-region-paca-face-au-changement-climatique

[2] Parus en 2016 et 2017 : http://www.air-climat.org/publications/

Introduction générale

Traiter de l'eau en Provence, c'est inexorablement se confronter à des paradoxes : eau cachée des sources ou cascade débordante quand elle s'abat en orages, eau discrète et frêle des fontaines ou majestueuse et tonitruante dans ses torrents, ou encore région au paysage sec mais qui ne manque pas d'eau.

Si cette région ne manque pas d'eau, c'est bien parce qu'elle a souffert historiquement de la sécheresse. Des glaciers des Alpes aux villes des franges côtières l'eau circule, non pas dans un continuum naturel mais grâce à de nombreux aménagements, dont certains peuvent être datés de l'époque romaine. Dériver l'eau, la conduire là où elle faisait défaut, a été l'œuvre des différentes sociétés locales qui nous ont précédées. Les procédés utilisés ont été aussi ingénieux que nécessaires, captage de sources, creusement de puits, de galeries souterraines, construction de restanques, et surtout édification de canaux utilisés d'abord pour les moulins puis pour l'agriculture et l'énergie électrique.

Les derniers grands aménagements hydrauliques de la Durance et du Verdon dans les années 1960-70 (barrages de Serre-Ponçon et de Sainte Croix ; canal usinier EDF et canal de Provence), ont sécurisé l'accès à la ressource pour une grande partie de la région. C'est donc grâce à un long et laborieux affranchissement des conditions naturelles du territoire par les sociétés locales que l'on peut aujourd'hui se féliciter d'une disponibilité largement suffisante de la ressource en eau pour les différents usages régionaux.

Ces aménagements ont fortement réduit les inégalités territoriales d'accès à la ressource en eau et ont permis, grâce aux stockages, de s'affranchir d'une partie des contraintes saisonnières. Certaines années, les tensions restent toutefois perceptibles durant la période estivale la plus consommatrice en eau.

Pour certains territoires de la région hors des périmètres desservis par ces transferts, en particulier sur le littoral, les ressources souterraines jouent un rôle essentiel dans l'approvisionnement en eau potable des usagers.

Nappes alluviales des rivières ou aquifères karstiques sont des ressources diversement sollicitées sur la région, certaines pouvant déjà être en limite d'exploitation, d'autres l'étant faiblement du fait de la méconnaissance de leur potentiel. Certains aquifères constituent ainsi de potentiels gisements, importants pour la diversification et la sécurisation des territoires. Cependant, le fait que la majorité des aquifères productifs karstiques se situe sur le littoral et les bassins vauclusiens, territoires les plus peuplés, les rend d'autant plus vulnérables aux pressions et aux pollutions. Les risques liés à la remontée du biseau salé dans certains aquifères littoraux ont déjà pu conduire à privilégier des aménagements de transfert d'eaux superficielles coûteux pour soulager ces ressources locales.

L'ensemble des aménagements hydrauliques, principalement à partir de l'axe Durance-Verdon, a permis un transfert d'eau de l'arrière-pays, historiquement rural, vers des espaces littoraux fortement urbanisés, ce qui pose la question des capacités d'approvisionnement pour les usages domestiques, le développement économique et industriel et le maintien des activités touristiques et agricoles dans les territoires situés en amont.

Depuis la loi sur l'eau de 1992, un nouvel « usager » est apparu : le milieu. En effet, cette loi dans son préambule, précise : « la répartition de la ressource doit être équilibrée entre les usagers et le respect du fonctionnement des milieux aquatiques ». Cette déclaration concrétise le passage de la gestion de l'eau à la gestion des milieux. En région PACA plus qu'ailleurs, la détermination des débits biologiques a fait l'objet de discussions longues et âpres, où souvent le besoin du milieu apparait comme un frein au développement économique. Dans certains cas, les compromis trouvés sont difficilement acceptés par toutes les parties, et de ce fait sont souvent fragiles et suceptibles d'être remis en cause lors de sécheresses exceptionnelles. Les changements climatiques qui s'annoncent, seront potentiellement source de nouvelles tensions sur la répartition de la ressource.

Comment penser aujourd'hui le partage de la ressource au regard de ces nouveaux enjeux économiques et écologiques ? La culture provençale du partage n'est jamais allée de soi et les conflits qui jalonnent son histoire sont là pour rappeler que la gestion de la ressource ne peut se faire que de manière collective avec compromis sur les besoins de chaque usage. L'affranchissement progressif de conditions climatiques rudes (sécheresse et pluviométrie violente) soulève aujourd'hui un nouveau problème, celui de l'amnésie. Puisque je ne manque pas d'eau pourquoi me soucierais-je de son partage ou de risques potentiels de pénurie ? L'eau arrive jusqu'à mon robinet, alors pourquoi me questionnerais-je sur l'impact des transferts sur les milieux ? Et puis, l'eau consommée est finalement infime puisque je rejette celle-ci dans le milieu après usage. Voici le type de raisonnement que beaucoup d'entre nous partagent et qui nécessite, sans doute plus que par les siècles passés, de questionner la qualité et l'impact des différents usages sur les milieux naturels.

De même, si les transferts d'eau ont permis jusqu'à présent de pallier les inégalités de disponibilité locale, n'y-a-t-il pas aussi des limites à leur développement ? Le Rhône n'est pas loin, les solutions techniques de dessalement et de réutilisation des eaux usées traitées sont des réponses locales possibles, mais faut-il sans cesse raisonner en termes de ressource mobilisable en fonction des besoins, ou bien repenser les besoins en fonction de la ressource disponible ? Comment raisonner sur le long terme, en tenant compte à la fois de l'histoire culturelle spécifique à notre territoire régional, des transformations économiques et démographiques potentielles mais aussi du contexte climatique à venir ? C'est à cet ensemble de questions que ce cahier tente de répondre.

1. Les eaux de surface : leur sensibilité vis-à-vis du climat et de ses changements

La variabilité des écoulements résulte de nombreux facteurs. Des facteurs d'origine climatique bien sûr, tels que les précipitations, la température, l'évapotranspiration... mais aussi d'autres facteurs physiques tels que le relief, la nature des sols, leur occupation, etc. En France, et plus particulièrement en PACA, la variabilité de ces facteurs est grande. Un bassin versant peut se situer dans un secteur sous influences multiples (climat méditerranéen, montagnard ou continental, configuration de plaines ou de montagnes, présence de zones plus ou moins anthropisées, zones karstiques, etc.) qui se combinent avec la variabilité spatio-temporelle des écoulements dans les cours d'eau. La variabilité temporelle hérite pour une grande partie de celle présente dans le climat auquel le bassin versant est soumis, et est résumée souvent par la notion de régime hydrologique. Cette notion permet de classer les cours d'eau en fonction de la saisonnalité des écoulements, et donc de la répartition des débits au cours de l'année, fonction de différents processus, qu'ils soient d'origine climatique (pluie, évaporation, neige...) ou pas (échanges nappes-rivières...).

Le bassin de la Durance (14 300 km^2, soit 45 % de la surface de la région PACA) illustre bien la complexité de ces systèmes. Il peut être schématiquement divisé en trois entités qui sont caractérisées par des régimes hydrologiques différents. Tout d'abord, la haute Durance (partie alpine) qui est caractérisée par un régime hydrologique de type nival avec des écoulements maximaux au printemps et faibles en hiver. L'eau de la fonte des neiges et les apports, plus tardifs, des petits glaciers et névés fournissent l'essentiel des débits de printemps et d'été. Ensuite, la moyenne Durance, caractérisée par un régime hydrologique pluvio-nival avec des apports qui se concentrent au printemps, les pluies d'automne qui constituent un maximum secondaire, et la baisse des eaux qui apparait en juillet et s'accentue en août et septembre. Et enfin, la basse Durance, caractérisée par un climat de type méditerranéen, avec des étés et des hivers secs, et des pluies essentiellement concentrées à l'automne et au printemps. L'étiage est très marqué en août et septembre ; il existe également en hiver mais de façon moins prononcée.

La Durance est également fortement marquée par l'anthropisation. Les aménagements hydrauliques (canaux) et hydroélectriques (barrages) réalisés à partir des années 60 ont radicalement influencé et modifié son régime hydrologique. L'anthropisation peut aussi modifier le régime hydrologique d'autres cours d'eau de façon assez importante, comme, par exemple, la Touloubre qui reçoit de mars à octobre, dans sa partie aval, de nombreux apports provenant des canaux d'irrigation (dont l'eau provient de la Durance). Ainsi sur l'aval, l'étiage est plutôt hivernal et dure pendant toute la période de chômage des canaux, alors que sur la partie amont, l'étiage estival est très marqué et accentué par les prélèvements et les dérivations. Les caractéristiques physiques des bassins jouent également un rôle important sur la variabilité spatiale du régime hydrologique. Les cas de l'Argens et de l'Huveaune sont, à ce titre, instructifs ; alors que l'Huveaune, comme le Gapeau, est privé d'une partie des apports par infiltration profonde vers la mer, accentuant ainsi les étiages estivaux, l'Argens bénéficie, quant à lui, d'apports karstiques dans ses secteurs calcaires et possède ainsi une bonne hydraulicité en période estivale tandis que ses affluents subissent des étiages très sévères.

Ainsi, la grande variété de cours d'eau, la complexité climatique, géologique et topographique de la région associées à l'anthropisation évolutive du système et aux incertitudes liées à l'évolution des précipitations dans le futur, rendent difficiles les exercices de prospectives concernant l'évolution de la ressource en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Dans ce contexte de changement climatique, les efforts de la recherche concernant l'instrumentation des cours d'eau, l'étude et la modélisation des hydrosystèmes, les études d'impact et les simulations climatiques sont plus que jamais nécessaires pour mieux prévoir et anticiper l'évolution future de la ressource en eau au cours des prochaines décennies.

Photo 2. Le Toulourenc (84)

1.1. L'intérêt du suivi instrumental : 50 ans d'observations sur le Réal Collobrier

On compte en France près de 3000 stations de mesure de débits, dont les durées d'enregistrement sont très variables (www.hydro.eaufrance.fr). Parmi ces stations de mesures, moins de 200 ont au moins 50 ans de données. C'est finalement très peu lorsque l'on veut étudier des phénomènes extrêmes ou bien pour apprécier une éventuelle non stationnarité des séries de mesures. De plus, ces quelques longues et précieuses séries de mesures sont plus fréquemment associées à des stations dites « historiques » sur les grands cours d'eau, et ont subi des altérations anthropiques (aménagements hydrauliques, urbanisation, usages). C'est pour ces raisons qu'il est relativement rare de trouver de longues séries de données, sur des petits bassins versants ayant subi peu de pressions anthropiques, sur lesquelles les études de stationnarité peuvent s'avérer pertinentes.

C'est le cas des données du bassin versant de recherche du Réal Collobrier. Ce bassin versant, affluent du Réal Martin lui-même affluent du Gapeau, est situé sur la commune de Collobrières dans le massif des Maures (Var). Il est équipé de 10 stations limnimétriques[3] contrôlant des bassins versants emboités de superficies allant de 1,5 à 70 km², et ce depuis 1967 (Figure 1). Ce bassin est également équipé de 15 pluviographes. Les données fournies depuis 50 ans sur ce bassin versant sont riches d'enseignements sur la variabilité des débits, même à une échelle d'espace relativement fine.

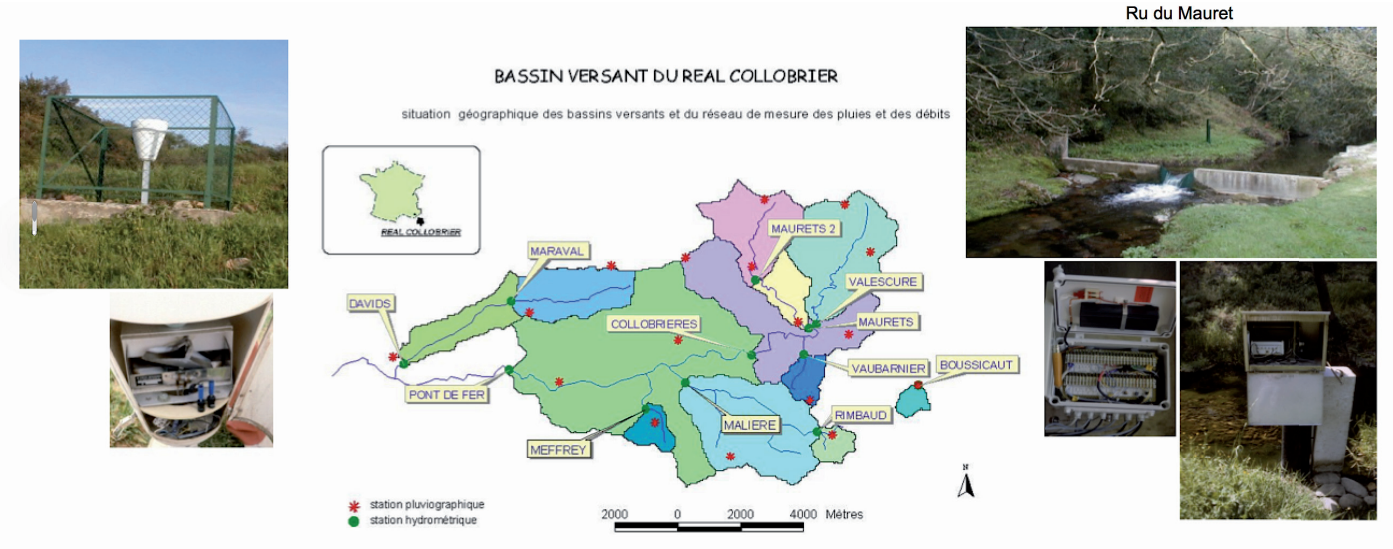


Figure 1. Réseau de mesure sur le Réal Collobrier (83)

Les enseignements du suivi sur la variabilité des écoulements

Le suivi instrumental a permis de mettre en évidence la forte variabilité des écoulements annuels moyens dans l'espace. Ils varient entre 145 mm et 650 mm, alors que la pluviométrie moyenne des bassins associés varie entre 800 et 1200 mm. Cette variabilité visible à l'échelle d'un bilan annuel est également marquée sur les épisodes de crues. La pluviométrie n'explique qu'en partie les fluctuations des écoulements, le reste de la variabilité est expliquée, entre autres, par les caractéristiques des bassins versants. L'explication de ces différences de comportement semble être liée à la profondeur et la texture des sols ainsi qu'à la nature de la roche mère plus ou moins altérée.

Par exemple, avec une roche mère (substratum) peu altérée, le bassin sud ne possède que peu de capacité de stockage et donc réagit fortement aux pluies et ne permet pas d'assurer un soutien d'étiage en été. En revanche, la partie nord-est présente une roche mère fortement altérée, avec une forte capacité d'infiltration. Cette particularité conduit à une réaction plus lente et moins productive du bassin en période de crue et à un soutien d'étiage marqué par la présence de nombreuses sources assurant un débit pendant toute la période d'été. Ces observations, facilitées et mesurables grâce au suivi instrumental mis en place en différents points du bassin, mettent en avant le fait que la variabilité des processus hydrologiques est d'autant plus marquée que l'on s'intéresse à des échelles fines, alors même que l'observation à ces échelles est particulièrement rare.

[3] Une station limnimétrique permet l'enregistrement et la transmission de la mesure de la hauteur d'eau (en un point donné) dans un cours d'eau

Les enseignements du suivi sur la non stationnarité des données hydro-climatiques

La disponibilité de 50 années d'observations permet d'effectuer des tests de tendance pour juger de la stationnarité, ou non, des données hydro-climatiques enregistrées sur le bassin versant. Sur le bassin du Réal Collobrier, on observe une tendance significative à la baisse des débits mensuels moyens de mars et avril. Ce résultat est cohérent avec les autres études réalisées dans la région qui montrent une augmentation des étiages pour les cours d'eau du sud de la France, avec des périodes de début d'étiage plus précoces. La non stationnarité des processus hydrologiques est également visible à travers la paramétrisation de modèles pluie-débit (Zoom 1) qui montre une tendance à l'accentuation de la diminution des débits. Ce point est aussi lié à la non linéarité des processus, pouvant conduire à une amplification des tendances climatiques. Conclure sur l'impact du changement climatique sur les écoulements reste difficile même avec des chroniques relativement longues. Malgré tout, les bassins comme le Réal Collobrier, soumis à une faible anthropisation, sont de bons candidats pour étudier l'impact du changement climatique sur l'évolution des écoulements et des compléments nécessaires aux études d'impacts. En effet, les données observées en différents points du réseau hydrographique, de ce bassin relativement petit, montrent que la variabilité spatio-temporelle des débits peut être très marquée à des échelles fines, mais aussi qu'elle dépend à la fois du climat et de la nature des sols et de la roche mère et donc des caractéristiques physiques du bassin versant.

ZOOM 1
La modélisation hydrologique

Un modèle hydrologique, appelé communément modèle pluie-débit, est un outil numérique de représentation d'une partie du cycle de l'eau à l'échelle d'un bassin versant. Il permet de transformer des séries temporelles de précipitations, de températures de l'air d'un bassin versant (les entrées du modèle, descriptives du climat) en une série temporelle de débits (la sortie du modèle). Cette transformation est souvent divisée en deux parties, la production et le transfert (ou routage). La production vise à réaliser des bilans d'eau à l'échelle du bassin versant, permettant notamment de répartir la précipitation brute observée (la totalité de la pluie qui est tombée sur le bassin versant étudié) en pluie «nette» (la part de la pluie brute qui participe concrètement au débit du bassin), en quantité d'eau évapotranspirée (part de la pluie brute qui retourne dans l'atmosphère par évaporation ou transpiration des plantes) et en quantité d'eau stockée par le bassin versant. L'étape de transfert consiste ensuite à répartir dans le temps la quantité d'eau participant au débit du bassin versant étudié.

De nombreux modèles hydrologiques ont été développés depuis la fin des années 1960. Le choix du type de modèle à utiliser dépend généralement de l'objectif de modélisation et des données d'entrée disponibles. Les modèles diffèrent par la manière de représenter les processus. Ils sont construits soit sur des relations mathématiques directes établies entre les entrées et les sorties du bassin versant : ce sont les modèles empiriques, soit en représentant les principaux processus hydrologiques sans utiliser les lois physiques concernées : ce sont les modèles dits conceptuels, ou bien en utilisant les lois physiques régissant les processus hydrologiques : ce sont les modèles à base physique. Les modèles diffèrent également dans leur façon de représenter l'espace. Les modèles globaux ne prennent pas en compte la variabilité spatiale au niveau du bassin, les modèles semi-distribués divisent le bassin en entités spatiales et les modèles distribués le divisent en maillage régulier. Dernière discrimination dans les modèles : le temps, toutes les échelles allant de l'infra horaire au pluriannuel peuvent être utilisées.

Un modèle hydrologique peut être utilisé dans plusieurs contextes : prévoir les crues et les étiages, prédéterminer les débits extrêmes en crue ou en étiage, réaliser des études d'impact anthropique sur l'hydrologie (construction d'aménagements hydrauliques (barrage par exemple), changements d'occupation du sol, etc.), ou bien des études d'impact de changements climatiques sur l'hydrologie, et enfin combler des lacunes dans les données de débits et reconstituer des séries de débits historiques.

1.2. Les évolutions possibles de la ressource en eau dans un contexte de changement climatique : exemple d'une étude d'impact, le projet R²D² 2050

Cette question est abordée par les études d'impact, qui ont pour objectif de quantifier les évolutions d'un système (ici, le fonctionnement du bassin versant et sa composante « débit ») soumis à une perturbation de ces entrées (ici, le climat). De telles études ont été menées en France depuis la fin des années 1990. Elles ont eu pour domaine d'application le territoire métropolitain ou des secteurs spécifiques sur des grands bassins versants emblématiques pour faire apparaitre des enjeux locaux (exemples : la gestion des crues pour la Seine ; le partage de la ressource sur des territoires déficitaires pour la Garonne). Elles se différencient notamment par les hypothèses sur le climat portées par les scénarios d'émission de gaz à effet de serre, les projections climatiques globales et leur déclinaison régionale... et les modèles d'impact qui sont alimentés par les visions du futur : les modèles hydrologiques (Cf. Zoom 1). Cette multiplicité d'hypothèses rend difficile une stricte comparaison des conclusions. En outre, chaque modèle ayant sa sensibilité propre, l'intensité des changements attendus diffère d'une étude à une autre.
Néanmoins, en 2016, il est possible de dégager des tendances « lourdes » sur le territoire métropolitain :

- des modifications du cycle hydrologique avec une intensité croissante avec la concentration en gaz à effet de serre et l'horizon considéré, à l'image de ce qui est envisagé pour le climat ;
- un pourtour méditerranéen qui apparait comme un « hot spot », c'est-à-dire parmi les régions les plus vulnérables aux changements climatiques avec des conséquences notables sur les activités humaines ;
- une baisse globale de la ressource en eau à l'échelle annuelle et principalement en période estivale ;
- une intensification des contrastes saisonniers avec des étiages estivaux plus sévères, pour les bassins au régime piloté par les précipitations ;
- une modification des régimes des rivières de montagne avec une réduction de l'épaisseur du manteau neigeux, une fonte plus précoce et une composante nivale à la baisse ;
- des projections cohérentes entre études sur les composantes du bilan en eau lorsque ces dernières sont contrôlées de manière univoque par la température de l'air (par exemple, la neige).

Et des éléments encore incertains :

- l'absence d'évolutions sur le régime des crues, partagée par les études d'impact, conséquence de projections sur les pluies extrêmes non concordantes.

Pour notre région, les études les plus récentes envisagent une diminution du débit moyen annuel (module) entre -10 et -30 % entre la période 1961-1990 et 2046-2065 (Figure 2).

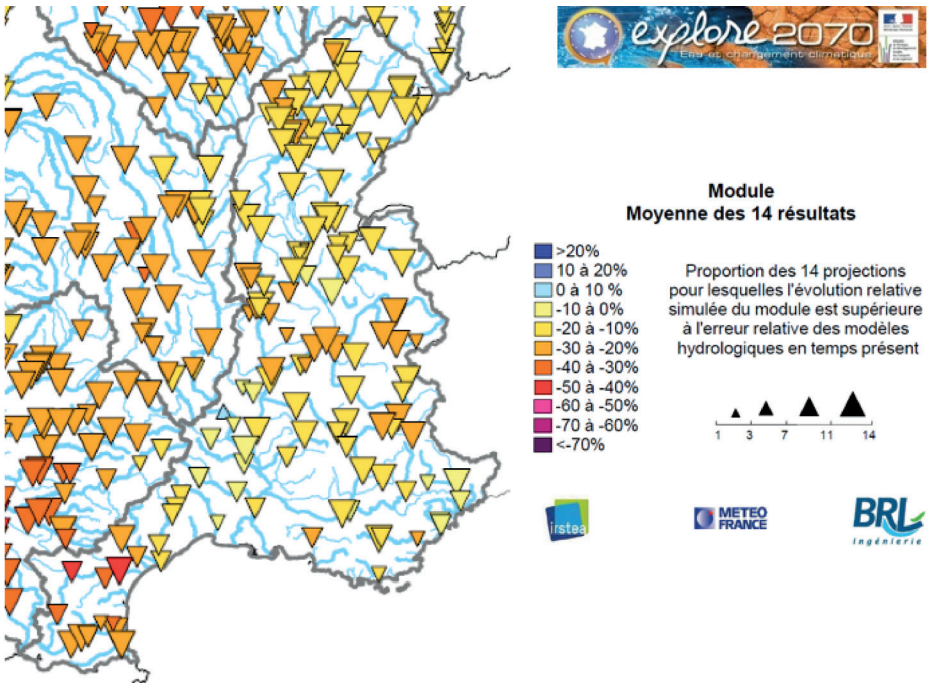


Figure 2. Evolutions relatives possibles (en %) du débit moyen annuel (module) entre 1961-90 et 2046-65 sur le bassin Rhône-Méditerranée - Résultats moyens établis sur 14 simulations (deux modèles hydrologiques différents alimentés par sept projections climatiques). La couleur des points est fonction de l'intensité du changement et la taille des points est liée à la convergence des 14 simulations (adapté de Chauveau et *al.*, 2013 ; étude Explore 2070)

Un des derniers exercices exploitant les simulations numériques du climat réalisés dans le cadre de CMIP5[4] suggère des changements structurés selon un gradient nord-sud, les évolutions étant plus significatives au sud de la France qu'au nord, ce qui pourrait renforcer des inégalités des territoires vis-à-vis de l'accès à la ressource. Les baisses des débits hivernaux (de décembre à février) resteraient contenues, hors secteurs de montagne et celles affectant les débits moyens en été concernent la région PACA, et pourraient atteindre jusqu'à environ -50 % sur le Var en milieu de siècle (RCP 4.5, RCP 8.5)[5]. La baisse en été est confirmée et amplifiée en fin de siècle pour le RCP 8.5 avec des changements relatifs de plus de 50 % affectant les cours d'eau de la région.

Parmi les secteurs à enjeu, arrêtons-nous sur la Durance et son principal affluent, le Verdon, le château d'eau séculaire de la région Provence–Alpes-Côte d'Azur et son devenir. Le cours de la Durance a été aménagé dès le XII[e] siècle pour l'entraînement des moulins à farine. De nombreux usages exploitent la ressource : loisirs, eau potable, irrigation, production hydroélectrique, etc.

Le projet national de recherche « Risque, Ressource en eau et gestion Durable de la Durance en 2050[6] » (R^2D^2 2050) s'est engagé dans une démarche couplant modélisation de l'hydrosystème et sa composante anthropique associée et élaboration de scénarios prospectifs associant acteurs locaux et experts. L'objectif visé est de quantifier les déséquilibres potentiels futurs entre offre et demande en eau sur les secteurs alimentés par la Durance et le Verdon.
Au delà des inévitables incertitudes, le projet R^2D^2 2050 a permis de révéler des tendances robustes pour l'avenir. Les modifications du climat engendrent une baisse notable de la ressource naturelle à l'horizon 2050 et des modifications de la dynamique de constitution et de fonte du manteau neigeux (Figure 3). Une des conséquences directe est la probable diminution de production d'énergie. Les évolutions du territoire induisent des demandes en eau très contrastées. La baisse probable des apports de fonte conduit à contraindre la gestion de la cote des grandes retenues (notamment Serre-Ponçon) et selon les priorités des usages, réduire la capacité à répondre aux pics de demande énergétique en hiver.

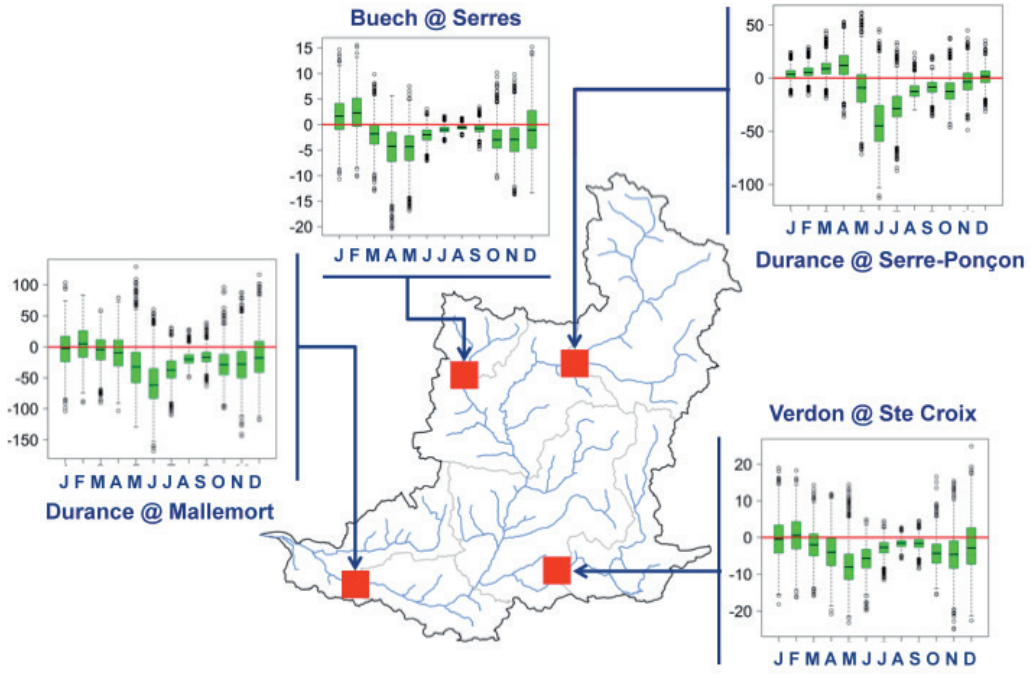


Figure 3. Changements des débits mensuels exprimés (en m^3/s) sur la période 2036-2065 par rapport à la période de référence 1980-2009 (six modèles hydrologiques différents alimentés par 330 projections climatiques) (extrait de Sauquet *et al.*, 2016 ; projet R^2D^2 2050)

De nombreuses sources d'incertitude existent à tous les niveaux de la modélisation sur les données et les représentations numériques en temps présent et en temps futur. Nous ne les détaillerons pas dans ce document. Les incertitudes liées à l'hydrologie héritent en partie de celles liées à la connaissance des climats actuels et futurs. Dans le cadre du projet R^2D^2 2050, il a été montré que :

- l'incertitude sur les débits d'étiage en condition naturelle vient majoritairement des modèles hydrologiques, et notamment de leur représentation différentiée des processus liés à l'évapotranspiration et à la neige. Une connaissance des processus sur la phénologie des plantes sous modification conjointe des teneurs en gaz à effet de serre et de la température, et de ceux relatifs à la constitution et fonte du manteau neigeux dans des zones peu instrumentées reste à approfondir ;
- dans le cas d'un bassin versant dont l'eau est utilisée par des territoires connexes, l'incertitude sur le niveau de pression sur la ressource portée par le développement économique joue à part égale avec celle due au climat.

[4] CMIP pour « Coupled model intercomparison project ». Projet du programme mondial de recherche sur le climat

[5] Les scénarios RCP, sont quatre scénarios (RCP 2.5, RCP 4.5, RCP 6, RCP 8.5), établis par le GIEC, qui sont basés sur la quantité de gaz à effet de serre qui sera émise dans les années à venir

[6] R^2D^2, 2014. Research project R^2D^2 2050. Risk, water Resources and sustainable Development within the Durance river basin in 2050. Coord. Eric Sauquet, IRSTEA, Lyon. Final report, 243p.

1.3. L'influence du changement climatique sur la température des cours et des plans d'eau

La température de l'eau est un des paramètres physiques les plus importants pour la vie des organismes d'eau douce. Cette variable affecte les organismes à plusieurs niveaux, du métabolisme en passant par le cycle vital jusqu'à l'aire de répartition. Une augmentation de la température a comme conséquence une augmentation du métabolisme, avec des conséquences sur la taille et la durée de vie de l'individu. De plus, les différentes phases du cycle vital des poissons et des invertébrés requièrent des seuils de température caractéristiques à chaque espèce. Si les conditions thermiques de l'écosystème sont modifiées de telle façon qu'elles ne sont plus appropriées à une espèce, elles pourraient causer son extinction, mais aussi favoriser le développement d'espèces invasives.

Une augmentation de la température des cours et plans d'eau déjà observée

De nombreuses études ont montré une tendance généralisée à l'augmentation de la température des cours et plans d'eau dans le monde entier. Cette augmentation de la température des plans d'eau a causé la réduction de la période d'englacement et l'allongement de la période de stratification estivale. La température de l'hypolimnion, couche d'eau la plus profonde et la plus froide, tend également à augmenter.

Quelques exemples choisis, proches géographiquement de la région PACA, illustrent bien ce phénomène déjà engagé. Dans le bassin de l'Èbre, en Espagne, des tendances à l'augmentation de la température de 0,02 à 0,06 °C/an ont été observées, ainsi que dans un ensemble de cours d'eau du nord de l'Espagne où une tendance de +0,02 °C/année a été observée au cours de la période 1986-2013. Sur la partie du Rhône la plus méridionale, la température de l'eau a augmenté de 3,0 °C sur la période 1977-2004 à raison de +0,11 °C/an. La dynamique thermique de ces fleuves est variable mais on a observé des périodes particulièrement chaudes en 1940-1949 et depuis les années 1980.

Un travail de reconstruction, par modélisation, des chroniques de températures des plans d'eau de la France métropolitaine estime une tendance moyenne d'augmentation de la température de surface de +0,02 °C/an. Cette augmentation est liée aux effets du changement climatique, mais aussi à des pressions anthropiques plus directes comme l'usage de l'eau pour le refroidissement des centrales nucléaires et thermiques à flamme, ainsi que les rejets liés à l'urbanisation. En aval de la centrale thermique d'Aramon, l'échauffement cumulé de l'eau du Rhône dû aux centrales nucléaires a été estimé à +1,4 °C sur la période 1977-2004. Une étude des principaux affluents du lac Lugano dans les Alpes suisses et italiennes a montré un échauffement plus important (de l'ordre de +2 °C) dans les cours d'eau avec une majeure occupation du sol par des aires urbaines.

Dans la zone méditerranéenne, les tendances à l'augmentation de la température sont souvent associées à la diminution des débits. Ainsi, l'aménagement hydraulique du bassin versant du Rhône, qui fait que les débits estivaux soient plus élevés que ceux observés historiquement à la fin du XIX^{e} siècle, limite la hausse des températures pendant cette période de l'année. De plus, et cela est aussi valable pour la Durance, la réduction de largeur et l'augmentation de profondeur limitent l'échauffement en réduisant la surface au miroir et en réduisant l'émission des rayonnements infrarouges. Pour le Rhône à Lyon, sur la base de mesures journalières des années 1870-1877, on a pu montrer que, dans la configuration pré-aménagement, les canicules devraient conduire à des températures d'environ +1 °C plus chaudes que dans la situation aménagée.

Une tendance à l'augmentation de la température des cours et plans d'eau

Les effets prévus du changement climatique sur les plans d'eau méditerranéens incluent, entre autres, la baisse des niveaux d'eau et une détérioration de la qualité de l'eau. D'après une étude récente réalisée à l'échelle européenne, la température des cours d'eau de la région PACA devrait augmenter de +2 à +3 °C d'ici la fin du siècle par rapport à la période 1971-2000. Pour les cours d'eau où les bas débits coïncident avec la période estivale, comme c'est le cas pour les cours d'eau méditerranéens, jusqu'à un quart de l'augmentation prévue de la température serait attribué à la réduction des débits.

Mais la réponse concrète du comportement hydrodynamique d'un plan d'eau vis à vis du climat va dépendre de ses caractéristiques propres, notamment de la morphométrie et de la température moyenne qui gouvernent les phénomènes de stratification. Ce sont les lacs les plus profonds et les plus chauds qui s'avèrent les plus sensibles au changement climatique. Avec le scénario à hautes émissions de gaz à effet de serre (RCP 8.5), une augmentation de la température de surface d'environ +2 °C est attendue à la fin du siècle au barrage de Bimont, localisé à proximité d'Aix-en-Provence dans la commune de Saint-Marc-Jaumegarde.

La gestion des retenues hydroélectriques peut compenser en partie la hausse des températures. Dans le cas des barrages avec plusieurs profondeurs d'extraction de l'eau, il est possible de gérer la quantité de chaleur emmagasinée dans la retenue. Ce type de dispositif a aussi été utilisé pour réguler la température en aval du plan d'eau et minimiser les impacts thermiques. Cependant, les modalités de gestion sont complexes. D'abord, la réduction de la chaleur emmagasinée dans le barrage peut conduire à majorer les températures en aval. Inversement, dans des retenues stratifiées, l'extraction d'eau à une certaine profondeur permettrait de réduire la température de l'eau en aval, mais avec pour conséquence d'élever la température moyenne de la colonne d'eau dans le barrage et d'induire des effets possibles sur la qualité de l'eau, à la fois dans le plan d'eau et en aval. Finalement, il faut inclure dans l'équation les intérêts économiques de l'exploitation du barrage.

1.4. L'influence du changement climatique sur l'évolution de l'humidité du sol et des sécheresses

La caractérisation de l'évolution de la ressource en eau en terme de situation moyenne mais aussi extrême (sécheresse) est un enjeu majeur du changement climatique en zone Méditerranéenne. Les études à mener nécessitent de prendre en compte les différentes composantes du cycle de l'eau : les précipitations mais aussi l'humidité du sol et le niveau des aquifères.

Le projet de recherche Climsec s'est penché sur l'évolution des sécheresses en France métropolitaine, jusqu'alors très peu étudiées, en développant des simulations de l'humidité du sol. Différentes simulations[7] ont été effectuées à l'aide de modèles climatiques régionalisés sur la France (scénarios SRES A2, A1B et B1) et elles ont permis d'apporter des informations capitales sur les sécheresses du XXIe siècle.

Le résultat le plus important concerne la différence de comportement entre l'évolution des sécheresses météorologiques dont le diagnostic reste peu robuste du fait de l'absence de consensus entre modèles climatiques sur la diminution des précipitations et les sécheresses agricoles (ou édaphiques), dont l'augmentation est déjà observable aujourd'hui, et qui semblent devoir s'aggraver d'ici le milieu du siècle sous l'effet de l'augmentation de l'évaporation liée à la hausse des températures.

Une aggravation observée et prévue des sécheresses du sol

L'analyse de l'extension moyenne des sécheresses des sols en région Provence-Alpes-Côte d'Azur depuis 1959 (Figure 4) met en évidence l'importance des événements récents de 2007 et 2012, mais surtout l'évolution de la moyenne décennale depuis les années 1980 avec une répétition de sécheresses quasi continue depuis 1997 (hors 2010 et 2013).
Au cours du XXIe siècle, quel que soit le scénario climatique considéré, un assèchement des sols est attendu en toute saison avec pour effet un allongement de la période de sol très sec (avancée nette au printemps) et une diminution de la période hivernale favorable à la recharge. Avec un scénario A2 (Figure 5), équivalent au RCP 8.5 actuel, la situation moyenne de l'humidité des sols pourrait ressembler en fin de siècle aux situations actuelles extrêmes de sol sec.

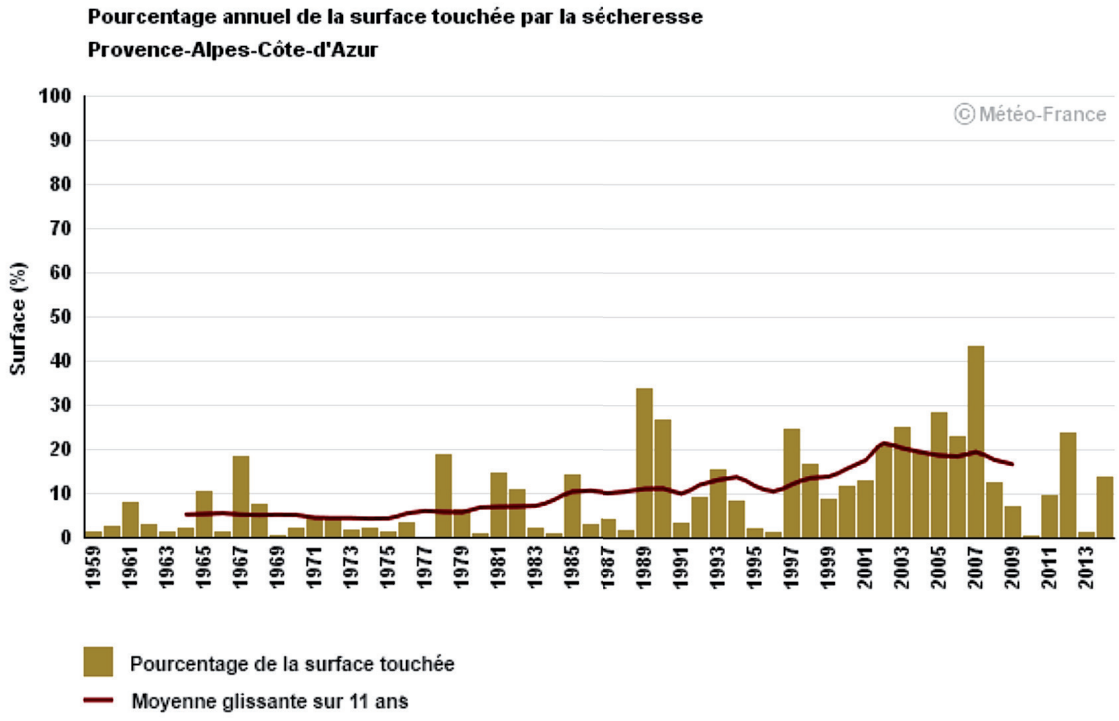


Figure 4. Pourcentage annuel de la surface touchée par la sécheresse du sol sur la région PACA sur la période 1959-2014 (source Météo-France, ClimatHD)

[7] Depuis 2014, les simulations ClimSec sont accessibles sur le portail DRIAS (http://www.drias-climat.fr/)

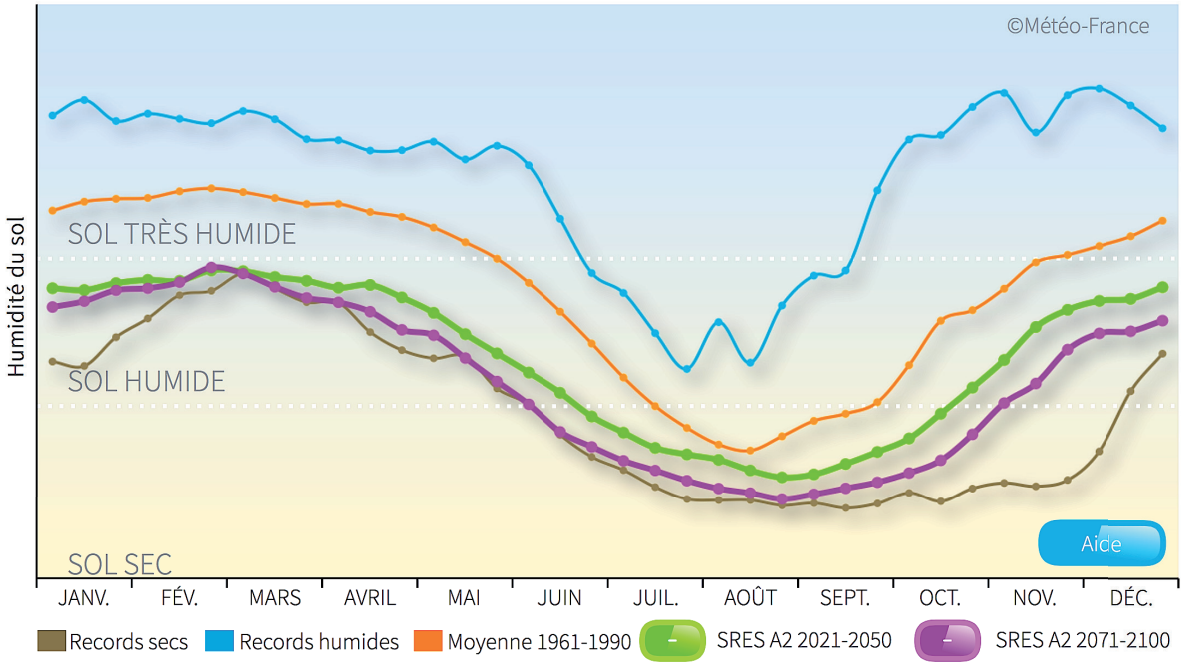


Figure 5. Evolution du cycle annuel de l'humidité du sol sur la région PACA entre la période de référence 1961-1990 et deux horizons temporels sur le XXIe siècle selon un scénario SRES A2 (source Météo-France, ClimatHD[8])

1.5. L'influence du changement climatique sur l'évolution du manteau neigeux dans les Alpes du Sud

Le projet SCAMPEI, avait pour objectif de réaliser et mettre à disposition de la communauté scientifique de nouvelles simulations climatiques à l'échelle de quelques dizaines de km² pour le futur proche et la fin du siècle sur la France métropolitaine, et plus particulièrement sur les zones montagneuses.

Le jeu de données SCAMPEI est fondé sur un ensemble de simulations réalisées suivant un protocole commun pour trois modèles numériques : ALADIN (modèle à aire limitée de Météo-France), LMDZ (modèle du Laboratoire de Météorologie Dynamique du CNRS, institut Pierre-Simon Laplace) et MAR (modèle du Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement). Ces simulations sont basées sur des scénarios de concentration de gaz à effet de serre et en aérosols préconisés et utilisés par le GIEC en 2008, l'un plutôt « optimiste » (B1), l'autre « pessimiste » (A2) et le troisième « médian » (A1B).
Trois périodes de 30 ans ont été considérées pour les simulations SCAMPEI :

- 1961-1990, période, dite d'analyse ou de référence, permettant de recaler les modèles par rapport aux observations et mesures ;
- 2021-2050, que l'on résume par les « années 2030 » (décennie centrale) ;
- 2071-2100, appelée les « années 2080 ».

[8] http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climathd

En utilisant les analyses par massif de Météo-France (données SAFRAN) et les valeurs extrêmes des 6 simulations SCAMPEI, on peut élaborer des graphiques qui synthétisent l'évolution de l'enneigement pour une année moyenne et pour différentes périodes passées ou à venir. Les figures 6 et 7 présentent la médiane (valeur atteinte une année sur deux) des périodes 1961-1990 et 1981-2010, ainsi que l'enveloppe des valeurs prédites par les 6 projections climatiques du projet SCAMPEI pour les années 2030 et 2080.

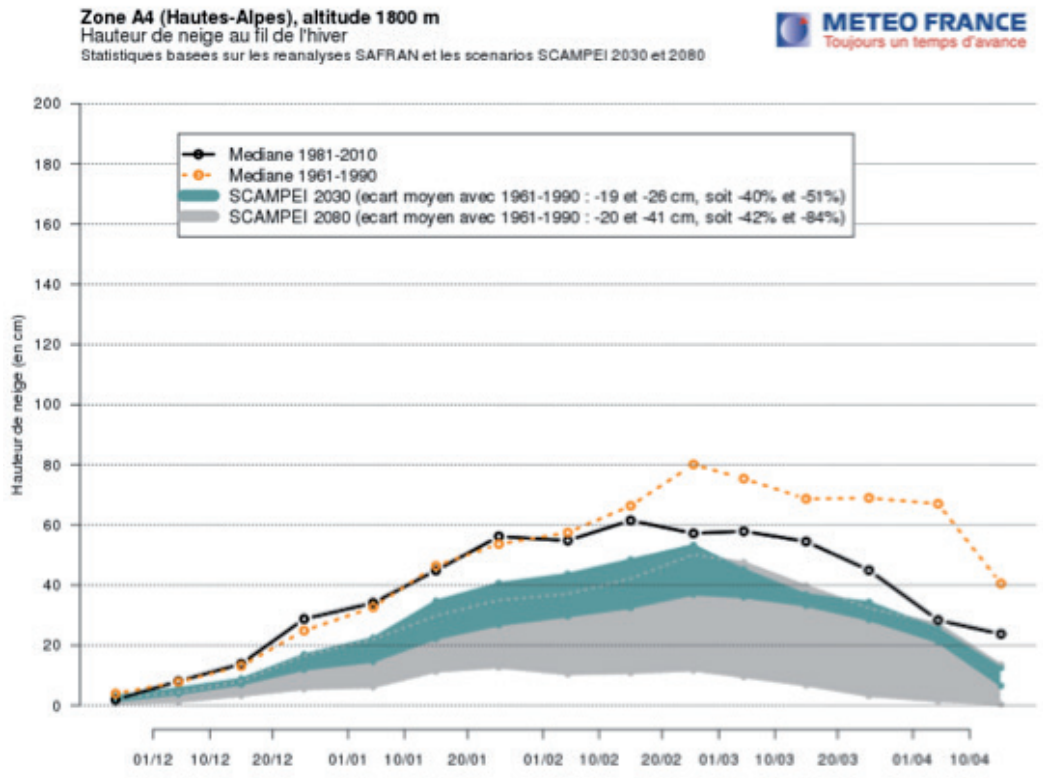


Figure 6. Répartition de la hauteur de neige d'une année moyenne, à 1800 mètres, dans les Hautes-Alpes, pour quatre horizons

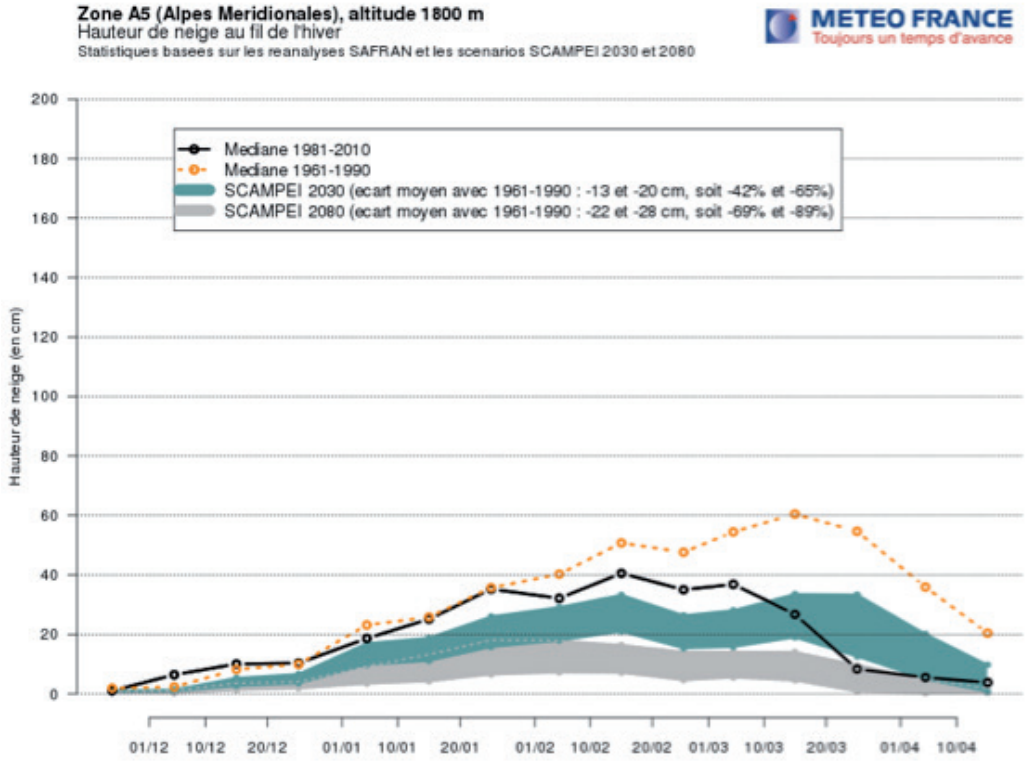


Figure 7. Répartition de la hauteur de neige d'une année moyenne, à 1800 mètres, dans les Alpes méridionales pour quatre horizons

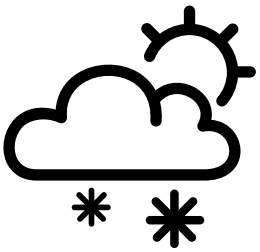
Plusieurs points sont à noter :

- on observe déjà, entre les années 1970 et les années 2000, une baisse de l'enneigement moyen à partir de la mi-février aux altitudes moyennes. Cette baisse est particulièrement marquée pour les zones les plus au sud (massif du Mercantour). Elle est moins accentuée aux altitudes plus élevées, au-dessus de 2500 mètres ;

- l'évolution pour les années 2030 confirme une évolution à la baisse sur l'ensemble du cycle annuel, supérieure à 50 % aux altitudes basses (au-dessous de 1500 m), moins importante aux altitudes élevées où la tendance est d'un peu moins de 20 % ;

- à l'échéance des années 2080, la baisse semble se confirmer, mais l'incertitude autour des résultats croît. Dans les hypothèses les plus pessimistes, la proportion des années avec très peu de neige augmente. Ceci est particulièrement vrai pour le massif du Mercantour où l'on risque de n'avoir plus de neige au sol en-dessous de 1800 mètres une année sur deux.

Cette situation a bien évidemment des répercussions sur les ressources en eau de la région PACA, puisqu'une partie de l'eau disponible en période estivale est directement issue de la fonte de la neige restant au printemps. Un bon indicateur de cette eau disponible est l'équivalent en eau du manteau neigeux. Cet indicateur est calculé depuis peu par Météo-France pour l'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (ONERC) (Figure 8). La tendance observée ces soixante dernières années est nettement à la baisse.



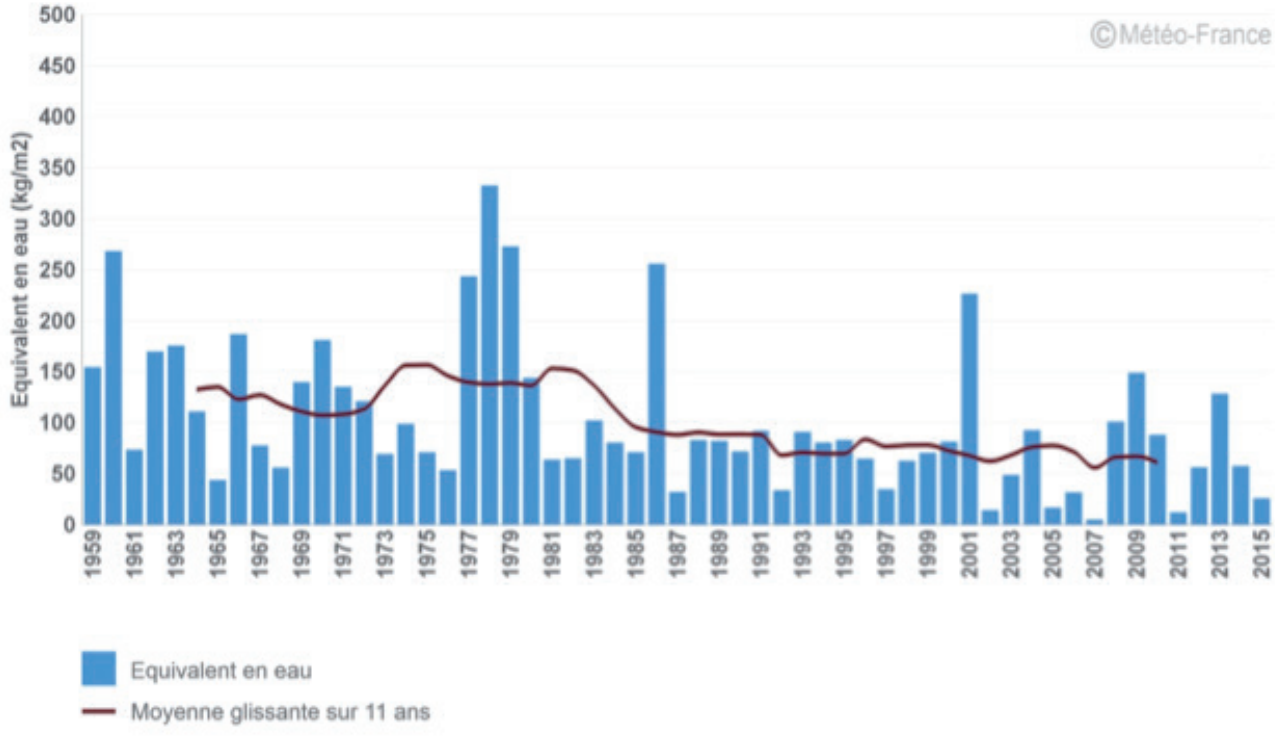


Figure 8. Evolution de l'équivalent en eau du manteau neigeux (au 1er mai) pour les Alpes du Sud, de 1959 à 2015

2. La variabilité historique des ressources en eau

Comme il a été montré dans le chapitre précédent, modéliser, prévoir et estimer les risques liés aux ressources en eau revêt une importance capitale dans le contexte actuel de changement global. Cela nécessite une très bonne connaissance des hydrosystèmes et de leur variabilité dans le temps et d'appréhender la variabilité actuelle dans un cadre temporel le plus large possible.

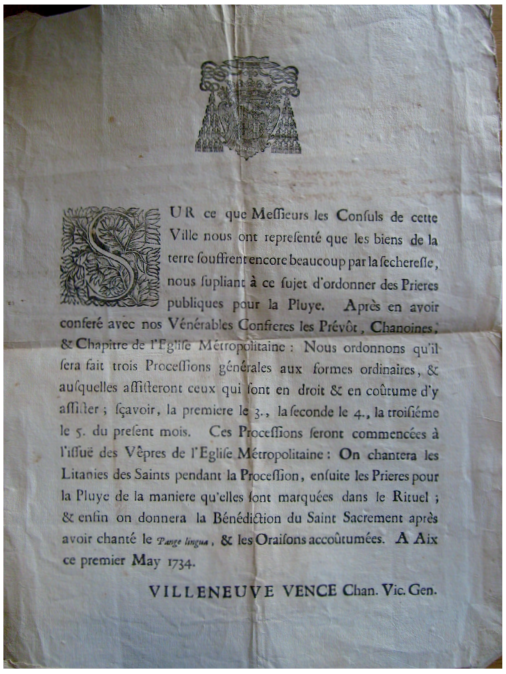
Malheureusement, les longues séries de mesures hydrologiques sont relativement rares, le développement des observations systématiques n'ayant commencé que dans les années 1960 et une profondeur d'une cinquantaine d'années est insuffisante pour pouvoir appréhender la variabilité de ces systèmes complexes. La paléo-hydrologie permet de résoudre en partie ce problème en prolongeant les séries temporelles de certains paramètres hydrologiques dans le passé à partir d'indicateurs historiques ou naturels. Les indicateurs historiques utilisés pour l'analyse restrospective de la variabilité hydrologique sont les rares longues séries instrumentales, les ré-analyses de variables météorologiques (§ 2.2) et les données historiques que l'on retrouve dans des textes qui mentionnent des faits relevant de l'hydrologie, comme les crues, les étiages remarquables ou l'englacement des cours d'eau (§ 2.1). Les indicateurs dits naturels - ou proxys naturels - sont entre autres les cernes d'arbres, les sédiments lacustres (§ 2.3) qui sont de très bons enregistreurs des crues et les traces glaciaires qui permettent de mettre en évidence les phases de recul et d'avancée des glaciers au cours du temps (§ 2.4). Ces différents indicateurs permettent de reconstituer la variabilité temporelle de différents paramètres hydrologiques sur des périodes de temps variées (du siècle au millénaire), et avec des résolutions temporelles différentes. L'analyse de la variabilité hydrologique passée permet de remettre les variations observées dans un contexte temporel bien plus étendu et ainsi d'améliorer la connaissance sur le fonctionnement et l'évolution des systèmes fluviatiles et lacustres avec éventuellement l'identification de cycles temporels ou de tendance à long terme, et, dans le cas des évènements extrêmes (crues et sécheresses), la possibilité de mieux appréhender leur variabilité en termes de fréquence et d'intensité. Ces informations permettent également, en élargissant le cadre chronologique d'analyse, de réduire l'incertitude d'échantillonnage et d'affiner la caractérisation des distributions statistiques des précipitations et des débits dont la connaissance revêt un intérêt capital en termes de prévision, de prédétermination du risque hydrologique et, in fine, d'aménagement du territoire.

2.1. Apport des archives textuelles et des premières données instrumentales dans la connaissance des sécheresses régionales passées

Si les premières données instrumentales de mesure des conditions météorologiques réellement utilisables datent du tout début de la période contemporaine, il existe cependant un vaste corpus d'archives textuelles que l'on peut qualifier d'« environnementales » et qui font office de sources indirectes pour reconstituer le contexte climatique dans le Sud-Est de la France (voir la base de données historiques HISTRHONE[9]). Pour le XVIII[e] siècle et la première partie du XIX[e], ces archives permettent de comprendre l'ampleur et l'impact des perturbations hydro-climatiques en Provence et d'identifier les fluctuations de la pluviométrie durant une période historique aujourd'hui considérée comme l'apex du Petit Âge de Glace dans l'Ouest du Bassin Méditerranéen (caractérisée par de nombreuses phases de sécheresse mais aussi par de violents épisodes de précipitations). C'est, par exemple, le cas de certains documents ecclésiastiques comme les processions religieuses et d'autres dossiers spécifiques comme les recueils de « secours aux communautés » (Fonds des États de Provence, Archives départementales des Bouches-du-Rhône) qui regroupent de nombreuses demandes d'aide des populations consécutives à des évènements météorologiques extrêmes bien souvent dévastateurs pour les infrastructures, les biens matériels ou les ressources agricoles.

Parmi les sources historiques disponibles les plus intéressantes, les demandes de procession pro pluvia ou petendam pluviam, c'est-à-dire « pour obtenir la pluie », faites par les communautés urbaines ou rurales auprès des autorités religieuses, tiennent une place de choix (Photo 3). Ces documents permettent d'obtenir des informations qualitatives sur les fluctuations de la pluviométrie et plus particulièrement sur les épisodes de sécheresse (on en trouve des mentions dès la fin du XIII[e] siècle à Marseille).

[9] http://histrhone.cerege.fr/



SUR ce que Meſſieurs les Conſuls de cette Ville nous ont repreſenté que les biens de la terre ſouffrent encore beaucoup par la ſechereſſe, nous ſupliant à ce ſujet d'ordonner des Prieres publiques pour la Pluye. Après en avoir conferé avec nos Vénérables Confreres les Prévôt, Chanoines, & Chapitre de l'Egliſe Métropolitaine : Nous ordonnons qu'il ſera fait trois Proceſſions générales aux formes ordinaires, & auſquelles aſſiſteront ceux qui ſont en droit & en coûtume d'y aſſiſter ; ſçavoir, la premiere le 3., la ſeconde le 4., la troiſiéme le 5. du preſent mois. Ces Proceſſions ſeront commencées à l'iſſuë des Vêpres de l'Egliſe Métropolitaine : On chantera les Litanies des Saints pendant la Proceſſion, enſuite les Prieres pour la Pluye de la maniere qu'elles ſont marquées dans le Rituel ; & enfin on donnera la Bénédiction du Saint Sacrement après avoir chanté le *Pange lingua*, & les Oraiſons accoûtumées. A Aix ce premier May 1734.

VILLENEUVE VENCE Chan. Vic. Gen.

Photo 3. Décision du Chanoine vicaire général d'Aix-en-Provence d'organiser des processions et des prières pour la pluie les 3, 4 et 5 mai 1734 faisant suite à une demande des consuls de la ville à cause de la sécheresse persistante (source : Archives Départementales des Bouches-du-Rhône, Aix-en-Provence, cote 2 G 186)

Pour la ville de Marseille et son territoire, sur trente-sept processions recensées et analysées entre 1678 et 1783, on note une forte concentration des demandes au printemps, au moment du développement des cultures semées, puis en août. Deux périodes importantes durant lesquelles la sécheresse peut avoir de lourdes conséquences sur la végétation et les récoltes. Le caractère non annuel des processions permet d'identifier des périodes de sécheresse durant certaines décennies comme de 1678 à 1683, de 1714 à 1725 puis de 1770 à 1783.

Dès le début du XVIII[e] siècle, on peut trouver d'anciennes et courtes séries de mesures des précipitations, comme par exemple pour la ville d'Aix-en-Provence entre 1728 et 1730, réalisées par des érudits locaux religieux ou astronomes. Ces premières données ont été publiées dans « Histoire et Mémoires de l'Académie Royale des Sciences ». Puis, il semble que la terrible sécheresse qui a eu lieu durant les années 1730-1731 ait incité les savants à commencer des enregistrements plus systématiques de la pluviométrie. La série régionale comportant les premiers enregistrements est celle de l'Observatoire de Marseille qui dispose de cumuls journaliers dès 1748. L'analyse de cette série de mesures jusqu'au milieu du XIX[e] siècle permet de confirmer les informations obtenues sur les variations dans les précipitations de cette période grâce aux sources indirectes (Figure 9). Si l'on considère tout d'abord le dernier quart d'un XVIII[e] siècle qui fut dans son ensemble fort perturbé, on note des épisodes de précipitation record comme pour l'exceptionnelle année 1772 (1315,9 mm), avec plus de 730,1 mm pour les seuls mois d'automne, ou bien l'année 1788 avec 1005,5 mm ! Les trois premières décennies du XIX[e] siècle seront, quant à elles, caractérisées par des forts épisodes de sécheresse récurrents. Ce fut par exemple le cas en 1808 (301,5 mm) mais surtout en 1817 où seulement 274,4 mm furent mesurés. Pour ces deux années, les hivers et les printemps furent extrêmement secs. L'assèchement presque total des rivières du territoire de Marseille et les intenses pénuries d'eau qui touchèrent à plusieurs reprises une ville à la croissance démographique rapide, avec une économie en plein développement, conduiront la municipalité à décider en 1834 la construction d'un nouveau canal d'approvisionnement à partir de la Durance : le célèbre Canal de Marseille dont la construction a débuté en 1839 pour une entrée en service en 1849 (date d'arrivée de l'eau sur les hauteurs du plateau Longchamp).

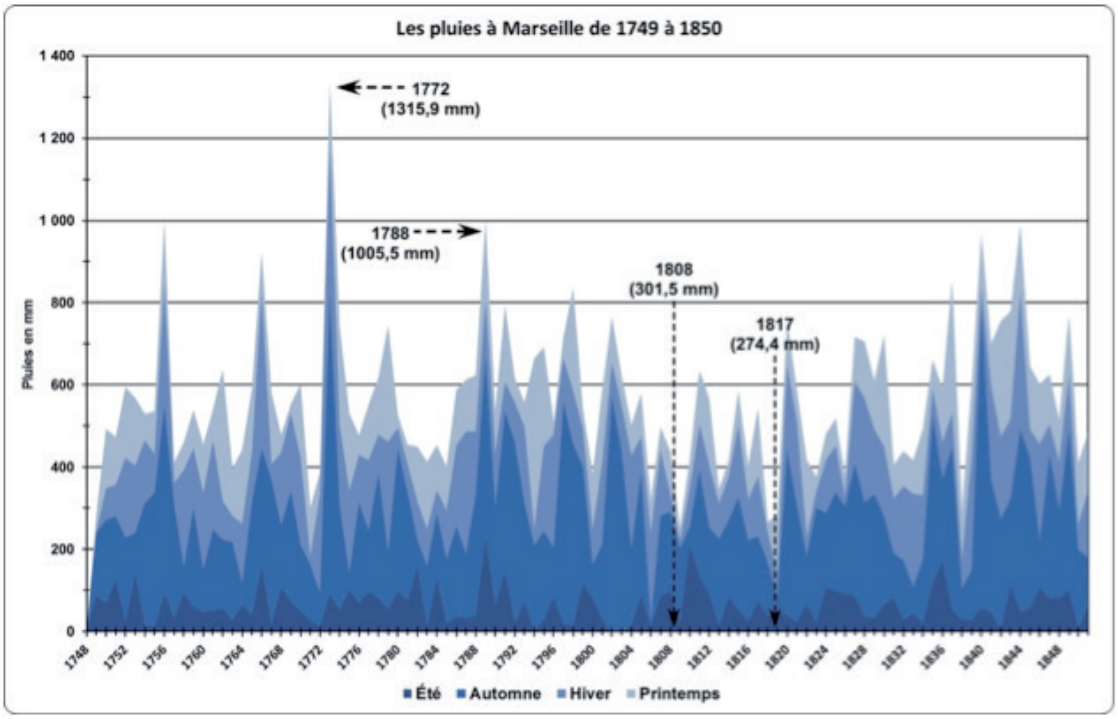


Figure 9. Précipitations mesurées à Marseille aux niveaux des différents Observatoires sur la période 1748-1850, les extrêmes sont représentés (source : Archives de l'Observatoire de Marseille, extraction des données réalisées par Georges Pichard, réalisation de la figure par Nicolas Maughan, 2016)

L'analyse de ces archives textuelles « environnementales », existantes pour les périodes modernes et contemporaines, permet donc d'apporter des informations sur les fluctuations du régime des précipitations et les ressources en eau disponibles en Provence. Ces observations, effectuées la majeure partie du temps par des érudits, se révèlent après analyse bien plus précises et informatives que leur ancienneté pourrait le laisser penser. Elles ne nécessitent souvent que de légères corrections pour être intégrées à des longues séries de mesures hydro-climatiques contemporaines.

2.2. Reconstitution historique des séries hydrologiques

Les projections climatiques annonçant une réduction de la disponibilité en eau ont récemment conduit les hydrologues à s'interroger sur la connaissance des sécheresses hydrologiques actuelles et passées pour mettre en perspective les événements futurs possibles issus des chaînes de modélisation hydroclimatique. Par ailleurs, la variabilité climatique et l'augmentation des températures de l'air constatées au cours des dernières années ont renforcé les besoins d'EDF et des gestionnaires de l'eau de disposer de longues séries. C'est le cas en particulier de la Durance, compte tenu des enjeux opérationnels sur les usages de l'eau et ceux de recherche (projet R²D² 2050, §1.2). Ces éléments scientifiques et opérationnels ont motivé des travaux de reconstitution de données hydrologiques sur l'ensemble du XX^{e} siècle et une partie du XIX^{e} siècle. Ces reconstitutions permettent d'appréhender de façon conjointe la variabilité temporelle et spatiale de variables hydrologiques. À partir de méthodes similaires (Zoom 2), des reconstitutions des étiages extrêmes et des débits de la Durance ont été réalisées ces dernières années dans la région.

ZOOM 2
Méthodes de reconstitutions hydrologiques basées sur les réanalyses climatiques globales

Deux méthodes – SCOPE dans le cadre d'une collaboration entre Irstea et la Compagne Nationale du Rhône et ANATEM dans le cadre d'une collaboration entre EDF et Irstea – ont été récemment développées et appliquées sur toute ou partie de la France, pour disposer de séries hydroclimatiques débutant à la fin du XIX^{e} siècle. Elles ont en commun l'exploitation de réanalyses climatiques globales[10], le développement d'une méthode de descente d'échelle statistique permettant de passer d'une description de la circulation atmosphérique synoptique à celle du climat à une échelle locale (SCOPE Climate et ANATEM Climato) et l'utilisation, dans la dernière étape, d'un modèle hydrologique (Zoom 1) pour fournir des chroniques complètes de débit (GR6J + Cemaneige pour SCOPE Hydro et MORDOR pour ANATEM Hydro). Ces deux méthodes proposent des reconstitutions d'ensemble pour prendre en compte les incertitudes associées. La méthode SCOPE a permis de reconstruire 25 chroniques équiprobables de précipitations et températures locales journalières sur la période 1871-2012 sur chaque cellule 8 × 8 km d'un maillage recouvrant la France (SCOPE Climate). SCOPE Climate a servi de données d'entrée au modèle hydrologique pour produire, sur 662 bassins versants français, 25 chroniques de débits journaliers sur la même période, constituant le jeu de données SCOPE Hydro. La qualité des reconstitutions obtenues a été validée sur la période récente (1958-2012). La méthode ANATEM a, quant à elle, pour originalité l'utilisation conjointe de témoins historiques (stations de température de l'air et de précipitations) en plus des informations issues de la réanalyse globale 20CR. Les séries ANATEM Climato et ANATEM Hydro ont été générées sur la période 1883-2010 (date commune de disponibilité des témoins de température de l'air à Marseille et de pluie à Gap). Une collaboration avec un historien a en outre permis de valoriser des séries historiques d'observations de débits de stations installées sur le bassin de la Durance dès le début du XX^{e} siècle. Ces séries d'observations de débits journaliers étaient disponibles dans les archives et ont été numérisées, ce qui permet aujourd'hui de disposer d'un peu plus d'une dizaine de séries centenaires sur la Durance, le Buëch, l'Asse, l'Issole et le Verdon. La méthode a été testée sur un échantillon étendu de 20 bassins versants naturels de la Durance.

Reconstitution des étiages extrêmes

Ce travail de reconstitution, réalisé sur une trentaine de bassins versants en région Provence-Alpes-Côte d'Azur a permis de confirmer objectivement la sévérité de certains épisodes connus, récents (par ex. 2007) ou anciens (comme 1921 ou 1949), et de mettre en lumière des événements peu documentés (par ex. 1878, 1893). Le résultat issu de SCOPE Hydro présenté ici, est centré sur les années de sécheresse 1921 et 2007 (Figure 10). Il illustre les reconstitutions d'étiages extrêmes sur le Buëch à Serres (affluent alpin de la Durance). L'étiage extrême de 1921 est, sur ce bassin, l'épisode le plus sévère du XX^{e} siècle. Il a touché une grande partie de la France en épargnant la région Sud-Ouest, et résulte d'une sécheresse exceptionnelle en terme de pluviométrie. Cet épisode a débuté à l'été 1921 et s'est poursuivi jusqu'au printemps 1922 pour les Alpes du Sud. L'année 2007 a, quant à elle, été marquée par un déficit pluviométrique prononcé sur les saisons d'été et d'automne dans le Sud-Est de la France, et des étiages sévères tardifs sur les bassins versants concernés. Une des conséquences en termes de gestion a été un déstockage exceptionnel supplémentaire d'une partie du volume de la retenue de Serre-Ponçon, initialement réservée à la production hydro électrique.

[10] Ici la Twentieth Century Reanalysis (20CR) produite par la National Oceanic and Atmospheric Administration des Etats-Unis

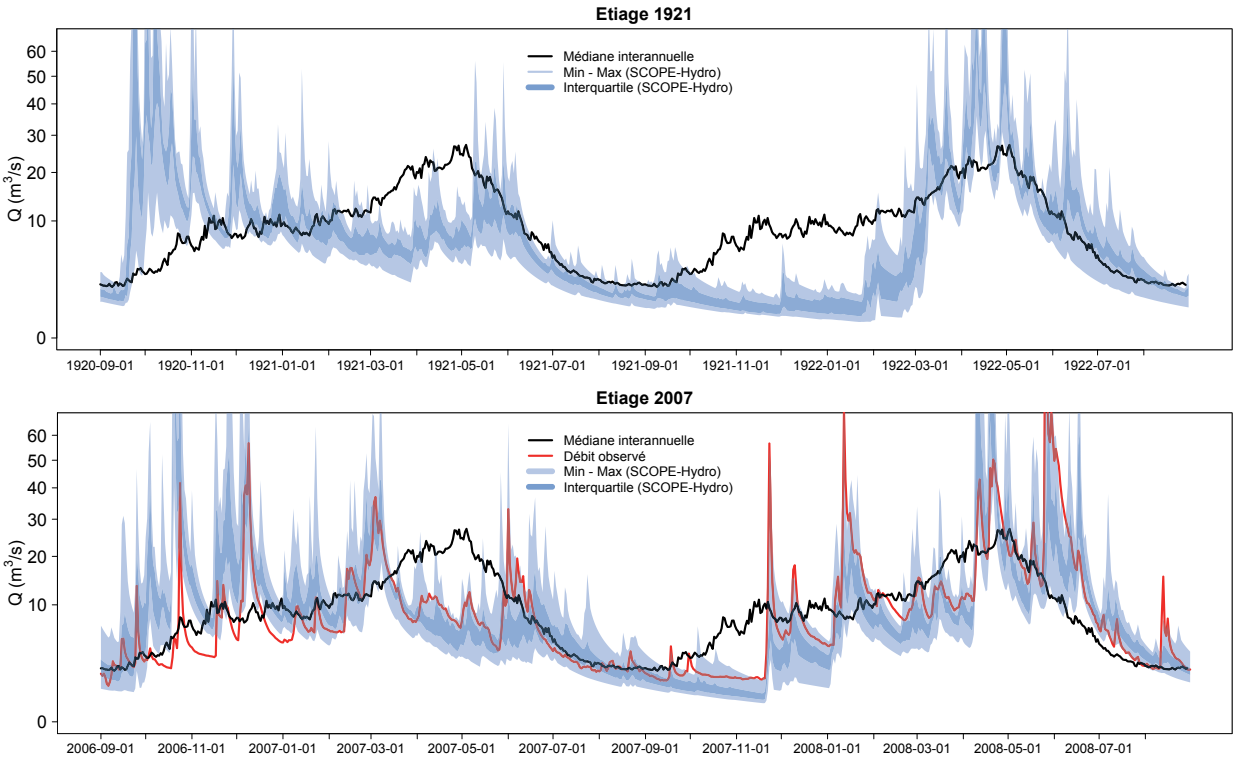


Figure 10. Chroniques de débit journalier observées et reconstituées dans SCOPE Hydro pour le Buëch à Serres (723 km²) lors des étiages de 1921 et 2007. Courbe noire : régime interannuel de référence, décrit par les débits observés médians de chaque jour de l'année. Les nuances de bleu permettent d'apprécier les incertitudes des reconstructions (les 25 membres sont synthétisés par des courbes enveloppes définies par les minimums et maximums (bleu clair) et par les 1er et 3e quartiles (bleu foncé))

Reconstitution des débits printaniers de la Durance

Une synthèse des reconstitutions de débits ANATEM Hydro obtenues pour les 20 bassins versants de la Durance sur la période 1883-2010, a été réalisée en caractérisant la proportion des bassins versants considérés comme étant dans un état d'anomalie hydrologique, déficitaire (étiage) ou excédentaire (crue) (Figure 11). Les données au pas de temps annuel permettent de mettre en évidence des périodes très excédentaires ou très déficitaires par rapport à la moyenne à long-terme. Concernant les périodes déficitaires, cette figure permet de retrouver des périodes de sécheresses historiquement connues (1921, 1949, 1973, 1989-1990 et 2005-2007) et peu documentées (1893). Concernant les périodes excédentaires, cette figure permet de retrouver des périodes de crues et de forte hydraulicité (fin des années 1880, fin des années 1910, fin des années 1920, fin des années 1930, 1977). À l'échelle de la Durance, cette figure met bien en évidence cette succession de périodes excédentaires et déficitaires, avec une période de fortes crues de la fin des années 1910 au début des années 1960 et une période avec des déficits forts depuis le début des années 1970.

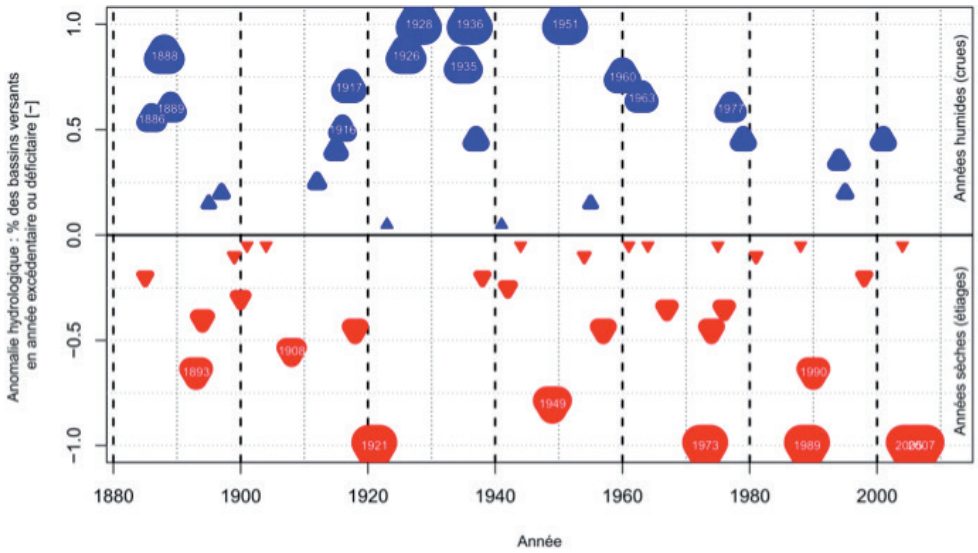


Figure 11. Anomalie hydrologique de 20 bassins versants de la Durance, dont les débits ont été reconstruits à partir d'ANATEM Hydro. Un bassin versant est considéré dans un état d'anomalie lorsque son débit moyen annuel est inférieur au quantile 10 % (étiages) ou supérieur au quantile 90 % (crue) de la distribution des débits moyens annuels. Cette figure présente la proportion de bassins versants en état d'anomalie entre 1883 et 2010 (un signe moins indique une période d'étiage, le symbole étant lui aussi proportionnel au nombre de bassins concernés)

Par ailleurs, les reconstructions obtenues par la méthode ANATEM Hydro ont été comparées à une reconstitution des débits sur la période de fonte (mai-juin) réalisée par une approche dendrochronologique (étude des séries temporelles des cernes de croissance d'arbres) (Figure 12). Cette étude, commandée par EDF et réalisée dans le cadre de la fédération de recherche ECCOREV, a pu être réalisée grâce aux fortes relations existant entre la croissance des pins cembro (*Pinus cembra L.*) et les débits des mois de mai et juin. Cette relation s'explique par la grande sensibilité des pins cembro aux hivers neigeux. Les séries temporelles de cernes de croissance des pins cembro ont donc permis, après calibration de la relation cerne/débit sur la période récente, de reconstituer dans le passé les débits de la Durance et du Verdon jusqu'en 1700. La comparaison entre la reconstitution dendrohydrologique et la reconstitution ANATEM Hydro met en évidence une très bonne corrélation entre ces approches indépendantes et permet de valider leur bonne représentativité des apports de fonte sur le long terme.

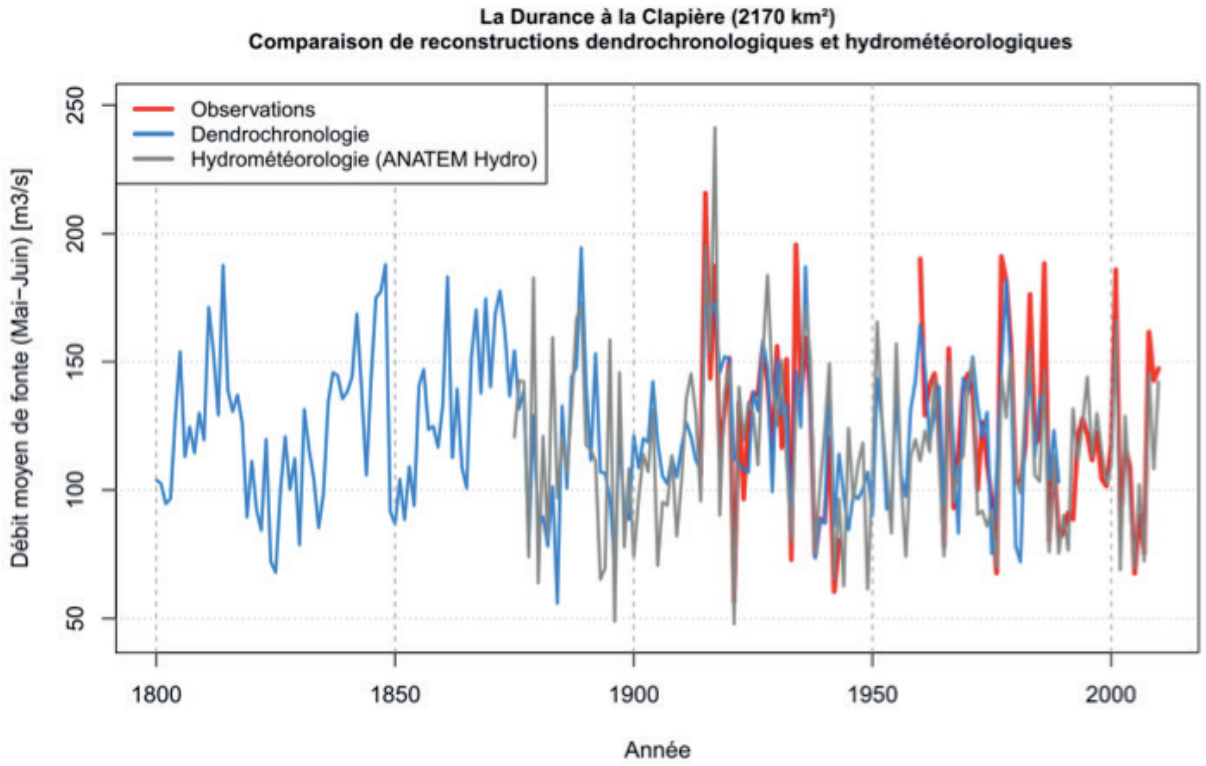


Figure 12. Comparaison des débits durant la période de fonte (mai-juin), estimés à partir de reconstruction hydrométéorologique (ANATEM Hydro) et de la reconstitution dendro-hydrologique

2.3. Les sédiments lacustres : 1300 ans d'histoire des crues dans les Alpes du sud

Approche déployée dans le cadre de l'étude des sédiments lacustres

Dans le contexte du réchauffement global, une modification du cycle hydrologique est attendue, pouvant notamment affecter les aléas hydrologiques (crues, inondations, etc.). Cependant, peu de données d'observation permettent de confirmer cette théorie, car les périodes d'observations sont généralement trop courtes par rapport au temps de retour de ces événements. Pour préciser les relations entre la variabilité climatique et la dynamique des crues, les sédiments de lacs sont de plus en plus étudiés car ils permettent de documenter l'évolution des crues au cours des derniers siècles, voire sur plusieurs millénaires. Au cours d'une crue, l'augmentation du débit entraîne une importante érosion de matériaux qui sont transportés par le cours d'eau puis piégés dans les lacs à l'aval, où ces matériaux formeront des dépôts caractéristiques, appelés « dépôts de crues ».

Le travail des sédimentologues consiste à identifier les dépôts de crues dans l'accumulation sédimentaire, à reconstituer l'intensité des crues à leur origine (à travers différents marqueurs tels que la taille des grains ou le volume de sédiments transporté pendant la crue) et enfin à les dater le plus précisément possible par la combinaison de nombreuses méthodes (radiocarbone, paléomagnétisme, etc.). Les chroniques d'occurrence et d'intensité des crues passées ainsi reconstituées sont ensuite validées par comparaison avec de longues séries de débits, ou le plus souvent avec des informations issues de documents historiques.

Photo 4. Prélèvement par carottage des sédiments présents au fond du Lac d'Allos (juin 2009). L'étude de cette carotte de sédiments a permis de reconstituer plus d'un millénaire d'activité de crues torrentielles

Variabilité millénaire des crues dans les Alpes du Sud

Deux chroniques millénaires d'occurrence et d'intensité de crues passées ont ainsi été reconstituées (Figure 13) dans les Alpes du Sud ; dans le Haut-Queyras à partir des sédiments du lac de Foréant et dans le Haut-Verdon à partir des sédiments du lac d'Allos (Photo 4). Ces chroniques nous révèlent que la fréquence des crues était nettement plus élevée pendant la dernière période froide, appelée Petit Âge glaciaire (PAG, 1300-1860 après J.-C.). Cette augmentation de la fréquence des crues semble s'expliquer par un renforcement des phénomènes de circulations atmosphériques qui amenaient davantage de masses d'air humide de la Méditerranée. C'est ce même processus qui serait à l'origine d'une augmentation significative de l'intensité des crues dans le secteur d'Allos pendant cette période froide du PAG. Si le haut du Queyras semble également avoir connu des crues intenses pendant le PAG, c'est pendant la période chaude de l'Anomalie Climatique Médiévale (ACM, 900-1200 après J.-C.) qu'ont eu lieu les crues les plus intenses, dépassant largement celles enregistrées au cours des dernières décennies.

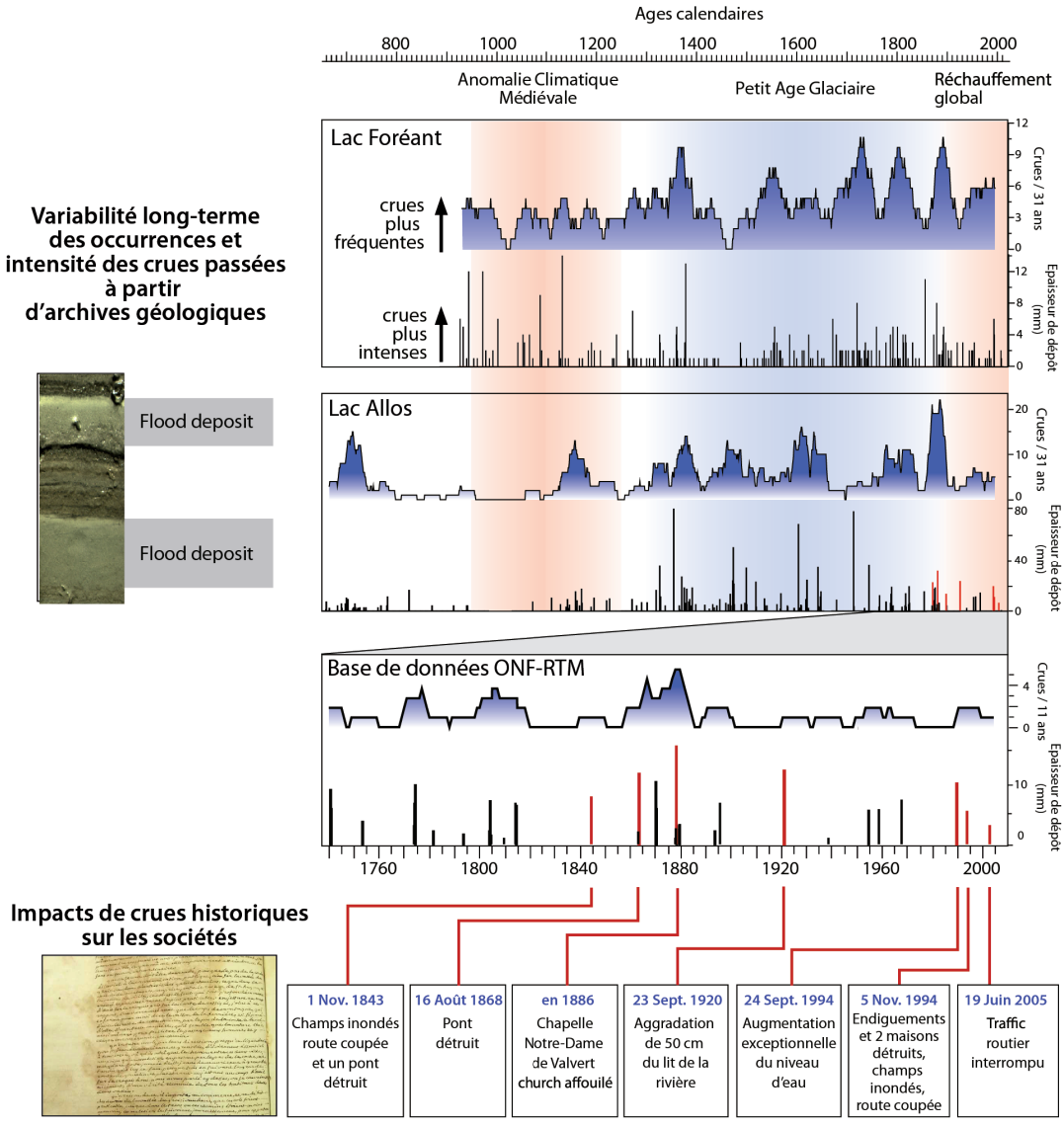


Figure 13. Chroniques millénaires de fréquence et d'intensité des crues d'affluents du Guil (Lac Foréant, Haut Queyras) et du Verdon (Lac d'Allos, Mercantour). Ces deux chroniques ont été reconstituées par l'étude des sédiments lacustres et validées par comparaison avec des crues documentées par des documents historiques

L'occurrence des crues les plus intenses pendant l'ACM dans le haut Queyras serait, quant à elle, liée à l'augmentation de température, favorisant l'occurrence de violents orages. Il est cependant remarquable que l'augmentation de température du dernier siècle (supérieure à celle de l'ACM) ne semble pas avoir généré des crues d'intensité similaire à celles de l'ACM. Ainsi, la température ne permet pas à elle seule d'expliquer toute la variabilité de fréquence et d'intensité des crues. Comprendre quels sont les autres paramètres climatiques qui interviennent (et leurs interactions) constitue l'enjeu des recherches actuelles.

2.4. Lien climat – glacier - ressource en eau

Dans les Alpes, les glaciers sont actuellement en train de reculer à une vitesse sans précédent. Ce phénomène est inquiétant et pourrait à terme devenir problématique pour la région PACA, car 15,5 milliards de m^3 d'eau douce sont stockés dans les glaciers du bassin Rhône-Méditerranée (source : agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, http:/ www.eaurmc.fr/le-bassin-rhone-mediterranee/les-caracteristiques-du-bassin-rhone-mediterranee.html). En effet, au printemps et en été, le ruissellement de la fonte des glaciers alpins est une des sources les plus importantes pour l'alimentation des cours d'eau alpins.

Quel impact aura le retrait futur des glaciers alpins sur la ressource hydrique de la région ?

Pour répondre à cette question et pour mieux s'adapter aux scénarios potentiels, il faut comprendre la sensibilité des glaciers au réchauffement. Utiliser et améliorer nos connaissances dans ce domaine permet d'affiner la modélisation de la réponse des glaciers aux variations climatiques et ainsi d'améliorer les simulations numériques de l'évolution future des glaciers.

La période interglaciaire actuelle, appelée « Holocène », fait suite à la dernière période glaciaire qui s'est terminée il y a à peu près 12 000 ans. Elle est caractérisée par un climat relativement stable. Néanmoins, il y a eu, entre environ 9 000 et 5 000 ans avant l'époque actuelle, une longue période, appelée optimum climatique de l'Holocène, qui était probablement plus chaude qu'aujourd'hui. La réponse des glaciers alpins à cette période chaude, qui est le meilleur analogue aux scénarios climatiques futurs, est encore mal connue. Néanmoins, nous savons que, durant plusieurs épisodes de l'Holocène, certains glaciers étaient de taille équivalente, voire même inférieure, à celle observée aujourd'hui.

Une des méthodes pour étudier le déplacement des fronts glaciaires repose sur la datation par le radiocarbone des restes de plantes qui ont poussé en aval d'un glacier lors des périodes plus chaudes et qui ont ensuite été incorporés dans (ou sous) la glace durant les avancées glacières des périodes plus froides. Il a ainsi été montré que la surface de plusieurs glaciers, notamment en Suisse, était plus réduite qu'aujourd'hui (1985) pendant presque toute la durée de l'optimum climatique de l'Holocène, voire au-delà (Figure 14).

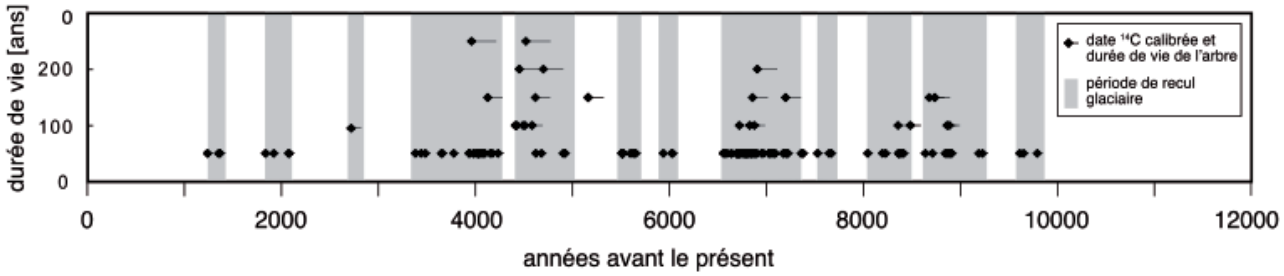


Figure 14. Périodes durant lesquelles six glaciers suisses étaient plus petits qu'aujourd'hui, ces périodes sont illustrées par les bandes grises. Modifiée de Joerin et *al.* (2006)

Ces résultats confirment que les glaciers sont très sensibles aux variations du climat et ont été sujets à des reculs importants lors des périodes les plus chaudes de l'Holocène. La température actuelle atteignant aujourd'hui des niveaux parmi les plus élevés de l'Holocène, et qui selon les différents scénarios devrait continuer à augmenter, la fonte des glaciers alpins devrait donc continuer de façon inquiétante dans les années à venir. Plusieurs études sont actuellement en cours pour reconstituer les périodes de recul et d'avancée glaciaire dans le massif des Ecrins qui est situé en PACA. D'autres études réalisées sur ce sujet[11], et notamment sur les glaciers de la région, seront abordées dans le cahier « montagne » du GREC-PACA.

[11] Marie Gardent 2014 - *Inventaire et retrait des glaciers dans les Alpes françaises depuis la fin du Petit Âge Glaciaire* - Thèse de doctorat.
Mélaine Leroy 2009 - *Étude des fluctuations glaciaires de Petit Âge de Glace dans le massif des Écrins : apports de la lichénométrie.*

3. Les influences du changement climatique sur les eaux souterraines

Les eaux souterraines constituent une réserve hydrique souvent très importante pour l'approvisionnement en eau des territoires et ainsi faire face aux différents usages (eau potable, irrigation, industrie ...). En effet, les aquifères jouent un rôle de tampon en lissant la variabilité annuelle et interannuelle des précipitations et des écoulements de surface. Ils soutiennent les débits des cours d'eau en été et maintiennent les zones humides dépendantes. Les aquifères ont également un rôle important dans la dynamique des crues en interceptant et en stockant une partie de l'eau. Toutefois, lorsque les capacités de stockage sont saturées, les refus d'infiltration peuvent s'additionner au ruissellement et ainsi accentuer les risques de crue. C'est particulièrement vrai dans le cas des aquifères karstiques se développant dans des formations géologiques calcaires où la dissolution du calcaire engendre la formation de cavités favorisant le stockage de l'eau mais aussi la rapidité des transferts. En cas de saturation du karst, les écoulements souterrains ont rapidement une influence sur le débit de crue engendrant des crues karstiques.

3.1. Les aquifères en PACA

En région PACA, les prélèvements d'eau souterraine sont trois fois moins importants (14 % des besoins) que la moyenne Française[12]. Ceci est le résultat d'une situation particulière marquée par les transferts amont - aval du système Durance - Verdon. Les aquifères restent néanmoins une source importante pour l'approvisionnement en eau potable et constituent localement une source importante dans les territoires non irrigués par des écoulements de surface et pourraient constituer un levier d'adaptation essentiel aux changements climatiques.

Les aquifères en PACA sont relativement morcelés avec des dimensions variables (Figure 15) et en moyenne inférieures à la moyenne nationale. Leurs conditions structurelles engendrent une diversité de comportements aux regards des aléas climatiques et des pressions anthropiques. Dans la région, on distingue quatre types d'aquifères.

- Les aquifères alluviaux superficiels qui sont les plus exploités du fait de la proximité de la ressource et d'une activité humaine forte dans ces zones. La dynamique temporelle de ces aquifères est en général fortement liée à la situation hydrologique en surface (débit des cours d'eau, prélèvement, irrigation gravitaire). Par ailleurs, ces aquifères sont souvent associés à des zones humides et constituent ainsi un enjeu environnemental. A proximité de la mer, ces aquifères sont soumis aux intrusions salines.

- Les aquifères sédimentaires molassiques (formations sédimentaires détritiques de forte épaisseur et grande porosité) permettent de stocker de grands volumes d'eau. Les principaux d'entre eux font partie des ressources stratégiques.

- Les aquifères karstiques constituent une ressource en eau pour une grande partie du territoire. Le débit des sources est cependant fluctuant et en étroite interaction avec la pluviosité. Ces aquifères représentent un fort potentiel globalement sous-exploité.

- Les aquifères fissurés au sein des massifs cristallins, sont peu représentés au sein de la région, mais ils peuvent jouer localement un rôle important.

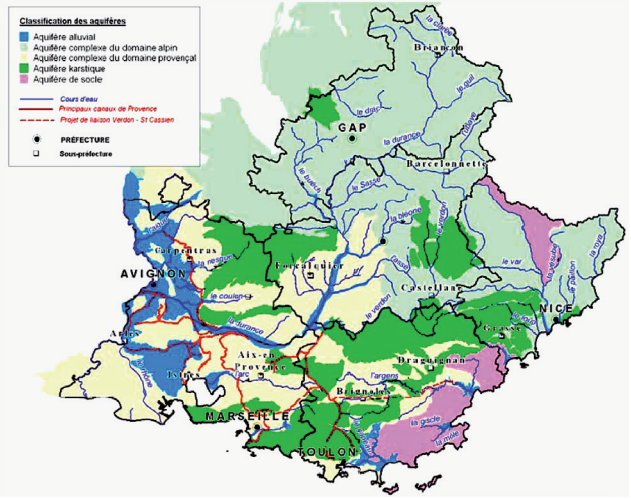


Figure 15. Les grands types d'aquifères régionaux (SOURSE 2010)

[12] Note de cadrage pour une stratégie régionale sur les eaux souterraines

3.2. Impact du changement climatique sur les aquifères

Le changement climatique aura une incidence sur les régimes hydrologiques et hydrogéologiques, du fait de la modification du régime des précipitations et de l'augmentation de l'évapotranspiration liée à celle des températures. Les projections actuelles tablent sur une diminution des précipitations, principalement en été et une plus grande variabilité en termes d'intensité. Cette évolution aura probablement un impact sur la recharge, qui est malgré tout assortie de grandes incertitudes, du fait de la complexité des mécanismes en jeu. Par exemple, l'impact négatif sur la recharge d'une baisse des précipitations, peut très bien être compensé par des pluies moins intenses favorisant l'infiltration par rapport au ruissellement. L'augmentation de l'évapotranspiration aura un impact plus prévisible, qui se traduira probablement par une augmentation des besoins en eau de la végétation (naturelle et cultivée). Cette dernière joue aussi contre la recharge en augmentant la part de l'eau consommée par la végétation, dans le flux potentiellement disponible pour l'infiltration. Toutefois, l'occupation du sol sera aussi amenée à évoluer dans le futur et en particulier les superficies occupées par la végétation et les cultures, ce qui rajoute de l'incertitude à celle liée à l'évolution future des précipitations.

3.3. L'analyse du passé

L'analyse du niveau des aquifères et du débit des sources au cours des dernières décennies ne permet pas de révéler de tendances. On observe plutôt une alternance de périodes sèches et humides qui ont un impact sur le niveau des aquifères. On constate une bonne capacité de résilience des aquifères, avec un retour à un niveau normal après des périodes d'étiage sévère. Ceci invite donc à considérer des périodes de temps long pour dresser un diagnostic sur la vulnérabilité quantitative des aquifères. L'analyse de la chronique de débit de la Fontaine-de-Vaucluse en est une bonne illustration. Les traitements statistiques effectués sur la série de débit montrent qu'après une phase de baisse tendancielle jusqu'au début du XX^{e} siècle (1910 – 1920), le début des années 20 étant reconnu comme une période de sécheresse majeure en France, la Fontaine a traversé une phase tendancielle de hausse de son débit jusqu'au milieu des années 60. Ensuite les débits ont tendanciellement recommencé à décroître jusqu'à un minimum (2,3 m^3/s) atteint lors du cycle 2006 – 2007. Depuis, il semblerait que s'amorce une légère remontée en tendance des débits. Des traits similaires ont été observés sur d'autres aquifères. Ainsi, sur l'aquifère molassique de Carpentras, les baisses observées au cours des années 2000 (avec parfois des pertes d'artésianisme), à un moment imputées à une surexploitation, ont ainsi été compensées lors des dernières années pluvieuses. Sur la plaine de la Crau, le niveau de la nappe a baissé pendant la période sèche de 2004 à 2007 avant de remonter au cours des années plus pluvieuses qui ont suivi (Figure 16).

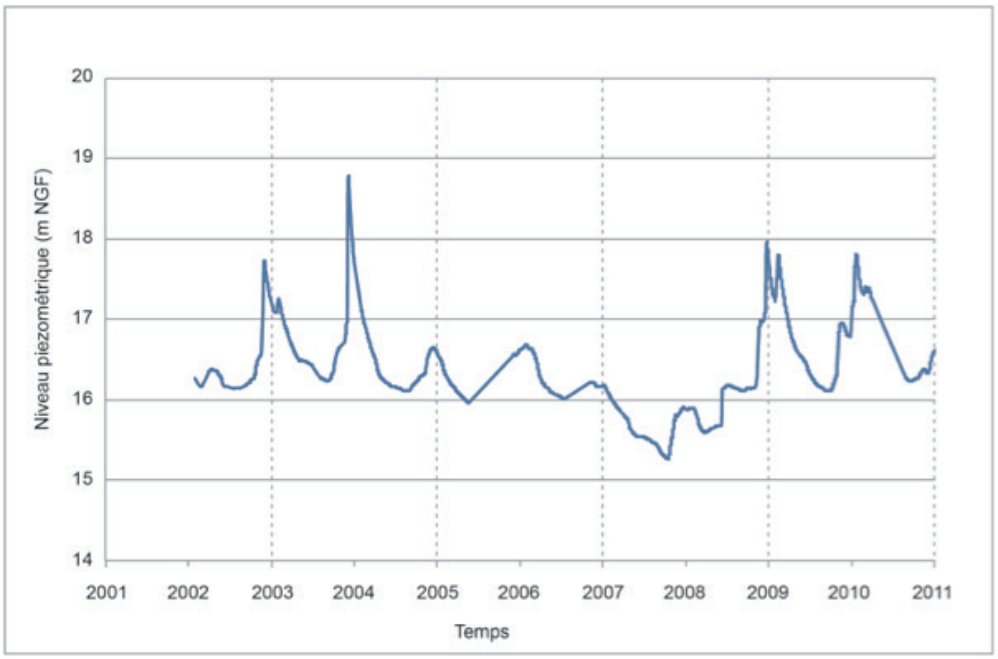


Figure 16. Evolution de la piézométrie (niveau libre de l'eau observé dans un puits ou forage rapporté à un niveau de référence (Nivellement Général de la France : NGF)) de la plaine de la Crau située dans la zone non cultivée (coussouls) (Projet Agadapt - INRA)

3.4. Les projections climatiques sur la recharge naturelle

Une étude menée par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) en collaboration avec l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée Corse (AERMC) a permis d'effectuer des évaluations de la recharge pour des contextes d'aquifères variés et représentatifs du bassin Rhône Méditerranée Corse (RM&C), dont celui de la Fontaine-de-Vaucluse[13]. Il a été possible d'explorer quelles pourraient être les incidences du changement climatique sur l'évolution future de la recharge à l'échelle du bassin RM&C incluant la région PACA. Ce travail a été réalisé en utilisant les projections climatiques du GIEC. La recharge a été calculée pour la période 2045-2065 en considérant les simulations du scénario A1B qui est le scénario médian en termes d'émission de gaz à effet de serre (Figure 17). En région PACA, la recharge future serait ainsi globalement affectée par une baisse comprise entre 10 % et 25 %, ce qui est inférieur à ce qu'on trouve dans le Languedoc et le Roussillon.

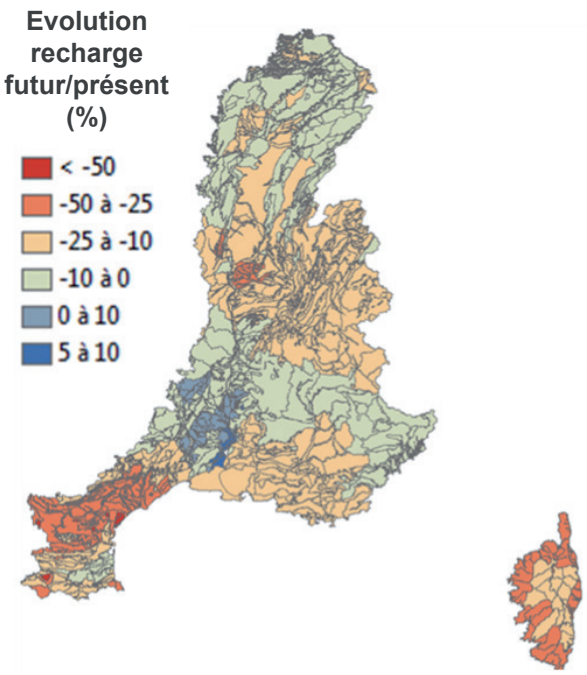


Figure 17. Carte de l'évolution de la recharge moyenne multi-modèle annuelle future (2045-2065) en proportion de la recharge moyenne annuelle pour la période présente (1970-2000). Les projections futures ont été réalisées avec le scénario médian d'émission des gaz à effet de serre (scénario A1B) (Caballero et *al.*, 2016)

Un travail similaire a été réalisé sur la plaine de la Crau à l'horizon 2050[14]. L'aquifère de la Crau est un aquifère superficiel dont le niveau est très dépendant de l'irrigation gravitaire, alimentée par les eaux de la Durance, qui assure près de 80 % de la recharge. Comme dans le cas précédent, le scénario A1B a été exploité. L'étude montre un accroissement de la demande évaporatoire de 2 à 12 % selon les types de couverts végétaux. Si elle est compensée par l'irrigation sans restriction (débit de la Durance suffisant), cette augmentation n'aura pas d'impact sur l'aquifère. Par contre, à prélèvement équivalent, toute modification d'allocation en eau se répercutera de manière très significative sur le niveau de la nappe. Par exemple, en 2030, une réduction de 30 % de l'eau prélevée sur la Durance aura un impact majeur avec un rabattement du niveau de la nappe de plusieurs mètres dans certains secteurs (Figure 18).

Ces résultats de projection doivent être manipulés avec précaution dans la mesure où la démarche adoptée pour les obtenir intègre beaucoup d'incertitudes. Ils présentent cependant l'avantage de fournir une première vision de l'évolution de la recharge future des aquifères et de leur vulnérabilité au changement climatique (probablement plus importante pour les aquifères dont la recharge dépend essentiellement des précipitations que pour ceux qui sont en relation hydraulique avec des aquifères voisins). La connaissance de ce type d'information revêt une grande importance pour les gestionnaires de la ressource en eau du territoire, car elle leur permettrait d'anticiper d'éventuelles situations de déficit futur.

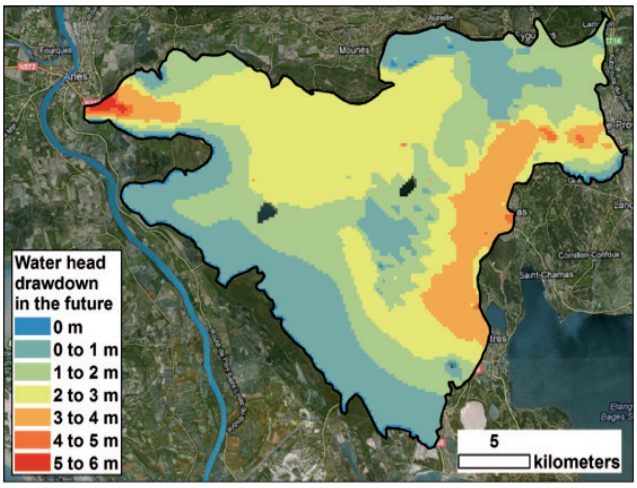


Figure 18. Baisse du niveau de la nappe de la Crau en 2030 avec scenario de -30 % sur les apports d'eau venant de la Durance (Trolard et *al.* 2016)

[13] Rapport BRGM/RP-65807-FR

[14] Projet Agadapt https://www6.inra.fr/agadapt

3.5. L'intrusion saline, pollution des eaux continentales

La Région Provence-Alpes-Côte d'Azur dispose de près de 700 km de côtes et de ce fait de nombreuses nappes aquifères sont en contact avec les eaux salées d'origine marine qui envahissent plus ou moins les formations géologiques côtières (Figure 19). En effet, l'eau salée, d'une densité supérieure (environ 1,025 kg/l) à l'eau douce, pénètre dans les terres essentiellement sous l'action du gradient de densité. Des variations de charge piézométrique de l'eau douce vont dépendre les variations de profondeur du «biseau» salé ou de celles de la zone de transition entre les deux types d'eau. La sensibilité des aquifères à l'intrusion saline dépend donc de leurs propriétés physiques (type d'aquifère : karstique ou alluvial par exemple, perméabilité, homogénéité) mais aussi de facteurs externes tels que les volumes d'eau prélevés et les usages qui en sont faits (eau potable, irrigation, industrie..) qui ont un impact sur la charge piézométrique de l'eau douce. La recharge de l'aquifère liée aux précipitations constitue également un facteur déterminant de l'intensité du phénomène d'intrusion saline.

Avec les conséquences du changement climatique, telles que l'augmentation du niveau marin et la modification des conditions de recharge, l'altération de la qualité des eaux douces par l'intrusion saline en milieu côtier est donc un problème susceptible de s'amplifier.

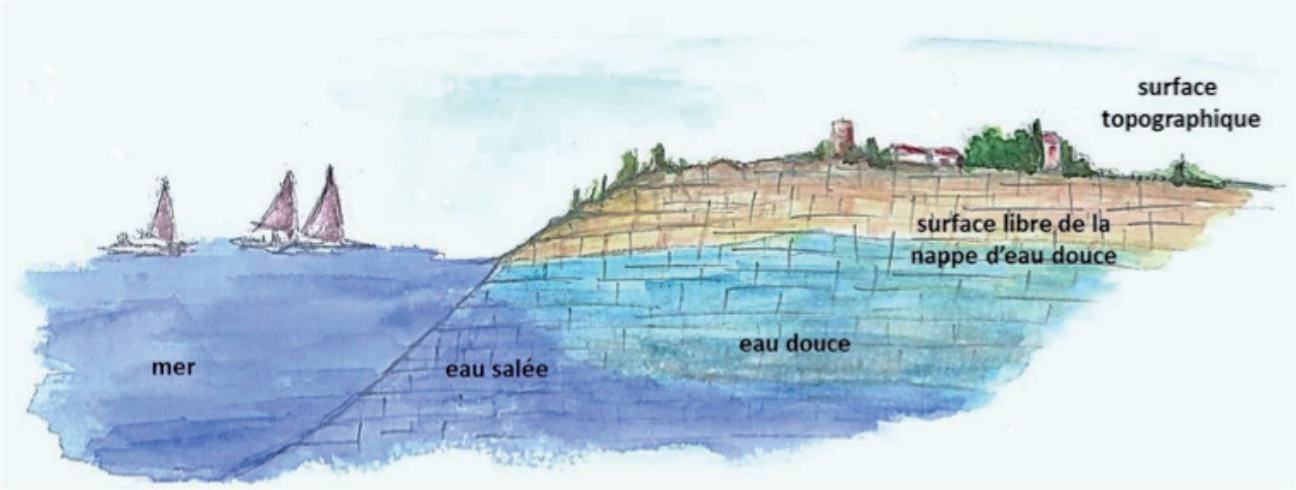


Figure 19. Intrusion saline (source BRGM)

Dans le cadre d'un projet national cofinancé par l'ONEMA (depuis le 1er janvier 2017, l'ONEMA est devenu l'Agence Française pour la Biodiversité) et le BRGM[15], des recommandations pour le suivi et la gestion des aquifères susceptibles d'être impactés par des intrusions salines, en lien avec le changement climatique mais aussi avec l'usage et la consommation des eaux souterraines, ont été formulées. Pour les aquifères les plus sensibles, mais non encore impactés, il est recommandé de réaliser des études détaillées comprenant un suivi piézométrique accompagné de profils de conductivité de l'eau et de prélèvements ciblés pour analyser les chlorures ou de suivis en continu en forage dans un réseau de piézomètres. Il faut également déterminer des niveaux d'alerte à partir desquels des mesures devront être mises en œuvre.

Photo 5. Digue gonflable amovible en période de crues sur le Gapeau. Elle maintient la nappe en charge et empêche la remontée du biseau salé

Pour les secteurs déjà impactés par les intrusions salines, des mesures de gestion doivent être mises en œuvre. Elles peuvent porter sur l'optimisation des prélèvements et le cas échéant sur une recharge artificielle pour maintenir une barrière hydraulique empêchant la progression de l'intrusion saline.

L'utilisation d'un modèle numérique pour simuler des scénarios de gestion active couplée à un réseau de piézomètres avec seuils d'alerte de la salinité à différentes profondeurs d'un aquifère constitue un bon outil de gestion et d'aide à la décision.

Pour aller plus loin, la Région, en partenariat avec le BRGM a lancé début 2017 une étude de cartographie régionale des zones d'intrusion saline potentielle.

[15] Rapport BRGM/RP-60829-FR

4. Les écosystèmes aquatiques sont-ils menacés par le changement climatique ?

Les écosystèmes aquatiques continentaux de la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur englobent différents types d'étendues d'eau existant à l'état naturel (rivières, fleuves, lacs, marécages, etc.) mais aussi créées par l'homme (retenues, rizières, canaux d'irrigation, etc). Ces écosystèmes abritent de très nombreuses espèces aquatiques, ou inféodées à ces milieux, aussi bien animales que végétales qui jouent un rôle primordial dans leur fonctionnement.

Dans ces écosystèmes aquatiques continentaux, les cycles de production sont étroitement liés aux variations saisonnières de la température et des précipitations et, dans notre région, plus particulièrement aux périodes d'étiage estival. Ces écosystèmes vivent au rythme des perturbations qui les façonnent et sont nécessaires à leur évolution. Mais lorsque les perturbations sont trop importantes, l'écosystème peut perdre son aptitude à retrouver un état d'équilibre, on dit alors qu'il perd sa capacité de résilience. Ces écosystèmes, fragiles pour la plupart, sont déjà soumis à une forte pression anthropique (artificialisation, prélèvements, pollution etc.) et devraient dans les années qui viennent être soumis à des conditions estivales de plus en plus sévères. Dans quelle mesure ces milieux et les espèces s'y trouvant, au moins pour une partie de leur cycle de vie, sont-ils menacés par le changement climatique ? Ces écosystèmes seront-ils susceptibles d'atteindre des seuils d'irréversibilités liés à la combinaison changement climatique/perturbation anthropique ? Répondre à des questions aussi complexes en quelques lignes impose des choix arbitraires focalisant la réflexion sur des éléments essentiels. Une première partie dessine les causes de la vulnérabilité de ces écosystèmes, une deuxième aborde la phase critique de l'étiage estival et une troisième aborde les questions relatives aux zones humides de Camargue.

4.1. Changement climatique, pression anthropique et manque de connaissances scientifiques participent à la vulnérabilité des écosystèmes aquatiques

Les écosystèmes aquatiques sont vulnérables face aux changements climatiques

Les changements climatiques induisent deux répercussions principales sur les écosystèmes aquatiques via l'échauffement de l'air et la modification de la pluviométrie :

- une augmentation de la température de l'eau, entrainant une augmentation globale du métabolisme de la matière organique, y compris sa dégradation, conduit à une eutrophisation du milieu (raréfaction de l'oxygène disponible pour la respiration des organismes aquatiques) ainsi qu'une évaporation accrue ;
- une dynamique de la pluviométrie plus contrastée, avec (i) de longues périodes sans pluie conduisant à augmenter significativement les linéaires asséchés ou diminuant la quantité d'eau et l'écoulement au niveau des cours d'eau en générant une moindre solubilité de l'oxygène dissous, et (ii) des périodes de pluies perçues comme intenses pouvant provoquer des crues rapides et dévastatrices, dont les caractéristiques restent sous-étudiées.

Les organismes aquatiques n'ont pas tous la même capacité de réaction, immédiate ou évolutive, pour faire face à ces répercussions et il est raisonnable de supposer que des populations entières pourront être décimées en l'espace de quelques heures, quelques jours ou quelques mois. Les perturbations de la température et de la pluviométrie n'auront pas les mêmes conséquences sur les espèces, selon leurs capacités de refuge, de tolérance ou de fuite. Alors qu'un oiseau inféodé au milieu aquatique (le martin pêcheur par exemple) pourra passer d'une rivière à une autre sous l'effet d'un stress thermique ou d'une crue, tant qu'un autre cours d'eau est disponible, une plante ne le pourra qu'à la faveur d'une dispersion de graines, et donc, sur un temps plus long.

L'effet indissociable de la pression anthropique

La grande diversité des écosystèmes aquatiques continentaux de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, des petits fleuves côtiers jusqu'aux lacs de haute altitude, impose une étude au cas par cas des effets potentiels des changements climatiques. La vulnérabilité de ces écosystèmes au changement climatique est d'autant plus grande que ces écosystèmes sont déjà soumis à une forte pression anthropique, avec notamment la canalisation des cours d'eaux au détriment des fonctionnalités du milieu, et donc de la biodiversité aquatique. En effet, l'utilisation du béton pour canaliser les cours d'eau lors des pluies torrentielles destructrices empêche la vie de se fixer (biofilm, micro- et macro-invertébrés, etc.). Toute la chaîne trophique est ainsi inhibée, des macro-invertébrés jusqu'aux poissons. L'artificialisation des cours d'eau n'est pas le seul résultat de la pression humaine, prélèvements (irrigation, eau potable) et rejets participent aussi à la forte pression exercée sur les cours d'eau. Moins soumis à la pression anthropique, les lacs de haute altitude constituent également des écosystèmes sensibles, vulnérables, qui sont utilisés comme des sentinelles des changements environnementaux.

Les variations environnementales sont certes le moteur de l'évolution biologique et conduisent les organismes à s'adapter en permanence à ces variations. Mais aujourd'hui, la particularité est que le rythme et l'amplitude des variations imposées par l'homme sur la nature sont bien plus marqués que ce à quoi étaient habituellement soumises les espèces. Certaines auront la capacité de suivre, d'autres moins.

L'évaluation de ces effets passe par une démarche scientifique

La mise en évidence d'effets de différentes contraintes sur l'environnement doit s'appuyer sur des faits et des résultats d'échantillonnages et d'expériences objectifs. Ainsi la démonstration du rôle du changement climatique dans les variations de la biodiversité des milieux aquatiques doit reposer sur une démarche scientifique rigoureuse et validée par des experts. Il faut que les études soient fondées sur une question clairement définie et qu'elles s'attachent à établir un protocole comparatif diachronique et synchronique, multipliant les unités d'échantillonnage afin d'éviter les biais locaux et afin de coller aux temporalités des cycles biologiques des espèces. Il s'agit également de s'inscrire dans une démarche au long cours la plus exhaustive possible et intégrant la fonctionnalité des écosystèmes, mais aussi indépendante de besoins immédiats (voir les initiatives type ATBI[16] du Parc national du Mercantour).

S'ajoute à cela la nécessité évidente de pouvoir croiser les données issues de différentes études. La création et l'animation pérenne de bases de données compilant les résultats d'études mandatées par des organismes publics et privés constitueraient une base opérationnelle indispensable pour fournir des réponses claires sur les effets du réchauffement climatique à l'échelle régionale, mais aussi sur d'autres pressions à d'autres échelles. Des données biologiques sur les milieux aquatiques de la région existent aujourd'hui, mais elles sont malheureusement trop fragmentaires, ce qui affaiblit la capacité d'analyse.

La mise en évidence de l'effet de quelque contrainte que ce soit sur un milieu passe par une comparaison avec ce milieu, ou un autre similaire, exempt de cette contrainte. L'établissement d'un état dit « de référence » est donc indispensable mais néanmoins complexe, car il devrait mobiliser les compartiments taxonomiques et fonctionnels des milieux dans leur globalité. Cet état de référence n'étant qu'un instantané à une échelle écologique, il conviendra ensuite de l'inscrire dans une dynamique temporelle donnant accès à une trajectoire de référence. Il devient ainsi possible de disposer d'outils plus réalistes d'analyses des états écologiques passés, sans qu'ils soient pour autant mobilisables à des fins prédictives vue l'étendue des changements globaux actuels et futurs. Il faut donc se donner les moyens d'acquérir des données sans autre

Photo 6. Ephémère adulte

[16] All Taxa Biodiversity Inventory

Photo 7. Larve de *Perlidae* (plécoptère)

justification que l'établissement d'un état de référence du milieu, démarche pas encore assez soutenue par les pouvoirs publics.

La biodiversité aquatique, qu'elle soit quantitative ou fonctionnelle, est nécessaire en soi et ne doit en aucun cas être justifiée par des besoins anthropiques. Envisager une menace, un risque, un impact ou un effet sur la biodiversité aquatique uniquement s'il existe un lien direct avec les usages que l'homme pourrait en faire n'est pas suffisant. Lorsque des espèces règlementées n'ont pas été inventoriées dans certains milieux, cela ne veut pas dire qu'elles en sont absentes - l'effort de prospection n'a peut-être pas été suffisant. De plus, si éventuellement elles en étaient absentes, ce milieu pourrait tout de même leur être favorable et elles pouraient potentiellement le coloniser si on leur laissait leur chance. Ainsi, il est nécessaire, quelques soient les résultats d'inventaires, de limiter, voire de proscrire, toute dégradation de ces écosystèmes aquatiques.

La biodiversité se retrouve trop souvent « à la remorque des usages » des milieux aquatiques et peine à être suffisamment prise en compte. Il en faudrait pourtant peu pour que les ruisseaux, rivières, étangs ou lacs voient leurs connaissances améliorées afin qu'ils soient mieux préservés face aux changements climatiques. Seule une prise de conscience politique soutenue par la société pourra y conduire.

4.2. L'étiage estival : une phase critique des milieux aquatiques face au changement climatique

Les extrêmes climatiques, sécheresse et crue, marquent profondément le fonctionnement des cours d'eaux. Le déficit pluviométrique en été se traduit par une période de basses-eaux, l'étiage estival. C'est lui qui détermine le point bas du développement des peuplements d'un cours d'eau. L'incertitude, voire les contradictions des prévisions d'évolution de la pluviométrie en PACA avec les changements climatiques, rendent extrêmement difficile l'évaluation de l'impact de ces changements sur les milieux aquatiques. La seule certitude qui semble faire l'unanimité des prévisions est que la sécheresse estivale va être plus sévère en intensité et en durée. Avec une autre certitude d'évolution climatique qui est une température plus élevée en été sur toute la région, nous avons deux phénomènes (sécheresse et forte chaleur) qui vont impacter fortement les milieux aquatiques de notre région.

La réduction de débit entraîne des modifications majeures dans le fonctionnement des cours d'eau. Il est évident que le plus impactant est lorsque la réduction de débit entraîne l'assec des cours d'eau. Si les espèces ne sont pas adaptées à ces conditions, et si elles n'ont pas la possibilité d'émigrer vers une zone refuge, on assiste à la disparition du peuplement aquatique.

Photo 8. Le secteur de Montaux sur le haut Argens le 14 janvier 2008

Les possibilités de recolonisation, lors du retour de l'eau, dépendront des réservoirs biologiques et des conditions de circulation pour les espèces (continuité biologique).

On rappellera que les cours d'eau sont confinés à l'intérieur de bassins versants isolés les uns des autres et, à part les oiseaux qui ont la possibilité de se déplacer d'un bassin à l'autre pour recoloniser les milieux lors du retour de l'eau, il faudra trouver à l'intérieur même de ces bassins versants les réservoirs biologiques permettant la reconstruction partielle ou totale de l'ensemble des êtres vivants de l'écosystème. A cette intensité de l'assec s'ajoute, comme facteur aggravant, sa durée. L'année 2007, à cet effet, a été fort instructive. Faisant suite à 4 années déficitaires, un secteur de 7 km a séché du 13 août au 14 janvier 2008 (Photo 8) sur la haute partie du fleuve côtier Argens. Si cette portion de l'Argens avait déjà connu des assecs sur cette zone (1991, 2005), jamais la durée n'avait été aussi longue, les pluies d'automne permettant habituellement le retour de l'écoulement vers la fin septembre au plus tard. Cette durée exceptionnelle sans eau aura causé la disparition du plécoptère *Leuctra occitana* (Despax 1930) (perles, photo 7), dont la présence était connue, dans le sud de la France, uniquement dans ce secteur du haut Argens.

Le deuxième impact majeur est le résultat de la réduction du débit sur le courant. Moins de débit, c'est des eaux moins rapides donc :

- moins de brassage avec, comme effet, une oxygénation des eaux qui diminue. Si la teneur en oxygène diminue, les espèces les plus exigeantes pourraient ne pas trouver des conditions leur permettant de vivre. Si la baisse de la teneur en oxygène n'est pas assez forte pour provoquer leur mortalité, elle peut provoquer un affaiblissement des individus, les rendant plus vulnérables à des maladies et/ou à des pollutions ;

- une capacité de transport qui diminue au profit des dépôts. En particulier pour les rejets de matières organiques, cela a comme conséquence une augmentation de la sédimentation au détriment d'une répartition sur une plus longue distance. Cette accumulation se traduira par une consommation de l'oxygène pour la dégradation de cette matière organique, consommation qui, selon son importance, pourra aller jusqu'à créer des conditions anoxiques ;

- une dilution des polluants qui se réduit et, par conséquent, une toxicité sur les organismes vivants qui augmente ;

- des risques importants d'eutrophisation du milieu (Photo 9).

Si l'abaissement du débit ne conduit pas à l'assec du cours d'eau, une plus faible quantité d'eau se traduit par une capacité d'habitat réduite et une diminution de la hauteur d'eau pouvant limiter et/ou empêcher la circulation des espèces. Mais l'impact majeur se trouve dans l'augmentation de la température, en été, lorsque le débit devient plus faible. La température de l'eau est un facteur majeur dans le fonctionnement des milieux aquatiques. La grande majorité des animaux aquatiques sont des poïkilothermes , animaux « à sang froid », dont les caractéristiques sont les suivantes :

- leur vie est bornée par une température inférieure et une température supérieure. Si la température baisse en deçà de la borne inférieure ou s'élève au-dessus de la borne supérieure, l'espèce disparaît ;

- depuis la borne inférieure de vie de l'espèce, la croissance augmente avec la température jusqu'à une valeur maximale que l'on appelle optimum thermique, avant de diminuer à l'approche de la borne supérieure ;

- les conditions de la reproduction de chaque espèce dépendent de la température. Ces conditions sont, dans la grande majorité des cas, strictes et présentent peu de possibilités d'évolution. Il en est de même pour des stades très fragiles comme l'embryogénèse, les jeunes stades etc. ;

- la sensibilité des espèces aux maladies est dépendante de la température, la plupart du temps elle augmente avec l'élévation de la température.

Enfin, plus une eau est chaude, moins elle contient d'oxygène. Si l'on synthétise tout cela, l'augmentation de la température de l'eau va favoriser les espèces les moins exigeantes en oxygène, celles préférant les eaux chaudes. Les peuplements d'eaux froides verront leur aire de répartition se réduire et pour certains risquent de disparaître. L'adaptation à ces changements peut se révéler brutale pour les espèces à spectre de température étroit et qui présentent peu de capacité d'acclimatation. En revanche, les effets peuvent être favorables si cette augmentation reste dans les limites de vie de l'espèce, en favorisant la croissance des individus et en limitant certaines maladies.

Les conséquences des changements climatiques sur les conditions d'étiage estival des milieux aquatiques apparaissent donc comme très impactantes. Les très fortes chaleurs estivales ne vont qu'accroître le retentissement de la réduction des débits sur la température de l'eau. Les effets sont d'autant plus importants que les différents facteurs agissent en synergie. Par exemple, la réduction du débit agit doublement

Photo 9. Eutrophisation de la rivière Eau salée lors de la sécheresse de 2007

sur la réduction de la teneur en oxygène (moins de brassage, réchauffement de l'eau), mais en même temps accroît les besoins physiologiques des animaux et donc leur besoin en oxygène.

À l'exception des cours d'eau alpins alimentés par les glaciers, les cours d'eau de PACA et les biocénoses qui les composent, semblent naturellement très sensibles aux changements climatiques à l'étiage. Cela d'autant plus que les sécheresses sévères et les canicules seront de plus en plus fréquentes, la succession de ces phénomènes ayant plus d'impacts que les phénomènes eux-mêmes. À cela s'ajoutent les effets souvent dévastateurs des remises en eau brutales avec les crues automnales. La quantité d'eau nécessaire au fonctionnement minimum du milieu apparait comme une part importante de la ressource en été. Cette part sera d'autant plus facile à obtenir qu'on aura maîtrisé à la fois les principaux prélèvements (pour l'agriculture et les besoins domestiques) et les rejets polluants. Mais il faudra aussi assurer le maintien d'un certain nombre de fonctionnalités du milieu, comme la variabilité des conditions de milieu, la connectivité écologique. Dans les zones fortement urbanisées, les aménagements des berges et du lit pour la protection contre les inondations ont provoqué une perte de l'hétérogénéité des milieux. Si la restauration morphologique, en cours sur les cours d'eau de la région, fait partie des objectifs qui permet une meilleure résistance des hydrosystèmes face aux changements climatiques, cette reconquête est pour le moins difficile, voire impossible sur les masses d'eau dites « fortement modifiées ». Une gestion optimale des conditions écologiques du lit d'étiage dans ces zones aménagées devient alors une priorité. C'est cette volonté de réduire l'impact des changements climatiques qui est engagée dans le programme de l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée « Sauvons l'eau ». En cela, il répond à l'obligation d'atteindre le bon état écologique des milieux aquatiques, objectif de la directive européenne cadre sur l'eau (DCE) traduite dans le droit français dès 2004.

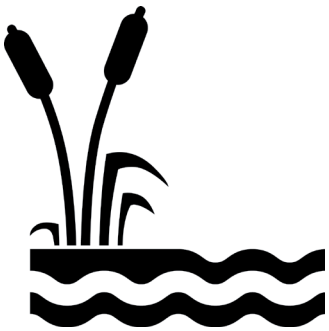
On pourra donc utiliser la quantité d'eau que l'on laissera en été pour le fonctionnement des milieux naturels comme un des indicateurs de la bonne, moyenne ou mauvaise gestion de l'eau face aux changements climatiques.

4.3. Les zones humides et le changement climatique

La préservation des milieux aquatiques et zones humides de Camargue au bénéfice de la lutte contre la variabilité climatique et les extrêmes

Dans le contexte du changement climatique, les zones humides littorales rendent de nombreux services aux sociétés (services écosystémiques). Ce sont des services d'approvisionnement, de régulation et d'atténuation des risques mais aussi des services culturels.

Les services rendus directement par les fonctions écologiques des zones humides littorales camarguaises sont diversifiés, mais la régulation de l'érosion et la réduction des risques naturels sont d'une grande importance. Les zones humides littorales sur les secteurs peu anthropisés permettent d'atténuer les effets de l'élévation du niveau de la mer en favorisant un stockage temporaire des eaux et en fournissant du sédiment contribuant à réduire la pression de l'érosion sur les secteurs voisins du littoral. Moins flagrant, mais également important, les zones humides littorales stockent du carbone organique, amortissant ainsi dans une certaine mesure l'augmentation du dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère, et contribuent à la régulation du climat local avec des températures plus tamponnées dans les zones humides que dans les écosystèmes non-humides voisins. La capacité des zones humides littorales à stocker le carbone sous forme organique (le « carbone bleu ») a été jusqu'à présent sous-évaluée et des travaux de recherche sont en cours actuellement sur ce sujet. Les zones humides salées sont particulièrement intéressantes sous cet aspect puisqu'elles ne produisent pas ou peu de méthane, un très puissant gaz à effet de serre, contrairement aux zones humides d'eau douce. Ces lagunes contribuent également à une amélioration de la qualité de l'eau continentale arrivant en mer par une très forte utilisation des sels nutritifs par les organismes vivants. Grâce à ces nutriments, les lagunes côtières sont des écosystèmes très importants pour les populations de poissons marins dont les juvéniles viennent profiter de cette manne pour grossir rapidement. Ainsi, dans le Golfe de Beauduc, les populations de poissons amphihalins (qui passent alternativement des eaux marines aux eaux continentales, par exemple les daurades, loups) bénéficient de la forte production dans les lagunes. Plus généralement, les services indirectement liés aux fonctions écologiques sont surtout ceux liés à la production primaire (végétale) et secondaire (production animale) et à l'alimentation. Dans le delta, la chasse, la pêche pour la faune sauvage et le pâturage pour les herbivores domestiques sont dépendants de ces fonctions.



La gestion des marais : une contribution au changement climatique ?

La gestion de l'eau en Camargue est caractérisée par des quantités importantes d'eau importée du Rhône, une partie étant ensuite rejetée par pompage dans le Rhône ou par drainage dans la lagune centrale, le Vaccarès. Depuis le Plan Marshall et la relance de la riziculture, cette gestion s'est beaucoup développée, accompagnée par une augmentation des réseaux d'irrigation et de drainage. La disponibilité de l'eau (Rhône) et la valeur économique de la chasse justifient un usage intense de l'eau dans de nombreux marais de Camargue, notamment pour y attirer les canards. Les volumes utilisés et les conséquences sur l'écologie des milieux sont très importants. La gestion de l'eau peut être relativement diversifiée selon les propriétés et les marais concernés, mais une pratique commune est l'augmentation de la durée d'inondation, souvent permanente. Lorsqu'un assèchement est pratiqué, il est généralement à contre-saison (en fin d'hiver) pour une remise en eau printanière ou estivale avec un strict contrôle des profondeurs. Ainsi les superficies inondées en été sont plus importantes qu'en hiver. Cette gestion qui stimule la production de plantes, si elle permet l'accumulation de matières organiques dans les sédiments des zones humides, accélère la production de méthane contribuant ainsi à l'aggravation du changement climatique. Cette gestion conduit également à une banalisation des écosystèmes et à la colonisation par des espèces exotiques envahissantes, notamment les jussies (*Luwigia peploides* et *L. grandiflora*). Un retour à l'assèchement estival des zones humides en Camargue contribuerait probablement à réduire la production de gaz à effet de serre et une restauration de la biodiversité camarguaise.

Photos 10-11. Inondation des marais littoraux salés en Camargue

5. Les conséquences du changement climatique sur les usages de l'eau

L'usage de l'eau ne se limite pas à l'utilisation de l'eau potable. L'eau est aussi au cœur de la plupart des activités humaines : agriculture, production industrielle, transport, nettoyage des villes, énergie... Nous avons vu dans les chapitres précédents que l'impact du changement climatique sur la ressource en eau ne sera probablement pas négligeable et plus particulièrement en été, période durant laquelle les impacts négatifs sur la ressource devraient être les plus importants. Des conséquences sont donc attendues sur les usages. Conséquences d'autant plus importantes que la ressource doit être partagée. Ainsi, même si les prélèvements pour l'industrie sont en baisse significative depuis une quinzaine d'années et que près de 90 % des prélèvements pour la production d'électricité sont restitués au milieu, les conséquences liées à la raréfaction de la ressource, notamment estivale, doivent être analysées et rapidement prises en compte. Ce chapitre aborde principalement les conséquences probables du changement climatique sur l'eau agricole et sur la production électrique en région PACA.

5.1. Les multiples facettes de l'eau agricole au prisme du changement climatique

Que ce soit au niveau international, national ou régional, le secteur agricole reste le premier consommateur d'eau. En région PACA, sur les 3,5 milliards de m^3 d'eau prélevés par an (hors hydroélectricité), 2,2 milliards sont attribués à l'agriculture, ce qui correspond à 66 % des prélèvements, contre 21 % pour l'eau domestique et 9 % pour l'industrie (SOURSE, 2010). C'est donc le secteur agricole qui est de plus en plus sollicité par les politiques publiques pour diminuer sa consommation et permettre un partage autre de la ressource dans une perspective de réchauffement climatique.

La région étant sous influence d'un climat méditerranéen, l'agriculture qui s'y est développée est majoritairement une agriculture de type irrigué (25 % de la S.A.U) et non pas pluvial comme dans la majeure partie des autres territoires français.

Ce fut d'ailleurs une des principales conquêtes des sociétés locales provençales que d'avoir réussi à canaliser l'eau et l'amener là où elle faisait défaut. Les premiers canaux d'irrigation furent construits au Moyen-Âge (Canal Saint Julien), d'autres suivirent à l'époque de la Renaissance (Canal de Craponne), avec un fort développement de ces structures hydrauliques à la fin du XIX^{e} siècle sur l'ensemble de la région. La création en 1907 de la « Commission Exécutive de la Durance » permit enfin le règlement de conflits pour le partage de l'eau entre les différents utilisateurs de l'amont et de l'aval de la Durance, en gérant la répartition des droits d'eau entre chacun. Cette histoire singulière a construit un espace de gestion collectif qui fonctionne aujourd'hui encore.

La région PACA est un des plus gros contributeurs à la production horticole, arboricole et maraîchère européenne[17] et les techniques d'irrigation utilisées pour ces cultures sont encore aujourd'hui majoritairement gravitaires, 52 % des surfaces régionales irriguées ont recours à des techniques d'irrigation par immersion ou à la raie, contre 37 % par aspersion et 10 % au goutte à goutte (SOURSE, 2010).

Pour autant, les agriculteurs n'ont pas attendu les injonctions institutionnelles pour mettre en place des procédés plus économes en eau, avec en particulier le développement de la micro-irrigation, là où la topographie des lieux, la disponibilité de la ressource et les moyens techniques (pompage sous pression) leur permettaient de le faire. C'est le cas par exemple de l'arboriculture fruitière sur une partie du territoire bas-alpin ou encore sur les contreforts du Mont Ventoux.

D'autres approches d'économie de la ressource font aujourd'hui l'objet d'attentions particulières. Avec les avancées des connaissances en pédologie et en écologie, sont reconsidérées par exemple des pratiques culturales anciennes, telle la revalorisation de la jachère, l'utilisation d'engrais verts, l'attention à la rotation des cultures, ou d'autres plus contemporaines comme l'amélioration génétique des plantes en vue de leur adaptation à des périodes de sécheresse plus prononcées, ou encore la gestion d'une agro-biodiversité pour favoriser la pluralité et la résistance des cultures. Ces différentes approches s'inscrivent bien dans la définition de l'adaptation au changement climatique proposée par Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) : « Ajustement des écosystèmes ou des systèmes socio-économiques en réponse à des stimuli climatiques présents ou futurs ou à leurs effets, afin d'atténuer leurs conséquences négatives ou d'exploiter de nouveaux éléments favorables ».

[17] Agreste (2014), Graph'Agri Région PACA, Ed. Ministère de l'agriculture

Si des techniques d'économie de la ressource en eau sont de plus en plus adoptées par les agriculteurs provençaux, il n'en demeure pas moins que l'irrigation gravitaire conduite dans des canaux présente également un certain nombre d'avantages non négligeables et qu'il convient de préserver. Nous pouvons en présenter au moins de deux types. Tout d'abord, l'eau mobilisée dans les canaux par les différents usages permet de limiter les prélèvements sur la nappe phréatique, mais aussi la circulation de l'eau dans l'ensemble du réseau des filioles[18] et les irrigations assurent la recharge des principales nappes souterraines de la région. L'exemple le plus emblématique est celui de la plaine de la Crau qui est quasiment dépourvue d'eau de surface mais dispose d'une nappe phréatique de 550 millions de m^3 qui alimente en eau 270 000 habitants dans les Bouches-du-Rhône et la zone industrielle de Fos. La recharge de cet aquifère dépend pour 2/3 de l'eau d'irrigation dérivée de la Durance par le canal de Craponne[19]. Aujourd'hui, le maintien de cette nappe est « totalement dépendant des apports provenant des fuites des canaux et de la percolation des irrigations gravitaires, estimés à 160 Mm^3/ an ». Sur le secteur durancien, l'eau d'irrigation joue aussi un rôle déterminant dans le maintien de plusieurs ressources souterraines. Selon une étude commandée par l'Association Syndicale Autorisée (ASA) du canal Saint Julien en 1999, la nappe phréatique de basse Durance est alimentée à 75 % par les eaux d'irrigation contre seulement 25 % de façon naturelle (cours d'eau et précipitations). De récents travaux menés sur la nappe phréatique qui alimente la ville d'Avignon confirment l'importance de cette proportion et le rôle déterminant de l'eau d'irrigation dans la recharge de l'aquifère[20] .

Photo 12. Le canal de Carpentras

Les canaux peuvent, en deuxième lieu, assurer un rôle d'évacuation et de drainage des eaux pluviales et jouer un rôle non négligeable de protection contre les inondations lors d'épisodes pluvieux intenses. Par exemple, sur le secteur de Salon de Provence, les canaux d'irrigation drainent, suivant les communes, de 35 % à 100 % des eaux pluviales. Une évaluation économique du coût de remplacement du canal a été réalisée pour la ville de Sisteron, montrant qu'en cas de disparition de celui-ci, les frais d'entretien d'un réseau d'évacuation seraient très largement supérieurs à celui du canal existant (Chambre d'agriculture 2005[21]). L'ASA du canal de Carpentras a pour sa part signé une convention avec la ville de Carpentras pour la régulation des eaux pluviales. Tous ces exemples témoignent de l'importance du maintien de ces anciennes structures hydrauliques et de la nécessité de continuer à les entretenir pour répondre à de nouveaux enjeux.

[18] Filiole : terme provençal désignant un petit canal d'irrigation dérivé d'un plus grand

[19] CED (2007), Commission Exécutive de la Durance. Une pratique et une expérience de plus de 100 ans de la gestion collective de l'eau et de la régulation concertée dans les territoires de basse Durance, Rapport, 16 p

[20] Nofal S., Cognard-Plancq A.L., Marc V., Tison F., Daniel M., Travi Y. (2012), *Impact de la gestion des eaux d'irrigation sur la recharge des nappes en Basse Provence. Exemple de la plaine d'Avignon*, in : C. Aspe, *De l'eau agricole à l'eau environnementale. Résistances et adaptation aux nouveaux enjeux de partage de la ressource en Méditerranée*, Quae, pp. 159-173.

[21] Chambre d'Agriculture 04 (2005), *Maintien et Sauvegarde du patrimoine hydraulique contribuant à la richesse environnementale*, Rapport, Digne, 28 p

Penser la gestion de l'eau agricole à l'échelle régionale ne peut se faire uniquement dans une perspective d'économie de la ressource sans intégrer les autres fonctions et services rendus par l'eau agricole et les canaux d'irrigation. Aujourd'hui, les ASA, associations qui gèrent les périmètres irrigués (il y en a environ 600 sur la région PACA), doivent composer avec des formes traditionnelles d'usage agricole de l'eau et des enjeux contemporains. Les canaux de Provence connaissent un nouveau tournant de leur histoire, vieille déjà de plusieurs siècles. Aujourd'hui comme hier, ils doivent faire face à une tension qui leur est constitutive, à savoir d'être des ouvrages hydrauliques à vocation d'aménagement du territoire - c'était déjà l'ambition d'Adam de Craponne - tout en étant le résultat d'un investissement sectoriel permettant la réalisation d'un équipement dont l'utilité dépasse sa fonction première et son usage initial.

L'eau agricole n'est plus seulement agricole, elle peut se faire aussi eau des jardins, eau du paysage ou eau des villes. Face aux transformations climatiques prévisibles, de nombreuses solutions s'offrent aux agriculteurs pour faire preuve d'adaptation, mais il est aussi important de raisonner de manière plus globale et d'analyser les conséquences d'une trop forte diminution de l'eau mobilisée par le secteur agricole, car cette eau est aussi à usages multiples, et les ouvrages d'art qui lui permettent de circuler ont eux aussi leur rôle à jouer dans cette nouvelle adaptation.

5.2. Les plantes auront-elles besoin de plus d'eau ?

Assez intuitivement, on aurait tendance à penser qu'avec le changement climatique, les plantes auront des besoins en eau plus importants du fait de l'augmentation de la température. Pourtant, une telle déduction n'est pas toujours exacte. En effet, la consommation en eau des plantes va dépendre de l'étendue de la surface évaporante (la surface des feuilles principalement) et de la demande climatique avec des effets antagonistes qu'il faut prendre en compte pour évaluer la consommation en eau résultante des plantes.

Comment évoluera la demande climatique ?

La demande climatique est la quantité d'eau perdue par les couverts végétaux, sous forme d'évapotranspiration, quand ils ne subissent pas de stress hydrique. On parle alors d'évapotranspiration potentielle qui va augmenter avec le rayonnement, le vent, l'hygrométrie de l'air (un air sec favorise l'évapotranspiration) et la température. L'augmentation de la température, qui est la caractéristique la mieux cernée dans le changement climatique, conduit à accentuer la demande climatique. Pour les autres grandeurs climatiques, leur évolution ne semble pas significative ou elle est encore mal cernée.

Il faut également prendre en compte l'augmentation du CO_2 dans l'atmosphère. En effet, la transpiration des plantes est principalement régulée par l'ouverture des stomates qui sont des orifices sur les feuilles qui mettent en communication l'eau contenue dans la plante avec l'atmosphère. La taille des ouvertures des stomates est pilotée par la plante selon deux processus : la photosynthèse qui a besoin d'un flux rentrant de CO_2 et la transpiration qui a un besoin de flux sortant de vapeur d'eau. Chacun de ces processus peut réguler l'ouverture selon les besoins et les contraintes de la plante. Dans notre cas, on montre que les plantes réduisent l'ouverture des stomates lorsque la concentration de CO_2 dans l'atmosphère augmente[22]. La conséquence directe est une réduction de la transpiration et ainsi des besoins en eau de la plante.

Le changement climatique impacte le développement des plantes

L'augmentation de la température joue sur le développement des végétaux. Il convient de distinguer les plantes annuelles des plantes pérennes. La durée du cycle d'une plante annuelle est fortement conditionnée par la température. Lorsque celle-ci augmente, les phases de développement s'accélèrent et ainsi la durée de vie de la plante, de la germination à la maturité, va se réduire. Si les plantes auront besoin de plus d'eau du fait de la demande climatique, elles en auront donc besoin moins longtemps et au final la consommation en eau cumulée par la plante pourrait être inférieure dans le futur. Avec les plantes pérennes il n'y a plus d'ambiguïté, la hausse des températures engendrant un allongement de la phase végétative, les plantes débourrant plus tôt au printemps et rentrant en dormance plus tard à la fin de l'automne. Pour ces plantes, la demande en eau sera plus importante. Enfin, il faut aussi tenir compte de la valeur fertilisante du CO_2. En effet, l'efficience de la photosynthèse est améliorée pour la plupart des plantes, ce qui augmente la surface foliaire et par conséquent la

[22] Les plantes, grâce à un gradient de CO_2 plus élevé, maintiennent le flux de CO_2 pour alimenter la photosynthèse malgré une conductance plus faible

transpiration. La demande climatique a augmenté d'environ 10 % au cours des 30 dernières années et une hausse similaire est attendue d'ici 2050. Ces hausses ne tiennent pas compte de l'impact direct de la teneur en CO_2 de l'atmosphère sur la transpiration qui atténuerait cette augmentation avec une diminution d'environ 5 % de la demande climatique.

5.3. Les conséquences sur la production électrique

Augmentation de la température des cours d'eau et conséquences sur la production des centrales thermiques

Si les rejets thermiques des centrales thermiques et nucléaires à circuit ouvert élèvent la température de l'eau des fleuves, la température de l'eau peut à son tour affecter leur fonctionnement à cause de restrictions physiques et légales.

Les limitations physiques sont liées à la réduction de l'efficacité du cycle de Carnot[23] avec une augmentation de la température. Ainsi, l'augmentation de la température de l'eau restreint la capacité de réfrigération des centrales thermiques et nucléaires et diminue l'efficacité de la production d'énergie. Une augmentation de la température de l'eau de +1 °C entraîne une perte de production d'électricité d'une centrale nucléaire d'environ 0,5 % et peut atteindre ou dépasser 2 % en cas de sécheresse ou de vague de chaleur. Ces limites physiques ne sont toutefois pas de nature à diminuer significativement la production à l'échelle d'un pays comme la France où les centrales nucléaires à circuit ouvert sur un fleuve sont minoritaires. Les arrêtés de rejets réglementaires donnent un cadre strict, en termes de débit et de température, au fonctionnement des centrales thermiques à circuit ouvert ou fermé.

Ainsi, du fait de l'augmentation de la température de l'eau, de la baisse des débits et des arrêtés de rejets, une réduction de la capacité de fonctionnement des centrales thermiques et nucléaires est attendue. Cette situation peut entraîner une restriction de la production électrique pendant les périodes très chaudes afin de respecter les limitations légales relatives à la pollution thermique, consécutive à la diminution ou à l'arrêt de la production. Il faut mentionner les épisodes de vagues de chaleur de 2003 et 2009 durant lesquelles plusieurs centrales françaises ont dû arrêter leur production. De plus, en période de canicule la demande électrique augmente à cause d'un usage accru de la climatisation. Ainsi, du fait d'une production réduite et d'une demande croissante, le prix de l'électricité est susceptible d'augmenter. Ce fut le cas en 2015. L'adéquation des arrêtés de rejets avec les impacts effectifs sur l'environnement doit être réinterrogée au fil de l'avancée des recherches scientifiques.

Les conséquences sur la production hydroélectrique

La gestion d'une réserve hydraulique à objectifs multiples se trouve sous la double dépendance de l'évolution des apports, notamment ceux en provenance de l'amont de la retenue et de l'évolution des besoins en eau à desservir en aval (débits environnementaux, irrigation, alimentation en eau potable (AEP), industrie, etc.). La gestion de la réserve hydraulique assure dans ce contexte un rôle de mise en cohérence entre l'offre de ressource naturelle (en générale abondante au printemps, surtout dans un bassin à composante nivale) et la demande en eau anthropique (forte en période d'étiage estival). Elle doit aussi être assurée en tenant compte des contraintes pesant sur la cote et bien sûr du rôle énergétique qu'occupe la réserve hydraulique dans le système électrique.

Le climat apparait naturellement comme un facteur clé pouvant modifier les grands déterminants de la gestion de la réserve hydraulique. L'évolution de la demande en eau liée au contexte territorial constitue un autre volet pouvant avoir des effets de même ordre de grandeur.

D'un point de vue climatologique, en France et plus particulièrement dans la partie méditerranéenne du sud-est du territoire, le changement climatique a principalement un impact sur l'élévation des températures de l'air (entre +1 et +2 °C, si on compare la période 1985-2015 à la période 1948-1984). À l'horizon 2050, les projections climatiques (GIEC3) utilisée dans le cadre du projet R^2D^2 2050[24] (§ 1.2) proposent une élévation de la température moyenne de l'air de 1 à 3 °C, par rapport à la période 1980-2009. L'impact sur l'intensité des précipitations et/ou sur leur volume annuel n'est pas avéré, aussi bien dans le passé que dans le futur. On peut observer éventuellement de légères modifications (à la baisse ou à la hausse) des cumuls saisonniers. D'un point de vue hydrologique, compte-tenu des processus hydrologiques dominants, l'impact de l'augmentation des températures peut modifier la saisonnalité des débits (avancement dans la saison de l'onde de fonte) et diminuer les débits estivaux, au travers d'une augmentation de l'évapotranspiration réelle. Le volume annuel d'écoulement devrait être à la baisse avec une conséquence directe sur la production électrique.

D'un point de vue territorial et contextuel, l'augmentation des températures de l'air a des effets sur l'ensemble des usages de l'eau (notamment, électricité, irrigation et production AEP). Ces effets conduisent principalement à une augmentation des prélèvements et/ou de la consommation de l'eau (à périmètre des productions et méthodes de transport/adduction de l'eau constants), ce qui peut mettre le système de multi-usages de

[23] L'efficacité du cycle de Carnot détermine le travail maximal fourni par une machine thermodynamique

[24] Sauquet et *al.*, 2014. Projet R^2D^2 2050 : *Risque, Ressource en eau et gestion Durable de la Durance en 2050*. Rapport de fin de projet

Photo 13. Lac de Serre-Ponçon

l'eau en tension, compte-tenu des enjeux et contraintes de chacun de ces usages, et rendre nécessaire la mise en œuvre de stratégies d'adaptation. Comparativement aux impacts directs, les impacts indirects sur la production hydroélectrique sont difficiles à estimer et d'ordre de grandeur au moins comparables car les usages sont interdépendants. Ces évolutions, inscrites dans un contexte de multi-usages et de coévolution des territoires sur les bassins versants et les zones d'usages connectées, sont susceptibles de modifier les équilibres d'usages et de gouvernance.

Concernant le fonctionnement hydrologique des bassins versants de montagne captés par des barrages réservoirs, tels que Serre-Ponçon et Sainte Croix qui sont les plus volumineux dans le Sud-Est, l'augmentation des températures de l'air a principalement un impact sur la modification du régime nival des apports et des impacts sur la réduction de leur module annuel[25] (5 à 15 %).

De manière générale et simplifiée, la modification du régime nival se traduit par une avancée dans le temps de l'onde de fusion, avec une réduction de la pointe de fusion et une augmentation relative des débits des mois autour de la période du maximum de fusion[26]. L'avancement de l'onde de fusion de quelques semaines induit un déphasage entre le remplissage de ces grands réservoirs et les besoins des usages connexes tels que le tourisme ou l'irrigation. Par ailleurs, l'augmentation des températures de l'air (et donc de l'évapotranspiration) peut également avoir pour effet de générer des étiages tardifs à l'automne en sollicitant davantage les réserves constituées.

Les bassins versants de plus faible altitude sont également touchés par l'augmentation des températures de l'air, avec une incidence sensible sur les écoulements sous l'effet de l'évapotranspiration, se traduisant par une réduction du module annuel. Dans un bassin aménagé

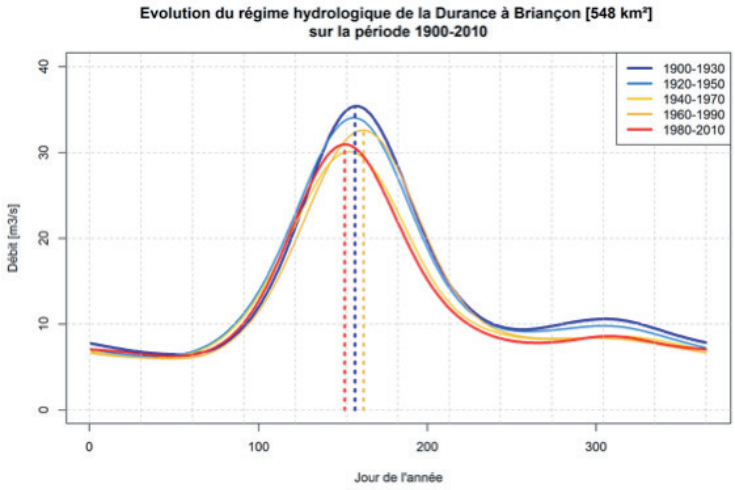


Figure 20. Exemple d'impact de la variabilité hydrométéorologique et de l'augmentation des températures de l'air sur le régime hydrologique de la Durance à Briançon (548 km²). Données issues de ANATEM Hydro (Kuentz, 2013)

[25] Module annuel : débit moyen interannuel

[26] Onde de fusion : forme donnée à l'évolution de la fusion nivale

interconnecté, doté de grands réservoirs comme celui de la Durance et du Verdon, la réduction des ressources des bassins versants de plus faible altitude reporte potentiellement les prélèvements vers les réserves en amont.

La figure 20 illustre la modification du régime hydrologique des apports sur la Durance, en illustrant la variabilité des régimes hydrologiques sur 30 années consécutives entre 1900 et 2010. Cette figure illustre deux effets : la variabilité hydrométéorologique avec des décennies caractérisées par une hydraulicité plus ou moins forte (intensité du débit au maximum de la fusion) et une évolution des régimes hydrologiques avec une variabilité de la date d'atteinte du maximum de la fusion de quelques semaines (par exemple, deux semaines entre 1960-1990 et 1980-2010).

L'évolution des régimes a un impact sur la gestion des aménagements et la production hydroélectrique en rendant plus délicate l'adéquation entre l'optimisation énergétique, la maîtrise des déversements en cas de crue, et le respect des contraintes touristiques et/ou agricoles, que traduit la courbe-guide de remplissage de la retenue, en raison du déphasage grandissant entre les apports naturels et les demandes en eau. En effet, ces évolutions obligent l'exploitant à être plus prudent dans sa gestion s'il veut conserver la même probabilité de satisfaction des différents usages, et peuvent le conduire à souhaiter remettre en cause le cadre de gestion établi.

ZOOM 3

Analyse de sensibilité de l'impact du changement climatique sur le taux de remplissage d'un barrage réservoir

Comme le montre la figure 21, l'augmentation des températures de l'air est un facteur de premier ordre sur la gestion des retenues en créant une fonte plus précoce. Dans cet exercice où la cote touristique a été considérée comme prioritaire devant l'énergie, la retenue est moins creusée pour garantir la tenue de la cote en période estivale. Si la diminution des précipitations apparaît ici comme un facteur de second ordre, elle a néanmoins pour impact de réduire encore un peu plus les amplitudes de variations de la cote du fait de la réduction des débits entrants. Les deux effets combinés ont pour conséquence de modifier la saisonnalité du remplissage de la retenue, avec une avancée significative des dates du minimum et du maximum de la cote. Sur cet exemple, le choix de donner la priorité au remplissage et à l'alimentation en eau réduit les degrés de liberté de gestion. Il met en évidence un impact sur la production hydroélectrique, sa flexibilité, et sa valorisation pour le système électrique, du fait de la réduction sensible du volume stocké turbinable en période hivernale et au printemps, lorsque les besoins énergétiques sont les plus importants.

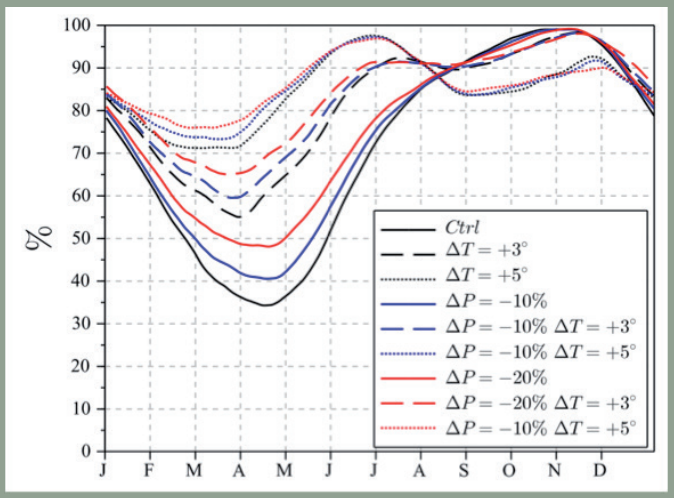


Figure 21. Exemple d'analyse de sensibilité de l'impact du changement climatique sur le taux de remplissage d'un barrage réservoir avec une double contrainte de production d'électricité et de cote objective. En noir : Courbe de référence et deux hypothèses d'augmentation de la température. En bleu et rouge, impact cumulé de la réduction respective des précipitations de 10 et 20 %. Reproduction de la figure publiée par François et *al.* (2014)

En synthèse et compte-tenu de l'ensemble des incertitudes liées au changement climatique et aux devenirs des territoires, on peut retenir que le devenir de l'offre de ressource naturelle est tout aussi important que l'évolution de la demande en eau des différents usages. La réserve hydraulique est à l'interface entre offre et demande en eau et sera donc soumise aux effets du climat sur ces deux termes (direct et indirect). En plus de jouer un rôle d'équilibre sur la sphère « eau », elle participe activement à un rôle d'équilibre dans la sphère « énergie ». Le changement climatique, en plus de modifier l'énergie produite annuellement, peut conduire à un accroissement des contraintes de gestion préjudiciable au rôle essentiel de l'hydraulique dans l'équilibre offre-demande du système électrique.

6. La Durance, lieu d'une gouvernance multi-niveaux adaptée aux défis futurs

Faire face aux défis futurs liés à l'eau et aux évolutions climatiques requiert des adaptations aussi bien techniques qu'institutionnelles. Selon l'OCDE, les solutions institutionnelles passent par la mise en place de « systèmes de gouvernance permettant l'élaboration et la mise en œuvre de politiques publiques robustes, à l'échelle appropriée, sur la base d'une répartition claire des responsabilités entre les différents niveaux de gouvernement, la société civile, le secteur privé et un éventail de partie-prenantes ».

En Europe, l'action publique dans le domaine de l'eau est principalement guidée par des concepts et des méthodes découlant de l'application de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau (DCE) adoptée en décembre 2000. La DCE promeut la gestion intégrée des ressources en eau à l'échelle du bassin versant. Sa traduction locale, en termes de processus, de décisions, de règles et d'actions opérationnelles, et donc de gouvernance, est facilitée, ou contrainte, par les conditions locales que connaissent les territoires de l'eau. Ceci est particulièrement avéré sur le pourtour méditerranéen, où les ressources en eau ont été façonnées de longue date par les interventions humaines. La gouvernance de ces territoires résulte d'une construction issue d'interactions entre différents niveaux de décisions et d'action (du local à l'international), qui permettent des adaptations et des évolutions.

À partir de l'étude de la Durance, ce chapitre retrace les évolutions passées de la gouvernance territoriale de l'eau et présente les solutions institutionnelles envisagées aujourd'hui par les acteurs locaux pour s'adapter aux enjeux de demain.

L'analyse est conduite à partir des rapports disponibles, complétés par des interviews auprès des principaux acteurs. Elle combine des éléments historiques et théoriques, propose une représentation multi-niveaux de la gouvernance actuelle. Elle s'attache plus précisément à identifier les enjeux du territoire de l'eau, les échelles de l'action publique et les articulations entre niveaux de gouvernance. Une attention particulière est portée aux arrangements institutionnels, aux modalités de gestion et aux usages.

6.1. Un territoire de l'eau méditerranéen, contrasté et sous pression

Géographiquement et démographiquement, le territoire de l'eau associé au bassin de la Durance comprend deux grandes zones caractérisées par une forte variabilité de la ressource (Figure 22) :

- Au Nord, à l'amont de Cadarache, les bassins versants de la Durance et du Verdon disposent de ressources abondantes, régulées par de grands barrages (Serre-Ponçon, Castillon,...). Ces bassins génèrent la moitié des apports. L'autre moitié provient du bassin versant intermédiaire de la Durance. Globalement, ce territoire constitue la principale zone productrice d'eau et d'énergie hydro-électrique pour une grande partie de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur.

- À l'aval et jusqu'à la zone côtière, les ressources en eau sont fragiles, souvent de moindre qualité, alors que cette zone connait un développement économique ancien et intense, source d'une forte demande en eau. À titre d'illustration le système Durance Verdon couvre le tiers des besoins en eau potable de la région.

Ce contraste spatial entre la disponibilité de la ressource et ses usages est accentué par une alternance de périodes d'excès d'eau et de sécheresses. Ces conditions ont conduit à réaliser de nombreuses infrastructures de transfert de la ressource en eau hors du bassin, au gré des différents projets contingents au développement économique et démographique de la région. Ainsi, malgré les spécificités géographiques de la région, un accès à l'eau plus adapté aux besoins a pu se dessiner. Les aménagements et les usages de l'eau associés sont historiquement organisés autour d'échelles variables depuis le niveau très local jusqu'au niveau national, par exemple dans le cas de la production hydro-électrique. Ils sont également sectoriels.

Le territoire de l'eau de la Durance s'est donc d'abord structuré autour des transferts et des aménagements, sans suivre la logique du bassin versant. Il est typique de bassins du pourtour méditerranéen subissant de fortes pressions anthropiques, équipés de nombreuses infrastructures hydrauliques et alimentés par des cours d'eau aux régimes hydrologiques irréguliers.

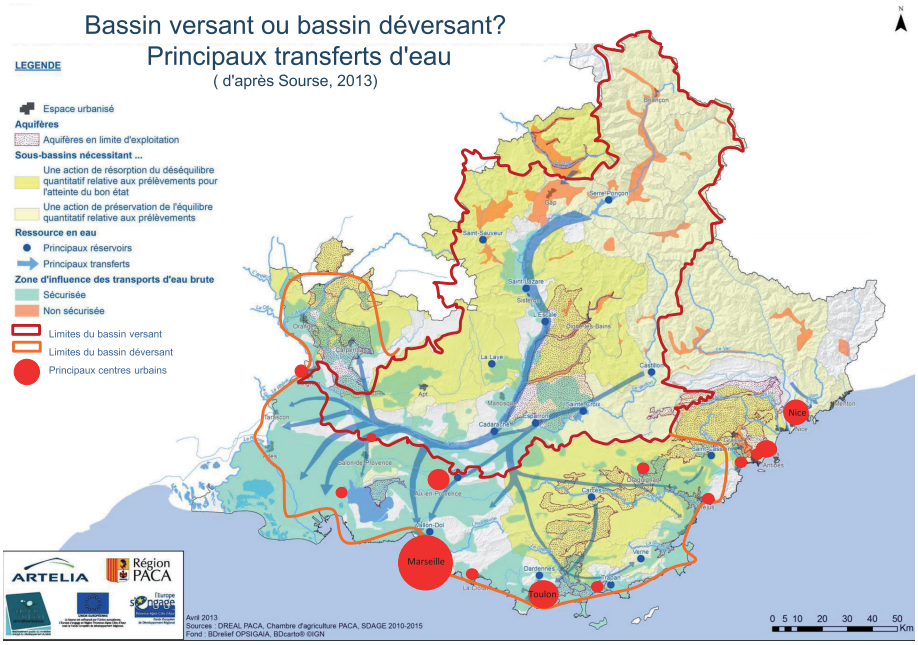


Figure 22. Les transferts d'eau en région Provence-Alpes-Côte d'Azur (d'après SOURSE 2013)

6.2. Un territoire de l'eau historiquement façonné par les transferts d'eau

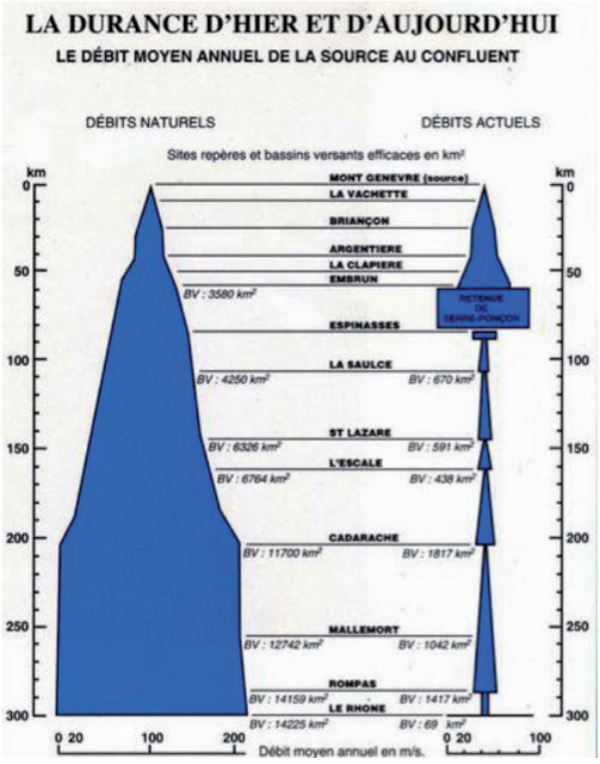


Figure 23. La Durance d'hier et d'aujourd'hui : le débit moyen annuel de la source au confluent (source « Eaux de Rhône Méditerranée Corse » - publication de l'Agence de l'eau, 1991)

Les ressources en eau sont, et ont toujours été, un facteur essentiel de développement économique. Depuis l'antiquité l'accès à l'eau est un enjeu majeur et à l'origine de nombreux ouvrages hydrauliques. Le territoire de la Durance ne déroge pas à la règle. Ses habitants l'ont façonné au fil du temps pour satisfaire leurs besoins en eau essentiels (alimentation en eau potable, assainissement, débits écologiques...) et leurs besoins économiques (énergie, irrigation, tourisme, industrie...) (Figure 23). Le développement des infrastructures permettant de mobiliser, de transporter et de distribuer l'eau, s'accompagne de négociations, de règles et de modalités de gestion qui confèrent à la ressource en eau une place de premier plan dans la gouvernance des territoires. Les transferts ont conduit à délimiter et à négocier un territoire de l'eau cohérent débordant le bassin versant hydrographique et comprenant les territoires d'usage de l'eau. Nous le nommons « bassin déversant ».

L'histoire de la rivière Durance et de son territoire est ainsi caractérisée par une succession de phases de développement correspondant à la mise en place des infrastructures et de la gouvernance associée.

- Durant une première phase couvrant la période du Moyen-Âge au XIXe siècle, le territoire d'usage de l'eau se construit en réponse aux demandes en eau locales : énergie hydraulique des moulins, irrigation et alimentation en eau potable des cités. La rivière et sa nappe d'accompagnement constituent une ressource non limitante, exception faite des risques liés aux crues et aux inondations. Durant cette première phase, l'eau est considérée comme une ressource en accès libre qu'il suffit de transporter sur les lieux de consommation. Sa gestion ne

s'appuie pas sur le concept de bassin versant. Les enjeux sont d'abord ceux de la mobilisation de l'eau, du financement des infrastructures (seuils, aqueducs et canaux), de leur propriété et de leur gestion. Cette époque prend fin au début du XX^{e} siècle avec les crises sévères qui résultent d'une concurrence accrue entre usages et de plusieurs années consécutives de sécheresse. La gouvernance évolue sous l'action combinée du développement (démographique et économique) et de la multiplication des aléas climatiques.

Photo 14. Canal de Craponne

- La seconde période est marquée par l'aménagement hydraulique de la Durance. Elle débute avec des conflits locaux qui nécessitent l'intervention de l'Etat et même la production d'une loi spécifique (loi Durance, 1907) pour établir des règles d'allocation de la ressource commune. Ce niveau d'arbitrage est rendu nécessaire par la pression croissante sur la ressource exercée par des usages locaux (alimentation en eau potable, irrigation et industries). L'eau perd alors son caractère de ressource en accès libre. En période d'étiage, les débits prélevables pour les services essentiels ou économiques deviennent interdépendants. Après-guerre, lors de la période de développement économique des « Trente Glorieuses », la loi de 1955 définit le programme d'aménagement hydraulique de la Durance. L'Etat concède la construction et l'exploitation des ouvrages à EDF, société publique créée en 1946 pour répondre aux enjeux de développement de la politique énergétique de la France. À partir des années 60, l'Etat confie la gestion de réserves sur le Verdon à la Société du Canal de Provence (SCP), puis lui concède l'aménagement hydraulique de la Provence et sa gestion. L'offre d'eau brute se développe au travers de nouvelles capacités de stockage et d'un large réseau de transport à surface libre et sous pression en galeries et conduites. La régulation hydraulique par l'aval et par la demande apparait. La gouvernance est celle d'un système centralisé avec un Etat fort. Des accords locaux bilatéraux et sectoriels sont spécifiquement établis par ouvrage, entre l'Etat et l'usager. Ils définissent les conditions selon lesquelles les infrastructures sont gérées et maintenues. Un nouveau contrat entre les acteurs de la région est ainsi scellé, pour une promesse de développement économique, urbain et agricole (pas encore touristique) fondée sur un approvisionnement en eau sécurisé réduisant les tensions et les conflits d'usages.

Durant ces deux premières périodes, les transferts se sont multipliés et ont sensiblement élargi le territoire de l'eau de la Durance bien au-delà de son bassin hydrographique. Les formes d'intervention publique mises en œuvre ont conduit à des territoires de l'eau où se juxtaposent des infrastructures, des accords bilatéraux, des valeurs et des savoirs sectoriels. Cette seconde phase est marquée par l'avènement d'une nouvelle gouvernance, à l'échelle du bassin, avec un corpus d'accords qui constitue aujourd'hui encore le socle du cadre de gestion en vigueur. Néanmoins, cette phase fondatrice de l'ère « contemporaine » de la gestion de l'eau en PACA, n'a pas tout résolu sur ce bassin. Malgré les transferts très importants qui ont pu être opérés, il subsiste un nombre important de sous-bassins déficitaires non sécurisés par cette ressource.

- La troisième période (des années 60-70 à nos jours) voit l'irruption des enjeux environnementaux et leur traduction opérationnelle dans les lois sur l'eau françaises (de 1964 à 2006) et la Directive Cadre européenne sur l'Eau (décembre 2000). L'instauration de débits écologiques négociés pour assurer le bon état des cours d'eau français se traduit, en période d'étiage, par une offre réduite pour les usages et les activités anthropiques (Figure 24). Des tensions et des conflits locaux apparaissent et sont résolus par des approches plus intégrées, associant l'ensemble des usagers et le public en conformité avec le nouveau cadre législatif et réglementaire. Il est intéressant de noter que la logique d'offre ne prévaut plus puisqu'aucune infrastructure importante n'a été construite malgré une démographie croissante et le développement du tourisme sur la Côte d'Azur, à l'exception de la liaison dite « Verdon-St Cassien » qui apporte l'eau du Verdon dans l'est du Var. Parallèlement, la gouvernance est profondément remaniée allant parfois jusqu'à une inversion des rôles et des compétences entre acteurs publics. L'érosion continue du rôle de l'Etat aboutit à une situation de gouvernance où les collectivités territoriales voient leurs compétences accrues et où les institutions du domaine de l'eau doivent compter avec l'histoire et la culture du territoire de la Durance. Les ressources en eau sont davantage gérées au niveau des territoires et les institutions de gestion locale se structurent et se renforcent. À titre d'illustration, le Syndicat Mixte d'Aménagement du Val de Durance (SMAVD), créé en 1976 pour lutter contre les inondations sur l'axe durancien aval, devient, en 2010, organisme de bassin chargé d'animer la politique de l'eau à l'échelle de la Durance.

Au cours de cette troisième période, le champ de l'intervention publique s'élargit au travers d'approches plus intégrées et faisant timidement participer le public. Néanmoins, les accords sectoriels conclus lors de la période précédente et les institutions qui en découlent sont toujours actifs et constituent la base de la gestion de l'eau. Les transferts d'eau ont abouti à l'interconnexion des territoires et à la prise en considération du bassin déversant comme l'échelle appropriée pour gouverner le territoire de l'eau de la Durance.

6.3. Vers une gouvernance intégrée et multi-niveaux pour coordonner la gestion de l'eau à différentes échelles territoriales et entre les secteurs d'usage

Aujourd'hui, le territoire de l'eau de la Durance est l'aboutissement d'une longue histoire durant laquelle chaque phase de développement est organisée autour de la mise en place d'infrastructures, de transferts interbassins, d'arrangements et de règles de gestion, et d'institutions (Electricité de France, Société du Canal de Provence...). Le bassin hydrologique est reconnu comme l'échelle pertinente de gestion des crues, de la qualité des rivières, de production hydro-électrique et de l'environnement. Il est cependant tout aussi nécessaire de considérer les enjeux liés aux usages essentiels et économiques, présents dans le bassin hydrologique comme dans le bassin déversant.

En termes de gouvernance, le système s'est complexifié : combinant des approches de bassin versant et de bassin déversant, il est profondément fragmenté entre des institutions héritées et celles issues des évolutions de la période récente. À titre d'illustration, les autorités publiques se diversifient et leurs compétences évoluent. Aux côtés de l'Etat et de ses établissements publics (Agence de l'Eau ; Agence française pour la biodiversité, ex-Onema...), les collectivités, assurent la mise en œuvre de la gestion de l'eau à différentes échelles. Ce sont principalement :

- des institutions locales de bassin (syndicats mixtes, syndicats intercommunaux...) responsables de la gestion concertée de l'eau au niveau des sous bassins ou des affluents de la Durance ;
- l'institution de bassin (SMAVD) responsable et coordinatrice de la gestion intégrée de l'eau à l'échelle du bassin de la Durance (environnement, crues, instruments de bassin) ;
- la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur avec des compétences de planification territoriale et de politique de l'eau. C'est la collectivité en charge de l'aménagement du territoire et des politiques publiques de l'eau. Elle met en œuvre la planification à long terme (SOURSE[27]) et anime le lieu régional de gouvernance de l'eau (AGORA).

Même en l'absence de conflits d'usage, les sécheresses de 2003 à 2007 ont montré la fragilité des règles d'allocation de l'eau et des modalités de gestion actuelles. Plus encore, les institutions de bassin et les approches de gestion intégrée des ressources en eau sont concernées, voire remises en cause, par les réformes territoriales en cours (Loi NOTRe[28], GEMAPI[29]). Dans ce contexte, l'efficacité et la résilience de la gouvernance de l'eau sont remises en causes par les incertitudes liées au changement climatique et aux évolutions de la demande en eau (R^2D^2 2050). Améliorer la gouvernance pour relever les défis futurs, notamment ceux liés au climat signifie adapter les institutions de gestion de l'eau, formelles ou informelles, à chaque échelle et en assurant une meilleure coordination des politiques de l'eau entre niveaux et entre usages. À l'échelle de la Région PACA, l'Assemblée pour une Gouvernance Opérationnelle de la Ressource en eau et des Aquifères (AGORA) met en place un dispositif facilitant l'accompagnement des acteurs du territoire de l'eau de la Durance et la structuration d'une réponse adaptée aux enjeux du territoire. Ce dispositif de gouvernance original et innovant résulte d'une volonté des acteurs locaux de favoriser à la fois une culture de l'eau, des pratiques partagées entre acteurs et des outils adaptés pour l'action, au croisement d'échelles pertinentes de gestion. Plus largement, ce type d'innovation institutionnelle, semble particulièrement adapté pour répondre aux défis liés à l'eau et au climat de territoires de l'eau du pourtour méditerranéen.

ZOOM 4
L'AGORA s'adapte aux nouvelles contraintes territoriales

L' AGORA met en place un dispositif adapté aux nouveaux enjeux du territoire :

- une gouvernance combinant différents niveaux (du local au régional) pour prendre en compte les transferts interbassins et renforcer les institutions locales de bassin ;
- une participation représentative des différents niveaux de gouvernements, de la société civile et du secteur privé ;
- une approche plus intégrée de la gestion des territoires de l'eau et des politiques sectorielles ;
- une vision partagée de l'avenir du territoire de la Durance et des principaux défis induits par le changement climatique ;
- une solidarité accrue entre territoires, spécialement entre ceux dont la ressource est sécurisée et ceux qui devront s'adapter à des ruptures d'approvisionnement et à des crises ;
- un cadre institutionnel facilitant l'innovation et la mise en œuvre de solutions techniques adaptées.

En s'appuyant sur les principes de l'OCDE pour la gouvernance de l'eau, ce dispositif pourrait être complété par :

- une mobilisation efficace et transparente de financements appropriés pour répondre aux défis à relever ;
- une production et un partage de données et d'informations sur l'eau permettant un suivi et une amélioration des politiques mises en œuvre.

[27] Schéma d'Orientation pour une Utilisation Raisonnée et Solidaire de la Ressource en Eau

[28] Loi portant sur la Nouvelle Organisation Territoriale de la République du 7 août 2015

[29] Gestion des Milieux Aquatiques et Prévention des Inondations : compétence transférée au bloc communal par la loi de Modernisation de l'Action Publique Territoriale et d'Affirmation des Métropoles du 27 janvier 2014

7. La gestion de l'eau face au changement climatique : un pas vers l'adaptation

Après avoir fait un tour d'horizon des connaissances concernant l'influence du changement climatique sur les ressources en eau et ses conséquences probables sur les milieux et les usages, ce chapitre met en lumière, succinctement, quelques pistes d'adaptations (non exhaustives) issues de nouveaux concepts et de projets de recherche en cours. En région Provence-Alpes-Côte d'Azur, la notion d'adaptation au changement climatique est déjà intégrée dans les politiques régionales liées à la ressource en eau (notamment dans le cadre de l'AGORA, Cf. Zoom 3), avec la mise en place, entre autre, du Plan Régional d'Adaptation au Changement Climatique. Nous n'en parlerons pas dans ce cahier mais en revanche nous ne manquerons pas de relayer, sur le site web du GREC-PACA, les initiatives concrètes issues de ces politiques et mises en œuvre sur le territoire.

7.1. Caractérisation des bénéfices économiques liés à la préservation des eaux souterraines

Pour anticiper le changement climatique, il est nécessaire de préserver des ressources en eau qui pourront s'avérer stratégiques à l'avenir car elles permettront à la société de disposer d'alternatives pour l'alimentation en eau potable (AEP) lorsque les ressources actuelles se réduiront. C'est notamment le cas des zones de sauvegarde pour l'alimentation en eau potable future, qui regroupent les territoires recelant des ressources de bonne qualité dont l'usage pour l'alimentation en eau potable est faible ou inexistant, et dont la préservation consiste à maintenir en l'état une occupation du sol ou des activités qui soient compatibles avec le bon état des eaux souterraines. Il est cependant difficile de mobiliser les élus, équipes techniques et collectivités autour des enjeux liés à la préservation de ces ressources, notamment lorsque cela s'oppose à des projets d'aménagement concurrents. C'est dans ce contexte que le BRGM et l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée Corse ont mené le projet de recherche CARAC'O[30] qui visait à développer un argumentaire économique mettant en avant l'intérêt de préserver les territoires sur lesquels sont localisées les ressources en eaux souterraines de bonne qualité.

Une série d'entretiens menés en 2013 auprès d'acteurs impliqués dans la préservation des eaux souterraines a permis d'identifier les leviers favorisant la mise en œuvre d'actions de préservation. Il est ainsi apparu nécessaire de démontrer que ces actions génèrent toute une diversité de bénéfices économiques pour les territoires. Ces bénéfices de la préservation ne portent pas uniquement sur les futurs usages potentiels de la ressource, ils s'étendent à l'ensemble des services délivrés par les écosystèmes présents sur la zone à préserver, et sont compatibles avec un bon état de la ressource en eau souterraine.

Une étude de cas a été développée en région Provence-Alpes-Côte d'Azur, sur la zone de sauvegarde des contreforts Nord de la Sainte-Baume. Cette zone de sauvegarde, peu exploitée actuellement pour l'eau potable, s'étend sur environ 7 400 ha constitués essentiellement de forêts et milieux semi-naturels. Elle recèle environ 4 millions de m^3 d'eau souterraine de bonne qualité et constitue une ressource stratégique pour les zones de forte consommation du littoral varois. La démarche proposée a consisté à identifier puis évaluer les services écosystémiques associés à la préservation des écosystèmes présents sur ce territoire.

Neuf services écosystémiques ont été identifiés par les acteurs locaux. Ils correspondent à trois grandes familles : (i) les services d'approvisionnement qui conduisent à des biens « appropriables » (aliments, matériaux, etc.) ; (ii) les services de régulation qui correspondent à la capacité des écosystèmes à moduler dans un sens favorable à l'homme des phénomènes comme le climat ou le cycle de l'eau ; et (iii) les services culturels, c'est-à-dire l'utilisation des écosystèmes à des fins récréatives, esthétiques et spirituelles, ou éducatives.

Les bénéfices associés à la préservation de l'ensemble de ces services écosystémiques sont estimés entre 2,9 et 5,4 millions d'€/an, soit entre 390 et 730 €/ha/an pour la zone de sauvegarde de la Sainte-Baume, selon les méthodes d'évaluation économique et les hypothèses utilisées (Figure 24). Les plus gros contributeurs sont les services culturels et récréatifs qui représentent en moyenne environ 69 % de la valeur économique des services écosystémiques fournis par la zone, suivis des services de régulation (23 %) dont le seul service de fixation et de stockage du carbone par les forêts contribue à hauteur de 16 %, puis des services d'approvisionnement (8 %). Il convient de noter qu'un argumentaire basé sur les seuls bénéfices associés à la préservation des ressources en eau pour l'alimentation en eau potable aurait amené à estimer les bénéfices de la préservation à hauteur de 130 à 410 k€/an, soit seulement 7 % des bénéfices totaux mis en évidence par une démarche globale basée sur les services écosystémiques à l'échelle d'un territoire.

[30] Caractérisation des bénéfices économiques liés à la préservation des eaux souterraines : le cas des zones de sauvegarde pour l'alimentation en eau potable ; HERIVAUX.C., GREMONT. M., BRGM/RP 63859 - FR. http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-63859-FR.pdf

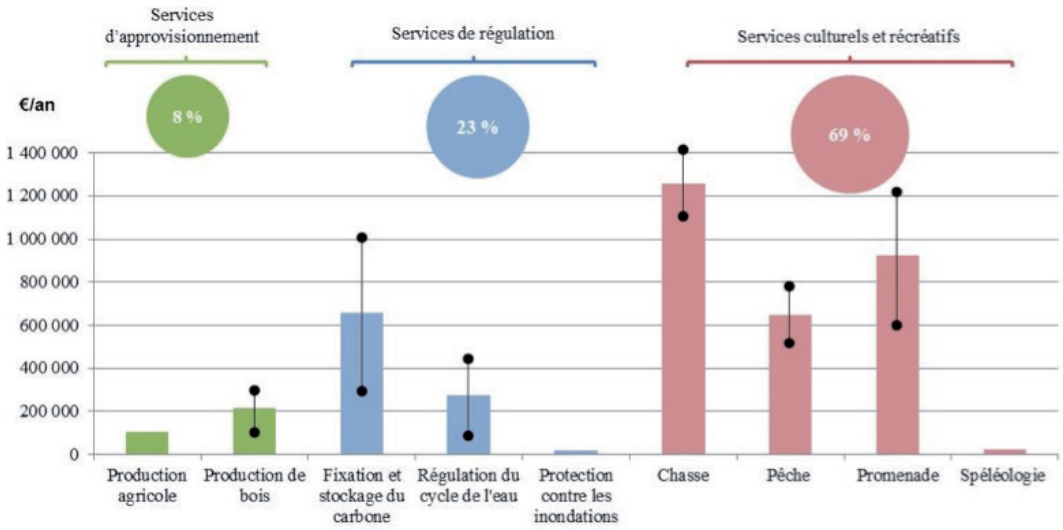


Figure 24. Valeur économique des bénéfices associés aux services écosystémiques liés à la préservation de la zone de sauvegarde des contreforts Nord de la Sainte-Baume

En conclusion, alors que la préservation des eaux souterraines non utilisées actuellement pour la production d'eau potable peut être difficile à justifier auprès des acteurs économiques, puisqu'elle implique des coûts immédiats pour des bénéfices futurs souvent incertains, ces résultats illustrent que le maintien d'écosystèmes compatibles avec une bonne qualité de l'eau permet de délivrer, dès aujourd'hui, des bénéfices non négligeables à l'échelle d'un territoire, pour toute une diversité de bénéficiaires.

ZOOM 5
L'effet de la gestion forestière sur la préservation de la ressource en eau

Dans les climats arides ou semi-arides, le développement de forêts denses, par plantation ou par un contrôle renforcé des feux par l'homme, peut conduire à une diminution des ressources locales en eau : la forte demande en eau des arbres contribue à une baisse accentuée des nappes phréatiques en saison sèche, et à des étiages ou assèchements prolongés pour les rivières. Même si la forêt dense contribue à limiter le ruissellement et accroît l'infiltration de l'eau dans le sol, elle n'est pas plus performante sur ces points qu'une végétation de type forêt claire, savane arborée ou garrigue dense. L'effet de la densité forestière sur la ressource en eau pourrait donc émerger localement comme un enjeu d'importance dans certains bassins versants méditerranéens. D'autant que dans un contexte de forêt plus sensible au feu et à la sécheresse, le contrôle de la compétition entre arbres et de la quantité de biomasse combustible peut constituer un élément clé de la gestion adaptative. Certains pays ont déjà lancé pour cela des campagnes de retour à des végétations arbustives naturelles en éliminant progressivement des reboisements denses réalisés dans le passé.

7.2. Les ressources non conventionnelles peuvent-elles constituer une piste d'adaptation ?

Toutes les activités humaines sont liées à un usage de l'eau qu'elles soient agricoles, industrielles, énergétiques ou domestiques. Les développements économiques et démographiques entrainent de fait une croissance continue des besoins en eaux (croissance particulièrement marquée dans les pays émergents). De plus, quelque soit l'endroit où l'on se trouve, les ressources conventionnelles (lacs, rivières, nappes phréatiques) sont limitées, d'un point de vue quantitatif, à des niveaux extrêmement différents et ce même dans une région de la taille de la région PACA. Il est important donc, à différentes échelles et selon les endroits, de pouvoir mettre en place des stratégies de gestion optimisées des ressources en eau. L'utilisation de ressources non conventionnelles et de cycles courts d'utilisation de l'eau, telle que décrite sur la figure 25, permettrait de limiter ou réduire la pression sur les ressources conventionnelles. Sont appelées ressources non conventionnelles les eaux pluviales, les eaux provenant du dessalement d'eaux de mer ou saumâtres et la réutilisation d'eaux usées traitées. Elles présentent chacune des avantages et des inconvénients quant à leur gestion et leurs usages. Avec

les technologies actuelles de traitement et de gestion des eaux, il est possible de mettre en place un tel cycle où les prélèvements directs de ressources conventionnelles ne représenteraient que 10 à 20 % de la somme de tous les besoins. Néanmoins, de tels cycles sont des solutions spécifiques à chaque endroit et à chaque territoire étudié. Cela nécessite donc de faire à l'échelle d'un territoire donné :

- un état des lieux spatio-temporel précis des besoins en eaux, aussi bien en termes de qualité qu'en termes de quantité, afin de classer les différents usages,
- un état des lieux spatio-temporel précis des ressources, en termes de qualité et de quantité, mais aussi de fragilité ou robustesse du milieu et des aménagements existants,
- une prospective et une projection réalistes de l'évolution des différents besoins dans le temps.

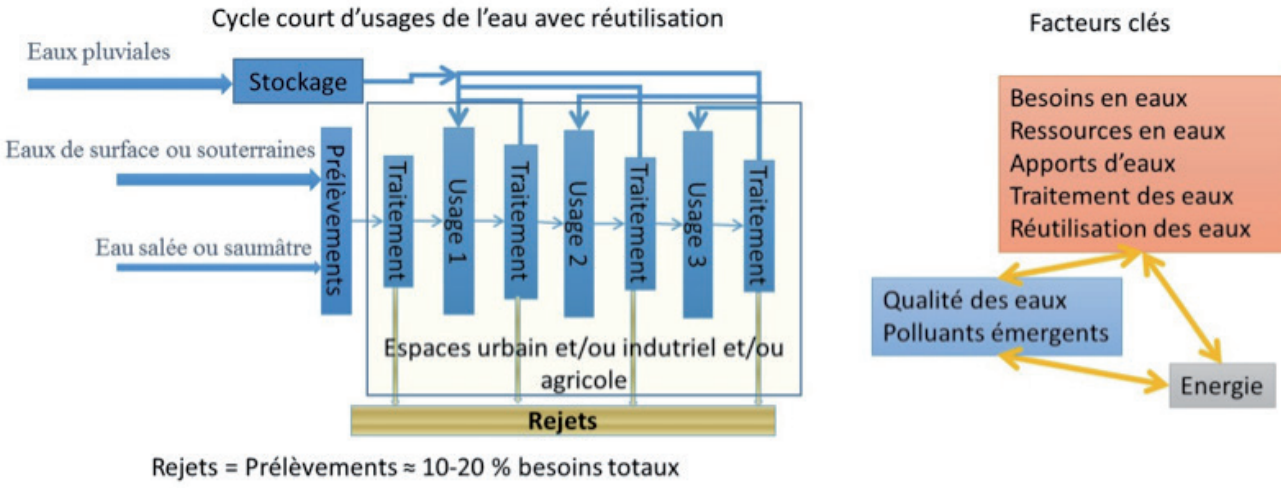


Figure 25. Représentation simplifiée d'un cycle court d'usages de l'eau (source : N. Roche)

Les quantités d'eaux présentes dans les mers et les océans peuvent laisser à penser que leur ressource est inépuisable et qu'il suffit de dessaler les quantités nécessaires pour répondre à nos besoins. Néanmoins, même si les procédés de dessalement, par osmose inverse notamment, ont beaucoup évolué ces dernières années, il ne faut pas négliger les risques environnementaux qu'ils représentent en termes de consommation énergétique, de rejets salés et de rejets de produits chimiques. De ce fait cette ressource ne peut être envisagée, d'un point de vue durable, que comme une ressource d'appoint de moins de 10 % des besoins.

Le stockage des eaux pluviales présente de réels intérêts quant à la répartition temporelle et saisonnière de la ressource et ce, sur différentes échelles. À une grande échelle, avec la mise en place de grands réservoirs de stockage associés à des canaux de distribution, comme cela a déjà été réalisé avec succès dans la région, en permettant notamment d'éviter le manque d'eau en Provence. Cette solution présente néanmoins des inconvénients liés notamment à l'impact de la mise en place de telles infrastructures sur les écosystèmes et sur le fait que les territoires situés en amont des réservoirs ne bénéficient pas ou peu de cette ressource. Il est aussi tout à fait pertinent de réaliser une gestion temporelle des eaux pluviales à des plus petites échelles (villes, quartiers, villages, maisons individuelles) avec néanmoins la limitation importante de ne récupérer, pour des questions de qualité, que des eaux de toitures. C'est un mode de gestion ancestral de la région qui a été peu à peu abandonné et qu'il conviendrait de réhabiliter dans tous les cas de constructions neuves (limitation des coûts d'investissement) afin de contribuer à des apports saisonniers, sans traitement, sur des usages locaux tels que l'arrosage des jardins et des espaces verts et le nettoyage des voiries.

La réutilisation des eaux usées traitées est une pratique qui est déjà étudiée et appliquée depuis plusieurs décennies en agriculture et avec succès dans de nombreux pays. Il ne faut pas limiter néanmoins son usage à l'irrigation car selon le niveau de traitement atteint et les besoins spécifiques d'un territoire, cette ressource peut être valorisée pour de nombreux usages avec, cependant, de vraies contraintes quant à leur qualité. Enfin, il ne faut pas sous-estimer la problématique de l'acceptabilité sociétale de la réutilisation de ces eaux et des efforts de communication seront nécessaires pour dissiper les craintes. La réutilisation des eaux usées traitées permettrait aussi de participer, au même titre que les eaux pluviales, à la recharge des aquifères côtiers très touchés par les prélèvements croissants et une imperméabilisation des sols provoquée par une urbanisation galopante qui provoque par endroit des remontées importantes du biseau salé. À une échelle plus petite, maison ou immeuble, le traitement et la réutilisation des eaux grises a déjà montré, par exemple au Japon, des potentialités très intéressantes permettant de réduire de 50 % le prélèvement d'eau pour un usage domestique.

Dans le cadre d'une gestion durable du cycle de l'eau, il convient donc de considérer, au même titre, toutes les ressources conventionnelles et non conventionnelles avec pour chacune, des spécificités, des qualités, des quantités à considérer. De ce point de vue, il faut aussi que le cadre législatif français sur la réutilisation des eaux usées traitées évolue rapidement de façon à permettre de sortir du cadre dérogatoire restrictif de son usage qui n'encourage pas la mise en place de projets d'envergure à l'instar de ce qui est fait dans de nombreux pays, notamment en Europe (Espagne, Italie, Portugal).

Enfin, il est important de considérer le lien entre tous ces cycles anthropiques de l'eau et l'énergie pour faire en sorte que les solutions choisies soient les plus neutres possible en énergie. Il convient également aussi d'optimiser le potentiel énergétique de ces eaux ; il est, en effet, tout à fait possible de produire de l'énergie à partir notamment de la chaleur des eaux usées.

7.3. L'eau virtuelle, un moyen d'évaluer l'impact des activités humaines sur la ressource en eau

La notion d'*eau virtuelle* est un nouveau concept qui établit un lien entre la production agricole et industrielle et l'utilisation des ressources en eau, directe et indirecte. Découlant directement de cette notion, la définition de *l'empreinte eau* permet de comptabiliser l'utilisation de la ressource en eau, directe et indirecte, associée aux activités humaines, de l'échelle individuelle à l'échelle globale. C'est une notion très concrète, qui offre un cadre rigoureux d'évaluation de l'impact des activités humaines sur la ressource en eau.

Ainsi, par exemple, on montre qu'il faut en moyenne 8000 litres d'eau pour fabriquer un jean. Ce chiffre comptabilise la consommation d'eau totale, incluant la production du coton, son transport sur le site de production et le processus industriel de fabrication. Dans le domaine agroalimentaire, l'empreinte eau la plus élevée est celle de la viande de bœuf, avec une moyenne de 3000 litres nécessaires pour produire un steak de 200 g. Néanmoins, il est évident que les impacts environnementaux de l'utilisation de la ressource en eau sont très dépendants de modes de production, qui vont de l'agriculture locale basée sur des cultures pluviales, à la production industrielle qui repose sur une agriculture intensive et irriguée. Pour permettre une analyse de ces impacts environnementaux potentiels, plusieurs catégories d'eau virtuelle sont définies. L'eau verte comptabilise l'eau de pluie consommée localement par la production agricole, et l'eau bleue celle qui est prélevée dans l'environnement (eau de surface ou souterraine) pour être acheminée sur le lieu de production. Une troisième catégorie, l'eau grise, vise à estimer l'impact des activités humaines en termes de pollution. Elle est définie comme la quantité d'eau nécessaire pour diluer une pollution jusqu'à revenir à des concentrations acceptables. Cette dernière, qui repose sur la caractérisation d'une pollution, est moins facile à utiliser.

À l'échelle globale, l'empreinte eau a été estimée à 9 087 109 m^3/an (1996-2005), dont 92 % sont liés au secteur agricole. Cela représente une moyenne d'environ 1400 m^3/habitant/an, avec évidemment de grandes disparités en fonction des régions du globe. Est-ce que l'empreinte eau est plus importante dans les régions où la ressource est la plus abondante ? Pas forcément malheureusement, et il arrive même que les choix économiques de certains pays les conduisent à exporter de l'eau virtuelle alors même que les productions concernées reposent sur une ressource insuffisante, ce qui conduit à l'appauvrissement progressif des aquifères. Encore insuffisamment utilisée, la notion d'empreinte eau est un outil particulièrement intéressant pour contribuer à évaluer la durabilité environnementale et économique des activités humaines.

Pour en savoir plus et calculer votre empreinte eau :
http://waterfootprint.org/

Conclusion Générale

La région Provence-Alpes-Côte d'Azur est un territoire contrasté d'un point de vue géographique et démographique. Ce contraste existe également en termes de disponibilité de la ressource en eau. Les différences de ressources, importantes au nord (Alpes du Sud) et limitées au sud (basse Provence) sont aggravées par l'existence, en zone méditerranéenne, d'une période sèche estivale. Ces facteurs déterminent des étiages très prononcés pouvant aller jusqu'à des assecs sur de longues parties des talwegs. L'inégalité territoriale vis-à-vis de la ressource en eau a engendré la réalisation de nombreuses infrastructures de transfert de l'eau au cours du temps, suivant en cela les développements économiques et démographiques de la région. Ces aménagements ont fortement réduit les inégalités territoriales d'accès à la ressource en eau et ont permis, grâce notamment aux stockages, de s'affranchir d'une partie des contraintes saisonnières et géographiques. Mais lors des années de forte sécheresse (2003-2007), les tensions restent toutefois perceptibles et l'équilibre autour de la multiplicité des usages pourrait s'avérer fragile dans un futur soumis au changement climatique.

Les incertitudes sur l'évolution de la ressource en eau (quantité et qualité) sont très grandes. Les fortes incertitudes sur les prévisions des précipitations, la complexité des systèmes hydrologiques, la forte pression humaine sur ces systèmes et le manque de connaissances (surtout concernant le suivi instrumental des cours d'eau) rendent extrêmement difficile la modélisation de ces systèmes, et donc l'évaluation de l'impact du changement sur la ressource future. Malgré tout, les résultats des travaux scientifiques sur la ressource en eau dans le futur montrent une trajectoire commune et cohérente pour la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. En considérant un scénario climatique médian, les débits annuels moyens, la recharge des aquifères, ou l'humidité du sol, seront probablement tous affectés par une diminution comprise entre 10 et 30 % vers 2050. Cette tendance devrait s'accentuer à la fin du siècle. La diminution des débits ne sera pas également répartie sur l'année. Le printemps et l'été seront plus particulièrement touchés, avec une diminution des débits qui pourrait atteindre 50 % dans certains secteurs en raison d'une sécheresse estivale plus sévère en intensité et en durée. La diminution du manteau neigeux, de plus de 50 % au-dessous de 1800 m, et sa fonte plus précoce viendront également renforcer les étiages estivaux et printaniers.

Dans le contexte du changement climatique, les ressources en eau montrent donc une tendance générale à la baisse et avec un manque d'eau accru en été. Ce ne sera pas sans conséquence sur les usages et le partage de l'eau. À la lueur de ces résultats, comment appréhender dès aujourd'hui la gestion de la ressource pour assurer un accès à tous dans le futur, en tenant compte à la fois des contraintes géographiques et culturelles spécifiques à notre territoire régional, mais aussi des transformations économiques et démographiques potentielles ?

Sachant aussi que les écosystèmes aquatiques ne devront pas être écartés des réflexions et des mesures d'adaptation qui en découleront. En effet, une attention toute particulière doit être portée à la protection et la conservation de la biodiversité de ces écosystèmes déjà fortement impactés par les activités humaines (prélèvements, rejets, artificialisation des cours d'eau etc.).

Il s'avère nécéssaire aujourd'hui d'intégrer les enjeux de l'eau dans l'aménagement du territoire afin d'assurer une gestion durable de la ressource et des milieux aquatiques. Il s'agira à la fois d'optimiser l'équilibre entre les différents usages (énergie, agriculture, eau potable) et entre utilisation des ressources locales et le recours au transfert d'eau, de préserver le bon état des eaux et des milieux, mais aussi de favoriser l'innovation et les zones de sauvegarde de ressources stratégiques. Une telle approche intégrée est déjà mise en œuvre par l'Assemblée pour une Gouvernance Opérationnelle de la Ressource en eau et des Aquifères (AGORA) de la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur, avec pour objectif, entre autres, de favoriser simultanément une culture de l'eau et des pratiques partagées entre acteurs ainsi que des outils adaptés pour l'action.

Nous n'avons pas traité dans ce document les problématiques liées aux aléas hydrologiques. Ces évènements météorologiques extrêmes, pluies torrentielles, inondations, avalanches et mouvements de terrains imputables au rôle hydromécanique de l'eau, sont des phénomènes naturels potentiellement destructeurs, mais que nous n'avons pas rattachés ici à la ressource en eau. En effet, ces phénomènes sont plutôt considérés à travers les risques qu'ils présentent pour une population donnée, c'est-à-dire par la probabilité de dommages occasionnés aux personnes et aux biens dans des situations d'occurrence aléatoire. De plus, il est encore aujourd'hui très difficile de faire un lien entre aléa hydrologique et changement climatique, les discussions à ce sujet restant ouvertes. Le GREC-PACA s'efforcera d'aborder ces sujets dans les mois à venir.

Les travaux scientifiques sur la connaissance et la modélisation des systèmes hydrologiques et de leurs écosystèmes associés continuent et doivent être soutenus au mieux par les pouvoirs publics. Ils permettront ainsi de mieux anticiper les changements à venir. Le GREC-PACA portera sur ces recherches, ainsi que sur les mesures d'adaptation développées, une attention toute particulière et continuera à les diffuser auprès des acteurs du territoire (à l'instar de sujets qui n'ont pu être abordés dans ce cahier). Inversement, afin de favoriser les interactions entre les acteurs territoires et les chercheurs, nous invitons les décideurs et les gestionnaires à faire remonter leurs remarques et leurs besoins auprès du GREC-PACA.

Les contributeurs

Pour obtenir la liste des références bibliographiques sur lesquelles s'appuie cette synthèse des connaissances, prenez contact avec le GREC-PACA (*contacts@air-climat.org*). Nous encourageons vivement les lecteurs, désireux d'en savoir davantage, à se rapprocher du GREC-PACA qui les orientera dans leurs démarches et recherches. Ils ont également la possibilité de s'adresser directement aux contributeurs de cette publication :

- **Claire Arnal** (§3), Directrice BRGM PACA, Marseille. Contact : c.arnal@brgm.fr
- **Patrick Arnaud** (§1.1), Chercheur IRSTEA, équipe risque hydrométéorologique, Aix-en-Provence. Contact : patrick.arnaud@irstea.fr
- **Chantal Aspe** (introduction, §5.1) - Maitre de Conférences, LPED UMR 151 AMU /IRD, Marseille. Contact : chantal.aspe@univ-amu.fr
- **Yves Bidet** (§1.5), Ingénieur, Chef de la division Études et Climatologie de Météo-France Sud-Est, Aix-en-Provence. Contact : yves.bidet@meteo.fr
- **Pierre Brigode** (§2.2, zoom 1) Maitre de conférence, Université Côte d'Azur, CNRS, OCA, IRD, Géoazur. Contact : pierre.brigode@unice.fr
- **Laurie Caillouet** (§2.2), Irstea, Unité de Recherche Hydrologie-Hydraulique, Centre Lyon/Villeurbanne : laurie.caillouet@irstea.fr
- **André Chanzy** (§ 3, §5.2): Chercheur, INRA UMR INRA/UAPV Environnement Méditerranéen et Modélisation des AgroHydrosystèmes Avignon. Contact : andre.chanzy@inra.fr
- **Victoria Chiu** - Maître de conférences, Université Jean Moulin Lyon 3, Equipe de droit public de Lyon (EDPL). Contact : victoria.chiu@univ-lyon3.fr
- **Johnny Douvinet** Maitre de conférences, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse (UAPV) UMR ESPACE 7300 CNRS. Contact : johnny.douvinet@univ-avignon.fr
- **Christel Francart** (introduction), Chargée de mission SOURSE / AGORA Service Eau et Milieux Aquatiques Conseil Régional Provence-Alpes-Côte d'Azur, Marseille. Contact : cfrancart@REGIONPACA.FR
- **Christophe Garrone** – Ingénieur, responsable du pôle études de la Maison Régionale de l'Eau, Barjols (83). Contact : christophe.garrone@mrepaca.com
- **Benjamin Graff** (§2.2), Ingénieur chargé d'affaires à la Direction Ingénierie et Grands Projets de la Compagnie Nationale du Rhône (CNR), Lyon : b.graff@cnr.tm.fr
- **Marine Grémont** (§7.1), Chercheur BRGM – Unité Nouvelles Ressources en Eau et Economie, Montpellier. Contact : M.Gremont@brgm.fr
- **Patrick Grillas** (§4.3), Directeur général délégué au programme, Tour du Valat. Contact : grillas@tourduvalat.org
- **Cécile Herivaux** (§7.1), Chercheur BRGM – Unité Nouvelles Ressources en Eau et Economie, Montpellier. Contact : c.herivaux@brgm.fr
- **Marie Jacqué** (introduction, §5.1)- Maitre de conférences, LPED UMR 151 AMU/IRD. Contact : marie.jacque@univ amu.fr
- **Nicolas Kaldonski** (§4.1), Maître de conférences – AMU, Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Écologie marine et continentale (IMBE). Contact : nicolas.kaldonski@imbe.fr
- **Anna Kuentz** (§2.2) Chercheur, Institut Météorologique et Hydrologique de Suède (SMHI). Contact : anna.kuentz@smhi.se
- **Jean-Christophe Marechal** (§3) Responsable de l'unité NRE (Nouvelles Ressources en Eau et Economie) – Direction D3E Eau, Environnement et Ecotechnologies, BRGM, Montpellier. Contact : jc.marechal@brgm.fr
- **Philippe Martin** (§2.1, §3.3) Professeur Université d'Avignon, UMR ESPACE 7300 CNRS. Contact : philippe.martin@univ-avignon.fr
- **Thibault Mathevet** (§2.2, §5.3) Ingénieur EDF – DTG Centre Hydrométéorologique Alpes - Département Surveillance Grenoble. Contact : thibault.mathevet@edf.fr
- **Nicolas Maughan** (§2.1), UMR-I2M ECCOREV, AMU. Contact : nicolas.maughan@gmail.com
- **Cécile Monière** (introduction) Chargée d'Etudes Eaux souterraines, Changement Climatique, Planification Territoire Côtiers Provençaux Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse- Délégation PACA & Corse Marseille. Contact : Cecile.MONIERE@eaurmc.fr
- **Antoine Nicault** (coordination générale, avant-propos, §2.2, conclusion générale) - Chercheur/consultant indépendant, Marseille. Contact : antoine.nicault@gmail.com
- **George Olivari** (§4.2), Maitre de conférence associé à AMU, Directeur de la Maison Régionale de l'Eau, Barjols (83). Contact : georges.olivari@mrepaca.com
- **Jordi Prats** (§1.4, §5.3), Ingénieur de recherche, Irstea Aix-en-Provence, Équipe Fonctionnement et restauration des systèmes hydrologiques continentaux (FRESHCO), UR RECOVER. Contact : jordi.prats@irstea.fr
- **Sophie Richard** (§6) - AgroParisTech UMR G-EAU « Gestion de l'Eau, Acteurs et Usages », Montpellier. Contact : sophie.richard@agroparistech.fr
- **Thierry Rieu** (§6) - AgroParisTech, UMR G-EAU « Gestion de l'Eau, Acteurs et Usages », Montpellier (G-EAU). Contact : thierry.rieu@agroparistech.fr
- **Florence Rivet** (§3.4, §3.5), BRGM PACA, Marseille. Contact : f.rivet@brgm.fr
- **Nicolas Roche** (§7.2), Professeur AMU, Coordinateur PR2I Environnement AMU, Aix-en-Provence. Contact : nicolas.roche@univ-amu.fr
- **Dominique Roux** (§5.3), Attaché au Directeur Délégué à la Coordination de l'Eau EDF DPIH, Marseille. Contact : dominique-ue-med.roux@edf.fr
- **Eric Sauquet** (§1.2, §2.2), Chercheur, Irstea - Unité de Recherche Hydrologie-Hydraulique, Animateur de l'équipe Hydrologie des Bassins Versants, Centre Lyon/Villeurbanne. Contact : eric.sauquet@irstea.fr
- **Irene Schimmelpfennig** (§2.4), Chercheur CNRS Cerege Aix-en-Provence. Contact : schimmelpfennig@cerege.fr
- **Jean-Michel Soubeyroux** (§1.4), DCSC/Directeur Adjoint Scientifique Météo-France. Contact : jean-michel.soubeyroux@meteo.fr
- **Christine Vallet-Coulomb** (§7.3), Maitre de conférence, AMU, Cerege Aix-en-Provence. Contact : vallet@cerege.fr
- **Michel Vennetier** (zoom 4), Chercheur IRSTEA Aix-en-Provence. Contact : michel.vennetier@irstea.fr
- **Jean-Philippe Vidal** (§1.2, §2.2), Chercheur IRSTEA Unité de Recherche Hydrologie-Hydraulique, Centre Lyon/Villeurbanne. Contact : jean-philippe.vidal@irstea.fr
- **Bruno Wilhelm** (§2.3), Maitre de conférences, Université Grenoble Alpes, CNRS, IRD, Institut des Géosciences et de l'Environnement, F-38000 Grenoble. Contact : bruno.wilhelm@univ-grenoble-alpes.fr

Comment citer cette publication du GREC-PACA ?

Les ressources en eau et le changement climatique en Provence-Alpes-Côte d'Azur, Les cahiers du GREC-PACA, édités par l'Association pour l'innovation et la recherche au service du climat (AIR), juillet 2017, 52 pages. ISBN : 9782956006053

L'association pour l'innovation et la recherche au service du climat, A.I.R. Climat, entend contribuer à la prise de conscience des enjeux du changement climatique, mais aussi aider à la recherche de solutions innovantes. Il s'agit d'intégrer le plus tôt possible l'énergie et le climat dans nos modes de vie et dans la façon de concevoir nos métiers et nos politiques.

contacts@air-climat.org - www.air-climat.org

ISBN 978-2-9560060-5-3