

Vulnerability of Mediterranean hydrosystems to climate changes and human activities: the VULCAIN project

Assessing potential impacts of likely future precipitation and temperature modifications for the 2020-2040 and 2040-60 periods over a Mediterranean basin

Authors and contacts:

Yvan Caballero (1) (*),
Keltoum Chaouche (3),
Luc Neppel (3),
David Salas y Melia (5)
Eric Martin (5)
Isabelle Terrasson (4)
Sébastien Chazot (4)
Jean-Michel Citeau (4)
Laure Maton (1)
Jean-Daniel Rinaudo (1)
Perrine Fleury (1)
Bernard Ladouche (1)
Nathalie Dorfliger (1)
Jean-Louis Pinault (2)

(*) corresponding author

- (1) BRGM - Unité EAU-RMD. Service Géologique Régional Languedoc – Roussillon. 1039, rue de Pinville. 34000 Montpellier.
- (2) BRGM – Unité EAU-M2H. Centre Scientifique et Technique. B.P. 6009. 45060 Orléans Cedex 02.
- (3) HydroSciences Montpellier – HSM. Maison des Sciences de l'Eau, Université Montpellier II. Place Eugène Bataillon. 34095 Montpellier Cedex 5.
- (4) BRL ingénierie. 1105, Avenue Pierre Mendès France. BP 4001. 30001 Nîmes Cedex.
- (5) Groupe d'étude de l'atmosphère météorologique. CNRM-GAME (Météo-France, CNRS). 42 Avenue de Coriolis. 31057 Toulouse.

Potential congress sub-theme related to the presented paper:

WATER AVAILABILITY, USE AND MANAGEMENT - Hydrological diagnosis and forecasting

CLIMATE CHANGE AND DISASTERS

- Linking climatology, hydrology and water resources management
- How good is our knowledge base?

Résumé

Les régions méditerranéennes dans lesquelles on trouve des hydrosystèmes fortement anthropisés et où les ressources en eau souterraines ont une grande importance pour l'alimentation en eau des populations, sont soumises à un climat contrasté et à une pression démographique en constante augmentation.

Le réchauffement global va probablement se traduire par des étés plus chauds et secs et moins de précipitations durant des hivers plus chauds et pour des saisons de pluies plus courtes, ce qui risque de réduire les ressources disponibles pour les besoins en eau potable et pour l'irrigation. En Languedoc-Roussillon par exemple, l'impact des changements climatiques sur la ressource en eau risque d'être renforcé par l'augmentation de la demande en eau liée à la croissance démographique importante que l'on observe à l'heure actuelle.

Dans ce cadre, le projet VULCAIN vise à développer une méthode de modélisation intégrée (transdisciplinaire) des impacts des changements climatiques et socio-économiques, sur les hydrosystèmes méditerranéens à moyen (2020-2040) et à long terme (2040-2060). La zone d'étude choisie se situe dans le département des Pyrénées Orientales dans lequel on trouve une grande variété d'hydrosystèmes spécifiques du contexte Méditerranéen et une situation parmi les plus critiques de la région en termes d'adéquation besoins-ressources.

Cet article présente les résultats de la première année de réalisation du projet. Une tendance à l'augmentation des températures de 1,5° a été observée sur les 35 dernières années, en parallèle d'une diminution générale des cumuls mensuels de précipitation (sauf en automne). Des scénarios de climat ont été construits qui montrent que ce réchauffement se prolonge dans le futur, mais que des incertitudes importantes sont associées à la diminution prévue des précipitations futures. Enfin, les caractéristiques physiques du territoire et de sa gestion de l'eau sont présentées et des éléments sur les impacts probables des scénarios climatiques obtenus sont avancés.

Keywords:

Climate change, GCM, downscaling, observed trends, climate scenarios, hydrological and hydrogeological modelling, Mediterranean.

Extended abstract

The Mediterranean region, that includes interconnected hydro-systems in which groundwater is important, is subjected to a contrasted climate and an increasing anthropogenic pressure.

Global warming over Mediterranean region will probably cause more warm and dry summers and less precipitation during warmer winters and shorter rainy seasons. These predictions set out by the last report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC AR4, 2007) are rather different than these released by the previous assessment report (IPCC TAR, 2001), in which more rainfall was predicted during winter. Those changes are likely to have a negative impact on water resources throughout the year and will certainly complicate the current water management strategies mainly oriented to respond to the domestic and agricultural water demand.

In the Languedoc-Roussillon region for instance, the population growth (on a mean range of 1,5% per year) is likely to provoke a substantial increase in demand for water by a rate close to 20% in the next 15 years, when alternatively, the extent of irrigation systems size will be slightly decreasing in the future. In addition, environment-protection policies will be enhanced in the future with the implementation of the European Water Framework directive.

Within this general framework, the VULCAIN project aims to implement of an integrated (transdisciplinary) modelling method to assess the impact of climatic and socio-economic driving forces on the Mediterranean hydro-systems at mean (2020-2040) and longer term (2040-2060).

The study zone is the Pyrénées Orientales department, chosen because it contains on the one hand, specific Mediterranean hydro-systems (coastal multi-layer aquifer, karstic systems with endogenous and exogenous recharge by rainfall and water losses and three river basins controlled by dams), and on the other hand, a socio-economic context that is close to the most critical of the Languedoc-Roussillon region in terms of water demand and available water resources.

This paper presents the first-year results of the VULCAIN project. Non stationarity analyses were performed on temperature and precipitation data series over 35 years (1970-2005). Results show an increase of mean annual temperatures of 1,5° C over the analysed period and a general decrease of monthly precipitation for all seasons, excluding autumn where an increase in both the rainfall events occurrence and intensity was found in November. Climate scenarios were built both from the simulation results of five global circulation models (GCM) (involved in the IPCC-AR4 simulation groups) under the A1B greenhouse gases emission scenario of the IPCC. Those scenarios show a general increase of the mean monthly temperature of 1-2°C for 2020-40 and 1.7-3.3°C for 2040-60. Relatively large differences are found between the different GCM results concerning future monthly precipitation, but a general decreasing trend is found for all seasons notably for 2040-60.

Two main different sorts of systems contain the water resources of the study area: the Agly, Têt and Tech river basins where the water management uses dams and channels essentially for irrigation purposes of around 15 000 ha of cultivated area and the plio-quadernary aquifer of the Roussillon plain exploited for drinking water purposes (60 Mi m³). Both systems are closely linked by hydraulic devices and present a notably strong dependence on dam management strategies. A baseline scenario is in development, to describe the expected evolution of economic activities depending on the water resources and on socio-economic and political drivers of the study area. Predicted climate change scenarios are likely to produce a general runoff, soil water content, aquifer recharge reduction and to complicate the filling of the dams. Consequently, the increasing demand in drinking water linked to the population growth is likely to face important difficulties. The impact of the climate scenarios on the agricultural water management is uncertain, as the different driving socio-economic forces may produce opposed impacts in this sector that could result in a reduction of water demand.

Assuming that climate does not change from present, the baseline scenario will be based on the territory expertise (using participatory protocols and actor meetings) and the evolution of regional socio-economic driving forces. It also will be consistent with assumptions underlying the definition of the SRES scenarios at a global level. Together with the climate scenarios, it will be used to force hydrological/hydrogeological models currently in development. Aiming to develop integrated tools and methods to the operational assessment of the global change impacts, the Vulcain project will permit the evaluation of the future vulnerability of the exploited hydro-systems and of the supplied territory in the Mediterranean context.

1 Introduction

Le changement global peut être défini comme l'ensemble des modifications d'origine naturelle et/ou anthropique du milieu ayant des conséquences à l'échelle planétaire. Son effet sur les ressources et les usages de l'eau va se traduire de manière très différente suivant les territoires considérés. Sur le bassin méditerranéen, les évolutions climatiques et socio-économiques futures sont à la fois, importantes, incertaines et fortement corrélées.

1.1 Évolution du contexte climatique du bassin Méditerranéen

Le bassin Méditerranéen se situe dans la zone de transition entre le climat tropical et le climat tempéré des latitudes moyennes. Sur l'ensemble de la région, les précipitations se concentrent sur les périodes hivernales et les étés sont chauds et secs. Cette dynamique générale est cependant perturbée par des événements de précipitation extrêmes (orages d'été et d'automne), ainsi que des épisodes de sécheresse intense.

Des modifications de ce régime climatique sont mises en évidence sur les 40 dernières années à l'échelle globale. Une tendance à l'augmentation générale des températures, particulièrement importante en été et à une diminution des précipitations est observée sur les régions méditerranéennes (Trenberth et al., 2007). La décroissance des précipitations ne va pas forcément de pair avec une diminution des événements extrêmes, pour lesquels des tendances opposées sont observées suivant les secteurs (augmentations sur les pluies journalières en Italie et Espagne, pas de tendance en Israël et Chypre, tendances variables en fonction de la saison en Grèce, décroissance dans les Balkans,...).

Les résultats des simulations les plus récentes des modèles de climat sont en accord avec la décroissance globale des précipitations observée. Les simulations réalisées pour les scénarios d'émission de gaz à effet de serre les plus pessimistes (A1B et A2), prévoient pour la fin du siècle, des diminutions de l'ordre de 10% à 20% des précipitations moyennes en hiver et de 20% à 30% en été. Cette prévision n'est cependant pas obtenue par tous les modèles en hiver, du fait des incertitudes associées à la modélisation du climat sur les régions méditerranéennes (Meehl et al., 2007). De même, l'incertitude quant à l'évolution future des événements de précipitation extrêmes reste forte (Christensen et al., 2007).

En ce qui concerne les températures, les incertitudes sont bien plus faibles puisque l'ensemble des modèles prédisent une augmentation des températures moyennes de l'ordre de 3° à 4° d'ici la fin du siècle pour les scénarios d'émission les plus pessimistes (A1B et A2), augmentation plus marquée en été qu'en hiver. Ces modèles prédisent de même une aggravation des sécheresses. Les ressources en eau des régions méditerranéennes sont donc susceptibles de subir un déficit important du fait de l'évolution climatique future.

1.2 Caractéristiques des hydrosystèmes du bassin Méditerranéen

Une grande diversité caractérise les hydrosystèmes méditerranéens et la ressource en eau qu'ils contiennent, tant du point de vue de leur taille, que sur le plan de leur morphologie et de leur contexte géologique et hydrogéologique. Ceci génère une importante variabilité des régimes d'écoulement des eaux de surface qui peuvent aussi bien subir des crues rapides et violentes en automne ou au printemps, que des périodes d'étiage sévère. Cette diversité caractérise aussi la ressource en eau souterraine qui est répartie dans des réservoirs très différents. On peut en effet la trouver au sein de roches de socle cristallin ou métamorphique, de formations carbonatées pouvant être affectées par des processus de karstification, de bassins sédimentaires côtiers affectés d'une grande hétérogénéité géométrique et de formations alluviales d'épaisseur variable. Du fait des caractéristiques climatiques auxquelles la région est confrontée, des aménagements hydrauliques (barrages, canaux,...) ont très tôt été construits (Ruf, 2001) de manière à pouvoir contrôler la ressource en eau sur le plan spatial et temporel ou pour aménager/protéger le territoire vis-à-vis des aléas climatiques (crues, sécheresses) et des contraintes agro-environnementales (drainage des secteurs marécageux de bordure littorale, irrigation,...). L'ensemble de ces facteurs rend complexe la compréhension des mécanismes qui contrôlent le fonctionnement des hydrosystèmes et l'évaluation de leur évolution future.

L'importante croissance démographique et l'urbanisation des zones littorales constituent les principaux facteurs de pression sur la ressource en eau des régions méditerranéennes. Une augmentation constante de la population permanente avoisinant les 1,5% par an sur les dix dernières années est par exemple observée en Languedoc-Roussillon (moyenne cachant une très grande hétérogénéité de situations). Cette croissance démographique s'accompagne d'un changement des modes de consommations d'eau : l'habitat individuel se généralise et s'accompagne de l'arrosage intensif des jardins et de la construction de piscines, la demande pour des équipements fortement consommateurs en eau (dont les golfs sont un symbole) augmente, les forages individuels se multiplient en l'absence de véritables moyens de contrôle, etc. Des structures de gestion de l'eau (SAGES ; Contrats de nappe et de rivière, ...) sont petit à petit mises en place pour organiser les usages de la ressource, notamment en diversifiant ses sources d'approvisionnement. Ainsi, si l'évolution socio-économique des territoires risque de se traduire par une augmentation de la demande en eau, il n'est pas aisé de déterminer la manière dont cette augmentation impactera la ressource en eau et ces différents compartiments (surface, souterrain et même marin - l'utilisation de techniques de dessalement étant de plus en plus fréquemment envisagée par les gestionnaires d'eau).

1.3 Changement global et ressource en eau

Dans ce contexte, il convient de s'interroger sur le poids relatif des facteurs de changements climatique et socio-économique sur la ressource en eau et son usage. Faut-il s'inquiéter des conséquences directes du changement climatique sur les ressources en eau alors que les facteurs socio-économiques, à travers la demande en eau, sont susceptibles d'avoir un impact autant ou plus marqué à plus brève échéance ? Quelle est la vulnérabilité des territoires reliés aux hydrosystèmes exploités ou qui dépendent des ouvrages ou des structures de gestion de l'eau existantes ? Quelles stratégies d'adaptation sont possibles face à ces évolutions et comment en évaluer les coûts ?

Le projet de recherche VULCAIN¹, « VULnerability of hydrosystems to combined effect of Climate Changes and human Activities In Mediterranean area », se propose d'aborder ces questions dans le contexte du département des Pyrénées Orientales, qui présente la plupart des caractéristiques spécifiques du contexte méditerranéen. Ce projet, d'une durée de 3 ans, a démarré en 2007 et a d'ores et déjà fourni de précieux enseignements en termes d'évolution du climat et de connaissance des usages de l'eau sur le département des Pyrénées Orientales.

Cet article présente tout d'abord les objectifs généraux du projet et décrit la manière dont il a été organisé pour les atteindre. Dans une deuxième section, les premiers résultats permettant de caractériser les évolutions du climat présent et futur sur la zone d'étude sont présentés. L'évolution des principaux paramètres météorologiques tels qu'ils ont été observés au cours des 40 dernières années dans le secteur des Pyrénées Orientales est analysée, de manière à mettre en évidence l'existence de non-stationnarités des paramètres du climat. Ensuite sont décrits les scénarios d'évolution du climat futur à court et moyen terme, obtenus à partir des simulations des modèles de climat les plus récentes. La troisième section, présente la manière dont les hydrosystèmes et les territoires qui les exploitent sont organisés sur la zone d'étude. La stratégie adoptée dans VULCAIN pour mener à bien le travail de modélisation hydrologique et socio-économique, nécessaire à l'évaluation des impacts est exposée. En conclusion quelques impacts probables sont décrits qualitativement sur la base des résultats obtenus et les contraintes en termes de manque de connaissances sont discutées.

2 Objectifs du projet VULCAIN et caractéristiques de la zone d'étude

2.1 Présentation du projet VULCAIN

VULCAIN vise à mettre au point une méthode de modélisation intégrée (transdisciplinaire) des impacts des changements climatiques et socio-économiques, sur les hydro-systèmes méditerranéens à moyen (2020-2040) et à long terme (2040-2060). En effet, les études d'impact du changement climatique sur les ressources en eau existantes en France (Leblois, 2002 ; Etchevers et al., 2002 ; Ducharme et al., 2003 ; Caballero et al., 2007) ou dans le monde (Allen et al., 2004 ; Anderson et al., 2006 ; Zierl and Bugman, 2005 ; Barnett et al., 2005 ; Booj, 2005 ; Christensen and

¹ Projet n° ANR-06-VULN-08, financé par l'Agence Nationale de la Recherche, dans le cadre de son appel à projet Vulnérabilité : Milieux et Climat - VMC 2006 et labellisé par le pôle « Risques » de PACA et LRO.

Lettenmaier, 2006 ; Dibike and Coulibaly, 2005) ne prennent généralement pas en compte l'effet régulateur des stratégies de gestion de l'eau, qui complique l'analyse des impacts. Ceci est d'autant plus important dans les régions méditerranéennes où des conflits d'usage de la ressource sont déjà visibles. L'étude de l'évolution future de la ressource en eau et de son usage au sein des hydrosystèmes méditerranéens nécessite donc une analyse intégrée des facteurs climatiques et socio-économiques.

La méthode adoptée pour atteindre l'objectif fixé pour le projet VULCAIN consiste à construire en parallèle des scénarios d'évolution future du climat et scénarios d'évolution des activités socio-économiques ayant un impact sur les ressources en eau, puis de les appliquer sur des modèles du fonctionnement hydrologique des bassins versants, intégrant les mécanismes de gestion de l'eau (alimentation en eau potable et agricole ; aménagements hydrauliques). La stratégie de comparaison des impacts des deux types de forçage (climatique et socio-économique) consiste à travailler à deux échelles temporelles distinctes, l'une de moyen terme (2020-2040) et l'autre de long terme (2040-2060). L'utilisation de ces deux échelles temporelles présente l'intérêt de :

- pouvoir comparer les impacts sur les hydrosystèmes d'une modification du climat dans un contexte socio-économique représentatif des tendances actuelles (court terme),
- intégrer des scénarios socio-économiques de rupture, notamment sous l'effet du changement climatique, mais aussi des évolutions structurelles de l'économie mondiale (moyen terme).

La complexité des relations entre les différents facteurs qui influenceront l'évolution des ressources en eau dans le futur pourra de cette manière être approchée, ainsi que les incertitudes qui leur sont associées (Figure 1).

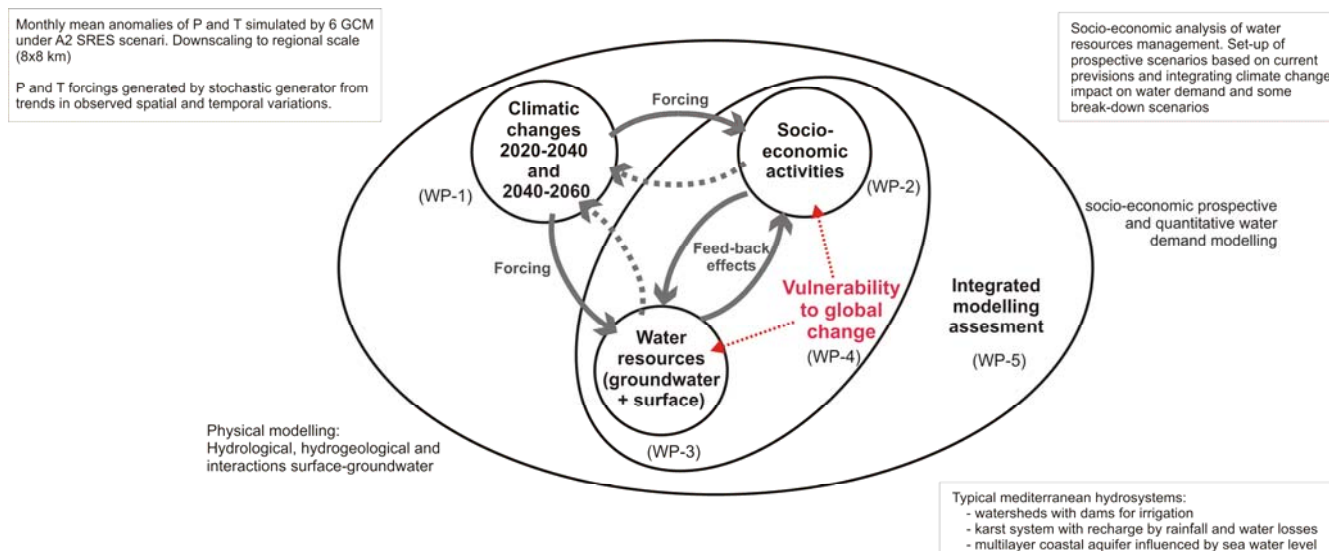


Figure 1 - représentation schématique du projet VULCAIN. Seules les interactions illustrées par les flèches en trait plein seront étudiées - Schematic description of the project and work packages (WP) organization. Only processes represented by solid arrows will be assessed in the VULCAIN project.

L'évolution du climat est examinée d'une part au travers de l'analyse de la stationnarité du climat actuel (présentée dans la section 3), et, d'autre part, sur la base des résultats de simulation de 5 modèles climatiques globaux (MCG) ayant participé aux derniers travaux du GIEC pour la construction de son 4^{ème} rapport² (présentés dans la section 4). L'évolution socio-économique fera l'objet d'une évaluation prospective de la demande en eau, basée sur l'acquisition de données sur la gestion et l'exploitation de la ressource en eau et l'animation d'ateliers participatifs avec des groupes d'acteurs du territoire. La stratégie de modélisation, intégratrice de ces deux grands facteurs d'évolution du niveau des ressources en eau, est présentée dans le paragraphe 2.3.

2.2 La zone d'étude

Le département des Pyrénées Orientales a été choisi comme zone d'étude car il comprend (Figure 2), d'une part, des hydrosystèmes représentatifs du contexte méditerranéen (bassins versants côtiers contrôlés par des barrages, aquifères multi-couches côtiers sédimentaires et alluviaux, systèmes karstiques alimentés par les pluies mais aussi par les eaux de surface (pertes de rivières)) et, d'autre

² Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat – www.ipcc.ch

part, un contexte socio-économique parmi les plus tendus de la région LRO, en termes de demande et de ressource en eau disponible.

D'une superficie totale de 4 200 km², le département des Pyrénées Orientales contient trois bassins versants principaux drainés par, du nord au sud, les cours d'eau de l'Agly, de la Têt et du Tech (Figure 2). Son substratum est essentiellement formé de roches cristallines et métamorphiques anté-cambriennes et primaires qui constituent le socle hercynien des Pyrénées et arment les principaux massifs (Canigou, 2800 m ; Albères, 1250 m ; Agly, 750 m) du secteur central et ouest de la zone d'étude. Ces terrains sont affectés par de grands accidents qui les découpent en plusieurs unités structurales. Sur le secteur nord de la zone d'étude, ils sont recouverts par une couverture d'âge secondaire formée des terrains sédimentaires de la nappe des Corbières, déformés par l'orogénèse alpine et non visibles car érodés plus au sud. L'est littoral du département constitue la plaine du Roussillon, qui est une dépression comblée de dépôts miocènes et pliocènes marins et continentaux disposés en plusieurs niveaux et recouverts par des alluvions quaternaires le long des cours d'eau principaux (Guitard et al., 1998, Berger et al. 1993). L'extrémité sud-ouest du département constitue la région de Cerdagne, plaine d'altitude supérieure à 1000 m dont les écoulements sont drainés vers le sud-ouest en direction de l'Espagne. Ce secteur ne sera pas considéré dans le cadre de Vulcain, essentiellement du fait du caractère transfrontalier de la gestion de l'eau.

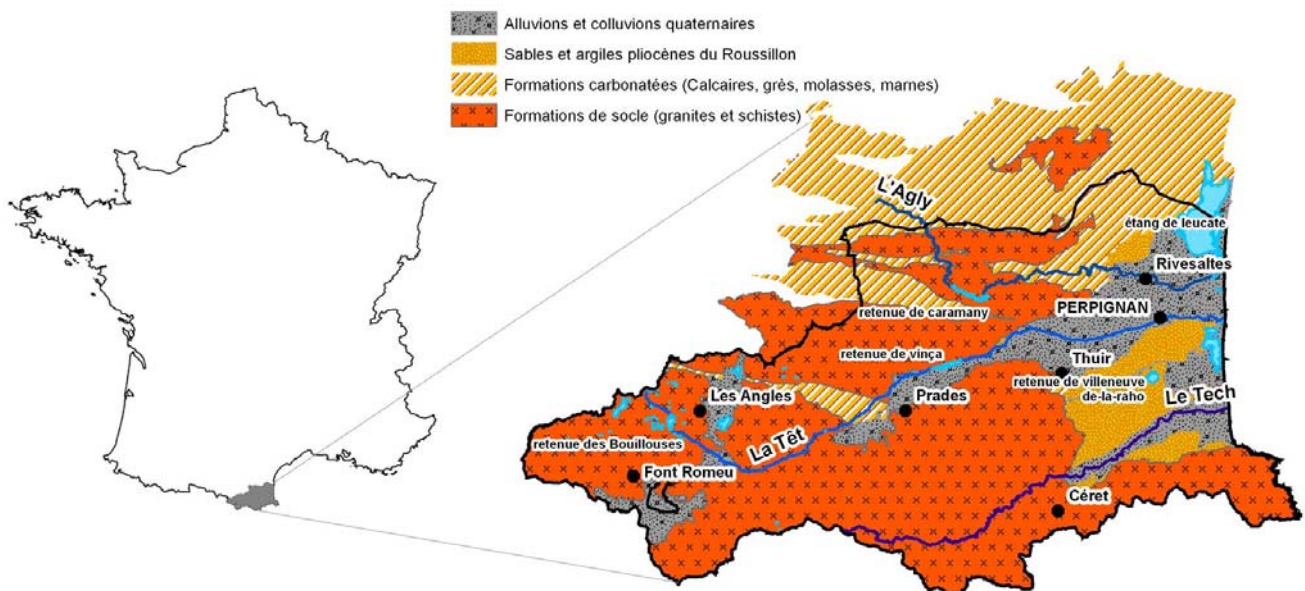


Figure 2 – Localisation de la zone d'étude et contexte géologique et géographique simplifié – Study zone localisation and simplified geological and geographical context illustration.

Les ressources en eau du département peuvent grossièrement être divisées en deux :

- les ressources en eau superficielles drainées par les cours d'eau dans leur partie amont et, pour deux d'entre eux (Agly et Têt), gérées au travers de retenues (Caramany et Vinça respectivement) essentiellement utilisées pour l'écrêtage de crue, l'irrigation et la production d'électricité (Bouillouses) et,
- la ressource en eau souterraine présente dans les aquifères karstiques du système des Corbières pour l'Agly et dans les aquifères de type sédimentaire de la plaine du Roussillon pour la Têt et le Tech. Les relations hydrauliques entre ces deux grands ensembles aquifères existent mais sont mal connues, de même que leurs circulations internes (notamment entre les formations quaternaires et les sables pliocènes de la plaine du Roussillon et au sein de ces derniers, entre les formations marines et les formations continentales).

La gestion de ces ressources vise essentiellement à répondre aux demandes en eau potable et pour l'irrigation, dont le pic se situe durant la période d'été. La stratégie actuelle se caractérise par l'interconnexion des ressources et une forte dépendance vis-à-vis des volumes stockés dans les barrages situés en amont des bassins versants.

2.3 Intégration de la gestion de l'eau dans la modélisation hydro(géo)logique

La stratégie de modélisation adoptée dans Vulcain consiste à délimiter 15 sous-bassins sur les trois bassins versants, au sein desquelles les relations entre écoulements de surface ou niveaux piézométriques, climat et demande en eau seront étudiées (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Cette délimitation s'est faite de manière à disposer sur chaque sous-bassin, d'une part, d'un contexte hydro-climatique et géologique le plus homogène possible et, d'autre part, de la possibilité de décrire le fonctionnement des aménagements hydrauliques existants (canaux et barrages). Les écoulements sur chaque sous-bassin sont contrôlés par une station hydrométrique située à leur exutoire.

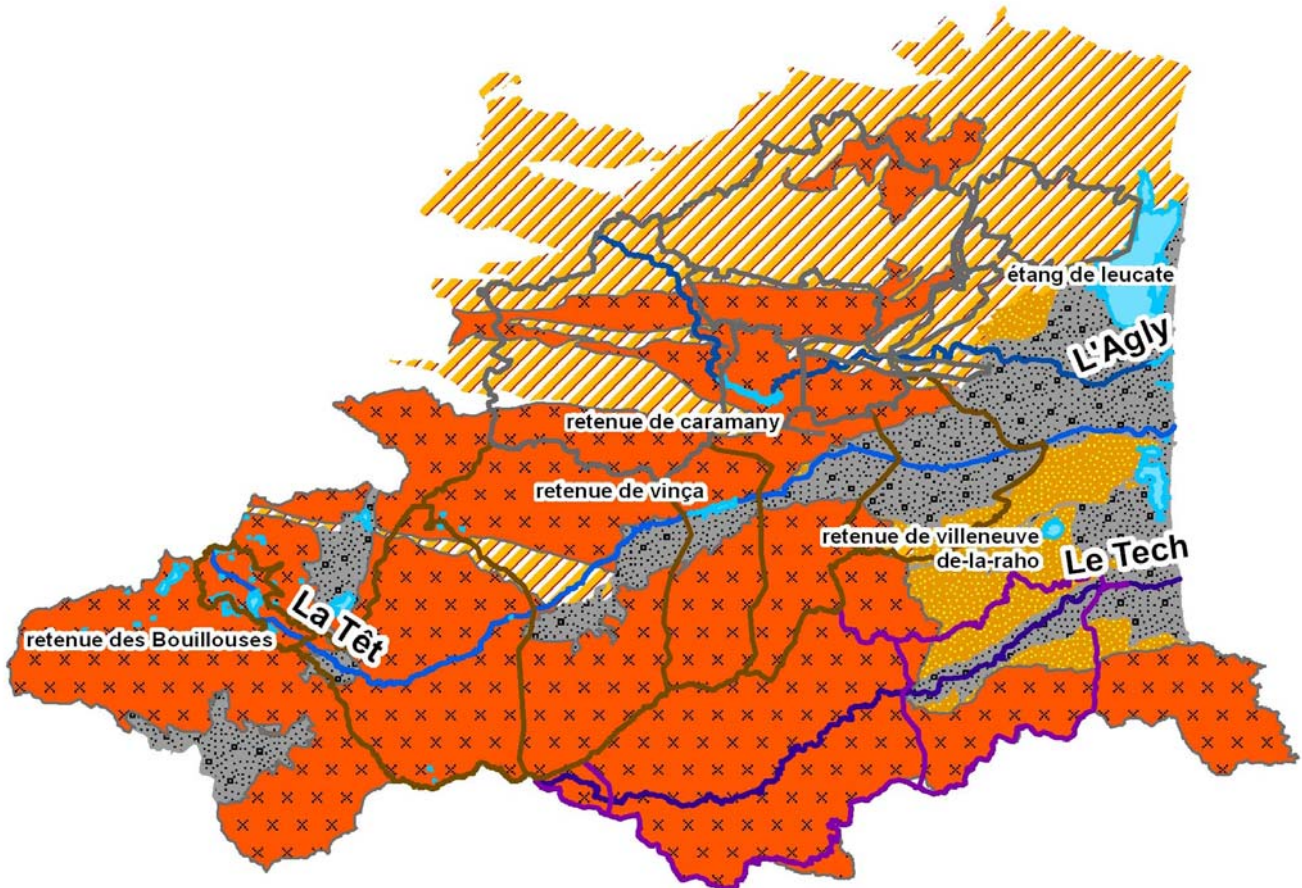


Figure 3 – Sous-bassins délimités sur les trois bassins versants du département (3 sur le Tech, 6 sur le Têt et 6 sur l'Agly) – Sub-basins localisation in the three river basins of the department (3 for the Tech, 6 for the Têt and 6 for the Agly river basins).

En ce qui concerne la plaine du Roussillon et l'aquifère plio-quadernaire, les relations entre climat, prélèvements et ressource en eau souterraine seront étudiées au niveau des différents piézomètres disponibles. En effet, le manque de connaissances, notamment concernant la géométrie des différents réservoirs et surtout la nature détaillée de leurs connexions hydrauliques, ne permettent pas à l'heure actuelle de réaliser un travail de modélisation hydrodynamique à l'échelle de l'ensemble de l'aquifère.

3 Premiers résultats sur l'évolution actuelle et future du climat

3.1 Stationnarité du climat sur les 40 dernières années

3.1.1 Description de la méthode

Différentes variables climatiques ont été examinées sur une zone couvrant le département des Pyrénées Orientales et le secteur sud du département de l'Aude (Chaouche et al. 2008). Les régimes de températures, de précipitations, d'enneigement et d'ETP ont été décrits à partir des valeurs moyennes mensuelles, saisonnières et annuelles sur une période de 36 ans (1970 – 2005). Ce travail a aussi porté sur les valeurs extrêmes, qui ont été échantillonnées sur des échelles de temps variant du mois à l'année. Deux jeux de données ont été utilisés, au pas de temps journalier :

1. des mesures directes au sol, à partir de 30 à 44 stations de mesures gérées par Météo-France et incluses dans la Climathèque sur les deux départements étudiés, soit une densité moyenne de 1 station pour 200 à 300 km².
2. des mesures élaborées, issues de l'analyse SAFRAN (Quintana-Segui et al., 2008) à mésoéchelle utilisant l'ensemble des données météorologiques au sol disponibles dans les bases de données de Météo-France, pour estimer les différentes variables atmosphériques utilisées ici (température, ETP, pluie, neige) sur une grille régulière de 8x8 km couvrant l'ensemble de la zone d'étude (Figure 4).

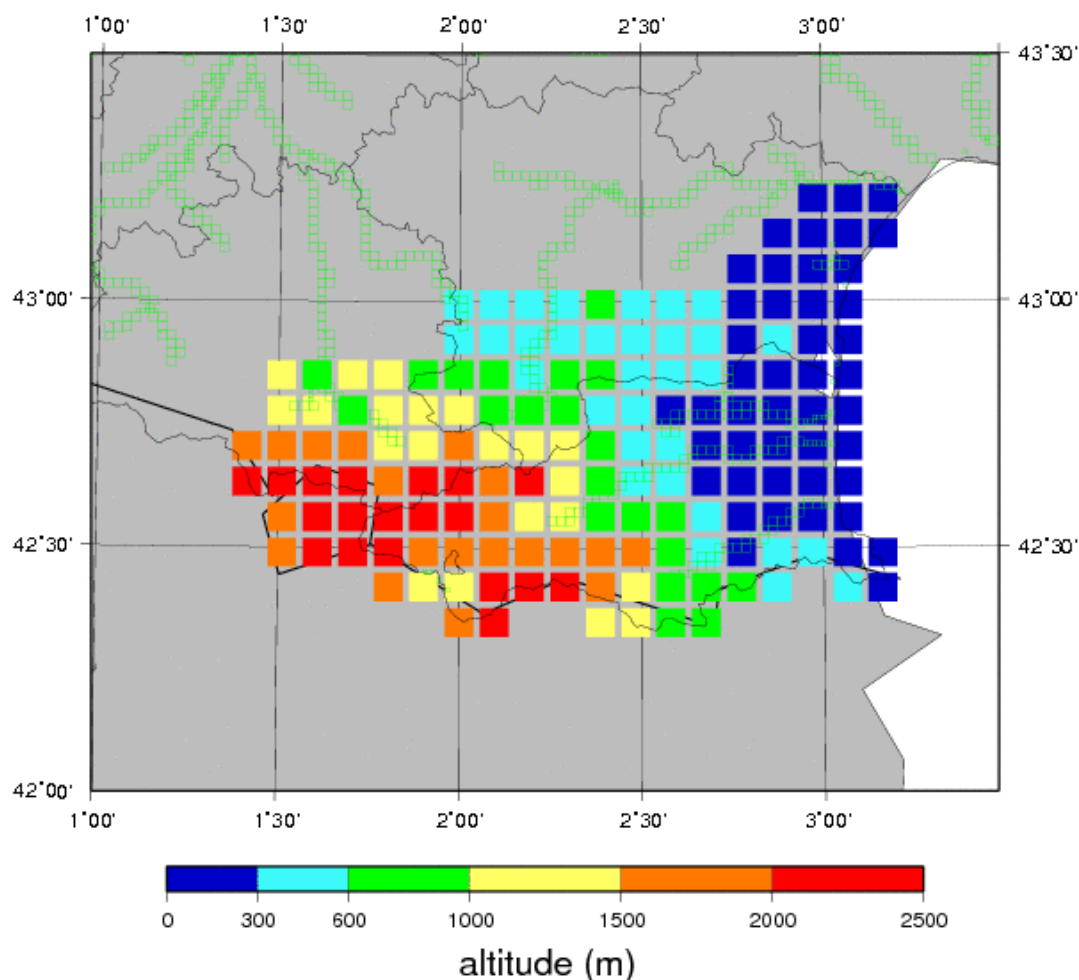


Figure 4 – Couverture SAFRAN (160 mailles de 8x8 km) de la zone d'étude, fournissant des valeurs élaborées de température, précipitation liquides et neigeuses et ETP au pas de temps journalier. – SAFRAN data base (160 cells of 8 km), providing elaborated daily temperature, liquid and solid precipitation and ETP over the study zone.

Sur la zone d'étude, les données élaborées de SAFRAN ont été moyennées sur 13 des 15 sous-bassins définis pour la modélisation. Nous présentons ici les résultats de l'analyse de stationnarité des variables climatiques moyennées sur la surface des bassins versants. Afin de s'affranchir de la saisonnalité présente dans les séries, les variables climatiques retenues sont :

- les maxima et cumuls de précipitations (solides et liquides) et d'ETP journaliers, calculés aux pas de temps annuels, saisonniers et mensuels.
- les températures journalières (c'est à dire la moyenne de la température minimale et de la maximale journalière) moyennées aux pas de temps annuels, saisonniers et mensuels.

Un test de Mann Kendall (Mann, 1945 et Kendall, 1975) est appliqué à chaque variable sur chaque sous-bassin aux seuils de 1%, 5% et 10%. Ce test est non paramétrique et ne présuppose que l'indépendance et l'équidistribution des données, hypothèse plausible dans le cadre d'analyses des maxima ou des cumuls annuels, saisonniers ou même mensuels (puisque les variables sont comparées d'année en année). Il est adapté à la détection de tendances monotones et non à la

détection de ruptures, ce qui le rend adapté au contexte de cette étude, où l'on s'attend plutôt à un changement de type tendanciel et non à des ruptures sur les séries analysées.

La significativité régionale du test est également évaluée. Pour ce faire, la procédure de ré-échantillonnage de Douglas (Douglas et al., 2000) a été choisie car elle a l'avantage de prendre en compte la corrélation entre les différentes stations de mesure utilisées.

3.1.2 Non stationnarités et tendances identifiées

Le Tableau 1 synthétise les résultats aux échelles annuelle, saisonnière et mensuelle des tests de stationnarité et de significativité régionale des variables climatiques sélectionnées, ne présentant que les non stationnarités significatives détectées.

Pas de temps	Annuel	Saisonnier	Mensuel
Pluie cumulée (mm/j)	Stationnaire	NSR Eté : à 5%, 7/13 ; SR = 6% Aut : à 5%, 4/13 ; SR = 6%	NSR Nov : à 5%, 9/13 ; SR = 0.6% Juin : à 5%, 4/13 ; SR = 4%
Pluie maximale (mm/j)	Stationnaire	NSR Eté : à 10%, 4/13 ; SR = 18% Aut : à 10%, 2/13 ; SR = 30%	NSR Nov : à 5%, 9/13 ; SR = 2% Août : à 5%, 2/13 ; SR = 15%
Pluie + Neige cumulée (mm/j)	Stationnaire	NSR Eté : à 5%, 7/13 ; SR = 5% Aut : à 5%, 5/13 ; SR = 2%	NSR Nov à 5%, 11/13 ; SR = 1% Juin : à 5%, 4/13 ; SR = 5%
Pluie + Neige maximale (mm/j)	Stationnaire	NSR Eté : à 10%, 5/13 ; SR = 15% Aut : à 10%, 2/13 ; SR = 25%	NSR Nov : à 5%, 12/13 ; SR = 0.9% Août : à 5%, 2/13 ; SR = 14%
Température moyenne (°C/j)	NSR 13/13 ; SR = 0.1%	NSR Prin : à 5%, 13/13 ; SR = 0.1% Eté : à 5%, 4/13 ; SR = 9%	NSR avr à 5%, 13/13 ; SR = 1% mai à 5%, 11/13 ; SR = 1% juin à 5%, 13/13 ; SR = 0.4% juil, à 5%, 13/13 ; SR = 0.04% sept à 5%, 5/13 ; SR = 5%
Température maximale (°C/j)	NSR 9/13 ; SR = 0.3%	NSR Prin : à 5%, 13/13 ; SR = 0.1% Eté : à 5%, 4/13 ; SR = 4% Hiv : à 5%, 2/13 ; SR = 9%	NSR Janv à 5%, 9/13 ; SR = 1% Mars à 5%, 7/13 ; SR = 1% Avril à 5%, 12/13 ; SR = 0.9% Mai à 5%, 12/13 ; SR = 0.04% Juin, à 5%, 13/13 ; SR = 0.01% Juil, à 5%, 10/13 ; SR = 2% Août : à 5%, 6/13 ; SR = 2%
ETP cumulée (mm/j)	NSR 9/13 ; SR = 1%	NSR Prin : à 5%, 11/13 ; SR = 1% Hiv : à 5%, 10/13 ; SR = 1%	NSR Fev à 5%, 6/13 ; SR = 3% Mar à 5%, 9/13 ; SR = 1% Avr à 5%, 2/13 ; SR = 15% Mai à 5%, 6/13 ; SR = 5% Juin, à 5%, 11/13 ; SR = 2%
ETP maximale (mm/j)	NSR 3/13 ; SR = 8%	NSR Prin : à 5%, 13/13 ; SR = 0.01% Hiv : à 5%, 8/13 ; SR = 1%	NSR Jan à 5%, 9/13 ; SR = 0.3% Mar à 5%, 12/13 ; SR = 0.6% Avr à 5%, 7/13 ; SR = 3% Mai à 5%, 10/13 ; SR = 0.2% Juin, à 5%, 9/13 ; SR = 1%

Tableau 1 - tests de stationnarité et de significativité régionale aux échelles annuelle, saisonnière et mensuelle : 'SR' désigne le niveau de significativité régionale. 'NSR' signifie que l'on accepte l'hypothèse de non stationnarité à l'échelle régionale - Stationnarity detection in annual series in the Languedoc-Roussillon region: 'SR' is the level of regional significance. 'NSR' means that the hypothesis of non stationnarity is accepted.

A l'échelle annuelle, seules les températures et l'ETP présentent des non stationnarités significatives, à la fois sur les maxima et sur les moyennes ou cumuls qui ont tendance à augmenter. Par ajustement linéaire, on chiffre à environ 1.5°C en 35 ans la hausse des températures moyennes annuelles sur la zone étudiée.

A l'échelle saisonnière, deux tendances inverses apparaissent sur les pluies : hausse des maxima et des cumuls automnaux et baisse sur ceux d'été. La prise en compte de la neige (mesurée ici en équivalent eau) renforce la significativité régionale de ces résultats de non stationnarité. Les températures et ETP présentent une tendance significative à la hausse en toutes saisons, mais elle se concentre particulièrement sur les saisons chaudes (été et printemps) pour les températures maximales et moyennes et sur les saisons de printemps et hiver pour les ETP maximales et cumulées. On note une non stationnarité des maxima hivernaux de température, mais elle est moins significative.

L'analyse à l'échelle mensuelle fait apparaître que le cumul de pluie du mois de Juin a tendance à baisser et à augmenter en Novembre (Figure 5). Parallèlement, les valeurs maximales des ces cumuls journaliers présentent une tendance à la baisse au mois d'août et à la hausse au mois de novembre. La tendance du mois de novembre présente une significativité régionale particulièrement forte, qui est encore renforcé lorsque l'on intègre la neige dans les précipitations (Figure 5).

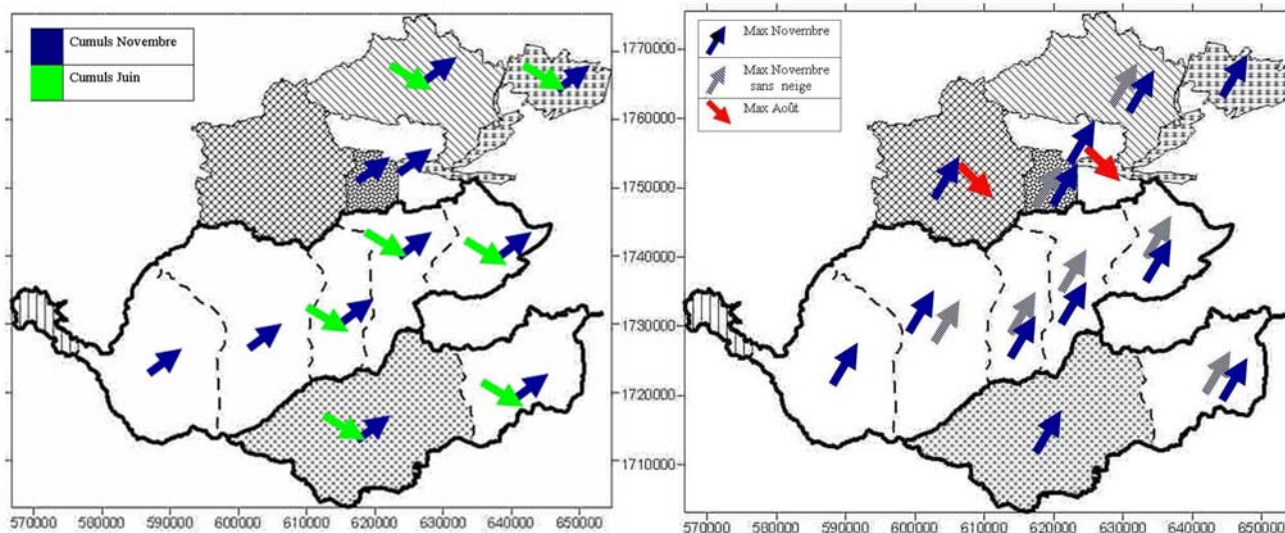


Figure 5 - Cartographie des tendances détectées sur chaque sous-bassin pour les précipitations cumulées de juin et novembre et pour les maxima d'août et de novembre – Trends detected over each sub-basin for the June and November cumulated rainfall et for the August and November maxima values.

Une quantification de la tendance sur les cumuls mensuels du mois de novembre par ajustement linéaire conduit à une hausse de 150% entre 1970 et 2005 (Figure 6).

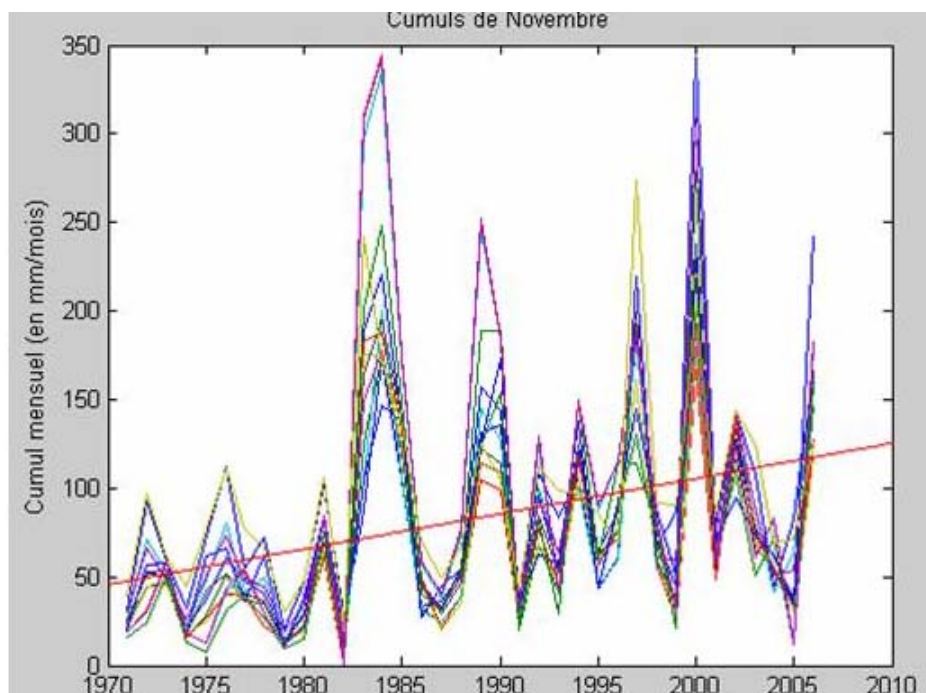


Figure 6 – tendance à la hausse observée sur les cumuls de précipitation mensuels de Novembre – Observed increase trend for the November cumulated precipitation.

Pour les températures (resp. ETP), les non stationnarités significatives sur les maxima se concentrent sur les mois de Mars à Août ainsi que Janvier (resp. les mois de Janvier à Juin) et les non stationnarités significatives sur les moyennes (resp. ETP cumulées) concernent les mois de Mars à Juin et Août (resp. les mois de Février à Juin) (cf. Tableau 1).

L'analyse du nombre de jours 'secs' par mois confirment le résultat précédent (Tableau 2). Est considérée comme journée sèche toute journée dont le cumul de pluie et de neige est inférieur à 0.1 mm. Un échantillonnage annuel est effectué en cumulant le nombre de jours secs par année hydrologique. Un test de Man Kendall est réalisé ensuite pour détecter une éventuelle non stationnarité entre 1971 et 2005.

	an	saison	mois
Nombre de jours 'secs' : Pluie+Neige < 0.1 mm	Stationnaire	NSR Aut : 13/13, SR = 0.8% Prin : 2/13 à 10%, SR = 20%	NSR Mars : 10/13, SR = 1% Nov : 7/13, SR = 2% Dec : 3/13, SR = 10%

Tableau 2 - tests de stationnarité et de significativité régionale sur les périodes sèches, à l'échelle mensuelle : 'SR' désigne le niveau de significativité régionale. 'NSR' signifie que l'on accepte l'hypothèse de non stationnarité à l'échelle régionale - Stationarity detection in monthly drought series in the Languedoc-Roussillon region: 'SR' is the level of regional significance. 'NSR' means that the hypothesis of non stationnarity is accepted.

En appliquant cette méthode aux données moyennées par sous-bassin, on constate une diminution en automne (diminution significative de 45% en Novembre) et une augmentation du nombre de jours secs au printemps (augmentation significative de 25% en mars) (Figure 7). La hausse des cumuls de précipitations mensuelles du mois de Novembre observée sur la Figure 6, semble donc liée à la fois, à la baisse du nombre de jours secs (cf. Tableau 2 et Figure 7), mais aussi à celle de l'intensité des précipitations puisque une tendance à la hausse est détectée sur les précipitations maximales pour ce mois (Tableau 1 et Figure 5).

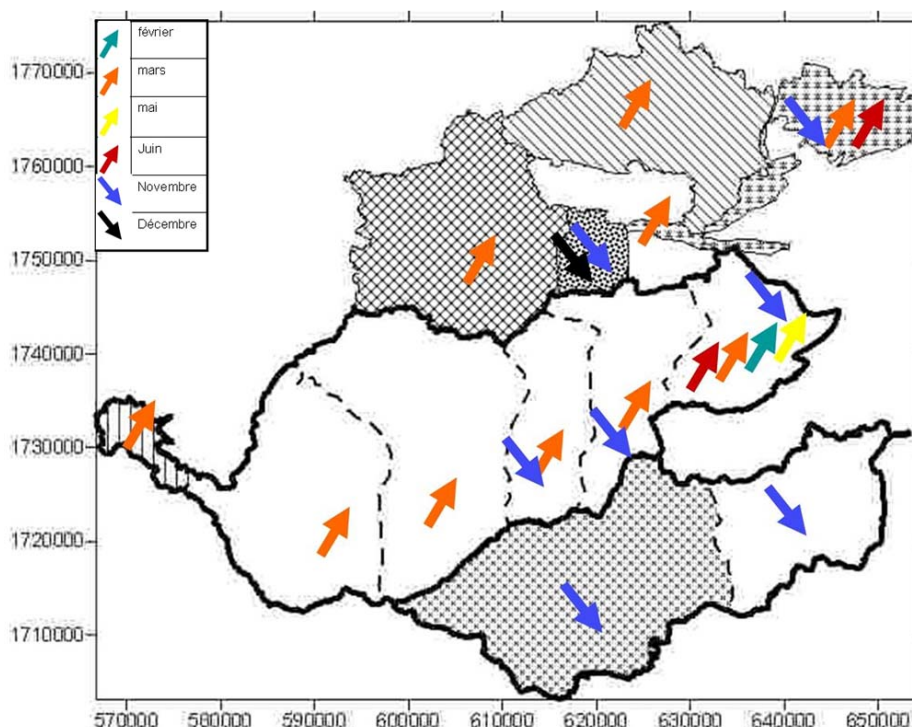


Figure 7 - Cartographie des tendances détectées sur le nombre de jours secs mensuels – Monthly trends detected over each sub-basin for the number of dry days.

Les analyses de stationnarité présentées révèlent une accentuation des extrêmes pluviométriques, avec une hausse en automne (particulièrement en Novembre) et une baisse en été (particulièrement en Août). De même, une baisse des cumuls est détectée sur toutes les saisons sauf l'automne. Ces baisses deviennent significatives sur les mois de Juin et Août, mais une baisse de 40% en 35 ans des cumuls du mois de Mars peut aussi être constatée (lorsque l'on applique le test à la série lissée par interpolation linéaire – Chaouche et al., 2008). La baisse de la pluviométrie de Mars semble due à une

baisse de l'occurrence des événements de précipitation tandis que celle de Juin est à mettre sur le compte d'une baisse de l'intensité des pluies.

Ce bilan contrasté doit être mis en lien avec les mécanismes liés au changement climatique, la région méditerranéenne étant influencée par l'extension des cellules de Hadley vers les pôles, qui décale vers le Nord les zones sèches subtropicales et les place à la limite entre tropiques et moyennes latitudes (Lu et al, 2007). D'après les résultats du Projet GICC-MedWater (2006), l'anticyclone des Açores semble se renforcer et s'étendre sur une zone plus large, provoquant une diminution des pluies sur le bassin méditerranéen. Le gradient méridien de pression sur l'Atlantique du nord est aussi renforcé, tout comme le gradient méridien de température dans les hautes couches de l'atmosphère ce qui a pour effet de décaler vers le Nord de l'Europe les zones de pluie. De plus, l'accélération du cycle de l'eau provoque des non stationnarités marquées aux saisons chaudes et une hausse de la pluviométrie automnale (Gibelin et Déqué, 2003). L'impact de ces non stationnarités sur les ressources en eau et sur sa gestion en région Languedoc Roussillon est donc potentiellement important.

3.2 Scénarios climatiques obtenus pour les périodes 2020-40 et 2040-60 à partir des modèles de climat

Les modèles de circulation générale (MCG) sont les outils que l'on utilise pour prédire l'évolution du climat dans le futur. Pour prendre en compte les incertitudes encore importantes qui sont associées à la manière dont ces modèles décrivent les mécanismes du climat, il est nécessaire d'utiliser les sorties de plusieurs d'entre eux pour alimenter les modèles hydrologiques et hydrogéologiques.

Pour ce faire, le projet VULCAIN s'est appuyé sur des simulations climatiques globales réalisées par 21 modèles dans le cadre de l'exercice d'intercomparaison WCRP/CMIP3 (World Climate Research Programme/Coupled Model Intercomparison Project). Ces simulations ont été analysées par le GIEC pour son quatrième rapport d'évaluation paru fin 2007. Certaines d'entre elles représentent le climat préindustriel, c'est-à-dire non perturbé par les activités anthropiques émettrices de gaz à effet de serre et aérosols (typique du milieu du 19^{ème} siècle). D'autres simulations, pour lesquelles des concentrations atmosphériques observées ou estimées des différents agents de forçage anthropiques ont été utilisées, décrivent l'évolution du climat sur la période 1860-2000. Le principe est le même pour estimer les changements climatiques pendant le 21^{ème} siècle, à l'exception du fait que l'évolution des concentrations des gaz à effet de serre et aérosols n'est pas connue a priori. C'est pourquoi plusieurs scénarios d'émission de ces gaz et aérosols (connus sous le nom de SRES-A1, A2, B1, etc.) ont été produits en suivant diverses hypothèses sur les évolutions socio-économiques, démographiques et agricoles possibles au cours du 21^{ème} siècle. Ces émissions ont été converties en concentrations et ont servi de données d'entrées aux modèles climatiques.

Parmi les 21 modèles de grande échelle formant la base de données CMIP3 (hébergée au PCMDI, Etats-Unis), 5 modèles simulant convenablement le climat de la fin du 20^{ème} siècle (1980-2000) sur la région d'intérêt ont été retenus : CNRM-CM3 (CNRM-GAME, France), HadGEM1 (UKMO, G.B.), IPSL-CM4 (IPSL, France), MPI-ECHAM5 (MPI, Allemagne) et NCAR-CCSM3.0 (NCAR, Etats-Unis). Les données de précipitation et de température de grande échelle (1 à 3,75° de résolution spatiale) ont été extraites à partir de la base de données du PCMDI pour chaque modèle sur le domaine France (8°W-10°E, 40-52°N), pour les périodes 1980-2000 (référence), 2020-2040 et 2040-2060. Le scénario de concentration retenu pour les deux périodes futures est le SRES-A1B, qui représente un scénario « médian » sur la seconde moitié du 21^{ème} siècle mais ne se distingue pas significativement de scénarios « optimistes » comme le SRES-B1 ou « pessimistes » tels que le SRES-A2 sur la période 2020-2060.

A partir des simulations du climat présent et futur, des anomalies mensuelles moyennes de température (T) et de précipitation (P) sur les deux périodes futures ont été calculées de la manière suivante :

$$(1) \quad \delta T = T_{\text{Futur}} - T_{\text{Référence}} \qquad (2) \quad \delta P = \frac{P_{\text{Futur}} - P_{\text{Référence}}}{P_{\text{Référence}}}$$

Ces ensembles d'anomalies, calculées pour les 5 modèles, permettent de rendre compte du changement de climat moyen sur la France entre 2020 et 2060, mais aussi de l'incertitude liée aux différences inter-modèles. Cela permettra d'évaluer ensuite le degré de confiance que l'on peut

attendre des simulations hydrologiques prenant en compte l'évolution des forçages climatiques.

Les anomalies climat futur – climat présent obtenues à partir des modèles de climat ont été appliquées sur les données SAFRAN du temps présent afin de constituer des jeux de forçages météorologiques correspondant aux périodes 2020-2040 et 2040-2060. L'interpolation a été faite en utilisant le logiciel coupleur OASIS (Terray et al., 1998) en mode interpolateur. La méthode d'interpolation choisie est bicubique, ce qui permet d'obtenir une évaluation spatiale lissée des changements de précipitation et de température. La carte géographique du réchauffement de la température moyenne annuelle, déduite des données de stations météorologiques acquises et homogénéisées par Météo-France sur la période 1901-2000 présente des structures régionales peu bruitées, ce qui justifie l'utilisation de ce type d'interpolation.

Les figures 1 et 2 montrent les variations de température et de précipitations pour les deux périodes sélectionnées. Pour 2020-2040, la variation moyenne de température est comprise entre +1 et +2 °C selon les mois (moyenne multimodèle). Elle est plus forte sur la période suivante : entre +1.7 et +3.3°C. Les courbes individuelles pour chaque modèle montrent que l'incertitude est assez importante. Concernant les précipitations, l'incertitude est plus importante mais en moyenne, les scénarios donnent une baisse légère pour la première période d'intérêt, et une baisse plus forte pour la deuxième période.

Les modèles de climat fournissent donc des résultats qui sont cohérents avec les tendances mises en évidence sur le climat présent, notamment pour les températures. Pour les précipitations, l'incertitude sur les résultats des modèles est relativement importante, mais la baisse globale des précipitations cumulées mensuelles détectée sur le climat présent, semble prolongée par les modèles pour le futur.

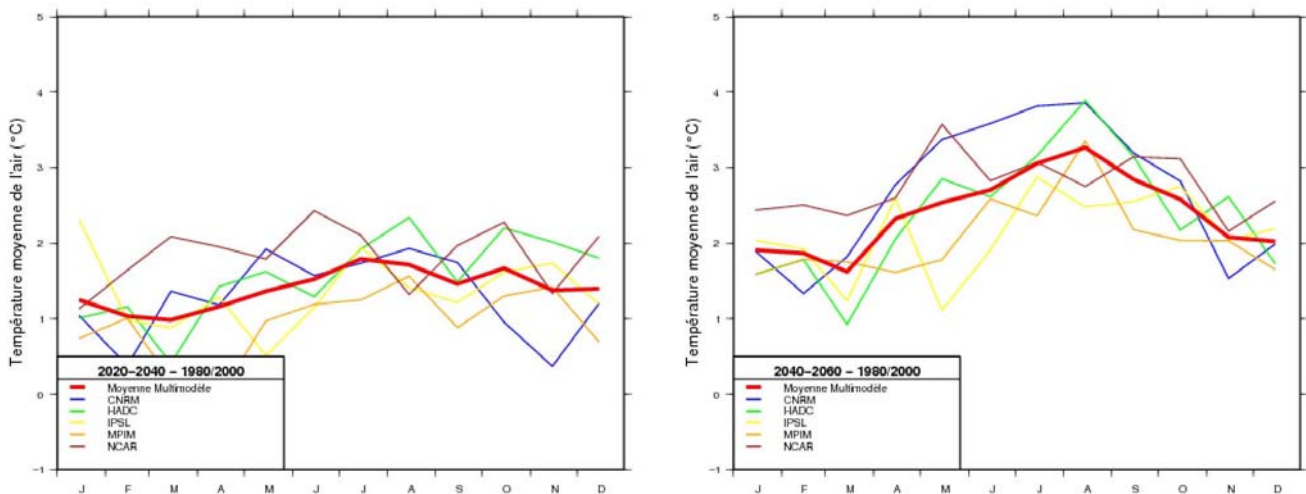


Figure 8 – Anomalies de température moyennes mensuelles en 2020-2040 (gauche) et 2040-2060 (droite) par rapport à la période de référence 1980-2000 (en °C) sur la zone d'étude (cf. Figure 4). Mean monthly anomalies of temperature for 2020-2040 (left) and 2040-2060 (right) in comparison to the reference period 1980-2000 (in °C) over the study zone.

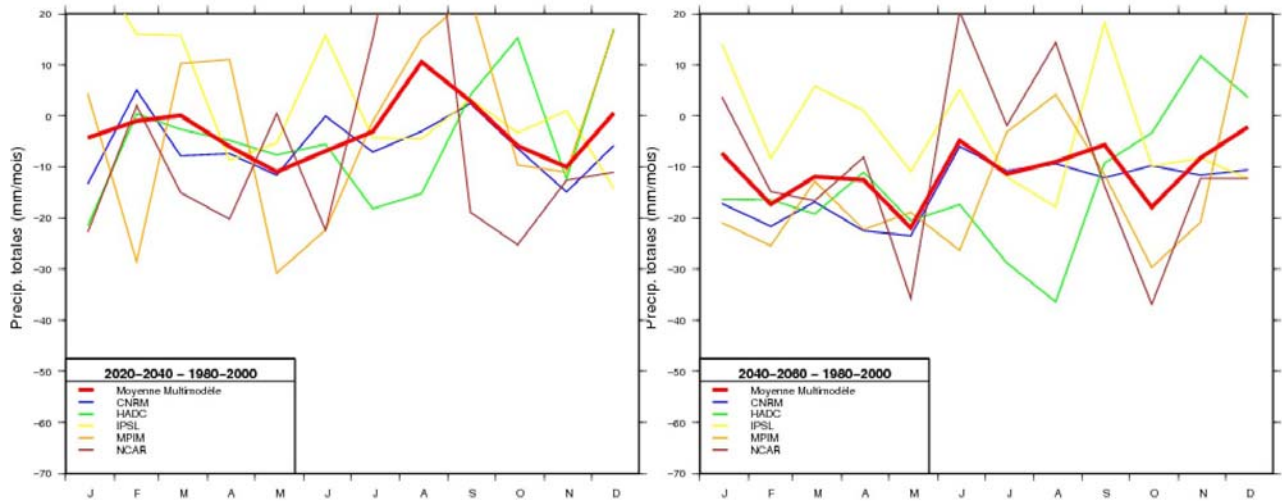


Figure 9 - précipitations cumulées mensuelles en 2020-2040 (gauche) et 2040-2060 (droite) par rapport à la période de référence 1980-2000 (en %) sur la zone d'étude. Mean monthly anomalies of precipitation for 2020-2040 (left) and 2040-2060 (right) in comparison to the reference period 1980-2000 (in %) over the study zone.

4 Premiers résultats sur le domaine socio-économique

L'objectif principal du volet socio-économique du projet consiste à élaborer des scénarios d'évolution des activités humaines pouvant avoir un impact sur l'état quantitatif des ressources en eau (essentiellement en termes de demande en eau) et susceptibles d'en influencer la dynamique future. La construction de ces scénarios fait appel à deux types de démarches :

- la construction d'un modèle permettant de quantifier les besoins en eau actuels et associés à chacun de ces futurs.
- une démarche de prospective participative, visant à imaginer et construire différents futurs possibles avec l'aide des acteurs concernés à l'échelle du territoire

4.1 Éléments sur la demande en eau actuelle

La demande en eau de la zone d'étude dépend essentiellement de la demande en eau potable et de l'irrigation. Les travaux socio-économiques portent donc essentiellement sur ces deux demandes.

4.1.1 L'Alimentation en Eau Potable (AEP)

La population permanente du département est en pleine croissance : proche de 300 000 habitants en 1975, elle est passée à 439 700 habitants en 2007 (calcul établi par l'agence AURCA sur la base des dernières données de recensement disponibles), soit une croissance de plus de 45% en un peu plus de 30 ans. Les projections de l'INSEE et du conseil régional Languedoc Roussillon tablent sur une poursuite de cette croissance à l'horizon 2030, ce qui pourrait porter la population à 540 000 habitants. La population touristique en période estivale atteint environ 450 000 personnes en pointe, ce qui conduit à pratiquement doubler la population du département. Cette population touristique se concentre pour près des trois-quarts sur le littoral ou la frange proche. Parallèlement à la hausse de la population, on assiste à une hausse logique des prélèvements pour l'AEP. Ces prélèvements atteignent aujourd'hui environ 55 à 60 Mm³, alors qu'ils étaient de l'ordre de 38 Mm³ en 1990, ce qui représente une augmentation de l'ordre de 45% sur 15 ans.

Plus de 80% du volume destiné à l'AEP est prélevé dans l'aquifère plio-quatenaire de la plaine du Roussillon. Il s'agit de volumes destinés à pratiquement l'ensemble des communes de la plaine, qui représentent environ 45 Mm³ dont approximativement 2/3 sont exploités dans les formations pliocènes et 1/3 dans les formations quaternaires. Les autres ressources mobilisées correspondent à des prélèvements dans les aquifères de socle, les aquifères karstiques ou dans des nappes alluviales localisées. Ces dernières peuvent localement être réalimentées par des canaux d'irrigation, ce qui rend les systèmes d'exploitation de la ressource pour l'AEP très fortement dépendants de la gestion de ces ouvrages hydro-agricoles sur certains secteurs, comme par exemple celui d'Ille sur Têt.

Bien que fortement corrélés, les prélèvements pour l'AEP ne dépendent pas que de la population. Ils sont aussi fonction des rendements des réseaux d'adduction qui ne sont pas toujours optimisés, des

pratiques des collectivités et de l'évolution du mode d'habitat. A l'échelle du département, on estime que 34% des volumes prélevés ne sont pas facturés (et sont donc perdus) et cette proportion peut-être plus forte sur certains réseaux. La part de l'irrigation des espaces verts à partir du réseau d'eau potable peut représenter jusqu'à 25% de la consommation sur le réseau pour certaines communes.

Une autre source de problèmes pour la gestion de l'AEP prenant de l'ampleur ces dernières années, concerne la dégradation de la qualité de l'eau prélevée. Cette dégradation est essentiellement liée à la pollution agricole diffuse. Elle affecte la plupart des niveaux aquifères des formations du plio-quadernaire, y compris les plus profondes, par le biais de la mise en communication hydraulique des différents niveaux dont sont responsables des forages défectueux ou établis en dehors des règles de l'art.

4.1.2 L'Irrigation

L'irrigation est indispensable pour plusieurs cultures à forte valeur ajoutée sur la zone d'étude. Environ 15% (15 000 ha) de la surface agricole utile (92 000 ha) est irriguée. Cette superficie irriguée concerne pour moitié des vergers (pêcher et abricotier), pour un quart du maraichage et pour 15 % de la prairie (chiffres issus du Recensement Général Agricole 2000). Une volonté de la profession agricole de développer l'irrigation des vignes émerge à l'heure actuelle, bien que celle-ci reste marginale au regard d'autres départements de la région Languedoc-Roussillon. Parallèlement, il faut noter que l'agriculture connaît globalement une forte déprise sur la zone d'étude. Ainsi, en 20 ans, les surfaces de vigne ont diminué d'un tiers et les surfaces de vergers d'un quart.

Les prélèvements pour l'irrigation se font par l'intermédiaire de trois systèmes :

- des réseaux hydro-agricoles ayant une très longue histoire : ce sont des systèmes basés sur une adduction gravitaire constitué d'un réseau de 250 canaux souvent très anciens (environ 11 000 ha irrigués). Ces canaux sont fortement dépendants de la gestion des barrages, qui sont souvent à double fonction (écrêtement de crues, soutien d'étiage). Ils sont essentiellement situés sur les têtes de bassin (canaux de montagne servant à irriguer les prairies), mais aussi en amont et en aval des barrages dans le bassin versant de la Têt et de l'Agly (canal de Perpignan). A l'heure actuelle, le système d'adduction gravitaire (lâchers d'eau des canaux à l'aide de vannes) évolue vers un système de réseaux sous pression qui prélèvent dans les canaux et alimentent des systèmes d'irrigation localisée,
- des réseaux sous pression prélevant directement dans une retenue (Villeneuve de la Raho, au sud de Perpignan),
- des prélèvements dans l'aquifère plio-quadernaire (environ 4 000 ha irrigués) et, plus récemment, dans des formations quadernaires réalimentées par les systèmes de canaux (inclus dans les 11 000 ha cités ci-dessus).

L'évolution de l'agriculture irriguée dans la zone d'étude soulève de nombreuses questions. La profession s'interroge en particulier sur le devenir des canaux anciens qui irriguent le territoire. L'entretien de ces canaux représente un coût très important que les associations d'irrigants ont du mal à supporter malgré les aides communales. On assiste cependant à des innovations institutionnelles : certaines associations d'irrigants se sont lancées dans l'établissement de contrats de canaux qui reconnaissent les différents bénéfices apportés par les canaux à la collectivité (paysage, tourisme, assainissement pluvial, recharge de nappes utilisées par l'AEP).

4.2 Évolution de la demande en eau : la démarche de prospective mise en oeuvre

Les trois questions de prospective auxquelles nous cherchons à répondre sont (Figure 10) :

1. quelle est l'évolution tendancielle des activités consommatrices d'eau à l'horizon 2030, indépendamment du changement climatique ?
2. comment ces activités seront-elles affectées par le changement climatique à l'horizon 2030 ?
3. comment les acteurs peuvent ils réagir à cet impact et comment s'adapter ?

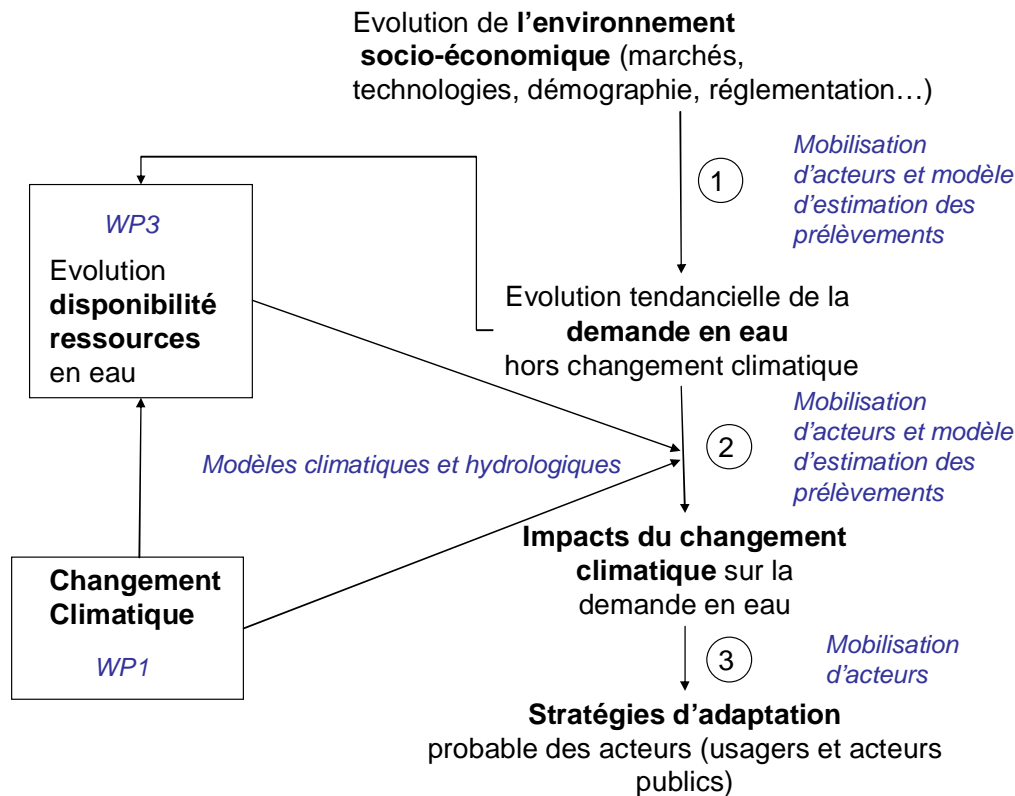


Figure 10 - Place des questions de prospective dans le projet VULCAIN – Prospective schematic organisation in the VULCAIN project.

Pour répondre à la première question, des ateliers sectoriels « eau potable » et « agriculture » de prospective faisant intervenir les acteurs et experts locaux sont organisés. Ils ont pour objectif d'élaborer un scénario tendanciel de la demande en eau sur le territoire. Le principe de ces ateliers est, dans un premier temps, d'identifier les facteurs de changements internes et externes au système étudié et dans un deuxième temps, d'identifier les tendances possibles pour chaque facteur (hypothèses d'évolution) en dissociant les tendances lourdes des avenir engagés ou des germes de changement et de combiner les hypothèses afin de construire des scénarios (Godet, 1997). Pour le secteur agricole par exemple, on cherchera à savoir quelles pourront être les futurs possibles pour les systèmes hydro-agricoles anciens mais aussi quels pourraient être les impacts de différentes situations des marchés agricoles, du développement des agrocarburants dans d'autres régions ou encore de l'urbanisation croissante.

La deuxième question, qui a trait à l'impact du changement climatique sur les activités économiques, sera analysé d'une part sur la base des impacts des scénarios climatiques à l'horizon 2020-2040 sur la ressource en eau et, d'autre part, d'une simulation de l'effet du changement climatique sur la demande en eau agricole. On cherchera par exemple à réfléchir avec les acteurs locaux à la nature des impacts, sur les activités consommatrices d'eau, d'une augmentation de la fréquence des difficultés de remplissage des barrages, d'une baisse des débits d'étiage ou du niveau piézométrique des nappes. La mise en discussion des résultats des différents groupes d'acteurs devrait permettre d'identifier des stratégies d'adaptation possibles : modification de la gestion du patrimoine hydraulique, modernisation des systèmes, politiques visant à modifier les usages, etc.

5 Conclusion

Le projet VULCAIN vise à mettre au point une méthode de modélisation intégrée (transdisciplinaire) des impacts des changements climatiques et socio-économiques, sur les hydro-systèmes méditerranéens à moyen (2020-2040) et à long terme (2040-2060). Sur la zone d'étude choisie, le département des Pyrénées Orientales, des travaux menés sur l'évolution actuelle et future du climat ont permis de mettre en évidence une hausse globale des températures de l'ordre de 1 à 2°C pour 2020-40 et de 1,7 à 3,3°C pour 2040-60, par rapport à la période récente 1980-2000. Ces tendances sont d'ores et déjà visibles, puisque une hausse des températures moyennes de 1,5°C a été détectée entre 1970 et 2005. L'évolution des précipitations apparaît beaucoup plus incertaine au vu de la

grande dispersion des résultats des différents modèles à l'échelle mensuelle. Une tendance générale à la baisse des cumuls moyens mensuels est tout de même pronostiquée, plus sévère à l'horizon 2040-60 que pour 2020-40. Cette incertitude est d'ores et déjà illustrée par les analyses de stationnarité conduites sur le climat présent, dont les principaux résultats indiquent une baisse généralisée des cumuls de précipitation sur l'année (en particulier en été), mais aussi une hausse de ces cumuls en automne (en particulier en novembre) liée à une augmentation de l'occurrence des événements pluvieux et à leur intensité.

La stratégie de modélisation des hydrosystèmes choisie pour VULCAIN permet de disposer, sur les 15 sous-bassins délimités sur la zone d'étude, d'une part, d'une prise en compte des contextes hydro-climatique et géologique la plus homogène possible et, d'autre part, de la possibilité de décrire le fonctionnement des aménagements hydrauliques existants (canaux et barrages), composants essentiels de la gestion de l'eau pour l'alimentation en eau potable et pour l'irrigation. Les travaux de modélisation des hydrosystèmes sont actuellement en cours et fourniront leurs premiers résultats rapidement.

Les connaissances acquises à ce stade permettent cependant de faire les constats suivants: les scénarios de climat envisagés conduiront probablement à réduire, sur l'ensemble de l'année, les écoulements de surface, la disponibilité de l'eau dans le sol et la recharge des aquifères, du fait du déficit pluviométrique et de l'augmentation de l'évapotranspiration prévus. En particulier, ceci risque de rendre plus aléatoire la possibilité d'un remplissage des retenues qui permette de répondre à la temporalité des usages sur le territoire de l'eau stockée. Des difficultés importantes risquent donc de se poser pour l'alimentation en eau potable, notamment si la croissance démographique se maintient au rythme actuel. La sensibilisation des populations, la mise en place d'équipements faiblement consommateurs d'eau, la capacité de stockage des différentes retenues du département seront autant de leviers qui permettront peut-être de limiter cet impact au moins à moyen terme. La situation risque d'être plus incertaine en ce qui concerne l'irrigation, dont les besoins en prélèvements de surface pour l'alimentation des canaux déboucheront probablement sur des conflits d'usage, si les stratégies actuelles de gestion sont maintenues. Cette incertitude est fortement liée aux évolutions socio-économiques dans ce secteur, qui risquent d'être importantes dans les prochaines années, si l'on en juge par l'émergence des structures de gestion concertée de l'usage des canaux (contrats de canaux), le renforcement des actions de préservation de l'environnement et de leur encadrement institutionnel (Directive Cadre Européenne sur l'Eau), mais aussi du fait du remplacement progressif des systèmes gravitaires par des systèmes sous-pression.

Cette analyse sommaire montre la nécessité d'une approche intégrée de l'ensemble des facteurs qui participent des usages de la ressource en eau. La prise en compte des ouvrages de gestion de l'eau dans les modèles, ainsi que la mise en place d'outils de calcul de la demande en eau potable et agricole intégrant les facteurs d'évolution socio-économique, constituent les moyens choisis dans VULCAIN pour caractériser les impacts du changement global sur la ressource en eau, en déterminant, dans la mesure du possible, les incertitudes associées à chaque facteur de changement.

6 Remerciements

Nous remercions le « modelling groups », le « Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison (PCMDI) » et le groupe de travail du WCRP sur la modélisation couplée (WGCM) pour leur rôle dans la mise à disposition du jeu de données multimodèle WCRP CMIP3. Le maintien de cette base de données est assuré par « the Office of Science, U.S. Department of Energy »

7 Bibliographie

Allen, D.M., D. C. Mackie and M. Wei. (2004), Groundwater and climate change: a sensitivity analysis for the Grand Forks aquifer, southern British Columbia, Canada, *Hydrogeol.J.*, 13(3), 270-290.

Andersson, L., Wilk, J., Todd, M.C., Hughes, D.A., Earle, A., Kniveton, D., Layberry, R., Savenije, H.H.G., (2006): Impact of climate change and development scenarios on flow patterns in the Okavango River. *J. of Hydrol.*, 331, 43– 57.

Barnett, T.P., Adam, J.C., Lettenmaier, D.P., (2005): Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438, doi:10.1038/nature04141.

Berger, G., Fontailles, M., Leblanc, D., Clauzon, G., Marchal, J.P, Vautrelle, C., (1993) : Notice explicative de la feuille Rivesaltes à 1/50 000^{ème}. BRGM.

Booij, M.J., (2005), Impact of climate change on river flooding assessed with different spatial model resolutions, *Journal of Hydrology*, 303(1-4), 176-198.

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

Chaouche, K., Neppel, L., Dieulin, C. Pujol, N., Caballero, Y., Ladouche, B., Martin, E., Salas-Melia, D. (2008): Non-stationarity detection on daily rainfall and temperatures extreme series in the Mediterranean region (soumis).

Christensen, N., Lettenmaier, D.P., (2006): A multimodel ensemble approach to assessment of climate change impacts on the hydrology and water resources of the Colorado River basin. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 3, 1–44.

Christensen, J.H., B. Hewitson, A. Busuioc, A. Chen, X. Gao, I. Held, R. Jones, R.K. Kolli, W.-T. Kwon, R. Laprise, V. Magaña Rueda, L. Mearns, C.G. Menéndez, J. Räisänen, A. Rinke, A. Sarr and P. Whetton, (2007), Regional Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Dibike, Y.B., Coulibaly, P., (2005): Hydrologic impact of climate change in the Saguenay watershed: comparison of downscaling methods and hydrologic models. *J. of Hydrol.*, 307, 145–163.

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.

Douglas E.M., Vogel R.M., Kroll C.N., 2000. Trends in flood and low flows in the United States: Impact of spatial correlation. *Journal of Hydrology* 240, 90-105.

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)

GICC-MedWATER (2006) : http://web.lmd.jussieu.fr/~li/gicc_medwater/index.html

Godet, M. (1997), *Manuel de prospective stratégique*, Dunod, Paris

Guitard, G., Laumonier, B., Autran, A., Bandet, Y., Berger, G.M., (1998) : Notice explicative de la feuille Prades à 1/50 000^{ème}. BRGM.

IPCC-AR4 (2007) : <http://www.ipcc.ch/ipccreports/assessments-reports.htm>

IPCC-TAR (2001) : <http://www.ipcc.ch/ipccreports/assessments-reports.htm>

Kendall M., 1975 : *Rank correlation methods*. London.

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

Lu J., Vecchi G.A. And Reichler T. (2007) : Expansion of the Hadley cell under global warming. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L06805, doi : 10.1029/2006GL028443.

Mann H., 1945 : *Non Parametric Tests Against Trend*. *Econometrica*, 13: 245-259.

Meehl, G.A., T.F. Stocker, W.D. Collins, P. Friedlingstein, A.T. Gaye, J.M. Gregory, A. Kitoh, R. Knutti, J.M. Murphy, A. Noda, S.C.B. Raper, I.G. Watterson, A.J. Weaver and Z.-C. Zhao (2007), Global Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Neppel L., 1997 : *Étude du risque pluvial en région Languedoc-Roussillon : caractérisation de l'aléa climatique*. Thèse de doctorat, Université Montpellier II, 272p.

Quintana-Seguí, P., P. Le Moigne, Y. Durand, E. Martin, F. Habets, M. Baillon, C. Canellas, L. Franchisteguy, and S. Morel (2008) : Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables: Validation of the SAFRAN Analysis over France. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 47, 92-107.

Ruf, T. (2001): Droits d'eau et institutions communautaires dans les Pyrénées Orientales. Les tenanciers des canaux de Prades (XIV^{ème}-X^{ème} siècle). *Histoires et sociétés rurales*. 16(2), 11-44.

Terray L., Valcke S., Piacentini A. (1998) OASIS 2.2 User's Guide and Reference Manual, TR/CMGC/98-05 [Available from CERFACS, 42 ave. G. Coriolis, 31057 Toulouse, France.]

Trenberth, K.E., P.D. Jones, P. Ambenje, R. Bojariu, D. Easterling, A. Klein Tank, D. Parker, F. Rahimzadeh, J.A. Renwick, M. Rusticucci, B. Soden and P. Zhai, (2007), Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Zierl, B. and H. Bugmann. (2005), Global change impacts on hydrological processes in Alpine catchments, *Water Resour. Res.*, 41, W02028, doi:10.1029/2004WR003447,