

E. SAUQUET * E. LEBLOIS * M. HAOND ** D. JOUVE **	EXAMEN DE LA VULNERABILITE DE LA RESSOURCE EN EAU VIS A VIS DES FLUCTUATIONS CLIMATIQUES - Application aux étiages du bassin du Rhône
* Cemagref Unité de recherche Hydrologie-Hydraulique 3 bis quai Chauveau - CP 220 69336 LYON Cedex 09 FRANCE ** Compagnie Nationale du Rhône Direction de l'Ingénierie - Eau et Environnement 2, rue André Bonin 69316 Lyon Cedex 04 FRANCE	Table des matières : RÉSUMÉ MOTS-CLÉS INTRODUCTION 1 Impact d'un changement climatique sur les étiages 2 Secteur d'étude et données hydro-météorologiques 3 Résultats des modélisations en restitution du passé 4 Les scénarios climatiques 5 Impact sur le régime des basses eaux 6 Des indicateurs de fragilité des étiages REMERCIEMENTS BIBLIOGRAPHIE

RÉSUMÉ

Les résultats présentés sont la synthèse des travaux réalisés lors d'un pré-projet soutenu par le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD) lors de l'appel d'offre « Risque Décision Territoire » RDT2003 (Sauquet et al., 2005). Son objectif était de mesurer la sensibilité du régime des basses eaux aux forçages climatiques perturbés sur un ensemble de plusieurs cours d'eau contribuant aux écoulements du Rhône. Ceci a été réalisé à l'aide de modèles hydrologiques globaux pluie-débit avec un calage optimisé sur des critères de ressource.

Différents scénarios de changement climatique mis à disposition librement par la communauté scientifique ont été considérés pour comparaison. Les impacts ont été mesurés au travers de modifications des variables d'étiage classiques. Nous avons également recherché des indicateurs de fragilité des étiages et de défaillance qui permettraient d'évaluer la pérennité d'un système de gestion en place. Une analyse de sensibilité a été engagée autour des points de fonctionnement identifiés par perturbation des données d'entrée afin d'identifier des bassins sur lesquels les apports sont les plus susceptibles d'être diminués, donc établir une échelle de sensibilité entre bassins. La démarche a été appliquée à quatre affluents du Rhône. La variabilité des bassins étudiés est insuffisante pour mesurer ici la pertinence de l'indicateur d'« élasticité » testé. Cet indicateur aurait l'avantage de s'affranchir des scénarios climatiques, encore incertains.

MOTS-CLÉS

Etiage, changement climatique, sensibilité, vulnérabilité

INTRODUCTION

Les années 2003 et 2005 ont été marquées par des étiages sévères généralisés sur le territoire français. Ces événements sont la conséquence de longues périodes de déficit pluviométrique de mars à août 2003 et de septembre 2004 à mars 2005. Ils ont démontré par l'exemple la fragilité de nos hydrosystèmes : les eaux de surface sont fortement sollicitées par des usages multiples et leur rareté est susceptible de déclencher des conflits entre les différents usagers. Le début d'année 2007 est déjà préoccupant avec une pluviométrie légèrement en dessous de la normale entre septembre 2006 et mars 2007 et un déficit en pluie efficace marqué en janvier 2007 (d'après « La situation des disponibilités en eau avant l'étiage 2007 », <http://www.ecologie.gouv.fr/-Secheresse.html>, consulté en mars 2007). L'été prochain pourrait s'inscrire dans la suite des années sèches 2003-2006.

Deux actions complémentaires doivent être engagées pour anticiper les risques d'étiage sévère à court terme par un diagnostic de l'état actuel et également à long terme en dressant une vision du futur.

Des éléments de diagnostic de l'état actuel sont présentés dans les travaux de thèse (Renard, 2006). La question d'une dérive progressive des séries de débit en France due à une modification du climat a été examinée. Les outils statistiques développés ont permis de détecter une tendance à des étiages estivaux plus sévères dans les secteurs pyrénéen et basque. À l'inverse, dans la zone alpine, l'augmentation des températures de l'air semble avoir réduit la quantité d'eau retenue en hiver sous forme de neige, augmentant ainsi les débits sur cette saison. Pour les autres bassins français examinés, le régime des basses eaux semble stationnaire. Des analyses ultérieures restent toutefois nécessaires pour confirmer l'origine purement climatique de ces résultats, les actions humaines étant souvent impliquées dans l'aggravation des étiages. De plus, il est nécessaire de réactualiser les résultats en incorporant les années 2003 à 2006.

Le volet complémentaire consiste à étudier l'impact d'évolutions climatiques sur la ressource en eau par des modélisations, ceci afin d'évaluer des risques de pénurie et de conflit d'usages de la ressource pour les années à venir. Les réponses ne sont pas immédiates du fait du contexte évolutif en terme de pression anthropique et de climat, non maîtrisé par les gestionnaires et qui conduit à une accentuation des tensions. Notre approche s'inscrit dans une démarche d'étude d'impact devenue standard (Carter et al., 1994) :

1. choix d'un modèle pluie-débit efficace ;
2. construction de séries temporelles futures alimentant les modèles hydrologiques à partir des prédictions du climat futur ;
3. application du modèle pluie-débit retenu alimenté par les séries représentatives des climats futurs possibles ;
4. examen des modifications engendrées sur le régime hydrologique par comparaison aux statistiques déduites des observations.

Cette communication propose une revue rapide des études d'impact de changement climatique sur la ressource. Le secteur d'étude, les données hydro-météorologiques, et les outils de modélisation sont ensuite présentés. La performance des modèles pluie-débit est analysée en restitution avant d'appliquer les perturbations suggérées par les scénarios climatiques. Les deux dernières parties sont consacrées aux moyens possibles de mesurer l'impact sur le régime des basses eaux et la vulnérabilité des hydrosystèmes.

1 Impact d'un changement climatique sur les étiages

Nombre d'études d'impact du changement climatique sont relevées dans la littérature scientifique et technique. Pour l'essentiel, les analyses portent sur les débits annuels et mensuels. Les résultats obtenus s'accordent sur une réduction notable de la ressource superficielle en eau à échéance 2050 sur les zones continentales au climat tempéré en moyenne latitude : les étiages sont plus sévères car l'accroissement des précipitations d'hiver est compensé par une augmentation des pertes par évaporation et une réduction des cumuls pluviométriques en période estivale (Arnell, 1999).

En France, Leblois et Margat (1998) ont examiné un affluent de l'Allier, la Dore. Cette étude à vocation pédagogique avait pour but de tester la sensibilité du régime hydrologique à une perturbation réaliste des forçages météorologiques. A cette date, il n'était pas encore question d'introduire les sorties des modèles climatiques. Cette contribution méthodologique jette les bases d'une analyse d'impact sur l'hydrologie de surface. L'expérience GEWEX-Rhône et son prolongement dans le cadre du programme « Gestion des Impacts du Changement Climatique » du MEDD (GICC) mettent en évidence un contraste saisissant entre le nord du bassin du Rhône qui voit ses écoulements annuels amplifiés tandis qu'au sud, les débits annuels sont réduits jusqu'à -40% sur le bassin de l'Ardèche (Leblois et al., 2004). Ces conclusions doivent toutefois être relativisées compte tenu de la faible capacité des modèles à reconstituer les étiages du passé. Sur le bassin Adour Garonne, l'Agence de l'Eau en collaboration avec le CNRM a engagé une réflexion prospective sur les étiages sous changement climatique (Caballero et al., 2004). Une réduction de

11% des débits d'étiage est annoncée à horizon 2050, conséquence d'une diminution des précipitations et d'une augmentation marquée des températures de l'air en été.

De l'ensemble des études d'impact, nous pouvons dégager quelques éléments :

- 1- tous les bassins versants n'ont pas la même sensibilité aux perturbations des forçages climatiques. En effet, « l'état initial » du bassin (régime actuel, étiage d'été ou d'hiver), la géologie et l'occupation du sol sont des éléments qui viennent nuancer les résultats observés à grande échelle. Il convient donc de procéder à des études régionales en prenant soin d'examiner des bassins représentatifs de la variabilité naturelle des régimes rencontrés, si une étude systématique exhaustive n'est pas possible.
- 2- les incertitudes autour des prédictions sont telles qu'une multiplicité de scénarios doit être envisagée pour asseoir un tant soit peu les tendances détectées et pour rendre compte des incertitudes (Prudhomme et al., 2003). En effet, les scénarios de l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), intégrés par une foison de modélisations à grande échelle s'accordent tous sur une hausse de la température moyenne sur le globe, mais la fourchette des valeurs possibles reste large surtout à l'horizon 2100.
- 3- la modélisation distribuée, satisfaisante intellectuellement dans un cadre de compréhension du fonctionnement du bassin, ne fournit pas forcément les meilleurs résultats en reconstitution des étiages. En conséquence, les évolutions futures sur cet aspect ne pourront pas être prédites avec justesse. L'alternative est donnée par une modélisation conceptuelle plus simple qui vise principalement une reconstitution du régime du bassin versant sans chercher à expliciter en détail les processus internes. Cette modélisation reste toujours d'actualité dans nombre d'études d'impact au détriment de modèles physiques plus lourds à mettre en œuvre. A contrario, les modèles conceptuels ne pourront pas suivre les éventuelles auto-adaptations du bassin versant, difficilement appréciables par ailleurs.

1.1 Outils de modélisation

Le modèle pluie-débit est un outil qui permet de simuler les débits en un point donné d'un cours d'eau à partir de la connaissance des précipitations liquides ou solides sur le bassin versant correspondant et du retour potentiel à l'atmosphère via les phénomènes d'évaporation. C'est une représentation très simplifiée du fonctionnement du bassin versant et de la complexité intrinsèque des processus hydrologiques.

Dans notre étude, le bassin sera considéré comme une entité homogène, sans prise en compte de la variabilité spatiale interne de ses caractéristiques (caractère global) et la transformation pluie-débit est décrite par un assemblage simple de réservoirs permettant de simuler la répartition des eaux dans les différents compartiments du cycle de l'eau (caractère conceptuel). Ce choix est guidé en partie par les bons résultats obtenus par Morvan (2000) sur des affluents du Rhône peu influencés par la neige, par comparaison à ceux restitués par un modèle plus complexe.

Quatre versions de modèles pluie-débit de ce type fonctionnant au pas de temps journalier sans leur module de neige ont été testés : GR4J (Perrin, 2002), HBV (Bergström et Forsman, 1973), TOPMODEL (Beven et Kirkby, 1979) et IHACRES (Jakeman et al., 1990). Ils diffèrent par les fonctions mathématiques utilisées représentant la répartition entre les réservoirs et la dynamique des transferts et par le nombre de paramètres à caler.

L'utilisation de ces modèles requiert une phase de calage des paramètres utilisés par les fonctions mathématiques. Ceci est réalisé par optimisation numérique pour adapter la structure aux spécificités du bassin étudié. La démarche à suivre est de rechercher le jeu de paramètres permettant d'obtenir, sur une période où l'on dispose conjointement des chroniques des pluies et débits observés, la chronique des débits simulés la plus proche possible de celle observée.

1.2 Choix des modèles

La procédure d'évaluation est classique, il s'agit de la procédure de calage –contrôle (Klemes, 1986). On scinde la chronique de débit en deux portions de longueurs sensiblement égales, on

utilise alors la première portion pour caler le modèle ; les paramètres obtenus sont ceux utilisés sur la seconde portion dite « de contrôle » pour la validation. De la même manière, on cale le modèle 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 comparerons aux observations. L'efficacité de chaque modèle en contrôle départage les modèles.

Dans la phase de recherche des paramètres optimaux, l'algorithme doit privilégier la reconstitution des débits de certaines phases du régime hydrologique selon l'usage escompté du modèle (prévision des crues, prédétermination des débits d'étiage). Ceci est obtenu au moyen d'une fonction « objectif » ou variable de synthèse qui mesure l'écart entre les débits modélisés et observés en donnant plus de poids aux restitutions dans la gamme d'intérêt. Cette préoccupation était déjà présente dans Arnell et Reynard (1996) qui optimisent leur modèle conceptuel en cherchant à réduire l'erreur quadratique des logarithmes des débits bruts, privilégiant ainsi la reconstitution des eaux moyennes et étiages.

Pour la phase d'évaluation des modèles, nous exploiterons des critères calculés sur les données observées et sorties des modèles :

- le critère de Nash et Sutcliffe (1970) calculé sur débits :

$$C1 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q(t) - Q^*(t))^2}{\sum_{t=1}^n (Q(t) - \overline{Q(t)})^2}$$

où $Q(t)$ et $Q^*(t)$ sont respectivement les débits observé et simulé au jour t , n le nombre total d'observations. $\overline{Q(t)}$ désigne la moyenne des $Q(t)$;

- le critère de Nash calculé sur les racines carrées des débits :

$$C2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (\sqrt{Q(t)} - \sqrt{Q^*(t)})^2}{\sum_{t=1}^n (\sqrt{Q(t)} - \sqrt{\overline{Q(t)}})^2}$$

Tous les aspects du régime hydrologique ont le même poids dans la valeur du critère ;

$$C3 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (\ln(Q(t) + \overline{QA}/40) - \ln(Q^*(t) + \overline{QA}^*/40))^2}{\sum_{t=1}^n (\ln(Q(t) + \overline{QA}/40) - \ln(\overline{Q(t) + \overline{QA}/40}))^2}$$

où \overline{QA} est le module, c'est-à-dire la moyenne des débits observés sur la période d'étude. C3 met davantage l'accent sur la restitution des basses eaux que le critère de Nash sur les valeurs brutes ;

- le rapport des volumes annuels RV qui compare les volumes totaux simulés et observés, cumulés sur l'ensemble de la période de test. Il permet d'évaluer la capacité du modèle à fournir un bilan en eau correct ;
- le rapport des étiages moyens REM : il compare les valeurs des débits moyens observés et simulés, sous le seuil d'un dixième du module et permet d'évaluer la qualité de restitution des volumes en période de faibles débits ;
- le rapport des indices d'écoulement de base $RIEB$: proposé par Lvovitch (1972), c'est un coefficient sans dimension qui permet de quantifier la part lente de l'écoulement total. $RIEB$ compare les valeurs de cet indice calculées sur les séries de débits simulés et observés.

Ces critères prennent en compte toutes les erreurs du modèle sur la période considérée. Pour tous les critères, la valeur 1 correspond à une modélisation parfaite. L'expérience montre que le classement des modèles diffère selon le critère d'efficacité. Pour tirer profit de l'information de chaque critère, nous avons effectué une moyenne arithmétique des valeurs d'efficacité sur les deux sous périodes et calculer les rangs, baptisés score sur les critères. Nous attribuerons un rang à chaque modèle selon le critère (1 : meilleur modèle ; 4 : plus mauvais modèle selon le critère).

Finalement, le jeu de paramètres optimal correspond à celui pour lequel le critère C3 est maximal et le modèle finalement retenu sera celui classé premier selon le score moyen.

2 Secteur d'étude et données hydro-météorologiques

Quatre bassins instrumentés de la partie française du bassin du Rhône peu influencés par la neige ont été étudiés :

- l'Eyrieux aux Ollières (644 km²)
- la Drôme à Loriol (1640 km²)
- le Roubion à Soyans (186 km²)
- l'Azergues à Lozanne (792 km²)

Les séries de débits journaliers sont issues de la base de données HYDROMET Rhône de la CNR et de la banque de données HYDRO du MEDD sur la période 1990-2002.

Les modèles sont alimentés par des chroniques de pluie de bassin, obtenue ici par simple moyenne arithmétique des valeurs observées aux points de mesure. Les données de pluie sont des cumuls journaliers acquis auprès de Météo-France. Les modèles sont peu sensibles aux variations journalières d'évapotranspiration (ETP). Les données d'ETP considérées sont des moyennes décennales interannuelles obtenues d'après la formule de Penman. Un lissage polynomial des valeurs décennales est effectué pour obtenir des valeurs journalières.

Les points de mesure sont reportés en Figure 1.

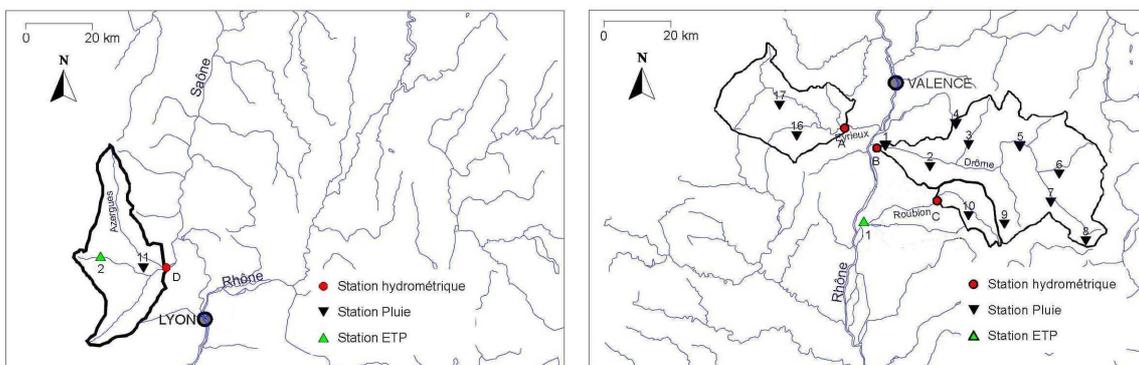


Figure 1 : Sites d'étude– Eyrieux A, Drôme B, Roubion C, Azergues D - et localisation des stations hydro-météorologiques

3 Résultats des modélisations en restitution du passé

Selon la procédure de calage contrôle, le choix est le suivant : TOPMODEL pour l'Eyrieux et l'Azergues et HBV pour la Drôme et le Roubion. Il n'y a pas de modèle universel qui convienne simultanément à tous les bassins. Les critères d'efficacité révèlent une modélisation des étiages modeste pour l'Eyrieux est (C_2 et C_3 sont inférieurs à 80%) et correcte pour l'Azergues, la Drôme et le Roubion (C_2 et C_3 sont de l'ordre de 80%). Dans la suite du document, les paramètres utilisés sont ceux obtenus par optimisation sur l'intégralité de la période d'observation.

Nous pouvons engager une étude de sensibilité avec les outils sélectionnés. Il reste à définir les variables hydrologiques sur lesquelles portera l'étude de sensibilité.

Compte tenu de l'objectif, le choix s'est porté sur des caractéristiques descriptives des basses eaux extraites des séries temporelles de débit :

- le débit dépassé 90% du temps (Q_{90}), fourni par la courbe de débits classés ;
- le débit mensuel minimal dans l'année de période de retour 5 ans ($QMNA5$) ; il est déterminé en ajustant une distribution statistique à l'échantillon des valeurs minimales des douze débits mensuels dans l'année. Par définition, il s'agit du quantile associé à la fréquence au non-dépassement 0.2. $QMNA5$ est retenu pour son aspect réglementaire.

Il convient de vérifier que ces variables sont convenablement restituées par les modèles hydrologiques dans les situations passées pour prétendre mesurer sa sensibilité à une perturbation du climat.

Nous avons donc reporté dans un même graphique les ajustements des échantillons des débits mensuels minimaux de l'année $QMNA$ à la loi log-normale et les courbes des débits classés observées (*Obs.*) et simulées (*Sim.*) dans un repère semi-log (Figure 2).

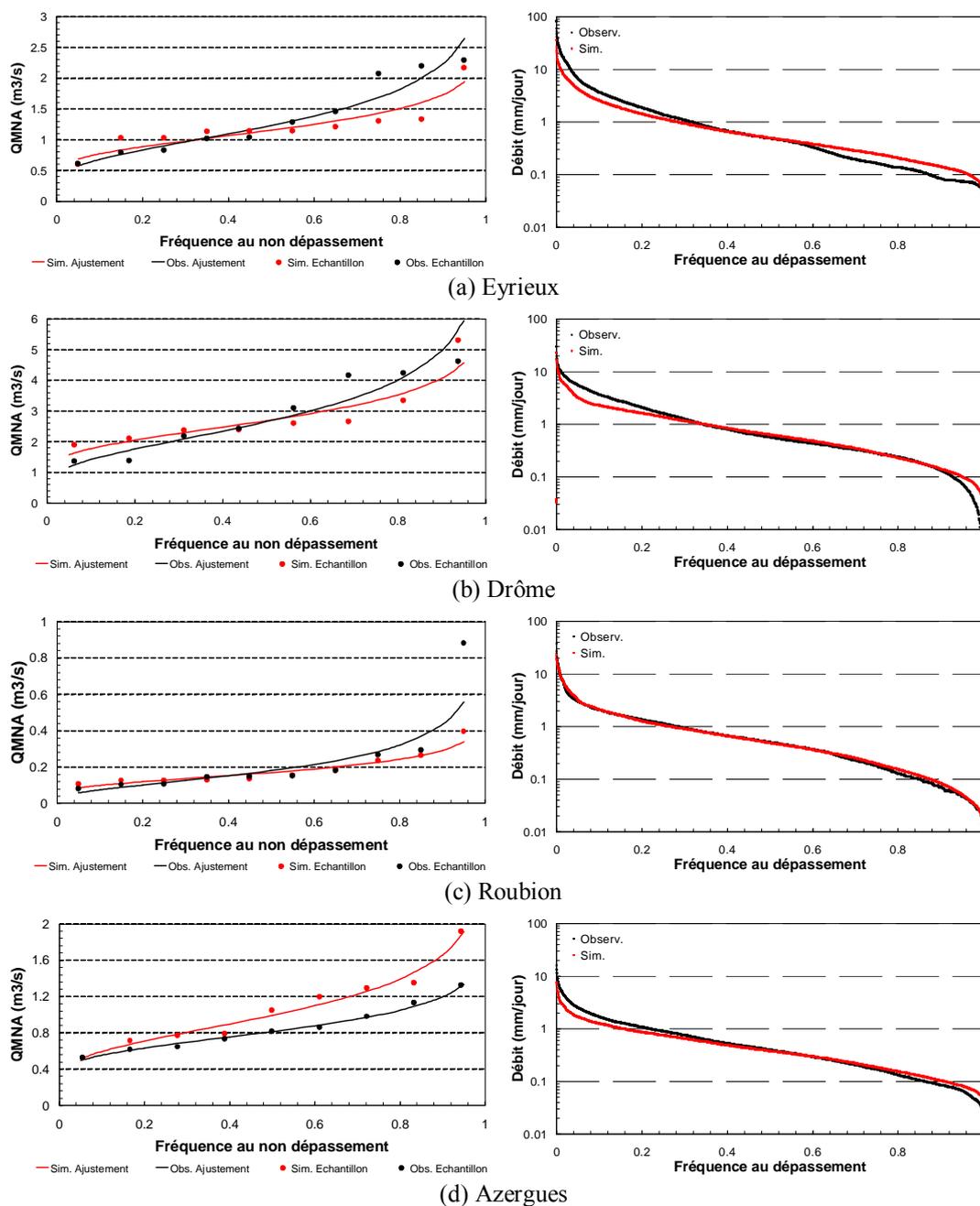


Figure 2 : Ajustements des échantillons de $QMNA$ observés et simulés à la loi log-normale et courbes des débits classés observés et simulés en chaque site

Les performances modestes sur l'Eyrieux se traduisent par un écart significatif entre les deux courbes en deçà de la valeur de débit dépassée 60% du temps. Pour les trois autres bassins, les courbes des débits classés se superposent dans la gamme des débits fréquents à faibles entre les fréquences au dépassement 20% et 90%.

Quant à la distribution des *QMNA*, les nuages de points expérimentaux et les ajustements issus des sorties des modèles des deux bassins, Drôme et Roubion, sont très proches de ceux obtenus sur les observations. C'est principalement la branche humide qui est mal restituée (fréquence au non-dépassement supérieure à 0.50) : les étiages reproduits par le modèle semblent moins sévères que ceux effectivement mesurés sur l'Azergues et la situation opposée est observée sur l'Eyrieux, la Drôme et le Roubion. Le biais le plus important concerne l'Azergues. Dans les étapes ultérieures, nous n'oublions pas de prendre en compte ce biais.

4 Les scénarios climatiques

La description du climat est issue des modèles de circulation générale (GCM). Les GCMs sont des outils numériques qui reproduisent les mécanismes physiques, chimiques et biologiques agissant au sein de l'atmosphère, l'océan, la cryosphère et sur les surfaces continentales à l'échelle de la planète. Ils fournissent une représentation du climat passé et une vision de l'avenir en incluant notamment les évolutions de la composition de l'atmosphère sur les éléments d'un maillage recouvrant le globe. Les GCMs utilisés diffèrent, entre autres, par la taille de la maille de calcul et par la manière d'intégrer les processus évoqués plus haut. Des incertitudes fortes pèsent sur le futur. Elles sont liées aux mécanismes de rétroaction encore mal appréhendés par ces modèles et au développement démographique, politico-sociétal, économique et au progrès technologique.

Pour nos besoins, nous avons extrait les sorties pluie et température de l'air en accès libre sur le site de l'IPCC (<http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/>). L'IPCC propose quatre familles de scénario, déclinées en groupe, qui conditionnent les scénarios d'émission des gaz dans l'atmosphère. Les prédictions des GCMs mises à disposition sont toutes jugées « physiquement plausibles » par les experts. Le choix d'un scénario de développement socio-économique de la planète et celui d'un GCM ne sont pas anodins à l'horizon fin du XXIème siècle car les différences en terme de climat y sont sensibles. Nous avons mesuré les impacts en intégrant 19 visions du futur.

Une opération de désagrégation spatio-temporelle des sorties des GCMs est indispensable. En effet, la résolution spatiale (100 km) et temporelle (mensuelle) des GCMs est incompatible avec la taille des bassins versants et le pas de temps de simulation des modèles pluie-débit. Nous avons adopté la démarche la plus simple, la méthode dite « des perturbations ». La différence entre le climat présent et le climat modifié est dénommée perturbation de grande échelle. Pour chaque bassin, la cellule la plus proche contenant le bassin versant examiné est identifiée. La perturbation de la cellule ainsi isolée est imposée aux données historiques des pluies et températures de bassin, de façon soit additive (variation de température), soit multiplicative (% de variation des précipitations). Dans notre cas, nous avons besoin de chroniques décennales d'ETP. Nous avons donc introduit les écarts en température de l'air annoncés introduits dans la formule de Thornthwaite.

Compte tenu des chroniques de pluie, le calcul des anomalies s'appuie sur la période disponible entre 1985-2005 et le futur 2070-2099. A titre d'illustration, les anomalies appliquées au Roubion sont présentées en Figure 3. Le lecteur notera la forte dispersion des anomalies à l'échelle locale d'une maille, avec des augmentations de température en août entre 2°C et 10°C selon le scénario de développement et selon le GCM. Cette disparité est moindre sur les températures d'hiver, cependant une hausse même réduite de quelques degrés entraîne une réduction, voire la disparition des précipitations solides. Pour les précipitations, les modèles climatiques, pour la plupart et quel que soit le scénario, envisagent une augmentation en hiver et leur diminution en été, cependant l'ampleur des modifications diffère d'une modélisation à une autre. Les climats selon HADCM3 sont les plus extrêmes en terme de pluie et de température (amplitudes les plus marquées).

Globalement, les GCMs prédisent, pour la majorité des surfaces continentales, des températures maximales plus élevées et de jours « chauds » (pour lesquels la température dépasse les seuils de 32, 35 ou 40°C selon le lieu), une réduction de l'amplitude thermique diurne, un assèchement des masses d'air et une augmentation du déficit hydrique des sols (IPCC, 2001). Les modèles sous scénarios A2 et B2 (sans usage de technologie propre et avec évolution démographique constante sur ce siècle) envisagent une diminution marquée des précipitations annuelles dans le sud de la

France.

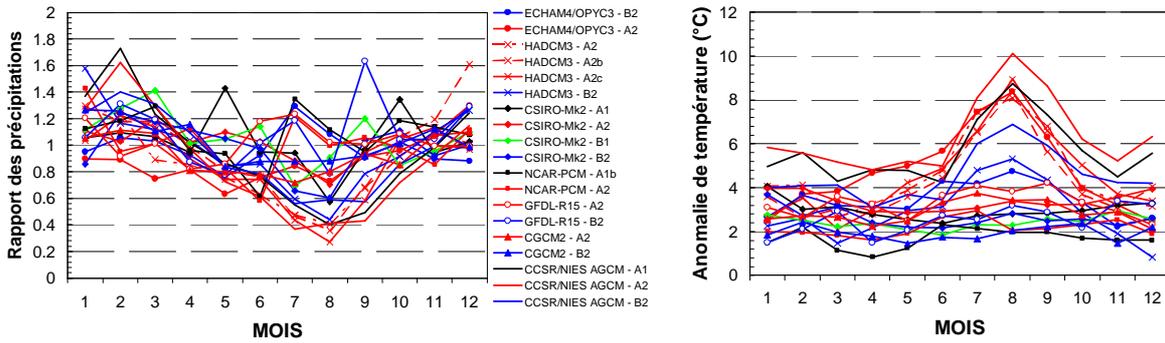


Figure 3 : Evolution du climat sur les variables de température et de pluie, selon différents modèles GCMs et différents scénarios

5 Impact sur le régime des basses eaux

Nous avons donc repris les modèles hydrologiques calés sur les observations des quatre bassins tests et les avons alimentés par les séries perturbées. Une des hypothèses est que la transformation pluie-débit sera peu modifiée à l'horizon 2080 (absence d'adaptation du bassin versant en terme d'occupation du sol et végétation, d'évolution des prélèvements d'eau). Les mêmes traitements statistiques ont été menés sur les chroniques de débits simulés sous changement climatique. Nous avons extrait les débits caractéristiques Q_{90} et Q_{MNA5} futurs (Figure 4, Figure 5).

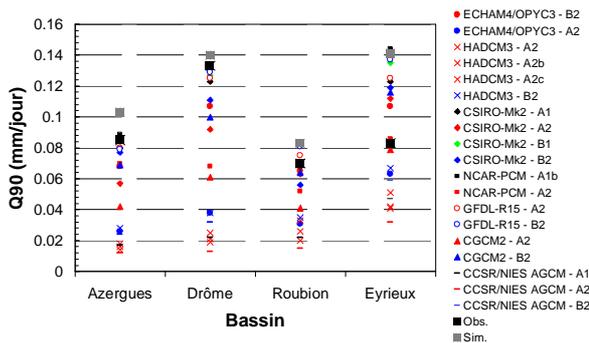


Figure 4 : Q_{90} , débit dépassé 90% du temps, simulé, observé et prédit selon différents modèles GCMs et différents scénarios

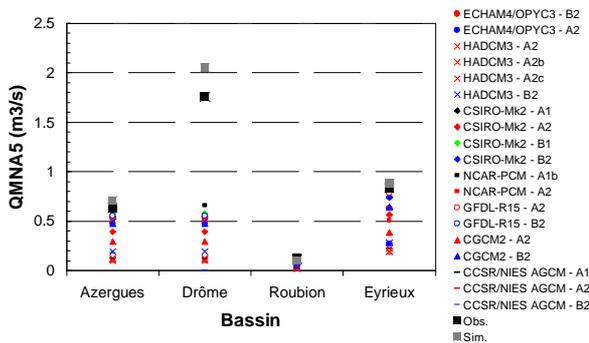


Figure 5 : Q_{MNA5} , débit mensuel minimal annuel de période de retour 5 ans, simulé, observé et prédit selon différents modèles GCMs et différents scénarios

Ces indicateurs sont tous à la baisse quel que soit le scénario, cette baisse est parfois drastique. Une manière plus opérationnelle d'exploiter ces simulations est d'évaluer la pérennité du système en appliquant des règles de gestion actuelles au contexte futur. Les situations de crise (défaillances du système) correspondent à des séquences de débits inférieurs à des valeurs spécifiées pour

lesquelles une priorisation des prélèvements est nécessaire. Dans le cadre d'un plan de gestion des étiages, ces seuils pourraient être définis par les DOE (Débits Objectif d'Etiage) ou les DCR (Débits de CRise). Pour établir un diagnostic, on peut s'appuyer sur les notions de fiabilité et de résilience qui qualifient respectivement la probabilité d'observer le système dans un état satisfaisant et la capacité du système à revenir dans un état satisfaisant. Ces notions ont été discutées par Loucks (1997) et Peters et al. (2005). Loucks (1997) a mis en place des indicateurs pour comparer différentes politiques de gestion de l'eau et apprécier le caractère durable du système dans le temps. Peters et al. (2005) ont repris ces éléments pour décrire les sollicitations des aquifères et tester leur pouvoir tampon.

Dans notre cas, une adaptation est possible. Le diagnostic repose alors sur deux variables calculées pour chaque séquence sous le seuil S : la durée L et le déficit cumulé D (Figure 6).

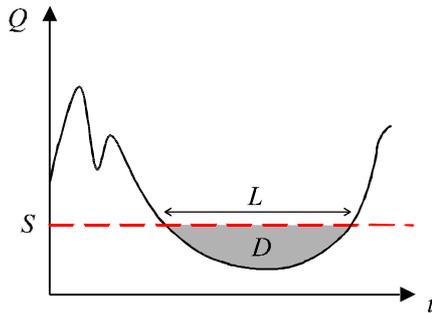


Figure 6 : Définition des variables caractérisant les défaillances en étiage

La fiabilité est mesurée par la proportion de valeur au-dessus du seuil S (fréquence associée à un état satisfaisant) :

$$F = 1 - \frac{1}{n} \sum_i L_i$$

où n est le nombre de données journalières que comporte la chronique et L_i est la durée de l'événement i exprimée en jour.

La résilience est l'inverse de la durée moyenne des épisodes \bar{L} : $R = 1/\bar{L}$. Nous lui préférons un indicateur basé sur la médiane L_{med} , statistique plus robuste et moins perturbée par d'éventuelles faibles oscillations autour du seuil : $R = 1/L_{med}$

Enfin, il est possible de compléter par une mesure de la vulnérabilité du système, qui renseigne la sévérité du système lorsqu'il est défaillant. Peters et al. (2005) suggèrent l'usage de :

$$P = 1 - \frac{D_{yr}}{D_{yr, \max}}$$

où D_{yr} est le déficit moyen par an et $D_{yr, \max}$ est la valeur maximale de D_{yr} dans toutes les configurations testées. Il est fortement dépendant de $D_{yr, \max}$, et donc de la situation la plus critique, pas nécessairement connue. Nous proposons :

$$P = \frac{D_{yr, \min}}{D_{yr}}$$

avec cette fois, $D_{yr, \min}$ est la valeur minimale de D_{yr} dans toutes les configurations testées. Dans le cadre du changement climatique, il est vraisemblable, pour les bassins au régime océanique, que $D_{yr, \min}$ corresponde à la valeur actuelle. La situation est optimale lorsque tous les indicateurs valent 1. Le système est critique lorsque tous les indicateurs sont nuls. L'intérêt des indicateurs de fiabilité F et de performance P est de permettre des comparaisons entre bassins.

Dans le cadre de cette étude, à titre d'illustration, nous fixons la valeur de seuil de chaque bassin au débit réglementaire $QMNA5$ observé quand les calculs concerneront les observations et à $QMNA5$ issu de la simulation sous climat présent quand il s'agira de chroniques issues du modèle pluie-débit (reconstitution et changement climatique).

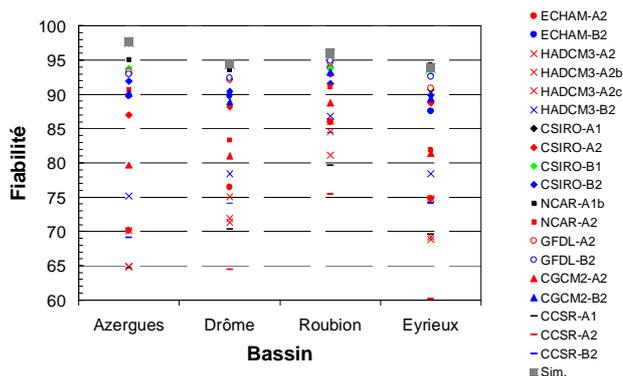


Figure 7 : Evolution de la fiabilité selon le modèle climatique et le scénario envisagé

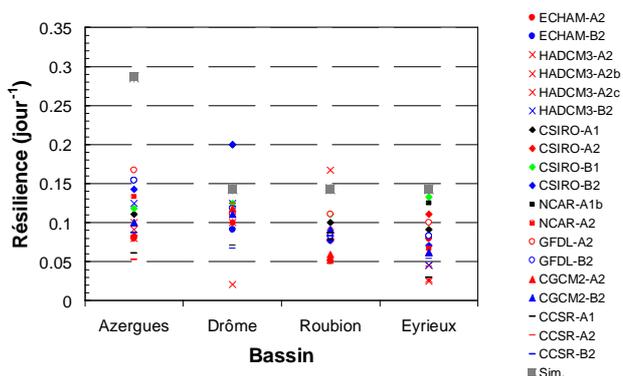


Figure 8 : Evolution de la résilience selon le modèle climatique et le scénario envisagé

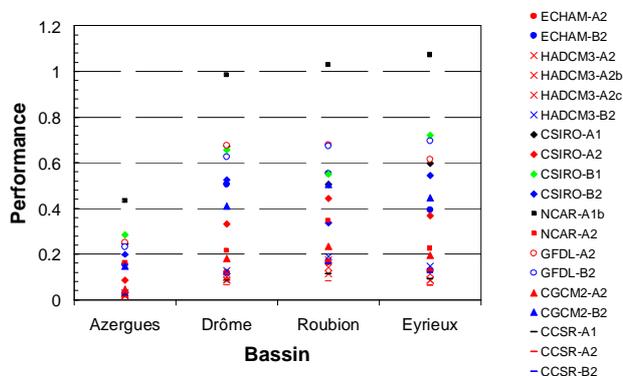


Figure 9 : Evolution de la performance selon le modèle climatique et le scénario envisagé

On constate que tous les indicateurs s’effondrent. Globalement, nous constatons très peu de différence entre bassin. Ainsi, la gestion, si le même débit d’objectif étiage est conservé, sera problématique. Les situations de crise pourraient être observées plus de 10% du temps (Figure 7). Les durées des épisodes seraient allongées (une anticipation des crises serait donc davantage nécessaire) (Figure 8). Finalement, les performances seraient amoindries avec des déficits plus forts (Figure 9).

6 Des indicateurs de fragilité des étiages

Quel que soit le scénario climatique, une tendance à une sévérité accrue des étiages semble se dessiner. Les potentialités de recharge favorisée par des précipitations hivernales plus abondantes, bénéfiques pour la rivière en étiage, sont neutralisées par une hausse des températures estivales. Finalement le bilan est négatif pour la rivière en terme de ressource. Cependant, les gammes de réduction sont très diverses selon le bassin considéré.

Précisons ici que nous avons choisi une méthode de désagrégation simpliste, compte tenu de la diversité des scénarios à grande échelle, le fait de multiplier les méthodes de désagrégation n'aurait pas réduit pour autant les incertitudes.

Que faut-il en conclure ? Les incertitudes liées au modèle hydrologique sont d'un ordre de grandeur plus faible que celles pesant sur les modélisations des GCMs et les projections politico-économico-sociétales. Ce fait avait déjà été souligné par Leblois et al. (2004). Nous aurions pu nous en convaincre en mettant en œuvre tous les modèles globaux (TOPMODEL, GR4J, HBV et IHACRES).

Telles quelles, ces sorties ne peuvent répondre à elles seules aux études d'impact. Les hydrologues doivent assurer une veille sur ces scénarios mais les résultats actuels sont encore, et pour longtemps, trop dispersés pour établir de solides conclusions en terme quantitatif pour le futur. L'aléa climatique est, au final, difficilement appréciable, il doit donc être complété par une notion de vulnérabilité à établir indépendamment ou presque des évolutions des scénarios climatiques, sur chaque bassin ou sous-bassin. Cette notion de vulnérabilité des étiages, ou indicateur de fragilité des étiages, du ressort de l'hydrologue doit être une signature du bassin révélateur des processus agissant sur le bassin en terme de transformation pluie-débit. Le paragraphe qui suit s'en fait écho.

Leblois et al. (2004) proposent une étude de sensibilité, selon la méthode des perturbations appliquées aux données d'entrée des modèles. L'exploration se voulait exhaustive vis à vis des perturbations et, de fait, envisageait des changements profonds en terme de climatologie (anomalies mensuelles de température de l'air combinées à des évolutions de précipitations entre - 60 % et + 60 %). Le coût de cette opération est tel que la démarche ne peut être appliquée que pour quelques bassins. En outre, le comportement du bassin autour de son point de fonctionnement actuel est ce qui intéresse l'hydrologue – et le gestionnaire pour une gestion efficace à moyen terme. Il s'agit de recentrer l'étude de sensibilité en se concentrant sur des évolutions réalistes conjointes des variables clefs conditionnant les étiages.

Sankarasubramanian et al. (2001) reprennent un indicateur robuste mentionné par Schaake (1990). Cet indicateur permet d'évaluer la sensibilité des débits au climat et d'apporter des éléments de compréhension des facteurs dominant la transformation pluie-débit :

$$e(Q, X) = \frac{X}{Q} \left(\frac{dQ}{dX} \right)$$

où X est la variable d'entrée dont on souhaite apprécier l'influence sur les débits Q de la rivière. Cet indicateur a été appliqué au module, moyenne interannuelle des débits moyens annuels, l'élasticité des débits vis à vis des précipitations a été examinée et les résultats s'affichent sous forme de carte qui permet de comparer la « résistance » de la rivière aux modifications des régimes pluviométriques. Une valeur supérieure à 1 indique qu'un changement de 1% des précipitations annuelles engendre une modification amplifiée de plus de 1% sur le module. Chiew et al. (2006) ont montré la pertinence de l'élasticité, dans sa version non paramétrique, à l'échelle du globe.

Notre souhait initial est de tester l'élasticité vis à vis de la température saisonnière d'été non plus sur les modules mais sur les $QMNA5$ et $Q90$, ce qui s'obtient d'après la formulation initiale par le calcul de :

$$e(Q, T) = \frac{\Delta Q}{Q} / \frac{\Delta T}{T}$$

la variable Q étant $QMNA5$ ou $Q90$. Nous préférons la définition suivante, pour limiter les risques de division par zéro :

$$e(Q, T) = \frac{1}{Q} \frac{\Delta Q}{\Delta T}$$

et nous obtiendrons les variations relatives de débit à une modification unitaire de la température d'été.

Cependant, ne modifier que la température n'est pas forcément réaliste. Le climat étant régi par des interactions entre variables, il faut envisager des modifications conjointes sur les autres entrées

des modèles hydrologiques. Nous modifierons donc les apports hivernaux qui règlent principalement la recharge des nappes pour les régimes à influence océanique (les hautes eaux s’observent en saison froide (janvier à mars) et les basses eaux en saison chaude (juillet à septembre)). Pour que les modifications soient réalistes, nous nous appuyons sur les tendances annoncées par les GCMs identifiées sur un diagramme présentant les écarts relatifs de pluie (décembre-mars) en fonction des écarts de température d’été (juin-septembre), la référence étant toujours le climat des années 1990 (Figure 10). Toutes les prévisions à horizon 2080 y sont placées. Nous constatons que pour une même catégorie de scénario (ex. A1), les résultats sont très différents d’un GCM à l’autre. Les points sont dispersés ; cependant, deux comportements apparaissent : une tendance vers un climat plus chaud en été et plus humide en hiver matérialisé par la droite bleue et un climat plus chaud en été à pluviométrie d’hiver constante représenté par la droite rouge. Nous appliquerons simultanément une hausse de température de +1°C en été et une augmentation de +6% des précipitations hivernales pour la « branche humide ». Une hypothèse implicite est la trajectoire quasi-linéaire du climat dans le plan horizontal de la Figure 10.

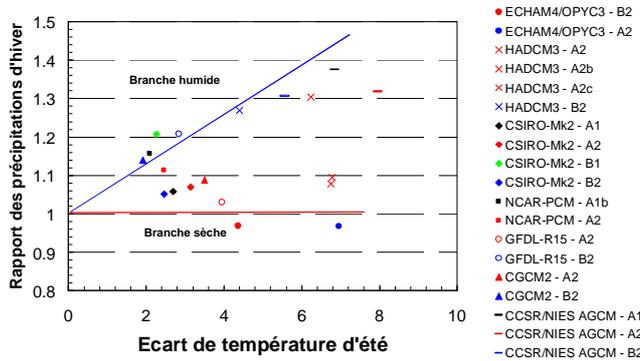


Figure 10 : Evolution conjointe des précipitations d’hiver et température d’été à l’horizon 2080 pour le Roubion selon les GCMs de l’IPCC Data Distribution Centre

Les écarts de débits ΔQ sont obtenus en soustrayant le débit simulé sous perturbation $Q_{+\Delta T}$ au débit simulé sous climat actuel par le modèle Q_{sim} (de ce fait, les éventuels biais systématiques du modèle hydrologique sont éliminés). En revanche, nous diviserons par le débit caractéristique observé Q_{obs} :

$$e(Q, T) \approx \frac{1}{Q_{obs}} \frac{(Q_{+\Delta T} - Q_{sim})}{\Delta T}$$

Le Tableau 1 propose des valeurs d’élasticité négatives, à une augmentation de température estivale correspond une diminution des débits. Ceci est cohérent avec le régime hydrologique des cours d’eau étudiés : l’évaporation estivale – donc la température de l’air - détermine principalement la sévérité des étiages. Les ordres de grandeur des élasticité sont comparables d’une station à une autre. Une hausse de 1°C engendre une réduction de l’ordre de 8% des caractéristiques d’étiage. Cette réduction est moins prononcée (-7%) si les pluies d’hiver sont plus abondantes, par comparaison de l’élasticité de la branche sèche à celle de la branche humide.

Bassin	Variable	Sec	Humide
Eyrieux	Q_{90}	-9.6	-7.2
	$QMNA5$	-7.9	-6.7
Drôme	Q_{90}	-7.5	-6.8
	$QMNA5$	-9.0	-8.3
Roubion	Q_{90}	-5.7	-4.3
	$QMNA5$	-7.9	-7.0
Azergues	Q_{90}	-8.2	-7.1
	$QMNA5$	-9.0	-8.3

Tableau 1 : Elasticité, résultats sur les quatre bassins testés

Sur ces exemples, nous décelons une sensibilité prononcée aux modifications de température. Cette conclusion reflète les conditions locales d’un secteur et d’un type de régime. Ces bassins ont

pour la plupart une faible composante souterraine et sont peu influencés par la neige. La majorité des eaux ruissellent en surface pendant l'hiver, les capacités de stockage étant réduites, quel que soit le régime de pluie d'hiver, les étiages souffriront d'une hausse de température pendant l'été.

CONCLUSION

Dans le cadre du projet « Risque Décision Territoire » 2003, une étude d'impact du changement climatique sur la ressource en eau a été menée sur quatre affluents du Rhône. Nous avons pu mettre en place les outils de modélisation pour reconstituer le fonctionnement du bassin actuel. Une projection de l'état de la ressource a été rendue possible grâce aux scénarios climatiques issus des GCMs. Les résultats ont montré un écart important entre débits de référence. Nous nous sommes dotés d'outils de diagnostic pour la gestion des crises et d'un indicateur d'élasticité qui mesure la sensibilité du bassin à une perturbation unitaire de température.

Un nouveau projet de recherche soutenu par le MEDD intitulé « Prospective Ressource en Eau : Evolution de la disponibilité en eau, évolution des usages et conséquences pour la gestion de la ressource superficielle – Application au bassin de la Garonne » (démarrage prévu au premier semestre 2007, associant Cemagref – EdF – Agence de l'Eau Adour Garonne) va continuer à explorer ces pistes. La volonté est d'approfondir la question de la disponibilité de la ressource et des incertitudes qui pèsent sur son devenir dans un cadre évolutif de pressions multiples en exploitant d'autres outils, au travers de modélisation et de définition d'indicateurs au-delà de la seule discipline hydrologie. Ce secteur géographique présente des contextes hydrologiques différents. Cette diversité permettra de l'intérêt de l'élasticité et d'établir une typologie de bassins pour lesquels les apports sont les plus susceptibles d'être diminués et pour lesquels les risques de pénurie d'eau associés vont croissants. Il sera nécessaire de s'assurer de l'indépendance de la valeur de l'élasticité vis-à-vis de la modélisation retenue pluie-débit, comme le recommande Dooge (1992). Nous envisagerons également de travailler à l'échelle des sous-bassins pour tenter d'isoler la sensibilité locale du secteur de celle des secteurs amont (il peut être illusoire pour une commune de compter sur une alimentation amont déjà fortement sollicitée par les installations, usages et prélèvements en tête de bassin). Une réactualisation des scénarios et une meilleure stratégie de désagrégation spatio-temporelle sont à envisager. Les résultats présentés restent malgré tout valides, puisque les conclusions de l'IPCC (2007) confirment les tendances indiquées dans le rapport de 2001.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier Charles Perrin pour la mise à disposition des outils de modélisation (Cemagref, Antony, France) et Jean-Philippe Vidal (Water Management Department, HR Wallingford, Royaume Uni) pour l'extraction et manipulation des sorties des modèles climatiques.

BIBLIOGRAPHIE

- ARNELL N.W. et REYNARD N.S., 1996. The effects of climate change due to global warming on river flows in Great Britain. *Journal of Hydrology*, 183(3-4): 397-424.
- ARNELL N.W., 1999. The effect of climate change on hydrological regimes in Europe: a continental perspective. *Global Environmental Change*, 9: 5-23.
- BERGSTROM S. et FORSMAN A., 1973. Development of a conceptual deterministic rainfall-runoff model. *Nordic Hydrology*, 6, 73-92.
- BEVEN K.J. et KIRKBY M.J., 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1), 43-69.
- CABALLERO Y., HABETS F., NOILHAN J. et MOOR J.F., 2004. Le changement climatique : étude de l'impact sur les ressources en eau du bassin Adour-Garonne. *Revue de l'Agence Adour Garonne*, 88 : 5-11.
- CARTER T.R., PARRY M.L., HARASAWA H. et NISHIOKA S., 1994. Technical Guidelines for Assessing Impacts of Climate Change. Special Report 0904813118. Intergovernmental Panel on Climate Change, WMO and UNEP, Geneva., 59 pages.
- CHIEW F.H.S., PEEL M.C., MAC MAHON T.A. et SIRIWARDENA L.W., 2006. Precipitation elasticity of streamflow in catchments across the world. *Proceedings of the Fifth FRIEND World*

- Conference, « Climate Variability and Change-Hydrological Impacts », Havana, CUB, November 2006; IAHS Publication, N°308, 2006, 256-262.
- DOOGE J.C.I., 1992. Sensitivity of runoff to climate change: a Hortonian approach. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 73(12): 2013-2024.
- IPCC, 2001. *Climate Change 2001 : Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. McCarthy J.J., Canziani O.F., Leary N.A., Dokken D.J. et White K.S. (Eds). Cambridge University Press, Cambridge, U.K, 1032 pages.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Summary for Policymakers*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 21 pages.
- JAKEMAN A.J., LITTLEWOOD I.G. et WHITEHEAD P.G., 1990. Computation of the instantaneous unit hydrograph and identifiable component flows with application to two small upland catchments. *Journal of Hydrology*, 117, 275-300.
- KLEMES V., 1986. Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, 31(1), 13-24.
- LEBLOIS E. et MARGAT J., 1998. Effets possibles sur les écoulements superficiels et les eaux souterraines. Impacts potentiels du changement climatique en France au XXIème siècle. Mission Interministérielle de l'effet de serre/Premier Ministre/M.A.T.E, Paris. 58-65.
- LEBLOIS E. et al., 2004. *Projet GICC-Rhône. Rapport final*, octobre 2004, 184 pages.
- LOUCKS P., 1997. Quantifying trends in system sustainability. *Hydrological Sciences Journal*, 42(4): 513-530.
- LVOVITCH M.I., 1972. Hydrologic budget of continents and estimate of the balance of global fresh water resources. *Soviet Hydrology*, N 4, 349-360.
- MORVAN X., 2000. Comparaison de deux approches de modélisation hydrologique : l'une globale, l'autre distribuée, en s'appuyant sur les données du bassin du Rhône. Rapport de DEA « Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistique et Géochimie », Université Paris VI, Cemagref, 56 pages + annexes.
- NASH, J.E. et SUTCLIFFE J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models: 1. A discussion of principles. *J. Hydrol.*, 10, 257-274.
- PERRIN C., 2002. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. *La Houille Blanche*, (6/7), 84-91.)
- PETERS E., VAN LANEN H.A.J. TORFS P.J.J.F. et BIER G., 2005. Drought in groundwater—drought distribution and performance indicators. *Journal of Hydrology*, 306: 302–317
- PRUDHOMME C., JAKOB D. et SVENSSON C., 2003. Uncertainty and climate change impact on the flood regime of small UK catchments. *Journal of Hydrology*, 277(1-2): 1-23.
- RENARD B., 2006. Détection et prise en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques en France. Thèse de doctorat, INP Grenoble. 361 p.
- SANKARASUBRAMANIAN A., VOGEL R. M. et LIMBRUNNER J. F., 2001. Climate elasticity of streamflow in the United States, *Water Resour. Res.*, 37(6), doi:10.1029/2000WR900330
- SAUQUET E., LEBLOIS E., RENARD B., HAOND M. et JOUVE D., 2005. Examen de la vulnérabilité de la ressource en eau vis à vis des fluctuations climatiques - Application aux étiages du bassin du Rhône. Rapport final, pré-projet Risque Décision Territoire, 58 pages.