

Projet GICC-Rhône

rapport final révisé – version courte

février 2005



la Clarée, haute vallée de la Durance

(photo E. Sauquet)

1 - Introduction : objectifs initiaux du projet, sa place dans le contexte scientifique général

Objectifs initiaux du projet

Le projet GICC-Rhône s'est intéressé aux impacts à prévoir sur la partie française du bassin du Rhône, dans le cas d'un changement climatique revenant à un doublement du CO₂ atmosphérique. Cette situation correspond approximativement à l'échéance 2050.

La voie retenue a été celle de la modélisation hydrologique déterministe du bassin versant du Rhône, complétée par une caractérisation des impacts associés. Les principales étapes ont été :

- d'évaluer le changement climatique global susceptible d'intervenir sous ce scénario 2 x CO₂, à l'aide des sorties de plusieurs modèles de circulation générale atmosphérique ;
- de désagréger les indications météorologiques globales qui en résultent vers les échelles détaillées nécessaires à la modélisation hydrologique ;
- d'appliquer les forçages climatiques obtenus à plusieurs modèles hydrologiques de la partie française du bassin versant du Rhône ou d'affluents d'intérêt particulier ;
- d'analyser les résultats issus de ces modèles, afin d'évaluer l'effet du changement relatif à l'hydrosystème étudié. Concrètement ont été examinés l'hydrologie générale des cours d'eau, préalable nécessaire à toute étude d'aléa hydrologique et de ressource en eau, ainsi que les impacts relatifs à divers domaines physiques, biologiques et socio-économiques : interactions entre eaux de surface et eaux souterraines, évolutions quantitatives et qualitatives possibles de la végétation, relation entre la ressource en eau et les systèmes agricoles irrigués, et enfin réaction des communautés ichtyologiques sous régime hydrologique modifié.

Compte tenu de son importance, le thème des incertitudes a fait l'objet d'une préoccupation constante ; dès le dépôt de projet, l'idée générale a été au moins d'exprimer et si possible de quantifier ces incertitudes, par des moyens techniques non précisés car eux-même objet de recherche. Pour permettre une telle étude le projet a eu recours à plusieurs modèles, tant au niveau des scénarios atmosphériques qu'à celui de la modélisation hydrologique.

Place du projet dans le contexte scientifique général

Les gaz à effet de serre de l'atmosphère limitent la déperdition de chaleur du globe terrestre en piégeant le rayonnement infrarouge. Cet effet naturel semble renforcé par diverses émissions d'origine humaine, et bien que la modélisation reste encore incertaine, tous les modèles de climat prévoient des évolutions assez nettes, soit un réchauffement de la température moyenne à la surface du globe de 1,5 à 5°C dans le présent siècle, un flux d'évaporation plus important, une humidité atmosphérique augmentée. Les précipitations devraient augmenter, mais cette augmentation ne sera pas uniforme, la tendance générale étant un accroissement des précipitations aux hautes latitudes et une diminution aux basses latitudes. La limite entre les deux zones se positionne le plus généralement au sud de la France. Pour l'heure les concepts et les capacités de modélisation adéquates ne sont pas réunis pour aborder un tel système directement avec une résolution fine. Il y a nécessité d'adopter une stratégie de désagrégation, permettant de passer d'un scénario climatique global à un scénario atmosphérique adapté à l'évaluation prévisionnelle d'impacts locaux en Europe.

L'effort de modélisation hydrologique tourné vers des échelles de plus en plus locales ne cesse de s'accroître ces dernières années. On peut citer les travaux de [Arnell, 1998] sur les effets du changement climatique sur les eaux de surface et leur impact en terme de ressource en eau en Grande-Bretagne, de [Morin et Slivitzky, 1992] sur la rivière Moisie (Canada). [Gellens et Schädler, 1997] comparent divers petits bassins versants suisses et belges, de plaine et de montagne, et examinent quelles sont les composantes de l'écoulement qui sont susceptibles d'être modifiées par le changement climatique. D'autres travaux s'axent sur l'étude des conséquences socio-économiques, tant sur l'évolution de la demande en eau [Alcamo et al, 1997], que sur le risque climatique et la capacité des sociétés humaines à le gérer. Ces études restent encore souvent qualitatives [Evans, 1997].

En France, le thème du changement climatique recoupe au plan scientifique les compétences au moins des programmes nationaux PNEDC, PATOM et PNRH, auxquels les organismes présents dans le projet GICC-Rhône participent. Le ministère chargé de la recherche (réunion du 21 mai 2001) et l'Académie des Sciences (colloque de septembre 2002) encadrent ces préoccupations, reprises en de nombreuses rencontres interdisciplinaires (par exemple le colloque d'Arles, en novembre 2002).

Ici, la question traitée est quelque peu plus appliquée. En France, le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable assume une tâche de prospective scientifique et territoriale plus concrète. Ce ministère a financé en 1996 ECLAT, puis REGCLIM, deux programmes de recherche sur la régionalisation des effets du changement climatique. Ces programmes n'ont pas étudié spécialement le devenir des hydrosystèmes, traités d'abord sous un angle grand public [Leblois et Margat, 1998] dans une plaquette coéditée par la Mission Interministérielle à l'Effet de Serre [collectif, 1998].

Le MEDD a donné bonne place à cette thématique au sein du programme Gestion des Impacts du Changement Climatique (GICC), dans lequel s'inscrit le projet GICC-Rhône ici rapporté. Ce projet a été soutenu par le Ministère de l'Environnement et du Développement Durable à travers le GIP Médias-France (convention Médias 9/99 et Médias 2/00).

2 - Résumé étendu, équipes participantes

Résumé étendu

Le changement climatique global susceptible d'intervenir sous scénario 2 x CO₂ a été évalué à l'aide des sorties de quatre modèles de circulation générale atmosphérique, deux d'entre eux faisant l'objet de deux intégrations à des résolutions différentes, aboutissant au total à six visions différentes du futur atmosphérique de la planète. Les indications météorologiques globales qui en résultent ont été désagrégées par la méthode des perturbations vers les échelles détaillées nécessaires à la modélisation hydrologique (approximativement, le saut d'échelle à faire correspondant au passage d'une grille de résolution synoptique à une grille de méso-échelle).

Le projet GICC-Rhône s'est appuyé sur les données rassemblées pour le projet Gewex-Rhône. Le projet Gewex-Rhône avait notamment rassemblé un forçage atmosphérique de référence sur 1981-1998, de résolution tri-horaire et à résolution spatiale de 8 km, élaboré à l'aide du système Safran (CNRM/CEN). Ce forçage comprend tous les champs suivants : température de l'air, précipitations pluvieuses et neigeuses, rayonnements incidents atmosphérique et solaire, vitesse du vent, humidité spécifique de l'air, ainsi que l'évapotranspiration potentielle, déduite des termes précédents.

Le changement climatique est basé sur le scénario suivant : le gaz carbonique CO₂ augmente de 1% par an et porte forfaitairement tout le changement climatique ; l'horizon temporel visé est 2050 (correspondant à un doublement du CO₂).

Sur la base d'une simulation climatique commune fournissant une température de surface de la mer de référence (Hadley Centre), plusieurs intégrations atmosphériques de ce même scénario ont été collectées, quatre à basse résolution issues d'un projet antérieur (LSPCR, Polcher), résolution typique 2.5° x 3.5°, et deux à haute résolution spécifiques au projet GICC-Rhône (pour le LMD dx = 100 km ; pour le CNRM dx = 50 km).

Les anomalies mensuelles de grande échelle ont été désagrégées par la méthode des perturbations. Cette méthode comprend :

- calcul des anomalies mensuelles déduites d'un Modèle de Circulation Générale (MCG) = valeur MCG climat modifié - climat MCG temps présent, interpolées sur la grille Rhône ;
- perturbation du forçage : forçage climat modifié = forçage temps présent + anomalie interpolée.

Six scénarios ont été construits en combinant des variables du climat observé avec les anomalies simulées pour les températures et les précipitations.

Ces scénarios de forçage climatique ont été introduits en entrée de cinq modèles hydrologiques différents, couvrant souvent toute la partie française du bassin versant du Rhône, parfois seulement des affluents d'intérêt particulier (en règle générale la Saône).

Les sorties hydrologiques des modèles sont comparées entre elles et comparées surtout au régime hydrologique actuel. Des méthodes de comparaison des régimes et d'analyse de sensibilité de l'hydrologie à certaines variables de forçage ont été mises au point ou adaptées pour l'étude.

La suite du projet a consisté à déduire des sorties de la modélisation hydrologique les indications que l'on pouvait raisonnablement en tirer quant aux effets du changement climatique sur les variables physiques majeures des hydrosystèmes étudiés et, dans la mesure

du possible, à interpréter ces changements en termes d'impact. Les domaines physiques, biologiques et socio-économiques étudiés ont été :

- l'hydrologie générale des cours d'eau (hautes eaux, manteau neigeux, écoulements médians, étiages),
- les interactions avec les eaux souterraines,
- les évolutions quantitative et qualitative de la végétation spontanée,
- les relations modifiées entre la ressource en eau et les systèmes agricoles irrigués,
- la réaction des communautés ichtyologiques sous régime hydrologique modifié.

A travers l'ensemble des travaux, on a veillé à exprimer et si possible à quantifier les incertitudes qui obèrent la connaissance actuelle. Ceci a amené également à :

- examiner l'apport de l'analyse satellitaire des variables d'état du bassin versant ;
- étudier les incertitudes ;
- prendre en compte les anomalies attendues des variables atmosphériques autres que pluies et température de façon à donner de la cohérence au climat futur ;
- examiner la dynamique de la végétation interactive.

Les produits obtenus sont :

- un ensemble de scénarios atmosphériques ;
- un ensemble de chroniques de débit sous scénarios de changement climatique ;
- un ensemble de rapports sectoriels relatifs aux conséquences du changement climatique ;
- divers articles et communications (voir en section 6) ;
- un rapport d'ensemble ;
- le présent résumé.

Parmi les résultats de l'étude, on retient ici la conclusion la plus nette : le premier facteur d'incertitude sur l'hydrologie à venir est le choix du scénario atmosphérique ; la dispersion entre les sorties des modèles hydrologiques, quoique significative, reste pour le moment inférieure.

Chronologie des travaux

Le projet GICC-Rhône a commencé en décembre 1999.

En 2000 a eu lieu la préparation des champs de forçages météorologiques (action pilotée par Météo-France, avec une contribution du LMD). Dans la même année, la modélisation hydrologique en climat perturbé a commencé à Météo-France et au CIG, mettant à profit les modèles distribués du bassin du Rhône en place dans ces laboratoires (capital issu du projet Gewex-Rhône antérieur sous égide PNEDC et PNRH). EdF/DER et BRGM ont commencé le montage et le calage de leurs propres modèles en climat présent. Les différents chantiers relatifs aux incertitudes et, au sein de l'ensemble des études d'impact, le chantier « analyse des chroniques » ont commencé par des échanges méthodologiques entre les équipes concernées.

En 2001 les modélisations hydrologiques en climat perturbé portées par Météo-France et par le CIG étaient achevées. Elles ont produit, en 131 stations représentatives de la diversité des conditions hydroclimatiques dans le bassin, des chroniques tant reconstituées que simulées

sous scénario, qui ont été rassemblées et mises à disposition des participants des tâches « impacts ». L'année 2001 a également vu plusieurs présentations du projet en divers colloques et séminaires. Ces présentations ont été importantes pour la visibilité du projet, et donc indirectement pour celle du programme GICC, et certainement utiles en ce qu'elles auront permis à d'autres équipes de tenir compte de ce qui a été déjà fait et d'imaginer mieux.

Début 2002, EDF/DR et le BRGM ont complété leurs simulations de débit.

Tout au long des années 2000 à 2002, deux tâches parallèles à l'axe « principal » que l'on vient de décrire se sont déroulées. La première a été la poursuite de la validation des modélisations distribuées employées par Météo-France et par le CIG sur d'autres variables que les débits, par analyse d'images d'archives satellitaires permettant d'évaluer des variables de surface à comparer aux variables d'état des modèles. Cette tâche a été portée par le CETP, en liaison avec Météo-France principalement. La deuxième tâche concernait la caractérisation des incertitudes. Une première approche de cette tâche de caractérisation des incertitudes a consisté à visualiser systématiquement la dispersion des résultats (tant entre variantes de forçage météorologique que entre modèles hydrologiques), sur la base d'un canevas graphique dont Météo-France a proposé la construction. Pour aller plus loin, le LTHE a proposé une méthodologie qu'il devait appliquer concrètement en une action pilote à mener avec Météo-France.

En 2003, la plus grande attention a été portée à ce thème des incertitudes. Le Cemagref a été amené à procéder au calage du modèle distribué Ecomag sur la partie amont du bassin versant de la Saône. Amener un cinquième modèle distribué dans le dispositif n'était certainement pas un but en soi. Mais il s'agissait d'un modèle bien maîtrisé par une personne recrutée en post-doctorat pour permettre au Cemagref de contribuer effectivement au thème incertitudes, selon la ligne proposée par le LTHE et en relais de ce laboratoire. Le BRGM et l'ENSMP ont travaillé conjointement à expliciter le rôle des nappes souterraines dans la déformation des régimes hydrologiques. Le CEN de Météo-France a repris ses travaux sur l'impact du changement climatique en zone de prépondérance nivale afin d'approfondir son diagnostic. Le CETP a travaillé à la validation des modèles distribués en temps présent, permettant de confronter images télédéteectées, observation de terrain et modélisation hydrologique quant à la couverture neigeuse (avec Météo-France/CEN et EDF/DTG) et également températures de surface télédéteectées et températures de surface modélisées au sein du modèle distribué ISBA (avec Météo-France/CEN et EDF/DTG). Le CETP a également observé sur la période récente les changements d'occupation du sol dans le bassin versant de la Saône. Ces changements ont été transmis à Météo-France pour évaluation de l'ordre de grandeur de leur impact hydrologique au sein de la modélisation ISBA (qui s'est révélé minime). Pour finir, le Cemagref et le CNRS (UMR5600 Crenam) ont procédé à une analyse de la stabilité de la végétation potentielle du bassin versant du Rhône vis à vis du changement climatique suggéré par les scénarios.

La fin de l'année 2003 a été consacrée à la rédaction d'un rapport étendu (près de 200 pages), qui a été révisé en 2004 pour tenir compte des remarques reçues. Le présent document constitue une synthèse du rapport révisé.

Fiche technique du projet

Equipes participantes

TITRE COURT : GICC-Rhône

COORDINATEUR : Leblois Etienne, assisté de Jean-Michel Grésillon

CEMAGREF – Groupement de Lyon – Unité de Recherches Hydrologie – Hydraulique

3 bis quai Chauveau – CP 220 – 69336 Lyon Cedex 09

Tel : 04 72 20 87 89 – Fax : 04 78 47 78 75 – E-mail : leblois@lyon.cemagref.fr

Equipes participantes, principaux partenaires

E. Ledoux – P. Viennot	ARMINES/CIG-ENSMP
D. Thiéry – C. Golaz – N. Amraoui	BRGM Service Eau
N. Lamouroux	CEMAGREF/BELY
E. Leblois – J.M. Grésillon	CEMAGREF/HHLY
J.C. Maihol – J.M. Gonzalez-Camacho	CEMAGREF/IRMO
B. Lacaze – N. Katiyar.	CNRS/UMR5600
C. Ottlé – S. Le Hégarat	CNRS/CETP
L. Li	CNRS/LMD
G.M. Saulnier	CNRS/LTHE
F. Hendrickx – J. Gailhard – R. Garçon	EDF/DRD
A. Boone – P. Etchevers – J. Noilhan – F. Habets – T. Pellarin	METEO-FRANCE CNRM

Articulation avec les programmes régionaux, nationaux et européens

Le projet GICC Rhône s'est fortement appuyé sur les travaux antérieurs du projet GEWEX-Rhône, composante de la participation française au programme international GEWEX lancée sous égide du PNEDC. Il a bénéficié des résultats du projet européen LSPCR (Polcher et al.). Il a présenté également des liens étroits avec le PNRH au travers du projet GEWEX-Rhône.

3 - Méthodologies expérimentales, modélisations utilisées et/ou développées dans le cadre de ce projet

Méthodologie générale du projet

Les scénarios atmosphériques

Quatre modèles de circulation générale (MCG) ont été considérés : les modèles du LMD, du CNRM de Météo-France (Arpège-Climat), du Hadley Center (HC) et de l'Université de Reading (UR). Six scénarios issus de ces MCG ont été considérés, correspondant à des simulations de type 'time-splitting' pour la période 2050-2060 avec doublement du CO₂ atmosphérique sous hypothèse de 1% de croissance annuelle. Pour chaque scénario, les champs de température de la mer ont été établis à partir de simulations préalables du modèle couplé Océan-Atmosphère du Hadley Centre.

De nouveaux scénarios sont maintenant disponibles dans la communauté française (avec de nouvelles hypothèses de croissance des gaz à effet de serre et capables de simuler continûment l'évolution du climat de la période actuelle jusqu'en 2100). Plutôt que d'intégrer l'un ou l'autre de ces scénarios dans la fin du projet (par ex. le dernier scénario Arpège-Climat, Royer et al. 2002), on a préféré dégager de la force de travail sur la thématique des incertitudes.

Les 6 scénarios considérés sont répartis en 4 scénarios 'basse résolution' pour lesquels 2 ou 3 points du MCG sont situés dans le bassin du Rhône et 2 scénarios 'haute résolution' (LMD-HR et CNRM-HR – Dequé et Marquet 1997) donnant une indication régionale du changement climatique à l'intérieur du bassin. Mentionnons le nombre de points de grille de ces deux scénarios dits à haute résolution dans le domaine Rhône : 28 points pour CNRM-HR et 10 points pour LMD-HR.

Modèle	Résolution	
	degrés	Km
Basse résolution (issus du projet LSCPR)		
HC	2.5 x 3.5	environ 270 km
LMD-LR	1.6 x 3.75	environ 300 km
CNRM-LR	3.8 x 3.7	environ 300 km
UR	2.8 x 2.8	environ 250 km
Haute résolution (spécifiques)		
LMD-HR	environ 1°	100
CNRM-HR	environ 30''	50

Les 4 scénarios 'basse résolution' ont été réalisés dans le cadre du projet européen LSCPR (Polcher et al. 1999). Dans ce projet, 2 scénarios par MCG différant par la représentation des processus de surface avaient été examinés : un schéma de base relativement simple et un schéma de surface considéré comme plus réaliste. Le projet LSCPR a montré une sensibilité non négligeable du climat simulé près de la surface (les variables à 2 m en particulier) à la paramétrisation de surface utilisée dans chaque MCG. Il n'était pas très réaliste de considérer les 8 scénarios LSCPR. Dans GICC Rhône on a convenu de considérer uniquement les scénarios construits avec les schémas de surface considérés comme les meilleurs par chaque groupe.

Pour chacun des 6 scénarios, 2 simulations ont été mises à disposition, une pour le climat présent (1 CO₂) et une pour le climat modifié (2 CO₂). Seules les valeurs moyennes mensuelles des 6 variables de surface étaient disponibles : précipitations totales, température et humidité de l'air à 2 m, vitesse du vent à 10 m et flux incidents solaire et atmosphérique.

Trois méthodes au moins permettent de désagréger des scénarios de grande échelle vers les échelles détaillées nécessaires à l'hydrologie : modélisation directe (modèles emboîtés) ; méthode dite des perturbations (modification directe des valeurs observées à échelle détaillée à raison des modifications évaluées sur la grande échelle) et adaptation stochastique sur une base de « types de temps ».

GICC-Rhône a adopté la méthode des perturbations. Les six scénarios sont donc construits en combinant les variables du climat observé avec les anomalies mensuelles simulées par les MCG :

$$Ta_{\text{climat modifié}} = Ta_{\text{climat observé}} (1981-1997) + \Delta Ta_{\text{mensuel GCM}}$$

$$P_{\text{climat modifié}} = P_{\text{climat observé}} (1981-1997) * (1 + (\Delta P / P)_{\text{mensuel GCM}})$$

$$ETP_{\text{climat modifié}} = ETP_{\text{climat observé}} (1981-1997) + \Delta ETP_{\text{mensuel GCM}}$$

Les autres variables météorologiques ont été conservées à leur valeur actuelle (ceci a fait l'objet d'explorations méthodologiques en tranche 2 du projet).

Ainsi, le climat modifié reste basé sur les 16 ans de la climatologie observée du bassin au pas tri-horaire. La chronologie des variations interannuelles (année sèche ou humide) n'est pas modifiée, pas plus que la distribution mensuelle des précipitations. L'intensité des précipitations est simplement modulée par le facteur d'anomalie relative mensuelle.

Les modèles hydrologiques

Cinq modèles hydrologiques ont été employés : Modcou, ISBA-Modcou, Marthe, CEQUEAU, Ecomag. Tous sont basés sur un découpage du bassin versant en mailles régulières selon des principes actuellement classiques. A des degrés divers, tous utilisent les mêmes données climatiques (Météo-France), de sol (INRA, Corine) et de débit (Hydro/MEDD).

Le modèle Modcou est un modèle spatialisé, à fonction de production conceptuelle, à réservoirs.

ISBA-Modcou résulte du remplacement de cette fonction de production conceptuelle par le modèle de transfert sol-végétation-atmosphère ISBA, la fonction de transfert hydrologique étant la même.

Le modèle Marthe, développé et mis en œuvre par le BRGM, est un modèle hydrodynamique 3D et multicouche couplé à un modèle de bilan hydroclimatique et à un réseau hydrographique schématisé.

Le modèle hydrologique CEQUEAU, utilisé par EDF/DER, peut être succinctement caractérisé comme le vicariant québécois de Modcou.

Le modèle Ecomag, d'origine russe, est un modèle distribué de même nature, inspiré des modèles de la famille WPI.

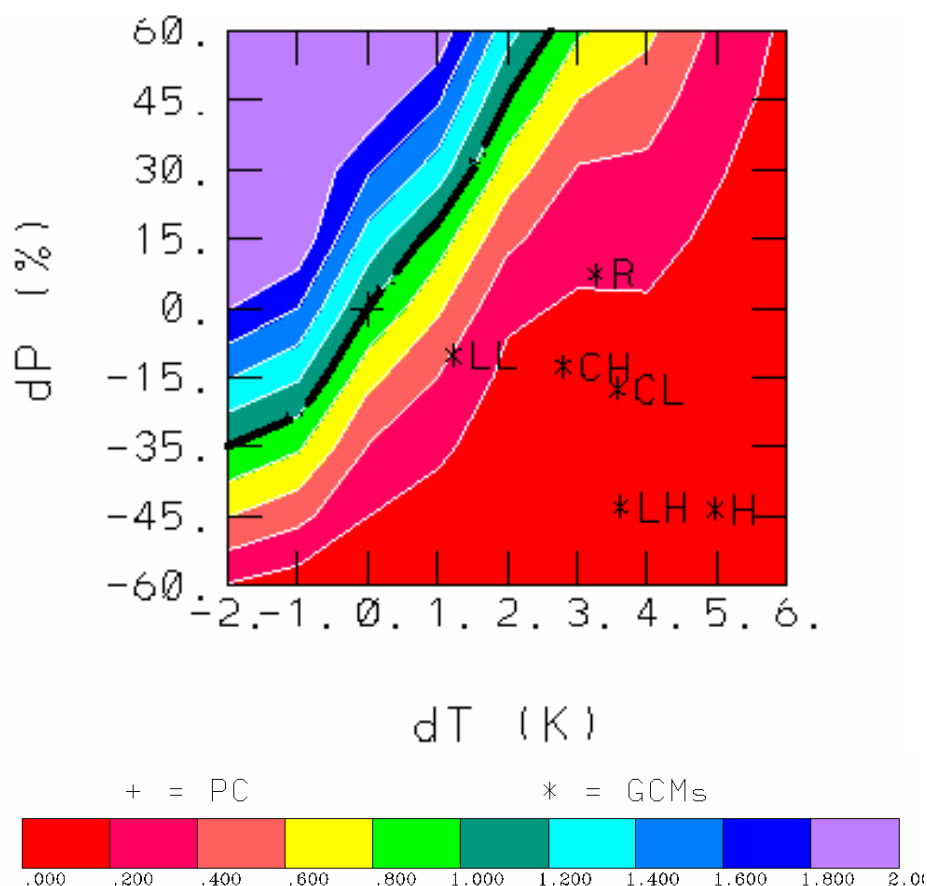
Tous ces modèles visent donc à rendre compte des principaux processus du cycle hydrologique en surface. Ils pré-existaient en tant que codes de calcul, mais seuls Modcou et ISBA étaient « montés » sur le bassin versant du Rhône, à la faveur de l'ancien projet

GEWEX-Rhône. Les modèles Marthe, CEQUEAU et ECOMAG ont donc été déployés spécifiquement pour le projet GICC-Rhône, respectivement sur les bassins de la Saône, de la Haute Saône, et du Rhône au Tricastin.

Outils d'étude des incertitudes

Les principaux outils d'analyse des incertitudes qui ont été adaptés et mis en œuvre au sein du projet sont les suivants :

Représentation en diagrammes de sensibilité



*Exemple d'un graphe d'analyse de sensibilité
Cas de l'évolution de l'écoulement estival de la Durance*

Le premier outil est un graphe d'analyse de sensibilité, dont la figure ci-dessus montre un exemple.

Dans l'exemple sont portées en abscisse les variations unitaires de la température de forçage et en ordonnée les variations d'intensité des précipitations. La figure code en fond de couleur le ratio entre la valeur de la variable d'intérêt (ici l'écoulement estival) simulée sous changement climatique et celle reconstitué pour le climat présent. La ligne d'indifférence (ratio=1) est marquée d'un trait noir. Le climat présent est figuré par le + sur le point de coordonnées ($dT=0$ K, $dP=0$ %). Les points étoilés montrent le positionnement, vis-à-vis de ces deux variables dT et dP , prises pour le bassin considéré, du climat futur issu de la désagrégation des différents scénarios atmosphériques (R=Reading ; H = Hadley Center ; CL et CH = CNRM basse et haute résolution ; LL, LH = LMD basse et haute résolution).

Sur l'exemple, on voit que que la lame d'eau écoulee tend logiquement à augmenter quand les précipitations augmentent et à diminuer quand la température augmente. La forte dispersion

entre les scénarios n'empêche pas des conclusions nettes : l'écoulement estival de la haute Durance pourrait être fortement diminué sous changement climatique.

Un grand avantage de la présente représentation est de montrer que la sensibilité aux variables de commande, et donc l'impact du changement climatique, diffère fortement selon les bassins versants, et selon la définition des variables étudiées – notamment selon la saison considérée.

Plus encore, on voit que les conclusions auront un degré de fermeté variable, ceci se lisant en examinant la dispersion des scénarios face à la sensibilité de chaque bassin particulier. Fondamentalement, ceci traduit que les conclusions dépendent des processus hydrologiques dominants dans chaque bassin versant et de la façon dont chacun est impacté par chaque scénario.

Une telle concision a un coût : il s'agit d'une figure construite pour un bassin versant précis, pour une variable hydrologique fixée, et moyennant le choix préalable de deux grandeurs résumant le changement climatique imposé. La construction d'une telle figure suppose ensuite l'intégration pour de nombreux couples (dT, dP) de la fonction de production pour le bassin versant concerné : on n'a disposé de tels résultats que pour certains bassins.

Méthode multi-objectif appliquée aux incertitudes

La méthode multi-objectif a été appliquée dans le projet pour examiner l'impact sur les prédictions de l'incertitude sur les paramètres des modèles hydrologiques distribués de la présente étude.

Cette méthode part de l'idée qu'il ne saurait y avoir un seul choix, objectif et statistiquement correct, pour la fonction objectif caractérisant l'accord entre un modèle et des observations. Dans un cadre multi-objectif, le calage d'un modèle peut ainsi se baser sur le respect :

- d'observations multi-variables : débits, niveaux piézométriques, humidité du sol, couverture nivale, etc. ;
- d'observations multi-sites : la même variable est observée en différents points du bassin modélisé ;
- de modes de réponse multiples : on utilise différentes fonctions objectifs pour rendre compte de différents aspects de l'accord entre observations et valeurs simulées ; dans le cas du débit, on distingue typiquement écoulements moyens, crues et étiages.

Le problème du calage revient dès lors à une minimisation conjointe de plusieurs fonctions, comme suit :

$$\text{Min}\{F_1(\theta), \dots, F_n(\theta)\} \quad (1)$$

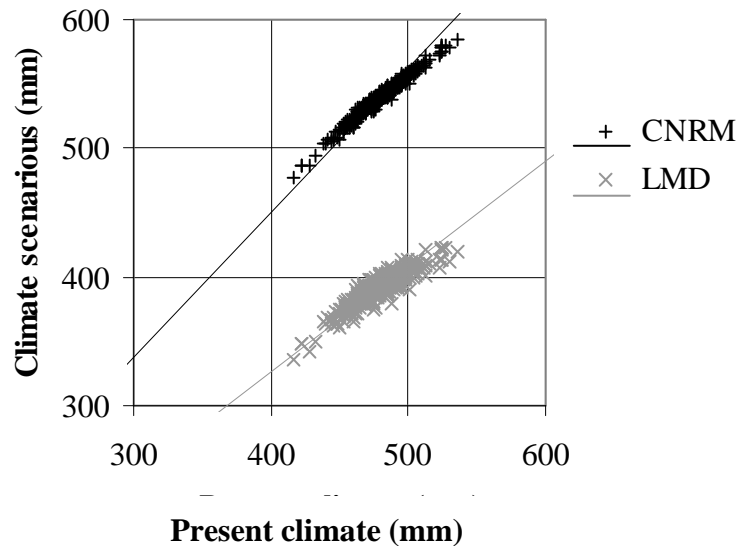
où $F_i(\theta)$, $i = 1, \dots, n$ sont les différentes fonctions objectif. Un problème multi-objectif, qui n'a dans le cas général pas de solution mathématique unique, pourrait en avoir une dans le cas qui est le nôtre de modélisation d'une réalité unique. Mais il est impossible en pratique de trouver un jeu de paramètres pour lequel tous les critères atteignent une valeur minimale, ceci étant du aux inévitables erreurs ou approximations de structure, de données, de résolution etc..

Posons qu'un jeu de paramètre θ en domine un autre θ' quand :

- a) $F_k(\theta) \leq F_k(\theta')$ pour $k = 1, 2, \dots, n$;
- b) $F_k(\theta) < F_k(\theta')$ pour au moins une valeur de k .

Certaines solutions apparaîtront comme non dominées, et ce sont les seules intéressantes. La dispersion des paramètres parmi ces solutions non dominées fournit une bonne image de l'incertitude du calage tel que réalisé (en climat actuel).

En examinant le comportement du modèle sous scénario pour l'ensemble des solutions non dominées, on obtient une image des implications de cette incertitude des paramètres en terme de conséquence du changement climatique.



Écoulement simulé au Châtelet pour chacun des 400 jeux de paramètres, en fonction de l'écoulement en climat présent. Les scénarios CNRM-HR et LMD-HR sont distingués.

Dans l'exemple ci-dessus, on montre que l'écoulement de la Saône au Châtelet est nettement augmenté selon le scénario CNRM-HR, nettement diminué selon le scénario LMD-HR, et que cette conclusion est indépendante du choix que l'on peut faire parmi l'ensemble des jeux de paramètres de calage que l'on peut considérer comme légitimes.

Ces deux premières approches, relativement récentes, ont été adaptées et introduites par les participants dans leurs outils en réponse particulière aux besoins du projet GICC-Rhône.

A la fin du projet GICC-Rhône, le recours à de telles approches paraît désormais tomber sous le sens. Ceci nous semble devoir être considéré comme le signe de leur adéquation à la problématique du projet.

Synthèse statistique

Des outils de statistique descriptive des régimes hydrologiques (classiques ou développés spécifiquement pour le projet) ont été mis à contribution pour dégager quelques tendances. Par exemple, l'ensemble des chroniques de débit observées, reconstituées et simulées sous changement climatique a été analysé, en terme de hautes-eaux, pour deux des modèles hydrologiques et deux des scénarios. En chaque station, on cale sur les valeurs fortes du débit un modèle comportemental de type $Q(d,T) = (Q_{10} + Gr \cdot \ln(T/10)) / (1 + \frac{d}{\Delta})$, où Q_{10} représente le débit journalier décennal, GR représente l'augmentation du débit de crue avec la période de retour, et Δ est une durée liée à la durée des crues D . Les évolutions sont prises en pourcentage et en moyenne pour l'ensemble des stations simulées afin de se dégager des variations locales.

Scénario	variable	modèle Isba-Modcou	modèle Modcou	commentaire
CNRM-HR	Q10	+12%	+13%	augmentation des pointes
	GR	+18%	+22%	augmentation des gradex
	D	+4%	-3%	durées inchangées
LMD-HR	Q10	-7%	-8%	diminution des pointes
	GR	-1%	inchangé	gradex inchangés
	D	-5%	-10%	diminution des durées ?

*Evolution moyenne des trois paramètres du modèle QdF sur les 131 chroniques
pour les modèles Isba-Modcou et Modcou, pour les deux scénarios à haute résolution*

Il est à noter que de tels résultats relatifs aux crues sont très dépendants de l'hypothèse de conservation de la durée des séquences pluvieuses impliquée par la méthode de genèse des champs atmosphériques retenue et reporte l'évolution sur les intensités de pluie. Or on sait que les crues dépendent non linéairement des intensités de pluie.

Ceci dit, on voit manifestement apparaître que la différence entre scénarios est plus forte que la différence entre modèles hydrologiques. C'est en ce sens que la statistique apporte beaucoup à la discussion des incertitudes.

4 - Résultats

Les résultats du projet sont de deux ordres : les uns sont des résultats de méthode ; les autres sont des résultats spécifiques au bassin versant étudié.

Résultats de méthode

A l'issue de cette étude, on peut proposer les conclusions suivantes relatives à la nature des prédictions hydrologiques qu'il est possible de faire sous climat influencé, ainsi que quelques remarques concernant la manière d'aborder des impacts particuliers.

Les travaux de modélisation entrepris montrent que si on dispose d'un scénario atmosphérique :

- il est possible d'en décliner certaines conséquences hydrologiques ;
- la variabilité engendrée par la variété des processus en œuvre dans les différents bassins et par les méthodes de désagrégation temporelle et spatiale est telle que les conclusions peuvent différer profondément d'un bassin à un autre, et dépendent fortement de la grandeur hydrologique étudiée ;
- la synthèse statistique des résultats hydrologiques est une voie qui permet cependant de dégager quelques tendances ;
- la mise en œuvre de représentations adaptées (diagramme de sensibilité) permet de montrer de façon relativement convaincante et ramassée que les conclusions dépendent

des caractéristiques propres des bassins concernés et du choix précis de la variable étudiée (nature de la variable, mais aussi support temporel (saison, durée, ...) et statistique (moyenne, quantile)). Certaines conclusions seront fermes, d'autres pas : la dispersion des scénarios atmosphériques dans le diagramme de sensibilité donne image de ce degré de fermeté ;

- la mise en œuvre de techniques d'exploration numérique des incertitudes adaptées (modélisation multi-objectif) permet de montrer que l'incertitude de calage des modèles hydrologiques n'est pas de nature à empêcher d'énoncer des conclusions relativement précises (ce qui suggère que si les modèles hydrologiques sont perfectibles, et certainement ils le sont, ce sera dans leur structure et non pas dans leurs algorithmes de calage).

A l'issue du projet GICC-Rhône, il paraît clair que la dispersion des « images du futur » que l'on obtient est principalement due à celle des scénarios atmosphériques de forçage censés représenter ces futurs possibles. Les incertitudes de calage des modèles hydrologiques distribués ne paraissent pas d'un ordre de grandeur suffisant pour que la substitution d'un jeu de paramètres de calage à un autre équivalent, ou la substitution d'un modèle à un autre, soient de nature à remettre en cause cette conclusion.

Résultats relatifs au bassin versant du Rhône

Hydrologie générale

Pour la Saône, l'Ardèche et le Rhône dans son ensemble, les hauts débits tendent à augmenter, les eaux moyennes et les étiages à diminuer. Pour la Durance, au régime nival, on observe une diminution du pic de fonte et un moindre maigre hivernal, les deux aspects étant évidemment liés.

Ces conclusions dépendent fortement du scénario : si les crues augmentent d'environ 12% dans le scénario CNRM-HR, elles diminuent quelque peu dans le scénario LMD-HR.

Par contre, l'évolution ne dépend guère du modèle hydrologique sous-jacent.

L'impact du changement climatique est évidemment saisonnalisé. Les écoulements sont susceptibles de diminuer de mai à novembre. L'évolution hivernale dépend du scénario retenu.

L'étude des bassins de la Durance et de la Saône montre que l'impact est différenciée selon les processus dominants dans les bassins.

Dans cet esprit, si on procède à une décomposition en fonctions orthogonales empiriques (EOF) de l'ensemble des régimes mensuels moyens sur les 131 stations reconstituées et simulées par les modèles, en climat présent ou sous scénario pour les deux forçages atmosphériques à haute résolution, on constate que la deuxième composante, qui porte le signal d'écoulement printanier attribuable à la fonte nivale, se trouve affaiblie sous scénarios de changement climatique.

Cette évolution en diminution de la composante nivale est la plus nette conclusion que l'on puisse tirer pour ce qui est de l'eau en tant que ressource.

Manteau neigeux

La simulation du manteau neigeux sur le bassin versant du Rhône fournit des résultats validés par comparaison avec les observations de hauteurs de neige et de débits. Sur 23 postes d'observation du manteau neigeux, l'écart quadratique moyen entre observations et simulation

de la hauteur de neige est de 16 cm. L'impact du réchauffement est une diminution générale des hauteurs de neige, de l'accumulation maximale et de la durée de l'enneigement. Cette diminution est forte à basse et moyenne altitude (réduction de 50 % du manteau neigeux, voire parfois disparition) et moins sensible en haute montagne (-20% pour l'accumulation maximale). Les surfaces enneigées pendant l'hiver diminuent en moyenne de 25 à 40 % suivant les scénarios. La fonte du manteau neigeux se produisant plus tôt et les précipitations neigeuses diminuant, les forts débits printaniers sont généralement réduits et ils apparaissent plus tôt (1 mois avant). Les débits hivernaux augmentent sensiblement (davantage de pluies hivernales), alors que les débits estivaux sont réduits de 50 % (assèchement plus marqué des sols). Ces tendances générales sont reproduites par tous les scénarios, à des degrés divers. Deux familles principales se distinguent : quatre scénarios « modérés » et deux « extrêmes » (dans le sens d'une réduction plus forte du manteau neigeux).

Biologie des écosystèmes aquatiques

Si l'on considère comme plausible une réduction des débits mensuels secs sur le bassin de l'ordre de 30% - 40 % (plusieurs scénarios s'accordant la-dessus), une réduction moyenne de la proportion des espèces d'eau courante de 20% semble également plausible. Elle pourrait concerner le nord-nord-est du bassin en particulier. Sans être 'catastrophique', cette évolution pourra renforcer la régression générale de ces espèces en Europe (en particulier hotu, ombre commun, vandoise, barbeau), due à l'aménagement des cours d'eau.

Production agricole irriguée

Les variations du climat prévues sous scénario 2xCO₂ par le modèle ARPEGE-CLIMAT sont de l'ordre de grandeur suivant : une augmentation de la température moyenne annuelle de 2,5 °C, et en juillet de 4 °C. La pluie moyenne annuelle demeure la même, mais sa répartition mensuelle change avec une diminution de 30 % en juillet. L'effet indirect du doublement de CO₂ simulé avec le modèle de culture STICS, induit une réduction de la durée du cycle du maïs de 21 % se traduisant par une perte en rendement de 15 %. Le raccourcissement de la durée du cycle induit une augmentation de la dose d'arrosage de 14 % avec une variabilité de 12 %. Le réchauffement climatique induit des doses d'arrosage plus élevées et moins variables. Une date précoce permet de décaler la période d'arrosages et de réduire la dose d'arrosage en août, période où la disponibilité en eau de la rivière est la plus faible. Une réduction de la dose de 45 % en moyenne, induit des pertes en rendement de 26 %, pour le climat présent et de 32 %, pour le climat futur. L'effet du stress hydrique peut ainsi être plus accentué pour un scénario 2xCO₂ que pour le scénario 1xCO₂. La variabilité du rendement passe de 4 % en conditions de satisfaction en eau optimales à 22 % en absence d'irrigation. L'augmentation de la demande en eau d'irrigation environ de 14 % ne peut qu'augmenter la fréquence des déficits en eau dans la basse vallée de la Drôme.

Il est intéressant de constater que dans la dernière décennie, la variabilité climatique (actuelle) en basse vallée de la Drôme a produit une température moyenne annuelle augmentée de 0.9 °C, avec en juillet une augmentation de 2 °C. Cette simple fluctuation et les tensions déjà actuelles sur la ressource en eau qu'elle a induit laissent penser que les ordres de grandeurs ci-dessus évalués pour les impacts sont corrects.

Végétation spontanée

L'hypothèse d'une végétation potentielle qualitativement constante apparaît en soi manifestement fautive. Elle devra être revue dans des études qui s'intéresseraient à certains impacts effectivement subordonnés à la stabilité de la végétation naturelle. Malgré cela, nous estimons que les évaluations d'hydrologie quantitative faites sur le bassin versant du Rhône

dans le cadre de GICC-Rhône, avec l'hypothèse d'une végétation invariante, peuvent être considérées comme une approximation satisfaisante au premier ordre. Les arguments majeurs sont liés à la part relativement faible du territoire occupée par une végétation « spontanée », et surtout le fait que l'évolution de la végétation se fera sur une durée probablement plus longue que l'horizon 2050 étudié.

Végétation interactive

Après avoir, dans un premier temps, évalué l'impact hydrologique d'une modification du climat avec la version standard d'ISBA, nous avons évalué l'apport de la prise en compte d'une végétation interactive via l'utilisation du module ISBA A-gs. Dans les simulations en temps présent, bien que l'évolution de la végétation varie d'année en année et présente des maximums d'indice foliaire variables, les résultats d'ISBA A-gs ont montré une faible sensibilité aux variations de l'indice foliaire, et la variation inter-annuelle de la végétation ne modifie que faiblement le bilan hydrique simulé.

On a ensuite étudié l'impact du changement climatique (scénario CNRM-HR), combiné au doublement de CO₂ sur l'évolution de la végétation et les différences que cela induit par rapport aux simulations d'ISBA standard. On constate que la végétation est très sensible à la fois au doublement de CO₂, qui conduit à une augmentation de l'indice foliaire, et au changement climatique, qui par effet de stress hydrique, tend au contraire à réduire le développement de la végétation, et de fait, son indice foliaire. En terme d'impact du changement climatique sur le bilan hydrique, il s'avère que la prise en compte de l'adaptation de la végétation au changement climatique et à l'augmentation du CO₂ ne conduit pas à des résultats très différents de ce qui avait été obtenu avec ISBA standard et donc sans prise en compte de cet impact.

Autres points

Les fluctuations observées de l'occupation du sol sur la bassin de la Saône au cours des années passées ne semblent pas de nature à modifier profondément la réponse du bassin. Ceci est dû au fait que les fractions occupées par les différentes occupations du sol varient relativement peu, alors que les réponses hydrologiques ne sont pas foncièrement différentes.

La modélisation très soignée de la nappe de la Saône entreprise par le BRGM ne lui a pas permis d'améliorer la précision des conclusions.

Discussion des incertitudes

Intrinsèquement, c'est la notion même de modèle qu'il convient de bien garder en mémoire pour ne pas faire dire à notre étude plus qu'elle ne prétend dire.

Un point sensible limite notre modélisation des variables hydrologiques en climat futur et notamment de leurs extrêmes. On peut le résumer comme suit : les MCG sont reconnus comme imparfaits ; on pense cependant que leur sensibilité au doublement de CO₂ (tendance des différents champs) est correcte ; ceci a induit une méthodologie de désagrégation particulière, la méthode des perturbations.

Or, cette stratégie limite la pertinence du dispositif pour l'évaluation des extrêmes. En effet le choix raisonnable en soi de la technique d'adaptation d'échelle des scénarios atmosphériques se révèle privilégier les écoulements moyens. Seules les fluctuations des valeurs moyennes mensuelles sont imprimées dans les champs des variables atmosphériques aux pas de temps tri horaires ou journaliers.

Un autre aspect à garder en mémoire est celui de l'équifinalité de calage des modèles hydrologiques, à savoir que toute une famille de jeux de paramètres peut rendre compte à un même degré des observations, pour un modèle dont la structure (géométrie et présentation des processus) est fixée. Un traitement possible de l'équifinalité est de considérer l'incertitude sur les paramètres comme ressortant d'un modèle mathématique qui reste à préciser compte-tenu des données (approche bayésienne). Moins contrainte mathématiquement, la méthode multi-objectif adoptée ici permet de bien montrer l'ordre de grandeur des incertitudes impliquées par l'équifinalité et, notamment, qu'elle est inférieure à la dispersion entre les scénarios atmosphériques.

La question de l'erreur de structure des modèles est plus délicate, en particulier elle n'est pas évaluable par de simples manipulations quantitatives. Nous l'avons abordée sous l'angle très pragmatique de la confrontation entre différents modèles, qui fournit une première vision de la dispersion des résultats attribuable à différentes formulations des phénomènes hydrologiques.

L'absence d'adaptation du bassin, la végétation naturelle et la végétation cultivée censées rester identiques à elles-mêmes sous des conditions climatiques différentes constitue une hypothèse forte. La végétation potentielle, réponse naturelle imaginée en équilibre avec les climats futurs, peut en effet être significativement différente de la végétation actuelle.

Quelle part cela aura-t-il dans une modification des régimes hydrologique des bassins ? Une étude de sensibilité menée par le CNRM, sur la base des modifications d'occupation du sol observées récemment sur le bassin de la Saône, montre s'il en était besoin qu'une variation de quelques pour cents de l'occupation du sol a peu d'influence sur l'hydrologie quantitative à l'aval du bassin. L'extension observée de la végétation naturelle dans les bassins concernés étant proche de celle qui est attendue, l'impact hydrologique de la modification de l'occupation de l'espace ne ressort pas comme déterminant.

Ceci n'exclut pas des points à garder en mémoire au moment d'étudier des évolutions plus locales (en zones naturelles justement) ou des variables autres (qualité de l'eau, érosion).

Les cultures irriguées seront bien évidemment soumises à des contraintes fortes de disponibilité en eau. La contribution de l'équipe Irmo montre clairement que le scénario général 2CO2 implique « mécaniquement » une tendance à la substitution de certaines spéculations agricoles vers d'autres moins exigeantes en eau, toutes choses restant égales par ailleurs. L'agriculture irriguée étant en France une pratique résultant plus d'un contexte économique et social particulier que des contraintes strictes de la nature, et comme il est impossible de savoir comment ce contexte évoluera, ce que seront les agricultures de demain reste largement incertain. Mais le résultat partiel obtenu – tendance à la substitution de spéculations moins dépendantes en eau en réponse à une tension sur la ressource – reste intéressant en soi.

Les incertitudes de modélisation, réelles, sont très variables d'un bassin à l'autre et selon les variables étudiées. Cependant, les pires incertitudes ne concernent peut-être pas l'hydrologie, et toute amélioration des scénarios atmosphériques du futur aura des répercussions immédiates sur la précision et la fiabilité des projections hydrologiques.

5 - Conclusion : résultats obtenus par rapport aux objectifs initiaux, perspectives à développer

La plupart des actions envisagées par le projet GICC-Rhône, soit dès sa conception, soit apparues souhaitables au cours du développement des travaux de recherches, ont pu être atteintes ; d'autres actions apparaissent souhaitables à l'avenir. La présente section détaille ces aspects.

Prise en compte d'un scénario de climat amélioré

Le projet GICC-Rhône a été très dépendant, quant à ses résultats, de la définition des scénarios climatiques et de leur régionalisation. Dans cet esprit, le projet GICC-Rhône a maintenu constamment le lien entre climatologues et hydrologues. Cependant, concrètement, il n'a pas été possible de prendre en compte des nouveaux scénarios devenus disponibles depuis 1999 (on envisageait par exemple de considérer le dernier scénario Arpege-Climat, Royer et al. 2002). Ce scénario, différent mais pas forcément « meilleur » que les autres pour ce qui est de prédire l'état du bassin versant du Rhône en 2050, aurait nécessité un effort important pour parcourir à nouveau ce qui avait été déjà fait et aurait nuit au nécessaire travail sur les incertitudes.

Evaluation des autres termes du bilan à l'échelle des sous-régions hydrographiques

Dans l'analyse des débits, il paraît nécessaire de distinguer écoulements et ressource et de rendre mieux compte de leur structuration spatiale et de la variabilité des écoulements. Par ailleurs, le projet dispose de plus d'informations que les seuls débits simulés. Pour le bassin dans son ensemble, on espérait examiner divers termes du bilan hydrologique. Disposer de la variation moyenne annuelle des précipitations (pluviométrie + lame de fonte) sur l'ensemble du domaine par rapport au climat actuel permet non seulement de faire une analyse des débits, mais aussi d'examiner globalement les termes du bilan. Il paraît donc possible et souhaitable d'élaborer des bilans par secteur géographique, au moins au niveau de la sous-région hydrographique (soit une vingtaine de fragments sur le domaine). Enfin les écoulements superficiels sont **de fait** le lieu d'une gestion partagée, d'une part spatialement en tant que ressource structurée par le réseau hydrographique, d'autre part par l'interaction entre la gestion de la ressource en eau (eaux moyennes), celle des aléas (hautes & basses eaux), et la gestion de fait du milieu naturel. Pour aller vers la prise en compte de ces interactions, une délimitation des volumes générés par sous-bassin et leur composition cartographique apparaissent souhaitables et possibles (Sauquet et al, 2000). Un travail méthodologique a été mené au sujet de la composition des crues et mériterait application (Gottschalk et al, 2002). Cette action se poursuivra au Cemagref hors du cadre formel du projet.

Caractérisation des impacts hydrologiques

La composition spatiale des écoulements se fait le long du réseau hydrographique et en temps courant. Si on s'intéresse aux régimes hydrologiques, on obtient une composition qui n'a rien de trivial : les 'modules' (espérance mathématique des débits) s'ajoutent, mais la variabilité des écoulements tend à diminuer quand la taille du bassin augmente (diminution relative des pointes de crue avec allongement concomitant des durées), cet effet attendu pouvant être battu en brèche en fonction de l'éventuelle hétérogénéité spatiale du climat ou la géologie. L'analyse à la station pratiquée dans GICC-Rhône et le recours à des statistiques d'agrégation traitant chaque chronique comme un individu indépendant ignorent cette interdépendance.

En un sens, ce qui a été examiné pour l'heure n'est pas encore un impact, mais plutôt un effet du changement climatique. En effet, l'impact suppose un usage défini. Et les usages sont multiples : demande *in situ* (milieu naturel et hydroécologie), eau potable, agriculture irriguée, industrie, navigation, hydroélectricité, dilution d'effluents, loisirs (seuls les usages soulignés ont été explicitement présents dans le projet). Ces différentes demandes diffèrent par leurs besoins en terme de degré d'agrégation, sensibilité aux variations, saisonnalité des besoins, exigences chimiques, biologiques, thermiques ; ceci fait que la caractérisation des effets du changement climatique par les indicateurs déployés ne suffit pas à préciser ce que sera son impact sur les sous-systèmes d'utilisation. Un précurseur général de toute étude de ressource en eau pourra être la distribution du volume V écoulé entre deux dates choisies d_1 et d_2 fixées dans l'année. Si $d_2=d_1$, on étudie la distribution des débits conditionnellement au quantième ; Si $d_2=d_1+1\text{an}$, la statistique obtenue est celle des débits annuels pour une année hydrologique commençant à d_1 . EdF-DTG, par exemple, examine la distribution des débits journaliers par saisons de 10 jours, ce qui revient à fixer $d_2=d_1+10\text{j}$. Notons qu'au plan international, les indicateurs retenus dans les études à échelle planétaire sont très souvent bien frustrés (mm/an ou $\text{m}^3/\text{an}/\text{hab}$), et il y a donc bel et bien possibilité pour les hydrologues d'apporter sur ce point une contribution utile aux études hydroclimatiques.

Autres perspectives

Hors de ces développements méthodologiques, on peut repérer deux axes de perspectives.

Le premier concerne le Rhône : il serait possible de mettre à disposition des éléments de scénarios et d'impact dans le cadre d'un partenariat avec les acteurs de la gestion effective, et d'effectuer un porté à connaissance des communautés de chercheurs structurées sur le fleuve (ceux de la Zone Atelier Bassin du Rhône notamment) ; il y aura également possibilité de prendre en compte les scénarios climatiques nouveaux, qui viendront à se préciser d'une part avec la constatation des choix politiques au niveau global et de leurs incidences sur l'écologie, d'autre part avec les progrès de la modélisation à l'échelle globale.

Le deuxième axe est celui de la transposition à d'autres bassins : la demande est potentiellement énorme, à mesure de la montée des conflits sur l'eau qui semblent devoir hélas accompagner le développement économique et humain.

Vis-à-vis de cette dernière perspective, il faut bien voir que le principal obstacle reste l'investissement technique et administratif nécessaire à la mise en place des bases de données nécessaires. Du point de vue des chercheurs, la bonne fin d'une action récente coordonnée par Météo-France sous égide du PNRH nous assure cependant que le système pourrait désormais être mis en place rapidement sur la France.

6 - Rapports, publications, thèses, sites Internet, et autres valorisations de l'étude

Articles

(seuls sont mentionnés les éléments parus au 1/10/2004)

- Etchevers P., Golaz C., Habets F. and Noilhan J. (2002) : Impact of a climate change on the Rhone river catchment hydrology. *J. Geophys. Res.*, 107 (D16), 10.1029/2001JD000490.
- Krasovskaia, I; Gottschalk, L , River flow regimes in a changing climate , *Hydrol. Sci. J.-J. Sci. Hydrol.* , 2002 , volume 47 , pages 597 - 609
- Krasovskaia, I; Gottschalk, L; Leblois, E , Signature of changing climate in river flow regimes of Rhone-Mediterranean-Corsica region , *Houille Blanche-Rev. Int.* , 2002 , volume , pages 25 - 30
- Krasovskaia, I; Gottschalk, L; Leblois, E; Sauquet, E , Dynamics of river flow regimes viewed through attractors , *Nord. Hydrol.* , 2003 , volume 34 , pages 461 - 476
- Leblois, E , Evaluation of the possible impacts of climatic change by distributed models (Gewex-Rhone et Gicc-Rhone projects) , *Houille Blanche-Rev. Int.* , 2002 , volume , pages 78 - 83
- Martin E. and P. Etchevers (2002) : Impact des variations climatiques sur le manteau neigeux, incidence sur l'hydrologie nivale, les avalanches (Impact of climatic changes on snow cover, snow hydrology and avalanches). *Journal de la Houille Blanche*, 8, 84-88.
- Martin, E; Etchevers, P , Impact of climatic changes on snow cover, snow hydrology and avalanches , *Houille Blanche-Rev. Int.* , 2002 , volume , pages 84 - 88
- Ottlé C., D. Richard, S. LeHégarat, C. Guérin, J. Noilhan P. LeMoigne, F. Habets, (2002) : Modélisation hydro-météorologique du bassin du Rhône : Apport de la télédétection spatiale, *La Houille Blanche*, 1-2002, 57-61.
- Sauquet, E; Leblois, E , Discharge analysis and runoff mapping applied to the evaluation of model performance , *Phys. Chem. Earth Pt B-Hydrol. Oceans Atmos.* , 2001 , volume 26 , pages 473 - 478
- Sauquet, E; Leblois, E , Mapping runoff within the GEWEX-Rhone project , *Houille Blanche-Rev. Int.* , 2001 , volume , pages 120 - 129
- Thiery D. et Amraoui N. 2001 - Hydrological modelling of the Saone basin. Sensitivity to the soil model. *Physics and Chemistry of the Earth Journal, Part B Vol 26 (5-6) pp. 467-472 April 2001.*

Communications à colloques et autres interventions orales

- Etchevers P. and Martin E. (2003) : impact of a climate change on the French Alps snow cover and mountain river discharges. *Mountains as Water Towers – Banff Mountain Summit., Proceedings, November 2003, Banff, Canada.*
- Etchevers P. et Martin E. (2002) : Impact d'un changement climatique sur le manteau neigeux et l'hydrologie des bassins versants de montagne. Colloque « L'eau en montagne », 4-6 septembre 2002, Megève, France.
- Etchevers P., Boone A., Noilhan J. et Martin E. (2002): Impact d'un changement climatique sur les bassins versants français : résultats et incertitudes. *Congrès de la Société Hydro-technique de France (SHF), 7-8 mars 2002, Grenoble, France.*
- Krasovskaia I., Gottschalk L., Leblois E., Signature of changing climate in Rhône-mediterranean-Corsica region, exposé au colloque SHF "variations climatiques et hydrologie", 12-13 décembre 2001
- Leblois E., 2000 - Application d'un modèle distribué à la détermination des impacts du changement climatique : un exemple sur le Rhône – *Entretiens J. Cartier, Montréal, 2000*
- Leblois E., 2003, intervention à la semaine européenne de l'ENGREF, 18 novembre 2003
- Leblois E., et al., 2001, Evaluation des impacts possibles du changement climatique, à la suite du projet Gewex-Rhône, par application d'un modèle distribué, exposé au colloque SHF "variations climatiques et hydrologie", 12-13 décembre 2001

- Leblois E., Noilhan J., Ledoux E., Ottlé C., et al., 2001, Modélisation hydro-météorologique du bassin français du Rhône, poster à la conférence « Lyon Fleuves 2001 », 6-8 juin 2001
- Martin E., Etchevers P., 2001, Impact des variations climatiques sur le manteau neigeux, incidence sur l'hydrologie nivale et les avalanches, exposé au colloque SHF "variations climatiques et hydrologie", 12-13 décembre 2001
- Noilhan J., Le programme GICC-Rhône : premiers résultats et perspectives. Séminaire GICC, Jussieu, 13-14 décembre 2001
- Noilhan J., Régionalisation dans le cadre GICC-Rhône : scénarios, méthodologie et impacts sur l'hydrologie du sol. Exposé dans le cadre de la journée du pôle de modélisation de l'IPSL sur le thème « variabilité climatique à l'échelle régionale pour le secteur géographique Nord-Atlantique, Europe et Méditerranée », Paris, 7 septembre 2001
- Ottlé, C., D.Richard, S. LeHégarat, C. Guérin, J. Noilhan, P. LeMoigne and Habets, F., 2001. Modélisation hydro-météorologique du bassin du Rhône : Apport de la télédétection spatiale. In: D. Duband (Editor), Imagerie satellitaire et radar au service de l'eau. Société Hydrotechnique de France, Toulouse, France, pp. 41-48.

Rapports et notes de travail

- Amraoui, N., Golaz, C., Thiéry D., 2003- Modélisation du bassin de la Saône : Caractérisation du système aquifère et modélisation des écoulements avec prise en compte de la nappe. Rapport BRGM à paraître
- Boone A., Noilhan J. et Etchevers P., 2000 : GICC-Rhône Climate Scenarios. Rapport intermédiaire du programme GICC/Rhône, CNRM+CEN , novembre 2000, 55 pages.
- Deschamps, Th., 2002, Influence de l'occupation des sols et des changements climatiques sur les crues, dans la région du Val de Saône, Rapport de stage de TER, Université Paris-Sud, Juin 2002, rapport interne CETP.
- Etchevers P., Boone A., Noilhan J., 2001 : impact du changement climatique sur le manteau neigeux alpin. Rapport intermédiaire du programme GICC/Rhône, CNRM+CEN , septembre 2001, 25 pages.
- Hendricks F., Avancement EDF R&D au titre de GICC-Rhône, note de travail EDF, 15 pages.
- Leblanc J., 2001 : Changements climatiques et irrigation, revue bibliographique, mémoire de l'INA-PG, série irrigation, n° 894, 36 pages
- Leblois E. et al. : analyse de l'impact du changement climatique sur l'hydrologie du bassin versant de la Saône – approche statistique de débits simulés sous scénarios – en cours de rédaction (2004).
- Leblois E., 2001 : Indicateurs hydrologiques et changement climatique, 10 pages
- Leblois E., Garçon R., 2000 : Comparaisons entre chroniques de débit, note de travail Cemagref-EDF/DTG, 20 pages.
- Ledoux E., L'influence du changement climatique sur le régime hydrologique des grands bassins versants , l'exemple du bassin du Rhône , note du CIG/ENSMP, 2002 , 9 p + figures
- Noilhan J., A. Boone and P. Etchevers, 2001: Application of climate change scenarios to the Rhone basin. Dans 'Applying Climate Scenarios for Regional Studies with particular reference to the Mediterranean', Rapport No 4 ECLAT 2, édité par S. Planton, C. Hanson, D. Viner and M. Hoepffner, Toulouse, 25-27 octobre 2000, 58- 74
- Richard, Daniel, 2001 : Mise en place de la base de données AVHRR dans le cadre du programme Gewex-Rhône et validation des simulations CIRCE, Rapport interne CETP, décembre 2001.
- Zin, I., Saulnier, G.-M., 2001, Incertitudes et modélisation, note de travail LTHE pour GICC-Rhône, 18 pages

Site internet

A Météo-France, le site <http://cnrm.meteo.fr/mc2> présente la contribution de Météo-France à la genèse des champs météorologiques sous scénario de changement climatiques.

7 - Disponibilité des données

Le projet GICC-Rhône n'a pas produit de base de données organisée.

La principale raison en est que les données de base dont il s'est servi restent dans plusieurs cas la propriété stricte des organismes ayant soutenu le projet, et que la distribution de résultats bruts aurait peu de sens en l'absence d'une référence en climat présent.

D'autre part, la valeur ajoutée du projet nous semble être plus dans la méthodologie et dans la discussion des incertitudes que dans la valeur précise de tel ou tel quantile de débit sous tel ou tel scénario.

Les participants resteront par contre attentifs aux besoins qui s'exprimeront auprès d'eux.

8 - Résultats qui mériteraient d'être valorisés dans le site Internet GICC

L'ensemble des résultats du présent rapport résumé nous pouvoir être portés à connaissance sur le site internet général du programme GICC. S'agissant d'une communication destinée à un public potentiellement large, il nous paraît important qu'ils soient replacés dans le cadre général suivant qui, dans un esprit de développement durable, nous paraît devoir accompagner toute communication de résultats de recherche liés aux hydrosystèmes :

- En toutes circonstances, une gestion de type patrimonial (nous avons ensemble une richesse à gérer) doit être favorisée. Ceci est lié à la nature même de l'objet étudié (réseau hydrographique incrusté dans un bassin versant habité par l'homme). La reconnaissance de la multiplicité des usages implique la nécessité d'une représentation variée de ces usages au sein d'une institution chargée de bâtir une perspective de moyen sinon de long terme. Une telle gestion passe par une connaissance approfondie de l'hydrosystème comme objet naturel ayant sa propre logique de fonctionnement ;
- les écoulements sont naturellement variables, la variabilité des écoulements implique le caractère aléatoire de la ressource qu'ils peuvent représenter. A cet égard, on suggère de ne pas trop rigidifier les gestions actuelles : tout changement de contexte remettra les optimisations trop pointues en cause, et il est important de minimiser le coût de ces remises en cause en gardant des marges d'adaptation. Le changement climatique, s'il se produit, sollicitera en effet fortement l'adaptation des hydrosystèmes et de leur gestion. Et la meilleure des gestions actuelles, celle qui accepte la réalité de la variabilité du milieu naturel et la variabilité hydrologique en particulier, sera la plus apte à s'adapter.

Parmi les conclusions du projet GICC-Rhône, on pourra retenir celles-ci, formulées par les évaluateurs du projet au sein du Comité Scientifique du programme GICC :

- La source majeure d'incertitude provient des scénarios climatiques de grande échelle, en particulier de la divergence des résultats pour un même scénario entre deux modèles atmosphériques différents. Si ce résultat est confirmé par des études ultérieures, il implique une grande prudence quant à l'utilisation des scénarios dans les études d'impact et la nécessité d'une approche pertinente d'ensemble des modèles. Les modèles actuels doivent faire un saut significatif dans la représentation du climat actuel car leur sensibilité régionale sera fortement conditionnée par cette représentation. De plus, il est nécessaire d'extraire de ces modèles l'information pertinente pour représenter la variabilité et les extrêmes ;
- un second point apparaît comme limitant dans plusieurs études : l'intervention de l'homme et les choix de gestion du milieu. En effet le territoire national est fortement anthropisé et tous les efforts de représentation de végétation potentielle, ou d'hydrologie, peuvent être remis en cause par l'intervention humaine. Il y a donc à insérer dans les études futures cette intervention du couplage entre systèmes naturels et gestion de l'environnement par les activités humaines ;
- les résultats obtenus l'ont été dans un contexte d'hypothèses et de scénarios scientifiques bien précis ; comme ils concernent une très large communauté d'utilisateurs finaux potentiels, il faut veiller dans toute valorisation à ce que le contexte de leur élaboration soit bien explicité, en sachant que ces hypothèses et ces scénarios peuvent présenter une variabilité dans le temps et dans l'espace qui peuvent profondément les modifier.