HAL
open science

Vulnérabilité des ressources en eau au changement global en zone méditerranéenne - Le projet Vulcain. Compte-rendu de fin de projet

Yvan Caballero, Sébastien Chazot, Jean-Michel Citeau, Nathalie Dörfliger, Perrine Fleury, Bernard Ladouche, Eric Martin, Laure Maton, Luc Neppel, Jean-Louis Pinault, et al.

To cite this version:

Yvan Caballero, Sébastien Chazot, Jean-Michel Citeau, Nathalie Dörfliger, Perrine Fleury, et al.. Vulnérabilité des ressources en eau au changement global en zone méditerranéenne - Le projet Vulcain. Compte-rendu de fin de projet. [Rapport de recherche] BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières) (Bureau de recherches géologiques et minières). 2011. hal-01362435

HAL Id: hal-01362435

https://brgm.hal.science/hal-01362435v1

Submitted on 8 Sep 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.

Public Domain

AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE ANR	**Compte-rendu de fin de projet**	

Projet ANR-06-VULN-008

VULCAIN

Programme ANR VMC 2006

A IDENTIFICATION 3
B RESUME CONSOLIDE PUBLIC 4
B.1 Résumé consolidé public en français 4
B.1.1 Vulnérabilité des ressources en eau au changement global en zone méditerranéenne (Le projet VULCAIN). 4
B.2 Résumé consolidé public en anglais 6
B.2.1 Vulnerability of water resources to global change in Mediterranean region (the VULCAIN project). 6
C MEMOIRE SCIENTIFIQUE 8
C.1 Résumé du mémoire 8
C.2 Enjeux et problématique, état de l'art 8
C.3 Approche scientifique et technique 9
C.4 Résultats obtenus 10
C.4.1 Non-stationnarités du climat présent 10
C.4.2 Les scénarios climatiques futurs 10
C.4.3 Demande en eau potable et agricole présente et future 11
C.4.4 Impact du changement climatique sur les ressources en eau de surface 11
C.4.5 Impact du changement climatique sur l'aquifère plio-quaternaire 12
C.4.6 Vulnérabilité du territoire étudié au changement global 12
C.5 Exploitation des résultats 13
C.6 Discussion 13
C.7 Conclusions 14
C.8 Références 14
D LISTE DES LIVRABLES 18
E IMPACT DU PROJET 21
E.1 Indicateurs d'impact 21
E.2 Liste des publications et communications 22
E.2.1 Revues à comité de lecture multipartenaires - International 22
E.2.2 Communications à conférence à l'international 22
E.2.3 Revues à comité de lecture Monopartenaires - International 23
E.2.4 Revues à comité de lecture – France 23
E.2.5 Communications à conférence en France 23
E.2.6 Conférences de vulgarisation 23
E.2.7 Autres actions de vulgarisation 24
E.3 Liste des éléments de valorisation 24

B.2 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN ANGLAIS

B.2.1 VULNERABILITY OF WATER RESOURCES TO GLOBAL CHANGE IN MEDITERRANEAN REGION (THE VULCAIN PROJECT).

The Mediterranean region has been pointed out as a « hot spot » in terms of climate change, with severe warming and precipitations decrease. Moreover, the intense population growth rate will probably deepen its water resources structural deficit. In the future, the water scarcity level will depend on both the withdrawals and the climate evolution. The VULCAIN project proposes a method to analyze and compare the climate and socio-economic change impacts on the water resources of the Pyrénées Orientales department (figure 1). Future climate and drinking/agricultural water use scenarios have been built and their impact on the water resources of the study zone was characterized and compared, with a description of the associated uncertainties. The results allowed the vulnerability characterization based on future water resources to water use budget. The main issues of the vulnerability of the studied territory have been identified, which are currently integrated by the water managers to structure their adaptation strategies.

B.2.1.1 Detect trends, build scenarios for the future and analyze their impact using hydrosystems modeling tools.

First, present climate has been described using non stationarity detection tests. Then climate scenarios have been built for the short (2020-40) and the middle term (2040-60), using state-of-art climate model outputs. Water demand models for drinking and agricultural use have been built to compensate for the sparse available data of that kind. Based on these models and on several socio-economic scenarios built together with the water managers of the territory in foresight assessments, future water demand has been computed. Hydrological and hydrogeological models linking climate and water resources were forced with future climate scenarios to simulate the future water resources. A water budget considering the future available resources and the current needs (societal (for drinking water and agricultural purposes) and natural water demand) allowed to describe the vulnerability issues. Finally, the water demands associated to the different socio-economic scenarios have been integrated in the water budget to be compared to the climate impacts.

B.2.1.2 Main results of the project

It has been showed that the future water resource of the territory will probably be reduced until a level that the saving water strategies currently considered will not be able to compensate and that this will be the case in the short term. The results and methods developed in this project have been used in other projects developed in the same time or currently built and current operational studies on the future water management in the territory. Several water management structures have been interested on the project results that have been widely presented in France and in foreign countries and in popularization actions (conferences, movie).

B.2.1.3 Scientific production from the starting date

7 papers (1 published and 6 others currently close to be submitted) will be produced. These papers will describe the present climate characterization [Chaouche *et al*, 2010], the present and future water demand for drinking and agricultural purposes modeling [Maton et al. (2011), Terrasson et al. (2011) et Rinaudo et al. 2011], the hydrological [Ladouche et al. 2011] and hydrogeological modeling [Ladouche et Caballero, 2011] and the vulnerability characterization based on the resources to needs water budget [Caballero et al. 2011].

B.2.1.4 Illustration

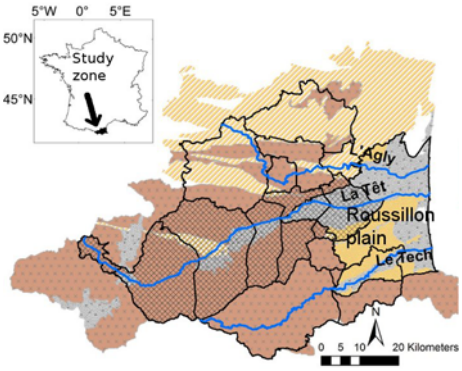


Figure 1 : Study zone localization, with the watersheds of the three Mediterranean rivers (Agly, Têt and Tech) that flow into the plio-quaternary aquifers of the Roussillon plain.

B.2.1.5 Factual Information

The VULCAIN project is a research project leaded by the BRGM, with the collaboration of the BRL Ingénierie group, the Hydrosciences laboratory of the University of Montpellier and the CNRM research center of Météo France in Toulouse. The project started on January 2007 and lasted 47 months. It has been funded by the ANR that provided 408 845 euros for a total cost of 822 783 euros.

C MEMOIRE SCIENTIFIQUE

Mémoire scientifique confidentiel : non

C.1 RESUME DU MEMOIRE

La vulnérabilité en termes de ressources en eau du département des Pyrénées Orientales au changement global a été étudiée en combinant des scénarios climatiques et des scenarios d'évolution socio-économiques. Des modèles hydrologiques, hydrogéologiques et de demande en eau ont permis de décrire le fonctionnement des hydrosystèmes et de caractériser l'évolution future de la demande en eau pour les usages eau potable et agricoles. Les 5 scénarios climatiques considérés prévoient une poursuite du réchauffement et un déficit de précipitations s'exprimant seulement à moyen terme, ce qui est en cohérence avec l'évolution climatique observée sur la zone d'étude au cours des 30 dernières années. Les scénarios contrastés d'évolution des usages eau potable (3) et de l'agriculture (2) prévoient une augmentation relative de la demande à court terme.
Les scénarios climatiques provoquent des réductions d'écoulement dans les fleuves de l'ordre de 20% à court terme et de 40% à moyen terme, surtout en été et en automne. L'influence du climat et celle des prélèvements est similaire pour ce qui concerne les eaux souterraines exploités sur la zone étudiée. Ainsi, la ressource en eau future devrait diminuer à un niveau que les stratégies d'économie d'eau actuellement envisagées ne permettront pas de compenser et ce, dès le court terme.

C.2 ENJEUX ET PROBLEMATIQUE, ETAT DE L'ART

Dans les régions méditerranéennes, une intensification des contrastes saisonniers (sécheresses, précipitations extrêmes) est observée au cours du dernier siècle. Comme partout dans le monde, la température est en hausse [IPCC, 2007] et ce sur les valeurs moyennes comme sur les valeurs extrêmes [Kuglitsch *et al*, 2010], [Hertig *et al*, 2010]. Des tendances variables à la baisse des précipitations ont été détectées à l'échelle saisonnière et annuelle sur la bordure méditerranéenne espagnole [De Luis *et al*, 2009], [Gonzales *et al*, 2009], [Lespinas *et al*, 2010]. La situation future prévue par les modèles couplés de circulation générale atmosphère océan (MCGAO), indique une intensification du réchauffement observé. Pour les précipitations, les prévisions ont évolué au cours des 10 dernières années. Alors que le 3ème rapport du GIEC [IPCC, 2001] prévoyait des hivers plus humides malgré une saison des pluies plus courte [Gibelin and Déqué, 2003], [Rowell, 2005],[Wang, 2005], [Planton *et al*, 2005], le 4ème rapport [IPCC, 2007] prévoit une diminution généralisée sur l'année des précipitations [Giorgi and Lionello, 2008], [Mariotti *et al*, 2008] et définit la région méditerranéen comme un « hot spot » du changement climatique [IPCC, 2007]. Cette évolution peut se traduire par un déficit d'écoulement dans les rivières, assorti de périodes d'étiage plus longues et d'une réduction de la recharge des aquifères [Etchevers *et al*, 2002], [Leblois, 2002], [Ducharne *et al*, 2003], [Alcamo *et al*, 2007], [Caballero *et al*, 2007], [Ducharne *et al*, 2007], [Elshamy *et al*, 2008], [Ardoin-Bardin *et al*, 2009], [Boé *et al*, 2009], [Candela *et al*, 2009], [Carter and Parker, 2009], [Gerbaux *et al*, 2009], [Giannakopoulos *et al*, 2009], [Kundzewicz and Döll, 2009], [MacDonald *et al*, 2009], [Lespinas *et al*, 2010]. Les aquifères peuvent contribuer à limiter les impacts du changement climatique sur la ressource en eau en période d'étiage, du fait de leur inertie et de leur soutien aux écoulements [Arnell, 1999], [Loaiciga *et al*, 2000], [Roy *et al*, 2001], [Morin and Slivitzky, 2002], [Miller *et al*, 2003], [Drogue *et al*, 2004], [Scibek and Allen, 2006], [Ducharne *et al*, 2007], [Goderniaux *et al*, 2009].
Parallèlement à l'évolution du climat, la pression des activités anthropiques sur le milieu naturel méditerranéen augmente rapidement. L'accroissement démographique, qui se traduit par une intensification de l'urbanisation dans les zones littorales, aggrave le déficit structurel de la région méditerranéenne en termes de ressource en eau [Döll, 2009]. Les prélèvements résultants concernent essentiellement l'alimentation en eau potable (AEP) et l'agriculture, dans un contexte où les ressources en eau exploitables sont souvent moins abondantes que les ressources en eau potentielles [Iglesias *et al*, 2007]. Dans les décennies à venir, le niveau de rareté de l'eau et l'intensité des conflits liés à son partage dépendront donc à la fois de l'évolution des prélèvements et du climat. L'évolution des prélèvements dans le futur est associée à de nombreuses incertitudes, notamment dans le secteur agricole. En effet, si la croissance démographique peut être considérée comme une tendance lourde, l'évolution de l'agriculture irriguée est beaucoup plus incertaine (risques économiques, contraintes réglementaires de plus en plus fortes, politique agricole européenne à l'avenir incertain,…). Les organismes en charge de la gestion de la ressource en eau (du type des « SAGE » existants en France) commencent à étudier les stratégies d'adaptation qui leur

permettraient d'anticiper les situations futures [Iglesias *et al*, 2007]. Or, il est possible que les impacts de la situation socio-économique future sur la ressource en eau soient aussi importants que ceux liés aux climat, même si leurs caractéristiques risquent d'être différentes [Alcamo *et al*, 2003], [Arnell *et al*, 2004]. Il est donc nécessaire de les étudier et de les comparer et de caractériser les incertitudes qui leur sont associés, pour proposer une expertise robuste de l'état futur de la ressource en eau sur un territoire donné [Holman, 2006]. Dans cette optique, des méthodes commencent à être proposées pour hiérarchiser les stratégies d'adaptation ou pour construire des scénarios prospectifs, mais cela est fait à des échelles trop grandes pour être directement utiles à des gestionnaires [Alcamo *et al*, 2007], [de Fraiture and Wichelns, 2010], ou sur des contextes différents de ceux observés en région méditerranéenne [Henriques *et al*, 2008], [Holman and Harman, 2008], [Hall and Murphy, 2010].

Le projet VULCAIN s'est donc attaché à développer une réflexion méthodologique sur l'étude et la comparaison des impacts du changement climatique et socio-économique sur les ressources en eau (de surface et souterraines) en contexte méditerranéen. Le département des Pyrénées Orientales a été choisi comme zone d'étude (Figure 1) car il présente un ensemble d'hydrosystèmes et une situation en termes de gestion de la ressource en eau qui peuvent être considérés comme représentatifs du contexte méditerranéen. Il s'agit de trois bassins versants (Agly, Têt et Tech) de taille moyenne (de l'ordre de 1 000 km²), qui alimentent un bassin littoral constitué d'aquifères de type alluvial et multicouche captif (aquifères plioquaternaires de la Plaine du Roussillon - 1 000 km²), fortement exploités. Sur ces hydrosystèmes, les relations entre eau de surface et eau souterraine sont mal connues et les processus hydrologiques naturels sont perturbés par les aménagements hydrauliques (barrages, canaux) utilisés pour la gestion de la ressource et les prélèvements. La gestion de la ressource est caractérisée par une demande en eau potable en forte hausse (en lien avec l'accroissement démographique), qui impacte sévèrement des ressources en eau souterraine soumises au risque d'intrusion saline. La demande en eau d'irrigation semble aussi augmenter, mais son évolution reste très incertaine et fortement dépendante de l'évolution de l'environnement économique et réglementaire du secteur. Enfin, l'organisation spatiale des hydrosystèmes et des structures de gestion de l'eau en présence font que cette zone d'étude est pratiquement indépendante du point de vue de ces ressources en eau, ce qui permet une comparaison des impacts des changements climatiques et socio-économiques à des échelles spatiales et temporelles communes.

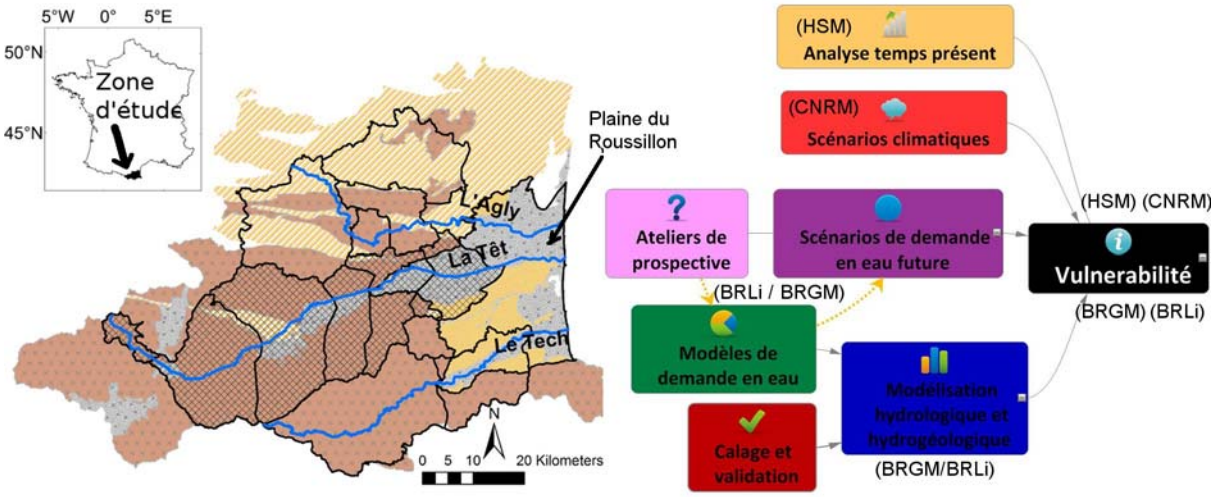


Figure 1: Zone d'étude, organisation méthodologique adoptée et implication des partenaires (BRGM ; BRL Ingénierie ; Hydrosciences Montpellier et CNRM de Météo France) dans les différents thèmes.

C.3 APPROCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

La Figure 1 présente de manière synthétique la méthode de travail adoptée. Le cadre climatique actuel a d'abord été décrit sur la zone d'étude au travers d'un travail de détection de non-stationnarités (test de Mann-Kendall) appliqué sur les chroniques de températures moyennes, d'évapotranspiration potentielle (ETP) et de précipitation observées (données des stations météorologiques et données SAFRAN [Quintana Seguí *et al*, 2009] des 35 dernières années [Chaouche *et al*, 2010] – Annexe 1.

En parallèle, le générateur stochastique Tempo [Pinault *et al*, 2001] a été calé sur les chroniques de température et de précipitation annuelles et mensuelles pour générer des scénarios climatiques à très

court terme, alternatifs à ceux issus des modèles de climat et intégrant les non-stationnarités détectées au cours du temps présent.
Ensuite, les prélèvements pour l'AEP et l'agriculture ont été déterminés sur chaque hydrosystème, pour la période comprise entre 1999 et 2007 [Terrasson et al. (2010] – Annexe 3, sur tous les sous-bassins définis sur la zone d'étude et l'ensemble de la plaine du Roussillon (Figure 1). Des modèles d'estimation de la demande en eau pour l'AEP et pour l'agriculture ont été construits [Terrasson et al. 2010] et [Terrasson et al. 2011] – Annexe 4) pour 1) estimer la part du prélèvement qui retourne dans les cours d'eau ou les aquifères et 2) calculer la demande en eau future à partir des scénarios socio-économiques prospectifs construits au travers d'ateliers associant les acteurs du territoire [Terrasson et al. 2011], [Maton et al. 2011] – Annexe 5 et [Rinaudo et al. 2011] – Annexe 6.
Une fois les débits « naturalisés » (débit observé + demande en eau pour l'AEP et l'agriculture), ils ont été reproduits à l'aide de l'outil Tempo sur la période 1980-2000. La modélisation sur le bassin versant de l'Agly est décrite dans [Ladouche et al. 2011] - Annexe 7, celle sur le bassin versant du Tech est décrite dans [Caballero et al. 2011] – Annexe 9. La modélisation sur le bassin versant de la Têt n'a pas pu être menée à son terme, faute de moyens et de temps.
Les connaissances sur la structure géométrique et les caractéristiques hydrodynamiques des aquifères plioquaternaires étant insuffisantes pour permettre la construction d'un modèle hydrodynamique, des modélisations ponctuelles de la piézométrie ont été réalisées en intégrant les prélèvements à l'aide de Tempo [Ladouche et Caballero, 2011] – Annexe 8.
Les modèles hydrologiques et hydrogéologiques calés et validés au temps présent ont ensuite été soumis à 5 scénarios de changement climatique [Martin et Salas, 2009] - Annexe 2. Ces scénarios ont été construits en utilisant la méthode des perturbations [Xue *et al*, 1991], [Déqué, 2007] pour les périodes 2020-40 (court terme) et 2040-60 (moyen terme), à partir des MCGAO les plus performants sur la zone d'étude (CNRM-CM3, HadGEM1, IPSL-CM4, MPI-ECHAM5, NCAR-CCSM3.0) et pour le scénario d'émission A1B. Les anomalies moyennes mensuelles obtenues entre présent et futur ont été appliquées sur la grille de 8x8 km de SAFRAN (Martin et Salas, 2009). L'impact des scénarios climatiques sur les débits des cours d'eau Agly [Ladouche et Caballero, 2011] et Tech [Caballero et al., 2011] et sur les niveaux piézométriques dans l'aquifère plioquaternaire [Ladouche et Caballero, 2011] a ainsi pu être déterminé.
Pour finir, la vulnérabilité de la zone d'étude au changement global a été caractérisée au travers d'un bilan global comparant aux différents horizons temporels, la ressource disponible et la demande en eau. Cette caractérisation a été détaillée sur le bassin versant du Tech [Caballero et al. 2011], en considérant la ressource en eau effectivement disponible, c'est-à-dire, en prenant en compte la nécessité de maintenir dans les cours d'eau un débit minimal permettant d'assurer la survie de l'écosystème aquatique [Acreman and Dunbar, 2004].

C.4 RESULTATS OBTENUS

C.4.1 NON-STATIONNARITES DU CLIMAT PRESENT

Des augmentations significatives ont été détectées sur les températures moyennes annuelles (de l'ordre de +1,1°C à +1,8°C) entre 1970 et 2006, plus marquées près du littoral qu'en montagne. Une évolution similaire est observée pour l'ETP moyenne annuelle (entre +34 mm et +150 mm entre 1970 et 2006, sur le nord et le nord-ouest). Aucune évolution n'a été observée sur les précipitations annuelles, ni sur la longueur des périodes sèches.
Les résultats à l'échelle mensuelle sont plus hétérogènes. Seules les températures des mois de mars à aout présentent des hausses statistiquement significatives. Les augmentations de l'ETP mensuelle, ne sont pas totalement corrélées à celles des températures, probablement parce que la relation de Penman-Monteith utilisée se base aussi sur l'humidité relative, le rayonnement solaire et la vitesse du vent. Pour les précipitations, des tendances à la diminution en Juin et à l'augmentation en Novembre ont été détectées. Ces résultats sont cohérents avec d'autres études [Moisselin *et al*, 2002], [Gonzales *et al*, 2009], [De Luis *et al*, 2009], [Lespinas *et al*, 2010], [Vidal *et al*, 2010]. Cependant, la variabilité saisonnière [Ludwig *et al*, 2004] sur le bassin de la Têt n'a pas été retrouvée. Tous ces résultats sont détaillés dans [Chaouche *et al*, 2010].

C.4.2 LES SCENARIOS CLIMATIQUES FUTURS

Le générateur calé sur les chroniques des 35 dernières années n'a pas été capable de reproduire les non-stationnarités à l'échelle mensuelle. Ses fonctions caractéristiques sont en effet conçues pour reproduire des comportements saisonniers et annuels. L'idée de l'utiliser pour reproduire des scénarios futurs intégrant des non-stationnarités détectées sur certains mois seulement a donc dû être abandonnée. Les scenarios climatiques issus des MCGAO choisis prévoient une augmentation

de température (entre +1.0°C et +1.8 °C en moyenne multi-modèle) à court terme, qui s'intensifie à moyen terme en valeur moyenne (entre +1.7°C and +3.3°C en moyenne multi-modèle) et en variabilité inter-saisonnière [Caballero et al., 2011]. Aucune évolution de la précipitation n'apparaît à court terme (entre -10.9% to +10.5% par rapport au présent, en moyenne multi-modèle) alors qu'une décroissance modérée (de -2.1% à -21.9% en moyenne multi-modèle) est prévue à moyen terme. Ces résultats sont relativement cohérents avec d'autres résultats obtenues sur le pourtour méditerranéen [Giorgi and Lionello, 2008], [Mariotti *et al*, 2008], [Giannakopoulos *et al*, 2009], [Lopez-Moreno *et al*, 2009]. Ces projections sont associées à des incertitudes qui sont plus importantes pour les précipitations que pour les températures, pour l'été que pour l'hiver et pour le moyen terme que pour le court terme. Ces résultats sont présentés dans [Martin et Salas, 2009].

C.4.3 DEMANDE EN EAU POTABLE ET AGRICOLE PRESENTE ET FUTURE

L'évolution future de la demande en eau potable a été estimée pour trois scénarios de développement démographique et économique contrastés. Le cadrage démographique de chaque scénario est complété par des hypothèses relatives à l'urbanisme, à l'activité touristique, aux pratiques de consommation des usagers et au rendement des réseaux d'eau potable. Une description narrative a permis leur appropriation par les acteurs. Une relative sensibilité de la demande en eau potable aux différentes hypothèses apparaît, la demande annuelle à court terme variant entre 51 et 68 millions de m^3 par an, contre 55 actuellement. Ces résultats sont présentés dans Terrasson et al (2010, 2011). Les ateliers de prospective organisés avec des experts et des agriculteurs font émerger deux scénarios contrastés pour l'agriculture future, correspondant respectivement à un déclin (scenario 1) et à une restructuration dynamique autour d'un projet régional reposant sur le développement d'une agriculture « haute-performance environnementale » (scenario 3+4). Le scénario 1 conduit à une stabilisation de la demande en eau, la baisse des surfaces en fruits et légumes étant compensée par une hausse des surfaces de vigne irriguées. Le scénario 3+4 conduit à une augmentation très significative des besoins en eau d'irrigation (+44% en volume annuel), avec une très forte hausse des besoins en étiage (+50% de juillet à septembre), susceptible de générer des conflits (Figure 2). Ces résultats sont présentés dans [Rinaudo et al. 2011].

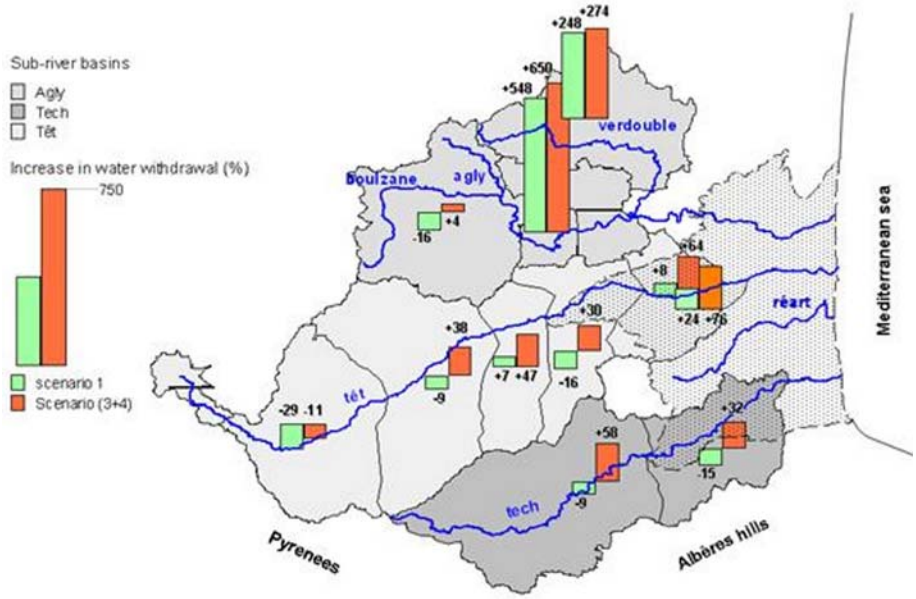


Figure 2: Répartition de la demande en eau par sous-bassins étudiés pour la période 2020-40.

C.4.4 IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES RESSOURCES EN EAU DE SURFACE

Des réductions des débits moyens de l'ordre de 0.5 à 1 m^3/s (-10 à -20 % par rapport au présent, au printemps et en automne) et une diminution du signal de fonte des neiges au printemps, sont observées à court terme sur le Tech et l'Agly. A moyen terme, la réduction est de l'ordre de 1 à 2 m^3/s (-20 à -40% toute l'année). Le soutien des aquifères alluviaux permet de limiter la diminution des écoulements en fin d'étiage. L'incertitude associée à ces résultats est forte en hiver. Seules les diminutions des débits entre le printemps et l'été sont statistiquement significatives (test de Student-Fischer). La présence de la retenue sur l'Agly permet de limiter l'impact des scénarios climatiques pendant l'étiage. Les débits d'infiltration au niveau des pertes diminuent (de l'ordre de 10% à court-terme et de 20 % à moyen-terme) dans une proportion moindre que celle des débits. L'impact sur la

recharge de l'aquifère karstique des Corbières est donc moindre que celui sur les débits des cours d'eau (Figure 3). Ces résultats sont présentés dans [Ladouche et al. 2011] et [Caballero et al. 2001]

C.4.5 IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR L'AQUIFERE PLIO-QUATERNAIRE

L'évolution piézométrique est contrôlée à parts égales par la recharge et par les prélèvements. L'impact des prélèvements se traduit par une influence interannuelle qui contrôle la tendance à la baisse de la piézométrie à long terme et par une influence saisonnière, qui contrôle le comportement estival. L'influence de la recharge ne s'observe donc qu'en hiver et la tendance à la hausse des températures observée par [Chaouche *et al*, 2010] (susceptible de provoquer une réduction des pluies efficaces) n'est pas visible à cause de l'effet prépondérant des prélèvements à long terme. Une baisse de la piézométrie de l'ordre de quelques centimètres à court terme et de quelques dizaines de centimètres à moyen terme est prévue (Figure 3). L'impact est plus marqué en période de recharge qu'en période estivale (contrôle prépondérant des prélèvements).

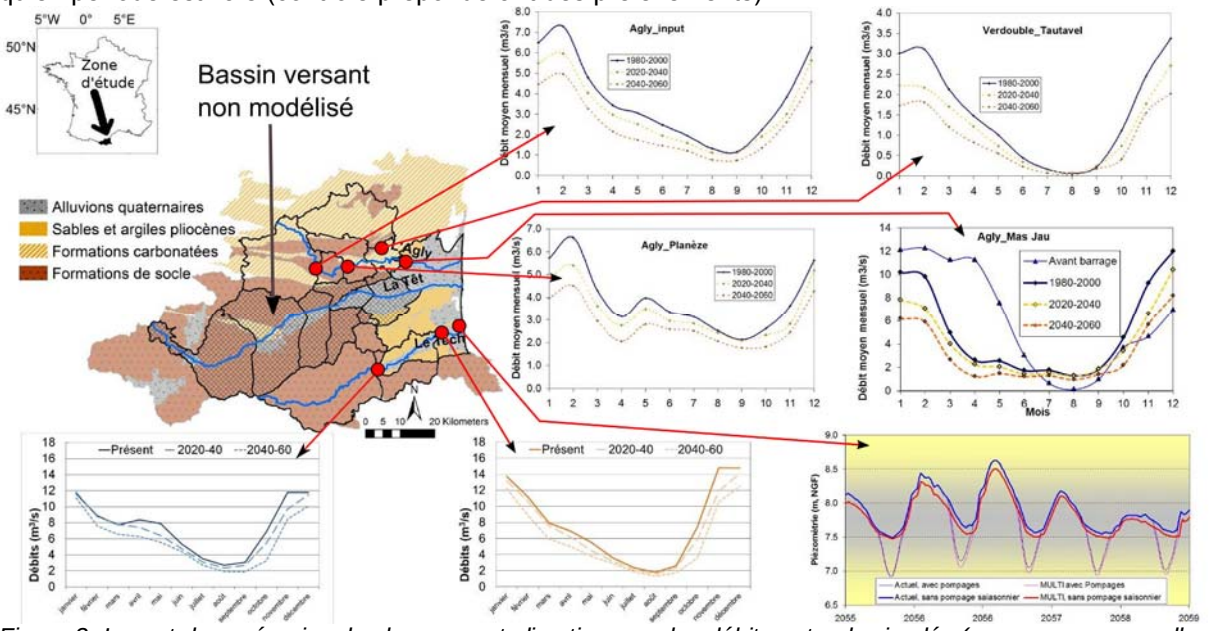


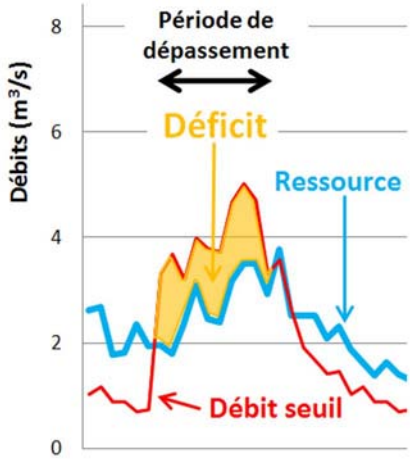
Figure 3: Impact des scénarios de changement climatique sur les débits naturels simulés (moyennes mensuelles multi-modèle) à l'exutoire de tous les sous-bassins étudiés et sur les évolutions piézométriques des aquifères du pliocène (extrait de la chronique journalière moyenne multi-modèle).

C.4.6 VULNERABILITE DU TERRITOIRE ETUDIE AU CHANGEMENT GLOBAL

A l'échelle annuelle (en extrapolant les résultats obtenus sur le Tech et l'Agly à la Têt), il apparaît que l'impact du climat provoque des diminutions de la ressource en eau superficielle bien supérieures aux évolutions de la demande en eau potable et agricole (et donc aux stratégies d'économie de la ressource actuellement envisageables) et ce, même à court terme.

A l'échelle saisonnière (en étiage, période de pointe en termes de demande en eau), la comparaison de la ressource disponible avec les besoins (demande en eau des usages + débit « seuil[1] ») réalisée sur le Tech, a confirmé que le déficit lié au climat futur serait supérieur à celui lié à la demande en eau future. Cette prépondérance se renforce au cours du temps, puisque la part du déficit liée aux prélèvements diminue en comparaison de celle liée au changement climatique (Figure 4).

[1] Le débit seuil correspond ici à la quantité d'eau que le gestionnaire de la ressource décide de laisser dans le cours d'eau pour assurer le bon fonctionnement de la vie aquatique – débit biologique - [Acreman and Dunbar, 2004]



Calcul de déficit pour une chronique de débits influencés par les prélèvements

Tech 2	1980-2000	2020-40	2040-60
F dépassmt (%)	30.7	33.0	38.6
V déficit (Mm3)	5.10	6.24	7.88

Combinaison des scénarios d'évolution des usages Eau Potable et Agricole

Irrigation \ AEP	1. Développement anarchique	2. Dynamisme durable	3. Tendanciel timide
1. Agriculture ultracompétitive	Scénario A	Scénario C	Scénario E
3/4. Agriculture régionale et Haute Performance Env	Scénario B	Scénario D	Scénario F

Calcul du déficit pour une chronique de débits influencés de 2020-40, avec prise en compte des différentes combinaisons de scénarios

Tech 2	2020-40	Sc. A	Sc. B	Sc. C	Sc. D	Sc. E	Sc. F
F dépassmt (%)	60.2	62.7	58.9	60.9	59.5	61.6	61.6
V déficit (Mm3)	6.24	6.69	7.83	6.28	7.38	6.49	7.61

Figure 4: Exemple de comparaison des ressources et des besoins à l'échelle saisonnière pour le sous-bassin n°2 du Tech. La fréquence de dépassement du débit seuil et le déficit volumique moyen annuel correspondants sont calculés pour le présent, le court et le moyen terme, en considérant les prélèvements constants par rapport au présent. Ensuite, les différents scénarios d'usage de l'eau sont combinés et le déficit résultant est calculé et comparé à celui obtenu à court terme.

Ainsi, la vulnérabilité du territoire étudié au changement global dépend de manière prépondérante de l'évolution du climat et ce, même à court terme. Cette situation remettra probablement en question les valeurs seuil actuellement définies et nécessitera de mobiliser fortement le potentiel d'adaptation du territoire (combinaison d'optimisation de la gestion de la ressource, du maillage des ressources et de création de nouvelles ressources). Ces résultats sont présentés dans [Caballero et al. 2011].

C.5 EXPLOITATION DES RESULTATS

Les résultats présentés ont été pris en main par les gestionnaires du territoire (SAGE Plaine du Roussillon, Chambre d'Agriculture, organisations de producteurs, Syndicat du Tech, Conseil Général des PO, Agglomération Perpignan, Agence de l'Eau RM&C, DREAL et DDEA), qui se sont en outre approprié les scénarios mis en débat au cours des ateliers de prospective pour l'élaboration de leurs propres stratégies. La problématique et les bases de données développées dans Vulcain ont été intégrées dans le cahier des charges des études « Volumes Prélevables » actuellement menées par l'Agence de l'Eau sur tout le bassin RM&C.
L'analyse du climat passée, les scénarios de climat futur et élaborés dans Vulcain ont été utilisés dans le projet AQUIMED (Era Net CIRCLE), comme support de discussion avec des groupes d'agriculteurs avec qui la réflexion prospective a été répliquée en France et au Portugal (Algarve avec le partenaire portugais Socius). Des publications communes aux deux projets sont en cours de préparation.
Les résultats du projet servent actuellement au montage de plusieurs projets (Aleyin et un projet traitant de changement climatique et terroirs viticoles) et ont permis de constituer un réseau de partenaires intéressés pour travailler ensemble sur la problématique du changement global et de la ressource en eau.

C.6 DISCUSSION

Discussion sur le degré de réalisation des objectifs initiaux, les verrous restant à franchir, les ruptures, les élargissements possibles, les perspectives ouvertes par le projet, l'impact scientifique, industriel ou sociétal des résultats.

Nous considérons que l'objectif général du projet a été atteint dans la mesure où la réflexion a pu être menée à son terme et que les grands facteurs ont été pris en compte. L'utilisation du générateur est une piste qui a dû être abandonnée faute de moyens, mais son intérêt est toujours étudié par ailleurs (projet ANR VMC-S SHIVA). Malgré le nombre réduit de partenaires, un nombre plus important que prévu de publications sont réalisées ou en cours de réalisation.
Les verrous restant à franchir à l'issue du travail réalisé sont les suivants ;

- nécessité de conduire des analyses sur le climat passé et de construire des scénarios climatiques futurs qui renseignent sur des paramètres dérivés des paramètres classiquement utilisés (direction du vent, dates d'occurrence des gelées, …), plus parlants pour les gestionnaires (agriculteurs surtout) ;

- modélisation de la dynamique temporelle des relations entre eaux de surface et eaux souterraines pour des aquifères complexes et très exploités comme les aquifères captifs ;
- caractérisation des relations entre aquifères littoraux et intrusions salines, qui sont une limite à l'exploitation de la ressource en eau souterraine, généralement difficile à définir ;
- modélisations hydrologiques et hydrogéologiques capables d'intégrer les aménagements hydrauliques et le maillage de la ressource, seules approches permettant d'étudier l'impact sur les déficits observés, des stratégies d'adaptation potentiellement disponibles ;
- articulation de démarches qualitatives (élaboration de scénarios narratifs) et quantitative (modèles de demande en eau) dans le domaine de la prospective. Il reste très difficile de transformer des hypothèses de changements sociaux présents dans les scénarios narratifs en hypothèses quantifiées utilisables par un modèle ; réciproquement, un certain nombre de paramètres du modèle ne peuvent pas être extraits des scénarios.
- articulation des scénarios d'évolution socioéconomiques réalisés à l'échelle locale (PO) avec des visions prospectives européennes, voire mondiales. Comment intégrer le fait que les futurs besoins en eau d'irrigation des PO dépendront essentiellement de l'impact du changement climatique sur les vergers espagnols ou sur la production maraîchère Bretonne ?
- simulation des adaptations du secteur agricole (en termes de choix de cultures, pratiques culturales) et quantification de la variation des besoins en eau auxquelles ces adaptations conduiront, ne serait-ce que qualitativement. Ceci nécessite probablement d'avoir recours à des outils semi-quantitatifs de modélisation des comportements de type Agent Based social Simulation Models [Ziervogel *et al*, 2005] pouvant être utilisés en prospective exploratoire avant d'être couplé à des modèles biophysiques.

Nous espérons que l'impact scientifique du projet Vulcain (une fois nos articles publiés) se traduira par une association plus systématique entre climat et évolution socio-économique (prise en compte des prélèvements) et entre eau de surface et souterraine dans les études sur le devenir des ressources en eau. De même, les résultats présentés établissent la nécessité de pousser la réflexion jusqu'à la comparaison entre besoins et ressources aux échelles temporelles et spatiales pertinentes, si l'on veut véritablement appréhender les enjeux du changement global.

Dans le domaine sociétal, beaucoup d'enseignements ont été tirés par les acteurs du territoire associés au projet, dans la perspective d'une réutilisation opérationnelle de la démarche utilisée (études volumes prélevables), d'élaboration de stratégies d'adaptation au changement climatique, dans la manière d'associer recherche scientifique et questions opérationnelles de gestion des ressources. Les résultats et le matériel produit dans le cadre du projet a déjà fait l'objet d'un grand nombre de présentations et de diffusions (documents, données, film), via le site du projet.

C.7 CONCLUSIONS

Le travail réalisé dans le cadre du projet Vulcain a permis de caractériser de manière précise les enjeux en termes de vulnérabilité future du territoire étudié. La situation future en termes climatiques et socio-économiques a pu être caractérisée sur la base des modélisations et données existantes. Le comportement des hydrosystèmes étudiés et la manière dont ils sont exploités ont été décrits à l'aide de modèles qui ont permis de mettre en évidence que le climat futur provoquera probablement des réductions d'écoulement dans les fleuves de l'ordre de 20% à court terme et de 40% à moyen terme, surtout en été et en automne. Les ressources en eau souterraines seront affectées de manière différente puisqu'il apparait que l'influence du climat et celle des prélèvements est similaire. L'ensemble du travail réalisé montre cependant que la ressource en eau future devrait diminuer surtout en période d'étiage et à un niveau que les stratégies d'économie d'eau actuellement envisagées ne permettront pas de compenser et ce, dès le court terme.

C.8 REFERENCES

Acreman, M. C. and M. J. Dunbar (2004), Defining environmental river flow requirements – a review, *Hydrol. Earth. Syst. Sci.,* **8***(5)*, 861 <last_page> 876, doi:10.5194/hess-8-861-2004

Alcamo, J., M. Flörke and M. Märker (2007), Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes*, Hydrol. Sci. J.-J. Sci. Hydrol.,* **52***(2)*, 247-275,

Alcamo, J., P. Doll, T. Henrichs, F. Kaspar, B. Lehner, T. Rosch and S. Siebert (2003), Development and testing of the WaterGAP 2 global model of water use and availability / Developpement et evaluation du modele global WaterGAP 2 d'utilisation et de disponibilite de l'eau*, Hydrol. Sci. J.-J. Sci. Hydrol.,* **48***(3)*, 317 <last_page> 337, doi:10.1623/hysj.48.3.317.45290

Ardoin-Bardin, S., A. Dezetter, E. Servat, J. E. Paturel, G. Mahe, H. Niel and C. Dieulin (2009), Using general circulation model outputs to assess impacts of climate change on runoff for large hydrological catchments in West Africa / Utilisation des sorties de modeles de circulation generale pour evaluer les impacts du changement climatique sur les ecoulements de grands bassins hydrographiques d'Afrique de l'Ouest, *Hydrological Sciences Journal,* **54***(1)*, 77 <last_page> 89, doi:10.1623/hysj.54.1.77

Arnell,N. W. (1999), The effects of climate change on hydrological regimes in Europe: a continental perspective, *Global Environ.Change,* **9**5-23,

Arnell, N. W., M. J. L. Livermore, S. Kovats, P. E. Levy, R. Nicholls, M. L. Parry and S. R. Gaffin (2004), Climate and socio-economic scenarios for global-scale climate change impacts assessments: characterising the SRES storylines, *Global Environ.Change,* **14**, 3-20, doi:10.1016/j.gloenvcha.2003.10.004

Boé, J., L. Terray, E. Martin and F. Habets (2009), Projected changes in components of the hydrological cycle in French river basins during the 21st century, *Water Resour.Res.,* **45***(8)*, W08426-15, doi:10.1029/2008WR007437

Caballero, Y., S. Voirin-Morel, F. Habets, J. Noilhan, P. LeMoigne, A. Lehenaff and A. Boone (2007), Hydrological sensitivity of the Adour-Garonne river basin to climate change, *Water Resour.Res.,* **43***(W07448)* doi:10.1029/2005WR004192

Candela, L., W. von Igel, F. Javier Elorza and G. Aronica (2009), Impact assessment of combined climate and management scenarios on groundwater resources and associated wetland (Majorca, Spain), *Journal of Hydrology,* **376***(3-4)*, 510-527, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.07.057

Carter, R. C. and A. Parker (2009), Climate change, population trends and groundwater in Africa, *Hydrol. Sci. J.-J. Sci. Hydrol.,* **54***(4)*, 676-689,

Chaouche, K., L. Neppel, C. Dieulin, N. Pujol, B. Ladouche, E. Martin, D. Salas y Melia and Y. Caballero (2010), Analyses of precipitation, temperature and evapotranspiration in a French Mediterranean region in the context of climate change, *Comptes Rendus Geosciences,* **342***(3)*, 234-243, doi:10.1016/j.crte.2010.02.001

de Fraiture, C. and D. Wichelns (2010), Satisfying future water demands for agriculture, *Agric.Water Manage.,* **97***(4)*, 502-511, doi:DOI: 10.1016/j.agwat.2009.08.008

De Luis, M., J. C. Gonzalez-Hidalgo, L. A. Longaresa and P. Stepanek (2009), Seasonal precipitation trends in the Mediterranean Iberian Peninsula in second half of 20th century, *Int.J.Climatol.,* **29***(9)*, 1312-1323, doi:10.1002/joc.1778

Déqué, M. (2007), Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values, *Global and Planetary Change,* **57***(1-2)*, 16-26, doi:10.1016/j.gloplacha.2006.11.030

Döll, P. (2009), Vulnerability to the impact of climate change on renewable groundwater resources: a global-scale assessment, *Environ. Res. Lett.,* doi:10.1088/1748-9326/4/3/035006

Drogue,G., L. Pfister, T. Leviandier, et al. (2004), Simulating the spatio-temporal variability of streamflow response to climate change scenarios in a mesoscale basin, *Journal of Hydrology, (293),* 255-269,

Ducharne, A., S. Théry, P. Viennot, E. Ledoux, E. Gomez and M. Déqué (2003), Influence du changement climatique sur l'hydrologie du bassin de la Seine, *Vertigo,* **4***(3)*, 1-13,

Ducharne, A., C. Baubion, N. Beaudoin, M. Benoit, G. Billen, N. Brisson, J. Garnier, H. Kieken, S. Lebonvallet, E. Ledoux, B. Mary, C. Mignolet, X. Poux, E. Sauboua, C. Schott, S. Thery and P. Viennot (2007), Long term prospective of the Seine River system: confronting climatic and direct anthropogenic changes, *Sci.Total Environ.,* **375***(1-3)*, 292-311, doi:10.1016/j.scitotenv.2006.12.011

Elshamy, M. E., I. A. Seierstad and A. Sorteberg (2008), Impacts of climate change on Blue Nile flows using bias-corrected GCM scenarios, *Hydrol. Earth. Syst. Sci.,* **5***(3)*, 1407 <last_page> 1439, doi:10.5194/hessd-5-1407-2008

Etchevers,P., C. Golaz, F. Habets and J. Noilhan. (2002), Impact of a climate change on the Rhone river catchment hydrology, *Journal of Geophysical Research,* **107***(D16),*

Gerbaux, M., N. Hall, N. Dessay and I. Zin (2009), The sensitivity of Sahelian runoff to climate change / Sensibilite au changement climatique du ruissellement au Sahel, *Hydrol. Sci. J.-J. Sci. Hydrol.,* **54***(1)*, 5 <last_page> 16, doi:10.1623/hysj.54.1.5

Giannakopoulos, C., P. Le Sager, M. Bindi, M. Moriondo, E. Kostopoulou and C. M. Goodess (2009), Climatic changes and associated impacts in the Mediterranean resulting from a 2 °C global warming, *Global Planet.Change,* **68***(3)*, 209-224, doi:DOI: 10.1016/j.gloplacha.2009.06.001

Gibelin,A. L. and M. Déqué. (2003), Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model, *Clim.Dyn.,* **20**327-339, doi:10.1007/s00382-002-0277-1

Giorgi, F. and P. Lionello (2008), Climate change projections for the Mediterranean region, *Global Planet.Change,* **63***(2-3)*, 90-104, doi:DOI: 10.1016/j.gloplacha.2007.09.005

Goderniaux, P., S. Brouyère, H. J. Fowler, S. Blenkinsop, R. Therrien, P. Orban and A. Dassargues (2009), Large scale surface–subsurface hydrological model to assess climate change impacts on groundwater reserves, *Journal of Hydrology,* **373***(1-2)*, 122 <last_page> 138, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.04.017

Gonzales, A. L., J. Nonner, J. Heijkers and S. Uhlenbrook (2009), Comparison of different base flow separation methods in a lowland catchment, *Hydrol. Earth. Syst. Sci.,* **6***(2)*, 3483 <last_page> 3515, doi:10.5194/hessd-6-3483-2009

Hall, J. and C. Murphy (2010), Vulnerability Analysis of Future Public Water Supply Under Changing Climate Conditions: A Study of the Moy Catchment, Western Ireland, *Water Resour.Manage.,* **24***(13)*, 3527 <last_page> 3545, doi:10.1007/s11269-010-9618-8

Henriques, C., I. P. Holman, E. Audsley and K. Pearn (2008), An interactive multi-scale integrated assessment of future regional water availability for agricultural irrigation in East Anglia and North West England, *Clim.Change,* **90***(1-2)*, 89 <last_page> 111, doi:10.1007/s10584-008-9459-0

Hertig, E., S. Seubert and J. Jacobeit (2010), Temperature extremes in the Mediterranean area: trends in the past and assessments for the future, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.,* **10***(10)*, 2039 <last_page> 2050, doi:10.5194/nhess-10-2039-2010

Holman, I. P. (2006), Climate change impacts on groundwater recharge- uncertainty, shortcomings, and the way forward?, *Hydrogeol.J.,* **14***(5)*, 637-647, doi:10.1007/s10040-005-0467-0

Holman, I. P. and J. Harman (2008), Preliminary evaluation of the benefits of a participatory regional integrated assessment software, *Clim.Change,* **90***(1-2)*, 169 <last_page> 187, doi:10.1007/s10584-008-9455-4

Iglesias, A., L. Garrote, F. Flores and M. Moneo (2007), Challenges to Manage the Risk of Water Scarcity and Climate Change in the Mediterranean, *Water Resour.Manage.,* **21***(5)*, 775 <last_page> 788, doi:10.1007/s11269-006-9111-6

IPCC (2007),
Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, pp. 996, Cambridge university Press, Cambridge.

IPCC (2001),
Climate change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability, IPCC WGII reportCambridge university Press, Cambridge.

Kuglitsch, F. G., A. Toreti, E. Xoplaki, P. M. Della-Marta, C. S. Zerefos, M. Türkeş and J. Luterbacher (2010), Heat wave changes in the eastern Mediterranean since 1960, *Geophys.Res.Lett.,* **37***(4)* doi:10.1029/2009GL041841

Kundzewicz, Z. W. and P. Döll (2009), Will groundwater ease freshwater stress under climate change?, *Hydrol. Sci. J.-J. Sci. Hydrol.,* **54***(4)*, 665-675, doi:10.1623/hysj.54.4.665.

Leblois, E. (2002), Evaluation of the possible impacts of climatic change by distributed models (Gewex-Rhone et Gicc-Rhone projects), *La Houille Blanche,* **8**, 78-83

Lespinas, F., W. Ludwig and S. Heussner (2010), Impact of recent climate change on the hydrology of coastal Mediterranean rivers in Southern France, *Clim.Change,* **99**, 425-456, doi:DOI 10.1007/s10584-009-9668-1

Loaiciga, H. A., D. R. Maidment and J. B. Valdes (2000), Climate-change impacts in a regional karst aquifer, Texas, USA, *Journal of Hydrology,* **227***(1-4)*, 173-194,

Lopez-Moreno, J. I., S. M. Vicente-Serrano, L. Gimeno and R. Nieto (2009), Stability of the seasonal distribution of precipitation in the Mediterranean region: Observations since 1950 and projections for the 21st century, *Geophys.Res.Lett.,* **36***(10)*, L10703, doi:10.1029/2009GL037956

Ludwig, W., P. Serrat, L. Cesmat and J. Garcia-Esteves (2004), Evaluating the impact of the recent temperature increase on the hydrology of the Tet River (Southern France), *J. of. Hydr.,* **289***(1-4)*, 204-221,

MacDonald, A., R. Calow, D. MacDonald, W. G. Darling and B. E. O. Dochartaigh (2009), What impact will climate change have on rural groundwater supplies in Africa?, *Hydrological Sciences Journal,* **54***(4)*, 690 <last_page> 703, doi:10.1623/hysj.54.4.690

Mariotti, A., N. Zeng, J. H. Yoon, V. Artale, A. Navarra, P. Alpert and L. Z. X. Li (2008), Mediterranean water cycle changes: transition to drier 21st century conditions in observations and CMIP3 simulations, *Environ. Res. Lett.,* **3***(4)*, 8, doi:10.1088/1748-9326/3/4/044001

Miller,N. L., K. E. Bashford and E. Strem. (2003), Potential impacts of climate change on California hydrology, *J.Am.Water Resour.Assoc.,* **39**771-784,

Moisselin,J. -M, M. Schneider, C. Canellas and O. Mestre. (2002), Les changements climatiques en France au XXe siècle en France, *La Météorologie, (38),* 45-56,

Morin,G. and M. Slivitzky. (2002), Impacts des changements climatiques sur le régime hydrologique: le cas de la rivière Moisie, *Revue des Sciences de l'Eau, (5),* 179-195,

Pinault, J. -., V. Plagnes, L. Aquilina and M. Bakalowicz (2001), Inverse modeling of the hydrological and the hydrochemical behavior of hydrosystems: Characterization of Karst System Functioning , *Water Resour.Res.,* **37***(8)*, 2191, doi:10.1029/2001WR900018

Planton, S., M. Deque, H. Douville and B. Spagnoli (2005), Impact du réchauffement climatique sur le cycle hydrologique, *C. R. Géoscience,* **337***(1-2)*, 193-202, doi:DOI: 10.1016/j.crte.2004.10.003

Quintana Seguí, P., E. Martin, F. Habets and J. Noilhan (2009), Improvement, calibration and validation of a distributed hydrological model over France, *Hydrol. Earth. Syst. Sci.,* **13**, 163-181,

Rowell, D. (2005), A scenario of European climate change for the late twenty-first century: seasonal means and interannual variability, *Clim.Dyn.,* **25***(7-8)*, 837-849, doi: 10.1007/s00382-005-0068-6

Roy,L., R. Leconte, F. P. Brisstte and C. Marche. (2001), The impact of climate change on seasonal floods of a southern Quebec River Basin, *Hydrol.Process.,* **15***(16),* 3167-3179,

Scibek, J. and D. M. Allen (2006), Modeled impacts of predicted climate change on recharge and groundwater levels, *Water Resour. Res.,* **42***(W11405)* doi:10.1029/2005WR004742, 2006

Vidal, J. -., E. Martin, L. Franchistéguy, M. Baillon and J. -. Soubeyroux (2010), A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system, *Int.J.Climatol.,* **30***(11)*, 1627-1644., doi:10.1002/joc.2003

Wang, G. (2005), Agricultural drought in a future climate: results from 15 global climate models participating in the IPCC 4th assessment, *Clim.Dyn.,* **25***(7 - 8)*, 739-753, doi:10.1007/s00382-005-0057-9

Xue,Y., P. J. Sellers, J. L. Kinter and J. Shukla. (1991), A simplified biosphere model for climate studies, *J.Clim.,* **4**345-364,

Ziervogel, G., M. Bithell, R. Washington and T. Downing (2005), Agent-based social simulation: a method for assessing the impact of seasonal climate forecast applications among smallholder farmers, *Agri. Syst.,* **83***(1)*, 1-26, doi:10.1016/j.agsy.2004.02.009