

SENSIBILITE AUX VARIATIONS CLIMATIQUES D'UN BASSIN A FORTS

ENJEUX – LE CAS DE LA GARONNE

Anne Dupeyrat (1), Cécile Agosta (1), Eric Sauquet (2), Frédéric Hendrickx (1)

(1) EDF – R&D – LNHE, 6 quai Watier, 78400 Chatou - France

Tel : +33 (0)1 30 87 70 04, Fax : +33 (0)1 30 87 81 09

Email: anne.dupeyrat@edf.fr

(2) Cemagref, UR Hydrologie-Hydraulique, 3 bis quai Chauveau, 69009 Lyon- France

INTRODUCTION

La gestion des ressources en eau à l'échelle d'un grand bassin versant, comme celui de la Garonne, est particulièrement complexe. Les grands bassins fluviaux subissent bien souvent de fortes pressions pendant la période d'étiage. La Garonne n'échappe pas à cette règle. Les besoins exprimés par les nombreux acteurs de l'eau sur ce secteur peuvent aboutir à des situations difficiles autour du partage de l'eau, comme lors des étiages sévères de 2003, 2005 et 2006. Ces situations de crise récentes ont fait émerger le besoin d'établir un diagnostic sur la gestion de la ressource à l'échelle du bassin et d'engager une réflexion prospective sur la disponibilité de l'eau sous hypothèse de changement climatique et en considérant les usages sur le territoire. Une étude d'impact a donc été initiée dans le cadre d'un projet de recherche baptisé IMAGINE2030, associant le Cemagref, EDF et l'Agence de l'Eau Adour Garonne, avec le soutien financier du MEDAD.

Plusieurs études ont déjà été menées sur des grands bassins fluviaux français : la Seine (Ducharne *et al.*, 2004), le Rhône (Leblois *et al.*, 2004) dans le cadre du programme « Gestion des Impacts du Changement Climatique » du MEDD (GICC) et la Garonne (Caballero *et al.*, 2005) en réponse à une demande spécifique de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne. L'étude GICC-Seine examinait le fonctionnement hydrologique et la qualité biogéochimique du bassin de la Seine soumis à des changements anthropiques directs (évolution des pratiques agricoles et des rejets ponctuels dans les cours d'eau) et indirects (changement climatique). Le projet GICC-Rhône était centré sur l'hydrologie du Rhône et de ses affluents mais abordait les aspects biologiques. Enfin, les travaux de Caballero *et al.* (2005) exploraient les aspects ressources en eau du bassin Adour-Garonne à l'horizon 2025 et 2050. Ces différentes études ne prenaient que très peu en compte les usages de l'eau et les perturbations que ceux-ci engendrent sur les régimes hydrologiques. L'étude présentée ici a pour objectif de prendre en compte de façon explicite les perturbations introduites par les activités anthropiques sur les régimes hydrologiques.

Dans le cadre de cette communication, nous nous concentrerons sur l'étude de sensibilité aux variations climatiques menée sur deux bassins peu influencés, aux comportements hydrologiques différents (le Tarn à Millau et le Salat à Roquefort) et sur un bassin fortement influencé par la production hydroélectrique (l'Ariège à Foix). Elle s'appuie sur les sorties du modèle hydrologique CEQUEAU couplé à un générateur de situations climatiques. Les résultats sont examinés au travers des variables hydrologiques classiques de débit mais également des indicateurs caractérisant les risques de défaillance du système faisant appel aux débits objectifs à maintenir définis dans le plan de

gestion des étiages du bassin. Enfin, nous présenterons l'approche employée pour mesurer les effets combinés d'une modification du climat et la gestion multi-contrainte des barrages. Les premiers résultats obtenus pour l'Ariège à Foix seront commentés.

SECTEUR D'ETUDE ET BASE DE DONNEES HYDRO-METEOROLOGIQUES

Le bassin versant de la Garonne à Lamagistère est soumis à des influences climatiques multiples (atlantique, méditerranéenne et climat de montagne), donnant lieu à des réponses hydrologiques différenciées. A cette diversité naturelle s'ajoute une complexité d'origine anthropique. Le bassin présente en effet sur son territoire de nombreuses exploitations agricoles et plusieurs retenues hydroélectriques dont certaines sont sollicitées pour soutenir les étiages.

Neuf sous-bassins sont examinés dans le projet. La présente étude se concentre sur trois d'entre eux ayant des surfaces drainées du même ordre de grandeur. Ils sont représentatifs de la variabilité des régimes hydrologiques rencontrés sur le bassin de la Garonne :

- le Tarn à Millau situé au sud-ouest du Massif Central (2150 km²) : les écoulements mesurés sont considérés naturels car il n'existe aucune retenue majeure et les prélèvements pour l'agriculture y sont négligeables ;
- le Salat à Roquefort situé dans les Pyrénées (1580 km²) : en amont de Roquefort, on ne recense qu'une seule retenue de faible capacité. Le fonctionnement hydrologique résultant est, en première approximation, quasiment naturel ;
- l'Ariège à Foix situé dans les Pyrénées (1360km²) : le régime hydrologique de ce cours d'eau est principalement influencé par la production hydroélectrique, les surfaces irriguées étant négligeables sur le bassin.

Le climat sur ces secteurs est décrit par un réseau de points de mesure sol sur la période 1975-2004. Les séries de pluie journalières ont été fournies par la Division Technique Générale (EDF - DTG). Les données de températures maximum et minimum journalières de l'air (source Météo France) permettent d'accéder à une moyenne journalière et de calculer l'évapotranspiration potentielle (ETP) journalière, selon une formulation inspirée de Thornthwaite. En complément, une température moyenne journalière pour la France est calculée à partir de la base de données SAFRAN (Quintana-Segui *et al.*, 2008).

Les séries de débits journaliers sont issues de la banque nationale de données pour l'hydrométrie et l'hydrologie (<http://www.hydro.eaufrance.fr/>). Des chroniques et mesures complémentaires ont été fournies par EDF - DTG. Pour évaluer l'impact de l'évolution du climat sur le régime hydrologique de l'Ariège, et ainsi projeter l'état des ressources indépendamment des pratiques liées à l'hydroélectricité et au soutien d'étiage, une série de débits naturels a été reconstituée à Foix. Cette opération de « renaturalisation » effectuée à partir des débits observés influencés repose sur un bilan comptable minutieux à l'aval de chaque ouvrage hydraulique des volumes transférés en dehors du ou vers le bassin (débits turbinés au droit de la station, débits évacués en crue par les ouvrages de décharge, débits réservés et débits perdus par fuite au travers du barrage) et accumulés dans la retenue.

Les contours des bassins versants et les différents points de mesure sont reportés en Figure 1.

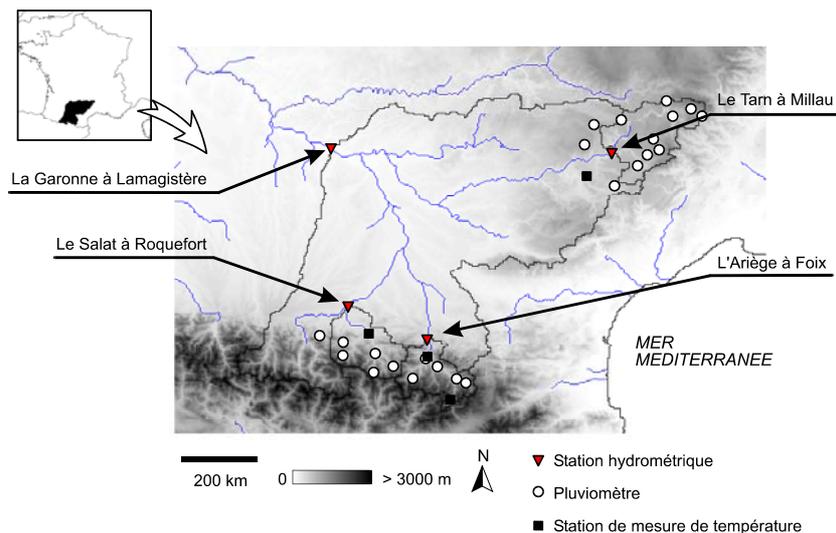


Figure 1 : Bassins étudiés et localisation des stations hydro-météorologiques

RESTITUTION DU PASSE PAR MODELISATION

Le modèle pluie-débit CEQUEAU

CEQUEAU est un modèle hydrologique conceptuel spatialisé développé par l'Institut National de la Recherche Scientifique Eau Terre et Environnement du Canada (Morin *et al.*, 1981). Il est utilisé par EDF R&D depuis la fin des années 1990 pour des études de changements climatiques sur de grands bassins français (Hendrickx, 2001 ; Manoha *et al.*, 2008). CEQUEAU fournit en sortie des chroniques de débit en différents points considérés comme exutoires, à partir de séries de pluie et de température de l'air. Pour la mise en oeuvre du modèle, les bassins versants sont discrétisés en mailles élémentaires. A chaque maille, sont associées la pluie et la température de la station la plus proche, affectées de coefficients fonctions des écarts en altitude entre la maille et la station météorologique. La fonction de production estime les différentes composantes du bilan hydrologique sur chaque cellule élémentaire et à chaque pas de temps. Une fonction de transfert régit ensuite les écoulements de maille en maille de l'amont à l'exutoire selon le réseau hydrographique défini par la topographie.

Qualité des reconstitutions

L'utilisation de ce modèle requiert une phase de calage des paramètres utilisés par les fonctions internes. Ceci est réalisé par optimisation pour adapter la structure aux spécificités du bassin étudié. Le choix des valeurs des paramètres s'appuie sur deux critères numériques, qui mesurent de manière agrégée la différence entre la sortie du modèle et les valeurs mesurées de débit : le critère de Nash et Sutcliffe (1970) calculé sur les débits $Nash(Q)$ et le même critère calculé sur le logarithme de la quantité $Q(t) + \overline{QA}/40$ où $Q(t)$ et \overline{QA} sont respectivement le débit observé à l'instant t et la moyenne des débits sur la période d'étude. Ce deuxième critère $Nash(\ln(Q))$ met davantage l'accent sur la restitution des basses eaux que le critère de Nash sur les valeurs brutes.

La procédure d'évaluation est celle de calage –contrôle (Klemeš, 1986). La chronique de débit est scindée en deux portions de longueurs sensiblement égales, la première portion est utilisée pour caler le modèle ; les paramètres obtenus sont ceux conservés sur la seconde portion dite « de contrôle » pour la validation. De la même manière, le calage du modèle est réalisé sur la deuxième sous-série et on

applique le modèle sur la première. Finalement, nous obtenons des chroniques simulées sur deux périodes indépendantes que nous comparons aux observations. Ainsi, nous mesurons les capacités du modèle à reproduire les débits dans une configuration inédite. Le pas de temps choisi pour l'étude est la journée. Les résultats concernant cette phase de calage – contrôle sont donnés dans le Tableau 1 et la Figure 2.

Dans l'ensemble le modèle restitue assez bien les débits sur les bassins versants étudiés. Le modèle appliqué au Tarn à Millau est le plus performant au sens des critères choisis. Le fait de n'avoir quasiment aucun stock de neige sur ce bassin explique grandement ce très bon résultat. Les modèles restituent globalement bien les étiages même s'il semble y avoir une légère surestimation des bas débits pour les bassins du Tarn à Millau et du Salat à Roquefort.

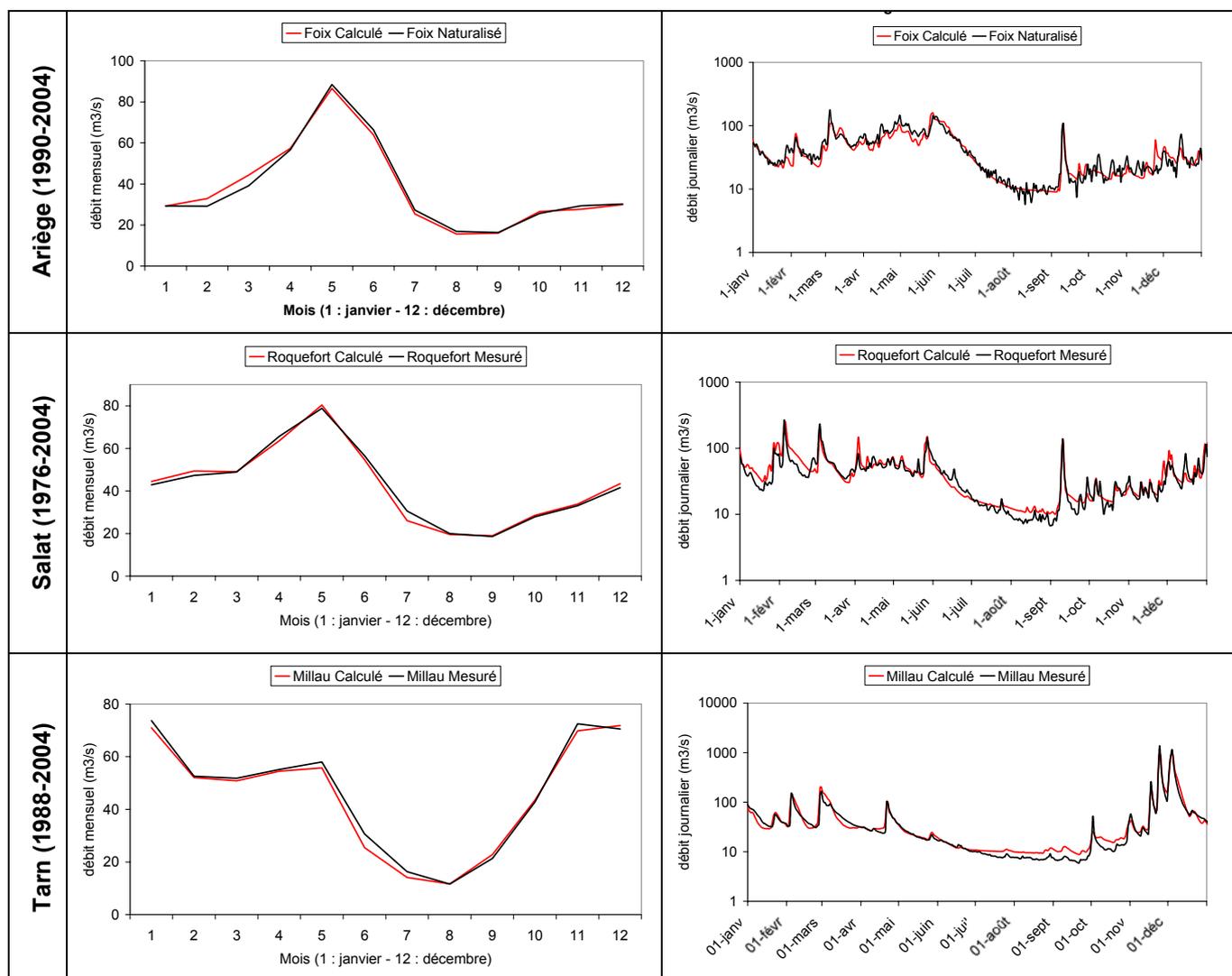


Figure 2 : Débits mensuels interannuels sur la plus longue période de calage possible et débits journaliers de l'année 2003 du Tarn à Millau, du Salat à Roquefort et de l'Ariège à Foix (noir : débits observés et rouge : débits calculés par le modèle)

Bassin	Calage		Contrôle			
L'Ariège à Foix (débit naturalisé)	1989-1996	\overline{QA} Mes/ \overline{QA} Calc	0.981	1997-2004	\overline{QA} Mes/ \overline{QA} Calc	1.073
		Nash (Q)	0.785		Nash (Q)	0.821
		Nash (ln(Q))	0.828		Nash (ln(Q))	0.882
	1997-2004	\overline{QA} Mes/ \overline{QA} Calc	1.002	1989-1996	\overline{QA} Mes/ \overline{QA} Calc	0.916
		Nash (Q)	0.831		Nash (Q)	0.762
		Nash (ln(Q))	0.881		Nash (ln(Q))	0.824
Le Salat à Roquefort	1975-1989	\overline{QA} Mes/ \overline{QA} Calc	1.027	1990-2004	\overline{QA} Mes/ \overline{QA} Calc	0.975
		Nash (Q)	0.812		Nash (Q)	0.769
		Nash (ln(Q))	0.899		Nash (ln(Q))	0.885
	1990-2004	\overline{QA} Mes/ \overline{QA} Calc	0.981	1975-1989	\overline{QA} Mes/ \overline{QA} Calc	1.033
		Nash (Q)	0.828		Nash (Q)	0.787
		Nash (ln(Q))	0.890		Nash (ln(Q))	0.896
Le Tarn à Millau	1987-1995	\overline{QA} Mes/ \overline{QA} Calc	1.002	1996-2004	\overline{QA} Mes/ \overline{QA} Calc	0.947
		Nash (Q)	0.936		Nash (Q)	0.925
		Nash (ln(Q))	0.934		Nash (ln(Q))	0.941
	1996-2004	\overline{QA} Mes/ \overline{QA} Calc	1.006	1987-1995	\overline{QA} Mes/ \overline{QA} Calc	1.055
		Nash (Q)	0.946		Nash (Q)	0.916
		Nash (ln(Q))	0.946		Nash (ln(Q))	0.925

Tableau 1 : Débits moyens mesurés et calculés par le modèle, valeurs du critère de Nash sur les débits et les logarithmes des débits en période de calage et contrôle pour les bassins du Tarn à Millau, du Salat à Roquefort et de l'Ariège à Foix.

LES SCENARIOS CLIMATIQUES ENVISAGES

L'approche classique pour réaliser une étude d'impact consiste à alimenter les modèles hydrologiques en s'appuyant sur les prédictions des GCMs. Une autre démarche est adoptée ici : les séries alimentant les modèles sont construites de manière stochastique à partir d'observations. Le générateur choisi (Lall et Sharma, 1996 ; Harrold *et al.*, 2003) réalise un ré-échantillonnage par proches voisins. Plaçons nous au $J^{\text{ème}}$ jour de l'année de simulation, pour lequel les p valeurs de pluie et de températures sont connues sur les sites d'intérêt ; nous recherchons alors les p valeurs pour $J+1$. Ce p -uplet est obtenu comme suit :

- les situations sur une fenêtre temporelle centrée autour des jours $n^{\circ}J$ des années d'observation disponibles sont extraites ;
- la ressemblance entre ces situations et le jour J est mesurée au travers d'une distance globale entre le vecteur considéré et ceux des situations extraites ;
- finalement, sur la base de la distance, seules les K plus proches, $i=1, \dots, K$ sont conservées ;
- chaque p -uplet ainsi sélectionné i est affecté d'une probabilité conditionnelle de tirage (\sim inverse de la distance, de telle sorte que les situations les plus proches ont plus de chance de sortir) ;
- un voisin i^* est ensuite choisi aléatoirement dans la liste des K candidats potentiels ;
- les valeurs de la journée suivante i^*+1 définissent celles du p -uplet du jour $J+1$;
- le processus est réitéré autant de fois que nécessaire.

Le tirage simultané dans les p séries permet de préserver la liaison spatiale entre sites et la cohérence entre les variables météorologiques. Le critère d'analogie permet lui de reconstituer la dynamique

temporelle. Il est possible de conditionner le générateur de telle sorte qu'il privilégie des voisins dans les mois les plus chauds, créant ainsi une chronologie représentative d'un climat plus chaud (Sharif et Burn, 2006).

Dans le cadre de notre application, la fenêtre temporelle de sélection est de 60 jours centrée sur le jour $n^{\circ}J$, $K=30$ voisins sont sélectionnés et $p=33$ chroniques sont générées ; il s'agit des 8 séries de températures minimales et maximales des quatre stations météorologiques, des pluies aux 24 postes de la Figure 1 et de la température journalière moyenne représentative de la France métropolitaine, calculée à partir de la base de données SAFRAN. Nous avons considéré cinquante réalisations de 29 ans représentatives du climat sur la plus longue période commune août 1975 - juillet 2004 ; cet ensemble est désigné dans la suite par « ClimRef » (Figure 3).

Deux climats plus chauds sont simulés avec deux biais distincts dans la procédure de sélection des voisins. Ainsi le premier exercice de simulation conduit à sélectionner 50% des K candidats potentiels du mois M dans les huit mois M parmi les plus chauds ; il résulte des températures mensuelles moyennes sur la région supérieures de 0.85°C à celles de la période 1975-2004 (« Clim1 »). Dans le second exercice, les deux mois M les plus chauds concentrent 50% des K candidats du mois M ; la hausse des températures atteint 1.25°C (« Clim2 »).

La Figure 4 relative à Clim2 montre que :

- le biais dans le ré-échantillonnage conduit à une pluviométrie moins abondante sur les Pyrénées (cf. la station de Pradières), tandis que sur le secteur du Massif Central (cf. la station de Montvert), les étés simulés sont certes plus secs mais les automnes peuvent enregistrer des cumuls mensuels importants du fait d'épisodes cévenols toujours présents dans le panier de situations candidates ;
- corrélativement à la diminution d'épisodes pluvieux sur les Pyrénées, la variabilité mesurée par l'écart-type des précipitations journalières est plus faible sous climat plus chaud que celle prévalant dans la période 1975-2004. Le signal température présente peu de modification en termes de variabilité captée à l'échelle mensuelle.

Les mêmes tendances sont perceptibles pour Clim1.

LES IMPACTS SUR LE REGIME DES EAUX

Les 50 simulations de 29 ans Climref, Clim1 et Clim2 ont alimenté le modèle CEQUEAU sur les trois bassins (Figure 5). Nous en retenons une distribution des débits mensuels de référence prenant en compte la variabilité du climat actuel. Les écoulements annuels des deux cours d'eau pyrénéens diminuent (de l'ordre de -15% pour Clim1 et -20% pour Clim2). Plus en détail, l'Ariège à Foix voit ses débits d'hiver légèrement croître (la part des précipitations liquides est plus abondante) et des débits de fonte de printemps diminuer (le manteau neigeux est moins épais). Les débits estivaux calculés sur la période juin-août obtenus s'effondrent de l'ordre de -20% pour Clim1 et -30% pour Clim2 conséquence d'une évapotranspiration accrue. Sur le bassin du Tarn à Millau, en revanche, le module est stable : la chute des débits estivaux est compensée par des débits d'hiver accrus.

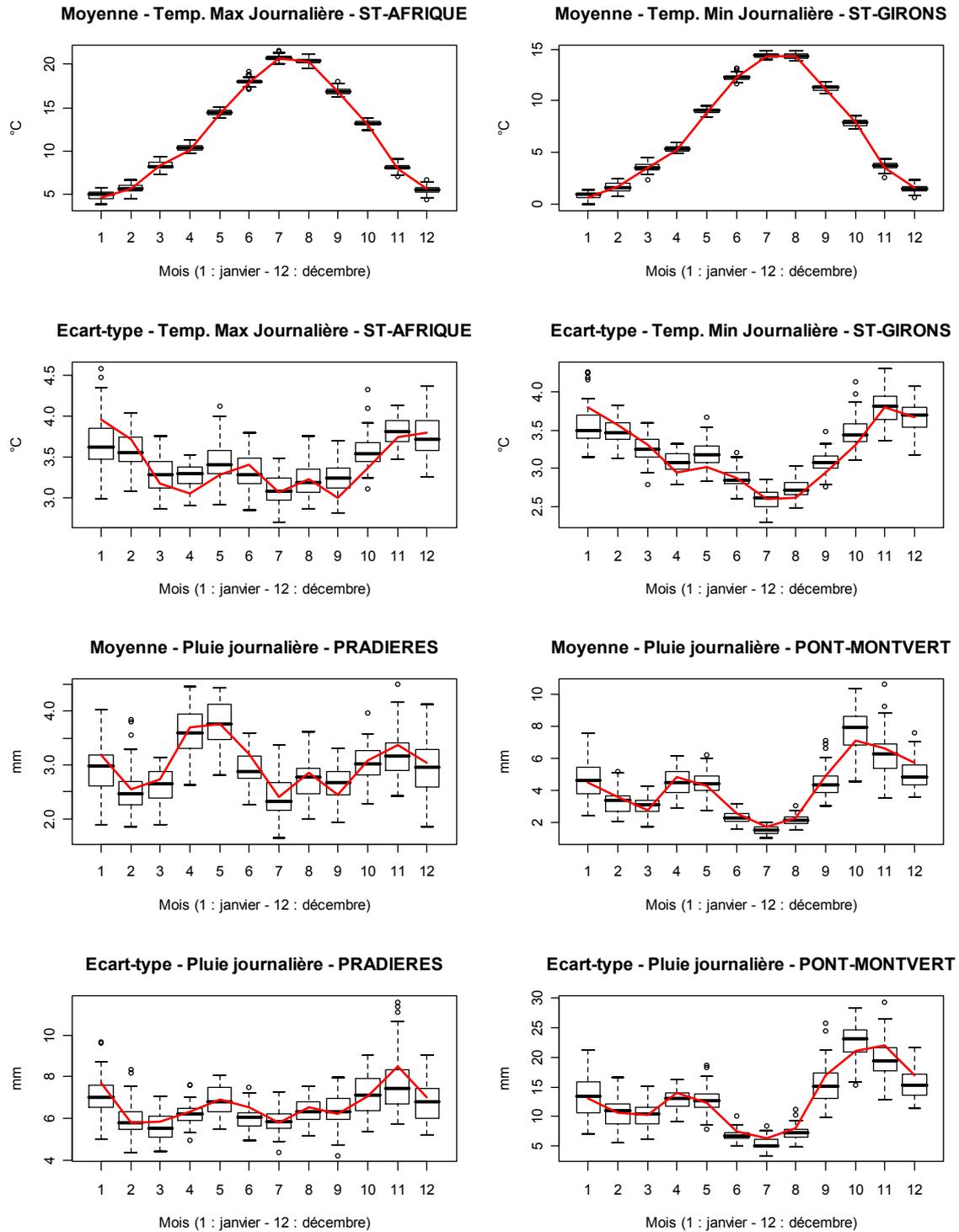


Figure 3 : Caractéristiques mensuelles simulés par ré-échantillonnage selon l’algorithme KNN sans biais (en rouge : données de référence sur la période 1975-2004), exemples de restitution sur quatre stations réparties dans le Massif Central (St-Afrique et Pont-Montvert) et dans les Pyrénées (St-Girons et Pradières). Le rectangle est défini par les premier et troisième quartiles et coupé par la médiane, la longueur des moustaches correspond à 1,5 fois l’écart interquartile

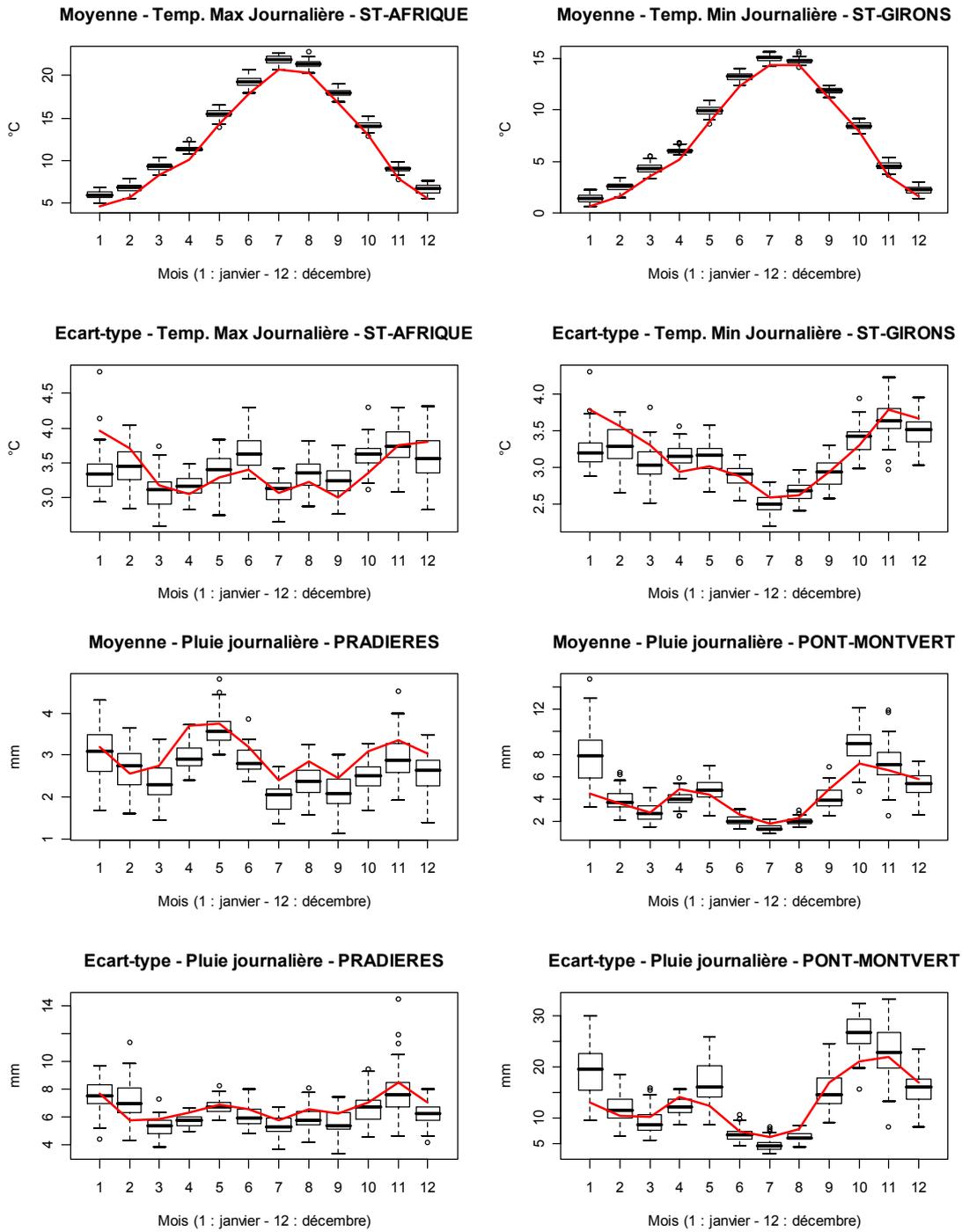


Figure 4 : Mêmes graphiques qu'en Figure 3 pour l'exercice Clim2.

Pour évaluer plus en détail les conséquences sur la gestion des eaux, nous avons examiné les fréquences d'apparition des crises et leur persistance. Dans le cadre spécifique des étiages, ces situations entraînent des procédures de restrictions et de limitations des usages. Elles correspondent à des séquences de débits inférieurs à une valeur réglementaire S . Deux variables proposées par (Loucks, 1997) participent au diagnostic :

- la fiabilité F , proportion de valeurs au-dessus du seuil S ; F renseigne la probabilité d'observer le système dans un état satisfaisant ;
- la résilience R , définie dans la littérature comme l'inverse de la durée moyenne des épisodes sous le seuil. Nous lui avons préféré un indicateur basé sur la durée médiane des épisodes L_{med} , statistique plus robuste : $R = 1/L_{med}$. R quantifie la capacité du système à revenir dans un état satisfaisant.

Le Plan de Gestion d'Etiage (PGE) Garonne-Ariège établi en février 2004 fournit des valeurs pour S au travers des Débits Objectifs d'Etiage (DOE) spécifiés en différents points du réseau hydrographique. Le DOE est la « valeur de débit fixée [...] au-dessus de laquelle sont assurés la coexistence normale de tous les usages et le bon fonctionnement naturel du milieu naturel aquatique [...]. Ce débit doit, en conséquence, être garanti chaque jour de chaque année ». Il est proche du débit moyen sur 10 jours minimal annuel $VCN10$ de fréquence quinquennale sèche, dans une configuration naturelle de bassin versant. Nous avons donc fixé en conséquence la valeur de S : $8.5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ pour le Salat à Roquefort et $8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ pour le Tarn à Millau et pour l'Ariège à Foix (ajustement à la loi log normale).

Les valeurs pour les différents exercices sont présentées dans le Tableau 2. Ces statistiques donnent une vision différente de celle fournie par les débits mensuels. Tout d'abord, il est possible de comparer les valeurs observées (Obs.) sur la période de calage du modèle hydrologique aux valeurs simulées (Rec.) sur cette même période et sur la période 1975-2004 entre parenthèses. Nous pouvons constater que la fiabilité est relativement bien prédite par CEQUEAU, avec une valeur F élevée pour le Salat et le Tarn et un peu plus faible pour l'Ariège. Pour la résilience, CEQUEAU restitue la hiérarchie observée entre les bassins, cependant, les valeurs restituées sont plus faibles : elles révèlent des séquences de crise plus longues. Le modèle peine à reproduire des oscillations autour du seuil de référence.

Dans le Tableau 2 nous avons résumé les valeurs des trois climats, par la médiane en gras, encadrée par les deux quartiles empiriques sur la base des 50 réalisations. Un climat plus chaud entraîne des crises plus longues. Le Tarn est hors situation de crise 99% du temps et ce chiffre reste constant quelle que soit la hausse de température. L'Ariège est le bassin le plus sensible. Le débit journalier est inférieur au $VCN10$ de fréquence quinquennale sèche 10% du temps pour le climat le plus extrême, ce qui signifie que la proportion de jours de crise est multipliée par deux. Le Salat est un bassin intermédiaire. Pour ce qui concerne la résilience, les valeurs évoluent à la baisse avec la hausse des températures, signe d'une augmentation de la durée des épisodes sous le seuil. Il faut noter un écart important entre la résilience observée et celle reconstituée via le modèle pour l'Ariège. Malgré tous les efforts de reconstitution d'un débit quasi-naturel, des oscillations parasites persistent d'où une durée médiane sous le seuil de 1 jours, et une valeur de 1 pour la résilience.

Sur la base de ces deux indicateurs, ce sont les bassins à composante neigeuse qui évoluent le plus. Nous pouvons soupçonner le fait qu'outre une réduction des apports, les bassins subissent une modification profonde de régime (caractère nival moins prononcé) ; le Tarn est actuellement pluvial méditerranéen, il le demeure et ne donc subit qu'un contre-coup de la modification du climat.

		Obs	Rec.	ClimRef	Clim1	Clim2
FIABILITE	L'Ariège à Foix	95.8	96.5 (98.1)	97.3 [96.5 ; 98.2]	93.5 [91.9 ; 95.0]	90.6 [88.5 ; 92.9]
	Le Salat à Roquefort	97.9	99.4 (99.4)	99.0 [98.7 ; 99.5]	97.0 [95.7 ; 98.1]	94.9 [92.9 ; 96.6]
	Le Tarn à Millau	97.7	99.1 (99.3)	99.8 [99.1 ; 100.]	99.3 [98.4 ; 99.8]	98.8 [98.2 ; 99.7]
RESILIENCE	L'Ariège à Foix	1.00	0.20 (0.18)	0.13 [0.11 ; 0.17]	0.12 [0.11 ; 0.15]	0.11 [0.10 ; 0.13]
	Le Salat à Roquefort	0.50	0.18 (0.17)	0.20 [0.16 ; 0.29]	0.20 [0.16 ; 0.25]	0.17 [0.16 ; 0.22]
	Le Tarn à Millau	0.17	0.04 (0.07)	0.16 [0.10 ; 1.00]	0.16 [0.07 ; 0.33]	0.14 [0.09 ; 0.18]

Tableau 2 : Résultats des exercices de modélisation sur les critères de fiabilité et de résilience

QUELLE GESTION POUR LE FUTUR ?

Peu d'études ont été réalisées à ce jour sur le devenir de l'hydroélectricité sous changement climatique à une échelle locale. Une des plus récentes (Schaepli *et al.*, 2007) porte sur le fonctionnement de la retenue de Mauvoisin (Alpes Suisses). Elle s'est inspirée des travaux américains de Payne *et al.* (2004) et de Christensen *et al.* (2004). Un modèle hydrologique représente les apports naturels dans le réservoir. Le débit turbiné du jour à l'aval de l'ouvrage est la somme d'une composante déterministe, *i.e.* la moyenne différenciée selon la période de l'année (en période de fonte ou non) et selon le jour de la semaine (dans le week-end ou non) et d'une composante stochastique, tirée aléatoirement dans une distribution statistique. Les paramètres des modèles sont calés sur le passé. Le modèle hydrologique est alimenté par différents scénarios climatiques et les auteurs vérifient le respect des règles de marnage du plan d'eau dans les prochaines décennies.

La représentation des influences sur le bassin de l'Ariège proposée ici est un peu différente. En effet, l'hypothèse de débits en sortie de retenue conditionnés pour l'essentiel par le hasard nous paraît trop simpliste. En France, la production hydroélectrique vient en soutien de celle d'origine nucléaire pour garantir l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité, mais aussi pour assurer la sécurité du système en permettant l'ajustement temps réel de la production à la consommation. Le placement de l'eau dans l'année vise en particulier à disposer d'une réserve maximale face aux plus grandes demandes de consommation comme les vagues de froid intense en lien avec le chauffage électrique.

Pour représenter ces éléments nous avons considéré un indicateur de température comme marquant la saisonnalité de la consommation électrique. Pour ce besoin, nous avons constitué un premier vecteur (*P*) considéré constant lorsque la température moyenne France est supérieure à 15 °C et égal à l'écart à 15°C quand la température moyenne France de l'air passe sous ce seuil. Ce vecteur *P* caractérise l'intérêt saisonnier à faire appel à l'hydroélectricité. On peut noter que cette définition, ne tient pas compte de l'incidence que peut avoir le développement de la climatisation en France. L'hypothèse que la climatisation a un effet moindre que le chauffage électrique sur la consommation d'électricité est vérifiée aujourd'hui mais sera probablement à ré-interroger dans un contexte de réchauffement climatique.

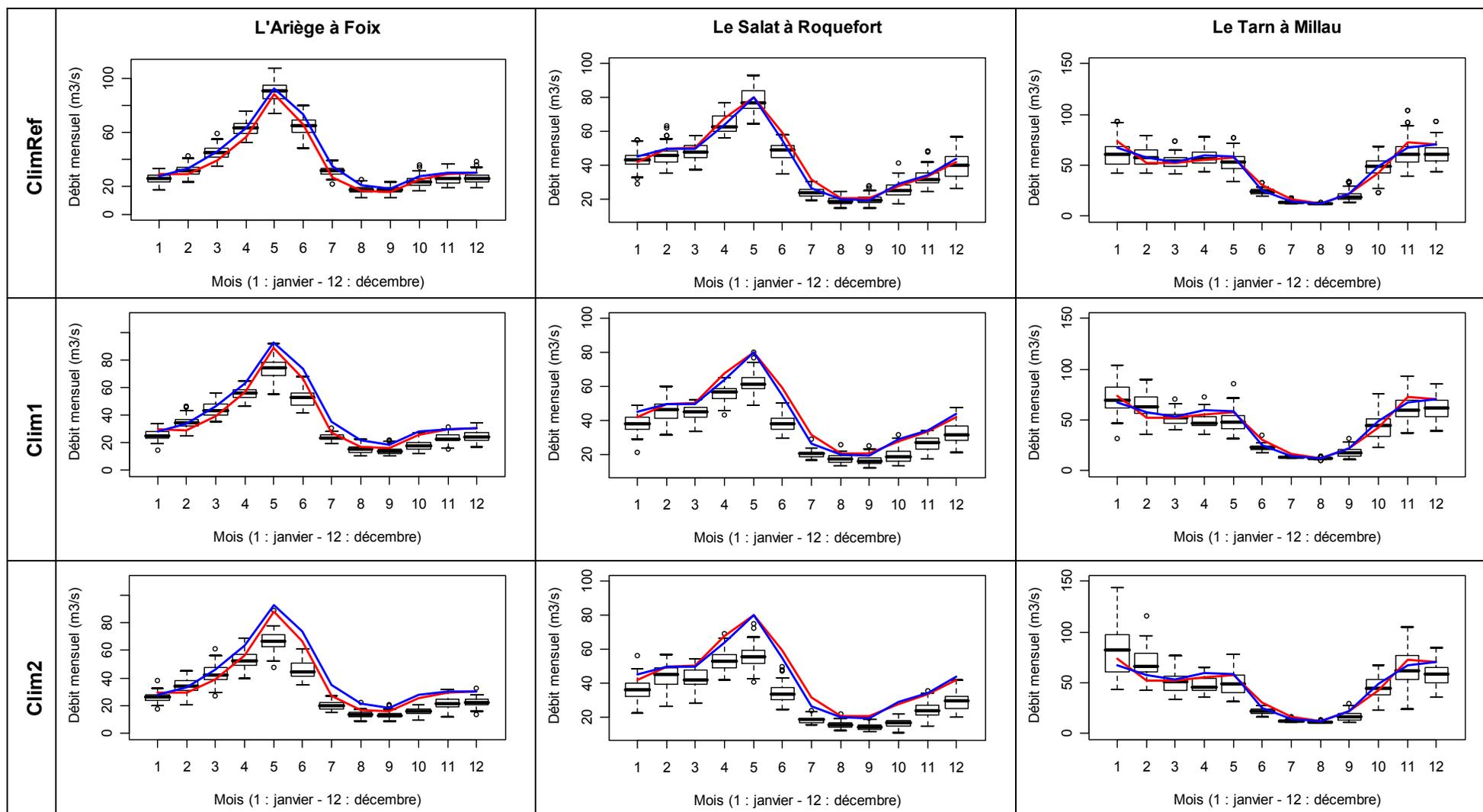


Figure 5 : Restitutions du modèle CEQUEAU sur les trois bassins tests pour les différents climats simulés (en rouge : données observées qui ont participé au calage du modèle, en bleu : valeurs issues de CEQUEAU sur la période 1975-2004)

La question classique d'un gestionnaire d'une réserve hydroélectrique peut s'exprimer à tout instant t par la question suivante : « ai-je plus d'intérêt à turbiner aujourd'hui ou à réserver mon volume d'eau pour une utilisation ultérieure ? ». On sent bien que la réponse à cette question sera conséquence à la fois de l'expression immédiate des besoins du système électrique, de l'anticipation des besoins ultérieurs de ce même système mais aussi de l'espérance d'apport à la retenue ou encore des contraintes s'appliquant aux retenues comme par exemple des objectifs de soutien d'étiage.

Usuellement, la résolution d'une telle question, ou plutôt la recherche de la commande optimale se fait en s'appuyant sur les bases théoriques de la programmation dynamique (Bellman, 1957 ; Borne *et al.*, 1990), et notamment le principe de Bellman qui s'exprime dans sa forme discrète par : « Dans un problème de décision, tout sous ensemble de décisions optimales est optimal dans les mêmes conditions ».

Pour rechercher le chemin optimal d'un état initial de stock A , à un état final pour un horizon donné, on détermine tout d'abord la stratégie de gestion du stock. Elle vise à définir les valeurs d'usage de l'eau pour tous les instants t de la simulation et ce quel que soit l'état du stock. Cette valeur permet notamment l'arbitrage entre l'appel immédiat par le système électrique et l'intérêt de réserver le volume d'eau pour un usage ultérieur.

L'élaboration de la stratégie se traduit en programmation dynamique par la constitution de la matrice des valeurs de Bellman (VB) telle que :

$$VB(t, Vstock) = \max_{Vturb} [P(t) \cdot Vturb + VB(t+1, Vstock - Vturb + Ventrant)]$$

avec $Vstock$: volume dans la retenue ; P : vecteur d'intérêt à turbiner ; $Vturb$: volume journalier turbiné ; $Ventrant$: volume journalier entrant dans la retenue

La valeur de Bellman traduit l'utilité économique à l'instant t d'une réserve de volume $Vstock$ et pour l'horizon de temps final que l'on se fixe. Les valeurs d'usage sont alors définies comme les dérivées par rapport à l'état des valeurs de Bellman. Elles traduisent l'intérêt à faire croître le stock et par là même l'intérêt à garder l'eau pour plus tard.

Pour notre application plusieurs hypothèses de modélisation ont été prises :

- l'ensemble des réserves de l'Ariège à Foix a été agrégé de manière à limiter la dimension du problème à la gestion d'un seul stock ;
- on se place en avenir connu, c'est-à-dire qu'on fait l'hypothèse que nos apports entrants et la température d'air servant à la construction du vecteur d'intérêt P sont parfaitement connus ;
- une contrainte de soutien du débit à Foix à la valeur objectif de 8 m³/s définie précédemment est aussi intégrée dans notre modélisation.

La simulation de la trajectoire de cette macro réserve est ensuite réalisée sur la base des valeurs d'usage calculées qui permettent à tout instant et quel que soit l'état de la réserve d'arbitrer entre l'utilisation immédiate ou ultérieure de l'eau.

Ces choix de modélisation étant faits, il convient dans une première étape de vérifier le réalisme de cette représentation dans les situations passées, notamment l'influence saisonnière qu'exerce l'hydroélectricité sur la ressource naturelle. Les débits mensuels influencés et la trajectoire moyenne de la macro-réserve sont donc calculés en exploitant les relations établies plus haut alimentées par les débits et températures des 50 simulations de ClimRef (Figure 6 et Figure 7 courbe rouge). Le modèle de gestion est globalement satisfaisant, il fournit des débits mensuels influencés sous ClimRef comparables à ceux observés. Il restitue bien la phase de stockage au moment de la fonte des neiges et la phase de déstockage pour la production d'électricité en hiver. La réserve est un peu sollicitée en août sans doute en lien avec l'objectif de soutien d'étiage mis dans le modèle. Ces résultats cohérents nous ont permis d'exploiter le modèle de pression sous climat modifié.

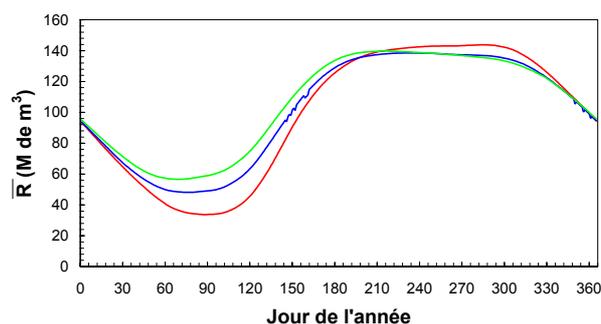
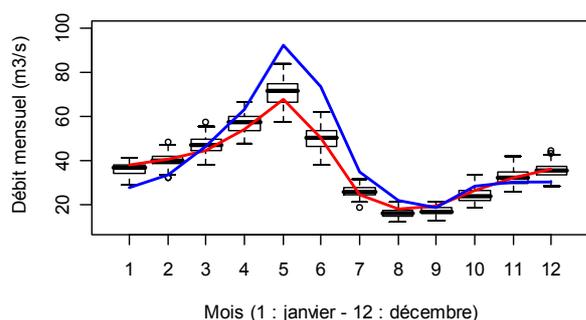


Figure 6 : Débits mensuels naturels reconstitués issus du modèle sur la période 1975-2004 (en bleu) et influencés sur la période de calage (en rouge), les box plots représentent les résultats sur les 50 simulations de ClimRef

Figure 7 : Règle de gestion, issue de l'analyse des débits naturels reconstitués et observés influencés de l'Ariège à Foix (en rouge : ClimRef ; en bleu : Clim1 ; en vert : Clim2).

Les débits mensuels influencés et la trajectoire moyenne de la macro-réserve sont donc calculés en exploitant les relations établies plus haut alimentées par les débits et températures des 50 simulations de Clim1 et Clim2 (Figure 7 et Figure 8).

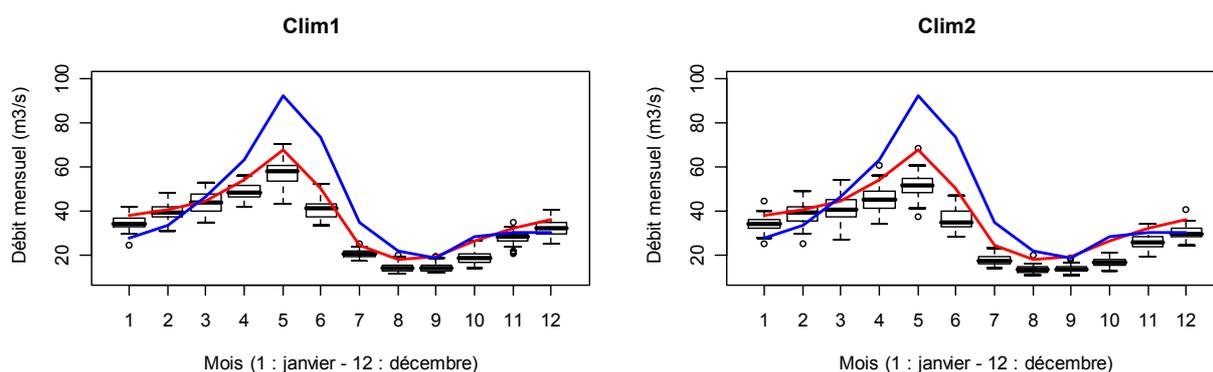


Figure 8 : Débits mensuels naturels reconstitués issus du modèle sur la période 1975-2004 (en bleu) et influencés sur la période de calage (en rouge), les box plots représentent les résultats sur les 50 simulations des climats modifiés

Force est de constater sous climat perturbé que la fluctuation de la réserve est moindre, conséquence d'une réduction des apports. On observe également que le remplissage de la macro-réserve semble avoir lieu plus tôt dans l'année sous climat modifié, conséquence de l'avancée de l'onde de fonte. Les soutiens d'étiage semblent également plus forts (déstockage l'été observé sur la Figure 7) sous climat modifié en cohérence avec les résultats obtenus sur la fiabilité.

CONCLUSIONS

Les résultats préliminaires montrent des résultats très satisfaisants en termes de modélisation hydrologique dans une configuration naturelle et sous influence. L'analyse de sensibilité aux perturbations du climat montre des évolutions particulièrement marquées sur les bassins pyrénéens, certainement du fait d'une fonte avancée du manteau neigeux et des précipitations moins abondantes. Le Tarn reste relativement stable grâce à des pluies d'automne et d'hiver toujours abondantes. En l'état actuel de nos travaux, la cohérence des exercices de simulations de climat devra être vérifiée en s'appuyant sur les sorties des modèles climatiques (scénarios de l'AR4).

Des indicateurs de défaillance ont été calculés sur les chroniques naturelles. Ils permettent d'appréhender les risques d'apparition des crises et leur persistance ; bien évidemment, ils sont dépendants de la qualité de la modélisation et du réalisme des forçages au pas de temps journalier.

Les analyses des sous bassins apporteront des éléments de comparaison et permettront de mesurer les bassins les plus sensibles. Un autre point clé sera la combinaison des contributions des différents secteurs, des déséquilibres locaux pourraient bien apparaître malgré un comportement jugé globalement satisfaisant au niveau de la Garonne à Lamagistère.

Le dernier volet est consacré aux usages sur le bassin. Nous avons mis en place une méthode sur le bassin de l'Ariège. L'existence de chroniques observées et renaturalisées a permis d'appréhender la gestion des ouvrages. Le remplissage et la vidange des stocks d'eau sont gouvernés par la production d'électricité et le soutien des étiages. Le fonctionnement a été approché par un modèle de pression, alimenté par des variables internes (apports et niveaux de remplissage) et climatiques (température France). Le modèle a été jugé satisfaisant. En supposant les paramètres de ce modèle stationnaires, nous l'avons appliqué aux scénarios futurs. La réduction des apports naturels entraîne une diminution de la fluctuation de la réserve agrégée. Il restera à vérifier la capacité de généralisation d'une telle approche sur les autres secteurs où l'influence de l'irrigation pourra dominer, puis à combiner l'ensemble de ces influences à l'échelle d'un grand bassin versant comme la Garonne.

REMERCIEMENTS

Ces travaux contribuent au projet IMAGINE2030 dans le cadre de l'appel à proposition « Risque, Décision, Territoire » lancé en 2006. Merci à l'ensemble des partenaires du projet et à Météo-France pour la mise à disposition de la base de données SAFRAN pour les besoins de recherche.

REFERENCES

- Bellman R. (1957). Dynamic Programming. Princeton Univ. Press.
- Borne P., Dauphin-Tanguy G., Richard J.P., Rotella F. et Zambetakis I. (1990). Commande et Optimisation des Processus. Ed. Technip, 303 pages.

- Caballero Y., Voirin-Morel S., Habets F., Noilhan J., Le Moigne P., Lehenaff A. et Boone A. (2005). Hydrological sensitivity of the Adour-Garonne river basin to climate change. *Water Resour. Res.*, 43, 10.1029/2005WR004192
- Christensen N.S., Wood A.W., Voisin N., Lettenmaier D.P. et Palmer R.N. (2004). The effects of climate change on the hydrology and water resources of the Colorado River basin. *Clim. Change*, 62(1-3): 337-363.
- Ducharne A., et 22 coauteurs (2004). Influence du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique et biogéochimique du bassin de la Seine, Rapport final du projet GICC-Seine, 60 pages.
- Harrold T.I., Sharma A. et Sheather S.J. (2003). A nonparametric model for stochastic generation of daily rainfall occurrence. *Water Resour. Res.*, 39(10), 10.1029/2003WR002182
- Hendrickx F. (2001). Impact hydrologique d'un changement climatique sur le bassin du Rhône. *Hydroécol. Appl.*, 13(1), 77-100.
- Klemeš V. (1986). Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrol. Sci. J.*, 31(1): 13-24.
- Lall U. et Sharma A. (1996). A nearest neighbor bootstrap for resampling hydrologic time series. *Water Resour. Res.*, 32(3): 679-693.
- Leblois E. et al. (2004). Projet GICC-Rhône. Rapport final, octobre 2004, 184 pages.
- Loucks P. (1997). Quantifying trends in system sustainability. *Hydrol. Sci. J.*, 42(4): 513-530.
- Manoha B., Hendrickx F., Dupeyrat A., Bertier C. et Parey S. (2008). Impact des évolutions climatiques sur les activités d'EDF (projet IMPEC). *La Houille Blanche* N°02-2008, 10.1051/lhb:2008018
- Morin G., Couillard D., Cluis D., Jones H.G. et Gauthier J.M. (1981). Prédiction des températures de l'eau en rivière à l'aide d'un modèle conceptuel. *Hydrol. Sci. J.*, 32(1) : 31-41.
- Payne J.T., Wood A.W., Hamlet A.F., Palmer R.N. et Lettenmaier D.P. (2004). Mitigating the effects of climate change on the water resources of the Columbia river basin. *Clim. Change*, 62(1-3): 233-256.
- Nash J.E. et Sutcliffe J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. 1. A discussion of principles. *J. Hydrol.*, 10, 257-274.
- Quintana-segui P., Le Moigne P., Durand Y., Martin E., Habets F., Baillon M., Franchisteguy L., Morel S. et Noilhan J. (2008). The SAFRAN atmospheric analysis : Description and validation. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(1) : 92–107, doi: 10.1175/2007JAMC1636.1.
- Schaefli B., Hingray B. et Musy A. (2007). Climate change and hydropowerproduction in the Swiss Alps: quantification of potential impacts and related modelling uncertainties. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11, 1191-1205.
- Sharif M. et Burn D.H. (2006). Simulating climate change scenarios using an improved K-nearest neighbor model. *J. Hydrol.*, 325: 179–196.