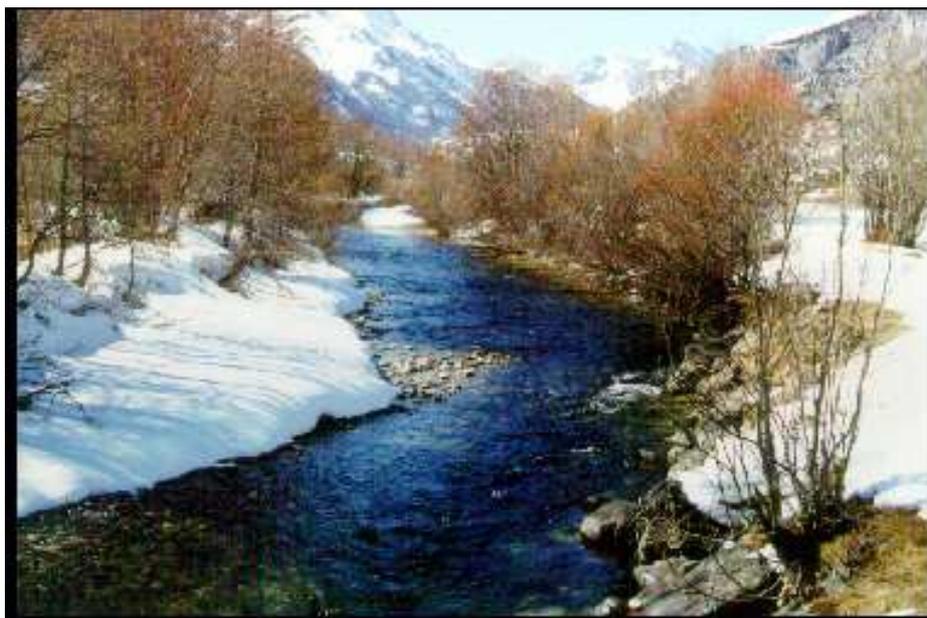


Projet GICC-Rhône
Rapport final de tranche I
Décembre 2002



La Clarée, haute vallée de la Durance

(photo E. Sauquet)

Tableaux

- 1 Les 6 scénarios de MCG 4 à basse résolution issus du projet LSCPR ; 2 à haute résolution, LMD-HR et CNRM-HR
- 2 Chroniques calculées disponibles
- 3 Moyenne des ratio entre lames d'eau simulées et lames d'eau reconstituées sur les 131 stations, pour les 2 modèles hydrologiques et les 6 scénarios climatiques
- 4 Ecart-type des ratio entre lames d'eau simulées et lames d'eau reconstituées sur les 131 stations, pour les 2 modèles hydrologiques et les 6 scénarios climatiques
- 5 Comparaison des paramètres du modèle QdF issus de la modélisation Isba-Modcou sur cinq stations.
- 6 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
- 7 Analyse de la variance. 6 scénarios, modèles Isba-Modcou et Modcou, sur 131 stations
- 8 Analyse de la variance. 6 scénarios, modèles Isba-Modcou, Modcou, et Cequeau, sur 7 stations

Figures

- 1 Le domaine modélisé du bassin versant du Rhône
- 2 Moyenne annuelle des variables climatiques du climat présent (1981-1997)
- 3 Variations mensuelles de la température de l'air T_a , des précipitations totales et neigeuses en moyenne sur le bassin du Rhône pour la période actuelle (1981-1997)
- 4 Cartes de la texture des sols (base INRA) et de la végétation reconstituées sur la grille 8 km à partir d'une résolution kilométrique.
- 5 Répartition des points de grille des 2 scénarios haute résolution dans le bassin du Rhône (résolution de 50 km et de 100 km respectivement pour les MCG CNRM – HR et LMD-HR)
- 6 Evaluation des 6 simulations MCG du climat présent sur le bassin du Rhône.
- 7 Anomalies mensuelles de précipitation (variation relative) et de température de l'air pour les 6 scénarios sur l'ensemble du bassin du Rhône.
- 8 Anomalies mensuelles d'évaporation potentielle pour les 6 scénarios sur l'ensemble du bassin du Rhône.
- 9 Variations saisonnière et régionale des anomalies relatives de précipitations
- 10 Discrétisation de base du domaine météorologique
- 11 Discrétisation du domaine de surface
- 12 Fonctions de production des modèles Modcou et ISBA-Modcou
- 13 Schéma de fonctionnement du modèle Cequeau
- 14 Fonction de transfert du modèle Cequeau

- 15 Cotes de l'eau dans les rivières du bassin de la Saône (m NGF). Les mailles en beige correspondent à la délimitation du système aquifère
- 16 Simulation de la Saône à Couzon, avec prise en compte du domaine souterrain
- 17 Différence entre les scénarios climatique et le climat actuel pour les hauteurs de neige (moyenne et maximum) et le nombre de jours de neige sur les Alpes
- 18 Evolution du manteau neigeux et des débits sur le bassin de la Haute Durance ; les 6 scénarios sont comparés au climat présent
- 19 Evolution des débits mensuels des bassins de la Saône à Macon et de la Durance sous hypothèse de changement climatique
- 20 Même construction, pour l'indice d'humidité du sol SWI. (SWI = 1 à la capacité au champ, SWI=0 au point de flétrissement)
- 21 Même construction pour l'évapotranspiration réelle
- 22 Evolution sous changement climatique de la distribution des débits variantes atmosphériques en rouge, reconstitution du climat présent en bleu
- 23 Evolution du débit moyen mensuel du Rhône à Beaucaire (modèle Modcou)
- 24 Analyse EOF de débits mensuels moyens
- 25 Trois premières EOF des régimes hydrologiques sur le bassin du Rhône.
- 26 Erreur de modélisation et impact du changement climatique
- 27 Evolution relative des débits annuels par rapport au débits du temps présent
- 28 Construction d'une analyse de sensibilité ; cas de l'évolution de l'écoulement estival de la Durance (explications dans le texte)
- 29 Etude de sensibilité aux anomalies mensuelles de température et de précipitation de l'écoulement total (Runoff), de l'équivalent en eau de la neige (Ws) et de l'humidité relative du sol (SWI) de la fonction de production hydrologique ISBA pour le bassin de la Haute Durance, en hiver (à gauche) et en été (à droite).
- 30 Comparaison des températures de surfaces pour la période 1981-1983. En abscisse, la température calculée à partir de l'imagerie NOAA/AVHRR, et en ordonnée la température de surface ISBA.
- 31 Estimation de l'occupation des sols à partir de l'imagerie NOAA/AVHRR pour l'année 1997 sur l'ensemble du bassin du Rhône
- 32 Variation moyenne annuelle de la lame incidente liée au forçage CNRM-HR

Introduction

Le présent rapport

Le présent rapport fait état des travaux effectués en première tranche du projet GICC-Rhône, projet soutenu par le Ministère de l'Environnement et du Développement Durable à travers le GIP Médias-France dans le cadre du programme de recherche Gestion des Impacts du Changement Climatique (GICC) (convention Médias 9/99). Il vise à donner une vue d'ensemble de l'avancement scientifique du projet GICC-Rhône à la date de rédaction.

Il décrit avant tout les tâches conventionnellement rattachées à la tranche I du projet (la génération des champs atmosphériques sous hypothèse de doublement de CO₂), mais aussi les modélisations hydrologiques effectuées et l'analyse des impacts hydrologiques. Il donne également des informations et propose des pistes quant à la tranche II du projet.

Sont successivement traités :

- 1) les objectifs du projet ; son organisation générale, et notamment son découpage en sous tâches,
- 2) les données disponibles et les méthodes pour la construction des scénarios atmosphériques sur le bassin du Rhône sous hypothèse de changement climatique,
- 3) les modèles hydrologiques utilisés,
- 4) l'analyse des résultats en terme d'impacts hydrologiques,
- 5) une conclusion et une discussion des limites de l'approche utilisée
- 6) une bibliographie et les productions du projet (articles et ensembles de données),

Sont ensuite présentés :

- en annexe 1, les actions en cours et celles qui apparaissent possibles ou souhaitables dans le cadre de la tranche II du projet, conformément aux annonces faites dans l'annexe technique du contrat de recherche (§ 1-2-1) ;
- en annexe 2, un résumé de l'utilisation du budget accordé par le MATE via Médias/France.

Cette présentation correspond à un projet conçu et animé comme un tout, et qui se poursuit.

Le contexte

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 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 (colloque d'Arles, 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/MATE a donné bonne place à cette thématique, au sein du programme Gestion des Impacts du Changement Climatique (GICC), dans lequel s'inscrit le projet ici rapporté.

1 - Objectifs, résumé

et organisation générale du projet

1.1 Objectifs du projet

Le projet vise à donner un éclairage sur les impacts à prévoir sur la partie française du bassin du Rhône, en raison d'un changement climatique résultant d'un doublement du CO₂ dans l'atmosphère (échéance probable 2050). Sa première tranche correspond à un travail effectué sur les scénarios climatiques et sur leurs conséquences hydrologiques.

Le changement climatique global susceptible d'intervenir sous scénario 2 x CO₂ est évalué à l'aide des sorties de deux modèles de circulation générale atmosphérique. Les indications météorologiques globales qui en résultent sont désagrégées par la méthode des perturbations vers les échelles plus détaillées nécessaires à la modélisation hydrologique. Les forçages climatiques obtenus sont appliqués à quatre modèles hydrologiques de la partie française du bassin versant du Rhône ou d'affluents d'intérêt particulier (les résultats issus de deux de ces modèles sont plus particulièrement analysés). Ceci fournit des indications sur les effets relatifs aux variables physiques majeures des hydro-systèmes étudiés. En particulier on étudie ainsi l'hydrologie générale des cours d'eau, conçue comme préalable à toute étude d'aléa hydrologique et de ressource en eau.

Sur la base de ces indications, on tentera dans une deuxième tranche d'évaluer les impacts relatifs à divers domaines physiques, biologiques et socio-économiques; les interactions avec les eaux souterraines ; les évolutions quantitative et qualitative de la végétation, indicatrices de ses capacités éventuelles d'adaptation ; les relations modifiées entre la ressource en eau et les systèmes agricoles irrigués ; la réaction des communautés ichtyologiques sous régime hydrologique modifié (en collaboration avec le projet proposé par M. Pont).

A travers l'ensemble des travaux on cherche à exprimer et si possible à quantifier les incertitudes que recèle la connaissance actuelle. A cet égard c'est à dessein que les proposant ont recours à plusieurs modèles tant au niveau des scénarios d'évolution globale qu'à celui de la modélisation hydrologique.

1.2 Résumé des travaux

1.2.1 Travaux annoncés (annexe technique du contrat de recherche)

TITRE DU PROJET : Etude des impacts potentiels du changement climatique sur le bassin versant du Rhône en vue de leur gestion – première phase

TITRE COURT : GICC-Rhône – première phase

COORDINATEUR : Leblois Etienne, ou son remplaçant désigné par le Cemagref
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

PRINCIPAUX PARTENAIRES :

E. Ledoux – C. Golaz	ARMINES/CIG-ENSMP
D. Thiéry – N. Amraoui – N. Courtois	BRGM/DR
Y. Souchon – N. Lamouroux	CEMAGREF/BELY
E. Leblois – P. Breil	CEMAGREF/HHLY
T. Rieu – J.C. Maihol – P. Ruelle	CEMAGREF/IRMO
B. Lacaze	CNRS/CRENAM/U.Saint-Etienne
C. Ottlé – S. Le Hégarat	CNRS/CETP
H. Le Treut – L. Li	CNRS/LMD
G.M. Saulnier	CNRS/LTHE
F. Hendrickx	EDF/DER
R. Garçon	EDF/DTG
P. Etchevers – J. Noilhan	METEO-FRANCE CNRM

RESUME DU PROJET :

Dans la phase I du projet, le changement climatique global susceptible d'intervenir sous scénario 2 x CO₂ sera évalué à l'aide des sorties de deux modèles de circulation générale atmosphérique. Les indications météorologiques globales qui en résultent seront désagrégées par la méthode des perturbations vers les échelles plus détaillées nécessaires à la modélisation hydrologique. Les forçages climatiques obtenus sont destinés à être appliqués à plusieurs modèles hydrologiques de la partie française du bassin versant du Rhône ou d'affluents d'intérêt particulier.

Cette première phase du projet comprend également la réécriture d'une proposition détaillée correspondant à la suite du projet initial, et qui vise à déduire de la modélisation hydrologique des indications sur les effets du changement climatique relatifs aux variables physiques majeures des (hydro) systèmes étudiés, et à évaluer les impacts relatifs à divers domaines physiques, biologiques et socio-économiques, notamment : l'hydrologie générale des cours d'eau (hautes eaux, écoulements médians, étiages), les interactions avec les eaux souterraines, l'évolution à attendre quant aux températures de l'eau, 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 veillera à exprimer et si possible à quantifier les incertitudes que recèle la connaissance actuelle. A cet égard, c'est à dessein que les proposant prévoient de recourir à plusieurs modèles tant au niveau des scénarios d'évolution globale qu'à celui de la modélisation hydrologique.

Les produits à attendre de la première phase sont un ensemble de scénarios atmosphériques mis en tant que de besoin à disposition des modélisateurs hydrologiques participants au projet. Selon la date à laquelle cette mise à disposition aura pu être effectuée, une partie des chroniques hydrologiques modifiées pourra être déjà disponible. Un document détaillé décrivant la méthodologie de l'ensemble des études d'impact aura été rédigé et soumis aux instances du programme GICC.

MOTS-CLES : scénarios climatiques régionaux, modèles hydrologiques, régimes hydrologiques, végétation, agriculture irrigués, hydroécologie

AXE(S) ET THEME(S) GICC CONCERNES :

La proposition est centrée sur le **thème 3.2** de l'appel à proposition (le cycle de l'eau et les hydrosystèmes). Elle touche également aux points **3.1** (régionalisation des scénarios climatiques). Elle fournira des indications relatives aux points **3.3** (agriculture), **3.4** (biodiversité), **3.5** (forêts).

1.2.2 Résumé des travaux effectués

Le projet GICC-Rhône s'appuie sur les données rassemblées pour le projet Gewex-Rhône ; ce projet a 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 (CEN/CNRM). Ce forçage comprend tous les champs usuels : température de l'air ; précipitation totale ; radiation atmosphérique, rayonnement 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 nouvelles à haute résolution (spécifiques) effectuées (LMD SECHIBA dx = 100 km ; CNRM ISBA dx = 50 km)

Les anomalies mensuelles de grandes échelle ont été désagrégées par la méthode des perturbations :

- 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 sont construits en combinant des variables du climat observé avec les anomalies simulées pour les températures et les précipitations. Ces scénarios de forçage climatique sont

introduits en entrée de quatre modèles hydrologiques différents de la partie française du bassin du Rhône. Des éléments sont fournis sur chacun de ces modèles ; leurs sorties hydrologiques 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 cette étude.

Parmi les résultats de l'étude, on retient ici la plus nette : le premier facteur d'incertitude sur l'hydrologie à venir est le choix du scénario atmosphérique ; la dispersion entre les modèles hydrologiques, quoique significative, reste pour le moment inférieure. Des progrès sont annoncés sur la qualité des scénarios atmosphériques, la modélisation hydrologique doit également progresser...

1.3 Organisation générale du projet GICC

1.3.1 Découpage des tâches et responsabilités

Le présent compte-rendu est fait en suivant la structure logique du projet GICC-Rhône, en faisant bien ressortir quelle tâche a été effectuée par quel laboratoire. Pour mémoire, les principaux laboratoires intervenant aux différentes étapes sont rappelés ci-dessous :

(tranche I)

création de scénarios atmosphériques	CNRM, LMD
modélisations hydrologiques distribuées	CNRM, CIG ; BRGM, EDF
Premières études d'impacts hydrologique (3.1)	Cemagref

(tranche II)

Compléments d'études d'impacts hydrologiques	Cemagref
études d'impacts	Cemagref, EDF, CRENAM, CNRM
approfondissements méthodologiques	CETP, BRGM
incertitudes	Cemagref ; LTHE, avec CNRM

A la demande des rapporteurs du projet, les premières études d'impacts hydrologiques sont rapportées avec la tranche I.

1.3.2 Chronologie des travaux effectués

Le projet GICC-Rhône a commencé en décembre 1999.

En 2000, son activité a été avant tout la préparation en plusieurs variantes de champs de forçages météorologiques correspondant à la perturbation des champs observés sur la période de référence adoptée pour l'évolution climatique à attendre au dessus du bassin du Rhône (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 ou poursuivi le montage et le calage de leurs propres modèles en climat présent.

Les chantiers « 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 ont été 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 sont désormais à disposition des participants des tâches « impacts ».

L'analyse des impacts est inégalement avancée selon les thèmes. S'agissant des débits, les premières constatations montrent avant tout l'importance de la composante nivale dans la genèse des écoulements. Météo-France a rendu une étude détaillée sur cet aspect. Pour tous les autres aspects, les études préparatoires (méthodologique, etc...) ont avancé, la plupart des équipes concernées ayant à aborder leur travail en deuxième tranche du projet, après que les impacts hydrologiques aient été fournis. Quelques éléments sont toutefois livrés dans ce rapport.

L'année 2001 a également vu plusieurs présentations du projet en divers colloques et séminaires. Ces présentations sont importantes pour la visibilité du projet, indirectement pour celle du programme GICC, et certainement utiles en ce que elles permettent à d'autres équipes de tenir compte de ce qui a été déjà fait et d'imaginer mieux (on pense notamment à la question des extrêmes, a priori hors de portée pour GICC-Rhône). Ces présentations ont mobilisé beaucoup d'énergie de la part du coordinateur.

Début 2002, EDF/DR a communiqué ses propres reconstitutions et simulations de débit, en un nombre de stations nettement restreint, mais qui enrichissent sans conteste les analyses d'impact et d'incertitudes en cours. BRGM/DR a produit des chroniques sur le bassin de la Saône, mais pour un des scénarios atmosphériques seulement.

Tout au long des années 2000 - 2001 - 2002, deux tâches parallèles se sont déroulées à l'axe « principal » que l'on vient de décrire. La première est 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 est portée par le CETP en liaison avec les modélisateurs concernés.

La deuxième touche à la caractérisation des incertitudes.

- Une première approche de cette tâche de caractérisation des incertitudes consiste en la visualisation systématique de 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 fourni une note de référence sur cette question, proposant une méthodologie qu'il se propose d'appliquer concrètement en une action pilote à mener avec Météo-France. Cette méthodologie est cependant très lourde et ne pourra pas être appliquée à l'ensemble des modèles ni à l'ensemble du bassin du Rhône. Le Cemagref se propose d'appliquer une approche analogue à un sous bassin de la Saône.

2 – Les données disponibles ; construction des scénarios atmosphériques sous scénario de changement climatique

2.1 Données disponibles - Rappel sur la base de données Gewex-Rhône

L'étude d'impact climatique est basée sur les réalisations du projet coopératif Gewex-Rhône qui a conduit à la mise en place d'une base de données inégale sur le bassin du Rhône et au développement de 2 modélisations hydro-météorologiques de complexité croissante sur une longue période de temps (1981-1996). Cette base constitue la référence du climat présent pour évaluer les perturbations des divers compartiments de l'hydrosystème sous hypothèse de climat modifié.

On rappelle brièvement les éléments constitutifs de la base des données climatiques et de sols et les principaux enseignements sur nos connaissances du cycle de l'eau dans ce bassin sur la période actuelle :

Le domaine d'intérêt couvre la partie Française du bassin versant (Figure 1) englobant ainsi une variabilité importante de régimes climatiques et hydrologiques : régime plutôt continental dans le bassin de la Saône, climat de montagne et régime hydrologique nival ou nivo-glaciaire sur les bassins du Doubs, de l'Isère et de la Haute Durance, climat Méditerranéen sur la Durance, climat cévenol au Sud Est du domaine. Ainsi, l'impact différentiel du changement climatique peut être examiné en fonction de la diversité des contextes hydro-climatiques actuels.

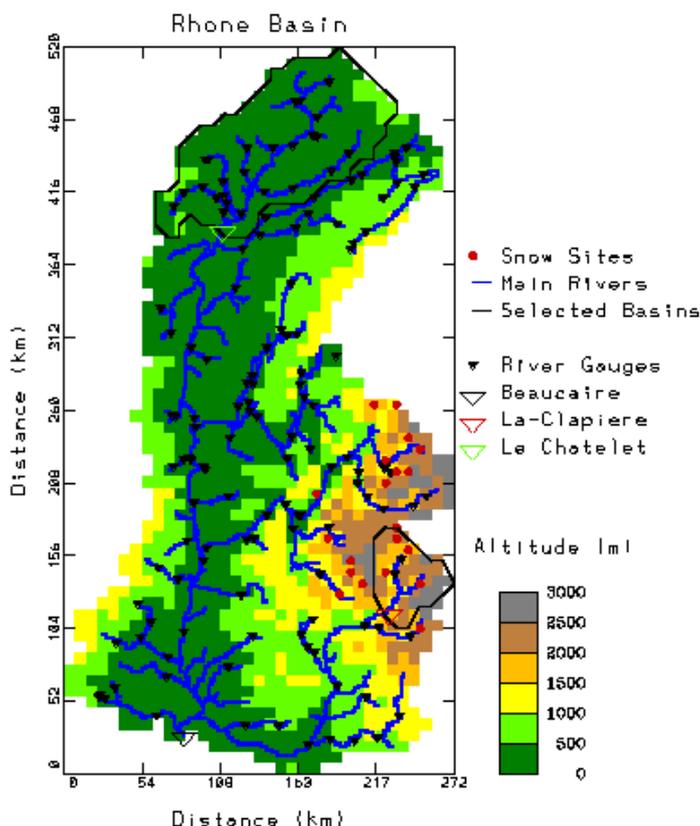


Figure 1 : Le domaine modélisé du bassin versant du Rhône

La figure 1 fait aussi apparaître les postes d'observation de débits et de hauteurs de neige utilisés pour la validation des modèles ainsi que la topographie sur la grille de calcul régulière

de 8 km. Les limites des bassins versants de la Saône et de la Haute Durance étudiés plus spécifiquement dans l'étude sont indiquées.

La base de données météorologiques utilisées dans le projet correspond aux 8 variables atmosphériques interpolées par le système SAFRAN alimenté par la totalité des mesures disponibles sur la période (Etchevers et al/ SAFRAN). Ainsi, ont été mises à disposition :

- les données tri-horaire sur une grille régulière de 8 km : précipitation liquide et solide, température et humidité spécifique de l'air, vitesse du vent, flux radiatifs solaire et atmosphérique, pression de surface,
- Les données journalières d'ETP (cette dernière variable est reconstituée à partir des variables atmosphériques de base à l'attention de modèles hydrologiques fonctionnant au pas de temps journalier tel que le modèle MODCOU du CIG).

Cette base météorologique constitue la référence du bassin pour le climat actuel et est utilisée pour définir le climat modifié par combinaison des anomalies mensuelles simulées par divers scénarios MCG (en particulier précipitations et température de l'air). La figure 2 montre la variation spatiale de la valeur moyenne annuelle de ces variables sur le domaine alors que la figure 3 illustre l'évolution temporelle des températures et précipitations moyennes sur les 16 ans. On peut noter l'importance notable du relief sur la plupart des variables, en particulier sur les précipitations neigeuses. Par ailleurs, la période considérée fait apparaître une assez grande variabilité inter annuelle de la pluviométrie avec l'occurrence d'années plutôt sèches (88, 89) ou plutôt humides (94, 95).

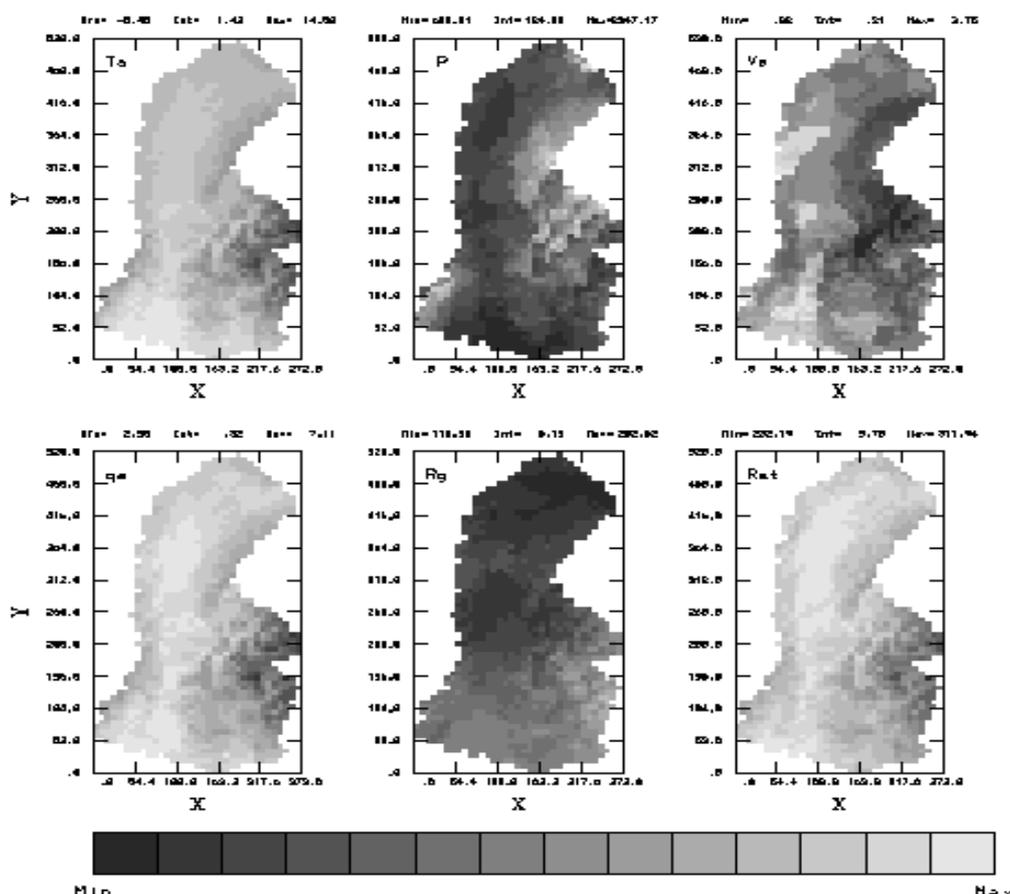


Figure 2 : Moyenne annuelle des variables climatiques du climat présent (1981-1997)

La figure 2 ci-dessus montre : en haut, température de l'air T_a , précipitations totales P , vitesse du vent V_a ; en bas, humidité spécifique q_a , rayonnement solaire R_g , rayonnement atmosphérique R_{at} . Pour chaque panneau les valeurs min et max sont indiquées dans le label supérieur.

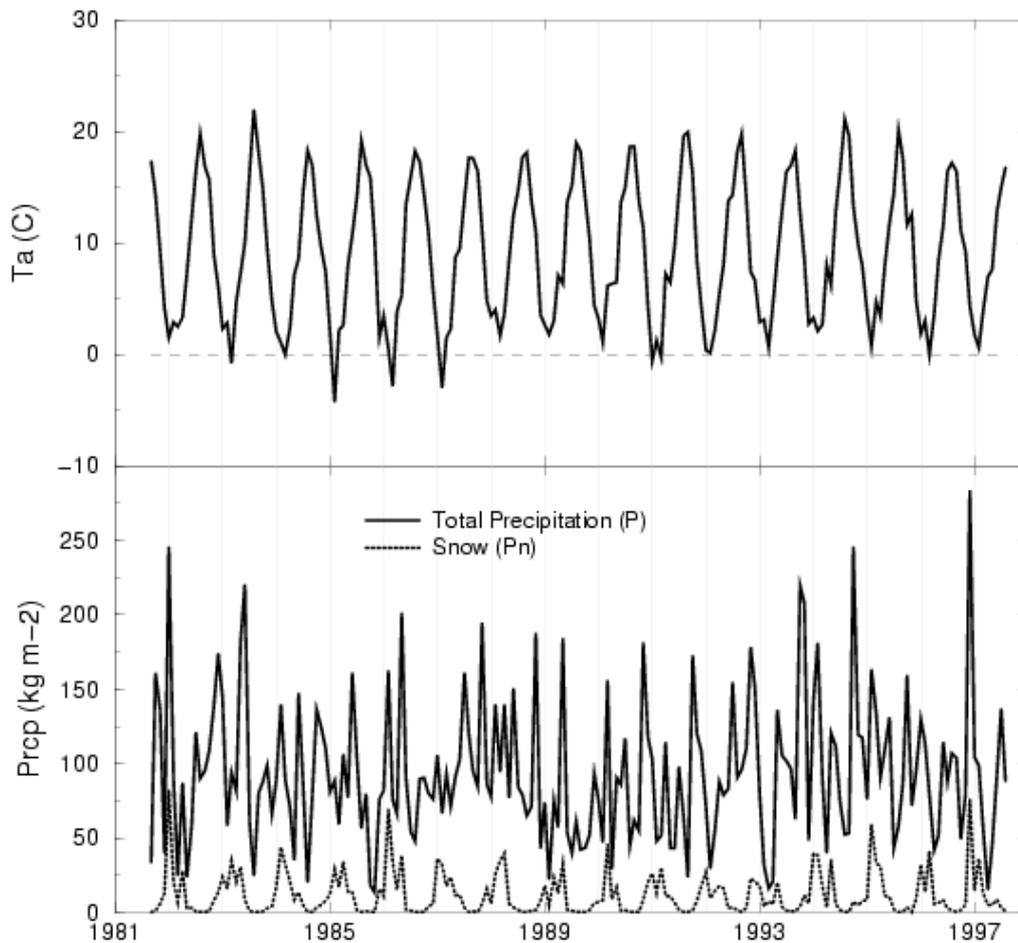


Figure 3 : variations mensuelles de la température de l'air T_a , des précipitations totales et neigeuses en moyenne sur le bassin du Rhône pour la période actuelle (1981-1997)

Une base de données de débits journaliers sur une centaine de stations du bassin du Rhône est utilisée pour évaluer les performances de la modélisation de climat actuel et les perturbations mensuelles de débits pour les climats modifiés en différents points nodaux du réseau hydrographique (calculé à partir d'un MNT à 1 km de résolution). Cette base de données confiée au projet GEWEX-Rhône par la banque HYDRO du ministère de l'environnement et du développement durable a été complétée par la mise à disposition par EDF de quelques chroniques désinfluencées des ouvrages hydroélectriques sur les rivières alpines. Ceci constitue une avancée en permettant de valider plus précisément la modélisation actuelle (ne prenant pas en compte les ouvrages) sur cette partie du domaine. A cette base hydrologique, il faut aussi associer les observations de hauteurs de neige disponibles en 25 stations qui ont permis d'étalonner divers schémas de neige. Le dernier aspect de la base concerne le sol (base des sols INRA à 1 km) et la végétation (base Corine Land Cover croisée avec une classification d'indices satellitaires NDVI/AVHRR) (figure 4).

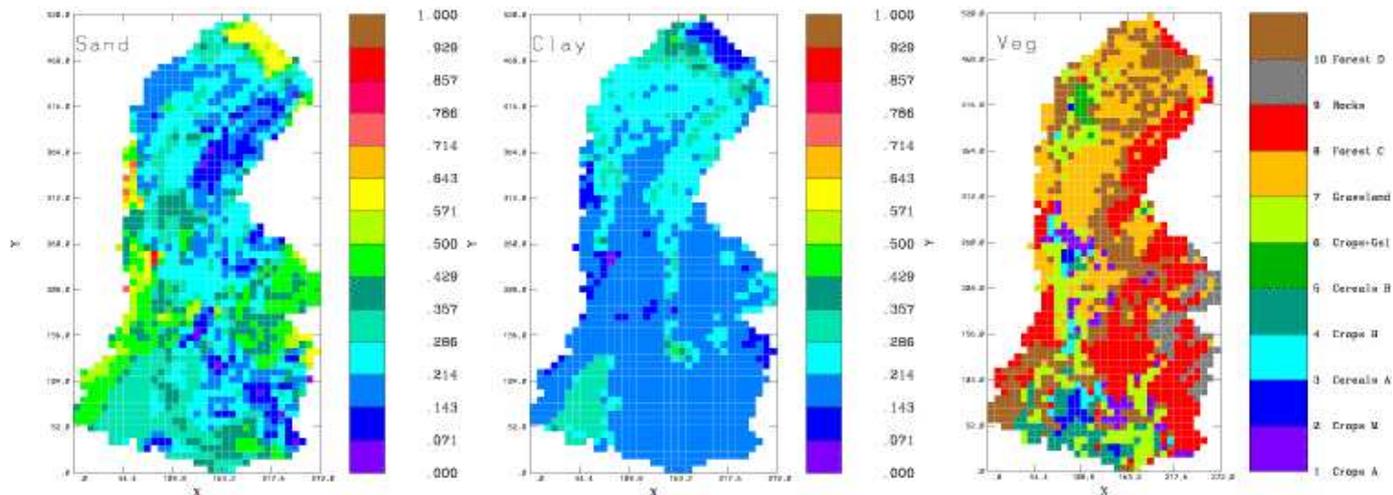


Figure 4 : Cartes de la texture des sols (base INRA) et de la végétation reconstituées sur la grille 8 km à partir d'une résolution kilométrique.

2.2 Scénarios de changement climatique sur le bassin du Rhône

2.2.1 Les scénarios, leurs résolutions, leurs schémas de fonctionnement

Six scénarios issus de 4 modèles de circulation générale ont été considérés dans la phase 1 du projet : modèles LMD, CNRM (Arpege-Climat), HC (Hadley Center) et UR (Université de Reading). Ces scénarios correspondent 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). Ces scénarios pourront être intégrés (cependant, en nombre limité) dans la phase 2 du projet (par ex. le dernier scénario Arpege-Climat, Royer et al. 2002).

Les 6 scénarios considérés dans la tranche 1 sont répartis en 4 scénarios 'basse résolution' pour lesquels 2 ou 3 points du MCG sont situés dans le bassin 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. La figure 5 montre la répartition des points de grille de ces deux MCG : 28 points pour CNRM-HR et 10 points pour LMD-HR. 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 ont été examinés différenciés uniquement par 2 options concernant la représentation des processus de surface : 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. Ainsi, il a été convenu de considérer uniquement les scénarios construits avec les schémas de surface considérés comme les meilleurs par chaque groupe (voir tableau 1).

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 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.

Modèle	Schéma de surface	Résolution	
		degrés	km
« basse résolution », issus du projet LSCPR			
HC	MOSES	2.5 x 3.5	
LMD-LR	SECHIBA	1.6 x 3.75	
CNRM-LR	ISBA	3.8 x 3.7	
UR	TESSEL	2.8 x 2.8	
« haute résolution »			
LMD-HR	SECHIBA		100
CNRM-HR	ISBA		50

Tableau 1 : Les 6 scénarios de MCG :
4 à basse résolution issus du projet LSCPR ; 2 à haute résolution, LMD-HR et CNRM-HR

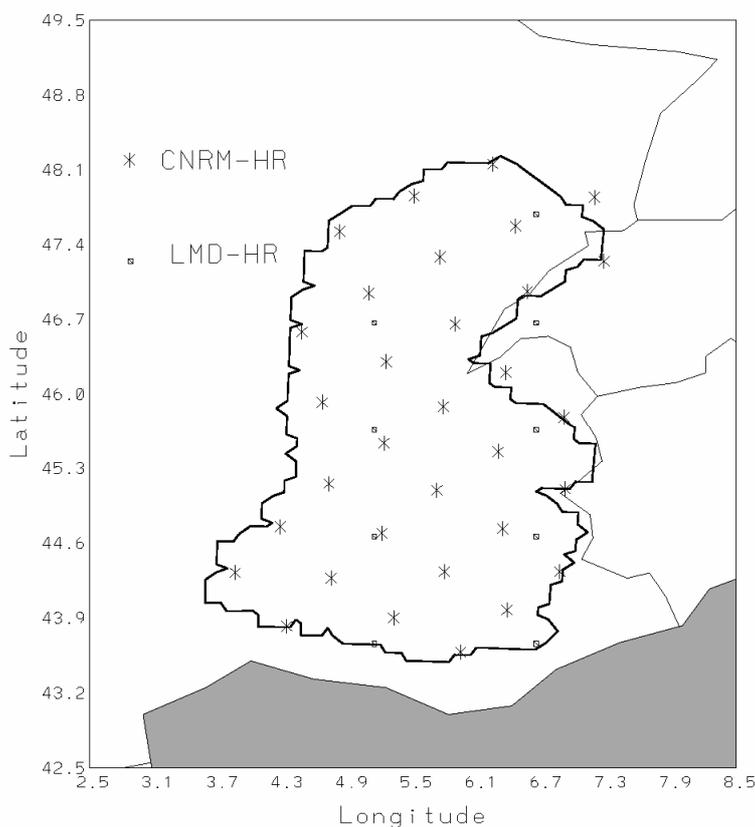


Figure 5 : Répartition des points de grille des 2 scénarios haute résolution dans le bassin du Rhône (résolution de 50 km et de 100 km respectivement pour les MCG CNRM – HR et LMD-HR)

2.2.2 Réalisme des simulations des MCG en climat présent sur le bassin du Rhône

La plus ou moins bonne aptitude des 6 simulations à décrire le climat présent peut être appréciée à la figure 6 qui compare les valeurs mensuelles moyennes des précipitations totales et de la température de l'air déduite des MCG avec la climatologie construite à partir de la base de données Rhône (1981-1996). On peut noter la bonne amplitude annuelle des simulations de la température de l'air (les sorties MCG n'ont pas été corrigées des effets du relief) même si l'amplitude annuelle est surestimée d'environ 5 K dans le modèle LMD.

Concernant les précipitations, les simulations sont plus dispersées. On peut remarquer l'aptitude acceptable des MCG à décrire le cycle annuel des précipitations sur le domaine, les précipitations hivernales étant assez bien reproduites pour les modèles basse résolution à l'exclusion du MCG LMD qui montre une surestimation significative. On peut noter également, que tous les MCG ont tendance à sous estimer les précipitations estivales dont la valeur minimum est également décalée d'un mois (septembre au lieu d'août). Cela peut être lié à l'incapacité des MCG à traiter correctement les précipitations automnales en provenance de la Méditerranée et qui sont responsables en partie de la pluviosité observée sur le bassin. Par ailleurs, il est remarquable que l'accroissement de résolution des MCG ne s'accompagne pas d'une amélioration de la climatologie des précipitations sur la zone d'intérêt. Les précipitations hivernales sont significativement augmentées dans les sorties CNRM et LMD, les précipitations estivales n'étant pas sensiblement améliorées. Ceci peut s'expliquer par une faiblesse de la dynamique des 2 modèles qui simulent une circulation trop zonale (communication de M. Déqué). Ceci a une répercussion accrue sur les champs de précipitations lorsqu'on augmente la résolution spatiale et par conséquent le blocage orographique : les précipitations augmentent sous l'effet du soulèvement orographique des masses d'air océanique.

2.2.3 Anomalies mensuelles simulées dans 6 scénarios MCG pour la période 2050-2060

Les simulations 1 CO₂ ont été interpolées spatialement sur la grille régulière 8 km du bassin du Rhône (Boone et al. 2000). Dans le cas des MCG basse résolution une moyenne des 2 ou 3 points de grille dans ou à proximité du bassin a été considérée.

Compte tenu des limites actuelles des MCG à simuler correctement les variables climatiques de surface il semble prématuré d'utiliser directement ces sorties pour forcer les modèles hydrologiques. En effet, on voit bien que les erreurs sur les précipitations pour la période actuelle dans certains scénarios ne peuvent conduire à des simulations réalistes de l'hydrologie régionale. Ainsi, c'est la **méthode des anomalies mensuelles** (ici, anomalie = écart entre simulations MCG 2CO₂ et 1CO₂) qui a été retenue en accord avec les spécialistes de la modélisation climatique. En effet, même si les modélisations MCG sont imparfaites à notre échelle d'intérêt, on peut penser que leur sensibilité à l'augmentation des gaz à effet de serre est moins entachée d'erreur. Ainsi, pour chaque scénario, les anomalies mensuelles moyennes ont été calculées pour chaque variable à partir des simulations 2x CO₂ et 1 CO₂ suivant :

$$\Delta T_a = T_a (2CO_2) - T_a (1CO_2)$$

$$\Delta X = (X_{(2CO_2)} - X_{(1CO_2)}) / X_{(1CO_2)} \text{ pour } X = P, q_a, R_g \text{ et } R_{at}$$

(avec P, précipitations totales, q_a , humidité spécifique, R_g , rayonnement solaire et R_{at} , rayonnement atmosphérique)

Les anomalies absolues sont considérées pour la température de l'air (généralement bien simulées par les MCG) alors que les anomalies relatives sont considérées pour les autres variables qui sont plus difficilement simulées par les modèles de climat. Les anomalies des précipitations neigeuses sont estimées à partir des précipitations totales et de la température du climat modifié en utilisant la même température seuil de partition pluie/neige que pour le climat présent ($T_{seuil} = 1 \text{ K}$).

Dans la phase 1 du projet GICC-Rhône, seules les anomalies de température et précipitations sont considérées (anomalies de type 1) alors que l'impact de l'ensemble des anomalies (type 2) sera examiné dans la phase 2 du projet. Ces anomalies ont été interpolées horizontalement sur la grille régulière 8 km.

La figure 7 illustre la variation des anomalies mensuelles de température de l'air à 2 m et des précipitations totales en moyenne sur le bassin. On voit que les anomalies hivernales de températures sont relativement homogènes autour de +2 K alors que les anomalies estivales sont extrêmement dispersées, allant de + 8 K en septembre pour HC à un réchauffement modéré pour le LMD basse résolution. Notons cependant que les 2 scénarios haute résolution donnent des anomalies comparables (+2K en hiver, +4 K en été-automne) avec cependant un déphasage temporel en été.

Concernant les anomalies relatives de précipitations, la dispersion inter- MCG reste élevée même si on peut dégager une tendance moyenne à des hivers plus pluvieux (+ 20% en moyenne) et des étés plus secs (- 30 % en moyenne). Les scénarios simulant les étés les plus secs sont le HC et le LMD-HR. Ce dernier fait apparaître d'ailleurs un déficit de précipitations sur toute l'année à l'exception du mois de février. La variabilité mensuelle est également forte pour la plupart des MCG, surtout en automne.

Les anomalies mensuelles de l'ETP sont présentées à la figure 8. Les MCG reproduisent assez bien l'ETP du climat présent. Les anomalies de l'ETP reflètent les anomalies de la température : augmentation mensuelle d'environ 8 mm l'hiver et de 15 mm l'été. En revanche, lorsqu'on considère l'ensemble des anomalies incluant les anomalies des flux radiatifs (type 2) qui contribuent à l'ETP on obtient une variation sensiblement différente (figure 8, panneau bas de droite). Les anomalies de rayonnement solaire tendent à diminuer les anomalies hivernales de l'ETP (le rayonnement solaire diminue car la pluviométrie et la nébulosité augmentent, contrebalançant ainsi l'effet température de l'air) et augmenter les anomalies estivales (plus de rayonnement solaire car moins de précipitations, renforçant alors l'effet température). Les effets radiatifs sont rarement pris en compte dans les scénarios d'ETP sous climat modifié. Ceci peut tendre à sous estimer les impacts sur l'hydrologie. En effet, les effets radiatifs peuvent conduire à une accentuation des écoulements hivernaux (diminution de l'évaporation hivernale) et au renforcement des sécheresses estivales.

La figure 9 montre la variation régionale des anomalies saisonnière (hiver , été) de précipitation estimées par les deux MCG haute résolution. On voit que ces anomalies sont faiblement corrélées : en hiver, CNRM-HR simule une augmentation importante sur le Nord du domaine (en relatif accord avec les MCG basse résolution), un peu moins marquée au sud alors que LMD-HR prévoit plutôt une diminution sur l'ensemble du bassin ! En été , l'accord entre les 2 MCG est plus acceptable en particulier sur le Sud du domaine (bassin de la Durance). Les différences notables entre les 2 MCG – HR vont conduire inévitablement à des impacts hydrologiques très différents, en particulier pour la période hivernale d'écoulement important par saturation du sol. Ainsi, la dispersion des impacts hydrologiques est beaucoup plus liée à la dispersion des scénarios actuels qu'à la diversité des modèles hydrologiques (ceci sera montré au chapitre suivant)

En résumé

Bien que présentant de fortes différences de mois à mois, les 6 scénarios se caractérisent par une augmentation de la température mensuelle d'environ 2 K l'hiver et de 4 K l'été. En moyenne, l'augmentation des précipitations hivernales est de 15% et la diminution estivale est de 20 %. Deux scénarios (HC et LMD-HR) se distinguent par une faible augmentation des précipitations l'hiver et une très forte diminution l'été.

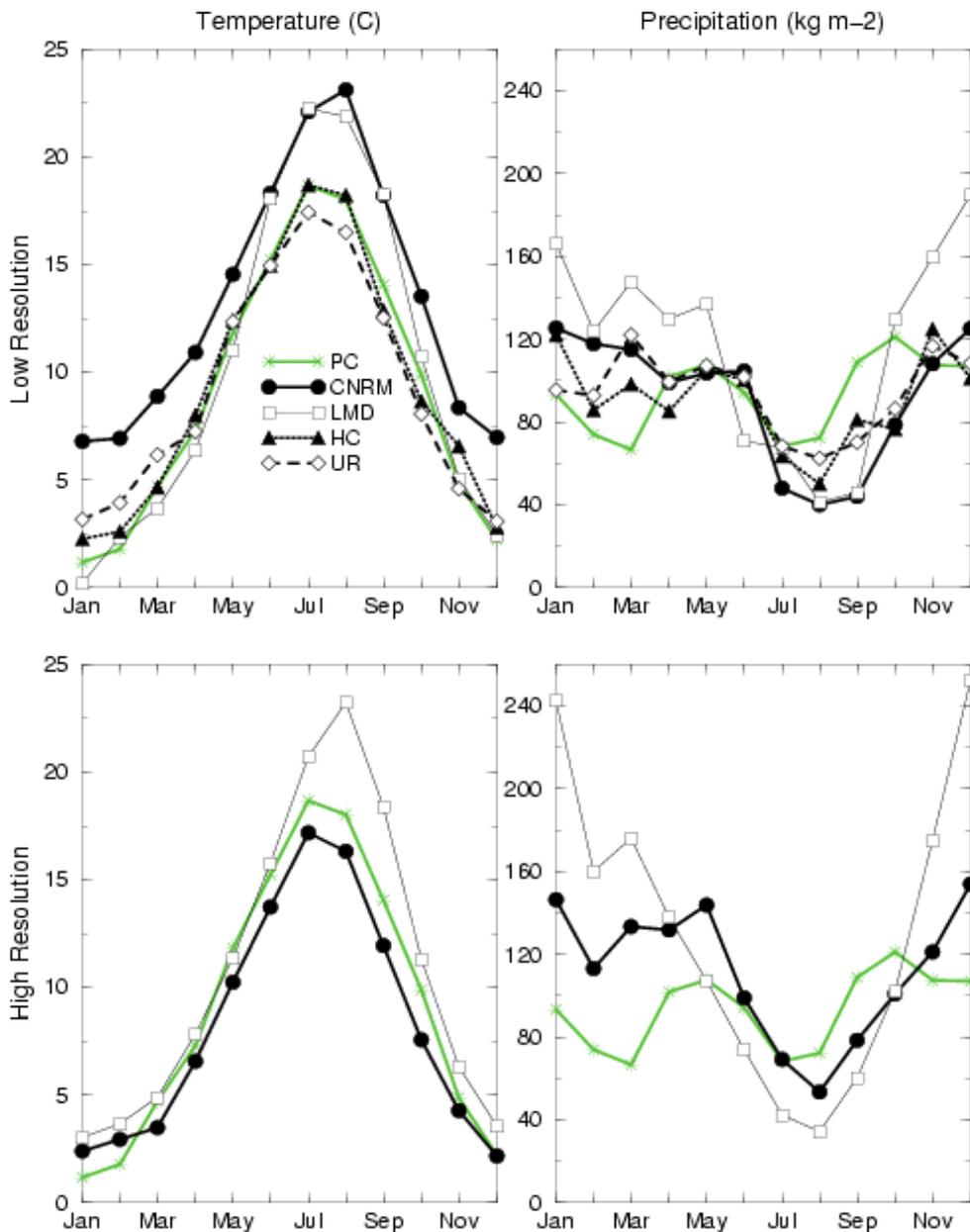


Figure 6 : Evaluation des 6 simulations MCG du climat présent sur le bassin du Rhône.

La figure 6 ci-dessus présente les précipitations et températures de l'air mensuelles comparées au climat observé pour la période 1981-1997 (PC : courbe verte). Les modèles 'basse résolution' et 'haute résolution' sont distingués.

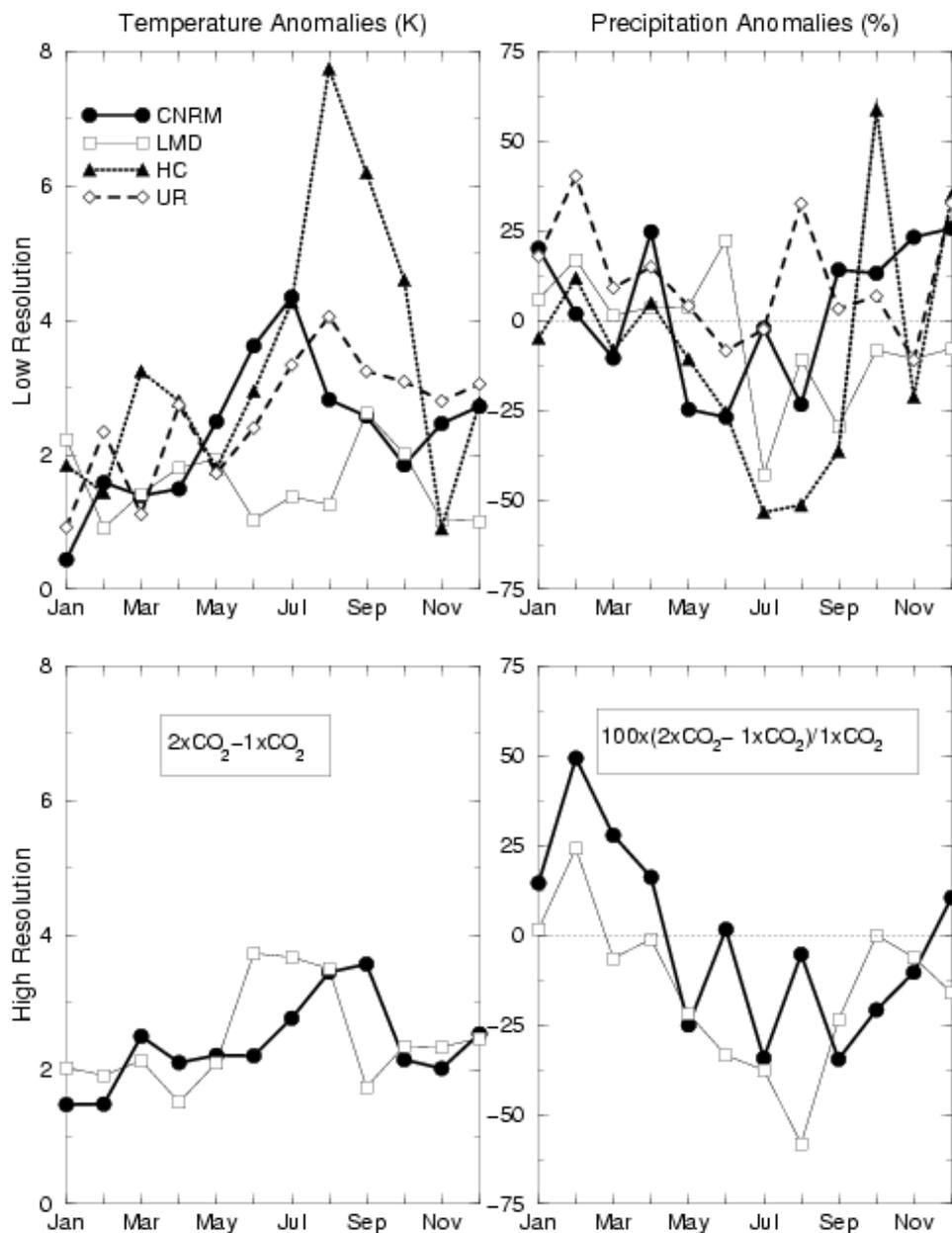


Figure 7 : Anomalies mensuelles de précipitation (variation relative) et de température de l'air pour les 6 scénarios sur l'ensemble du bassin du Rhône.

La figure 7 montre les anomalies mensuelles calculées à partir des simulations 2 CO₂ et 1CO₂ de chaque MCG. Elles sont ensuite combinées au climat observé (1981-1997) pour définir les 6 scénarios du climat modifié.

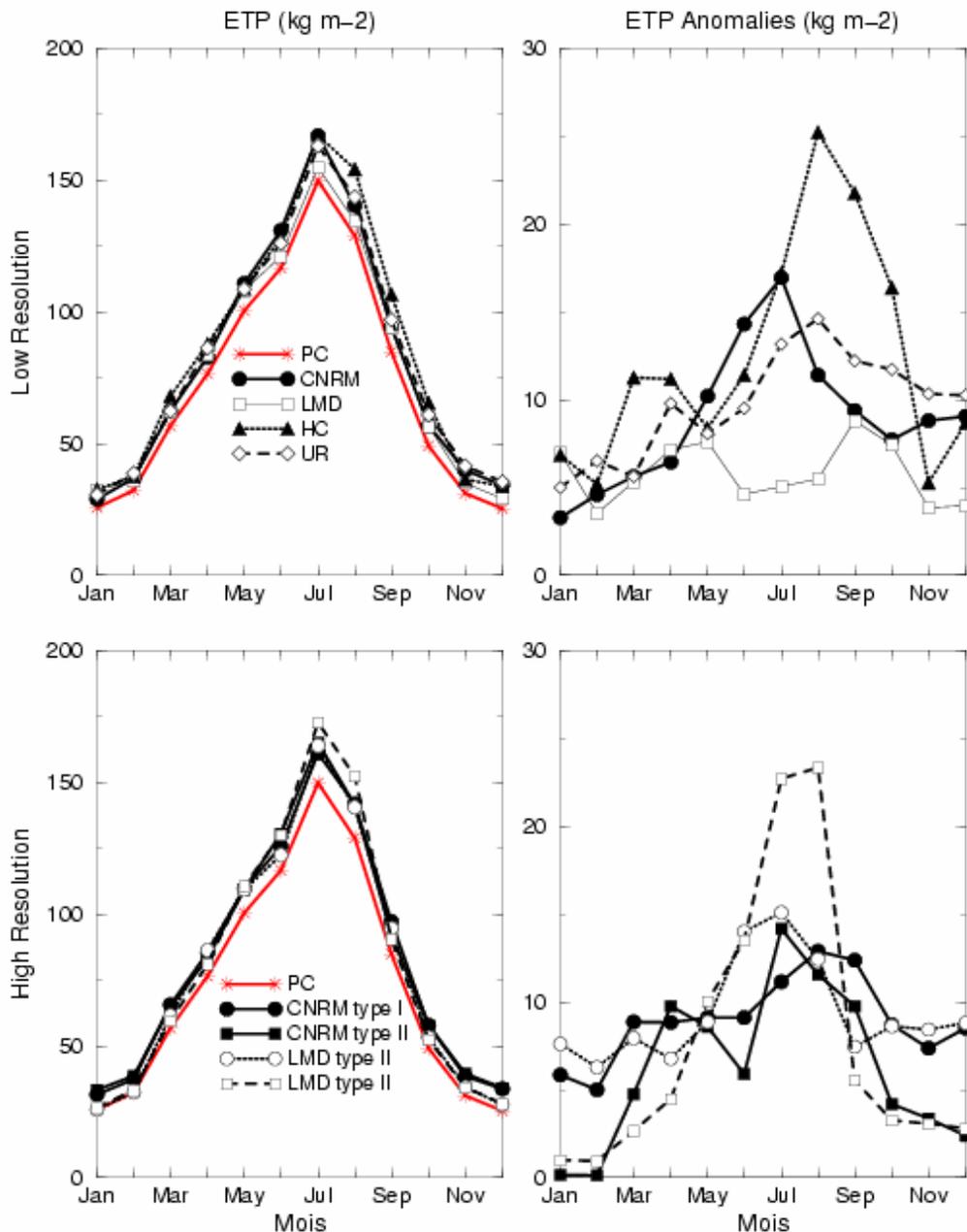


Figure 8 : Anomalies mensuelles d'évaporation potentielle pour les 6 scénarios sur l'ensemble du bassin du Rhône.

La figure 8 ci-dessus montre les anomalies mensuelles d'évaporation potentielle ; sur le panneau de gauche, comparaison de l'ETP des 6 sorties MCG pour le climat présent avec les observations (PC), panneaux de droite : anomalies mensuelles de l'ETP en prenant en compte (i) uniquement les anomalies de température de l'air (type 1) (ii) en considérant les anomalies de température, d'humidité, de vitesse du vent et des flux radiatifs (type 2 – uniquement pour les scénarios 'haute résolution').

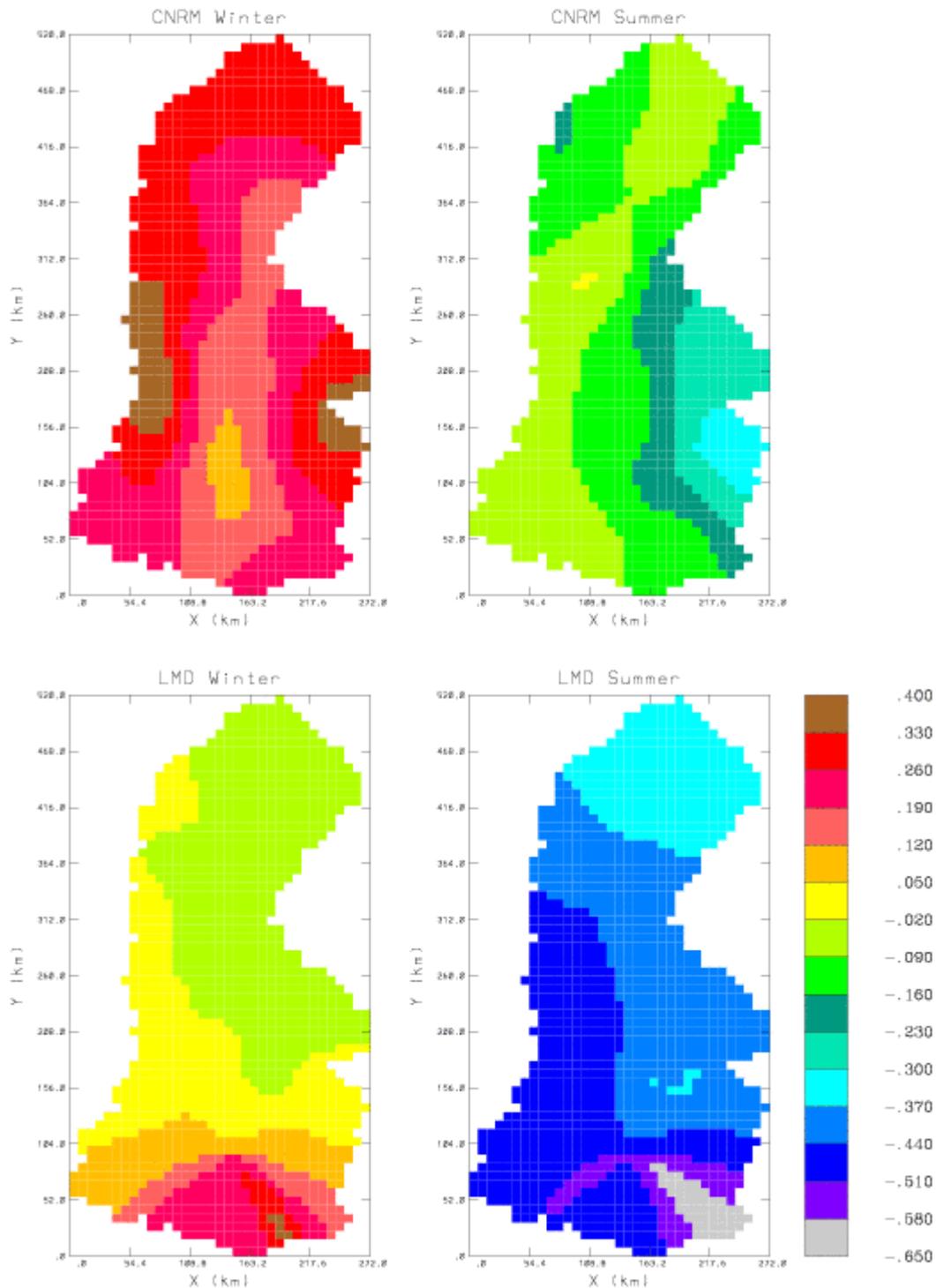


Figure 9 : Variations saisonnière et régionale des anomalies relatives de précipitations

La figure 9 montre les variations saisonnières et régionales des anomalies relatives de précipitations simulées par les 2 MCG haute résolution pour la période 2050-2060 ; panneaux du haut : CNRM-HD, panneaux du bas : LMD-HR. Gauche : hiver ; droite : été. L'échelle va de -65% à +40%

2.3 Définition des scénarios climatiques retenus pour les études d'impact pour la période 2050-2060

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 :

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

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

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

Les autres variables météorologiques étant conservées à leur valeur actuelle (ceci fait l'objet d'une proposition d'amélioration en tranche 2 du projet).

Ainsi, le climat modifié est défini sur les 16 ans de la climatologie 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.

Deux séries de forçages (climats présent et modifié) pour chaque scénario sur la grille 8 km ont été préparées et distribuées en vue des simulations hydrologiques. Seuls les écarts mensuels entre les simulations hydrologiques 2 CO2 et 1 CO2 sont examinés, en particulier les anomalies mensuelles des débits, de l'évaporation, du contenu en eau du sol et de la neige.

Cette action a été menée en 2000 par le CNRM, avec l'aide du LMD. Les jeux de fichiers de forçage (climat modifiés de diverses définition et climat présent) ont été mis à disposition des participants intéressés par Météo-France, sous forme de cd-roms (1 cd-rom relatif à la résolution temporelle journalière ; plusieurs cd-roms pour les champs de forçage au pas de temps tri-horaire). Un rapport de travail présentant ces données et la méthodologie suivie pour les obtenir a été réalisé (Boone et al, 2000). La réunion du 24 novembre 2000 a pris acte de la bonne fin de cette tâche « création de scénarios atmosphériques ».

3 - Les modèles hydrologiques utilisés

Quatre modèles hydrologiques sont employés : Modcou, ISBA-Modcou, Marthe, CEQUEAU. Ils sont tous basés sur un découpage du bassin versant en mailles (modèles distribués en grille) selon des principes actuellement classiques [Ledoux et al, 1989]. Tous utilisent à des degrés divers les données climatiques (météo-France), de sol (INRA, Corine), de débit (Hydro/MEDD) présentées auparavant.

3.1 Modèles Modcou et ISBA-Modcou

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

Modcou est mis en œuvre par le Centre d'Informatique Géologique de l'ENSMP ; ISBA – Modcou est mis en œuvre par le CNRM de Météo-France. Les deux modèles ont été mis en œuvre sur toute la partie française du bassin versant du Rhône. Les chroniques de débit en 131 stations du domaine ont été reconstituées en climat présent et simulées pour 6 scénarios de changement climatique ; elles seront étudiées au chapitre suivant.

3.1.1 Découpage du bassin

La discrétisation du bassin versant est effectuée sur une base kilométrique, puis les mailles sont regroupées quatre par quatre sur des critères d'homogénéité hydrologique (même altitude) et topologiques (respect des principaux sous-bassins, regroupement limité près des rivières) afin d'en limiter le nombre. Les figure 10 et 11 montrent ces grilles de maillage de surface, identiques pour ISBA-MODCOU et Modcou.

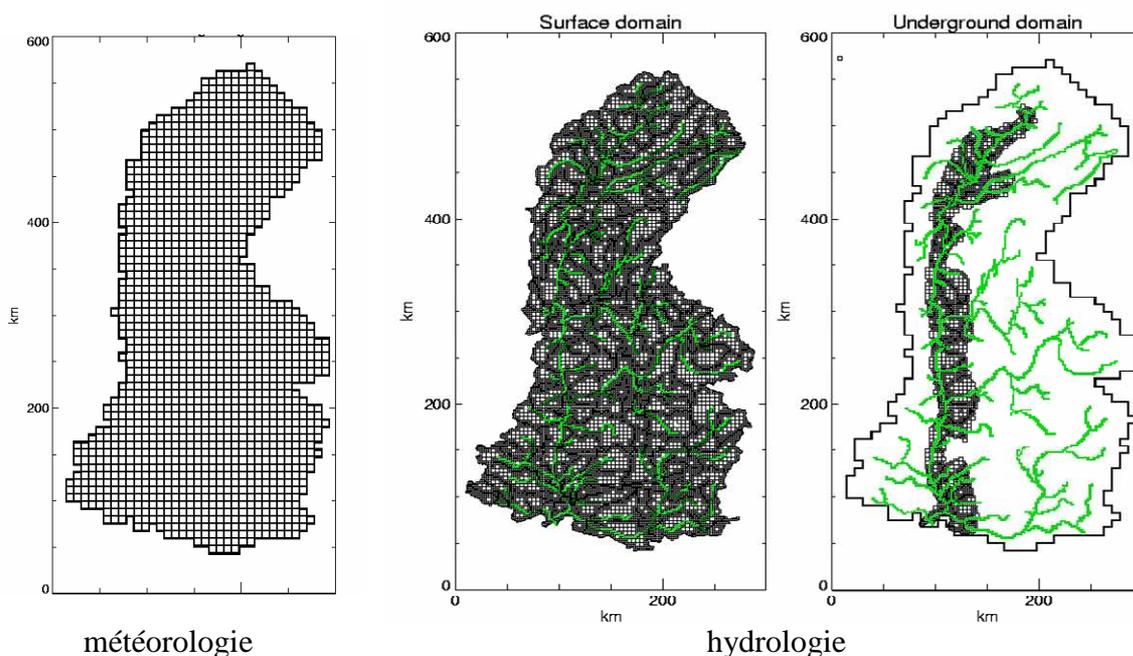


Figure 10 : Discrétisation de base du domaine météorologique

Figure 11 : Discrétisation du domaine de surface

3.1.2 Fonctions de production

La figure 12 ci-dessous montre le principe des fonctions de production des deux modèles.

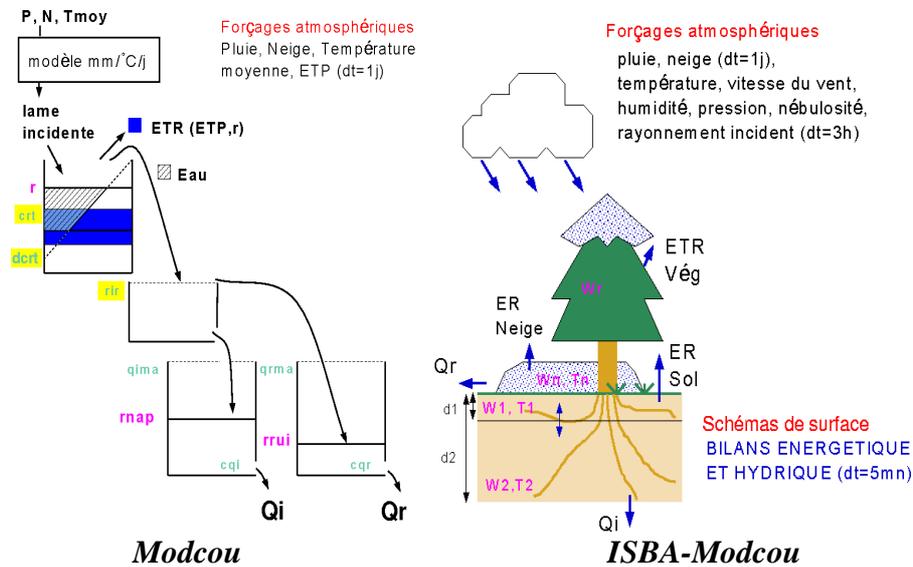


Figure 12 : Fonctions de production des modèles Modcou et ISBA-Modcou

Modcou utilise une fonction de production à réservoirs (panneau de gauche). Cette fonction de production conceptuelle reproduit schématiquement les principaux flux hydriques observés au sol moyennant le réglage de 7 paramètres, coefficients empiriques réputés constants pour chaque type de surface (géologie x occupation du sol). Q_i et Q_r correspondent à des écoulements infiltrés ou transférés à la rivière, donc lents ou rapides.

Le modèle ISBA-Modcou du cnrm utilise comme fonction de production le modèle de transfert sol-végétation-atmosphère ISBA (panneau de droite). ISBA décrit la plupart des processus physiques locaux sur la base des équations de la physique appliquées à l'échelle locale, y compris la fonte nivale et les transferts thermiques dans le sol. Les coefficients intervenant dans la description des différents processus, calés par ailleurs, sont tabulés. Il ne reste guère que la profondeur hydrologiquement active du sol comme élément de calage.

Pour son application à des mailles de grande taille nécessairement hétérogène, ISBA a été doté d'une paramétrisation du ruissellement sous-maille de type VIC (Habets, 1998).

3.2 Modèle CEQUEAU

Le modèle hydrologique CEQUEAU est un modèle hydrologique maintenu et distribué par l'INRS-Eau, mis en œuvre dans le cadre de GICC-Rhône par EDF/DER ; il est brièvement présenté ci-dessous, les indications qui suivent pouvant être largement complétées à partir du site <http://www.inrs-ete.uquebec.ca/cequeau/information.htm>.

Le modèle hydrologique CEQUEAU, modèle déterministe matriciel, prend en compte les caractéristiques physiques du bassin versant sur la base d'un double découpage de ce bassin versant.

Le premier découpage délimite le bassin versant en surfaces élémentaires que nous appellerons "carreaux entiers". La dimension à donner aux "carreaux entiers" dépend principalement de la superficie du bassin versant étudié, des données météorologiques disponibles, de la topographie du terrain, etc. Les données physiographiques nécessaires pour chaque "carreau entier" sont l'altitude, les pourcentages de forêts, de lacs et de marais.

Ce premier découpage est pris en compte pour le calcul de l'écoulement vertical de l'eau, pluie, fonte de neige, évapotranspiration, infiltration et variations des réserves superficielles et profondes, bref tout ce qui participe de la "fonction de production".

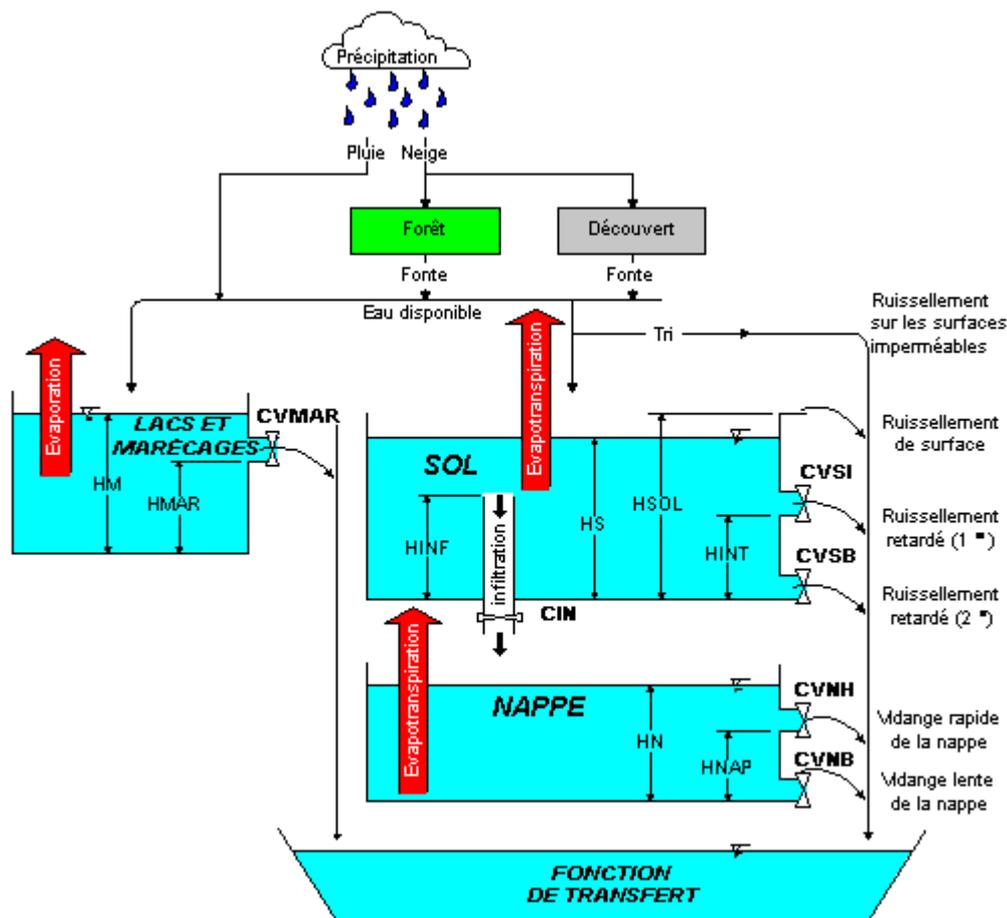


Figure 13 : schéma de fonctionnement du modèle Cequeau

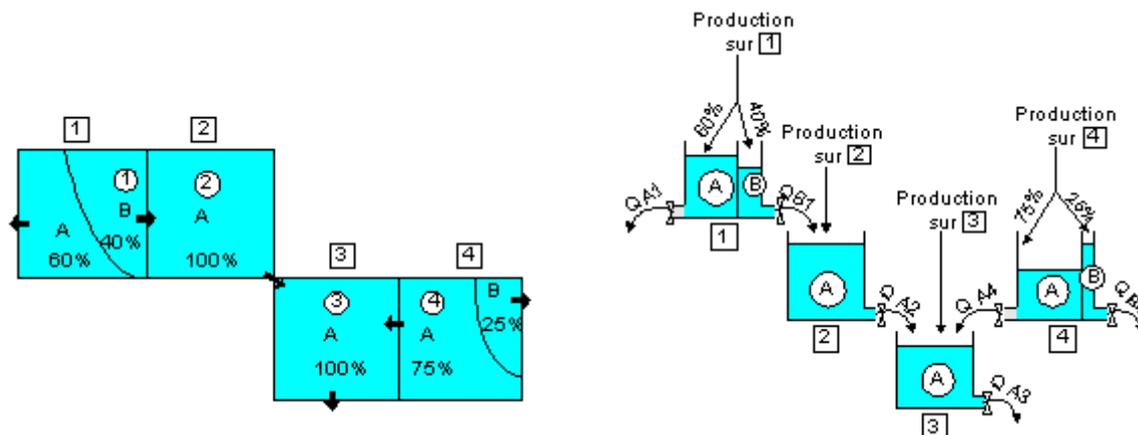
Le deuxième découpage consiste à subdiviser les "carreaux entiers" en éléments partiels qu'on appelle "carreaux partiels" en fonction des lignes de partage des eaux. Les données nécessaires pour chaque "carreau partiel" sont le sens d'écoulement de l'eau et son pourcentage de superficie par rapport au "carreau entier" qu'il subdivise. On évalue alors le transfert de l'écoulement dans le réseau de drainage. Les processus compris dans cette partie tiennent compte de l'influence des lacs, des marécages et des ouvrages artificiels tels que barrage, détournement, etc. On désigne cette partie par le terme "fonction de transfert".

Tous ces processus sont schématisés dans le modèle CEQUEAU sous forme de réservoirs communiquant entre eux à l'aide de relations mathématiques reproduisant, à l'échelle du pas

de temps de la simulation, les différents transferts de masse. Ces lois ne sont pas physiques mais comportementales.

Le schéma de production qui vient d'être décrit aboutit à l'obtention d'un volume d'eau sur chaque "carreau entier", disponible pour le transfert en rivière et dont l'origine (ruissellement direct ou retardé, vidange de la nappe, des lacs et des marais) n'a plus à être connue. Ce transfert est effectué de "carreau partiel" à "carreau partiel".

La figure 14 montre la schématisation de la fonction de transfert.



a) Vue en plan d'une partie du bassin b) Schéma du transfert en rivière correspondant
Figure 14 : fonction de transfert du modèle Cequeau

Par exemple sur le panneau 14b on voit que le carreau partiel A du carreau entier [2], reçoit la partie QB1 de l'écoulement de la partie B du carreau en amont [1], à laquelle s'ajoute sa production, avant d'écouler la partie QA2 dans le carreau partiel A du carreau en aval [3]. Le volume d'écoulement d'un carreau à un autre, pour un pas de temps donné, dépend de l'eau disponible dans les réserves et des caractéristiques physiques de la rivière sur le "carreau partiel" considéré.

Données physiographiques nécessaires pour la fonction de transfert : altitude, pourcentage de forêt, lacs, marais, sens d'écoulement de l'eau, positionnement des ligne de crêtes.

Données météorologiques et hydrologiques:

- températures de l'air maximum et minimum, aux stations météorologiques;
- précipitations liquides ou solides aux stations météorologiques;
- débits observés (périodes de calibration et de validation).

Application au Rhône

EDF a procédé à la modélisation du Rhône en amont de Vivier à l'aide du modèle CEQUEAU : 7 stations ont été simulées avec le climat actuel et avec les 6 scénarios de changement de climat. Cette modélisation numériquement très satisfaisante profite de ce que le modèle est calé et que sa validation est principalement basée sur les débits en quelques stations majeures.

Le critère d'optimisation des calages est le critère de Nash entre débits observé et calculé, évalué sur la base des débits journaliers.

3.3 Modèle Marthe

Le modèle Marthe est un modèle distribué développé et mis en œuvre par le BRGM. Il procède d'un découpage du bassin versant en mailles de taille constante. Le transfert en rivière s'appuie sur une géométrie hydraulique simplifiée ; il effectue une approximation de l'écoulement hydraulique en régime uniforme, ce qui est potentiellement une amélioration par rapport à l'isochronisme des modèles dérivés de CEQUEAU.

Marthe utilise comme fonction de production soit Gardenia (BRGM), soit GR3 (Cemagref). Les deux fonctions sont de type conceptuel, donc des schémas de bilan à réservoirs qui, avec peu de paramètres, permettent de calculer l'évapotranspiration et d'obtenir un partage entre ruissellement et infiltration. GR3 se veut comportemental et parcimonieux. Gardenia se veut plus explicatif et intègre notamment un module de fonte de neige basé sur une approche degré-jour.

Le BRGM a préparé un maillage fin du bassin de la Saône au pas de 2 km, ainsi que les données climatiques journalières de référence de Pluie, de Température Moyenne et d'Évapo-Transpiration potentielle nécessaire, afin d'alimenter le code MARTHE couplé avec une fonction de production de type GR3. Il a également procédé à la mise en forme détaillée de la géométrie des systèmes aquifères et mise en cohérence des données piézométriques avec les cotes hydrométriques dans les cours d'eau, de façon à permettre des simulations intégrant réellement l'influence des nappes souterraines.

Il a procédé ensuite à la réalisation de premiers scénarios d'influence de modifications climatiques (sans couplage avec la nappe).

L'ensemble des informations nécessaires à la construction du modèle maillé ont été recueillies et mises en forme.

Les paramètres de description du réseau hydrographique sont, pour ce qui est du profil en long, déduite du maillage de base, corrigé d'éléments de cote disponibles. Largeur et profondeur du lit sont estimés à partir de formules régionales, fournies par le Cemagref, qui relie largeur et profondeur du lit à la surface du bassin versant et aux statistiques de débit. Pour les 52 stations hydrométriques du bassin la largeur varie de 17.5 à 159 mètres, et la profondeur de 0.8 à 5.6 mètres. Dans tous les cas nous avons imposé une largeur minimale de 17.5 mètres et une profondeur minimale de 1.5 mètre. Les autres paramètres décrivant le réseau hydrographiques (épaisseur et perméabilité du lit, rugosité du lit de la rivière), ont également fait l'objet d'évaluations relativement frustes

La figure 15 présente la cote de l'eau dans la rivière, nécessaire au calcul des échanges nappe-rivière.

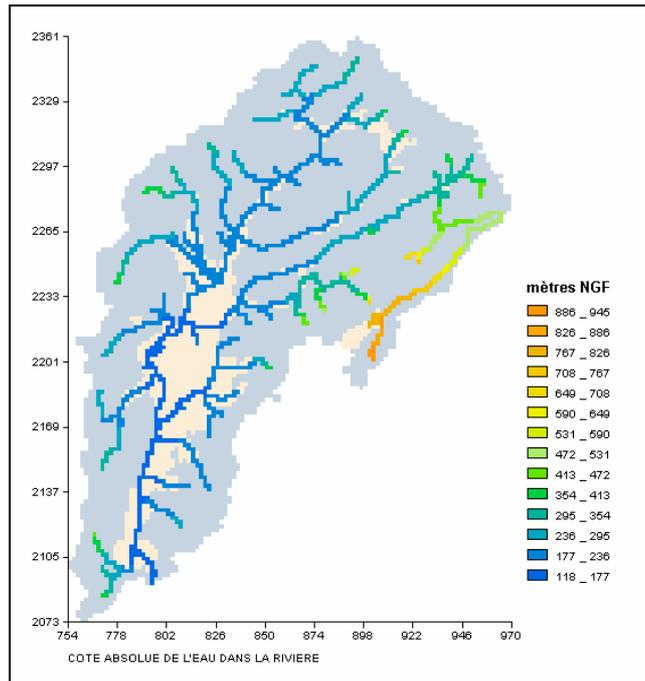
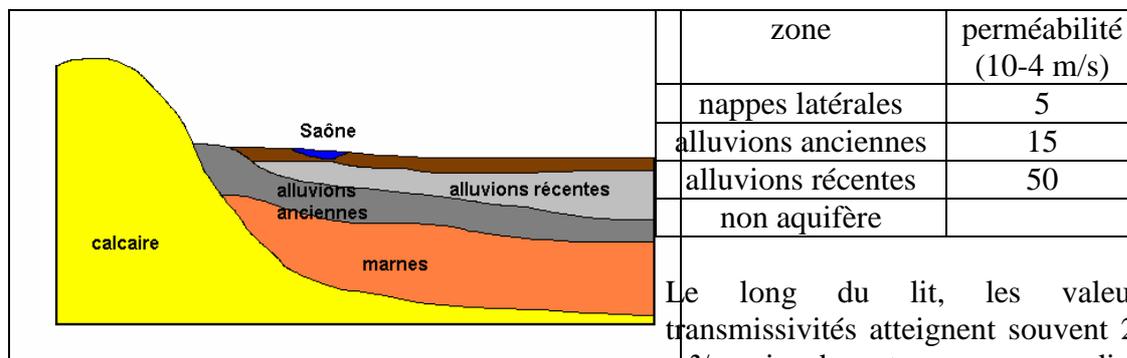


Figure 15 : Cotes de l'eau dans les rivières du bassin de la Saône (m NGF). Les mailles en beige correspondent à la délimitation du système aquifère

Paramètres hydrodynamiques souterrains

Pour le domaine souterrain, seul a été prise en compte la nappe alluviale, en gardant à l'esprit que les échanges entre cette nappe et les calcaires encaissants peuvent cependant être localement importants. L'aquifère recouvre moins de 30% du domaine total qui couvre 7546 mailles de 2x2 km² (ceci est conforme au choix de l'équipe Gewex Rhône qui avait privilégié le choix du bassin du Rhône en raison de la relative modicité des nappes). L'aquifère alluvial repose soit sur un substratum marneux qui l'isole des formations sous-jacentes, soit directement sur une formation aquifère (grès ou calcaire), qui peut alimenter l'aquifère alluvial. L'ensemble des zones où ces alimentations peuvent exister a été déterminé par l'analyse des différentes cartes géologiques couvrant le bassin.



**Schéma de la vallée de la Saône
Coupe W-E schématique**

Le long du lit, les valeurs de transmissivités atteignent souvent 2 10⁻² m²/s voire davantage, pour une dizaine de mètres d'épaisseur. Le coefficient d'emménagement est pris égal à 10 % partout.

Premières simulations de calage en régime transitoire du modèle couplé

Les simulations initiales ont été réalisées sur les années 1981 à 1984, le bilan hydrique étant calculé par le module Gardenia (Brgm). L'infiltration se produit sur moins de 30% du bassin, principalement au niveau de la plaine. les secteurs du bassin recevant de fortes précipitations (reliefs des Vosges, du Jura, Bourgogne) ne génèrent pas d'infiltration : la pluie efficace, après un temps de séjour dans la maille lié au temps de percolation, y rejoint le réseau de surface et ne se ré-infiltre pas en aval.

Les éléments de calage objectifs sont très peu nombreux car d'une part on ne dispose pratiquement d'aucune chronique piézométrique représentative de l'aquifère alluvial dans sa zone étendue et d'autre part les paramètres hydrodynamiques sont mal connus. Le calage consiste d'une part à simuler convenablement les débits des cours d'eau, y compris les étiages et d'autre part à simuler des variations piézométriques d'un ordre de grandeur raisonnable.

Premiers résultats obtenus

La figure 16 montre les résultats obtenus : La part transitant par la nappe (infiltration en bleu-très-foncé) et retournant à la rivière (en rose) est par rapport au débit total du système (en bleu) de l'ordre de 15%, mais les débits d'étiage simulés (juillet 83 par exemple) sont essentiellement constitués de ces débits d'échanges nappe rivière. Il s'agit d'une première simulation et une analyse de sensibilité devra s'attacher à préciser ce pourcentage. Cependant, compte tenu du manque de données de calage il est probable qu'on puisse obtenir des simulations également satisfaisantes avec des ratios d'écoulement très différents. Rappelons en effet qu'on avait obtenu des simulations très satisfaisantes en ne faisant pas intervenir directement de nappe mais uniquement une composante retardée...

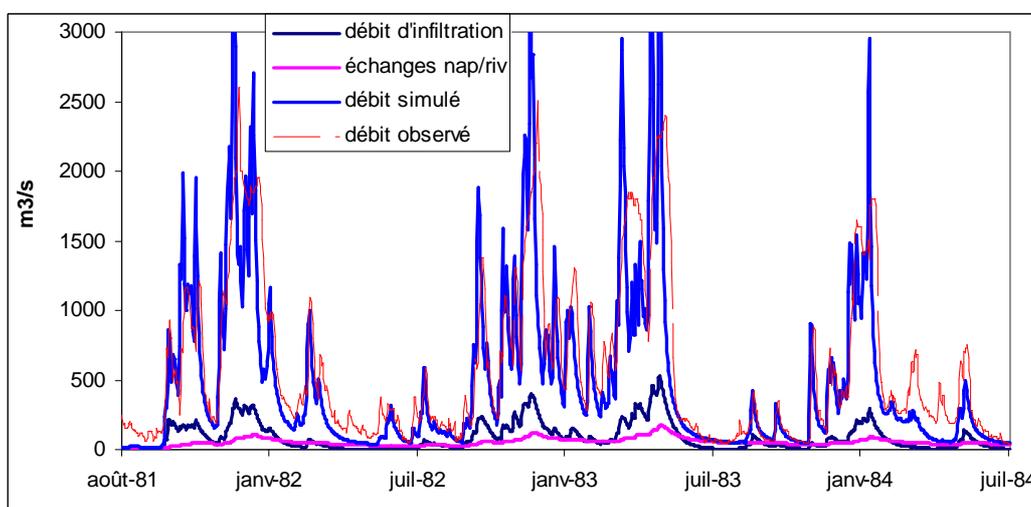


Figure 16 : simulation de la Saône à Couzon, avec prise en compte du domaine souterrain

Difficultés rencontrées

L'introduction du couplage avec le domaine souterrain avec toute sa complexité (débordements, assèchements, variations de la cote de l'eau dans les cours d'eau) entraîne un allongement considérable du temps de calcul, qui passe de la minute à l'heure par année simulée. Des procédures permettant de conserver l'état de la nappe pendant plusieurs pas, y compris les débordements, et de ne faire le couplage qu'à une certaine fréquence (tous les 7 à 10 jours par exemple) ont dû être introduites.

4 - Analyse des impacts hydrologiques

4.1 Exemple d'analyse d'impact hydrologique détaillée, à partir du modèle hydrologique ISBA-MODCOU

Le modèle ISBA-MODCOU se distingue des autres modèles hydrologiques par une description détaillée des processus de surface, en particulier liée à la résolution du cycle diurne des bilans énergétique et hydrique de la surface : schémas de neige détaillés, différentes composantes de l'évapotranspiration, stockage et diffusion de l'eau dans le sol, schémas de ruissellement en surface et de drainage.

Les anomalies climatiques décrites précédemment impactent fortement les bilans de surface car :

L'augmentation des pluies hivernales plus forte que l'augmentation de l'ETP, augmente le contenu en eau du sol et partant, le ruissellement de surface et le drainage. Sur les zones montagneuses, l'augmentation simultanée de la température de l'air s'accompagne d'une diminution des précipitations neigeuses et par conséquent d'une réduction des accumulations hivernales (en particulier en zone de moyenne montagne).

La diminution des précipitations estivales accroît le déficit hydrique du sol (l'excédant hivernal étant perdu pour le réservoir sol par ruissellement). Le déficit hydrique est encore renforcé par l'augmentation de l'ETP (augmentation de la température de l'air) ce qui entraîne une désaturation des sols beaucoup plus précoce et des étiajes plus sévères en automne.

L'augmentation de la température de l'air entraîne une augmentation de l'évaporation réelle pendant l'hiver et le printemps car les sols sont bien alimentés en eau. En revanche, l'évaporation réelle a tendance à être réduite en été – automne par effet de stress hydrique. Le flux de chaleur sensible vers l'atmosphère est alors renforcé. Dans le cadre des échanges couplés surface-atmosphère ceci induit possiblement une rétroaction positive en accentuant le risque de réduction des précipitations. La neige est aussi un compartiment très sensible par accentuation de la fonte et réduction de l'accumulation.

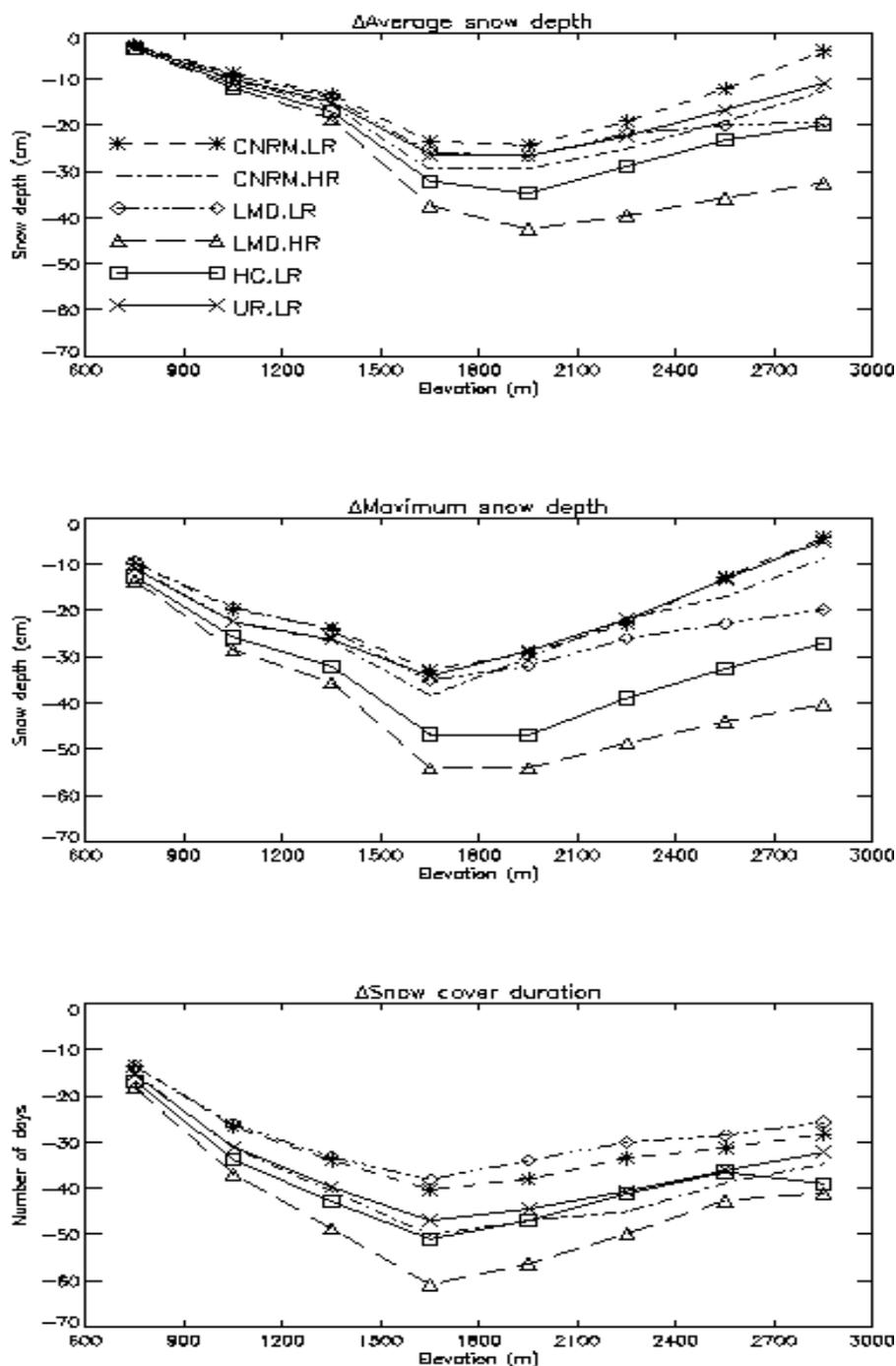


Figure 17 : Différence entre les scénarios climatique et le climat actuel pour les hauteurs de neige (moyenne et maximum) et le nombre de jours de neige sur les Alpes (Etchevers et al. 2001).

Ceci est illustré par la figure 17 qui montre l'évolution moyenne de la hauteur et du nombre de jours de neige en fonction de l'altitude pour l'ensemble du massif alpin (Etchevers et al. 2002). L'évolution du manteau neigeux a été calculée par le modèle CROCUS. Des résultats similaires sont obtenus avec un modèle de neige plus simples à 3 couches (Etchevers et al, 2001). Quelque soit le scénario, la hauteur et le nombre de jours de neige décroissent à toutes les tranches d'altitudes, les réductions les plus fortes étant associées aux 2 scénarios extrêmes (HC et LMD-HR). On voit que cette réduction concerne fortement la tranche d'altitude moyenne (entre 1500 et 2400m) qui est aussi la tranche d'altitude où se concentrent

les stations de sport d'hiver : -30 cm de diminution de la hauteur de neige moyenne et 50 jours avec moins de neige en moyenne. Les surfaces enneigées diminuent en moyenne de 25 % à 40 % suivant les scénarios. Le manteau neigeux pour les altitudes élevés est un peu moins affecté car la température moyenne y est largement inférieure au point de fusion (donc moins sensible à l'élévation de la température).

Les anomalies du manteau neigeux risquent d'impacter très fortement le régime des rivières alpines. Ceci est illustré à la figure 18 qui montre l'évolution du manteau neigeux et des débits pour le bassin de la Haute Durance (en amont de Laclapière). Cette partie du haut bassin alpin est dépourvue de barrages ce qui permet de relier directement la dynamique du manteau neigeux au régime hydrologique. Pour les conditions actuelles, la modélisation est capable de reproduire remarquablement les débits mensuels. Les scénarios climatiques montrent une réduction de l'équivalent eau d'environ 50 % et une fonte beaucoup plus précoce d'environ 1 mois. La fonte nivale précoce entraîne un pic de crue au mois de mai, en avance d'un mois environ. Il est remarquable de noter que ce décalage est présent dans tous les scénarios. Il s'en suit des étiages beaucoup plus prononcés en juillet et août. En automne et hiver, on peut noter une augmentation significative des débits dus à la plus grande proportion de précipitations liquides. Des évolutions comparables concernent les bassins de l'Isère à St-Gervais, du Drac à Fontaine, de l'Ubaye à Barcelonette et du Doubs à Conclavon (Martin et Etchevers, 2001).

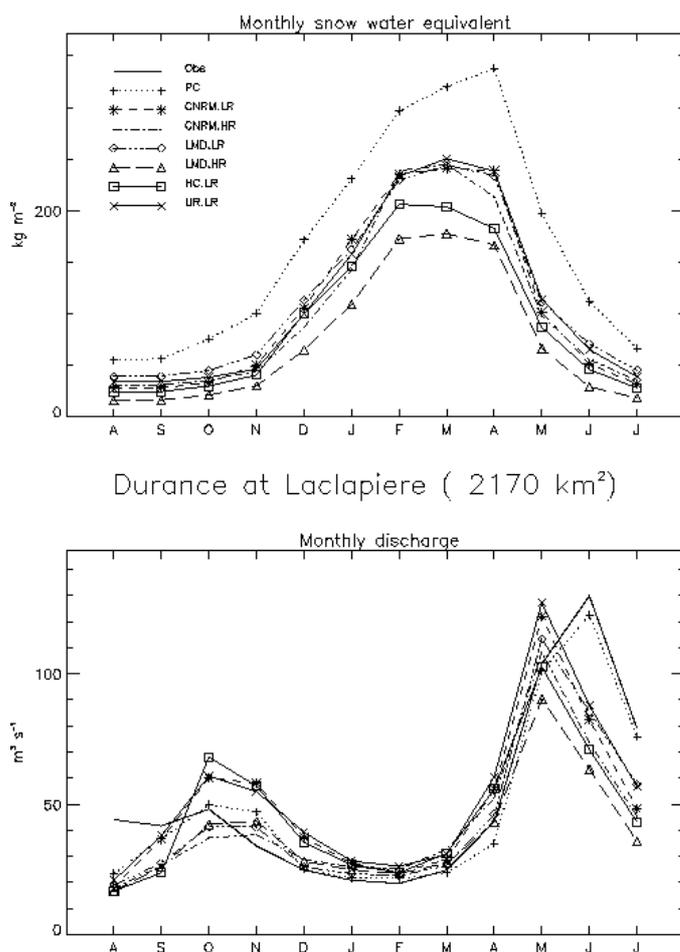


Figure 18 : Evolution du manteau neigeux et des débits sur le bassin de la Haute Durance les 6 scénarios sont comparés au climat présent (Obs et PC) (Etchevers et al. 2001)

Les figures 19 à 21 reprennent l'évolution possible des débits, du contenu en eau du sol et de l'évaporation estimée à partir du modèle hydrologique Isba-Modcou pour 2 bassins au régime hydrologique contrasté : les bassins de la Saône et de la Haute Durance. L'enveloppe de toutes les simulations avec les 6 scénarios ainsi que la valeur moyenne sont comparées à la climatologie du climat présent. Pour le bassin de la Haute Durance, le renforcement des débits hivernaux et la diminution des débits estivaux sont bien liés à l'augmentation du contenu en eau du sol de hiver (dans le climat présent, la neige limite l'infiltration hivernale) et à une forte réduction l'été. L'évaporation est augmentée légèrement l'hiver et au printemps (plus forte proportion de surface déneigée) et diminue l'été quand l'eau du sol devient un facteur limitant (malgré l'augmentation de l'ETP). Des évolutions comparables apparaissent pour le bassin de la Saône bien que plus dispersées au niveau des débits. Sur ce bassin, la dynamique nivale n'est pas déterminante et le changement climatique ne s'accompagne pas d'un décalage temporel marqué de régime hydrologique. En moyenne, c'est à dire si on considère chaque scénario comme équiprobable, on note une augmentation d'environ 10 % des débits hivernaux et une réduction un peu plus faible des débits d'étiage. Cependant, les simulations sur ce bassin sont plus incertaines car le diagramme de dispersion des MCG englobe la climatologie du présent (contrairement au bassin de la haute Durance). En effet, les 2 scénarios extrêmes (LMD-HR et HC) pour ce bassin simulent une baisse des débits sur toute l'année. Le contenu en eau du sol du bassin de la Saône a tendance à diminuer toute l'année, fortement l'été, mais aussi l'hiver sous l'effet de l'augmentation de l'ETP et ceci quelque soit le scénario MCG.

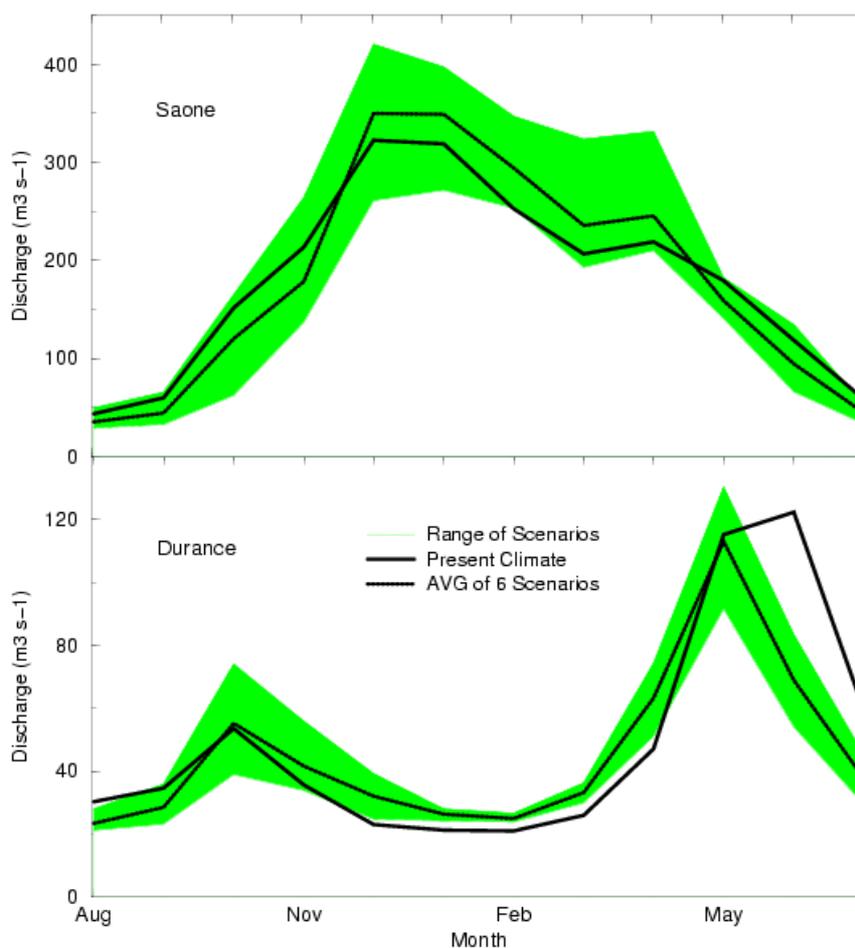


Figure 19 : Evolution des débits mensuels des bassins de la Saône à Macon et de la Durance sous hypothèse de changement climatique : la valeur moyenne est indiquée ainsi

que l'enveloppe simulée par les 6 scénarios pour comparaison avec la valeur moyenne du climat actuel.

Pour la Saône, le climat de temps présent est contenu dans le nuage de dispersion des six scénarios, quand bien même on observe une tendance générale à un été plus sec et des écoulements plus abondants en hiver.

Pour la Durance, tous les scénarios indiquent un régime hydrologique modifié, avec un débit maximum (dû à la fonte nivale) avancé d'environ un mois par comparaison au climat présent. Globalement, l'écoulement moyen diminue en raison d'une évaporation plus intense, qui peut être reliée à une moindre couverture nivale sous scénarios de changement climatique.

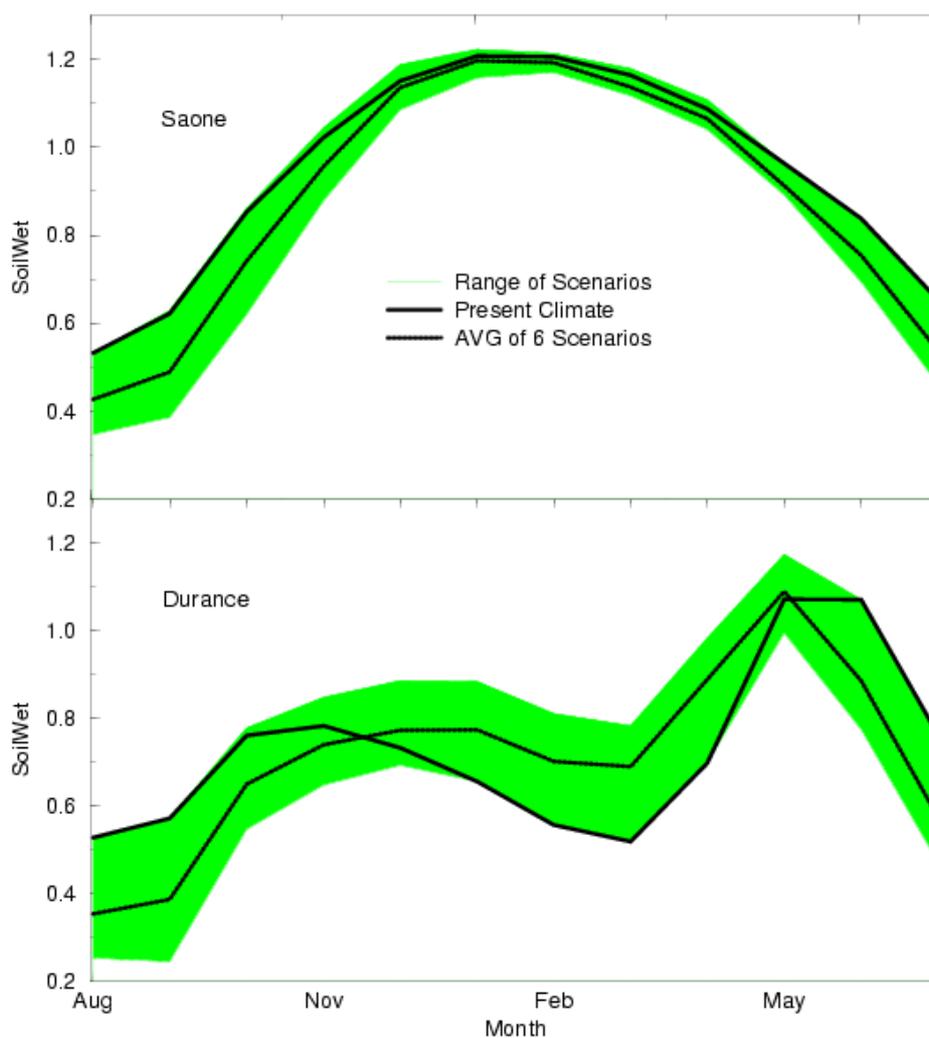


Figure 20 : Même construction, pour l'indice d'humidité du sol SWI. (SWI = 1 à la capacité au champ, SWI=0 au point de flétrissement)

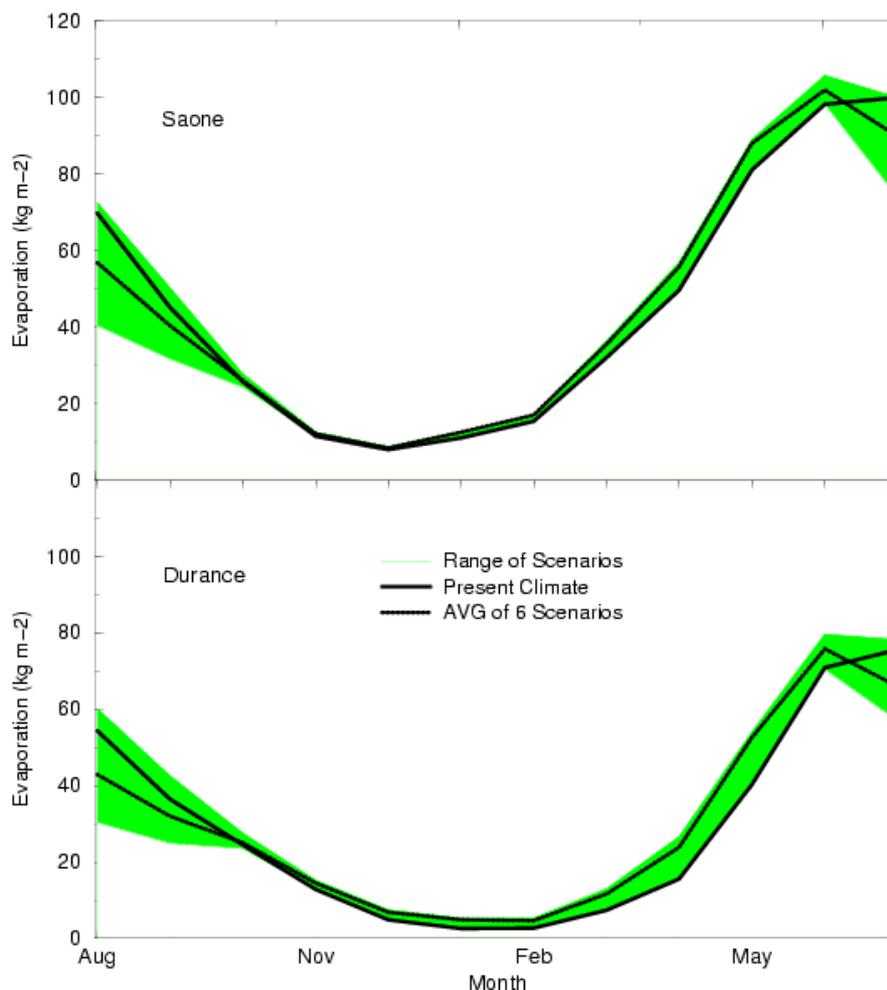


Figure 21 : Même construction pour l'évapotranspiration réelle

4.2 Diagnostic hydrologique sur l'ensemble des simulations

Le diagnostic détaillé que l'on peut faire sur quelques rivières peut être complété par l'analyse simultanée des chroniques de débit observées, reconstituées et simulées.

Vocabulaire

débites observés	(obs)	= données issues de la base de données nationale Hydro
débites reconstitués	(rec ou pc)	= débits issus de modélisation, avec climat temps présent
débites simulés	(sim)	= débits issus de modélisation, le climat étant modifié selon une vision possible du changement climatique

4.2.1 Disponibilité des simulations

Seuls cnrm et cig ont traité la totalité du domaine et des variantes atmosphériques ; Edf-DER se concentre sur 7 stations majeures de l'axe Saône-Rhône de l'axe Saône-Rhône ; le Brgm n'a pour l'heure traité que le secteur Saône et pour un des scénarios seulement.

Le tableau ci-dessous donne la consistance des chroniques calculées disponibles

	Modèle	pc	cnrm-hr	lmd-hr	cnrm-lr	lmd-lr	hc-lr	ur-lr
Cnrm	Isba-modcou	131	131	131	131	131	131	131
Cig	Modcou	131	131	131	130	130	131	131
Edf	Cequeau	7	7	7	7	7	7	7
brgm	Marthe	52		52				

Tableau 2 : chroniques calculées disponibles

4.2.2 Nécessité d'intercomparaison sur des sous-ensembles cohérents

Cette évolution devant être appréciée sur des ensembles de stations stables, on doit considérer 131 stations pour les modèles cnrm et cig (Cf. figure 1 « river gauges »), 52 stations pour les modèles cnrm, cig et brgm (bassin de la Saône), 7 stations pour les modèles cnrm, cig et edf et 3 stations seulement pour les quatre modèles car brgm et edf ne travaillent pas exactement sur les mêmes secteurs.

Cette disparité est donc nuisible aux intercomparaisons et milite pour que les domaines modélisés soient homogénéisés et que les scénarios non encore traités soient considérés.

A fins d'illustration, on s'intéressera plus particulièrement aux stations suivantes :

Saône à Macon, Rhône à Vivier, Durance à la Clapière, Ardèche à Sauze-Saint-Martin, Rhône à Beaucaire

4.2.3 Critères statistiques

Cemagref HHLV et EdF/DTG ont travaillé en 2000 et 2001 à une note de travail « comparaison entre régimes hydrologiques observées, reconstitués et sous scénarios » destiné à servir de canevas à cette tâche 3.1. Une première version de cette note a été diffusée (Leblois & Garçon, 2000).

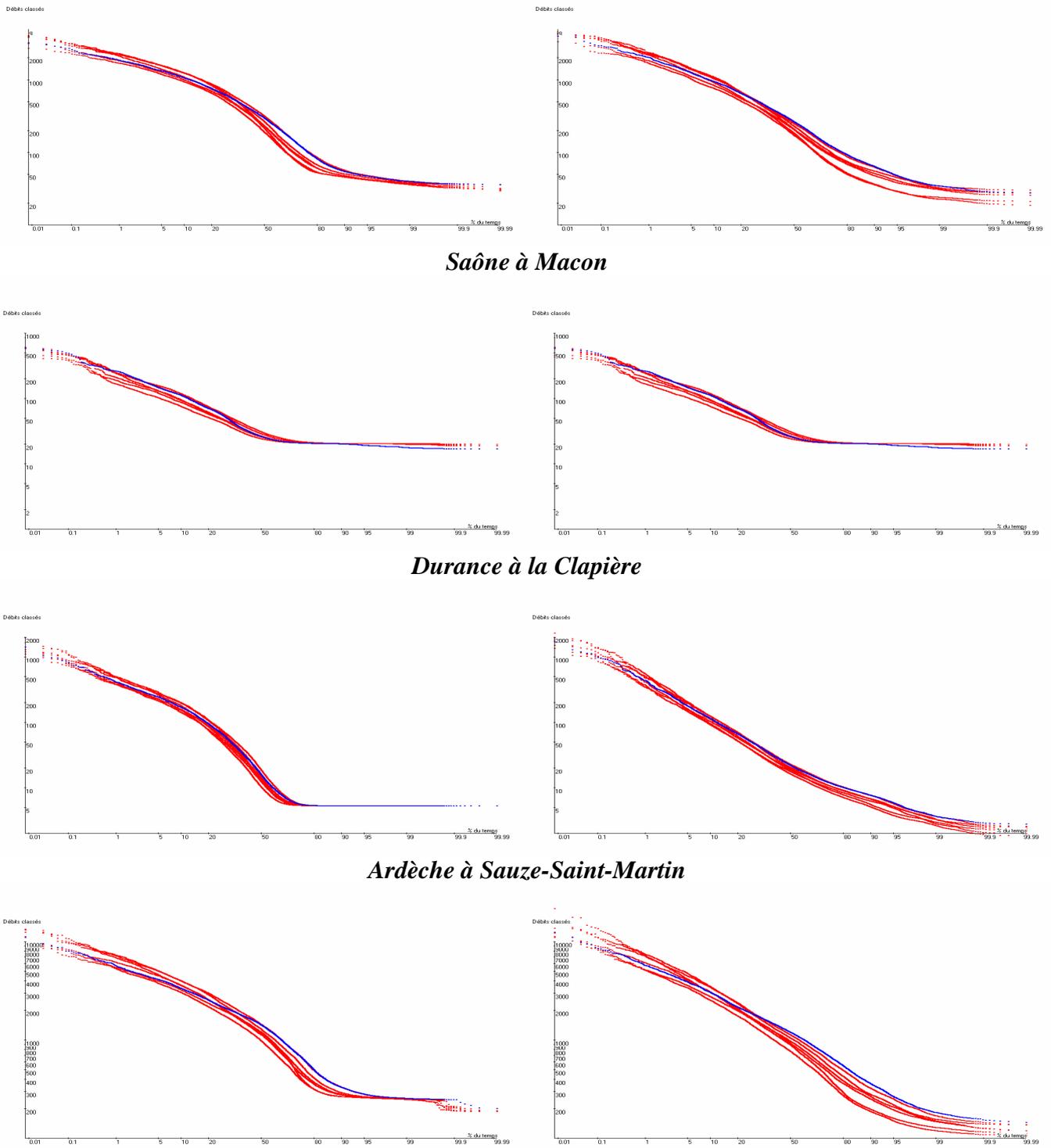
On la résumera ici en disant que

- la caractérisation des fonctions de répartition empirique restera la base de la discussion des impacts, associée à une analyse en débit durée fréquence des hautes eaux et de la saisonnalité des écoulements et, autant que possible, à la caractérisation cartographique de certaines variables très globales
- les techniques d'analyse statistique usuelles de l'hydrologie, adaptées à des chroniques observées fruit de la seule géophysique, ne s'appliquent pas forcément sans précautions aux chroniques « artificielles » que sont les chroniques issues de modèles numériques. Par exemple, un soutien d'étiage quelque peu « forfaitaire » empêchera la description des débits par une distribution globale, alors même que les hautes eaux peuvent être très correctes.

En conséquence, la note d'orientation méthodologique précitée est en cours de reprise à l'éclairage de l'expérience acquise, et certainement évoluera vers une discussion des outils appropriés à la configuration de l'information hydrologique particulière à un projet de modélisation hydrologique distribuée.

4.2.4 Distribution des débits

Dans un premier temps, on s'intéresse à la distribution des débits journaliers, indépendamment de leur chronologie, selon la représentation dite « courbe des débits classés ».



Saône à Macon

Durance à la Clapière

Ardèche à Sauze-Saint-Martin

modèle Isba-modcou

Rhône à Beaucaire

modèle modcou

**Figure 22 - Evolution sous changement climatique de la distribution des débits
variantes atmosphériques en rouge, reconstitution du climat présent en bleu**

La figure 22 compare donc les débits simulés sous scénario de changement climatique et les débits reconstitués pour le temps présent. Pour Saône, 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, c'est le contraire (diminution du pic de fonte et basses eaux hivernales moins accentuées).

4.2.5 Cycle annuel des débits moyens

Ci-dessous, en une station donnée, apparaissent les évolutions comparées des moyennes mensuelles du débits des cours d'eau suivant le scénario retenu .

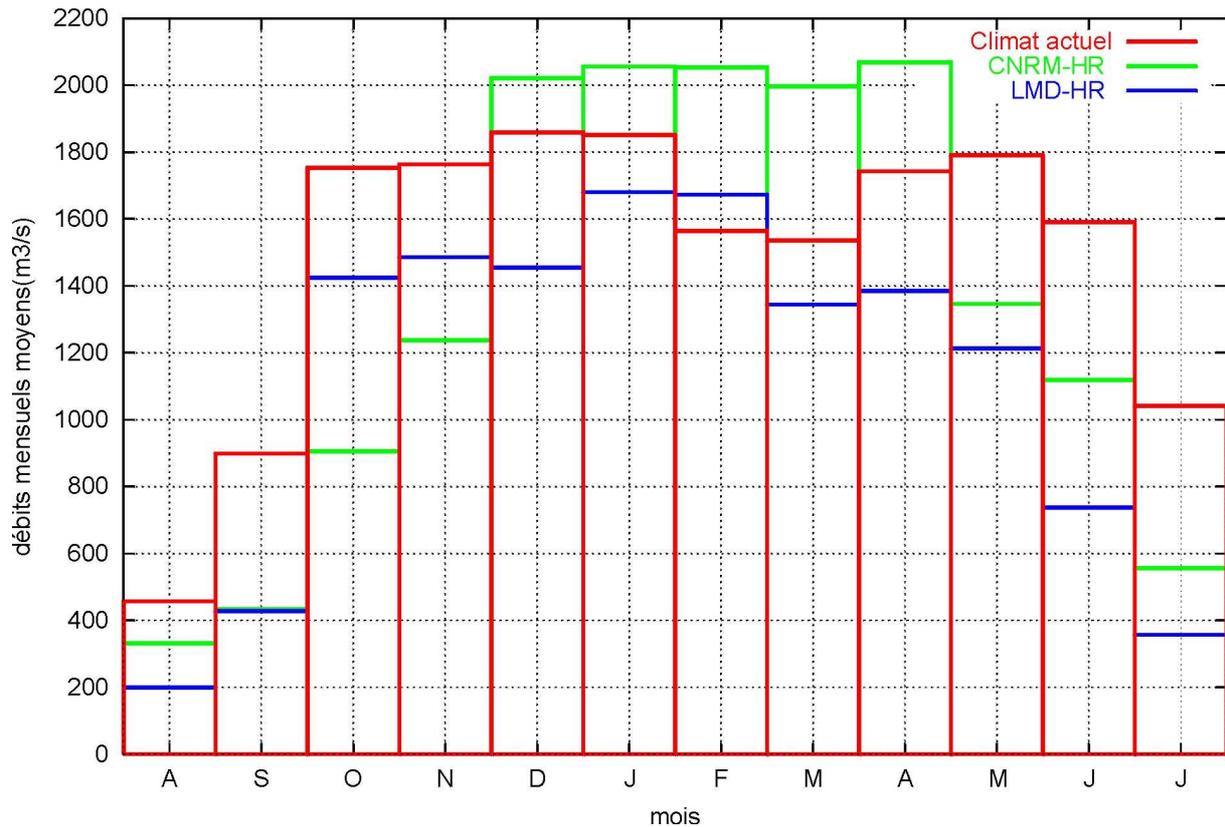


Figure 23 : Evolution du débit moyen mensuel du Rhône à Beaucaire (modèle Modcou)

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.

On a vu dans le cas de la Durance et de la Saône que l'impact montre une sensibilité différenciée selon les processus dominants dans les bassins.

4.2.6 Evolution de la lame d'eau écoulée

En s'intéressant aux deux modèles modcou et isba-modcou, on peut comparer les évolutions de la lame d'eau écoulée (sim/rec) sur les toutes les 131 stations et comparer les moyennes par modèle et par scénario :

	cnrm-hr	lmd-hr	cnrm-lr	lmd-lr	hc-lr	ur-lr	moyenne modèle
Isba-modcou	0.973	0.810	1.022	0.905	0.957	1.138	0.968
modcou	0.920	0.752	1.006	0.842	0.894	1.051	0.911
moyenne scénario	0.947	0.781	1.014	0.874	0.926	1.095	0.939

Tableau 3 : moyenne des ratio entre lames d'eau simulées et lames d'eau reconstituées sur les 131 stations, pour les 2 modèles hydrologiques et les 6 scénarios climatiques

Si on s'intéresse à la consistance spatiale du signal en examinant l'écart-type de ce rapport, on constate que les variantes lmd-hr, hc-lr et ur-lr sont très homogènes. Ceci peut bien être liée au manque de nuances dans la répartition géographique du signal de changement climatique. Modcou, par ailleurs, présente une réaction plus dispersée que Isba-Modcou, fait qui reste à interpréter.

	cnrm-hr	lmd-hr	cnrm-lr	lmd-lr	hc-lr	ur-lr	moyenne modèle
isba-modcou	0.096	0.047	0.047	0.016	0.044	0.033	0.047
modcou	0.109	0.057	0.150	0.122	0.038	0.025	0.835
moyenne scénario	0.125	0.052	0.098	0.069	0.042	0.029	

Tableau 4 : écart-type des ratio entre lames d'eau simulées et lames d'eau reconstituées sur les 131 stations, pour les 2 modèles hydrologiques et les 6 scénarios climatiques

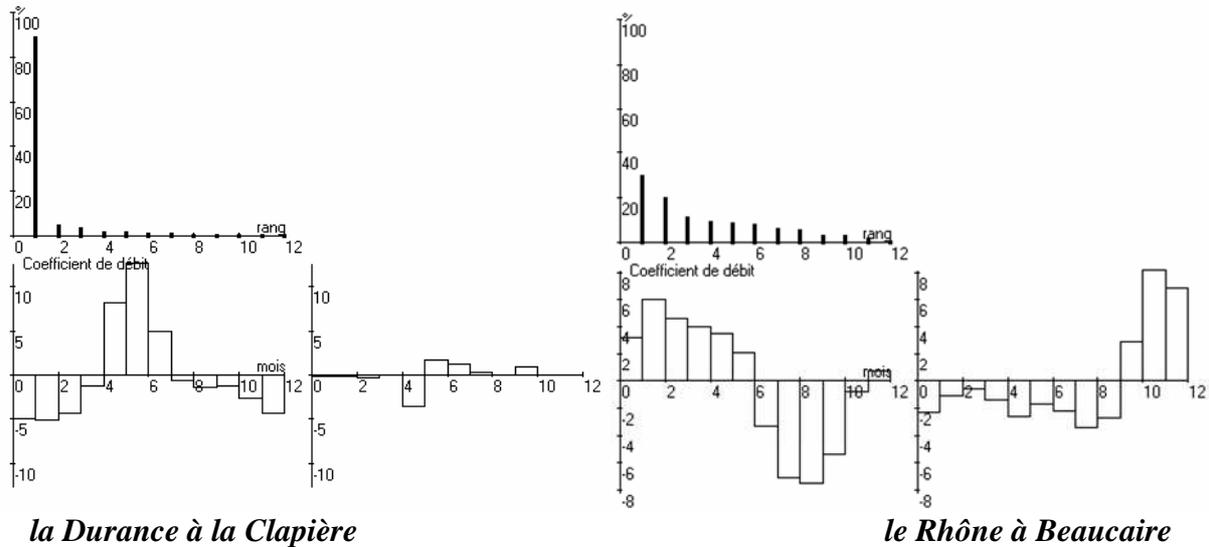
4.2.7 Saisonnalité des écoulements

Le Groupe Intergouvernemental pour l'Etude du Climat a insisté récemment sur la possibilité d'une évolution de la saisonnalité des écoulements en rivière sous l'influence du changement climatique (GIEC/IPCC, 2001).

Pour synthétiser cet aspect, le Cemagref a développé l'usage de l'analyse en fonctions orthogonales empiriques (EOF) comme outil de synthèse et de caractérisation des régimes hydrologiques (= au sens ici d'étude des débits mensuels, mettant l'accent sur la saisonnalité des écoulements). Cette approche permet la mise en évidence des régimes dominants sous-tendant des ensembles relativement vastes de chroniques de débit, et se prête bien à l'analyse de la dérive temporelle d'objets multidimensionnels. La transcription du changement climatique comme variation de la fonction de densité des pondérations sur une base d'EOF invariante a par exemple été utilisée pour caractériser l'attracteur climatique dans une étude décrivant la fréquence des régimes de circulation atmosphériques observés (Corti et al., 1999).

Notre application de cette approche à l'hydrologie, en collaboration avec la chaire d'hydrologie de l'Université d'Oslo, a fait l'objet d'une présentation orale en colloque accompagnée d'un article sous presse (Krasovskaia & al., 2002).

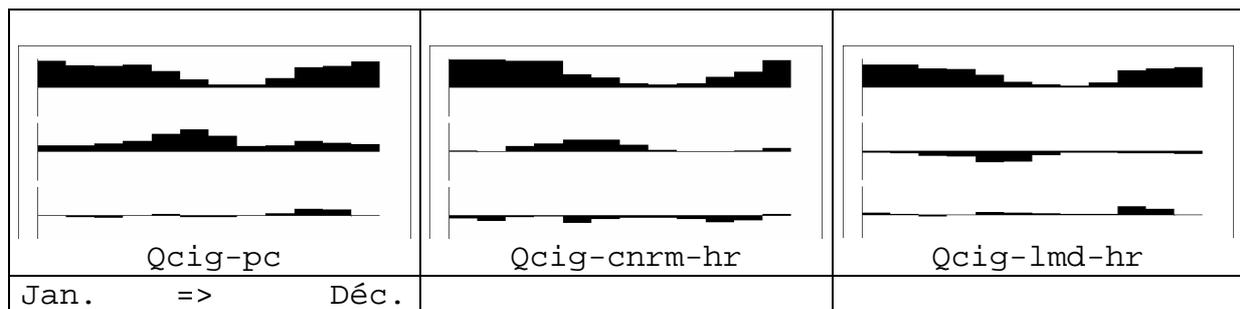
Transposition au domaine hydrologique d'une approche par ailleurs familière aux météorologues, l'analyse EOF est aussi un bon outil de communication interdisciplinaire, meilleur par exemple que certaines analyses propres aux hydrologues.



**Figure 24 : analyse EOF de débits mensuels moyens
Distribution de la variance et les deux premières fonctions d'amplitude**

La figure 24 montre les deux premières composantes pour une rivière nivale, type de régime extrêmement stable, et pour le Rhône, régime composé typique. Une mesure d'entropie de la distribution, caractérisant l'irrégularité interannuelle du profil des débits mensuels, est de 0.22 pour la Durance et de 0.85 pour le Rhône (Les extrêmes étant 0 pour un seul cycle immuable et 1 pour onze cycles décorrélés et de même variance).

Dans cet esprit, la figure ci-dessous montre la décomposition en trois premières fonctions orthogonales empiriques (EOF) de l'ensemble des régimes mensuels moyens sur les 131 stations reconstituées et simulées par le modèle Modcou, en climat présent et sous scénario pour les deux forçages atmosphériques à haute résolution.



**Figure 25 : trois premières EOF des régimes hydrologiques sur le bassin du Rhône.
Régimes reconstitués à gauche (-pc) et sous scénario à droite (-cnrm-hr et -lmd-hr).
(synthèse Cemagref de résultats du CIG)**

La deuxième composante porte le signal d'écoulement printanier attribuable à la fonte nivale.

Les panneaux 2 et 3 évoquent l'affaiblissement de cette fonte nivale pour les scénarios de changement climatique.

4.2.8 Evolution des crues

L'approche en débits classés, puisqu'elle détruit la chronologie lors du tri des valeurs journalières, ne permet pas en règle générale un traitement satisfaisant des crues, plutôt caractérisées par l'approche dite débit-durée-fréquence (QdF).

Notons $Q(d,T)$ le débit moyen dépassé en moyenne une fois tous les T années pendant la durée d . Cette caractéristique statistique des crues peut être approchée par la formulation $Q(d,T)=Q(0,T)/(1+\frac{d}{\Delta})$ étudiée notamment par [Javelle, 2001]. $Q(0,T)$ représente la distribution des débits instantanés, pour laquelle on adopte un modèle exponentiel usuel pour la description des échantillons sup-seuil, il vient $Q(d,T)=(Q10+Gr.Ln(T/10))/(1+\frac{d}{\Delta})$.

$Q10$, Gr et Δ sont des paramètres propres à chaque chronique de débit et évalués par calage. $Q10$ est le débit de pointe décennal ; Gr , dénommé gradex, marque l'aggravation du débit de pointe avec la période de retour T ($= dQ/dLnT$) ; ce sont des débits ; Δ caractérise la décroissance du débits moyen avec la durée ; on lui substitue D , durée pendant laquelle le débit est supérieur à la moitié du débit de pointe. On démontre que D peut être évalué à 0.41Δ .

Les résultats des simulations effectuées avec les modèles Isba-modcou et Modcou sont exploités à l'aide de ce modèle QdF. Ici les résultats pour quelques stations clefs, dans le cas particulier d'Isba-modcou. La comparaison des colonnes obs et rec=pc montre que le modèle Isba-Modcou reproduit correctement les paramètres du modèle QdF pour le Rhône et la Durance, mais qu'il a du mal à reproduire les courtes crues cévenoles (cas de l'Ardèche), et à soutenir les crues de la Saône à Macon (D trop faible en l'absence de champ d'inondation et de nappes explicites).

station	obs			Pc			cnrm-hr			lmd-hr		
	Q10	GR	D	Q10	GR	D	Q10	GR	D	Q10	GR	D
Rhône à Beaucaire	8496	1243	12	8770	1261	14	9801	1476	15	8218	1207	15
Saône à Macon	2906	464	29	2865	422	16	3651	583	15	2653	403	14
Durance à la Clapière	335	58	14	432	82	14	371	71	6	342	65	5
Rhône à Viviers	6577	912	24	6499	907	16	8099	1246	14	6493	1011	11
Ardèche à Sauze	1952	456	2	1338	277	2	1136	233	2	1392	302	2

Tableau 5 : comparaison des paramètres du modèle QdF issus de la modélisation Isba-Modcou sur cinq stations.

En comparant le climat présent reconstitué et les deux scénarios de changement, on constate la forte disparité entre les deux scénarios. Se pose la question de savoir si la tendance ici observée (crues plus fortes dans le scénario cnrm-hr, plutôt moins avec lmd-hr) est une tendance liée à ces stations particulières ou une tendance générale.

L'ensemble des chroniques de débit observées, reconstituées et simulées sous changement climatique a donc été analysé en ces termes.

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

Tableau 6 : évolution 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

Notons que ces 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 reporté l'évolution sur les intensités de pluie. Or les crues dépendent non linéairement des intensités de pluie.

Il reste par contre extrêmement intéressant de constater que l'évolution est très différenciée selon les scénarios atmosphériques : les crues augmentent d'environ 12% dans le scénario cnrm-hr, et diminuent quelque peu dans le scénario lmd-hr. Par contre, l'évolution ne dépend guère du modèle hydrologique sous-jacent.

4.3 Etude des incertitudes.

GICC-Rhône travaille avec des modèles évidemment imparfaits. Il est donc nécessaire de s'interroger sur le positionnement de ces modèles par rapport à la question posée (le devenir du bassin du Rhône), et d'examiner les principales incertitudes entachant les conclusions que l'on serait tenté de tirer des chiffres bruts.

Il y a plusieurs moyens de traiter du problème : on ne présente ci-dessous que les éléments ayant fait l'objet de travaux effectifs au sein du projet.

- rapport entre erreur de modélisation et impact du changement climatique
- visualisation de la disparité des résultats entre scénarios et entre modèles
- analyse de sensibilité
- ébauche théorique sur le problème de l'équifinalité

4.3.1 Rapport entre erreur de modélisation et impact du changement climatique

On dispose de chroniques de débit observées ; de chroniques reconstituées (en climat présent) ; de chroniques simulées (sous scénario de changement climatique).

On s'intéresse à caractériser l'erreur de modélisation et la modification des régimes due au changement climatique

L'écart entre débits reconstitués et observés est une erreur de modélisation ; l'écart entre débits reconstitués et simulés (delta CC estimé sur la figure 26) est l'impact dû au changement climatique tel que l'on peut le percevoir à travers le modèle.

Une hypothèse forte mais nécessaire est que la modification des régimes hydrologiques et l'erreur de modélisation sont statistiquement orthogonales. Ceci permet de les examiner l'une et l'autre pour elle-même.

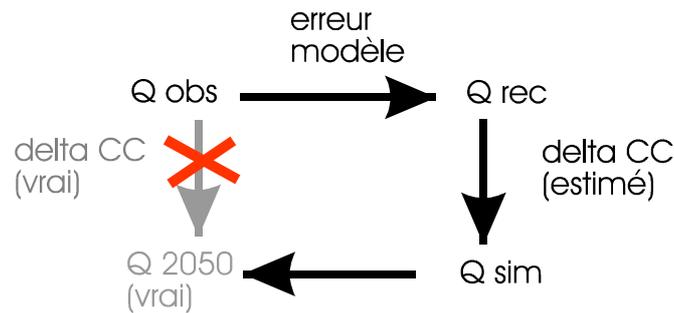


Figure 26 : Erreur de modélisation et impact du changement climatique

Ceci permettrait, en dernière analyse mais uniquement au premier ordre, d'écrire que $Q_{2050} = Q_{obs} + (Q_{sim} - Q_{rec})$. Ceci est vrai en espérance, mais la crédibilité d'un débit ainsi reconstruit restera d'autant plus faible que les erreurs de modélisation seront fortes...

Dans l'attente, le recours à plusieurs modèles hydrologiques (et à plusieurs scénarios atmosphériques) est évidemment un moyen de stabiliser quelque peu l'estimation de delta CC, qui sera seule examinée dans la suite.

4.2.2 Dispersion entre les scénarios et entre les modèles

Plus haut, on a montré comment se manifestait la dispersion entre scénarios atmosphériques pour une même station hydrométrique. Cette dispersion entre scénarios est la règle :

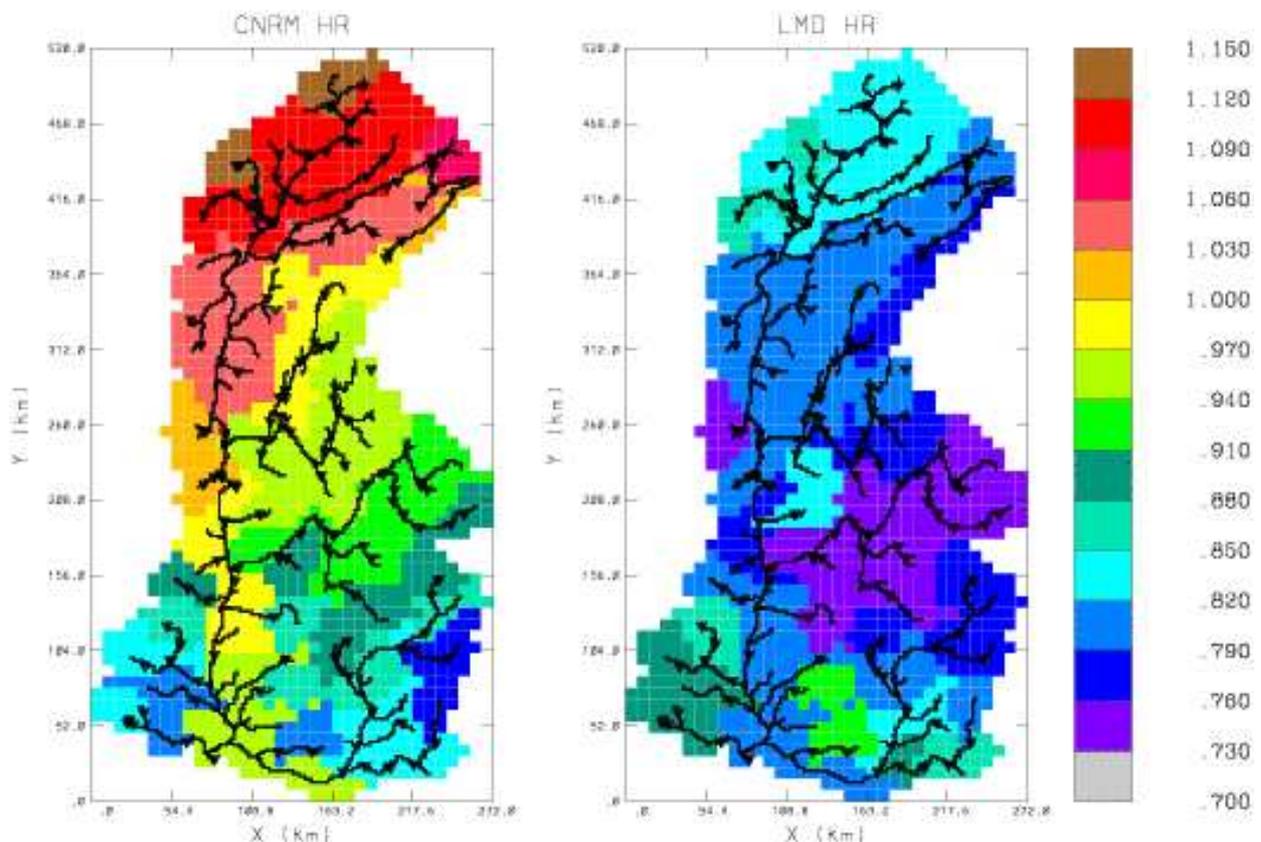


Figure 27 : Evolution relative des débits annuels par rapport au débits du temps présent

La figure 27 ci-dessus montre l'évolution relative des débits annuels par rapport aux débits du temps présent tels que simulés par 2 MCG haute résolution sur le bassin du Rhône : CNRM-HR (à gauche) et LMD-HR (à droite)

4.3.3 Analyse de sensibilité

Une deuxième approche de cette tâche de caractérisation des incertitudes, plus pragmatique, consiste à soigner, en toute occasion, la présentation de la dispersion des résultats (tant entre variantes de forçage météorologique que entre modèles hydrologiques). Cette dispersion constitue en effet un minorant de l'incertitude. Sa visualisation peut être faite par exemple comme ci-dessous (canevas graphique proposé par le CNRM).

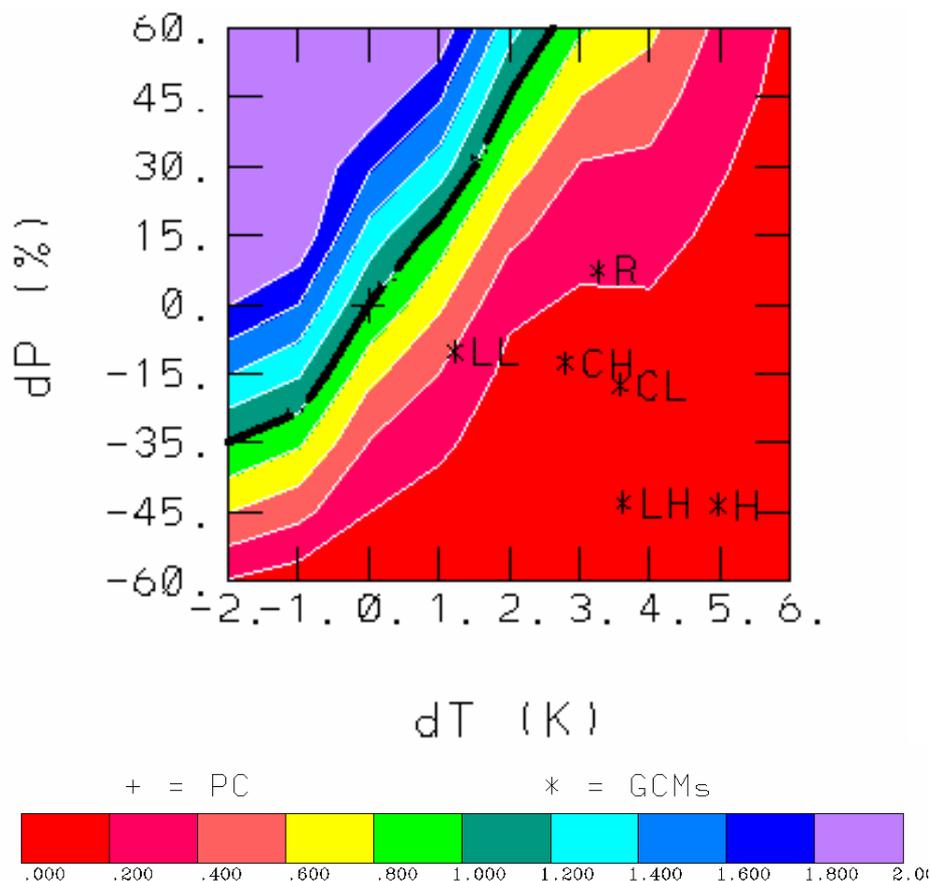


Figure 28 : Construction d'une analyse de sensibilité ; cas de l'évolution de l'écoulement estival de la Durance (explications dans le texte)

La figure 28 est construite pour un bassin versant donné, et pour une variable hydrologique donnée. Ici, l'écoulement estival de la Haute-Durance. En abscisse sont portées des variations unitaires de la température de forçage, en ordonnée des variations d'intensité des précipitations. La figure code en couleur le ratio entre la valeur de la variable 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 + en coordonnées ($dT = 0$ K, $dP = 0$ %).

Ces figure et les suivantes ont été établies par le CNRM dans le cas de la fonction de production ISBA. Elles supposent l'intégration pour de nombreux couples (dT, dP) de la fonction de production pour le bassin versant concerné ; le coût de cette opération explique que l'on ne dispose de tels résultats que pour quelques bassins. Il y a cependant accord au sein du consortium pour adopter chaque fois que ce sera possible des représentations de ce genre. Logiquement, la lame d'eau écoulee tend à augmenter quand les précipitations augmentent, et tend à diminuer quand la température augmente. Les prédictions des différentes variantes de forçage atmosphérique sont figurées par les *. Dans le cas présent, la forte dispersion entre les scénarios n'empêche pas des conclusions nettes : l'écoulement estival de la haute Durance pourrait être fortement diminué.

Un avantage de la présente représentation est de montrer que l'impact du changement climatique sera différencié selon les bassins versants, selon les variables étudiées, et selon les saisons. Plus encore, les conclusions auront un degré de fermeté variable, dépendant notamment de la sensibilité au changement climatique des processus hydrologiques dominants dans chaque bassin versant.

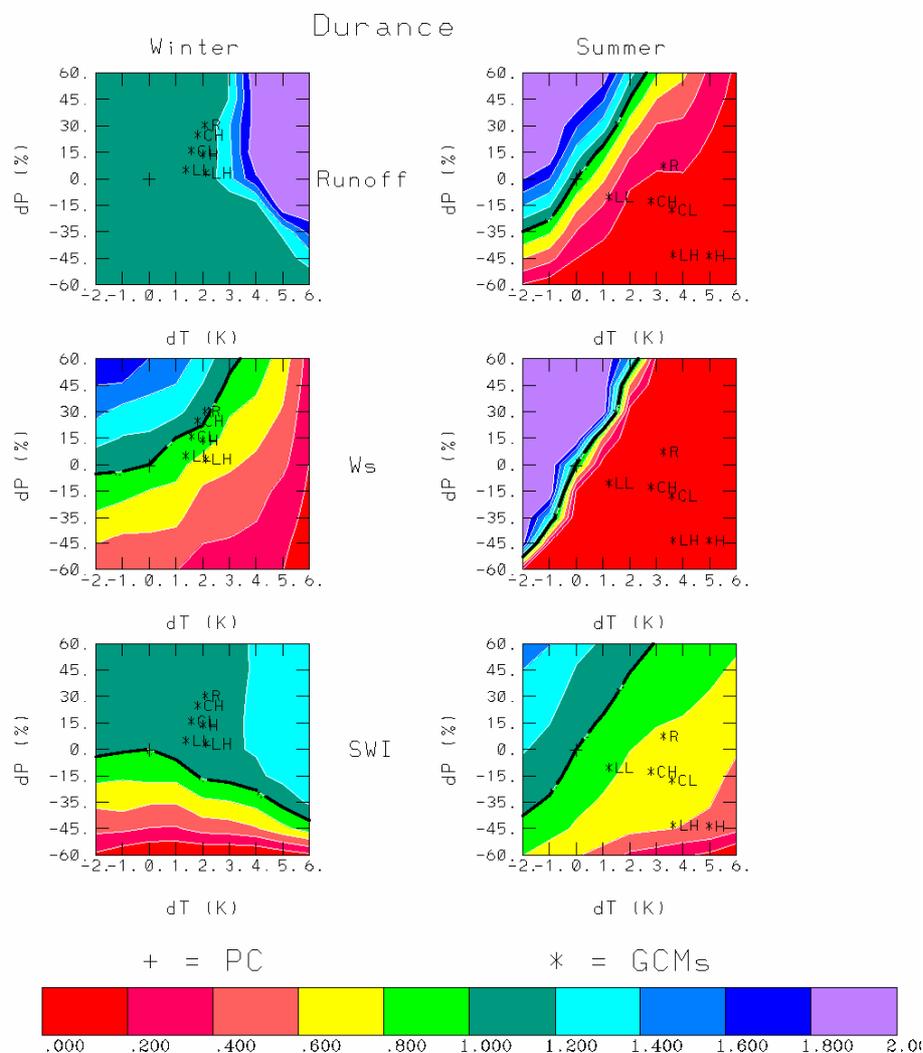


Figure 29 : Etude de sensibilité aux anomalies mensuelles de température et de précipitation de l'écoulement total (Runoff), de l'équivalent en eau de la neige (Ws) et de l'humidité relative du sol (SWI) de la fonction de production hydrologique ISBA pour le bassin de la Haute Durance, en hiver (à gauche) et en été (à droite).

Des anomalies mensuelles de température de l'air (variant entre -2 K et +6 K) et des précipitations (-60 % - + 60 %) sont combinées au climat présent pour estimer les anomalies résultantes sur le ruissellement total (runoff), l'équivalent eau de la neige (Ws) et l'humidité relative de l'eau du sol (indice SWI pour Soil Water Index) pour l'hiver et l'été. Les isolignes correspondent à des variations de 20 % par rapport au climat actuel (+) (variations négatives en grisé).

Par exemple, on peut voir que la réduction de l'humidité du sol associée aux anomalies des 6 scénarios se situe dans la tranche -20 à - 40 % pendant l'été alors que l'humidité du sol serait augmentée d'environ 10 % quelque soit le scénario en hiver.

4.3.4 Partage de l'incertitude entre scénarios météorologiques et modèles hydrologiques

Pour formaliser les constatations faites, il est possible de recourir à l'analyse de variance à deux dimensions, et d'examiner le poids respectif des facteurs « modèle hydrologique » et « scénario atmosphérique » dans l'évolution des variables d'intérêt.

On examine la moyenne de l'évolution moyenne de la lame d'eau interannuelle écoulée (moyenne du ratio entre l'écoulement sous scénario et écoulement sous climat présent), pour les 131 stations traitées par les 2 modèles Modcou et Isba-modcou. Une analyse de variance permet de hiérarchiser la part due aux scénarios et celle qui est due aux modèles :

	isba- modcou	modcou	moyenne scénario
cnrm-hr	0.973	0.920	0.947
lmd-hr	0.810	0.752	0.781
cnrm-lr	1.022	1.006	1.014
lmd-lr	0.905	0.842	0.874
hc-lr	0.957	0.894	0.926
ur-lr	1.138	1.051	1.095
moyenne modèle	0.968	0.911	0.939

ANOVA	SS	modalités	Degrés de liberté	MS	F	Seuil à 1%	
Facteur « modèle »	SSA	0.0096	2	1	0.0096	36.0 , df(1,5)	16.3
Facteur « scénarios »	SSB	0.1185	6	5	0.0237	88.8 , df(5,5)	11
résidu	SSE	0.0013		5	0.0003		

**Tableau 7 : Analyse de la variance.
6 scénarios, modèles Isba-Modcou et Modcou, sur 131 stations**

Pour les 7 stations traitées également par Cequeau, il vient

	Isba- modcou	Modcou	cequeau	Moyenne scénario
cnrm-hr	1.013	0.972	0.964	0.983
lmd-hr	0.797	0.747	0.778	0.774
cnrm-lr	1.057	1.018	0.982	1.019
lmd-lr	0.906	0.869	0.882	0.886
hc-lr	0.939	0.886	0.864	0.896
ur-lr	1.136	1.054	1.033	1.074
Moyenne modèle	0.975	0.924	0.917	0.939

ANOVA	SS	modalités	df	MS	F	F à 1%
Facteur « modèle »	SSA 0.0118	3	2	0.0058	17.9 df(2,10)	7.56
Facteur « scénarios »	SSB 0.1756	6	5	0.0351	106.8 df(5,10)	5.64
résidu	SSE 0.0033		10	0.0003		

**Tableau 8 : Analyse de la variance.
6 scénarios, modèles Isba-Modcou, Modcou, et Cequeau, sur 7 stations**

Les conclusions sont donc les mêmes.

Certes, le modèle sous-jacent à cette analyse n'a aucune raison d'être respecté (variables normales, modèle additif du type $x = \bar{x} + \delta^* j + \delta^* i + \varepsilon_j$). Par ailleurs, les modèles hydrologiques d'une part, scénarios atmosphériques d'autres part, sont dans une certaine mesure consanguins et cette analyse n'en tient pas compte.

Quoiqu'il en soit, l'ANOVA, réputée pour sa stabilité de ses diagnostics, suggère très clairement que :

Le premier facteur d'incertitude sur les variables à venir est le choix du scénario atmosphérique. La dispersion entre les modèles hydrologiques est également significative, mais elle est bien moindre.

4.3.5 Un cadre théorique pour l'analyse : équifinalité des modèles

Le LTHE a développé un cadre méthodologique d'estimation des incertitudes, issu des travaux de M. Georges-Marie Saulnier et de Melle Isabella Zin, doctorante ; ce cadre distingue :

- (1) le problème classique de propagation des incertitudes (une incertitude sur les variables de forçage d'un modèle se propage et génère des incertitudes dans l'estimation des variables pronostiques)

(2) le problème de l'incertitude dans la validité de la modélisation.

En effet, un modèle est construit pour répondre à un certain nombre de questions. Ce faisant, un certain niveau de complexité est imposé au modèle: il faut que celui ci soit suffisamment détaillé pour répondre à la question. Il n'est par contre pas certain que les données disponibles soient en quantité suffisante pour permettre une vérification complète du modèle construit. Les informations de terrain disponibles ne permettent de vérifier qu'une partie du modèle. Les autres parties du modèle fournissent des résultats idéalement réalistes mais nécessairement incertains car imparfaitement vérifiables. La quantification de ce problème "d'ambiguïté dans la modélisation*" ainsi que celle de la propagation d'incertitudes ont été regroupées dans une méthode générale appliquée par le LTHE en guise de test sur le modèle de prévision des crues TOPMODEL. Une note technique est disponible (Zin & Saulnier, 2001).

* equifinalité, en français.

5 - Conclusion, discussion, commentaire sur la diffusion des résultats

5.1 Principaux résultats

- ⇒ si on dispose d'un scénario atmosphérique, il est possible d'en décliner certaines conséquences hydrologiques ;
- ⇒ La variété des processus en œuvre dans les différents bassins et de leur agrégation 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 ;
- ⇒ les impacts varieront d'un bassin à l'autre à raison de la variété (de taille et d'altitude) de ces bassins, qui leur donne une sensibilité différenciée aux différents termes du climat.
- ⇒ La synthèse statistique des résultats hydrologiques est une voie qui permet cependant de dégager quelques tendances ;
- ⇒ 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.

5.2 Discussion des limites de l'approche GICC-Rhône

5.2.1 Eléments de critique quant à la démarche de modélisation elle-même

- La méthode employée manque de pertinence pour les extrêmes, ceci étant moins le fait de la limitation des modélisations hydrologiques adoptées, que du choix initial de la technique d'adaptation d'échelle des scénarios atmosphériques qui se révèle privilégier les écoulements moyens. En effet :
 - Ce sont les fluctuations des valeurs moyennes mensuelles qui sont reportées sur les chroniques des variables atmosphériques aux pas de temps tri horaires ou journaliers...
 - Les MCG sont reconnus comme imparfaits, mais leur sensibilité au doublement de CO₂ est considérée comme juste.Ces deux effets se combinent pour rendre discutables les fluctuations des variables modélisées, notamment des variables hydrologiques et de leurs extrêmes.

- L'équifinalité des modèles, ici traitée faute de mieux par le recours à plusieurs modèles, reste en soi dangereuse. Une traduction de cette équifinalité peut être la suivante : aucun modèle distribué n'est absolument fiable lorsqu'il sort de son domaine de calibration. Le changement climatique correspond pourtant exactement à cette situation où les conditions de fonctionnement hydrologique sont modifiées...
- Pas d'adaptation du bassin : végétation naturelle et végétation cultivée restent identiques à elles-mêmes.
- 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.

5.2.2 Éléments de critique quant à la 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 l'action 3.1 GICC-Rhône dans cette première phase, et le recours à des statistiques traitant chaque chronique comme un individu indépendant, ignore cette interdépendance.
- Les écoulements superficiels, en tant que ressource structurée dans l'espace, sont DE FAIT le lieu d'une gestion partagée ; d'autre part, il y a nécessairement interaction entre gestion de la ressource en eau (eaux moyennes), gestion des aléas (hautes & basses eaux), et 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 par ailleurs été mené au sujet de la composition des crues et mériterait application (Gottschalk L. et al, 2002).
- 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 (les usages soulignés sont présents dans la tranche II du 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 en tranche I 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 $d_2=d_1+10j$. Notons qu'au plan international, les indicateurs retenus dans les études à échelle planétaire sont très souvent bien frustrés (mm/an ou m³/an/hab), et il y a donc bel et bien possibilité d'apporter sur ce point une contribution utile aux études hydroclimatiques.

5.3 Données disponibles de GICC Rhône

Il n'y a pas de base de données organisée. Les jeux de fichiers de forçage (climat modifiés de diverses définition et climat présent) ont été mis à disposition des participants intéressés par Météo-France, sous forme de cd-roms (1 cd-rom relatif à la résolution temporelle journalière ; plusieurs cd-roms pour les champs de forçage au pas de temps tri-horaire). Un rapport de travail présentant ces données et la méthodologie suivie pour les obtenir a été réalisé (Boone et al, 2000). La circulation au sein du groupe des chroniques de débit simulée se fait de même par ftp ou envoi de cd-roms.

Toutefois l'ensemble des résultats de ce rapport paraissent valorisables sur le site internet GICC, pour peu qu'ils soient :

- fournis avec les réserves indiquées ci-dessus,
- insérés dans le cadre général suivant qui, dans un esprit de développement durable, nous paraît devoir accompagner toute communication liée aux hydrosystèmes :

* toute gestion de type patrimonial « nous avons ensemble une richesse à gérer » doit être favorisée. Une telle gestion passe par une connaissance de cette richesse. 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.

* 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 optimiser les gestions actuelles : tout changement de contexte les remettrait 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, provoquera un fort d'adaptation des hydrosystèmes et de leur gestion.

6 - Bibliographie et production du projet

6.1 Bibliographie et références

6.1.1 Références externes citées

Alcamo J., Döll P., Kaspar F. ET Siebert S., 1997, Global change and global scenarios of water use and availability : an application of WaterGAP 1.0, Wissenschaftliches Zentrum für Umweltsystemforschung, Universität gesamthochschule Kassel, 49 pages + annexes

Collectif, 1996, Rapport du Programme ECLAT du Ministère de l'Environnement "Régionalisation des effets climatiques – Synthèse des résultats obtenus et perspectives", 221 p.

Collectif, 1998, Euroclivar recommendations - Variability and Predictability Research in Europe, 1999 – 2004, 119 p.

Corti, S., Molteni, F. & Palmar, T. N. (1999) Signature of recent change in frequencies of natural atmospheric circulation regimes. *Nature* 398, 799-882.

Evans T. E., 1997, Les effets des changements dans le cycle hydrologique mondial sur la disponibilité des ressources en eau, in Fakri Bazzaz et Wim Sombroek, *Changements du climat et production agricole*, FAO.

Gellens D., Schädler B., 1997, Comparaison des réponses du bilan hydrique de bassins situés en Belgique et en Suisses à un changement de climat, *Revue des Sciences de l'Eau*, 10, 3:395-414

IPCC (2001) *Climate Change 2001 – Impacts, Adaption and Vulnerability*. Intergovernmental Panel on Climate Change, GRID Arendal.

Knighton D. (1998) *Fluvial forms and processes: a new perspective*. Wiley, New York, NY.

Morin G. et Slivitzky M. , 1992, Impacts de changements climatiques sur le régime hydrologique : le cas de la rivière Moisie , *revue des Sciences de l'Eau*, 5, 2 :179-196

6.1.2 Références internes

Engeland K., Gottschalk L. and Tallaksen L. (2001): Estimation of regional parameters in a macro scale hydrological model. *Nordic Hydrology* 32(3), 161-180.

Engeland K., Gottschalk L., 2002, Bayesian estimation of parameters in a regional hydrological model. *Hydrology and Earth System Sciences* 6(5), 883-898.

Gottschalk L., Krasovskaia I., Leblois E. and Sauquet E., 2002, Temporal and Spatial Scaling in Runoff Characteristics in a River Basin, article soumis

Gottschalk L., Beldring S., Engeland K., Tallaksen L., Sælthun N.R., Kolberg S. and Motovilov Y. (2001), Regional / macroscale hydrological modeling : a Scandinavian experience. *Hydrological Sciences Journal* 46(6), 963-982

Habets, F. (1998) Modélisation du cycle continental de l'eau à l'échelle régionale. Application aux bassins versants de l'Adour et du Rhône, thèse de doctorat de l'université Paul Sabatier - Toulouse III, 224 pages

Javelle P., 2001, Caractérisation du régime des crues : le modèle débit-durée-fréquence-convergent, approche locale et régionale, these de l'INPG, 237 pages + annexes

Lamouroux N., Capra H. Simple predictions of instream habitat model outputs for target fish populations. *Freshwater Biology*.(in press)

Lamouroux N., Olivier J.M., Persat H., Pouilly M., Souchon Y., Statzner B. (1999) Predicting community characteristics from habitat conditions: fluvial fish and hydraulics. *Freshwater Biology*, 42, 275-299.

Lamouroux N., Poff N.L., Angermeier P.L. Convergence of stream fish community traits in France and Virginia (USA) along geomorphic and hydraulic gradients. *Ecology*. (in press)

Lamouroux N., Souchon Y. Simple predictions of instream habitat model outputs for fish habitat guilds in large streams. *Freshwater Biology*. (in press)

Leblois E. et Margat J., 1998, Effets possibles sur les écoulements superficiels et les eaux souterraines, contribution à la plaquette "Impacts potentiels du changement climatique en France au XXIe siècle" éditée par la Mission Interministérielle à l'Effet de Serre et le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, pages 58-65.

Ledoux E., 1980, Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains, Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.

Ledoux, E., Girard, G. et de Marsily, G., 1989, Spatially distributed modeling : conceptual approach, coupling surface water and groundwater, in : *Unsaturated flow in hydrologic modeling, Theory and practise*, Kluwer Academic Publishers, 435-454.

Mahfouf J. et Noilhan J., 1996, Inclusion of a gravitationnal drainage in a land surface scheme based on the force-restore method, *Journal of Applied Meteorology*, 35(6), 987-992.

Motovilov Y., Gottschalk L., Engeland K. and Rodhe A. (1999): Validation of a distributed hydrological model against spatial observations. *Agricultural and Forest Meteorology* 98-99, 257-277.

6.2 Production du projet

6.2.1 Communications à colloques, exposés divers

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., 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

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.

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

Noilhan J., Le programme GICC-Rhône : premiers résultats et perspectives. Séminaire GICC, Jussieu, 13-14 décembre 2001

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., 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

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

6.2.2 Articles

Etchevers P., Golaz C., Habets F. and Noilhan J., 2002, Impact of a climate change on the Rhone river catchment hydrology, *Journal of Geophysical Research*, (sous presse)

Krasovskaia I., Gottschalk L., Leblois E., Signature of changing climate in Rhône-mediterranean-Corsica region, *la Houille Blanche*, no 8/2002 (sous presse)

Krasovskaia, I., Gottschalk, L., Leblois, E., Sauquet, E., 2002, Dynamics of river flow regimes viewed through attractors ; 8 pages + figs, article soumis

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, accepté pour publication dans *la Houille Blanche*

Martin E., Etchevers P., 2001, Impact des variations climatiques sur le manteau neigeux, incidence sur l'hydrologie nivale et les avalanches, la Houille Blanche, no 8/2002 (sous presse)

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

Thierry D., Amraoui N., 2000 - Hydrological modelling of the Saone basin. Sensitivity to the soil model. Physics and Chemistry of the Earth (soumis)

6.2.3 Rapports et notes de travail

Boone A., Noilhan J. et Etchevers P., 2000 : GICC-Rhône Climate Scenarios. Rapport intermédiaire du programme GICC/Rhône, CNRM+CEN , novembre 2000, 55 pages.

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.

F. Hendricks, Avancement EDF R&D au titre de GICC-Rhône, note de travail EDF, 15 pages.

E. Leblois, R. Garçon, 2000 : Comparaisons entre chroniques de débit, note de travail Cemagref-EDF/DTG, 20 pages.

E. Leblois, 2001 : Indicateurs hydrologiques et changement climatique, 10 pages

Leblanc J., 2001 : Changements climatiques et irrigation, revue bibliographique, mémoire de l'INA-PG, série irrigation, n° 894, 36 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

Zin, I., Saulnier, G.-M., 2001, Incertitudes et modélisation, note de travail LTHE pour GICC-Rhône, 18 pages

6.2.4 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.

Annexes

Annexe 1 - La phase 2 du projet GICC-Rhône

1 Coordination et gestion du projet

La coordination de la seconde phase sera assurée conjointement par Etienne Leblois et Jean-Michel Grésillon, responsable du laboratoire.

S'agissant des tâches techniques du Cemagref HHLY :

- les outils d'analyse hydrologique étant désormais bien cernés, l'actualisation de ces analyses au fur et à mesure de l'arrivée de chroniques de débit modélisées par de nouveaux modèles ou sous des scénarios atmosphériques améliorés ne posera guère de problèmes.

- une tâche technique propre à la phase 2 du projet (modélisation de la Saône avec caractérisation des incertitudes) sera menée par Kolbjorn Engeland, post-doctorant, en lien direct avec Georges-Marie Saulnier et Joël Noilhan.

2 Contenu

2.1 Objectifs de la phase 2

Les objectifs de la phase 2 du projet sont énumérés ci-après.

- 1) Etudes d'impacts sur les écosystèmes aquatiques (Cemagref BELY)
- 2) Etudes d'impacts « agriculture irriguées » (Cemagref IRMO)
- 3) Etude de la neige (Météo-France, Centre d'Etude de la Neige)
- 4) Etude de l'évolution probable de la végétation (CRENAM)
- 5) Compléments méthodologiques :
 - influence des échanges nappes rivières (BRGM)
 - Analyse satellitaire des variables d'état du bassin versant (comme confortement des modèles hydrologiques) (CETP)
- 6) Etude des incertitudes, à traiter par voie bayésienne (LTHE et Cemagref HH)

Pour certains d'entre eux un bref état d'avancement est fourni .

A ces actions déjà définies et sur lesquelles les équipes travaillent, nous souhaitons ajouter les tâches suivantes, résultant des conclusions du travail de la tranche 1 :

- 7) Prise en compte d'un ou de quelques scénarios de climat amélioré, par exemple Arpege-Climat (Royer et al, 2002) (action CNRM pour le scénario ; CIG, CNRM, EDF et BRGM pour la modélisation hydrologique ; Cemagref HH en intégration des résultats)
- 8) Prise en compte des anomalies des autres variables atmosphériques que pluies et température de façon à rétablir une cohérence interne du climat futur (CNRM)
- 9) Prise en compte de la dynamique de la végétation interactive (CNRM)

- 10) Homogénéisation du domaine modélisé par les différents modèles pour une meilleure intercomparaison (BRGM surtout)
- 11) Evaluation des autres termes du bilan hydrologique à l'échelle de la sous région hydrographique (Cemagref HH)

2.2 Eléments d'avancement de quelques uns des objectifs de la phase 2

Etude d'impact sur les écosystèmes aquatiques »

Ce chantier est conduit par N. Lamouroux, du Cemagref. Il concerne l'estimation des anomalies biologiques (structure des peuplement de poissons) et de leur incertitudes en liaison avec les anomalies de débits estimées par les partenaires du projet. Les anomalies de débits engendrent des anomalies hydrauliques (vitesses, hauteurs), elle mêmes générant des anomalies biologiques: l'hydraulique est une variables clé pour certaines espèces d'eau courante, qui guide leur choix d'habitat comme leur stratégie évolutive à plus long terme. L'effet des anomalies de température, estimé en liaison avec le projet GICC-Aquabio, est un effet à plus large échelle qui n'est pas détaillé dans GICC.

Notre approche est statistique sur l'ensemble des tronçons de cours d'eau: compte tenu de l'incertitude attendue des modèles d'impact physiques sur un site donné, à laquelle s'ajoutera l'incertitude des modèles de réponse biologique, seule une approche statistique des impacts biologiques par type de cours d'eau paraît envisageable. Nous réaliserons donc une typologie des cours d'eau du bassin basée sur leurs anomalies hydrologiques. Nous évaluerons ensuite la gamme des anomalies hydrauliques attendues par groupe de cours d'eau et leurs traductions en termes biologiques. Pour préparer ces estimations, nous avons à ce stade particulièrement progressé sur les liens

- 1) $\Delta\text{BIO} = f(\Delta\text{hydraulique})$
- 2) $\Delta\text{Hydraulique} = f(\Delta\text{Débit})$

en s'assurant à chaque fois d'identifier les relations les plus générales possibles, c'est à dire validées sur une large gamme de cours d'eau, en France et à l'étranger.

Liens $\Delta\text{BIO} = f(\Delta\text{hydraulique})$

Afin d'être utilisées dans une problématique d'impact, les relations reliant la biologie à l'hydraulique doivent être le plus causales possible et le moins descriptives possible (l'hydraulique étant souvent corrélée à une foule d'autres variables le long des cours d'eau). C'est pourquoi les liens $\Delta\text{BIO} = f(\Delta\text{hydraulique})$ sont généralement obtenus à l'aide de modèles d'habitat, qui couplent un modèle hydraulique avec des modèles de préférences des différentes espèces pour les conditions hydrauliques locales (vitesse, hauteur). Nous avons récemment montré:

- que les prédictions des modèles d'habitat sont essentiellement liées à deux caractéristiques hydrauliques adimensionnelles des tronçons de cours d'eau: nombres de Froude et de Reynolds. Ce sont des combinaisons du débit, de la hauteur moyenne et de la largeur (tests sur environ 100 cours d'eau français).
- que ces prédictions correspondent effectivement à des différences biologiques observées (proportions d'espèces ou de guildes) entre sites ayant des valeurs de nombres de Froude et de Reynolds différentes (tests sur 80 cours d'eau de France et des Etats-Unis).

Par exemple (résultats non détaillés ici), un doublement de nombre de Reynolds mensuel sec (correspondant plus ou moins à un doublement du débit mensuel sec) génère une diminution de plusieurs dizaines de % de la proportions d'espèces de poissons typiques des habitats profonds et courants (hotu, barbeau, blageon, ombre etc ...).

Ces identifications de relations quantitatives entre biologie et descripteurs hydrauliques simples des tronçons de cours d'eau apportent une simplification considérable des modèles d'impact existants (Lamouroux et Capra, in press ; Lamouroux et Souchon, in press). La validation biologique de ces relations sur une large gamme de sites sont les premières obtenues dans le domaine (Lamouroux et al., 1999 ; Lamouroux et al., sous presse).

Liens Δ Hydraulique = f(Δ Débit)

Les variables hydrauliques importantes pour les modèles d'impact sont des combinaisons du débit Q, de la hauteur d'eau H et de la largeur L. Reste donc à connaître les lois H(Q), L(Q). Ces lois, qui reflètent ce qu'on appelle la « géométrie hydraulique » des tronçons de cours d'eau, ont des propriétés très générales dans les cours d'eau du monde entier (elles sont modélisables comme des lois puissance à exposant constant)¹. Nous avons développé et testé de telles lois pour les cours d'eau Français (environ 100 sites) et vérifié leur cohérence avec celles trouvées ailleurs (Knighton, 1998).

Reste donc à : coupler nos modèles avec les anomalies de débits estimées sur le Rhône ; estimer les incertitudes ; comparer nos résultats avec les approches complémentaires développés dans le projet GICC-Aquabio ; discuter et présenter les résultats.

Références : Knighton D. (1998)

Etude d'impact sur l'agriculture irriguée

Ce chantier démarre, conduit par le Cemagref, unité de recherche irrigation à Montpellier (« IRMO »).

Une analyse bibliographique a été confiée à un étudiant de l'INA-PG. et a abouti à actualiser l'état de la connaissance des impacts du changement climatique sur la production agricole et à valider les principales dépendances et rétroactions attendues entre évolution climatique et irrigation (J. Leblanc, 2001).

L'activité scientifique spécifique a porté dans un premier temps sur la connaissance actuelle des pratiques d'irrigation dans un périmètre irrigué de la Drôme où la culture du maïs est dominante. Les assolements, doses appliquées et niveaux de rendement sont connus. De même 3 principales classes de sol ont été identifiées. Sur la base des données climatiques des 27 dernières années (1975-2001) à Montélimar, les besoins en eau à l'ETM ainsi que les rendements des cultures dominantes comme le maïs ont été simulés à l'aide du modèle Stics. Au préalable une validation du modèle (concernant la culture du maïs) a été effectuée sur la base des données recensées relatives au rendement. On dispose alors d'une estimation, à

¹ C'est le type de loi qui est mentionné par le BRGM comme outil de construction d'une représentation simplifiée de la géométrie du réseau hydrographique (Note du coordinateur).

l'échelle du périmètre, de la demande en eau moyenne en combinant assolements et types de sol que l'on pourra confronter aux consommations en eau réelles estimées puis à la ressource en eau disponible dans le bassin versant de la Drôme. Les tendances évolutives du climat estimées à partir des sorties d'un modèle de circulation atmosphérique (Météo-France) sont en cours d'analyse. Le test sur l'évolution du taux de carbone confirme bien une augmentation de rendement selon le modèle en supposant la ressource en eau non limitante. Il convient toutefois d'adapter les tendances d'évolution constatées au pas de temps mensuel pour les paramètres climatiques au pas de temps journalier, entrées du modèle Stics.

Les questions auxquelles IRMO se propose de chercher réponse dans la suite sont les suivantes :

Peut-t-on avancer ou retarder (et de combien de jours) les dates de semis pour demeurer en deçà des consommations en eau admissibles avec les mêmes objectifs de rendement ? Dans la négative, quelle modification d'assolement ou réduction du rendement des cultures les plus consommatrices faudra-t-il consentir ?

Quelles stratégies d'adaptation au niveau de pratiques culturales, de l'évolution des assolements et de l'allocation de l'eau peut-on considérer pour pallier le déficit en eau d'irrigation estimé déjà en climat présent pour la Drôme à 2 million de m³ une année sur deux (DIREN, 1991), qui induit une surexploitation de la nappe d'accompagnement de la rivière et met en cause sa pérennité ?

La prise en compte des chroniques de débit simulées sous scénarios pour la Drôme, associé aux variations climatiques mensuelles de la température, de la précipitation, du rayonnement et de l'ETP prévues par le MCG de Météo-France pour le point de grille le plus proche de la station de Montélimar donnera un ensemble de possibles permettant de concrétiser cette approche.

Etude d'impact sur la neige

Une analyse complète de l'impact du changement climatique sur la nivologie des Alpes et l'hydrologie des cours d'eau à alimentation nivale a été effectuée en 2001 par le CEN de Météo-France. Cette analyse a été communiquée aux partenaires sous forme d'un rapport interne au projet (Etchevers et al., 2001) et à la communauté hydrologique sous forme d'une communication orale (Martin et al, 2001) qui s'accompagnera d'un article publié.

En résumé, les impacts relatifs à la couche nivale sont les suivants : diminution de la couverture de neige, avancement des hauts débits liés à la fonte, voire disparition du caractère nival de certaines rivières.

Cette étude est déjà bien avancée puisque le terme nival, intimement lié au fonctionnement propre de la modélisation hydrologique, est généré en même temps que les débits simulés (Cf § 4.1).

Pour autant, sa description détaillée reste à faire en tranche 2.

Etude de l'évolution probable de la végétation

Le programme de travail du CRENAM, en charge de cet aspect, a été formalisé fin 2001 par une convention explicite avec la coordination.

L'objet de ce travail est d'estimer les modifications possibles de l'occupation des sols pour le climat modifié (extension des forêts,...).

Compléments méthodologiques

Plusieurs chantiers du projet GICC-Rhône ou à sa périphérie ont pour objet de vérifier et d'améliorer la validation des modèles employés, en évaluant directement certaines structures (nappes, végétation), en éliminant certains facteurs anthropiques (principaux barrages) et en validant les modèles sur d'autres variables que les seuls débits (neige, humidité du sol).

Influence des échanges nappes rivières

L'action de modélisation en cours au BRGM et décrite plus haut doit à terme fournir une variante de modélisation réputée bien tenir compte des nappes souterraines, eu égard aux compétences de cet établissement.

Facteurs anthropiques

EdF-DTG a animé une réunion technique en septembre 2000 sur la façon dont on pouvait tenter de s'affranchir de l'influence des barrages et reconstituer des débits pseudo-naturels. Une demi-douzaine de chroniques désinfluencées ont été fournies fin 2001 aux partenaires intéressés, action qui se poursuit actuellement². Le bénéfice majeur attendu est de permettre un meilleur jugement sur la validité en zone alpine des modèles hydrologiques employés.

Validation sur des variables d'état du bassin versant

Ci-dessous, on trouvera un récapitulatif de l'action propre du CETP, visant à fournir des éléments de validations sur des variables autre que les débits.

Une base de données (images NOAA/AVHRR à 1 km de résolution) est acquise sur la période complète 1981-2000, soit 255 images. L'exploitation de cette source d'information a nécessité le développement d'outils informatiques qui sont désormais en phase d'exploitation.

La température de surface a pu être estimée pour l'ensemble des données acquises à ce jour, ce qui a permis une comparaison avec les valeurs obtenues par le modèle ISBA-MODCOU sur la période 1981-1983 (cf. figure 30). Ces premiers résultats montrent un écart de l'ordre de 8K entre les simulations du modèle et la température observée avec un écart-type de 3.1K. Une estimation de la couverture neigeuse a également fait l'objet d'une première comparaison avec les sorties du modèle pour ces mêmes années.

L'estimation de l'occupation du sol sur l'ensemble du bassin et l'ensemble de la période est en cours de traitement et devrait prochainement être finalisée. Quatre classes dominantes ont pu être interprétées : forêts, prairies, zones agricoles, zones arboricoles, surfaces d'eau (Figure 30). L'acquisition d'images SPOT haute résolution sur l'ensemble du bassin sera sans doute

² Cette action est mentionnée ici pour son importance méthodologique, mais n'est pas conventionnellement liée au projet GICC-Rhône

nécessaire pour valider ces cartes. Cette phase de travail sera poursuivie par le développement de méthodes pour modéliser l'évolution temporelle (inter-annuelle) des types de végétation sur le bassin. Dans ce but, une première étude de suivi de l'évolution de la couverture végétale par différents indices spectraux de végétation a démarré (stage K.K. Talukdar). Elle doit permettre de modéliser l'évolution annuelle des principaux types d'occupation du sol. Les indices tels que le NDVI, OSAVI, TSAVI, GEMI ont été calculés et tracés pour la période 1993-2000 et pour des zones tests sélectionnées en fonction de leur occupation du sol (déterminée dans un premier temps à partir de l'information Corine Land Cover). Cette comparaison a permis de mettre en évidence la supériorité des indices élaborés de type SAVI ou GEMI qui prennent en compte les caractéristiques spectrales des sols sous-jacents et les caractéristiques atmosphériques par rapport aux indices simples de type NDVI. L'analyse du comportement inter-saisonnier et inter-annuel de ces zones va nous permettre de caractériser chaque type de végétation et de détecter les éventuels changements. Les liens avec la variabilité climatique seront ensuite examinés.

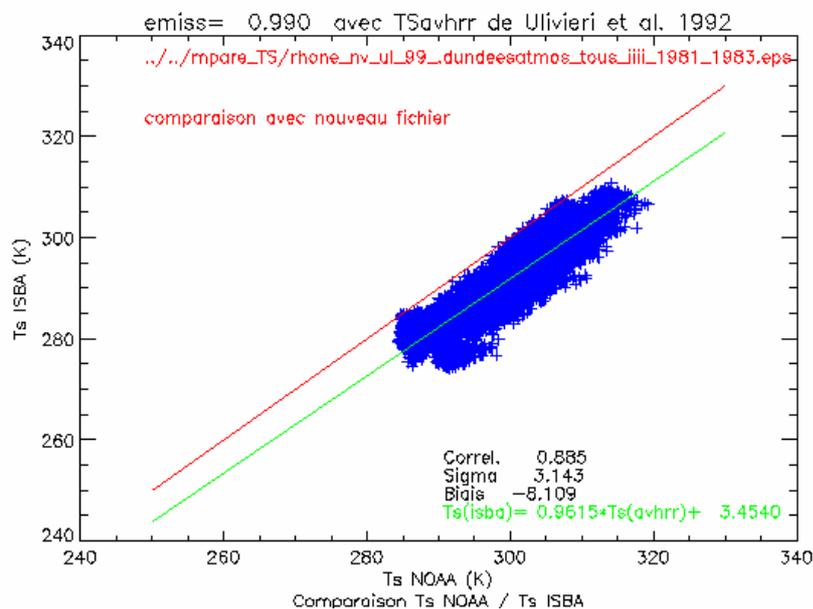


Figure 30 : Comparaison des températures de surfaces pour la période 1981-1983. En abscisse, la température calculée à partir de l'imagerie NOAA/AVHRR, et en ordonnée la température de surface ISBA.

Classification image AVHRR 1 km

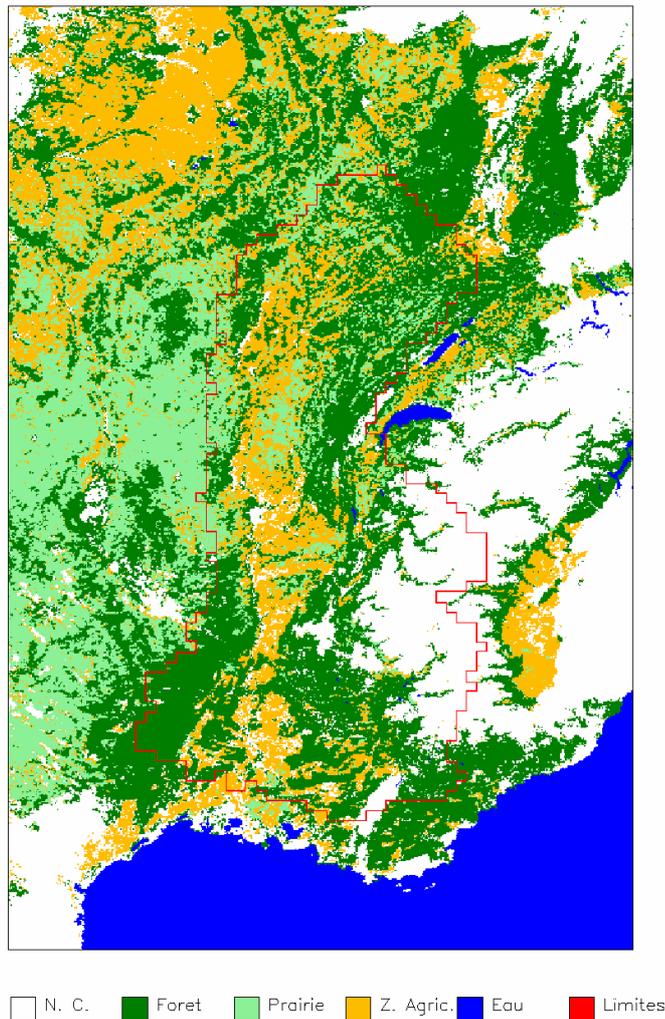


Figure 31 : Estimation de l'occupation des sols à partir de l'imagerie NOAA/AVHRR pour l'année 1997 sur l'ensemble du bassin du Rhône

Etude des incertitudes

Etendue des incertitudes à traiter

A côté du recours systématique à plusieurs modèles et scénarios, un débat a animé l'équipe de projet : y a-t-il intérêt ou non à un exposé soigné de l'ensemble des hypothèses faites par le projet GICC-Rhône et notamment sur toutes celles « cachées » dans la structure même des modèles et données employées ?

« pour » : il faut le faire, car c'est de bonne méthodologie scientifique et particulièrement nécessaire compte tenu de la nature du projet GICC-Rhône.

« contre » : d'abord c'est une tâche sur-humaine, ensuite et surtout cela ne débouche sur rien qu'un exposé littéraire, une litanie désespérante.

En synthèse, le coordinateur propose de se borner à l'énoncé qualitatif des hypothèses impliquées par l'assemblage de modèles réalisé par GICC-Rhône, donc directement liées à la méthodologie choisie et mise en œuvre, sans détailler les hypothèses internes à chaque modèle et réputées exposées par ailleurs. Ce chantier lui échoit, sous contrôle de l'ensemble des participants.

Etude des incertitudes par voie bayésienne

Dès 2000, le LTHE a développé un cadre méthodologique d'estimation des incertitudes, issu des travaux de M. Georges-Marie Saulnier et de Melle Isabella Zin, doctorante . La tranche II doit voir une application concrète cette méthode à quelque sous-secteur ou sous-modèle manipulé dans GICC-Rhône. La définition et la conduite de cette opération est à la charge du LTHE, en lien avec le CNRM.

D'ores et déjà, le Cemagref s'est assuré la collaboration d'un post-doctorant, Kolbjorn Engeland, qui déploie en ce moment le modèle hydrologique Ecomag (Motovilov et al., 1999) sur la Saône amont. Le bénéfice attendu de cette action n'est pas d'abord de disposer d'un autre modèle encore sur ce secteur à côté de ceux du cig, cnrm et brgm, mais surtout que ce modèle dispose d'une surcouche de caractérisation bayésienne de ses incertitudes, développée par la personne au cours de sa thèse (Engeland et al, 2002 ; Gottschalk et al, 2001 ; Engeland et al, 2001). Ceci permet d'appliquer concrètement la démarche tracée pour GICC par (Saulnier, 2001).

EDF DER souhaite également participer au chantier incertitude, en examinant pour au moins un bassin versant plusieurs jeux de paramètres présentant une "qualité équivalente" (à définir) et en évaluant l'influence du critère d'optimisation sur les résultats des simulations.

2.3 Quelques précisions sur les actions nouvelles projetées

Prise en compte d'un scénario de climat amélioré

On l'a vu, le projet GICC-Rhône est très dépendant, quant à ses résultats, de la définition des scénarios climatiques et de leur régionalisation. Une veille doit donc être maintenue sur ce sujet, assurée pour le projet par ses partenaires météorologues et climatologues.

En 2001, le LMD s'est ainsi intéressé à la régionalisation des scénarios climatiques en Europe. La question posée est celle de l'échelle spatiale pertinente qu'un scénario climatique peut atteindre. Plusieurs résolutions du modèle climatique LMDZ ont été utilisées, y compris un agrandissement local sur la vallée du Rhône. Il semble que si l'augmentation de résolution peut apporter des améliorations pour des phénomènes régionaux ou locaux, elle ne permet pas d'en atteindre d'autres qui renvoient à la paramétrisation physique des modèles. Le LMD réalise actuellement, l'imbrication d'un modèle régional dans le modèle climatique LMDZ, en espérant que cette approche hybride pourra apporter une contribution significative à la régionalisation des scénarios climatiques en Europe.

Le projet GICC-Rhône aura aussi de tels éléments à intégrer dans la tâche « incertitudes », tout ceci justifiant de maintenir jusqu'au terme du projet le lien entre climatologues et hydrologues.

Concrètement :

On propose la prise en compte des nouveaux scénarios devenus disponibles depuis 1999 (au moins le dernier scénario Arpege-Climat, Royer et al. 2002). Cette action nécessite du temps machine dans tous les laboratoires impliqués, et une intégration des résultats dans les résultats communs.

Prise en compte des anomalies des autres variables atmosphériques

Dans la phase 1 du projet GICC-Rhône, seules les anomalies de température et précipitations sont considérées (anomalies de type 1) ; ceci permet une meilleure intercomparaison avec les nombreuses études internationales où seules ces variables sont considérées. Par contre, le climat futur quel qu'il soit aura sa cohérence interne et il paraît important de réaliser aussi un jeu de scénarios climatiques où les autres variables atmosphériques (rayonnement notamment) seront modifiées. Ainsi donc l'impact de l'ensemble des anomalies (type 2) sera examiné dans la phase 2 du projet.

A l'avenir, on pourrait aussi songer à modifier la distribution des précipitations comme suggéré par certains MCG (le modèle Arpege-Climat montre une tendance à l'augmentation du nombre de jours de précipitations fortes).

Prise en compte d'une végétation interactive

Les cartes de sol et de végétation étaient invariantes dans la première phase. Dans la seconde phase, le CNRM se propose d'examiner les modulations possibles des impacts par la végétation dans un contexte d'atmosphère enrichie (assimilation du CO₂ atmosphérique et adaptation de la biomasse au nouveau contexte climatique et hydrique).

Homogénéisation du domaine modélisé

Une extension du secteur modélisé par Marthe et si possible par Cequeau, au Rhône entier, est désirable, car la géométrie variable des domaines modélisés complique inutilement l'analyse conjointe de leur prédictions.

Le BRGM Des simulations sur la période de 18 ans seront réalisées avec les précipitations du schéma "Climat Présent" ainsi qu'avec les précipitations résultant de certains scénarios de doublement du taux de CO₂. Cependant, à titre de comparaison tous les scénarios de modifications de climat seront simulés avec le modèle sans nappe qui étant plus simple a pu être très bien calibré par des procédures de calages automatiques. Ce modèle ayant des temps de calculs raisonnables est en effet adapté à des analyses de sensibilité en particulier des différents schémas de bilans hydriques.

On étudiera aussi la possibilité d'étendre le modèle de surface à tout le bassin du Rhône, comme les autres membres du consortium. L'intérêt étant en particulier d'analyser l'influence des variations climatiques sur l'enneigement dans les massifs montagneux et également dans les régions à climat plus secs (Provence par exemple).

On analysera également la possibilité de prendre en compte la ré-infiltration des ruissellements de surface vers le réservoir sol ce qui devrait améliorer la genèse des crues, par une approche plus semblable à la méthode des "zones contributives" et l'estimation de l'ETR.

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 mieux rendre mieux compte de leur structuration spatiale et de la variabilité des écoulements.

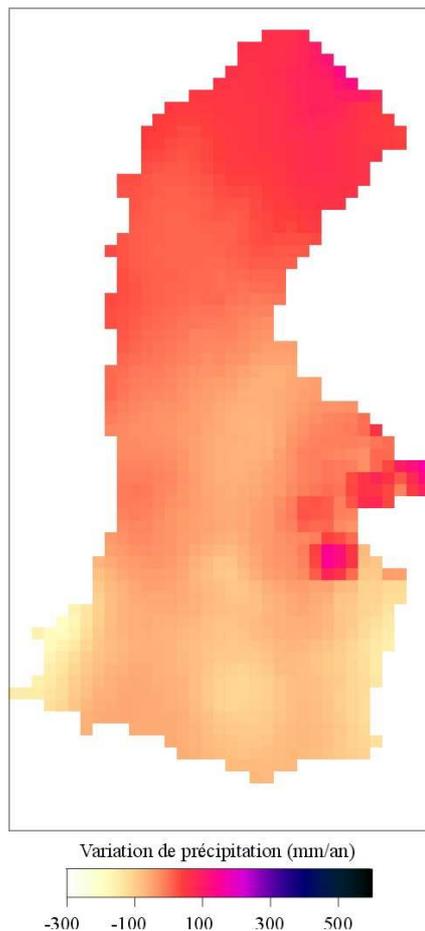


Figure 32 : Variation moyenne annuelle de la lame incidente liée au forçage CNRM-HR

Comme le montre la figure 32, le projet dispose de plus d'information que les seuls débits simulés. Pour le bassin dans son ensemble, on peut examiner divers termes du bilan hydrologique ; ici on retrace la variation moyenne annuelle des précipitations (pluviométrie + lame de fonte) sur l'ensemble du domaine par rapport au climat actuel.

Ceci permet non seulement de faire une analyse des débits, mais globalement des 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).

3 Apport des membres du CS de GICC

Sur toutes ces orientations, la proposition des évaluateurs du projet d'une rencontre entre les principaux membres du projet et les membres intéressés du CS de GICC est évidemment la bienvenue.

Annexe 2 – Eléments financiers

Utilisation du budget accordé par le MATE via Medias/France

(Extrait du document financier transmis au GIP Médias France en février 2002)

1 Ventilation par laboratoire

Laboratoire bénéficiaire	Budget total	Budget versé	Dépense effective du laboratoire pour le projet	Ecart positif au budget (excès de dépense)	Ecart négatif au budget (dépenses non réalisées)
Armines	125740.93	85140.40	81059.00		44681.93
BRGM/DR	32085.46	23436.97	65819.20	33733.74	
Cemagref/HHLY	75679.20	51750.07	77605.39	1926.19	
CNRS/CETP	116758.40	79177.62	121030.67	4272.27	
CNRS/LMD	47892.59	33235.14	23072.90		24819.69
CNRS/LTHE	95799.13	65165.26	824.00		94975.13
EDF	132328.07	89572.56	235307.00	102978.93	
Météo-France	168078.41	113401.99	208000.00	39921.59	
Total	794362.19	540880.02	812718.16	182832.72	164476.75

Tous les chiffres de ce tableau récapitulatif sont exprimés en francs TTC.

2 Ventilation par nature de dépense

Catégorie	total (F,TTC)
Fonctionnement / Achat de données	6030.00
Fonctionnement / Achat de fournitures administratives	25738.54
Fonctionnement / Inscriptions à des congrès	2350.00
Fonctionnement / Licences et maintenance logiciels	16345.40
Fonctionnement / Divers (Frais prorata temporis)	314726.20
Fonctionnement / Petit équipement	12060.00
Fonctionnement / Gratifications de stage	33986.00
Sous-traitance	23072.90
Missions	42742.46
Personnel en CDD	292000.00
Personnel vacataire	43667.00

Sommaire

Introduction	4
Le présent rapport.....	4
Le contexte	4
1 - Objectifs, résumé et organisation générale du projet.....	6
1.1 Objectifs du projet.....	6
1.2 Résumé des travaux.....	7
1.2.1 Travaux annoncés (annexe technique du contrat de recherche).....	7
1.2.2 Résumé des travaux effectués	8
1.3 Organisation générale du projet GICC.....	9
1.3.1 Découpage des tâches et responsabilités	9
1.3.2 Chronologie des travaux effectués	9
2 – Les données disponibles ; construction des scénarios atmosphériques sous scénario de changement climatique.....	11
2.1 Données disponibles - Rappel sur la base de données Gewex-Rhône	11
2.2 Scénarios de changement climatique sur le bassin du Rhône	14
2.2.1 Les scénarios, leurs résolutions, leurs schémas de fonctionnement.....	14
2.2.2 Réalisme des simulations des MCG en climat présent sur le bassin du Rhône	16
2.2.3 Anomalies mensuelles simulées dans 6 scénarios MCG	16
2.3 Définition des scénarios climatiques retenus pour les études d'impact	23
3 - Les modèles hydrologiques utilisés	24
3.1 Modèles Modcou et ISBA-Modcou	24
3.1.1 Découpage du bassin	24
3.1.2 Fonctions de production	25
3.2 Modèle CEQUEAU.....	25
3.3 Modèle Marthe	28
4 - Analyse des impacts hydrologiques.....	31
4.1 Exemple d'analyse d'impact hydrologique détaillée, à partir du modèle hydrologique ISBA-MODCOU.....	31
4.2 Diagnostic hydrologique sur l'ensemble des simulations	36
4.2.1 Disponibilité des simulations	36
4.2.2 Nécessité d'intercomparaison sur des sous-ensembles cohérents.....	37
4.2.3 Critères statistiques	37
4.2.4 Distribution des débits.....	38
4.2.5 Cycle annuel des débits mensuels moyens.....	39
4.2.6 Evolution de la lame d'eau écoulée.....	39
4.2.7 Saisonnalité des écoulements	40
4.2.8 Evolution des crues	42
4.3 Etude des incertitudes.....	43
4.3.1 Rapport entre erreur de modélisation et impact du changement climatique	43
4.3.2 Dispersion entre les scénarios et entre les modèles.....	44
4.3.3 Analyse de sensibilité.....	45
4.3.4 Partage de l'incertitude entre scénarios météorologiques et modèles hydrologiques	47
4.3.5 Un cadre théorique pour l'analyse : équifinalité des modèles	48

5 - Conclusion, discussion, commentaire sur la diffusion des résultats	50
5.1 Principaux résultats	50
5.2 Discussion des limites de l'approche GICC-Rhône	50
5.2.1 Eléments de critique quant à la démarche de modélisation elle-même.....	50
5.2.2 Eléments de critique quant à la caractérisation des impacts hydrologiques.....	51
5.3 Données disponibles de GICC Rhône	52
6 - Bibliographie et production du projet	53
6.1 Bibliographie et références.....	53
6.1.1 Références externes citées.....	53
6.1.2 Références internes	53
6.2 Production du projet	55
6.2.1 Communications à colloques, exposés divers	55
6.2.2 Articles	55
6.2.3 Rapports et notes de travail	56
6.2.4 Site Internet	56
Annexe 1 - La phase 2 du projet GICC-Rhône	58
1 Coordination et gestion du projet	58
2 Contenu	58
2.1 Objectifs de la phase 2	58
2.2 Eléments d'avancement de quelques uns des objectifs de la phase 2	59
2.3 Quelques précisions sur les actions nouvelles projetées	65
3 Apport des membres du CS de GICC	67
Annexe 2 – Eléments financiers.....	68
Utilisation du budget accordé par le MATE via Medias/France.....	68
1 Ventilation par laboratoire.....	68
2 Ventilation par nature de dépense	68