



**HAL**  
open science

## **R<sup>2</sup>D<sup>2</sup> 2050 Risque, ressource en eau et gestion durable de la Durance en 2050**

Eric Sauquet

► **To cite this version:**

Eric Sauquet. R<sup>2</sup>D<sup>2</sup> 2050 Risque, ressource en eau et gestion durable de la Durance en 2050. Références : Les connaissances scientifiques au service de la, Direction de la recherche et de l'innovation (DRI) du Commissariat; Général au Développement Durable (CGDD), pp.47-55, 2015. hal-01254297

**HAL Id: hal-01254297**

**<https://hal.science/hal-01254297>**

Submitted on 12 Jan 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## **R<sup>2</sup>D<sup>2</sup> 2050 : Risque, Ressource en eau et gestion Durable de la Durance en 2050**

### **PRÉSENTATION DU PROJET ET OBJECTIFS DES RECHERCHES**

**Date d'engagement :** 23 décembre 2010

**Montant du budget :** 1 410 519 € TTC dont 421 920,68 € TTC de subvention du service de la recherche du ministère chargé du développement durable.

#### **Coordinateurs :**

Eric Sauquet

Irstea, centre de Lyon-Villeurbanne

Unité de recherche hydrologie-hydraulique,

5 rue de la Doua CS70077, 69626 Villeurbanne cedex, France

[eric.sauquet@irstea.fr](mailto:eric.sauquet@irstea.fr)

#### **Partenaires Scientifiques :**

Irstea, centres de Lyon-Villeurbanne et d'Antony

EDF, R&D LNHE Chatou, DTG Grenoble

UMR METIS, UPMC Paris

LTHE Grenoble

SCP Le Tholonet

ACTeon antennes de Colmar et de Grenoble

#### **Mots clés :**

Durance, évolution climatique, ressource en eau, prospective, usages, impacts socio-économiques.

#### **Objectifs des recherches :**

L'objectif du projet R<sup>2</sup>D<sup>2</sup> 2050 est d'analyser l'impact hydrologique et socio-économique du changement climatique dans le bassin de la Durance à l'horizon 2050. Il met à jour pour partie les résultats du projet GICC-Rhône<sup>1</sup>, en se concentrant sur un des affluents majeurs du Rhône et complète l'étude "Explore 2070" réalisée à l'échelle nationale<sup>2</sup>. Les verrous scientifiques ont porté principalement sur la construction d'une représentation fidèle du fonctionnement actuel de ce grand bassin versant très contrasté en termes de régime hydrologique et de climat, fortement anthropisé et sujet à de nombreux transferts d'eau vers l'extérieur, sur l'élaboration d'une vision prospective quantifiée du devenir de la gestion de l'eau, impliquant les acteurs du territoire et sur la quantification des incertitudes permettant de hiérarchiser la part relative des différentes sources à l'origine de ces incertitudes.

1 Leblois E., 2002. Evaluation des possibles impacts du changement climatique par modélisation distribuée (projets Gewex-Rhône et GICC-Rhône). *La Houille Blanche*, 8, 78-83, doi:10.1051/lhb/2002112.

2 Chauveau M., Chazot S., Perrin C., Bourgin P.-Y., Sauquet E., Vidal J.-P., Rouchy N., Martin E., David J., Norotte T., Maugis P., de Lacaze X., 2013. Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070 ? *La Houille Blanche*, 4, 5-15, doi:10.1051/lhb/2013027.

## I. PRÉSENTATION DES TRAVAUX ET RÉSULTATS

### Introduction

Le bassin versant de la Durance, cours d'eau majeur du sud-est de la France, se caractérise par une grande diversité des usages traditionnels de l'eau tels que l'agriculture irriguée, l'hydroélectricité, l'alimentation en eau potable et l'industrie, mais aussi par des demandes sociétales récentes (loisirs liés à l'eau, préservation de la qualité des milieux). Ces usages sont des activités importantes pour le développement du territoire qui vont au-delà des limites naturelles des bassins versants de la Durance et du Verdon.

L'évolution démographique, la montée en puissance des préoccupations environnementales (notamment au travers de l'application de la directive cadre sur l'eau) et le développement économique devraient continuer d'influencer les usages établis (alimentation en eau potable, énergie, irrigation) et ceux émergents (service écologique, tourisme). S'ajouteraient, aux évolutions socio-économiques et démographiques du territoire, l'impact du changement climatique. Les effets combinés de demandes en eau modifiées et d'évolution du climat devraient avoir, semble-t-il, une incidence sur la disponibilité en eau et la clef de répartition entre les usages de l'eau.

Le projet R<sup>2</sup>D<sup>2</sup> 2050, soutenu financièrement par le programme GICC et par l'agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, a eu pour objectif principal d'évaluer les impacts des évolutions anthropiques et climatiques sur la gestion de l'eau à l'échelle de la Durance en se focalisant sur l'équilibre offre-demande en eau des territoires sécurisés par les grandes réserves hydrauliques de la Durance et du Verdon, à l'horizon 2050.

### Matériels et méthodes

Une chaîne de modélisation numérique a été développée et mise en place sur le territoire (Figure 1), incluant des représentations actuelles et futures : du climat, de la ressource naturelle, des demandes et prélèvements en eau pour l'agriculture, l'industrie et l'alimentation en eau potable et du fonctionnement des grandes réserves hydrauliques. L'approche multi-modèle et multi-scénario permet d'appréhender pour partie les incertitudes liées à l'exercice.

Les résultats sont fournis en différents points du bassin versant de la Durance en amont de Mallemort (Figure 2). Les principaux points de restitution sont des stations hydrométriques actuellement en fonctionnement : la Durance à Serre-Ponçon, à l'Escale, à Cadarache et à Mallemort, le Buech à Serres, le Verdon à Sainte-Croix et à Castillon.

Le climat actuel est décrit par deux ré-analyses préexistantes : SPAZM<sup>3</sup> et SAFRAN<sup>4</sup> et une nouvelle archive

3 Gottardi F., Obled C., Gailhard J., Paquet E., 2012. Statistical reanalysis of precipitation fields based on ground network data and weather patterns: Application over French mountains. *Journal of Hydrology*, 432–433, 154-167.

4 Vidal J.-P., Martin E., Franchisteguy L., Baillon M., Soubeyroux, J.M., 2010. A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over

“Durance météo” DuO<sup>5</sup>, créée pour les besoins du projet. DuO, fruit de l'hybridation des deux ré-analyses cherché à tirer parti des qualités de SPAZM (résolution spatiale 1 km) et de SAFRAN (disponibilité au pas de temps horaire). L'évapotranspiration de référence est calculée selon la formule de Penman Monteith<sup>6</sup> afin de s'approcher au mieux du référentiel des agronomes.

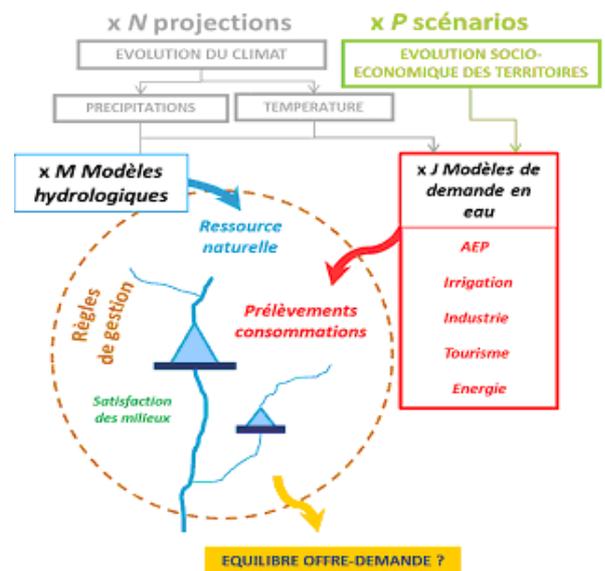


Figure 1 – Différentes composantes de la chaîne de modélisation

Les projections climatiques ont été générées par trois méthodes de descente d'échelle statistiques appliquées à une sélection de sorties de modèles de grande échelle (GCMs), toutes basées sur l'approche par analogie et déjà éprouvées dans le cadre du projet ANR RIWER2030<sup>7</sup>. Pour satisfaire aux exigences des modèles d'impact, la grille de restitution des méthodes de descente d'échelle est définie par le maillage 8x8 km de SAFRAN.

Sept modèles hydrologiques de structures différentes, et a priori à la sensibilité différente sous climat modifié ont été retenus pour simuler les évolutions passées de la ressource naturelle. Six d'entre eux ont été forcés par des climats futurs. Un protocole commun de test de ces modèles a été mis en place afin d'évaluer leur capacité à reproduire le comportement hydrologique des bassins versants dans les conditions naturelles actuelles.

France with the Safran system. *International Journal of Climatology*, 30, 11, 1627-1644, doi: 10.1002/joc.2003.

5 Magand C., Ducharne A., Le Moine N., Gascoin S., 2013. Introducing hysteresis in snowdepletion curves to improve the water budget of a land surface model in an alpine catchment. *Journal of Hydrometeorology*, doi:10.1175/JHM-D-13-091.1.

6 Allen R. G., Pereira L. S., Raes D., Smith M., 1998. Crop Evaporation – Guidelines for computing crop water requirements, Irrigation and drainage paper 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma.

7 Hingray B., Hendrickx F., Bourqui M., Creutin J.D., François B., Gailhard J., Lafaysse M., Le Moine N., Mathevet T., Mezghani A., Monteil C., 2013. RIWER2030: Climats Régionaux et Incertitudes, Ressource en Eau et Gestion associée de 1860 à 2100. Projet ANR VMCS 2009-2012. Rapport final, 60 p.

Trois modèles de complexité variée estimant les besoins en irrigation (FIVE CoRE, SiSPAT et MODIC) ont été appliqués sur neuf cultures emblématiques du bassin de la Durance<sup>8</sup>. Seul l'un d'entre eux, MODIC, a pu être généralisé à l'ensemble du territoire.

Un modèle statistique sur la base d'une fonction économétrique<sup>9</sup> a été développé pour représenter la demande en eau potable (AEP).

Les simulations en temps futur ont volontairement été menées en conservant les règles de gestion actuelles, sans limiter la sollicitation des réserves en eau à leur valeur contractuelle et sans modifier les objectifs de remplissage, afin de faire émerger le nouveau champ de contraintes auquel chaque usage pourrait être exposé en absence de mesures d'adaptation.

Cet ensemble de modèles a permis de reproduire de manière satisfaisante le fonctionnement actuel des composantes naturelles et anthropiques de l'hydrosystème prenant en compte les principaux processus, leurs interactions et leur spatialisation.

Un exercice de prospective a été mené avec le soutien d'acteurs impliqués dans la gestion de l'eau pour construire quatre scénarios de développement socioéconomique des secteurs connectés au système Durance-Verdon. Ces scénarios "littéraires" ont fait l'objet d'une quantification<sup>11,12</sup>, i.e. un conditionnement des valeurs assignées aux paramètres des modèles de besoin en eau (par ex. évolution des assolements, évolution démographique...).

La sensibilité des milieux au changement climatique a été examinée sur l'Asse, cours d'eau intermittent caractéristique des Préalpes du sud. Cette étude a mis en œuvre deux des modèles hydrologiques, une procédure de reconstitution d'assecs le long du linéaire, exploitant des campagnes de jaugeage et des relations empiriques établies à partir d'échantillons prélevés *in situ* entre richesse biologique et intermittence<sup>13</sup>.

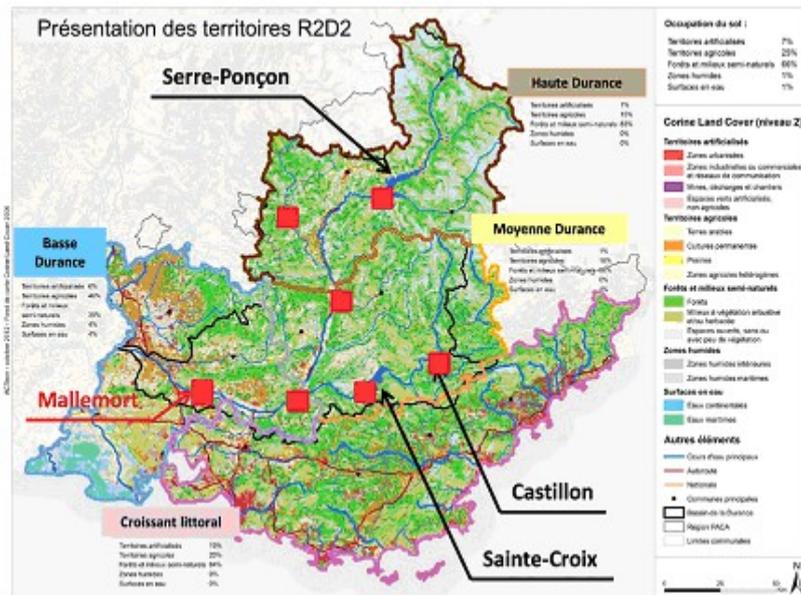


Figure 2 – Territoires d'étude, ouvrages hydrauliques d'intérêt, occupation du sol et points d'analyse des modélisations (■).

Enfin, un outil de simulation des grands ouvrages hydrauliques (Serre-Ponçon, Castillon, Sainte-Croix), baptisé MORGLite, inspiré de la pratique opérationnelle d'EDF et dans la continuité de premiers travaux sur la simulation de la gestion des ouvrages hydroélectriques<sup>10</sup>, a été élaboré pour représenter le lien entre leurs gestions, les sollicitations du système Durance-Verdon et les objectifs de remplissage des réserves, de respect des débits réservés et de cotes touristiques.

8 Braud I., Tilmant F., Samie R., Le Goff I., 2013. Assessment of the SiSPAT SVAT model for irrigation estimation in south-east France. In : *International Conference on Monitoring and Modeling Soil-Plant-Atmosphere Processes*, 19-20 juin 2013, Naples, Italie, Procedia Environmental Sciences, 19, 747-756. doi: 10.1016/j.proenv.2013.06.083.

9 García-Valiñas M.A., Nauges C., Reynaud A., 2009. How much water do residential users really need? An estimation of minimum water requirements for French households. In : *Proceedings of the 17th Annual Conference of the European Association of Environmental and Resource Economists*, 24-27 June 2009, Amsterdam, The Netherlands, 18 p.

10 Hendrickx F., Sauquet E., 2013. Impact of warming climate on water management for the Ariège river basin (France). *Hydrological Sciences Journal*, doi: 10.1080/02626667.2013.788790.

## Résultats

### Connaissance et représentation de la Durance dans le contexte actuel

Le travail conséquent d'analyse des prélèvements, des transferts d'eau et des usages a permis de connaître les pressions actuelles pesant sur le système Durance-Verdon, de comprendre les principaux facteurs explicatifs des évolutions récentes et, *in fine*, de reconstituer des chroniques de débits naturalisés sur la partie aval du territoire au pas de temps journalier. Les séries de prélèvements issues des redevances de l'agence de l'eau et des débits observés et naturalisés disponibles sur la période 1980-2009 ont constitué la référence pour qualifier la pertinence des modèles d'impact en temps présent.

11 Samie R., Arama Y., Bouscasse H., Sauquet E., Hendrickx F., 2014. La prospective, un outil de réflexion stratégique sur la gestion future de la ressource en eau à l'échelle d'un territoire : l'exemple du bassin de la Durance (France). In : *FRIEND-Water 2014, Hydrology in a Changing World: Environmental and Human Dimensions*, February 2014, Hanoi, Vietnam (IAHS Publ. 364, 2014), 221-227.

12 Bouscasse H., 2013. Renforcer l'interface entre chercheurs et acteurs de l'eau: mais que nous offrent les exercices de prospectives territoriales ? In : *Entretien Jacques Cartier, Colloque 8 : Gestion des risques face aux changements climatiques*, 25-26 nov. 2013, Lyon, France.

13 Cipriani T., Tilmant F., Branger F., Sauquet E., Datry T., 2014. Impact of climate change on aquatic ecosystems along the Asse River Network. In : *FRIEND-Water 2014, Hydrology in a Changing World: Environmental and Human Dimensions*, February 2014, Hanoi, Vietnam (IAHS Publ. 364, 2014), 463-468.

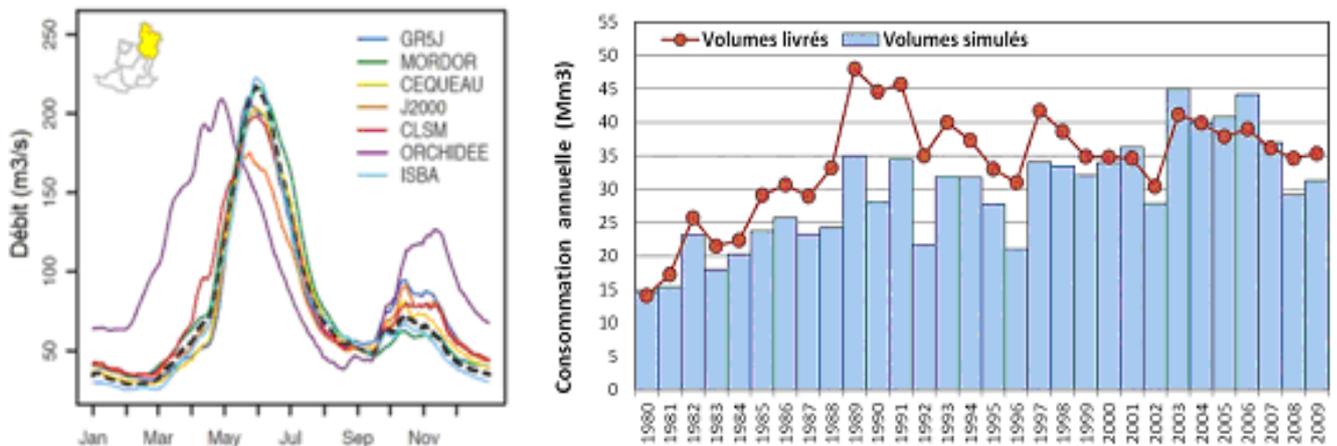


Figure 3 – Résultats de simulation des outils mobilisés dans R<sup>2</sup>D<sup>2</sup> 2050, en haut les débits décennaux moyens interannuels observés et simulés pour la Durance à Serre-Ponçon, en bas les consommations annuelles en eau d'irrigation simulées par le modèle FIVE-CoRe et livrées sur le périmètre desservi par la SCP

L'analyse des séries de débits simulés par les modèles hydrologiques montre l'existence de différences notables entre modèles sur près de 25 bassins étudiés. Les origines de ces écarts sont partiellement expliquées en examinant les variables internes et les modalités choisies pour l'application des modèles. Aucun des modèles ne semble meilleur que les autres sur l'ensemble des critères ou des stations (Figure 3, gauche), ce qui rejoint les conclusions de précédents exercices de comparaison. Le projet a mis en lumière des similitudes inattendues entre modèles aux structures pourtant fondamentalement distinctes.

#### Evolution de l'hydro-climatologie du bassin de la Durance à l'horizon 2050

Un ensemble de projections a été élaboré à partir de onze simulations globales réalisées par quatre GCMs différents issus du projet européen ENSEMBLES<sup>14</sup>. Les méthodes de descente d'échelle considérées intègrent une composante stochastique, chaque simulation a pu ainsi être déclinée en 100 réalisations possibles (d'où un total de 3300 projections disponibles). Cependant, la quantité de projections élaborées s'est révélée au-delà des capacités de calcul associées aux différents modèles d'impact. Une méthodologie<sup>15</sup> à base d'échantillonnage par hypercubes latins a été mise en place afin de réduire le nombre de projections utilisées en entrée des modèles d'impact en préservant la diversité des sources d'incertitudes et les caractéristiques statistiques, en termes de changements entre le présent et le futur, présentes dans l'ensemble initial.

Le changement climatique envisagé sur la période 2036-2065 et ses effets sur la ressource naturelle, mesuré sur la base des 330 projections, par rapport à la période 1980-2009 (Figure 4) se traduit par les évolutions suivantes :

- une augmentation des températures moyennes de l'ordre de 1.5°C, et pouvant aller jusqu'à 3°C, plus importante l'été ;
- une forte incertitude sur l'évolution des précipitations ;
- une réduction de la ressource en eau estivale (par ex. -20 m<sup>3</sup>/s pour le débit d'étiage moyen d'août à Cadarache) ;
- une diminution des stocks de neige et une fonte avancée dans l'année qui induisent une réduction des débits au printemps ;
- une évolution de la ressource annuelle (par ex. autour de -20 m<sup>3</sup>/s avec un intervalle entre -70 et +40 m<sup>3</sup>/s à Cadarache) ;
- des évolutions incertaines des débits hivernaux, du fait notamment de la forte variabilité dans les projections sur les pluies.

#### Evolution des usages sur le bassin de la Durance à l'horizon 2050

Une manière d'appréhender l'incertitude de l'avenir socio-économique est de s'appuyer sur un faisceau de scénarios plausibles contrastés. Deux options s'offraient : faire des scénarios de demande en eau future ou faire des scénarios de territoire et en déduire une demande en eau. C'est la seconde option qui a été choisie. Il convient de rappeler les précautions de lecture et d'interprétation de ces scénarios :

- (1) à l'instar du futur climatique, le devenir socio-économique du territoire n'est certainement pas parmi les scénarios élaborés, qui ne sont que des conjectures n'ayant de valeur qu'au regard de ce qu'elles essayent de tester,
- (2) d'autres scénarios auraient pu expliquer un même "niveau" de demande en eau,
- (3) les scénarios ont été construits indépendamment de l'évolution du climat.

14 Van der Linden P., Mitchell J.F.B., 2009. ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre.

15 Vidal J.-P., Hingray B., 2013. Sub-sampling ensembles of downscaled climate projections. In: *12th International Meeting on Statistical Climatology, Program & abstract*, 24 juin 2013, Jeju, Corée du Sud, 126-127.

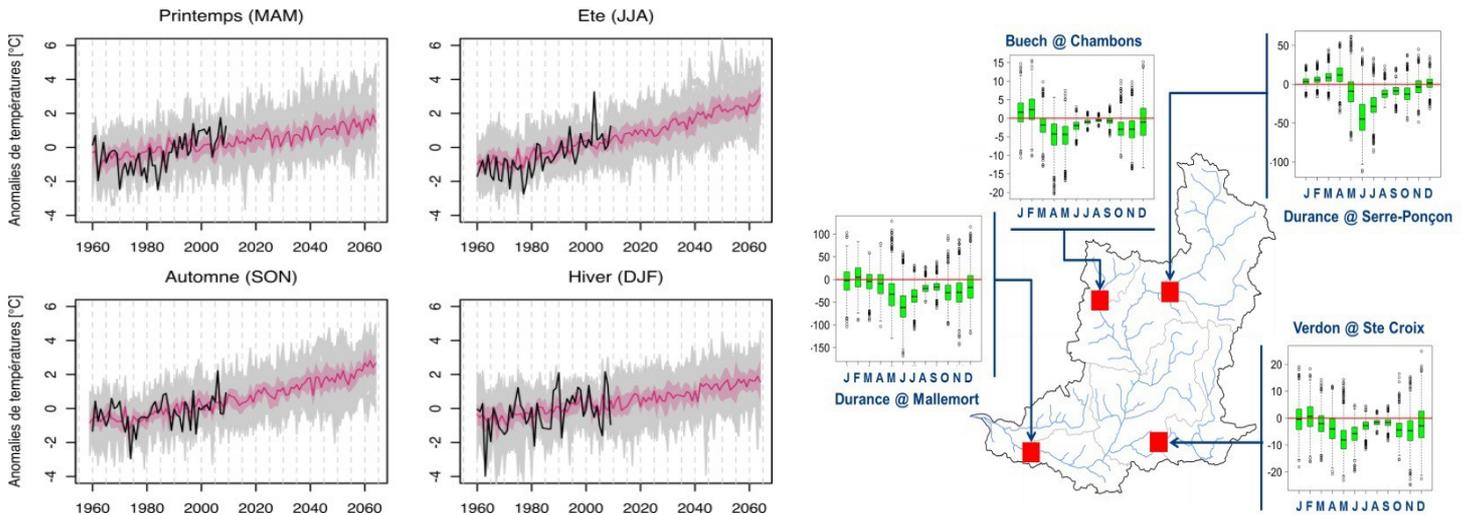


Figure 4 : Evolution des anomalies de températures saisonnières moyennes du bassin de la Durance à sa confluence avec le Rhône (en haut; les anomalies des 330 projections climatiques sont tracées en gris, la médiane est en rose foncé et l'enveloppe rose est l'intervalle entre les premier et troisième quartiles; les forçages DuO sont représentés en noir) et changements de débits mensuels exprimés en m3/s (en bas) sur la période 2036-2065, par rapport à la période de référence 1980-2009 (les boîtes sont définies par les premiers et troisièmes quartiles).

L'approche envisagée a l'avantage d'ancrer quatre scénarios dans un contexte territorial avec les cohérences internes (ex. compétition entre usages) imposées à l'heure actuelle ou émergentes dans le futur. L'exercice de prospective a mobilisé l'expertise des acteurs du territoire sur le bassin de la Durance dans le cadre de trois réunions, organisées en octobre 2012. Le résultat est quatre scénarios prospectifs pour le territoire (*investissement, spécialisation, écologie, crise*, voir Figure 5).

S'y ajoutent les scénarios *tendanciel* et *business-as-usual*, ce dernier, baptisé *Niv2010*, est calqué sur une photographie du territoire en 2010. Au total, six scénarios ont été proposés.

L'interprétation chiffrée des scénarios socio-économiques conduit à deux futurs avec des surfaces irriguées en augmentation et deux en diminution (Figure 6, en haut). Le scénario *tendanciel* propose une réduction en cohérence avec les évolutions récentes observées sur le territoire.

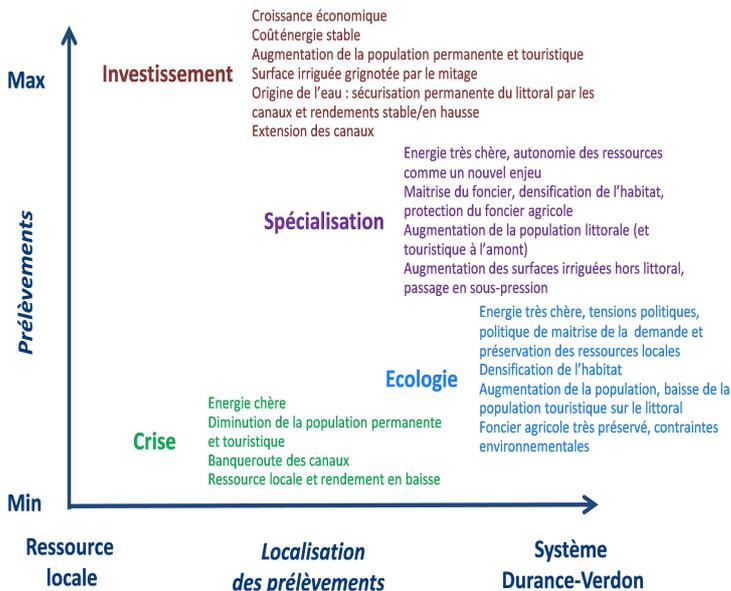


Figure 5 – Principales caractéristiques des quatre scénarios prospectifs pour le territoire

Ces futurs se traduisent, à l'échelle du territoire, par des demandes en eau contrastées (total des prélèvements hors alimentation des canaux), avec une hausse sensible pour le scénario *investissement* et une baisse prononcée pour le scénario *crise*, et par des prélèvements réduits par rapport à la période 1980-2009 (Figure 6, en bas). La demande en eau potable est très dépendante de la démographie et de l'exploitation ou non des ressources locales et conduit dans certains scénarios à des transferts accrus. La combinaison des hypothèses conduit à des baisses sensibles allant de 19% pour le scénario *spécialisation* (amélioration des rendements des canaux) à 30% pour le scénario *crise* (agriculture irriguée et AEP en berne).

L'examen de la dispersion des résultats semble indiquer que les évolutions des prélèvements sont plus sensibles aux facteurs socio-économiques qu'au facteur climat.

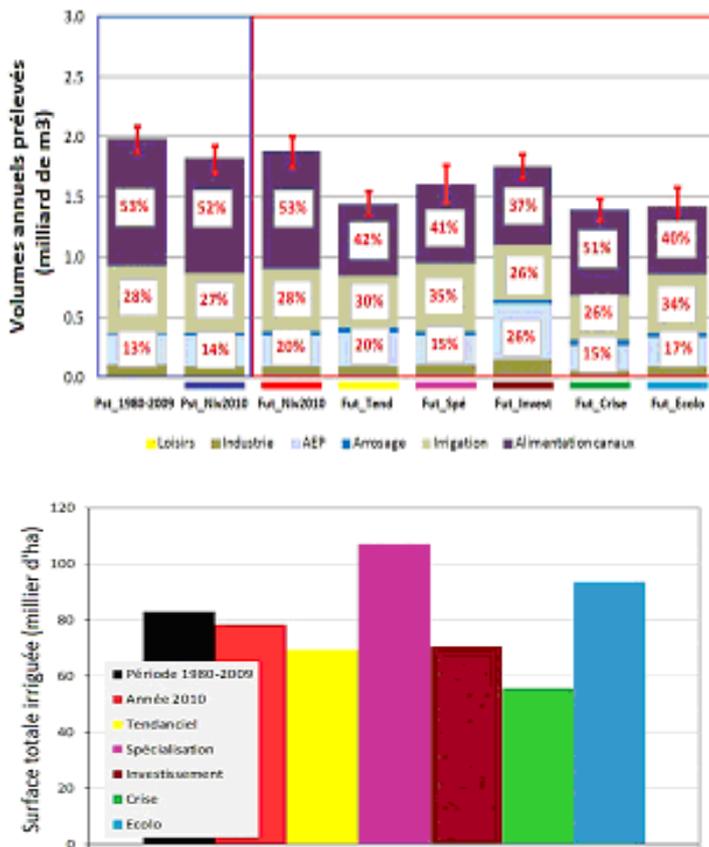


Figure 6 – Evolution de la surface totale irriguée considérée dans MODIC (en haut) et prélèvements par usage avec MODIC, modalité Cycle Fixe (en bas) selon les six scénarios socio-économiques sous les climats temps présent (Pst) et 2050 (Fut) issus de la sélection de dix projections climatiques régionalisées, à l'échelle du système Durance-Verdon. Les segments en rouge représentent la dispersion des résultats induite par les dix climats modélisés

La Figure 7 illustre les sorties de MORGLite obtenues sur la base d'une gestion inchangée. Sont représentées les valeurs moyennes de consommation des tranches d'eau réservées sur la Durance à Serre-Ponçon, ainsi que le nombre et l'intensité des consommations annuelles

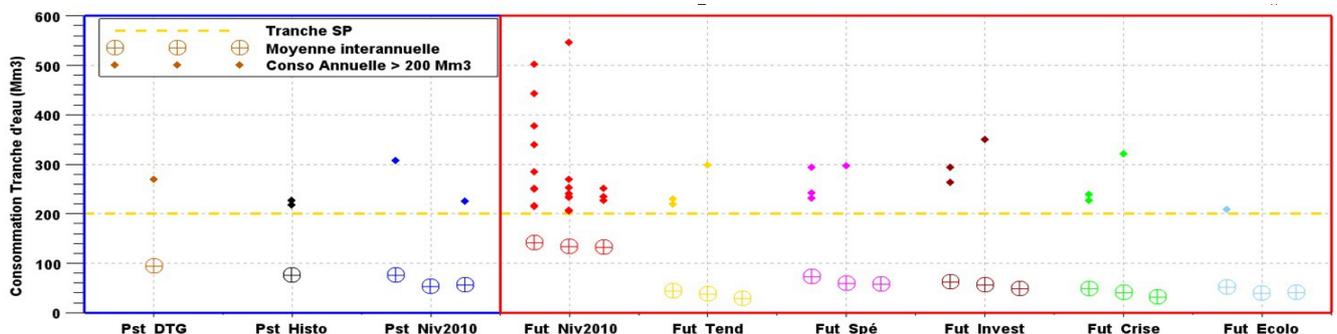


Figure 7 – Consommations annuelles moyennes et supérieures au seuil 200 Mm3 (tranche Serre Ponçon) sur la ressource disponible à Serre-Ponçon (SP), estimée par les outils opérationnels (DTG) et reconstituée par les outils de R<sup>2</sup>D<sup>2</sup> 2050 (Histo) et simulée en temps présent (Pst) et à l'horizon 2050 (Fut) selon les six scénarios socio-économiques et les trois projections climatiques régionalisées

dépassant la valeur contractuelle de 200 Mm3. Sur la Durance, un territoire avec des pratiques maintenues au niveau 2010, verrait fortement augmenter la consommation moyenne (+100 %) avec de nombreux dépassements annuels de 200 Mm3. En revanche, sur les cinq autres devenirs envisagés, grâce notamment au maintien ou à l'amélioration des rendements des canaux d'irrigation, le recours à la tranche d'eau serait soit stable, soit légèrement à la baisse, du fait d'une réduction de la sollicitation par rapport à la situation en temps présent. Le constat est différent sur le Verdon.

Les devenirs du territoire conduiraient à une hausse de la consommation moyenne conséquence d'une demande accrue en AEP et trois d'entre eux pourraient occasionner des dépassements fréquents de la valeur 85 Mm3, équivalent de la tranche d'eau mobilisable de Castillon, sans pour autant dépasser le cumul des tranches d'eau des deux retenues Sainte-Croix et de Castillon (225 Mm3).

### Incertitudes sur le diagnostic à l'horizon 2050

La richesse des approches et disciplines abordées dans le projet a permis d'engager une réflexion sur les incertitudes sur le devenir de la gestion de l'eau du système Durance. De nombreuses sources d'incertitude ont été identifiées, mais pas toutes quantifiées. C'est le cas des incertitudes relatives aux données de base (climat, hydrologie et usages).

L'examen des simulations des besoins en eau des plantes en temps présent sur neuf cultures montre une grande variabilité des estimations entre les différents modèles testés. Ces différences s'estompent dès lors que les anomalies entre présent et futur sont exploitées pour caractériser l'impact du changement climatique. La prise en compte ou non de l'évolution de la phénologie des cultures induite par le changement climatique est également une source d'incertitude partiellement examinée dans le projet. Ici sa prise en compte a révélé que la phénologie influence peu les usages énergétiques et touristiques des réservoirs.

Les débits naturels futurs ont fait l'objet d'un examen détaillé des incertitudes associées grâce à l'approche multi-modèles. Il est apparu que la majeure partie des incertitudes sur les débits moyens annuels provient de la modélisation climatique globale, qui intervient via la quantité de précipitations projetée.

Cette dernière est fortement incertaine du fait de la variabilité naturelle chaotique du climat<sup>16</sup>. Pour des variables plus intimement liées aux processus de surface, comme l'évapotranspiration ou les débits d'étiages estivaux, la part d'incertitude liée à la modélisation hydrologique s'avère loin d'être négligeable et augmente avec l'échéance des projections.

Au-delà de l'analyse de l'incertitude structurelle des modèles hydrologiques, les modalités de calage des paramètres peuvent influencer la réponse des modèles. Cependant les choix de calage semblent de second ordre sur l'évolution des débits annuels face à l'incertitude provenant des forçages<sup>17</sup>.

### Conclusions – Perspectives

Le projet R<sup>2</sup>D<sup>2</sup> 2050 a contribué à améliorer la connaissance du fonctionnement du bassin versant de la Durance et des territoires connectés via les transferts d'eau, par le recueil de données d'origines physique, biologique et socio-économique. Cette base de connaissance a permis la mise en place et le développement d'outils dédiés à la modélisation de la gestion de l'eau et des interactions entre ressources en eau locales et volumes stockés en amont dans les grandes réserves. Une réelle difficulté est apparue lors de l'interprétation des données relatives aux usages. Des scénarios pour le futur ont été construits, non sans difficulté, avec les acteurs, réinterprétés dans les modèles et finalement combinés avec les évolutions climatiques pour fournir une vision quantifiée des besoins en eau du territoire en 2050.

Les modifications du climat engendrent une baisse notable de la ressource naturelle à l'horizon 2050. Les évolutions du territoire induisent des demandes en eau très contrastées.

À territoire inchangé, la sollicitation de la réserve de Serre-Ponçon devrait augmenter du fait de la baisse de la ressource locale. La tranche d'eau réservée serait plus fréquemment insuffisante. Les cinq devenir envisagés du territoire incluant la poursuite de programmes d'économies d'eau proposent une vision opposée avec une baisse de la sollicitation qui permet de contenir plus aisément l'utilisation de la réserve agricole. La vision sur le système Verdon est différente : à usage maintenu au niveau 2010, les sollicitations aval des ouvrages sont légèrement sensibles au climat affichant une faible augmentation. Seuls trois scénarios du territoire (*spécialisation, investissement, tendanciel*) conduisent à une augmentation de la sollicitation des réservoirs du Verdon pouvant dépasser la tranche de Sainte-Croix mais sans jamais épuiser l'ensemble des réserves allouées.

<sup>16</sup> Hingray B., Saïd M., 2014. Partitioning internal variability and model uncertainty components in a multimodel multireplicate ensemble of climate projections. *Journal of Climate*, doi: 10.1175/JCLI-D-13-00629.1.

<sup>17</sup> Magand C., Ducharne A., Le Moine N., Brigode P., 2014. Sensitivity to the calibration period and transferability of the Catchment Land Surface Model parameters under changing climate: a case study in the Durance watershed, France. *Hydrological Sciences Journal*, accepté.

La production d'énergie est directement impactée par la baisse de la ressource naturelle. La baisse probable des apports de fonte conduit à contraindre davantage la remontée de cote avant l'été avec un objectif de remplissage lié aux cotes touristiques inchangé. La réserve énergétique saisonnière est dans ces conditions fortement réduite, quels que soient les devenir des territoires, notamment sur le Verdon.

Si l'usage touristique de Serre-Ponçon semble pouvoir être sensiblement préservé sous réserve d'une évolution du territoire fondée sur une économie d'eau substantielle, celui de Sainte-Croix et Castillon semble plus délicat à garantir dans la configuration actuelle.

Sur la base des hypothèses retenues dans le projet R<sup>2</sup>D<sup>2</sup> 2050, l'effet du changement global sur la Durance semble pouvoir être contenu sur les secteurs sécurisés par le système Durance-Verdon sous réserve que l'avenir du territoire se développe à l'intérieur du faisceau des scénarios choisis ici. Des sensibilités différentes sur la sollicitation des réserves de la Durance et du Verdon ont pu s'exprimer.

Elles nécessiteront de repenser l'équilibre entre les usages et de faire évoluer les règles de gestion de la ressource en eau... Sur les territoires dépendants de la seule ressource locale (non sécurisés), la situation pourrait être critique avec des sécheresses plus fréquentes et des arrêtés de limitation des usages qui pourraient fort bien réduire la capacité à prélever. Dans tous les cas, il sera nécessaire de mettre en œuvre des mesures d'adaptation.

Les perspectives sont forcément nombreuses. Du point de vue méthodologique, les modèles, globalement satisfaisants sont tous améliorables... sous réserve de l'existence d'observations adaptées. Le projet R<sup>2</sup>D<sup>2</sup> 2050 a été l'occasion d'améliorer la représentation des processus de constitution et de fonte de la neige dans les modèles hydrologiques, mais son implémentation requiert des mesures du manteau neigeux.

Seules trois projections hydro-climatiques ont présenté des qualités suffisantes pour être exploitées par le modèle de gestion des réserves, du fait de biais présents dans les simulations de débit en temps présent. La représentation fine de l'anthroposystème a en effet fait émerger un niveau d'exigence plus élevé sur la performance des modèles hydrologiques.

Tout le potentiel des outils développés aurait mérité d'être exploité plus en avant. Ainsi, la question d'un nouveau mode de gestion n'a pu être abordée. L'adaptation sur le territoire est présente implicitement au travers de la poursuite de mesures d'économie d'eau introduites dans les scénarios. D'autres stratégies restent à construire avec les acteurs.

## II. APPORTS AUX POLITIQUES PUBLIQUES ET ACQUIS EN TERMES DE TRANSFERT

Le projet R<sup>2</sup>D<sup>2</sup> 2050 a répondu pour partie aux questions sur le caractère durable du système Durance-Verdon dans sa configuration actuelle. C'est une contribution aux fiches-actions "eau" et "recherche" du plan national d'adaptation au changement climatique PNACC<sup>18,19</sup> encourageant l'amélioration des connaissances sur les impacts du changement climatique sur les ressources en eau et de différents scénarios possibles d'adaptation. Les résultats des modèles hydrologiques confirment une réduction de la ressource naturelle en milieu de siècle. Il est à noter que le nombre de modèles exploités pour représenter le climat et l'hydrologie et donc de trajectoires futures esquissées est beaucoup plus important que dans l'étude "Explore 2070" (en ce sens, le projet R<sup>2</sup>D<sup>2</sup> 2050 est certainement, à ce jour, l'exercice le plus riche réalisé en France). Le caractère régional confère plus de confiance aux conclusions établies du projet R<sup>2</sup>D<sup>2</sup> 2050 sur le secteur Durance-Verdon, par rapport aux autres études à portée nationale.

En comparaison avec les analyses prospectives réalisées dans "Explore 2070" ou dans l'étude prospective réalisée à l'échelle du bassin de la Garonne<sup>20</sup>, et du fait des réserves à usage multiple constituées sur la Durance et le Verdon et des modalités de partage et d'anticipation qui se sont mises en place progressivement, le système Durance-Verdon apparaît comme étant relativement robuste aux changements climatiques en comparaison avec les bassins versants des régions voisines du Sud de la France. Le traitement du changement global sur ce secteur a été particulièrement difficile du fait de la complexité naturelle du bassin versant et des interactions multiples avec les activités économiques. L'exercice, même incomplet puisque l'effet sur le milieu n'a pas pu être traité, a nécessité plus de trois ans d'effort soutenu de collecte de données et de mise en cohérence de ces données au travers notamment de modèles numériques. Il reste à progresser sur la mise à disposition de données relatives à la gestion de l'eau. En absence d'information quantifiée, il sera délicat de construire des outils intégrés qui représentent les actions actuelles de prélèvements nets sur les cours d'eau et qui, alimentés par des projections climatiques, permettront d'anticiper objectivement le futur. En termes de hiérarchie des incertitudes pesant sur les usages, le facteur climat apparaît secondaire devant les trajectoires socio-économiques possibles suivies par le territoire. La durabilité du système Durance-Verdon dépend de ce qu'on veut faire des activités sur les secteurs sécurisés par cet ensemble d'ouvrages.

Ceci justifie le soutien d'actions favorisant le dialogue entre communautés de recherche pour progresser dans les études d'impact et visant le développement d'outils

18 MEDDE, 2013. Évaluation à mi-parcours du Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC). Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, décembre 2013, 50 p.

19 MEDTL, 2011. Plan national d'adaptation de la France aux effets du changement climatique. Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement, juillet 2011, 187 p.

20 Agence de l'Eau Adour-Garonne, 2014. GARONNE 2050, Etude prospective sur les besoins et les ressources en eau, à l'échelle du bassin de la Garonne, Rapport final, 68 p.

représentant tous les déterminants (physiques, biologiques et socio-économiques) de l'anthroposystème avec le même degré de finesse.

La question d'adaptations locales spécifiques au système Durance-Verdon n'a pas été abordée en profondeur. Néanmoins les scénarios socio-économiques intègrent de façon plus ou moins marquée des mesures d'économie d'eau faisant écho à la fiche-action "eau" (mesure n°3 "Développer les économies d'eau et assurer une meilleure efficacité de l'utilisation de l'eau"). Les mesures insérées dans ces scénarios sont plutôt d'ordre structurel (maintien ou amélioration des rendements des canaux d'irrigation et des réseaux de distribution d'AEP, sauf pour le scénario *crise*). Elles s'inscrivent dans une dynamique d'économie d'eau sur le territoire qu'il s'agirait de prolonger en étroite collaboration avec les acteurs à la lumière des hypothèses et résultats du projet R<sup>2</sup>D<sup>2</sup> 2050. *In fine* elles contribueront à réduire l'impact négatif du changement climatique (ressource naturelle disponible diminuée) sous réserve de leur poursuite et de leur extension, ou d'adaptation à la marge (modification de gestion, volumes prélevables, requalification d'infrastructures, amélioration plus importante de l'efficacité hydraulique...).

Les résultats du projet ont déjà été exploités par différents acteurs du territoire (agence de l'eau, syndicat mixte d'aménagement et de développement de Serre-Ponçon, Syndicat Mixte d'Aménagement de la vallée de la Durance) dans le cadre d'études prospectives sur la ressource en eau. Les données produites éclairent ainsi la décision publique.

## III. LISTE DES PRINCIPALES VALORISATIONS DES RECHERCHES

### Articles scientifiques

- Hendrickx F., Sauquet E., 2013. Impact of warming climate on water management for the Ariège river basin (France). *Hydrological Sciences Journal*, doi: 10.1080/02626667.2013.788790.
- Hingray B., Saïd M., 2014. Partitioning internal variability and model uncertainty components in a multimodel multireplicate ensemble of climate projections. *Journal of Climate*, doi: 10.1175/JCLI-D-13-00629.1.
- Magand C., Ducharme A., Le Moine N., Brigode P., 2014. Sensitivity to the calibration period and transferability of the Catchment Land Surface Model parameters under changing climate: a case study in the Durance watershed, France. *Hydrological Sciences Journal*, accepté.
- Magand C., Ducharme A., Le Moine N., Gascoin S., 2014. Introducing hysteresis in snow depletion curves to improve the water budget of a land surface model in an alpine catchment. *Journal of Hydrometeorology*, doi:10.1175/JHM-D-13-091.1.
- Braud I., Samie R., Tilmant F., Vidal J.-P., Chérel J., 2014. Quantifying climate change impact on irrigation

requirements in south-east France: intercomparison of four models on nine typical crops. *Agricultural Water Management*, in prep.

Hingray, B., *et al.*, 2015. Partitioning internal variability and model uncertainty in a multimodel ensemble of climate projections: influence of model replicate number. *Geophysical Research Letters*, in prep.

Magand C., Tilmant F., Ducharme A., Chauveau M., Vidal J.-P., Le Moine N., Mathevet T., Sauquet E., Perrin C., Oudin L., 2015. Construction par hybridation d'analyses atmosphériques adaptées aux zones de montagne : exemple de l'archive météorologique DuO dans le bassin de la Durance. *La Houille Blanche*, in prep.

Perrin, C., *et al.*, 2015. Are similar hydrological simulations produced by models with similar internal behavior? Comparative evaluation on the Durance River basin under contrasted conditions. X, in prep.

Vidal, J.-P., *et al.* (2015) Selecting downscaled climate projections for impact and adaptation studies. *Climatic Change*, in prep.

### Autres

Participation d'E. Sauquet au film "Eau et changement climatique : paroles d'acteurs de la Durance", réalisé par J. Bengel et France Nature Environnement PACA, <http://vimeo.com/8494283>