

Les Pyrénées orientales face aux changements globaux: comparaison des effets des changements climatique et anthropique sur les besoins en eau

Isabelle TERRASSON¹, Sébastien CHAZOT¹, Laure MATON², Jean-Daniel RINAUDO³, Yvan CABALLERO³

¹ BRLingénierie - e-mails: isabelle.terrasson@brl.fr; sebastien.chazot@brl.fr

² BRGM - e-mail: jd.rinaudo@brgm.fr; y.caballero@brgm.fr

³ Syndicat Mixte du Bassin de Thau - e-mail: lmaton@smbt.fr

RÉSUMÉ. – Dans les Pyrénées Orientales, la tendance à la décroissance du débit d'étiage des rivières observée au cours des dernières décennies devrait se poursuivre à l'avenir, pouvant accentuer les stress hydriques sur les milieux aquatiques et la compétition entre usages et usagers pour l'accès aux ressources.

Le projet de recherche ANR-VULCAIN a comparé les impacts des changements climatique et socio-économique sur les hydrosystèmes du territoire des Pyrénées Orientales. Un couplage de méthodes de prospective participative et de modélisation ont été utilisés pour quantifier l'évolution des prélèvements en eau sous l'effet de ces changements. Des scénarios socio-économiques ont été construits avec les acteurs du territoire, lors de séances thématiques de travail en groupe (urbanisme et aménagement du territoire d'une part et agriculture d'autre part), dont les résultats ont été quantifiés à l'aide de modèles pour en estimer les effets des changements anthropiques sur les prélèvements domestiques et agricoles. En parallèle, des scénarios climatiques ont été utilisés dans le même modèle agricole afin d'estimer les possibles impacts des changements climatiques sur les besoins agricoles.

Dans les scénarios envisagés, l'évolution des besoins nets en irrigation sous l'effet des changements anthropiques a une amplitude plus grande que l'évolution des prélèvements pour l'eau potable ou les évolutions des besoins nets en irrigation sous l'effet du changement climatique qui sont du même ordre de grandeur. Des marges de manœuvre existent pour satisfaire l'augmentation de ces besoins, en révisant les modes de distribution actuels pour les rendre plus efficaces, en optimisant l'utilisation des capacités de stockage, ou en utilisant des ressources de substitution.

Cet article présente l'approche utilisée, ainsi que quelques-uns des principaux résultats.

Mots-clés : changement climatique, prospective, scénarios, prélèvements en eau

Western Pyrenees facing global change: comparison of the effects of climatic and anthropogenic change on water abstractions

ABSTRACT. – In the French Western Pyrenees, the trend to the decrease of low water flows that has been observed during the current years should be going on in the future. This may increase the hydric stress on aquatic ecosystems, and the competition among water uses and users for accessing water resources.

The research project ANR-VULCAIN compared the impacts of climatic and socio-economic change on the hydro-systems of the French Western Pyrenees. Modeling and participative prospect analysis have been coupled to quantify the evolution of water abstractions under these two types of change. Socio-economic scenarios have been built together with local stakeholders during workshops (urbanism / land planning on the one hand and agriculture on the other hand). Their results have been quantified with the models developed so as to assess anthropogenic change impacts on domestic and agricultural abstractions. In parallel, the agricultural model has been fed with climatic scenarios so as to assess the impacts of climate change on agricultural water needs.

In the created scenarios, the evolution of agricultural water needs under climate change have a bigger range than the evolution of abstractions for domestic water and agricultural needs under anthropic change, which are the same order of magnitude. To satisfy this evolution, there are some rooms to maneuver: make distribution modalities more efficient, optimize the management of storage capacity, or use substitution resources.

This paper presents the approach that has been followed, and some of the main results.

Key-words: climate change, prospect analysis, scenarios, water abstractions

I. INTRODUCTION

La tendance à la décroissance du débit d'étiage des rivières observée au cours des dernières décennies [Giuntoli et Renard, 2010] peut, entre autres, être liée à des changements climatiques, à une modification des états de surface d'un bassin versant ou à l'augmentation des prélèvements. La

diminution des débits des fleuves côtiers méditerranéens est relativement marquée depuis 1965 - elle peut atteindre -30 % [Lepinas, 2008, Giuntoli et Renard, 2010], avec une intensification des périodes d'étiage. Cette évolution est essentiellement liée à des augmentations de température [Renard, 2006 ; Lepinas, 2008 ; Martin et Salas y Melia 2008 ; Caballero *et al.* 2008], mais des diminutions de précipitations

printanières et estivales ont également été mises en évidence dans les Pyrénées Orientales [Chaouche, 2010].

La plupart des rivières Européennes, en particulier dans le sud, pourraient à l'avenir être confrontées à des stress hydriques et à une compétition accrue des usages pour l'accès aux ressources [Feyen et Dankers, 2009]. Dans les Pyrénées Orientales, les prévisions du projet de recherche ANR-VULCAIN, portant sur l'impact des changements globaux (climatique et socio-économique) sur les hydrosystèmes du territoire des Pyrénées Orientales, indiquent pour la période 2040-2060 une continuation des tendances à la hausse des températures et de l'évapotranspiration potentielle (ETP), et à la baisse des précipitations, donnant lieu à des baisses de -20 à -80 % des débits selon les mois et les bassins [Caballero *et al.*, 2008].

Or les prélèvements eux-mêmes sont soumis à une évolution sous l'effet des changements climatiques d'une part et socio-économiques d'autre part. L'estimation de cette évolution est nécessaire pour mieux quantifier l'impact de la dynamique des changements globaux sur les ressources en eau et anticiper les situations de compétition entre usagers. Pour cela, des modèles de prélèvement en eau ont été couplés avec des scénarios élaborés lors d'ateliers de prospective afin de quantifier l'évolution possible des prélèvements. Cet article présente la méthodologie retenue pour l'analyse rétro-prospective des prélèvements en eau dans les Pyrénées Orientales, réalisée dans le cadre du projet VULCAIN [Caballero *et al.*, 2008], ainsi que quelques-uns des principaux résultats.

II. CADRE D'ANALYSE

La zone d'étude se situe dans le bassin méditerranéen qui est une des régions les plus vulnérables aux impacts annoncés du changement climatique [Giorgi 2008; Magnan, A. *et al.*,

2009]. Elle s'étend sur les bassins versants des fleuves Têt, Tech et Agly et les territoires situés entre ces bassins et la mer, soit approximativement les territoires concernés par l'aquifère multicouches plio-quaternaire et le karst des Corbières. Elle coïncide approximativement avec le département des Pyrénées-Orientales, un territoire d'environ 4 200 km² à l'extrémité ouest de la côte méditerranéenne française.

La plupart des prélèvements en eau du territoire sont à destination de l'agriculture (près de 90 %) et des réseaux d'alimentation en eau potable (AEP) (un peu plus de 10 %). D'autres prélèvements spécifiques à destination de l'industrie et de la production de neige de culture existent mais sont de moindre importance.

III. PRÉLÈVEMENTS POUR L'EAU POTABLE

III.1. Vision rétrospective des prélèvements à destination de l'eau potable

Pour mettre en parallèle les usages de l'eau et la population, la zone d'étude a été découpée en unités de distribution (UDI) qui sont les plus petits groupes de communes interconnectées et indépendantes du point de vue des prélèvements et distributions d'eau. Chaque UDI est alimentée entièrement et de manière autonome par un groupe de prélèvements. Ce découpage permet d'attribuer à chaque UDI a) une population, b) un prélèvement à partir des données de l'AERMC, c) une consommation en eau à partir des informations des services d'eau. Pour les communes de l'arrière-pays, souvent autonomes, un regroupement a été réalisé, qui représente 43 400 habitants soit 10 % de la population du département. Par souci de lisibilité, ces UDI ont été regroupées en zones d'analyse, comme indiqué sur la Figure 1. Les prélèvements sont estimés à partir des données du BRGM entre 1975 et 1985, puis avec les données

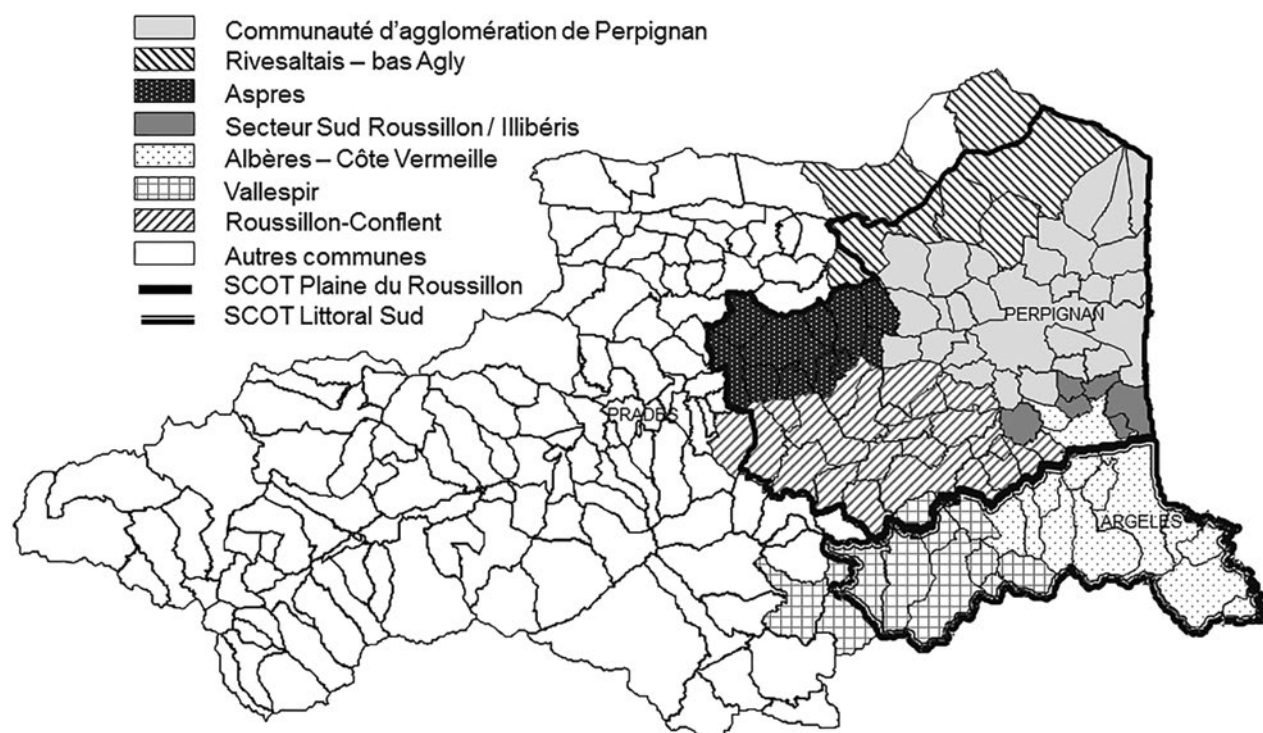


Figure 1 : Carte du découpage du territoire d'étude.

de l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée Corse ajustées à partir de compléments de la DRASS et des exploitants. Des études « volumes prélevables » ont été réalisées depuis sur les principaux bassins versants, qui ont repris les données du projet Vulcain et les ont actualisées.

III.1.1. Des prélèvements pour l'eau domestique qui ont augmenté et se sont concentrés sur le littoral

Le département est caractérisé par une évolution de la démographie méditerranéenne typique, avec une concentration de la population autour du pôle d'attraction économique de l'agglomération de Perpignan, une explosion de la population estivale sur le littoral, et un dépeuplement des zones rurales de l'arrière-pays. Entre 1954 et 2007, la population du département est passée de 230 000 à 440 000 habitants (INSEE), soit une croissance de +90 %. La population du littoral, correspondant aux territoires des Schémas de COhérence Territoriale (SCOT) de la Plaine du Roussillon et du Littoral Sud, ne cesse de croître pour atteindre aujourd'hui 88 % de celle de la zone d'étude, contre 65 % en 1980 et 80 % en 1954. La population touristique du département en période estivale dépasse 450 000 personnes le jour de pointe et conduit pratiquement à un doublement de la population du département. Elle équivaut à une population lissée sur l'année de 90 000 personnes environ et se concentre pour près des trois-quarts sur la frange proche du littoral [Comité départemental de Tourisme, 2007]. Le pic de prélèvement estival est ainsi très marqué, et on observe un coefficient de pointe de 1,4 entre le mois de juillet et la moyenne mensuelle des prélèvements.

Depuis les premières informations des années 70, les prélèvements en eau ont également connu une hausse marquée. Les prélèvements du département ont doublé entre 1975 et les années 2000 (représenté sur la Figure 2). Pourtant, au cours de cette période, la population départementale a augmenté d'environ 40 %. Dans le même temps, les prélèvements dans la nappe du plio-quaternaire ont plus que triplé, pour une population de la Plaine (alimentée essentiellement par les eaux de la nappe et également principale destinataire) qui a augmenté de près de 50 %. Néanmoins, on note un tassement des prélèvements en 2006 et 2007, notamment dû aux efforts d'amélioration des rendements de réseau dans les zones les plus urbanisées de la plaine littorale.

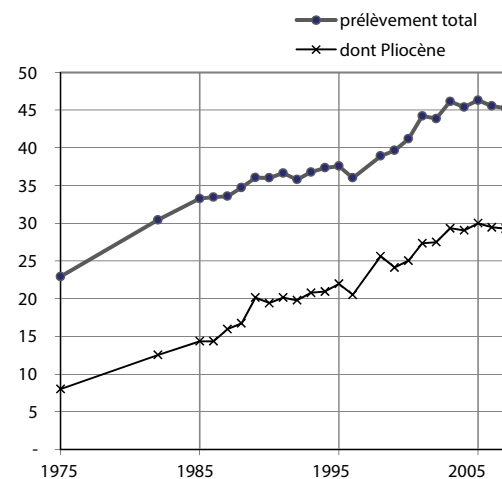


Figure 2 : Évolution des prélèvements dans la nappe plio-quaternaire des Pyrénées Orientales.

III.1.2. Prélèvements actuels pour l'eau potable

Les prélèvements bruts en eau potable ont été estimés à 52 Mm³ en 2007 sur la zone d'étude. Sur la zone d'étude, 83 % des prélèvements à destination de l'alimentation en eau potable proviennent de l'aquifère plio-quaternaire (Figure 3). Le complément provient des prélèvements de surface (principalement dans le Tech) à hauteur de 6 % et d'autres ressources souterraines profondes. Les volumes non facturés s'élèvent à environ 22 Mm³ (moyenne 2004 à 2007). Le rendement primaire, rapport moyen sur la période 2004 à 2007 entre volumes facturés et volumes prélevés, s'élève à 59 % mais demeure très variable.

III.2. Projections des prélèvements à destination de l'eau potable à l'horizon 2030

Le mode de calcul des prélèvements futurs est réalisé de la même manière que pour les prélèvements actuels. Le ratio de consommation et les rendements primaires considérés par défaut sont ceux de 2007.

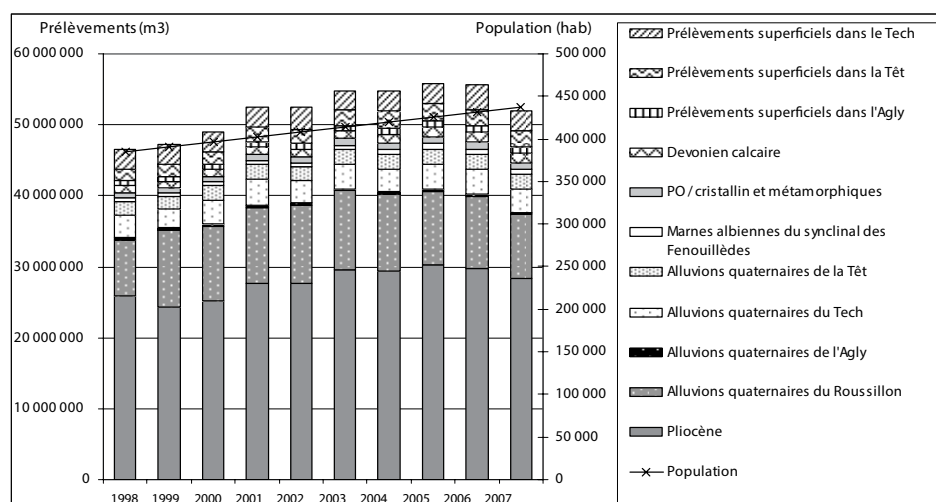


Figure 3 : Évolution de la population et des prélèvements annuels par ressource entre 1998 et 2007, sur la zone d'étude.

$$P = \mu \times p \times R$$

où P est le prélèvement, μ le rendement primaire du réseau, p la population, et R le ratio de consommation par habitant.

Des scénarios d'évolution socio-économiques ont été élaborés à partir d'une démarche prospective participative. La méthode des scénarios a été retenue [Godet, 2007] : elle consiste à décrire plusieurs cheminements logiques d'une situation actuelle vers des futurs imaginés. Un découpage en 3 étapes a été retenu : a) l'analyse structurelle, visant à identifier les *facteurs de changement*, variables ayant entraîné des changements territoriaux par le passé ou susceptibles d'être moteur de changement à l'avenir ; b) le diagnostic prospectif partagé, consistant à faire des hypothèses d'évolution sur les facteurs de changement ; c) la prospective exploratoire visant à construire un nombre limité de scénarios contrastés en combinant les évolutions des facteurs de changement, et en s'assurant de la cohérence des hypothèses combinées. Des acteurs du territoire en lien avec l'approvisionnement en eau domestique et l'aménagement du territoire (services d'eau, collectivités, comité départemental de tourisme, ...) ont été invités à participer à 2 ateliers de prospective. Le premier était centré sur l'étape a), tandis que le second regroupait les étapes b) et c). Entre les deux, un travail d'ordonnement du matériau d'atelier, d'analyse quantifiée des facteurs de changement, et de veille sur les tendances, a été effectué et proposé aux acteurs dans une série de fiches pour étayer leur réflexion. A la fin des ateliers, 3 scénarios contrastés ont été retenus, permettant de moduler les paramètres de calcul des prélèvements en eau :

— Un scénario de « passivité politique impliquant une perte de vitesse du territoire » : face à la passivité de l'action publique en termes d'urbanisme, la plaine littorale est saturée, d'où une baisse d'attractivité du territoire et une légère décroissance de la population, mais le développement d'un tourisme de masse sur la côte. Dans un contexte de laxisme dans le renouvellement des réseaux, les populations, non sensibilisées aux économies d'eau, et vivant dans un habitat

à fort étalement horizontal, ont une consommation individuelle en augmentation, malgré la hausse du prix de l'eau.

— Un scénario nommé « épicurien dynamique » : les politiques volontaristes durables lancent une dynamique de rééquilibrage territorial, avec une concentration des centres urbains, le développement de transports en commun entre ces centres et les nouveaux pôles High-Tech. La démographie connaît une croissance dynamique et la fréquentation touristique se maintient. Grâce à des politiques incitatives, les rendements primaires s'améliorent, et des économies d'eau sont réalisées.

— Un scénario « tendanciel timide », dans lequel le territoire demeure attractif : la population augmente prudemment, et la fréquentation touristique se maintient. Les politiques subissent ces tendances mais parviennent à maintenir les rendements de réseaux à leur niveau actuel. La tendance à la baisse des consommations individuelles d'eau se poursuit.

Les scénarios envisagés à l'horizon 2030 sont contrastés en termes de moteurs des évolutions socio-économiques. En revanche, du point de vue des prélèvements, le contraste est réduit par des évolutions de facteurs qui se contrebalancent. La comparaison des variables considérées dans chaque scénario avec les valeurs estimées en 2007 montre que suivant les scénarios, les prélèvements en eau pourraient varier de -4 % à +13 % par rapport à la valeur actuelle considérée :

— Le scénario de perte de vitesse fait l'hypothèse d'une baisse de population, dont les répercussions sur les consommations en eau sont tempérées par une augmentation de la population touristique, mais l'augmentation des prélèvements est conséquente (+13 Mm³) en raison des gaspillages.

— Les rythmes démographiques du scénario dynamique durable se traduisent par une augmentation des consommations, mais une baisse sensible des prélèvements (-4 Mm³) en raison des améliorations de rendements et des économies d'eau.

— L'augmentation prudente de la population envisagée par le scénario tendanciel timide est contrebalancée par une sensibilisation de la population aux économies d'eau qui résulte en une augmentation plus modérée des prélèvements (+ 6 Mm³).

Tableau 1 : Hypothèses considérées dans les scénarios prospectifs AEP et évolution des prélèvements.

Variable	Valeur actuelle (moyenne 2004-07)	Scénario de perte de vitesse	Scénario dynamisme durable	Scénario tendanciel timide
Population permanente	440 000	-22 000 (-5 %)	+140 000	+100 000
Population saisonnière -2 mois	530 000	680 000 (+30 %)	=	=
Répartition géographique et temporelle	Pic : 450 000 nuitées/jour début août	+42 % en bordure littorale, maintien pop actuelle en arrière-pays	rééquilibrage	=
Rendement primaire de réseau	Global : 60 % (70 % PMCA, 60 % 1°-2° couronnes, 50 % reste urbain, 40 % rural)	Global : 50 % (60 % PMCA, 50 % 1°-2° couronnes, 40 % ailleurs)	> 70 % (80 % PMCA, 70 % ailleurs)	~
Economies d'eau	-	Gaspillages : 5 %	-10 %	-5 %
Consommation annuelle	33 Mm ³	+3 Mm ³	+6 Mm ³	+6 Mm ³
Prélèvement annuel	55 Mm ³	+13 Mm ³	- 4 Mm ³	+6 Mm ³
Débit fictif continu (Qfc) prélevé le mois de pointe (m ³ /s)	2,3 m ³ /s	+0,6 m ³ /s	- 0,1 m ³ /s	+0,3 m ³ /s

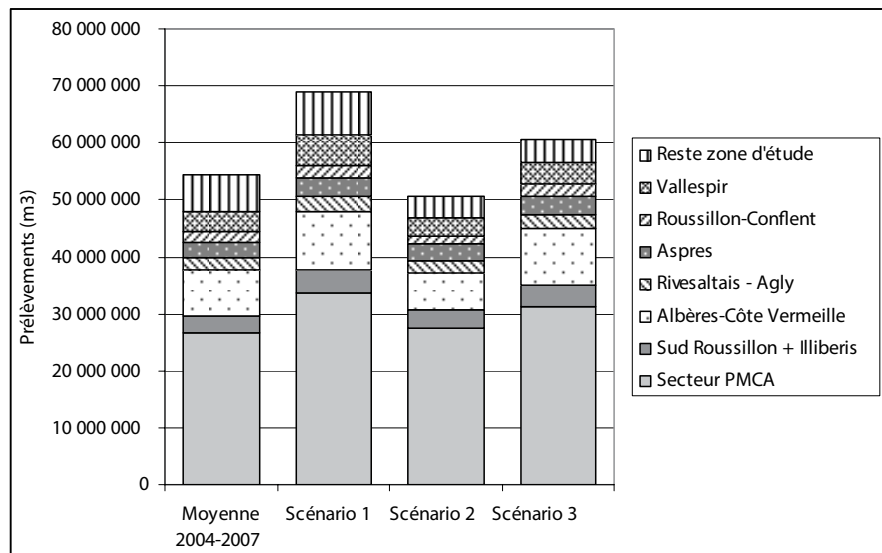


Figure 4 : Évolution des prélèvements à l'horizon 2030 dans les différents scénarios prospectifs.

IV. LES PRÉLÈVEMENTS AGRICOLES

IV.1. Importance de l'irrigation

L'agriculture dans les Pyrénées Orientales concerne une superficie agricole utile (SAU) d'environ 92 000 ha selon le Recensement Général Agricole (RGA) de 2000, en diminution de 9 % par rapport à 1979. Le zonage culturel est très marqué. Les têtes de bassins versant au sud-ouest sont caractérisées par une agriculture de montagne : élevage, prairies, céréaliculture. Dans les vallées, du maraîchage coexiste avec d'autres cultures dominantes : la vigne dans la plaine de l'Agly, le pêcher dans la vallée de la Têt, la vigne et le cerisier dans la vallée du Tech. Dans la plaine du Roussillon, le maraîchage est prépondérant mais recule face à l'urbanisation. Dans les Albères, la vigne AOC est majoritaire. A l'exception des surfaces enherbées en augmentation depuis 1979 (+56 %), l'ensemble des cultures connaît une tendance à la baisse depuis 1979, particulièrement marquée pour la

vigne (-33 %), pour le maraîchage (-39 %) et pour les vergers (-23 %), mais avec un relatif maintien de la superficie en pêcher (baisse de seulement 7 %), qui représente désormais les $\frac{3}{4}$ de la superficie en verger.

Les Pyrénées Orientales connaissent à la fois les rigueurs du climat méditerranéen en plaine avec des étiages très sévères et des épisodes pluvieux intenses, et les caractéristiques d'un climat montagnard sur les têtes de bassin permettant le stockage temporaire des précipitations hivernales sous forme de neige. Des canaux ont été construits dès le Moyen-Âge [Ruf, 2001], afin de distribuer cette ressource aux points d'usage. Ce réseau de canaux s'est maintenu jusqu'à nos jours, avec une diversification de ses fonctionnalités : approvisionnement en eau des villes, moulins, irrigation, assainissement pluvial, agrément. Depuis 30 ans, d'autres aménagements – barrages et forages – ont été développés et sécurisent les usages de l'eau en été.

Les surfaces irriguées sont estimées à environ 15 000 ha en 2000 par le Recensement Général Agricole, soit 16 % de

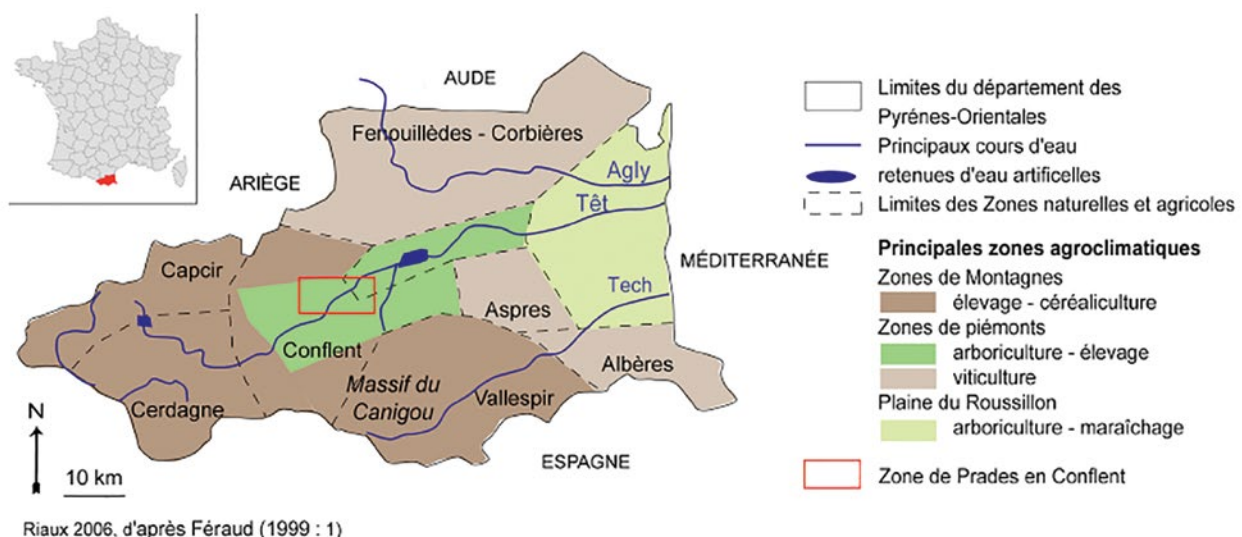


Figure 5 : Carte des systèmes agraires dominants dans les Pyrénées Orientales.

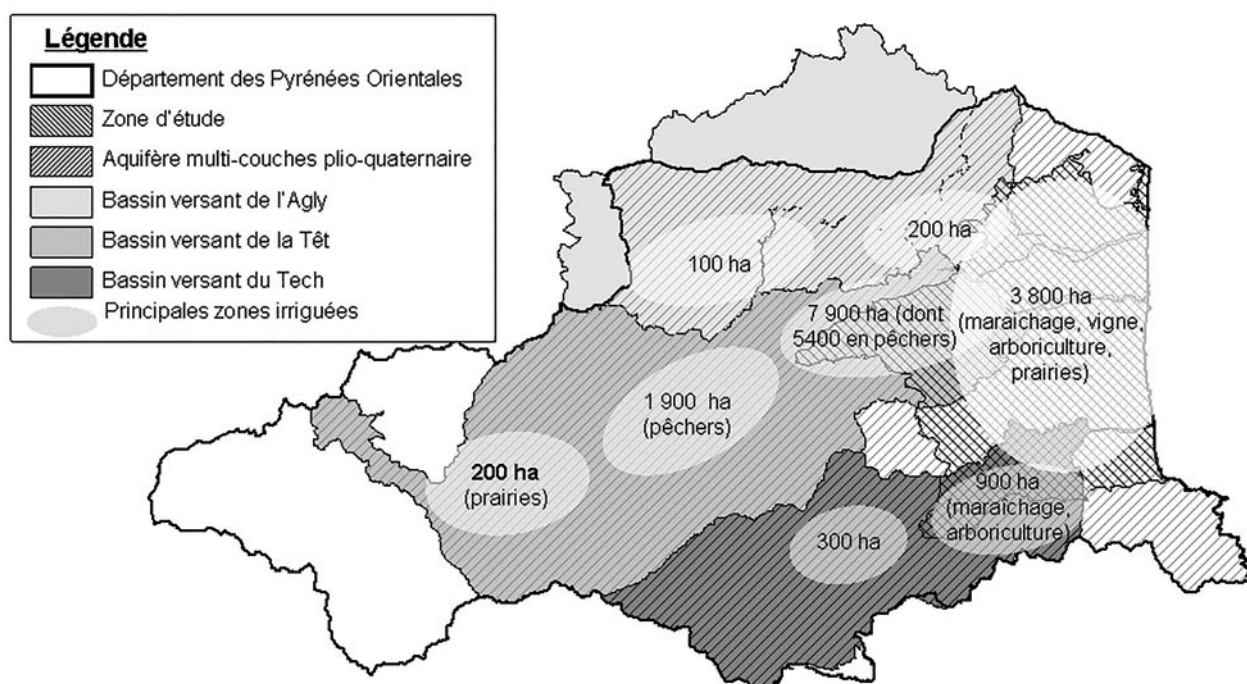


Figure 6 : Carte des superficies irriguées sur la zone d'étude.

la SAU, et ont diminué de 22 % depuis 1979. Cette superficie irriguée concerne pour moitié des vergers, pour un quart du maraichage, et pour 15 % de la prairie. Environ 11 000 ha irrigués sont desservis par une adduction gravitaire. L'eau est distribuée soit par gravité, soit à partir de réseaux sous pression utilisant l'adduction gravitaire ou les forages de la Plaine du Roussillon. La plupart des surfaces irriguées du département bénéficient de la régulation des barrages sur les fleuves Têt et Agly. Le remplissage de ces deux ouvrages, qui assurent en priorité une fonction d'écroulement des crues, n'est cependant pas garanti chaque année et des restrictions peuvent être décidées, limitant les débits entrant dans les canaux.

Les surfaces irriguées par périmètre et par sous bassin ont été estimées à partir du recensement général agricole (RGA) de 2000 ainsi que des études disponibles [ADASIA, 2003], et de la connaissance de terrain d'experts de la Chambre d'Agriculture des Pyrénées Orientales [Jacques Féraud, comm. pers.].

IV.2. Méthode pour quantifier les prélèvements à destination de l'irrigation

Les analyses suivantes visent d'une part à quantifier les flux d'eau anthropiques actuels pour mieux comprendre leur influence réelle sur les ressources en eau et d'autre part d'utiliser le même modèle pour analyser l'évolution de ces flux sous l'effet a) du changement climatique par modification des conditions climatiques dans le modèle ; et b) des changements socio-économiques du territoire grâce à l'évolution des paramètres correspondant aux caractéristiques des systèmes de production dans le modèle.

Il apparaît qu'il est très difficile, en particulier dans la plaine du Roussillon, d'affecter une surface irriguée à la ressource qu'elle prélève ou à un point de prélèvement. Les canaux de la plaine et leur réseau secondaire, notamment

dans le bassin de la Têt à l'aval de Vinça, forment un enchevêtrement complexe et s'alimentent les uns les autres, sans que ces connexions ne soient quantifiables simplement. Dans les périmètres dominés par les canaux gravitaires, de nombreuses surfaces sont alimentées par des forages dans la nappe quaternaire, elle-même alimentée par les systèmes gravitaires.

Un modèle des prélèvements et des demandes en eau agricole au pas de temps mensuel a été construit afin de déterminer, à l'échelle des 13 zones hydrologiques élémentaires du projet, les prélèvements nets actuels et futurs possibles. Ce modèle part de l'hypothèse que les besoins pour l'irrigation sont satisfaits par des prélèvements en rivière, ou dans la nappe quaternaire qui lui est associée. Il met en parallèle les besoins liés au climat et aux choix culturels, et les prélèvements bruts dans le milieu naturel intégrant les contraintes liées aux modes d'adduction, d'irrigation et de gestion. La Figure 7 explicite les termes du bilan.

IV.2.1. Besoins théoriques en irrigation

Le calcul agro-climatique du besoin en irrigation des cultures est conduit par la méthode des coefficients culturels (1) au pas de temps décennal sur la période 1971-2005, référence du projet [FAO, 1998].

$$BU_{th}(i, k) = \sum_j \max [0, (Kc(i, j) \times ETP(k, j) - P(k, j)) - RU(j-1)], \quad (1)$$

où $BU_{th}(i, k)$ est le besoin théorique unitaire mensuel en irrigation de plante i sur la zone climatique k , $RU(j-1)$ est la réserve utile du sol à la fin de la décennie $j-1$, $ETP(k, j)$: évapotranspiration potentielle pendant la décennie j , sur la zone climatique k , $P(k, j)$ est la précipitation efficace pendant

la décade j , sur la zone climatique k , $Kc(i,j)$ est le coefficient cultural de la culture i pendant la décade j (fonction du développement de la plante).

Si cette méthode présente l'avantage de tenir compte des principales caractéristiques des systèmes de cultures étudiés (zone climatique, type de culture, superficies, stades de développement de la plante, etc.), elle présente néanmoins le biais de ne pas intégrer l'évolution du comportement des plantes face à un climat modifié (réaction phénologique à une évolution de la température ou de la concentration de CO_2 , étudiée dans le programme CLIMATOR [Brisson et Levraut, 2010]).

Les besoins théoriques en irrigation pour chaque zone climatique sont obtenus par la formule suivante :

$$B_{th}(k) = \sum_i S_i \times BU(i, k)$$

où $B_{th}(k)$ est le besoin théorique unitaire mensuel en irrigation sur la zone climatique k , S_i est la surface irriguée pour la culture i .

IV.2.2. Besoins nets et prélèvements nets pour l'irrigation

L'eau du prélèvement brut peut être affectée à plusieurs devenir, représentés sur la Figure 7 : a) une part est consommée par les plantes (le besoin théorique en eau d'irrigation) ; b) une part sort définitivement du système (évaporation en surface des canaux gravitaires ou évapotranspiration sur les surfaces sans culture) : ces pertes « définitives » ne retournent pas à court terme vers les milieux aquatiques du sous-bassin considéré (nappes, cours d'eau) ; c) une part retourne au milieu de manière directe ou diffuse.

Les besoins nets sont la part du prélèvement brut ne retournant pas au cours d'eau. Ils intègrent les pertes définitives, par l'intermédiaire d'un coefficient de *surconsommation*, estimé à dire d'expert, à 25 % des besoins en eau théoriques des cultures pour les canaux gravitaires et à 10 % pour les systèmes sous pression plus économes (ces ordres de grandeur ont été vérifiés a posteriori par des mesures de débit en rivière). On définit ensuite pour chaque système d'irrigation la part des retours vers chacun des sous-bassins versants en fonction de la localisation des périmètres

irrigués par rapport aux exutoires des sous-bassins. Pour chaque périmètre irrigué, les retours au milieu sont calculés et répartis entre les sous-bassins situés en aval de la prise. Cette répartition est réalisée à dire d'experts sur la base de la cartographie des canaux et périmètres irrigués réalisée dans le cadre du projet Vulcain.

La plupart des usagers de l'eau prélèvent plus que leurs stricts besoins. La quantité totale prélevée dans le milieu (prélèvements bruts) est en partie consommée (besoins) et en partie perdue par des fuites du réseau d'adduction et de distribution, par évaporation, etc. Une partie de ce prélèvement brut retourne au milieu d'origine en fin d'utilisation (rejet de station d'épuration, ou en colature de canaux) ou par l'intermédiaire des pertes. On appelle prélèvement net la part du prélèvement définitivement soustraite à la ressource. Dans un cours d'eau, le prélèvement net peut varier selon si l'on se place en amont ou en aval d'un rejet. La différence entre les besoins nets et les prélèvements nets réside dans leur répartition : les besoins nets constituent la part du prélèvement brut consommée par les cultures du sous-bassin b ou définitivement perdue lors du transport correspondant (mais le retour associé peut rejoindre le milieu naturel dans le bassin b , comme dans les sous-bassins aval $b+i$), alors que les prélèvements nets sont la part du prélèvement brut du bassin b que l'on ne retrouve pas dans le milieu en sortie du bassin b (ils ne tiennent pas compte des retours dans les bassins aval). Les prélèvements nets sont utilisés par les hydrologues pour désinfluencer les débits.

IV.2.3. Données climatiques utilisées

Les données météorologiques utilisées sont issues de la base de données SAFRAN [Vidal *et al.*, 2010], qui couvre la France sur la période allant de 1958 à 2008. SAFRAN est une analyse météorologique à méso-échelle qui comporte 8 variables (la pluie, la neige, la température de l'air à 2m, la vitesse du vent, l'humidité spécifique, les rayonnements visible et infrarouge et la nébulosité). À partir de certaines de ces variables (température, rayonnement, humidité et vent) l'évapotranspiration potentielle (ETP) a été calculée en utilisant la formulation de Penmann-Montheith recommandée par la FAO [Allen *et al.*, 1998]. Ces données sont spatialisées sur une grille de 8x8 km, dont les cellules correspondant aux périmètres irrigués de la zone d'étude ont été sélectionnées.

Les scénarios de climat futur ont été construits en appliquant aux séries de précipitation et de température de la base des données SAFRAN, ainsi qu'aux données d'ETP de la période présente, des anomalies moyennes mensuelles (méthode « delta » ou de « perturbation », Déqué, 2007). Ces anomalies traduisent l'évolution relative de la moyenne mensuelle d'une variable climatique (ici les précipitations et les températures) simulée par un modèle de climat donné, entre la période présente (2020-2040) et la période future (2040-2060) [Martin et Salas y Melia, 2008 et Caballero *et al.* 2008]. Cette méthode, qui reste simple d'utilisation, est largement utilisée dans les études d'impact du changement climatique, ou elle est appréciée pour sa robustesse [Déqué, 2007 ; Quintana-Segui, 2010]. Les anomalies ont été construites à partir des sorties de 5 modèles (CNRM-CM3 (CNRM-GAME, France), HadGEM1 (UKMO, G.B.), IPSL-CM4 (IPSL, France), MPI-ECHAM5 (MPI, Allemagne) et NCAR-CCSM3.0 (NCAR, Etats-Unis)) simulant convenablement le climat de la fin du 20ème siècle (1980-2000 – période de référence) sur la région d'intérêt. Les données de précipitation

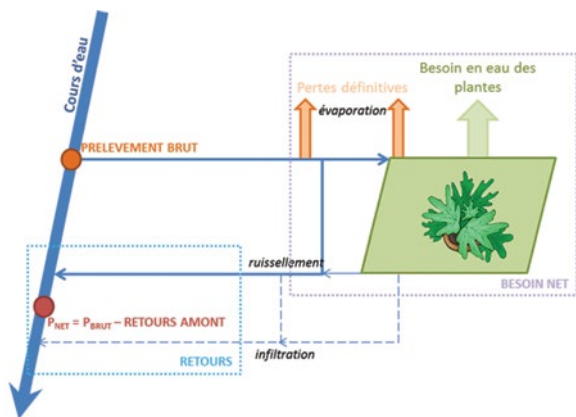


Figure 7 : Schéma représentant les prélèvements bruts et besoins nets. Le prélèvement net est le prélèvement définitivement soustrait à la ressource.

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 (http://www-pcmdi.llnl.gov/new_users.php), 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 [Martin et Salas y Melia, 2008]. Ces simulations du climat correspondent au scénario d'émission de gaz à effet de serre SRES-A1B [Nakicenovic et Swart (2000)], scénario « médian » sur la seconde moitié du 21ème siècle. Les anomalies moyennes mensuelles grande échelle obtenues à partir de ces données ont ensuite été désagrégées à l'échelle de la grille SAFRAN à l'aide du logiciel coupleur OASIS [Terry et al., 1998] en mode interpolateur. Les valeurs moyennes mensuelles multi-modèles (moyenne des valeurs des 5 sorties de modèles de climat) ont été utilisées pour calculer les besoins en irrigation futurs.

IV.3. Prélèvements actuels pour l'irrigation

Les prélèvements bruts à destination de l'irrigation sont estimés à partir des mesures existantes entre 2000 et 2006 à 393 Mm³. La quantification à partir du modèle estime des besoins nets en irrigation à 90 Mm³ en année quinquennale sèche, soit environ le quart.

Les besoins nets comme les prélèvements bruts connaissent un pic marqué au mois de juillet. Cependant, il est intéressant de constater qu'ils ne sont que partiellement corrélés : malgré des besoins en irrigation nuls en hiver, les prélèvements demeurent. Le Tableau 1 montre la part des prélèvements bruts destinée aux besoins nets. Ainsi, les marges d'optimisation les plus importantes en termes de volume se trouvent dans la vallée de la Têt. Même si les quantités d'eau mises en jeu dans les vallées du Tech et de l'Agly sont plus faibles, il existe aussi une certaine marge de manœuvre puisque les besoins nets ne représentent que 23 % et 17 % des prélèvements bruts. Cela provient du fait

que, d'une part, la plupart des gros prélèvements bruts sont réalisés par des canaux gérés loin en amont de la zone à irriguer (le prélèvement réalisé ne s'adapte donc pas en temps réel aux variations de demande), et, d'autre part, les canaux sont aussi utilisés pour d'autres usages que l'irrigation : antigel (non considéré dans le modèle, mais réalisé hors période d'été d'où une erreur relative limitée par rapport aux débits), remplissage de la retenue de Villeneuve-de la Raho, recharge de nappes, ... Dans la plaine littorale, où les prélèvements sont réalisés majoritairement par des forages, les besoins nets en irrigation et les prélèvements bruts sont *a priori* mieux corrélés.

IV.4. Projections des prélèvements agricoles à l'horizon 2030

IV.4.1. Evolution des besoins agricoles sous l'effet du seul changement climatique

L'évolution du besoin théorique en eau agricole sous l'effet du seul changement climatique a été estimée en supposant que les systèmes de production sont maintenus à l'identique et en faisant l'hypothèse que le comportement stomatique des cultures reste stationnaire.

A l'échelle de l'ensemble de la zone d'étude (Figure 9), la modélisation des besoins nets en irrigation sur l'ensemble de la zone d'étude montre, une hausse généralement plus marquée à long terme (+20 % en moyenne annuelle sur une année quinquennale sèche) qu'à moyen terme (+9 %). La tendance à la hausse est particulièrement marquée au cours de la période estivale en valeur absolue, en lien avec l'intensification prévue de l'accroissement de la température et par conséquent de l'ETP. Mais en relatif, ce sont surtout les mois printaniers qui connaissent l'augmentation la plus forte, car ils conjuguent les prévisions d'augmentation de la température et de baisse notable des précipitations.

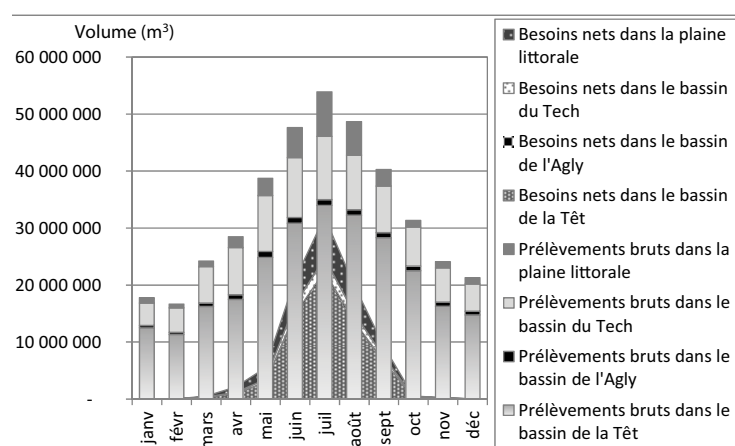


Figure 8 : Comparaison des prélèvements bruts et besoins nets mensuels en irrigation actuels, issus de la modélisation réalisée sur la période climatique 1970-2006.

Tableau 1 : Ratio besoins nets/prélèvements bruts le mois de pointe.

	Têt	Tech	Agly	Littoral
annuel	21 %	8 %	7 %	56 %
juillet	52 %	23 %	17 %	80 %

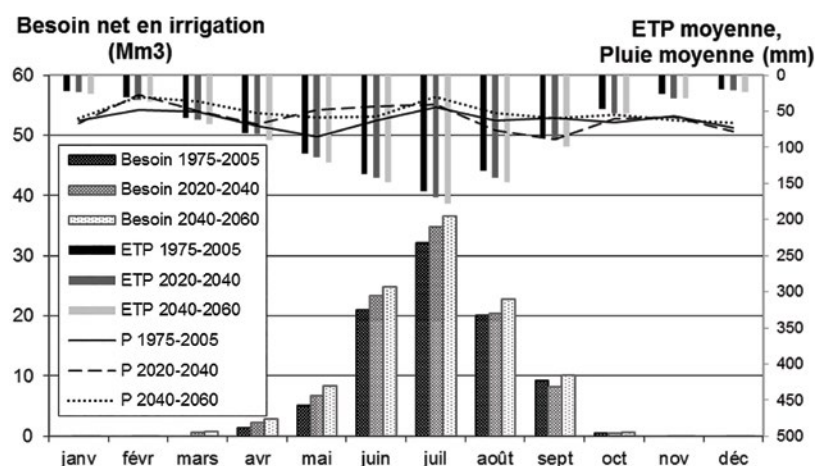


Figure 9 : Évolution mensuelle des besoins nets quinquennaux secs en irrigation sur l'ensemble de la zone d'étude par rapport à 1975-2005, en valeur absolue et en relatif, mise en regard des variations climatiques aux horizons 2020-40 et 2040-60.

	janv	févr	mars	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	année
2020-2040	—	—	—	56 %	33 %	11 %	8 %	1 %	— 11 %	4 %	—	—	9 %
2040-2060	—	—	—	98 %	63 %	18 %	14 %	13 %	10 %	8 %	—	—	20 %

Tableau 2 : Scénarios prospectifs agricoles et quantification des besoins futurs.

	Actuel	Modernisation ultra-compétitive	Agriculture régionale	Haute Qualité Environnementale
Contexte general		Libéralisation, compétition mondiale et alignement des prix. PAC démantelée. Produits alimentaires bon marché.	Libéralisation limitée par normes UE strictes: qualité des produits et prix européens > marchés mondiaux. Niches régionales subventionnées	Marché européen protégé par normes sanitaires strictes. Prix UE > prix mondiaux. Aides pour la production HQE
SAU totale	92 000 ha	déprise (montagne : ++, plaine : +)	stabilité	augmentation des surfaces
S(ha) irriguée	15 000 ha	17 000 ha	Augmentation des surfaces irriguées 25 000 ha	
S en vigne	37 000 ha, 500 irrig.	8 000 ha, 5 000 ha irrigués	18 000 ha relocalisation partielle sur coteaux, 7 000 ha irrigués	
S légumes	3600ha	3 000 ha	5 000 ha	
S vergers	7700ha	9 000ha (pêche/abricot)	14 000 ha	
Usages de l'eau		Irrigation économe, abandon du gravitaire et des canaux	Apports de ressource exogène	Ressources alternatives, modernisation canaux
Besoins nets	90 Mm ³	84 Mm ³ (-6 Mm ³)	125 Mm ³ (+ 35 Mm ³)	

Tableau 3 : Quantification des besoins futurs sous l'effet combinés des changements climatiques (horizon 2020-2040) et anthropiques (scénarios à l'horizon 2030).

Besoins nets	90 Mm ³	88 Mm ³ -2 Mm ³	132 Mm ³ + 42 Mm ³
--------------	--------------------	--	--

La modélisation a également montré une augmentation des besoins en eau comparativement légèrement plus importante une année médiane [+8 Mm³ à l'horizon 2020-2040 et +20 Mm³ à l'horizon 2040-2060] qu'une année quinquennale sèche [respectivement +8 et +18 Mm³ à l'horizon 2040-2060]. Il semble ainsi que la fréquence des années sèches tend à augmenter légèrement plus que leur sévérité. Le débit fictif continu équivalent aux besoins nets du mois de pointe (11,9 m³/s en juillet) augmenterait respectivement de 8 % et 14 % en année quinquennale sèche à ces horizons temporels.

IV.4.2. Besoins futurs sous l'effet des seuls changements socio-économiques

Quatre scénarios d'évolution socio-économiques ont été imaginés en ateliers de prospective à l'horizon 2030 [Rinaudo *et al.*, accepté]. Trois ont finalement été retenus pour la modélisation. Ces scénarios envisagent plusieurs évolutions possibles pour les systèmes agricoles, qui sont détaillés et quantifiés dans le Tableau 2. Les deux derniers scénarios partent de situations socio-économiques divergentes, mais se traduisent par des évolutions comparables des superficies irriguées.

Ces résultats montrent que, selon nos hypothèses, l'augmentation moyenne des besoins nets en eau d'irrigation est plus importante selon les changements anthropiques [-6 à +35 Mm³, en moyenne 15 Mm³] que selon les changements climatiques [+8 Mm³ à l'horizon 2020-2040]. Lorsqu'on examine les effets cumulés des changements climatiques et socio-économiques par couplage du modèle de besoins en eau et de scénarios, les besoins nets varieraient en moyenne de 20 Mm³ en moyenne selon les scénarios envisagés.

V. CONCLUSION

Cette étude propose une quantification des besoins en eau domestique et agricole, sur le territoire des Pyrénées Orientales, pour la période actuelle et future (2030 et 2050), dans le but de la comparer à l'évolution de la ressource disponible sur le territoire. Ce travail intègre à la fois l'évolution du climat futur et des activités socio-économiques traduites en termes de demande en eau, en couplant des modèles (eau potable d'une part, prélèvements agricoles d'autre part, s'appuyant sur des sorties de modèles climatiques) et des scénarios élaborés en ateliers participatifs.

Les résultats de cette démarche montrent à l'horizon 2030 une augmentation moyenne des besoins en irrigation plus importante sous l'effet des changements socio-économiques [moyenne des 2 scénarios : 15 Mm³] que des changements climatiques [+8 Mm³ à l'horizon 2020-2040], et également plus importante que pour l'évolution des prélèvements en eau potable suivant les scénarios d'évolution socio-économiques envisagés [+5 Mm³ en moyenne sur les 3 scénarios envisagés]. Mais ces changements restent du même ordre de grandeur. La question de la répartition de ces prélèvements sur les différentes ressources reste à approfondir, quitte à réserver les ressources de meilleure qualité (aquifère Pliocène) en priorité aux usages domestiques.

Face à la possibilité de voir les besoins augmenter de manière importante, et la réglementation environnementale de plus en plus contraignante, les stratégies de gestion actuelles à l'échelle du territoire peuvent être remises en cause. Les prélèvements pour l'irrigation sont largement supérieurs aux besoins, et ne sont pas pilotés en fonction de la demande : il existe ainsi une importante marge d'optimisation

qui pourrait absorber les augmentations de besoins nets anticipées. Mais les prélèvements des canaux multi-usages rendent également d'autres services (recharge de la nappe quaternaire par infiltration, remplissage de la retenue de Villeneuve-de-la-Raho). L'augmentation des besoins nets et les débits environnementaux à maintenir en cours d'eau pourraient être alloués techniquement par une amélioration de la gestion des réseaux et de l'efficacité des équipements, mais qui diminuerait alors la recharge de la nappe. Un choix politique se pose ainsi par rapport à l'évolution future de ces systèmes : doit-on basculer vers un système efficient, pour faire face à l'augmentation de la demande, mais réduire ainsi l'alimentation en eau de la nappe quaternaire, destinataire d'une bonne partie des retours et exploitée pour l'eau potable? Ou bien, doit-on maintenir et optimiser le système de canaux et ses externalités environnementales et paysagères, mais alors comment faire face à l'augmentation possible de la demande?

L'implication de décideurs dans les ateliers participatifs a permis de donner de l'ampleur à la réflexion prospective sur les ressources en eau du territoire. Le Conseil Général a poursuivi cette réflexion par une exploration plus technique, en réalisant une étude sur les possibilités de sollicitation de ressources alternatives, endogènes (karst des Corbières, nouveau barrage, etc.) ou exogènes (transfert d'eau du Rhône, dessalement) [BRLi, 2011].

VI. BIBLIOGRAPHIE

- ALLEN R. G., M. SMITH A. PERRIER ET L. S. PEREIRA (1998) — Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO, Rome, Italy. *Irrigation and Drainage*. **56** 300 p
- BAE D.-H., I.-W. JUNG ET D. P. LETTENMAIER (2011) — Hydrologic uncertainties in climate change from IPCC AR4 GCM simulations of the Chungju Basin, Korea. *Journal of Hydrology*. **401** 90-105
- BRGM (2003) — *Connaissance des eaux souterraines de la plaine du Roussillon. Accord Cadre pour la définition d'un programme global de protection et de gestion concertée des ressources en eau de l'aquifère multicouche plio-quaternaire de la plaine du Roussillon. Tome 1 Rapport.* Conseil Général des Pyrénées Orientales, République Française, Agence de l'Eau RMC, Chambre d'Agriculture des Pyrénées Orientales. 47 p
- BRLi (2010) — *Etude de repositionnement du Canal de Perpignan.* Conseil Général des Pyrénées Orientales, République Française, Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, Chambre d'Agriculture des Pyrénées Orientales, ADASIA. 172 p
- BRLi (2011) — *Proposition et évaluation de solutions destinées à mobiliser des ressources en eau complémentaires sur le département des Pyrénées Orientales – Phase 1.* Conseil Général des Pyrénées Orientales. 115 p
- BRLi (2012) — *Etude des volumes prélevables du bassin versant de la Têt – Phase 1-2.* Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse. 203 p
- CABALLERO Y., CHAOUCHE K., NEPPEL N., SALAS Y MELIA D., MARTIN E., TERRASSON I., CHAZOT S., CITEAU J.-M., MATON L., RINAUDO J.-D., FLEURY P., LADOUCHE B., DOR-FLIGER N., PINAULT J.-L. (2008) — Vulnerability of Mediterranean hydro-systems to climate changes and human activities: assessing potential impacts of likely future precipitation and temperature modifications for the 2020–2040 and 2040–60 periods over a Mediterranean basin. 20 13th IWRA World Water Congress 1-4 September 2008, Montpellier, France. Accessible sur le site: 20 p

- DANKERS R. AND FEYEN L. (2009) — Impact of global warming on streamflow droughts in Europe. *Journal of Geophysical Research*. **114** 16 p
- DÉQUÉ M. (2007) — Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values., doi10.1016/j.gloplacha.2006.11.030. *Global and Planetary Change*. **57** 16–26
- GAUDET, MICHEL (2007) — *Manuel de prospective stratégique*. Dunod, 3^e édition. 502 p
- GIUNTOLI I., AND RENARD B. (2010) — Identification des impacts hydrologiques du changement climatique: constitution d'un réseau de référence pour la surveillance des étiages. *Rapport d'étude CEMAGREF-ONEMA*. 106 p
- KINGSTON D. G., M. C. TODD R. G. TAYLOR J. R. THOMPSON ET N. W. ARNELL (2009) — Uncertainty in the estimation of potential evapotranspiration under climate change. *Geophysical Research Letters*. **36** 1-6
- LESPINAS FRANCK (2008) — *Impact du changement climatique sur l'hydrologie des fleuves côtiers en région Languedoc-Roussillon*. Thèse de doctorat de l'Université de Perpignan. Discipline : Hydroclimatologie. 332 p
- MARTIN ERIC, SALAS Y MELIA DAVID (2008) — *CNRM-GAME Projet VULCAIN : scénarios climatiques obtenus pour les périodes 2020-40 et 2040-60 à partir des modèles de climat. Note technique accessible sur le site web du projet Vulcain*. 11 p
- NAKICENOVIC N. AND R. SWART (2000) — *Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 570 p
- LOUDIN L. (2004) — *Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global*. Thèse. Sciences de l'eau Paris, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts. 495 p
- RENARD B. (2006) — *Détection et prise en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques en France*. Thèse de doctorat, l'INP Grenoble. 361 p
- RINAUDO JEAN-DANIEL, MATON LAURE, RICHARD-FERROUDJI AUDREY, CHAZOT SEBASTIEN, TERRASSON ISABELLE (2013) — Combining scenario workshops with modelling to assess future irrigation water demands. *Agricultural Water Management*. **130** 103-112
- RUF THIERRY (2001) — Droits d'eau et institutions communautaires dans les Pyrénées-Orientales – Les tenanciers des canaux de Prades (XIV^e-XX^e siècle). *Histoire & Sociétés Rurales*. **16** 11-44
- TERRAY L., VALCKE S. AND A. PIACENTINI (1998) — Oasis 2.2 Ocean Atmosphere Sea Ice Soil, User's Guide and Reference Manual. *Technical Report TR/CMGC/98-05, CERFACS, Toulouse, France*. 77 p
- QUINTANA SEGÚI P., RIBES A., MARTIN E., HABETS F., BOÉ J. (2010) — Comparison of three downscaling methods in simulating the impact of climate change on the hydrology of Mediterranean basins. doi10.1016/j.jhydrol.2009.09.050. *Journal of Hydrology*. **383** 111–124
- VIDAL J.-P., MARTIN E., FRANCHISTEGUY L., HABETS F., SOUBEYROUX J.-M., BLANCHARD M., BAILLON M. (2010) — Multilevel and multiscale drought reanalysis over France with the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological suite. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **14** 459-478