

**Université Pierre et Marie Curie, Université Paris-Sud,
Ecole des Mines de Paris
& Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts**

**DEA Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistique et
Géochimie
Filière Hydrologie et Hydrogéologie Quantitatives**

**Impacts du changement climatique sur la variation des
paramètres hydrologiques du bassin versant du Rhône**

Dialecti PANGALOU

**Directeurs de recherche: Emmanuel LEDOUX
Pascal VIENNOT
Chantal DE FOUQUET**

**Centre Informatique Géologique
Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris**

Septembre 2003



Remerciements

Je tiens ici à remercier très sincèrement Monsieur Emmanuel Ledoux qui m'a accueilli très chaleureusement dans le laboratoire du CIG et qui m'a confié ce sujet de mémoire, qui a été toujours présent et qui m'a donné de conseils lorsque j'en avais besoin.

Je remercie aussi Monsieur Pascal Viennot, qui était toujours là pour m'aider pour tout problème d'informatique, pour m'enseigner tous les programmes utilisés et pour contribuer considérablement à la réalisation de ce stage.

Je ne pourrais jamais oublier non plus la contribution de Messieurs Etienne Leblois et Kolbjørn Engeland et notre très bonne collaboration quand je suis allée à Cemagref de Lyon pour une partie de mon stage. Je les remercie beaucoup.

Je tiens à remercier de plus Madame Chantal De Fouquet, qui était toujours accueillante quand j'en avais besoin.

Je voudrais aussi remercier tous les thésards de CIG qui ont créé une ambiance assez "festive" dans le laboratoire, et qui ont été toujours volontaires à corriger mon français, même si parfois ils se moquaient de moi...

Ce travail ne pourrait pas être accompli sans le soutien quotidien de mes parents et de mes amis et sans leur "injection de moral" chaque fois que j'étais pessimiste.

Je vous remercie tous!

SOMMAIRE

INTRODUCTION	5
1 Présentation du modèle utilisé.....	6
1.1 Principes de base.....	6
1.2 Modélisation de la Fonction de Production (MODSUR)	7
1.2.1 Calcul des fonctions de production	7
1.2.2 Transfert de l'eau de surface	8
1.2.3 Calage.....	9
1.3 Simulation conjointe des transferts de surface et des transferts souterrains (MODCOU)	10
1.3.1 Le transfert souterrain	10
1.3.2 Le transfert dans le réseau hydrographique	10
1.3.3 Les échanges surface – souterrain	10
2 Présentation du domaine modélisé.....	12
2.1 Domaine géographique et morphologique	12
2.1.1 Domaine de surface.....	12
2.1.2 Domaine souterrain	12
2.2 Les climats du bassin du Rhône	13
2.2.1 Pluie et neige.....	13
2.2.2 Température.....	14
2.3 Le régime hydrologique du fleuve et de ses affluents.....	15
3 Le modèle Rhône	17
3.1 Discrétisation des domaines de surface et souterrain	17
3.1.1 Domaine de surface.....	17
3.1.2 Domaine souterrain	19
3.2 Analyse des données	20
3.2.1 Les données météorologiques.....	20
3.2.2 Les mesures hydrométriques	21

4	Simulations	22
4.1	Optimisation du calage	22
4.1.1	Définition des critères statistiques utilisés	22
4.1.2	Le code utilisé	23
4.2	Résultats	24
5	Simulations sous différents scénarios	28
5.1	Constitution de scénario	29
5.2	Les scénarios utilisés et leurs résolutions	30
5.3	Analyse de la sensibilité du système pour un changement climatique imposé	32
5.4	Variations de la contribution de la nappe souterraine selon les différents scénarios	37
	CONCLUSIONS	42
	Bibliographie	43

INTRODUCTION

Ce mémoire fait partie du programme Gestion et Impacts du Changement Climatique – Rhône qui a pour ambition de construire des scénarios prévisionnels des impacts locaux de l'évolution prévisible du climat mondial sur la partie française du bassin du Rhône,.

Le sujet de ce mémoire fait suite aux travaux réalisés par Catherine Golaz – Cavazzi dans le cadre d'une thèse qui a été soutenue en 1999. La méthodologie est d'appliquer certains scénarios climatiques prévus par Météo – France sur le modèle MODCOU pour prévoir la variation des paramètres hydrologiques et tester la sensibilité du modèle.

Le travail que nous avons accompli comprend trois volets:

- Une analyse de sensibilité du modèle hydrologique après calage à la variabilité des paramètres climatiques température et précipitations;
- En même temps nous avons tenté d'effectuer une sorte d'optimisation sur le calage du modèle pour tester les incertitudes du modèle. Pour faire ceci, le code d'optimisation MOCOM – UA développé par l'Université de l'Arizona a été adapté aux besoins de MODCOU pour que l'intervalle des valeurs des paramètres qui satisfont au calage de MODCOU puisse être déterminé.
- L'analyse des résultats de simulation jusqu'à présent a montré que la nappe souterraine dans le bassin du Rhône, malgré le fait qu'elle n'est pas très étendue sur l'ensemble du bassin, joue un rôle assez important. Alors, il a été décidé de discuter la contribution de la nappe particulièrement sur le sous-bassin de la Saône.

1 PRÉSENTATION DU MODÈLE UTILISÉ

Pour la réalisation de ce stage nous avons utilisé le modèle MODCOU, issu d'une étroite collaboration entre l'Institut National de la Recherche Scientifique (INRS) – Eau au Québec, l'Orstom et le CIG (Girard et al., 1981). D'habitude, pour utiliser le modèle MODCOU il faut d'abord faire tourner GEOCOU, MODSUR et NONSAT en cet ordre. Par contre, car notre domaine était déjà modélisé, nous avons écarté les étapes de GEOCOU et NONSAT et nous avons gardé les résultats des modèles obtenus par Golaz – Cavazzi (1999). Donc, les seuls programmes décrits ci-dessous sont MODSUR et MODCOU.

1.1 PRINCIPES DE BASE

Une présentation détaillée du Modèle MODCOU se trouve dans Ledoux (1980) et Ledoux et al. (1989).

Le cycle de l'eau met en œuvre de très nombreux mécanismes complexes. Pour schématiser le cycle de l'eau, le modèle distingue cinq fonctions interconnectées:

- *la fonction d'entrée*

Elle constitue la source des apports d'eau dans le système. Elle prend en compte essentiellement les précipitations sur le domaine de surface, mais également les précipitations sur le domaine de surface tant en profondeur qu'en surface.

- *la fonction de production*

Il s'agit du maillon dominant du modèle. Le rôle de cette fonction est la répartition des précipitations entre infiltration, ruissellement, évapotranspiration et stockage du sol. Grâce à elle s'effectue le choix entre le transfert par le domaine de surface et le transfert par le domaine souterrain.

- *la fonction de transfert de surface*

L'objectif de cette fonction est d'acheminer l'eau disponible à travers le domaine de surface. Il s'agit de l'eau issue de la fonction de production destinée au ruissellement ainsi que de l'eau échangée avec le domaine souterrain.

- *la fonction de transfert souterrain*

Cette fonction simule le mouvement de l'eau dans les aquifères suivant les lois de l'écoulement en milieux poreux. Cette eau provient de l'infiltration et des échanges réciproques avec le réseau hydrographique principal.

- *la fonction d'échange surface – souterrain*

Elle calcule la relation à double sens entre le domaine de surface et le domaine souterrain aux points situés sur le réseau hydrographique principal.

1.2 MODÉLISATION DE LA FONCTION DE PRODUCTION (MODSUR)

Le programme MODSUR effectue une première étape dans la simulation du cycle de l'eau sur notre système hydrologique. Plus précisément, il calcule d'une part le bilan hydrique sur une maille de surface en utilisant des fonctions de production et d'autre part il calcule le transfert de la lame d'eau ruisselée à la rivière en utilisant la notion de temps de concentration du sous-bassin versant. En même temps il calcule le transfert dans le réseau de drainage principal.

1.2.1 Calcul des fonctions de production

Les fonctions de production réalisent sur le lieu de précipitations le partage entre infiltration, ruissellement, évapotranspiration réelle et stockage dans le sol. Ce partage pouvait être fait indépendamment du transfert de surface et du transfert souterrain au moins sur les zones de ruissellement pur. Dans ces conditions, ce calcul est effectué à partir des données météorologiques et des paramètres caractérisant les mécanismes de partage.

Description de fonctions de production

Le domaine est découpé en un certain nombre de zones météo, où les forçages (précipitations, température moyenne, et évapotranspiration potentielle) sont homogènes.

Le modèle comprend un réservoir dit "réservoir sol" dans lequel s'effectue le bilan hydrique, puis un certain nombre de réservoirs de transfert, chargés de moduler la libération de l'eau vers le domaine de surface et vers le domaine souterrain (cf. Figure 1.1).

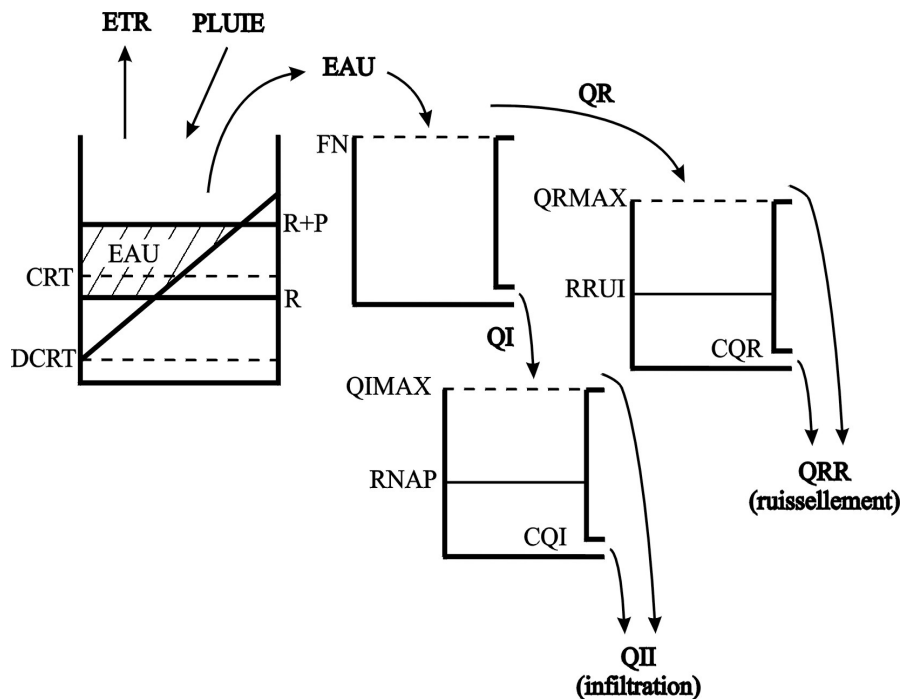


Figure 1.1 Schématisation du principe d'une fonction de production

Le bilan hydrique est effectué pour chaque pas de temps météo à partir de la lame d'eau précipitée (**P**), de l'évapotranspiration potentielle (**ETP**) et de l'état du stock (**R**) en eau dans le réservoir sol, suivant le schéma de la Figure 1.1. La quantité d'eau disponible (**EAU**), pour la mise en circulation est réglée d'après la valeur du stock par rapport au niveau minimal (**DCRT**) et moyen (**CRT**) du réservoir sol. L'évapotranspiration réelle (**ETR**) est ensuite déduite du stock d'eau restante après la déduction de l'eau disponible jusqu'à concurrence de l'évapotranspiration potentielle. Le calcul du bilan hydrique est alors effectué comme suit:

$$\begin{aligned}
 R_{MAX} &= 2(CRT - DCRT) + DCRT & QI &= \min(EAU, FN) \\
 RBA &= \max(DCRT, R) - DCRT & QR &= \max(0, EAU - QI) \\
 RHA &= \min(R + P, R_{MAX}) - DCRT & ETR &= \min(R + P - EAU, ETP) \\
 DR &= \max(0, RHA - RBA) & R &= R + P - EAU - ETR \\
 EAU &= \max(RP - R_{MAX}, 0) + \frac{DR(2RBA + DR)}{4(CRT - DCRT)}
 \end{aligned}$$

Les réservoirs de transfert ont ensuite pour tâche de répartir l'eau disponible en une lame ruisselée (**QR**) et une lame infiltrée (**QI**). Cette répartition est menée par le seuil maximal d'infiltration (**FN**). Un second réservoir de transfert règle ensuite la libération de l'eau ruisselée en simulant le ruissellement pur et le ruissellement retardé (**QRR**) à l'aide du niveau de débordement du réservoir de ruissellement (**QRMAX**) et du coefficient de tarissement du réservoir de ruissellement (**CQR**). Enfin, un troisième réservoir de transfert provoque éventuellement un retard entre l'infiltration et l'alimentation de la nappe dépendant du seuil de débordement de ce réservoir (**QIMAX**) et du coefficient de vidange (**CQI**).

Chaque type de fonction de production choisi est mis en œuvre pour chacune des zones météorologiques et sur l'ensemble des "pas de temps météo" constituant la période de simulation. Ce calcul peut ainsi être tout d'abord entièrement effectué en lame d'eau sans tenir compte d'une discrétisation autre que celle des précipitations.

1.2.2 Transfert de l'eau de surface

Les lames d'eau infiltrées sont ensuite converties en volumes disponibles à chaque pas de temps pour chacune des mailles de la couche de surface, en fonction de leur appartenance à telle zone météorologique et en fonction de la superficie qui y est attribuée à chaque fonction de production.

Le transfert de l'eau de surface sur les zones de ruissellement pur y est effectué globalement pour chaque sous-bassin et pour chaque pas de temps météo en tenant compte de la durée de trajet de l'eau d'une maille jusqu'à l'exutoire du sous-bassin. Ce calcul implique la discrétisation des sous-bassins en zones isochrones rassemblant les mailles présentant une durée de trajet identique jusqu'à l'exutoire.

Le programme MODSUR tente de réaliser une première approche partielle et provisoire du mouvement de la seule eau ruisselée. Le transfert partiel de l'eau de surface dans le réseau hydrographique principal est effectué indépendamment pour l'ensemble des bassins simulés de la couche de surface, c'est-à-dire ceux comportant des mailles rivières. Le calcul y est mené de façon analogue au cas des sous-bassins en regroupant les mailles rivières par zones isochrones déterminées d'après leur temps de transfert à l'exutoire, puis en acheminant l'eau disponible issue du calcul sur les sous-bassins, globalement vers l'exutoire du bassin.

Le programme MODSUR fait usage, sur le domaine de surface de données concernant:

- la météorologie (précipitations, évapotranspiration potentielle)
- les mécanismes de la production (choix des modèles et des paramètres de fonctions de production)
- les durées de transfert de surface (temps de concentration des bassins simulés).

Le programme calcule alors le bilan hydrologique du domaine de surface, qui aboutit aux résultats suivants:

- eau disponible en provenance du ruissellement sur les sous-bassins en chacune des mailles du domaine de surface,
- eau disponible pour l'infiltration vers le domaine souterrain sur chacune des mailles du domaine de surface.

Ces résultats se stockent sur fichier magnétique à chaque pas de temps y sont utilisés par le programme MODCOU.

1.2.3 Calage

En ce point-ci une première approche du calage du modèle est possible. On peut discerner entre l'ajustement du bilan hydrologique global et l'ajustement des temps de concentration.

Le premier ajustement peut être fait sur l'ensemble de la période des observations disponibles ou sur toute durée partielle au choix:

- *calage du bilan hydrique*

Il résulte de la comparaison, sur une période donnée, pour chaque bassin entre le volume mesuré écoulé aux exutoires et la résultante de l'infiltration et du ruissellement calculés par le modèle. Le réglage porte sur l'évapotranspiration réelle régie par les paramètres concernant le réservoir de bilan des fonctions de production.

- *calage de la répartition entre infiltration et ruissellement*

Ce calage suppose que l'on soit capable de distinguer sur les débits observés la part en provenance du ruissellement de celle en provenance des nappes souterraines. Le

réglage porte également dans ce cas sur les fonctions de production et concerne les paramètres de répartition de l'eau disponible à la sortie du réservoir de bilan.

Quant à l'ajustement des temps de concentration, il est effectué indépendamment sur chaque bassin versant et consiste à régler le temps de concentration de façon à obtenir le synchronisme les pointes de crues observées et la composante due au seul ruissellement des crues calculées, en modifiant l'organisation en zones isochrones.

1.3 SIMULATION CONJOINTE DES TRANSFERTS DE SURFACE ET DES TRANSFERTS SOUTERRAINS (MODCOU)

Ce programme effectue le transfert souterrain dans les aquifères et le transfert de l'eau de surface dans le réseau hydrographique principal en tenant compte de la relation nappes – rivières. Le résultat de la simulation concerne les variations du niveau piézométrique en tout point des nappes et les débits aux exutoires ainsi qu'en diverses stations hydrométriques choisies sur le cours des rivières.

1.3.1 Le transfert souterrain

Cette partie du modèle s'appuie sur l'intégration de l'équation de diffusivité régissant les écoulements en milieux poreux. Le domaine souterrain est schématisé par une succession de couches représentant les niveaux perméables, sièges d'écoulements subhorizontaux. Les transferts entre les couches, au niveau de semi-perméables supposés non-capacitifs, sont considérés comme monodimensionnels, perpendiculaires aux couches.

A chaque pas de temps, la résolution des équations comme la loi de Darcy, la principe de continuité, les équations d'état, en bref l'équation de diffusivité, fournit la charge hydraulique en tout point du domaine souterrain.

1.3.2 Le transfert dans le réseau hydrographique

Le transfert en rivière effectue l'acheminement de l'eau produite par ruissellement à l'exutoire des sous-bassins de calcul, en tenant compte des relations nappes – rivières.

L'algorithme de transfert considère le réseau hydrographique principal comme une arborescence des réservoirs ou biefs en relation éventuelle avec la nappe et se vidant les uns dans les autres de l'amont vers l'aval, suivant une loi de tarissement exponentielle définie par un coefficient de vidange. Les biefs sont constitués d'une succession de mailles rivières appartenant à une même zone isochrone.

1.3.3 Les échanges surface – souterrain

La relation nappe – rivière règle la liaison entre le modèle de transfert souterrain et le modèle de transfert en rivière. Le couplage est effectué, pour chaque pas de temps du

calcul, entre les mailles rivières de la couche et les mailles des couches souterraines qui leur correspondent verticalement.

Deux cas peuvent se présenter (cf. Figure 1.2).

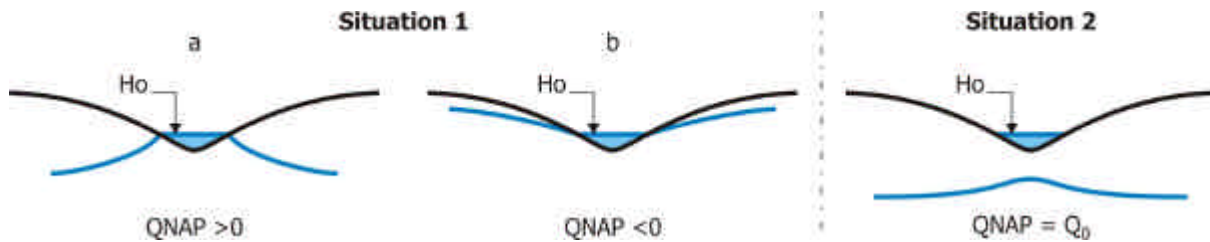


Figure 1.2 Schématisation de la relation nappe - rivière

Dans la première situation, la rivière et la nappe sont connectées, la rivière imposant son niveau à la nappe moyennant une perte de charge plus ou moins intense à travers son lit. Le sens de circulation de l'eau peut éventuellement varier au cours du temps. Dans cette situation, nous calculerons le débit échangé au niveau d'une maille rivière par la formule:

$$Q = T_p(H - H_0)$$

avec H : niveau piézométrique de la nappe,

H_0 : niveau de la rivière,

T_p : coefficient de transfert réglant la perte de charge entre nappe et rivière
 $([L]^2[T]^{-1})$

Q sera donc positif lorsque la circulation s'effectue de la rivière vers la nappe.

Dans la deuxième situation, la rivière et la nappe sont déconnectées par la présence entre elles d'une zone non saturée. Nous admettrons dans ce cas que le transfert s'effectue toujours dans le sens rivière – nappe avec une valeur Q_0 connue de débit:

$$Q = Q_0$$

2 PRÉSENTATION DU DOMAINE MODÉLISÉ

2.1 DOMAINE GÉOGRAPHIQUE ET MORPHOLOGIQUE

2.1.1 Domaine de surface

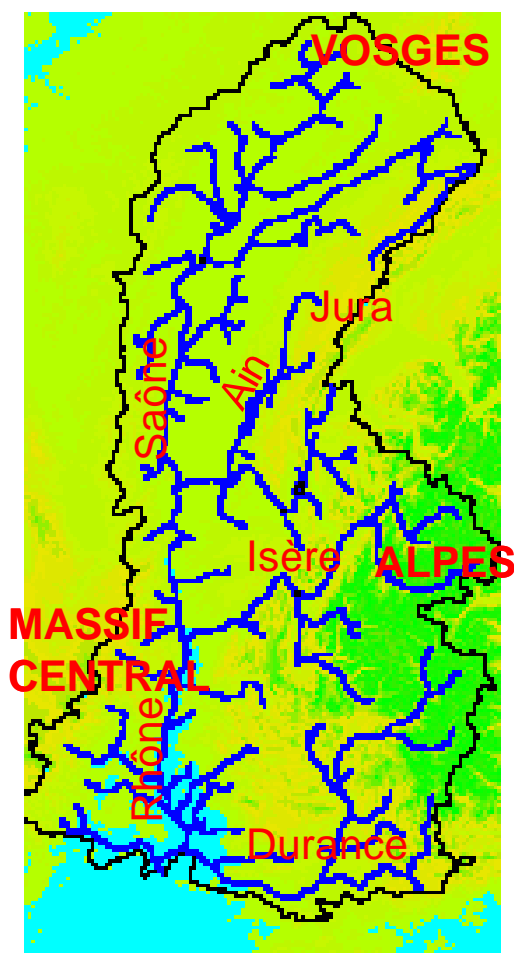


Figure 2.1 Le bassin du Rhône.

Dans ce projet nous modélisons la partie française du bassin du Rhône (cf. Figure 2.1), soit environ 86500 km². Le bassin total (y compris la partie suisse) couvre lui 96500 km². Le Rhône prend sa source au glacier de la Furka à 1760 mètres d'altitude, sur le versant méridional du St Gothard, et parcourt la Suisse jusqu'au lac Léman à 375 mètres d'altitude. C'est à partir de sa sortie du lac Léman que nous entrons dans le domaine modélisé (Golaz – Cavazzi, 1999).

Le bassin présente quatre grandes unités: le couloir médian formé par l'axe Saône – Rhône, la bordure Est du Massif Central, le Jura en bordure Est des plaines de la Saône, les Alpes et les massifs préalpins (Collectif 1991).

Le bassin présente une grande dissymétrie entre les chevelus des rives droite et gauche. En rive droite, les rivières font rarement plus de 50 kilomètres de long (hormis les rivières cévenoles), alors qu'en rive gauche, les bassins versants sont étendus, les longueurs des rivières de 300 à 400 kilomètres, et les débits puissants.

Cette dissymétrie s'explique par un transport solide important des rivières descendant les Alpes, qui a repoussé le Rhône contre le Massif Central.

Au-delà de cette dissymétrie, les pentes faibles et le cours lent des rivières du bassin de la Saône forment un second contraste saisissant avec les rapides rivières descendant des Alpes.

2.1.2 Domaine souterrain

Nappes de type alluvial

Les terrains composés d'alluvions récentes grossières (sables, graviers, galets), et situés le long des cours d'eau, abritent des nappes d'accompagnement très productives, mais aussi

très proches de la surface donc très vulnérables. On retrouve principalement ces nappes le long de la Saône et des affluents rive gauche: de l'Isère, de la basse Durance, du Rhône et de ses petits affluents rive gauche.

Des terrains à granulométrie plus fine (composés de graviers, sables, argile et limon) couvrent des nappes de plus grande extension, pour la plupart situées en rive gauche du Rhône en aval de Lyon, dont la plus importante est celle du Bas – Dauphiné.

Les roches carbonatées peuvent elles aussi abriter des nappes dans un milieu de type poreux et si elles sont peu karstifiées, dans certains secteurs du bassin de la Saône par exemple.

Indiquons une dernière nappe étendue, peu influente sur les écoulements mais au caractère bien particulier. Cette nappe siège dans les terrains argileux de la Bresse et de la Dombes. D'une épaisseur importante, elle est toutefois peu productive car l'eau est piégée dans des couches ou des lentilles de sable délimitées par des niveaux argileux.

Zones karstiques

Les terrains karstiques sont formés de roches carbonatées peu perméables, parcourues de fissures qui au fil du temps sont élargies par dissolution ou érosion. Ces terrains sont alors traversés de chenaux, pouvant relier des salles qui forment des axes privilégiés d'écoulements. La présence de ces chenaux entraîne une grande hétérogénéité du milieu. Les eaux dites "de la réserve" fournissent le débit de base du système karstique jusqu'à son tarissement complet. En cas d'épisode pluvieux, les eaux d'infiltration chassent une partie de ces eaux de réserve avant de rejoindre elles-mêmes l'exutoire du système (Mudry, 1990).

Les systèmes karstiques sont très présents dans la zone de l'Agence Rhône – Méditerranée – Corse. Ils représentent environ 30% de la surface totale. En ce qui concerne le bassin du Rhône, on retrouve des karsts en bordure du Massif Central et des Vosges, ainsi que trois grands ensembles qui sont:

- le Jura avec ses plateaux entaillés de gorges profondes,
- le plateau de Vaucluse et
- les préalpes de Savoie et du Dauphiné, renfermant des karsts perchés.

2.2 LES CLIMATS DU BASSIN DU RHÔNE

Les données météorologiques utilisées pour cette modélisation permettent d'illustrer les conditions climatiques du bassin.

2.2.1 Pluie et neige

L'utilisation des données journalières de précipitations sur la période du 01/01/1971 au 31/12/1990 a conduit Champeaux et Tamburini (1996) à proposer un découpage de la France en 12 zones climatiques, dont 6 présentes au niveau du bassin du Rhône:

- climat à tendance continentale sur la Lorraine, la Franche – Comté et la Bourgogne;
- climat "vosgien" sur le versant Ouest qui subit une influence océanique forte et sur le versant Est, protégé par un effet de foehn;
- climat de montagne – Jura, Alpes – caractérisé par de fortes précipitations (totales annuelles supérieures à 1200 mm, et nombre de jours pluvieux¹ supérieur à 130 jrs/an);
- climat du couloir saôno-rhodanien – Limagne, Forez et Mâconnais; le massif central faisant barrage aux précipitations venant de l'Ouest, cette zone est relativement abritée;
- climat cévenol caractérisé par de fortes et violentes précipitations en automne;
- climat méditerranéen, caractérisé par sa sécheresse estivale, qui remonte la vallée du Rhône jusqu'au Nord d'Orange.

Nous présentons à la Figure 2.2 les précipitations totales cumulées sur l'année. Cette figure représente des moyennes annuelles sur la période 1981 – 1998. On observe conformément à la zonation climatique des précipitations importantes sur versant ouest des Vosges, de fortes précipitations sur le Jura, les Alpes et l'Ardèche et de relative sécheresse du Sud du bassin ainsi que de la vallée de la Saône, avec des précipitations inférieures à 800 mm.

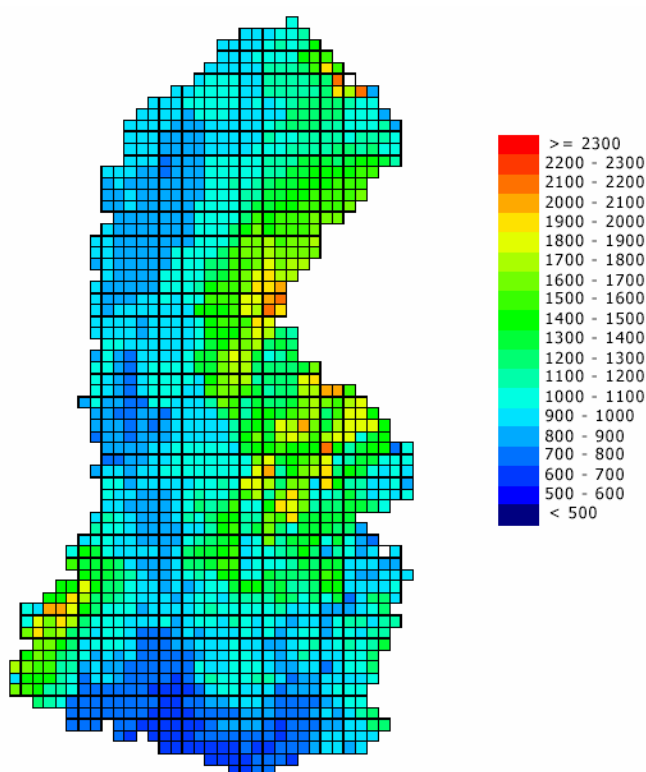


Figure 2.2 Précipitations annuelles moyennes (mm)

2.2.2 Température

S'appuyant sur le champ de températures journalières moyennes sur l'ensemble des années modélisées (Figure 2.3), on constate les points suivants:

- un gradient Nord – Sud bien marqué dans les axes des vallées, les températures moyennes annuelles s'étageant de 11 à 15°C le long de l'axe Saône – Rhône,

¹ Jours recevant plus de 0.2 mm

- des températures plus basses sur les reliefs (avec un gradient thermique de l'ordre de $-0.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$) et des températures très faibles toute l'année à très haute altitude, expliquant le maintien des neiges éternelles,
- la vallée de la Durance qui se démarque bien de son environnement immédiat avec des températures presque aussi douces que dans le Sud de la vallée du Rhône.

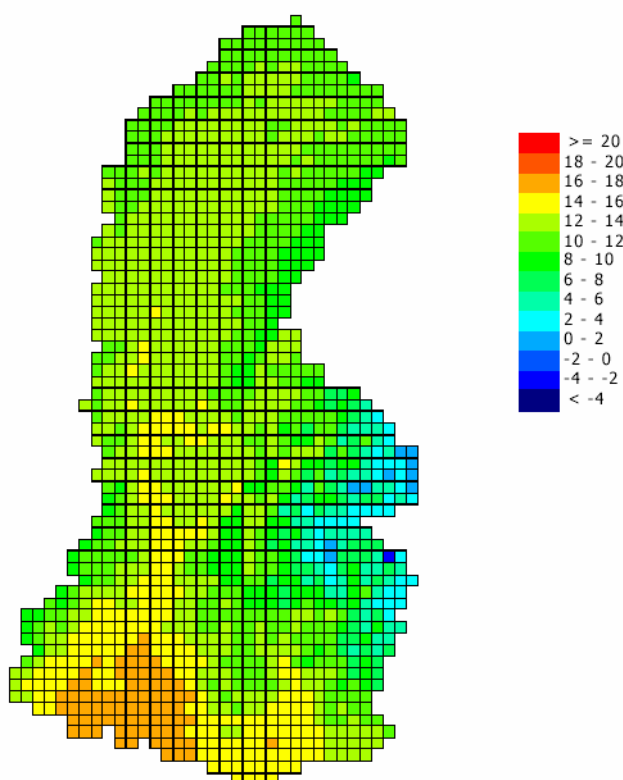


Figure 2.3 Températures annuelles moyennes ($^{\circ}\text{C}$)

2.3 LE RÉGIME HYDROLOGIQUE DU FLEUVE ET DE SES AFFLUENTS

D'après Golaz – Cavazzi (1999), dans le bassin du Rhône, on observe plusieurs régimes hydrologiques:

- *Le régime glaciaire.* La période de basses eaux se situe en hiver, et la période de hautes eaux de juin à août. L'importance de la lame de fonte est principalement liée à l'énergie: température et rayonnement incident. La variation interannuelle est modérée.
- *Le régime nival.* Ce régime est voisin du précédent mais la fonte des neiges est plus précoce que celle des glaciers. La période de hautes eaux se situe au printemps. La variation interannuelle, liée à celle des précipitations neigeuses, est plus marquée.
- *Le régime glacio-nival.* La période de hautes eaux est plus précoce et dure du printemps à l'été, successions de la fonte des neiges puis de celle des glaciers.
- *Les régimes pluvio-nival et nivo-pluvial.* Ici le mode d'alimentation est double: précipitations liquides (mode prépondérant dans le régime pluvio-nival) et fonte des neiges (mode prépondérant dans le régime nivo-pluvial).
- *Le régime pluvial océanique.* Le mode d'alimentation est la pluie, bien répartie dans l'année. La variabilité intra-annuelle du débit est principalement liée aux variations des prélèvements par l'ETR.

- *Le régime pluvial méditerranéen.* Le mode d'alimentation est la pluie tombant principalement en hiver, conduisant à des étiages très sévères en été.

Certaines rivières n'ont plus de régime naturel tant l'influence des aménagements y est grande.

Le Rhône, recevant les apports de ces différents affluents, est donc un fleuve au régime complexe et changeant. Sa caractéristique essentielle est l'importance de son alimentation, qui lui permet de se classer au premier rang des fleuves français.

3 LE MODÈLE RHÔNE

3.1 DISCRÉTISATION DES DOMAINES DE SURFACE ET SOUTERRAIN

3.1.1 Domaine de surface

Le contour du bassin versant a été déterminé à partir du MNT à 30'' d'arc de l'USGS (USGS, 1999) ramené à un pas kilométrique, dans le système de coordonnées Lambert II étendu. Au niveau de Beaucaire, dernière station de mesure du débit sur le Rhône avant le delta, on obtient ainsi une surface de 86 496 km². Ce contour, ainsi que les différentes couches d'informations liées à la topographie ont été générés à partir d'IDRHyDem (Golaz – Cavazzi, 1999).

La surface seuil utilisée pour la définition du réseau hydrographique majeur (constitué de l'ensemble des mailles rivières) et la délimitation des sous-bassins est de 250 km². Il est en effet illusoire d'espérer restituer des débits satisfaisants pour des surfaces inférieures à cette échelle, faute d'une prise en compte suffisante de la variabilité spatiale des zones de production et des forçages atmosphériques.

Maillage

Le maillage automatique SIGMOD a été mis en œuvre sur le bassin du Rhône en autorisant un regroupement le long des rivières, et en limitant la taille des mailles à 8 x 8 km² à l'intérieur des sous-bassins. Cette opération a conduit à une discrétisation en 27054 mailles de 1 à 8 km de côté, dont 2982 en rivières.

Le maillage est tel que la grille à mailles de 8 x 8 km² sur laquelle il s'appuie est rigoureusement superposable à la grille des champs météorologiques.

Temps de transfert à l'exutoire

La Figure 3.1 présente la distribution des temps de transfert relatifs sur le bassin, temps de transfert calculés à partir des

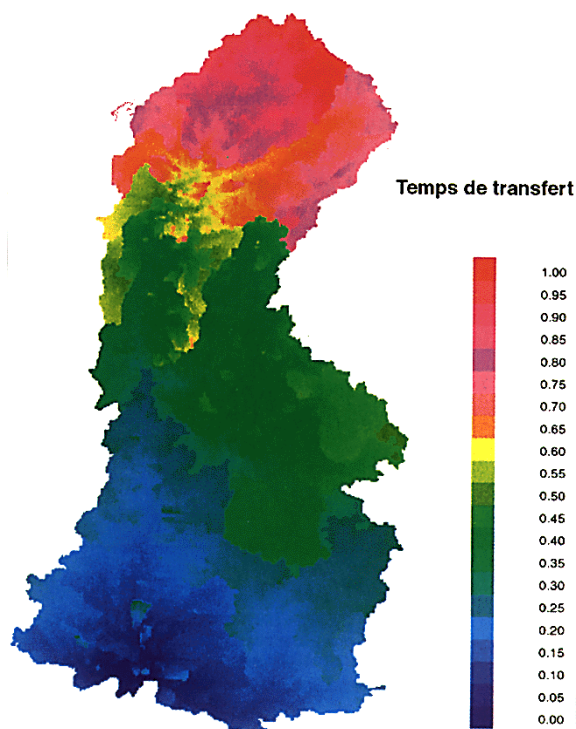


Figure 3.1 Temps de transfert de la lame d'eau jusqu'à l'embouchure du fleuve estimé aux différents endroits du bassin du Rhône. Les temps sont normés par rapport au temps de concentration du bassin, temps le plus long (rouge) mis par une goutte d'eau pour rejoindre l'exutoire, qui est égal dans notre cas à 6 jours. (Source: CNRS)

racines des pentes et des surfaces drainées. Ces temps de transfert relatifs sont ensuite multipliés par le temps de concentration du bassin, qui est l'un des paramètres de calage du modèle, afin de délimiter les zones isochrones.

Zones de production

La discrétisation du bassin en zones de production s'appuie sur l'identification de types de sols et de modes d'occupation du sol.

Pour différencier les types de sols, nous avons exploité la base de données numérisées des sols de France, à supports polygonaux, au 1/1000000 de l'INRA (King et al., 1995). Ces informations ont été extraites au pas kilométrique (Golaz – Cavazzi, 1999). L'analyse des données de la base INRA a conduit à distinguer six catégories de matériaux principaux:

all: dépôts alluviaux ou glaciaires (ou colluvions)

cal: roches carbonatées (calcaires et dolomies)

arg: marnes et roches argileuses

sab: roches sableuses et formations détritiques

lim: roches limoneuses

cri: socles cristallins et cristallophylliens

La carte des modes d'occupation du sol s'appuie sur la base de données Corine Land Cover (Collectif, 1996). Les catégories distinguées et prises en compte pour l'établissement de la carte des fonctions de production sont :

frt: forêt

eau: eau libre

ice: neige et glace

imp: roches nues et villes

dif: différent des précédents (cultures, prairies, broussailles...)

Les zones cultivées irriguées ont été également extraites, en vue d'une exploitation ultérieure au niveau de l'estimation des ETP des cultures.

A partir de ces données concernant les types de sols et les modes d'occupation, la carte des zones de production au pas de 500 mètres a été générée par croisement. Ces zones sont au nombre de 14, notées z1 à z14, et sont définies comme suit:

Tableau 3.1 Définition des zones de production (Source: Golaz – Cavazzi, 1999)

Types de sol	Mode d'occupation				
	frt	eau	ice	imp	dif
all	z1	z2	z14	z13	z8
cal	z3	z2	z14	z13	z9
arg	z4	z2	z14	z13	z10
sab	z5	z2	z14	z13	z11
lim	z6	z2	z14	z13	z12
cri	z7	z2	z14	z13	z13

Le pourcentage de la surface en eau libre, zone de production z2, est pour tous les sous-bassins inférieur à 1%. Les zones qui dominent sur le bassin versant du Rhône sont celles qui sont associées à un type de sol calcaire, zones 3 et 9. Les zones avec une couverture forestière occupent 37% de la surface selon la base Corine Land Cover.

3.1.2 Domaine souterrain

Notre modèle vise à reproduire le comportement du bassin dans sa globalité. La prise en compte du domaine souterrain doit permettre de reproduire l'amortissement des crues et le soutien des étiages, là où ils ne peuvent être reproduits par les seules fonctions de production, au niveau du réservoir de transfert des lames infiltrées (Golaz – Cavazzi, 1999).

Maillage

Le contour du domaine souterrain monocouche a été délimité à partir d'une image numérisée de la carte géologique de France au 1/1000000 (SGN, 1996). Pour construire le maillage du domaine souterrain, Golaz – Cavazzi (1999) a ensuite extrait la partie du maillage de surface contenue dans ce contour, ce qui a conduit à l'obtention du maillage du domaine souterrain (Figure 3.2).

Le but de ce maillage n'était pas de modéliser les variations de la nappe, mais de reproduire l'effet

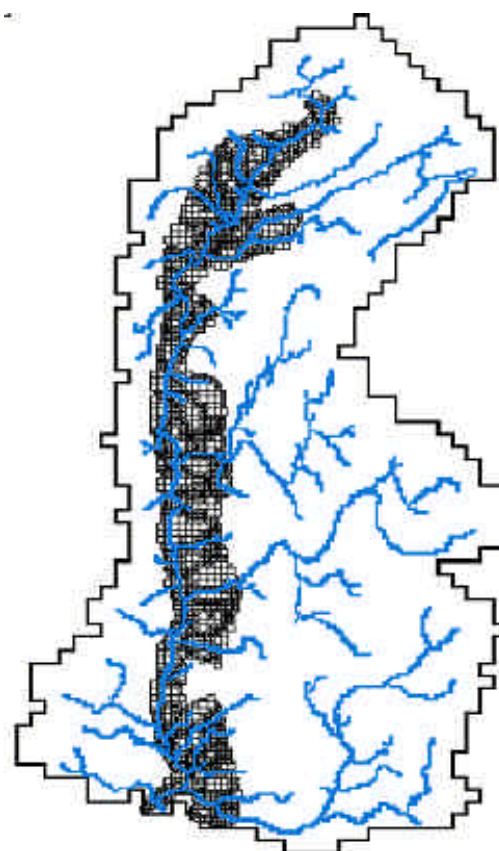


Figure 3.2 Discretisation du domaine souterrain.

retard qu'induit le transfert de la lame infiltrée dans le domaine souterrain. Pour cette raison le nombre de paramètres du domaine souterrain était minimisé (18), estimant que l'effort devait se porter sur les paramètres liés aux fonctions de production.

3.2 ANALYSE DES DONNÉES

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 inégalée sur le bassin du Rhône et au développement de deux modélisations hydro-météorologiques de complexité croissante sur une longue période de temps (1981 – 1998). 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 de données climatiques et de sols et les principaux enseignements sur nos connaissances du cycle de l'eau dans ce bassin sur la période actuelle.

3.2.1 Les données météorologiques

Le domaine d'intérêt englobe 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 (Collectif, 2002).

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

- les données tri-horaires 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 a été 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 des modèles de circulation générale, en particulier précipitations et température de l'air. Le relief du bassin joue un rôle très important sur la plupart des variables, en particulier sur les précipitations neigeuses. Par ailleurs, la période considérée fait apparaître

une assez grande variabilité interannuelle de la pluviométrie avec l'occurrence d'années plutôt sèches¹ (85-86², 88-89, 89-90) ou plutôt humides³ (82-83, 87-88, 93-94, 94-95). Également, les précipitations neigeuses peuvent varier fortement d'une année à l'autre, pouvant quasiment doubler. Ces précipitations solides représentent, en moyenne sur le bassin, un peu plus de 10% des précipitations totales.

3.2.2 Les mesures hydrométriques

L'ensemble des stations de mesure du débit disponibles sur le bassin du Rhône a été mis à disposition par la banque Hydro du Ministère de l'Environnement et du Développement Durable. Parmi les quelques 620 stations disponibles, 131 ont été utilisées: leurs surfaces drainées sont supérieures à 250 km² et elles ont fonctionné pendant au moins deux ans au cours de notre période d'intérêt. Ces stations servent au calage et à la validation des modèles.

La base de données de débits journaliers sur une centaine des 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. Cette base a été complétée par la mise à disposition par EDF de quelques chroniques des ouvrages hydroélectriques sur les rivières alpines. Ceci constitue une avancée en permettant de valider plus précisément la modélisation actuelle sur cette partie du domaine.

Quant aux débits fournis par EDF, il faut noter que la simulation de leur gestion est complexe, et ne peut être réellement prise en charge que par les exploitant eux-mêmes. Les simulations du bassin ont été mises en œuvre sans les effets anthropiques. Cela implique que nous disposons de chroniques "naturalisées", reconstituées à partir des chroniques observées en enlevant l'influence des aménagements.

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) et la végétation (base Corine Land Cover croisée avec une classification d'indices satellitaires NDVI/AVHRR).

¹ Une année est dite sèche quand elle présente des précipitations cumulées inférieures à 1000 mm.

² Chaque année est considérée de commencer le 1 août et terminer le 31 juillet de l'année suivante.

³ Une année est dite humide quand elle présente des précipitations cumulées supérieures à 1200 mm.

4 SIMULATIONS

4.1 OPTIMISATION DU CALAGE

Comme on l'a vu dès le premier chapitre, les données d'entrée de MODSUR sont les données météorologiques du lieu d'étude, le temps de concentration du bassin et les paramètres des fonctions de production. A partir de ces entrées, MODSUR évalue les lames d'eau d'infiltration et les lames d'eau de ruissellement. Cependant un calage des paramètres entrant dans les fonctions de production est nécessaire. Étant donné que le modèle MODCOU utilise les sorties du code MODSUR, la qualité du calage au sein de ce dernier est particulièrement importante.

Le domaine que nous souhaitons modéliser est très complexe. En effet, le bassin du Rhône français couvre une superficie de 86 496 km², correspondant à 27 054 mailles. Ce domaine comprend 132 stations hydrométriques observées sur 17 années. Le domaine comprend 14 fonctions de production en fonction de la géologie, la végétation et du climat locaux. Le calage qui a déjà été réalisé donne de bons résultats mais il existe de stations hydrométriques qui ne sont pas bien calées. De plus, de nouvelles données fournies par EDF sont à disposition. Il a donc été décidé de tenter d'améliorer le calage pour mieux simuler les débits aux stations hydrométriques.

4.1.1 Définition des critères statistiques utilisés

Il existe des critères qualitatifs (adéquation visuelle) et quantitatifs. S'il est vrai que dans le cas d'un nombre de valeurs très important à comparer, l'usage de critères qualitatifs devient délicat, ils sont quasiment indispensables pour s'assurer de la pertinence des critères quantitatifs.

Soit N le nombre de valeurs que l'on veut comparer, on notera:

$$\text{la moyenne } \bar{Q}, \text{ égale à } \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{t=N} Q(t)$$

$$\text{l'écart type } s_Q, \text{ égale à } \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^{t=N} (Q(t) - \bar{Q})^2}$$

Pour estimer les performances de cette modélisation, nous nous appuyerons sur les critères suivants:

- Biais ou erreur moyenne (BIAIS), en pourcentage:
Biais permet de déterminer si le modèle tend à sur ou sous-estimer les débits.

$$BIAIS = 100 \times \frac{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^{t=N} (Q_{sim}(t) - Q_{obs}(t))}{\bar{Q}_{obs}}$$

La valeur optimale est 0. Une valeur positive (négative) indique que les débits ont tendance à être sur (sous) estimés.

- Critère de Nash (NS):

NS permet de calculer la part de la variance expliquée grâce au modèle.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{t=N} (Q_{sim}(t) - Q_{obs}(t))^2}{\sum_{t=1}^{t=N} (Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})^2}$$

Le critère de Nash peut varier de $-\infty$ à 1. La valeur optimale est 1 (estimation parfaite). Une valeur nulle signifie que le modèle n'est pas meilleure que si l'on avait remplacé la valeur simulée par le débit moyen. Une valeur supérieure à 0.7 est habituellement considérée comme satisfaisante.

- Le coefficient de corrélation entre valeurs observées et valeurs simulées (r ou rho):

Ce critère mesure la co-fluctuation des séries simulées et observées.

$$r = \frac{1}{N} \times \frac{\sum_{t=1}^{t=N} (Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim}(t) - \bar{Q}_{sim})}{s_{Q_{obs}} \times s_{Q_{sim}}}$$

Le calage est d'autant plus satisfaisant que ce coefficient est proche de 1.

4.1.2 Le code utilisé

Un code d'optimisation appelé MOCOM-UA a été développé par l'Université de l'Arizona, dont l'utilisation est particulièrement bien adaptée aux problèmes de calage hydrologiques. D'après Sorooshian et al. (1998) le code calcule différents critères statistiques pour évaluer la qualité d'un calage. Pour cela, il génère aléatoirement différents points dans un espace à n dimensions, n étant le nombre de paramètres à caler, et il applique l'algorithme d'optimisation SIMPLEX. Il en sort donc des ensembles Pareto qui sont des ensembles de solutions non hiérarchisés et efficaces. Il existe donc plusieurs solutions ayant toutes la même valeur Pareto étant donné qu'aucune ne permet de minimiser chaque critère statistique.

Lors de la collaboration entre l'École des Mines de Paris et le Cemagref Lyon, nous avons mené à bien le couplage entre MOCOM, MODSUR et MODCOU.

Le couplage débute par le lancement de MOCOM qui crée un fichier qui répertorie les paramètres d'entrée dans MODSUR. Ces paramètres sont déterminés aléatoirement dans MOCOM dans des intervalles prédéfinis, le jeu de paramètres respectant des contraintes hydrogéologiques données. MODSUR utilise donc ce jeu de paramètres pour calculer l'infiltration vers le domaine souterrain et les écoulements superficiels qui constituent l'entrée de MODCOU. Ce dernier calcule alors les débits aux stations hydrométriques prédéfinies et MOCOM calcul subséquemment les valeurs des critères statistiques (Nash) à partir de ces

résultats pour chaque station. Ce processus est répété un certain nombre de fois. Chaque jeu de paramètres est considéré comme un point. On applique alors l'algorithme Simplex plusieurs fois jusqu'à ce que tous les points aient la même valeur Pareto. Ainsi, tous les jeux de paramètres finaux ont des valeurs de critères différentes mais sont équivalents en terme d'intérêt d'optimisation.

4.2 RÉSULTATS

Afin de valider le couplage de ces modèles nous avons choisi de travailler sur un système plus simple composé seulement de trois stations, de deux années de modélisation et de 12 paramètres différents des fonctions de production. Les paramètres choisis étaient le COI, QIMAX et RNAP (cf. §1.2.1) des fonctions de production 3, 7, 9, 13 (cf. §3.1.1). Nous avons choisi ces paramètres à optimiser parce qu'il s'agit d'une part des fonctions de production dominantes, et d'autre part des paramètres qui règlent principalement le réservoir de transfert et qui peuvent provoquer le retard souhaitable entre l'infiltration et l'alimentation de la nappe.

Pour ces trois stations (Le Verdon à Vinon – Gréoux, La Durance à Jouques – Cadarache et Le Guil à Montdauphin) les résultats obtenus sont présentés sur les Figures 4.1, 4.2 et 4.3 respectivement.

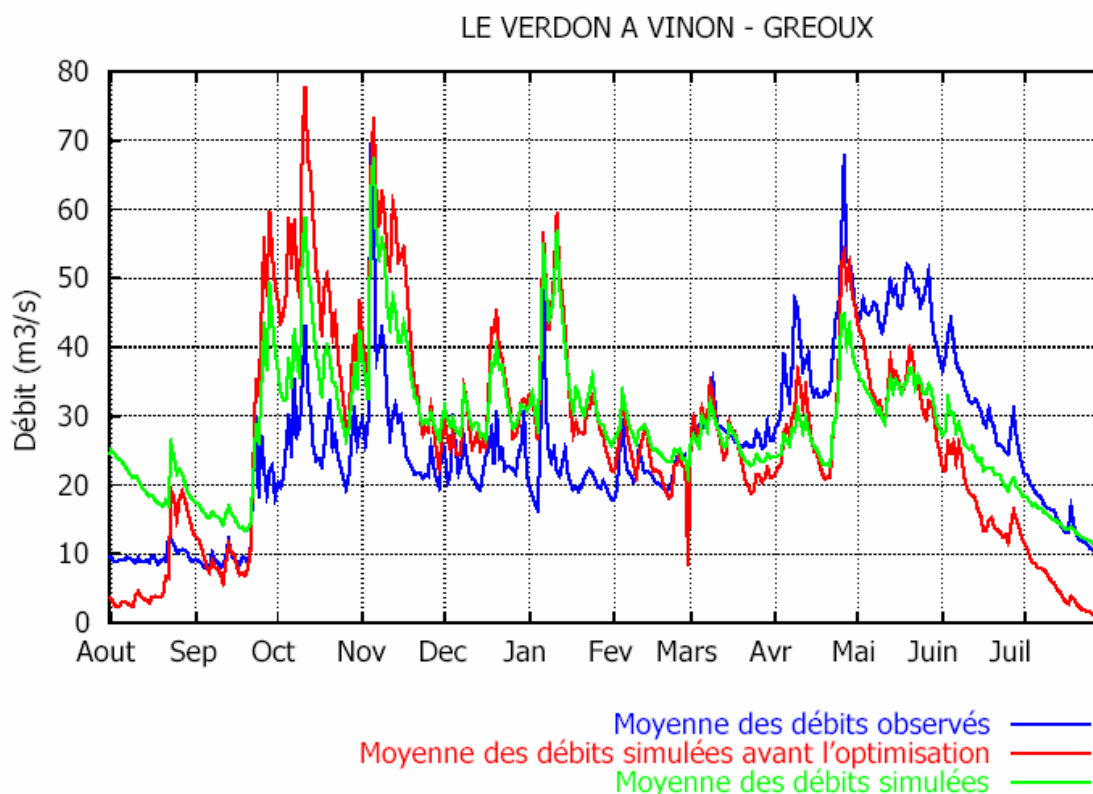


Figure 4.1 Débit moyen annuel pour la station du Verdon à Vinon - Gréoux

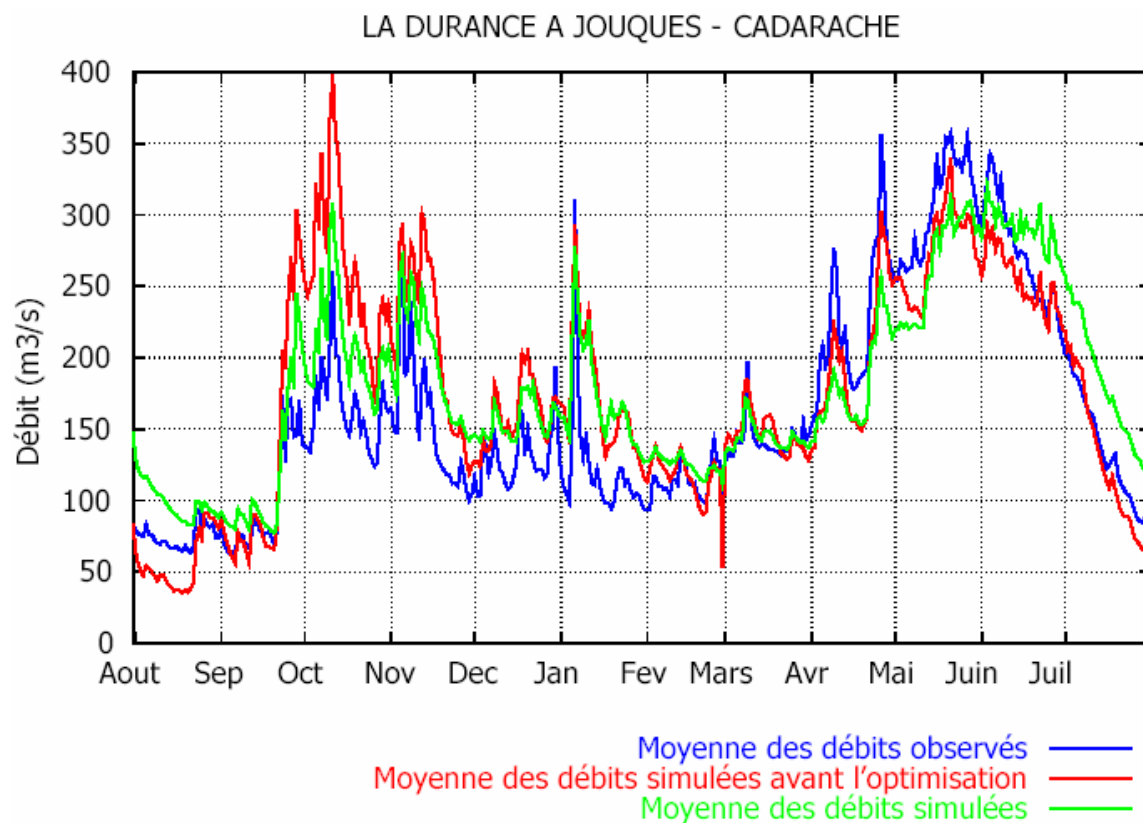
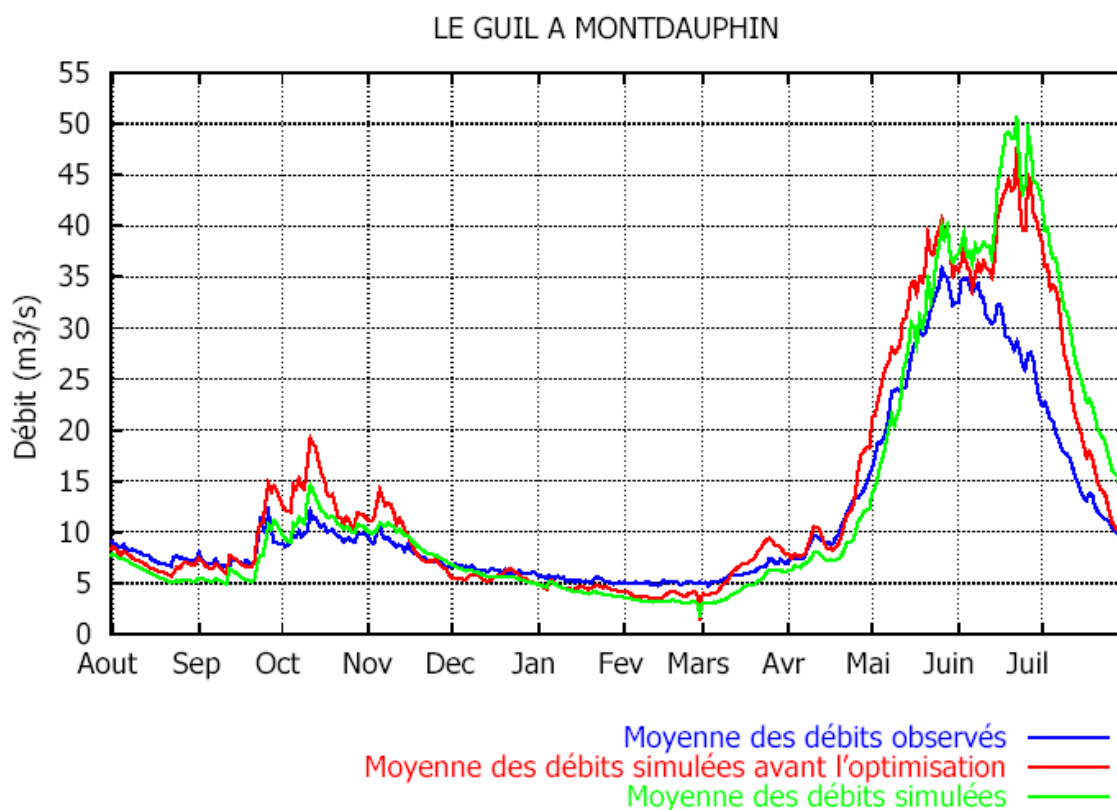


Figure 4.2 Débit moyen annuel pour la station de la Durance à Jouques - Cadarache



En dépit de notre attente, les résultats de l'optimisation sont un peu décevants. C'est vrai que le débit sur ces trois stations est un peu mieux simulé, mais il n'y a pas une amélioration très évidente. Plus précisément le critère de Nash, qu'on a utilisé comme critère statistique pour l'optimisation, passe de 0.461 à 0.701 à la station du Vinon à Gréoux, de 0.437 à 0.719 à la station de la Durance à Jouques – Cadarache et reste inchangé (0.323) à la station du Guil à Montdauphin. Au premier abord, on voit alors une augmentation des critères de Nash, surtout pour la station du Vinon et de la Durance.

Cette amélioration se situe surtout sur la diminution du débit pendant les mois hivernaux, qui se rapproche mieux du débit observé, or pendant les mois estivaux on observe une surestimation du débit, qui nous donne un étiage beaucoup plus élevé que l'étiage observé. Par contre, quand on regarde les effets directs sur le reste des stations du bassin on observe que l'optimisation n'a pas vraiment optimisé les critères de Nash pour les autres stations.

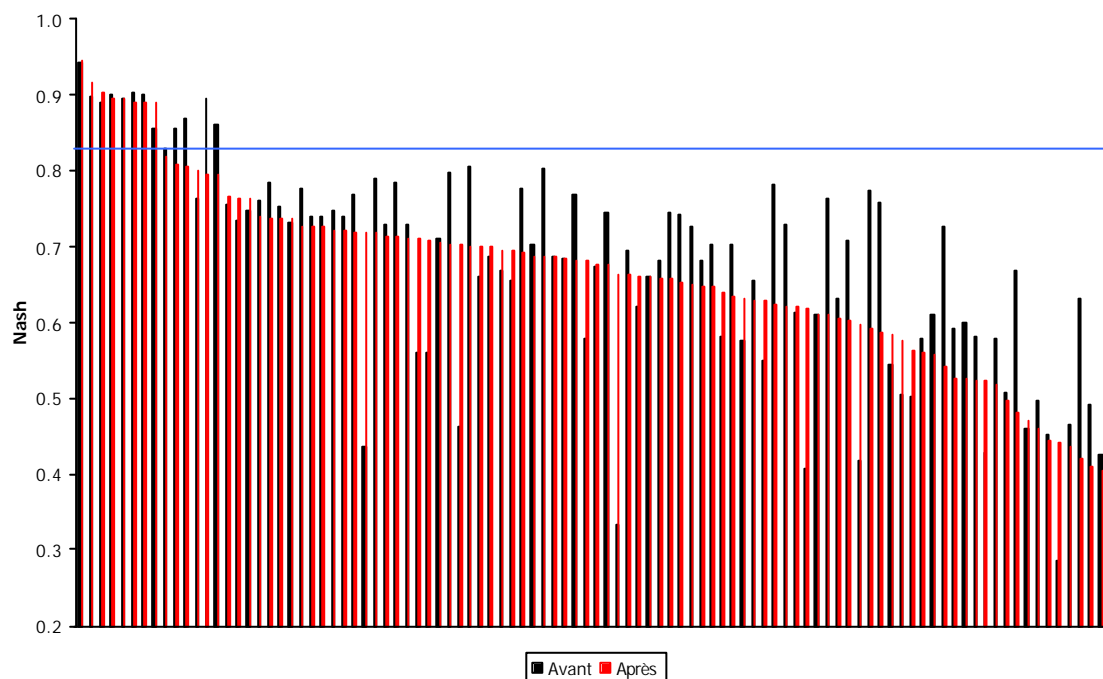


Figure 4.4 Comparaison des critères de Nash avant et après l'optimisation pour toutes les stations du bassin.

Sur la Figure 4.4 nous apercevons que la plupart des critères de Nash étaient meilleurs avant l'optimisation que après. Il y a bien sûr des exceptions mais elles ne sont pas prédominantes. Par exemple, aux stations de l'Ignon à Dienay, du Rival à Beaufort, du Vernaison à Port-en-Royans, du Coulon à Beaumettes, du Coulon à Coste-Raste et du Verdon à Estellie, il y a une amélioration significative de plus que 0.5. De plus, sur la Figure 4.5 nous observons le pourcentage de différence entre les valeurs de critères de Nash avant et après l'optimisation. Nous voyons qu'il y en existe certaines stations où cette variation

Figure 4.3 Débit moyen annuel pour la station du Guil à Montdauphin

5 SIMULATIONS SOUS DIFFÉRENTS SCÉNARIOS

La plus grande partie du rayonnement solaire traverse directement l'atmosphère pour réchauffer la surface du globe. La terre, à son tour, "renvoie" cette énergie dans l'espace sous forme de rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde. La vapeur d'eau, le gaz carbonique, et d'autres gaz absorbent ce rayonnement renvoyé par la terre, empêchent l'énergie de passer directement de la surface du globe vers l'espace, et réchauffent ainsi l'atmosphère. L'augmentation de la teneur atmosphérique en gaz à effet de serre peut se comparer à la pose d'un double vitrage: si les apports de rayonnements solaires à l'intérieur de la serre restent constants, la température s'élèvera.

C'est la structure des molécules de certains gaz qui les rend aptes à rabattre vers le sol les rayons infrarouges. Les principaux gaz à l'effet de serre sont le gaz carbonique, le méthane, les chloro-fluoro-carbures, l'ozone et le protoxyde d'azote.

Les concentrations de ces gaz sont minimales: 0,035% en volume pour le plus abondant, le CO₂, environ 600 fois moins que l'oxygène. Cela explique pourquoi les activités humaines peuvent changer ces concentrations. La contribution du gaz carbonique à l'effet de serre est approximativement 50% par rapport aux autres gaz à l'effet de serre. Donc, l'augmentation de température est principalement liée au gaz carbonique. Sa concentration est passée de 280 ppm au début de l'ère industrielle à 356 ppm en 1993, et augmente de 1,5 ppm par an. Cet accroissement est presque totalement d'origine humaine.

Les conséquences du réchauffement global sont plusieurs. A titre indicatif on cite:

- La fonte d'une partie des glaces polaires et le réchauffement des océans pourraient entraîner une élévation du niveau des mers, que les hypothèses moyennes évaluent à 50 cm, menaçant 92 millions de personnes vivant dans les zones côtières. La part due à la dilatation de l'eau de mer peut être quantifiée en fonction de l'élévation de la température. Selon certaines hypothèses, en France, notamment les espaces deltaïques seraient affectés (delta du Rhône).
- Les zones climatiques propres à quelconque type de culture, d'élevage ou de forêt, seront déplacées.
- Une température plus élevée accroîtra l'évaporation, d'où davantage de vapeur d'eau, un gaz qui contribue à l'effet de serre ("rétroaction positive"). Celle-ci, en particulier en présence d'aérosols, se condense en fines gouttelettes qui forment les nuages, d'où viennent principalement de précipitations. Les nuages bas réfléchissent la lumière solaire (rétroaction négative) tandis que les nuages hauts absorbent et réémettent les infrarouges (rétroaction positive). Il y a aussi des incertitudes sur les zones qui recevront par ailleurs de précipitations.

- Une augmentation est à prévoir de la fréquence et de la durée des grandes crues et des grandes sécheresses. En France, en cas d'augmentation de 2°C de la température moyenne, les précipitations d'hiver augmenteraient de 20%, les précipitations d'été diminueraient de 15%.

Sans être parfaits, les modèles climatiques ont récemment fait de notables progrès et prennent en compte un nombre croissant de phénomènes. Ces modèles prévoient une augmentation de la température moyenne du globe de 2°C entre 1990 et 2100 en cas de doublement de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Si rien n'était entrepris pour limiter l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, un réchauffement beaucoup plus élevé pourrait être à prévoir. L'étude des climats du passé, ou "paléoclimatologie" montre qu'une variation de quelques degrés seulement de la température moyenne de la planète transforme profondément la physionomie de notre planète.

Pour conclure, malgré les incertitudes, les présomptions de changements climatiques sont sérieuses et le climat d'un lieu ne se limite pas à sa température. C'est pour cette raison ci qu'on étudie plusieurs scénarios climatiques et on effectue une analyse de sensibilité.

5.1 CONSTITUTION DE SCÉNARIO

A l'échelle globale

Il existe de nombreux scénarios d'évolutions climatiques issus de modèles de circulation générale (MCG), couplés continent – atmosphère, qui ont souvent une résolution spatiale de l'ordre de 100 x 100 km². Ces MCG utilisent en forçages d'entrée les températures des océans (sea surface temperature, SST) calculées par les modèles couplés océan – atmosphère. Ces températures conditionnent fortement l'évolution de l'atmosphère.

On utilise alors deux simulations à l'aide du MCG. La simulation de référence utilise des valeurs de SST correspondant au climat actuel. La simulation du climat perturbé utilise des valeurs de SST calculés par un modèle couplé océan – atmosphère en tenant compte de l'augmentation de la concentration de CO₂.

Ainsi, les forçages de SST sont issus d'une simulation du modèle couplé océan – atmosphère HADCM2 du service de la météorologie britannique. Cette simulation couvre les années 1860 à 2100. A partir de 1990, elle prend en compte une augmentation progressive de 1 %/an de la concentration en CO₂ (augmentation proche de celle observée actuellement, estimée entre 0.5 et 1 % (Petit, 1998)) et un maintien de la concentration en aérosols. Avant 1990, les concentrations observées sont utilisées. Les valeurs de SST obtenues pour les années 1990 et 2060 sont utilisées respectivement pour la simulation de référence et pour la simulation du climat perturbé.

A l'échelle régionale

Pour simuler l'impact d'un changement climatique sur les ressources en eau et les débits d'un grand bassin comme celui du Rhône, il faut disposer de ces mêmes variations mais à une échelle spatiale plus fine de l'ordre de 1×1 à $10 \times 10 \text{ km}^2$. Ce changement d'échelle porte le nom de désagrégation (Golaz – Cavazzi, 1999). L'une des techniques de désagrégation est l'utilisation des variables calculées par les MCG comme conditions limites d'un modèle météorologique local à mailles plus fines.

Le modèle ARPEGE possède une résolution relativement fine sur la France, mais cette résolution n'est pas encore suffisante pour bien reproduire les effets orographiques, particulièrement importants sur le bassin du Rhône. La désagrégation reste donc incontournable.

5.2 LES SCÉNARIOS UTILISÉS ET LEURS RÉOLUTIONS

Six scénarios issus de quatre modèles de circulation générale ont été considérés: les modèles LMD (Laboratoire Météorologique Dynamique), CNRM (Centre National des Recherches Météorologiques), 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 CO_2 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 (Collectif, 2002). Les moyennes mensuelles des forçages atmosphériques comprennent six paramètres: rayonnement solaire (R_g), rayonnement atmosphérique (R_{at}), température d'air (T_a), vitesse du vent (V_a), humidité spécifique (q_a) et précipitation totale (P).

Les 6 scénarios considérés 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) donnant une indication régionale du changement climatique à l'intérieur du bassin. Les 4 scénarios "basse résolution" ont été réalisés dans le cadre du projet européen LSCPR (Polcher, 1999). Dans ce projet, 2 scénarios par MCG ont été examinés différant 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.

Pour tout scénario il y a une 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°C dans le modèle LMD. Pour les deux scénarios de haute

résolution (LMD et CNRM), la topographie a évidemment la plus large influence sur le gradient horizontal de la température.

Concernant les précipitations, les simulations sont plus dispersées. On remarque 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. Également, tous les MCG ont tendance à sous-estimer les précipitations estivales dont la valeur minimum est aussi décalée d'un mois (septembre au lieu d'août). Les précipitations hivernales sont significativement augmentées dans les sorties CNRM et LMD, les précipitations estivales n'étant pas sensiblement améliorées.

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°C l'hiver et de 4°C 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.

Le climat actuel de la base de données du Rhône est renseigné sur 17 années (août 1981 – juillet 1998) avec une résolution temporelle de 3 heures et une résolution spatiale de 8 km. Deux types de forçages ont été construits: scénarios type I dans lesquelles juste les forçages de température et précipitation ont été modifiés, et scénarios type II dans lesquelles tous les six variables atmosphériques ont été perturbés (Boone et al., 2000). Pour tous les deux types de forçages les précipitations doivent être partitionnées en neige et pluie.

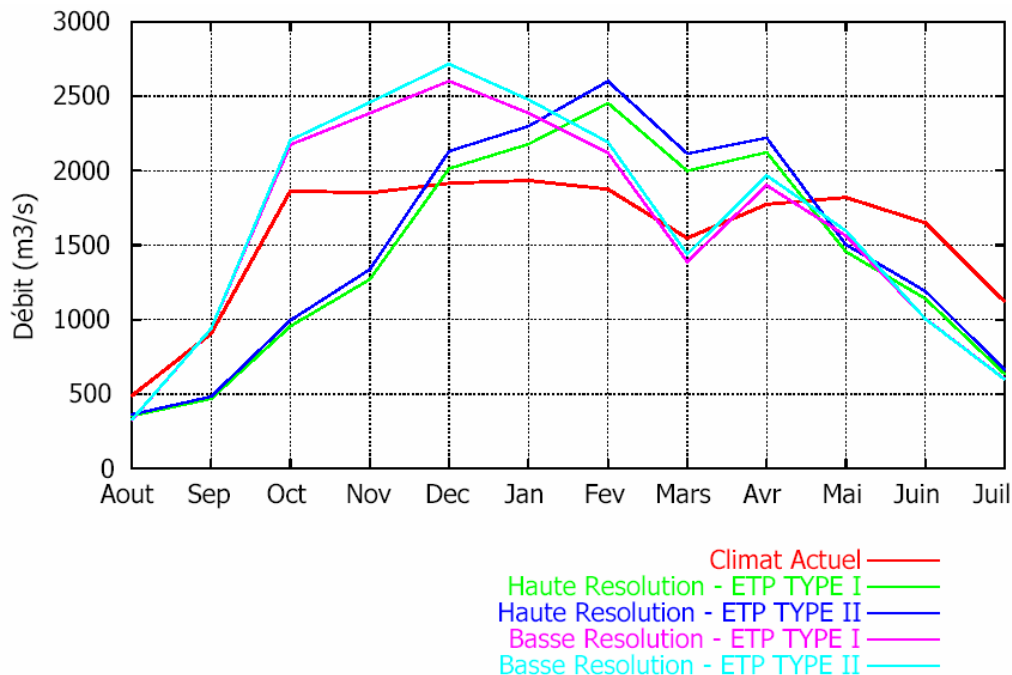


Figure 5.1 Comparaison des scénarios CNRM sur l'exutoire du Rhône à Beaucaire de haute et basse résolution et avec l'ETP type I et type II par rapport au climat

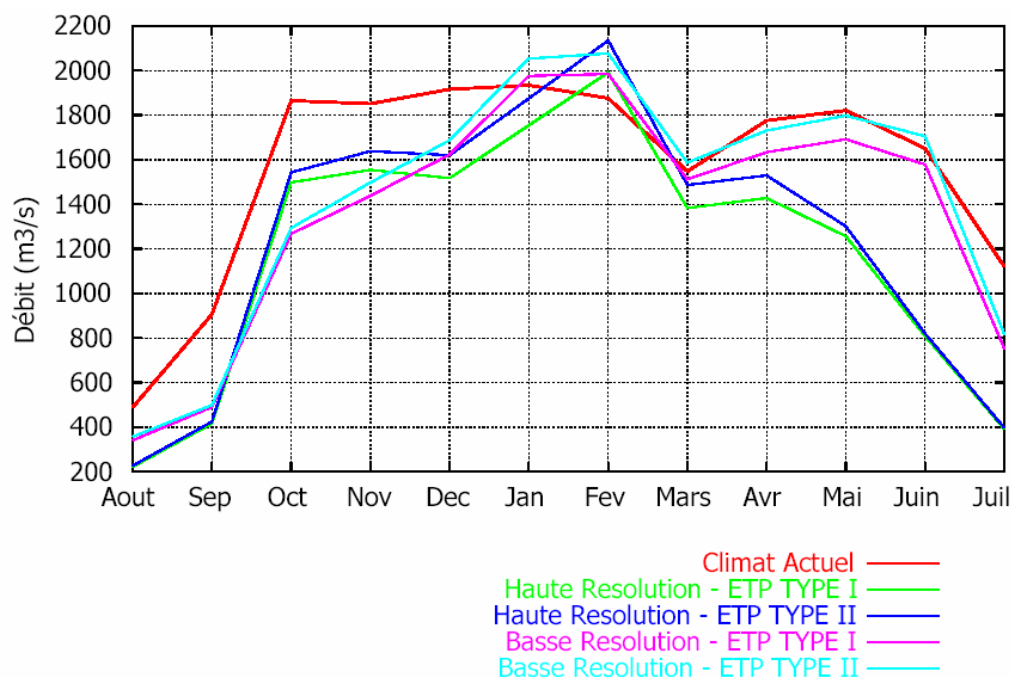


Figure 5.2 Comparaison des scénarios LMD sur l'exutoire du Rhône à Beaucaire de haute et base résolution et avec l'ETP type I et type II par rapport au climat actuel.

5.3 ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ DU SYSTÈME POUR UN CHANGEMENT CLIMATIQUE IMPOSÉ

Dans cette partie de ce mémoire, on explore l'impact des différents scénarios de climat modifié sur les constituants hydrologiques du bassin du Rhône. Pour cette analyse on a choisi trois sous-bassins contrastés du bassin du Rhône: la Durance à la Clapière, la Saône au Châtelet et l'Ardèche à Sauze St. Martin.

Les forçages atmosphériques ont été moyennés sur l'ensemble de chaque bassin. Ainsi, le forçage atmosphérique a été et est uniforme. Le bassin de la Durance a été choisi parce qu'il représente assez bien le climat alpin et il est relativement sensible quant aux anomalies de température et précipitations, à cause de son altitude assez haute (plus de 2000m). Le bassin de la Saône est plus représentatif d'une altitude plus basse et du climat continental. La contribution de la nappe sur le bassin du Saône est un facteur très important sur la modélisation hydrogéologique et alors l'étude de sensibilité peut montrer de résultats très dispersés par rapport aux autres bassins choisis. De plus, le bassin de l'Ardèche est caractéristique du climat cévenol avec de fortes et violentes précipitations particulièrement en automne.

L'objectif de ces tests est d'estimer la sensibilité des modèles aux évolutions de deux paramètres atmosphériques clés, les précipitations et la température. Pour cela on a fait varier par rapport au climat actuel, et de façon uniforme tout le long de l'année, la température par pas de 1°C et les précipitations par tranche de 15%. Ainsi, nous avons

obtenu un champ de températures de -2°C à $+6^{\circ}\text{C}$ et un champ de précipitations de -60% à $+60\%$. Il y existe donc un ensemble de 9×9 forçages associés à chacun de sous-bassins.

Les résultats des simulations du modèle permettront de mettre en évidence les zones où l'impact sera plus important, et donc de déterminer les seuils de sensibilité du modèle. Tous résultats de chaque expérience ont été obtenus à l'équilibre, c'est à dire que le stock d'eau des réservoirs en fin d'année est égal au stock d'eau en d'année.

Sur les Figures 5.3, 5.4 et 5.5 sont présentés les résultats de l'étude de sensibilité pour les bassins de la Saône, de l'Ardèche et de la Durance respectivement. En abscisse sont portées des variations unitaires de la température de forçage, en ordonnée des variations d'intensité des précipitations. Les Figures codent 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 ($dT = 0 \text{ K}$, $dP = 0 \%$).

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 ainsi que le stock d'eau de tous les trois bassins pourraient être fortement diminués.

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 robustesse variable, dépendant notamment de la sensibilité au changement climatique des processus hydrologiques dominants dans chaque bassin versant.

Pourtant, il existe certaines similarités dans tous les trois bassins. Pour les différents scénarios prévus, il y a toujours une diminution du stock d'eau hivernal jusqu'à 80% et une diminution du stock de neige (hivernal) entre 20 et 60% . Il faudra noter que, pour tout scénario, même au bassin de la Durance toute la neige sera fondue pendant l'été. De plus, nous observons une très importante diminution de la neige pour chaque sous-bassin même en hiver.

Nous pourrions constater encore que pendant les mois hivernaux, l'écoulement total du bassin de la Saône et du bassin de la Durance paraît ne dépendre que de la variation des précipitations et pas de la variation de la température.

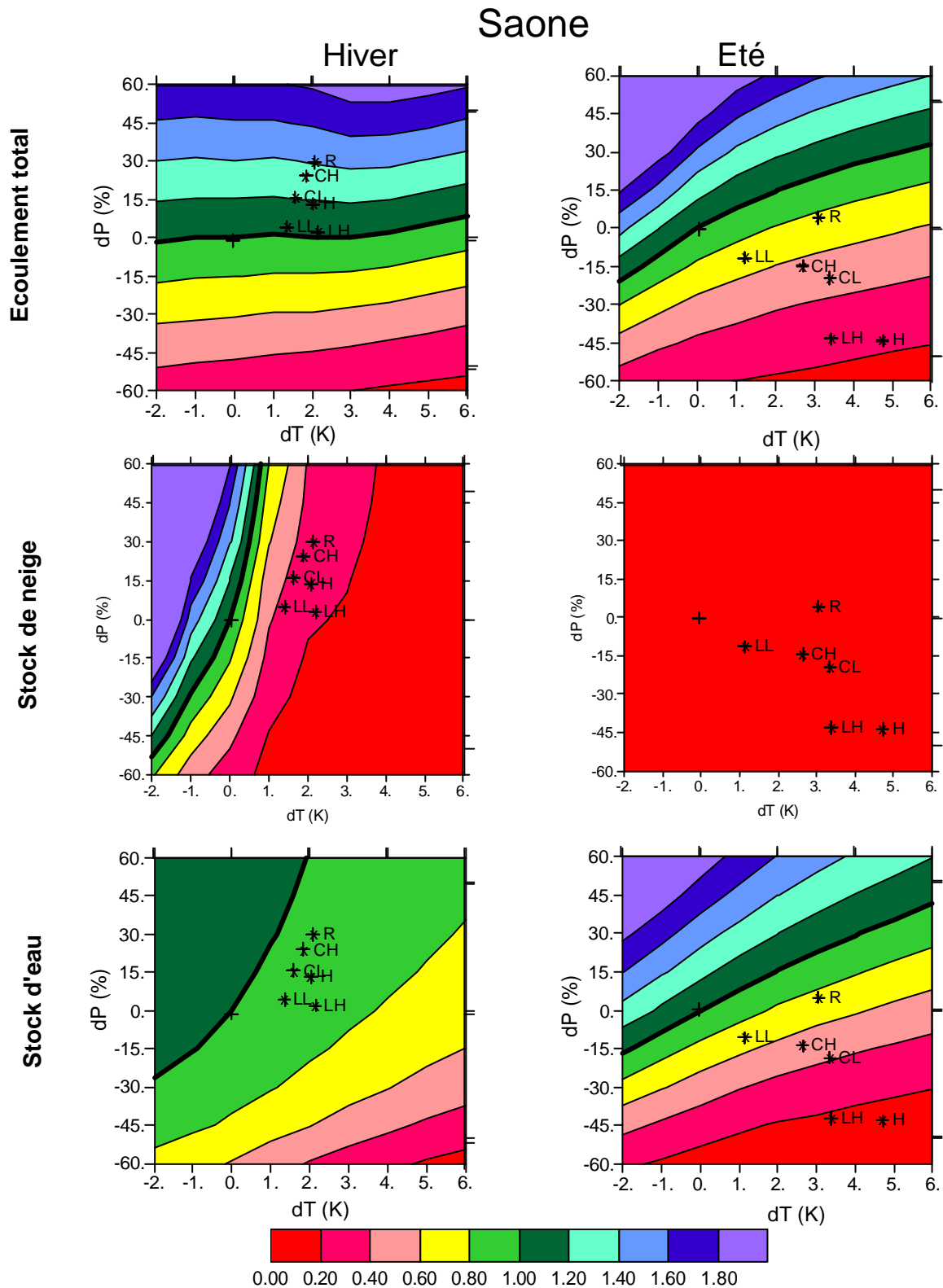


Figure 5.3 Etude de sensibilité aux anomalies mensuelles de température et de précipitation de l'écoulement total, de l'équivalent en eau de la neige et de l'humidité relative du sol (Stock d'eau) pour le bassin de la Saône, en hiver (à gauche) et en été (à droite).

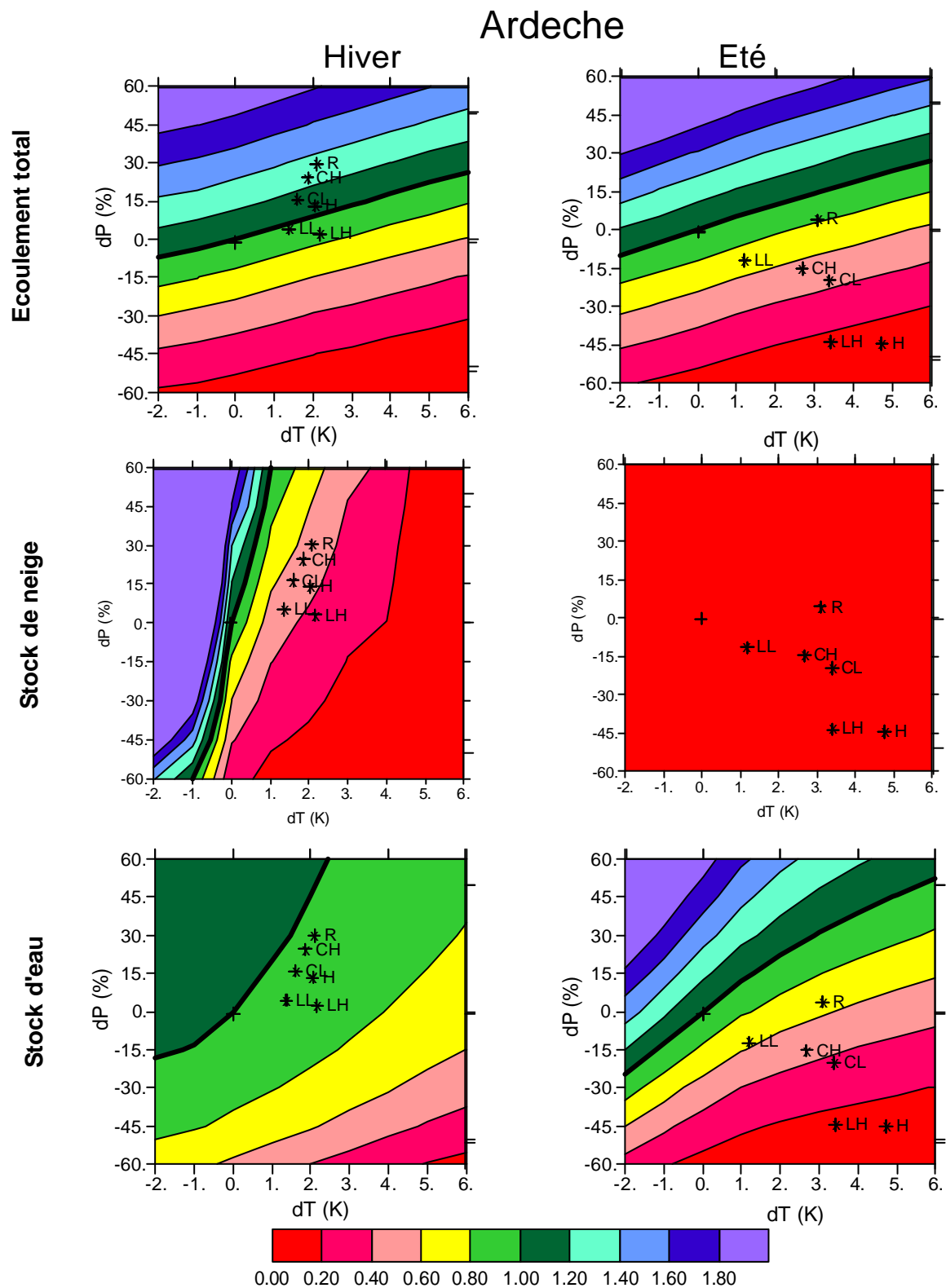


Figure 5.4 Etude de sensibilité aux anomalies mensuelles de température et de précipitation de l'écoulement total, de l'équivalent en eau de la neige et de l'humidité relative du sol (Stock d'eau) pour le bassin de l'Ardèche, en hiver (à gauche) et en été (à droite).

5.4 VARIATIONS DE LA CONTRIBUTION DE LA NAPPE SOUTERRAINE SELON LES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS

Dans le chapitre 3.1.2 nous avons constaté que la nappe souterraine n'est pas très étendue, or elle joue un rôle important sur les simulations de débit en toute station qui est située sur cette zone par le soutien des étiages. Nous avons alors considéré qu'une analyse de sa contribution était nécessaire.

Nous avons ainsi simulé le débit octroyé par la nappe pour les deux scénarios de haute résolution: LMD et CNRM. Nous étions surtout intéressés par la contribution de la nappe sur le bassin de la Saône, subséquemment nous avons fait les simulations pour deux stations sur la Saône, au Châtelet et à Mâcon, ainsi qu'à l'exutoire du Rhône à Beaucaire. Nous avons comparé les deux scénarios en ce qui concerne les forçages d'ETP type I et d'ETP type II. Les résultats de nos simulations se présentent sur les Figures 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 et 5.11.

Impacts du changement climatique sur la variation des paramètres hydrologiques du bassin versant du Rhône

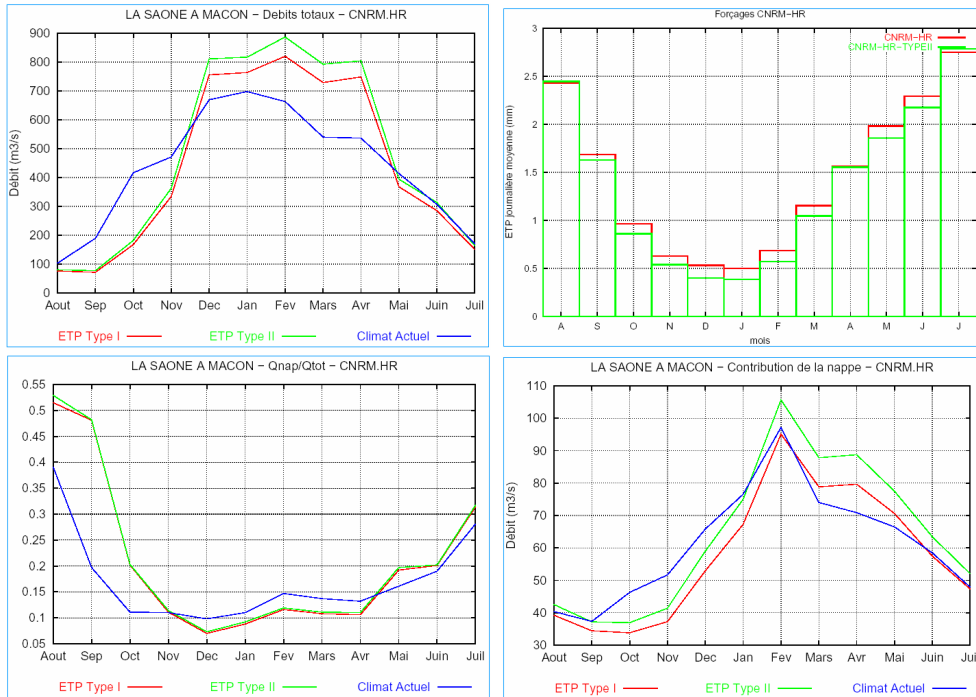


Figure 5.6 Contribution de la nappe à la station de la Saône à Mâcon selon le scénario de haute résolution du CNRM avec ETP type I et ETP type II. Le premier graphe présente les moyennes mensuelles de débits totaux, le deuxième l'évapotranspiration potentielle moyenne mensuelle, puis les moyennes mensuelles du rapport du débit fourni par la nappe sur le débit total et finalement les moyennes mensuelles du débit de la nappe.

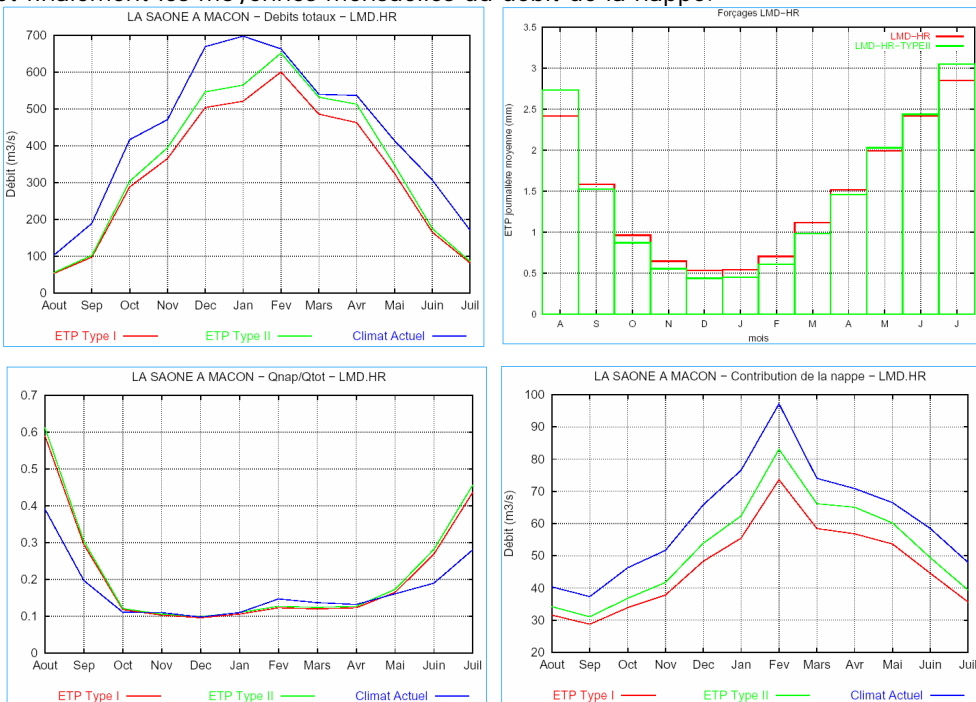


Figure 5.7 Contribution de la nappe à la station de la Saône à Mâcon selon le scénario de haute résolution du LMD avec ETP type I et ETP type II. Le premier graphe présente les moyennes mensuelles de débits totaux, le deuxième l'évapotranspiration potentielle moyenne mensuelle, puis les moyennes mensuelles du rapport du débit fourni par la nappe sur le débit total et finalement les moyennes mensuelles du débit de la nappe.

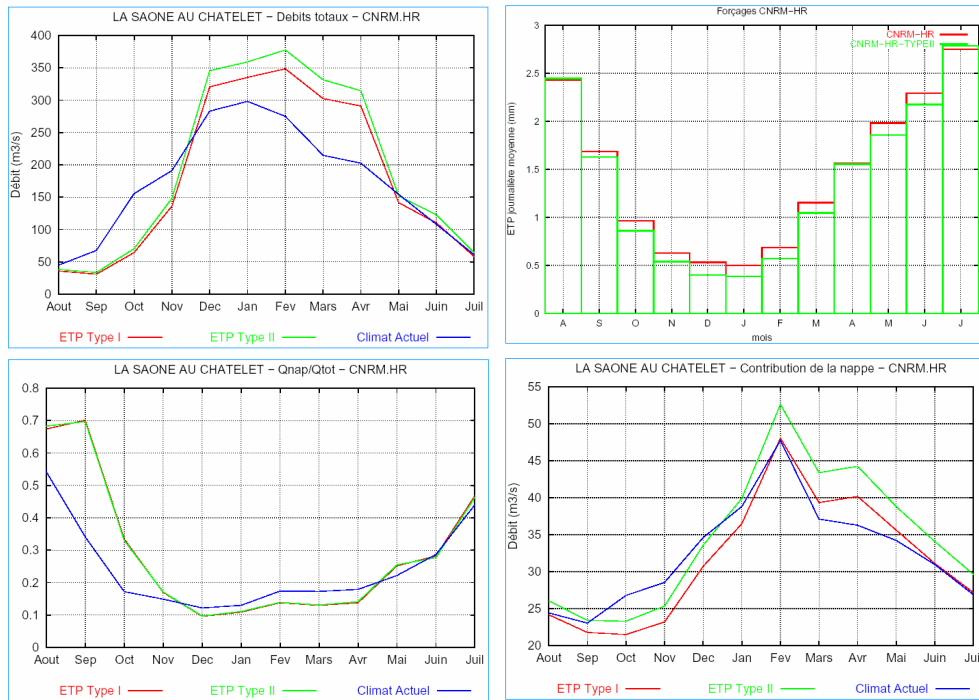


Figure 5.8 Contribution de la nappe à la station de la Saône à Châtelet selon le scénario de haute résolution du CNRM avec ETP type I et ETP type II. Le premier graphe présente les moyennes mensuelles de débits totaux, le deuxième l'évapotranspiration potentielle moyenne mensuelle, puis les moyennes mensuelles du rapport du débit fourni par la nappe sur le débit total et finalement les moyennes mensuelles du débit de la nappe.

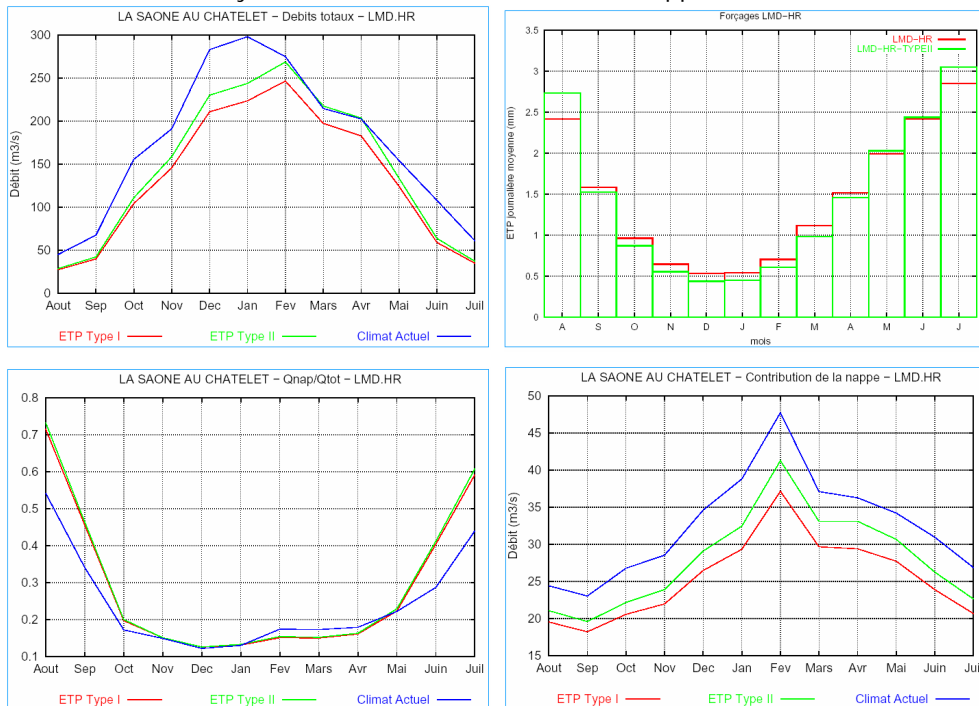


Figure 5.9 Contribution de la nappe à la station de la Saône à Châtelet selon le scénario de haute résolution du LMD avec ETP type I et ETP type II. Le premier graphe présente les moyennes mensuelles de débits totaux, le deuxième l'évapotranspiration potentielle moyenne mensuelle, puis les moyennes mensuelles du rapport du débit fourni par la nappe sur le débit total et finalement les moyennes mensuelles du débit de la nappe.

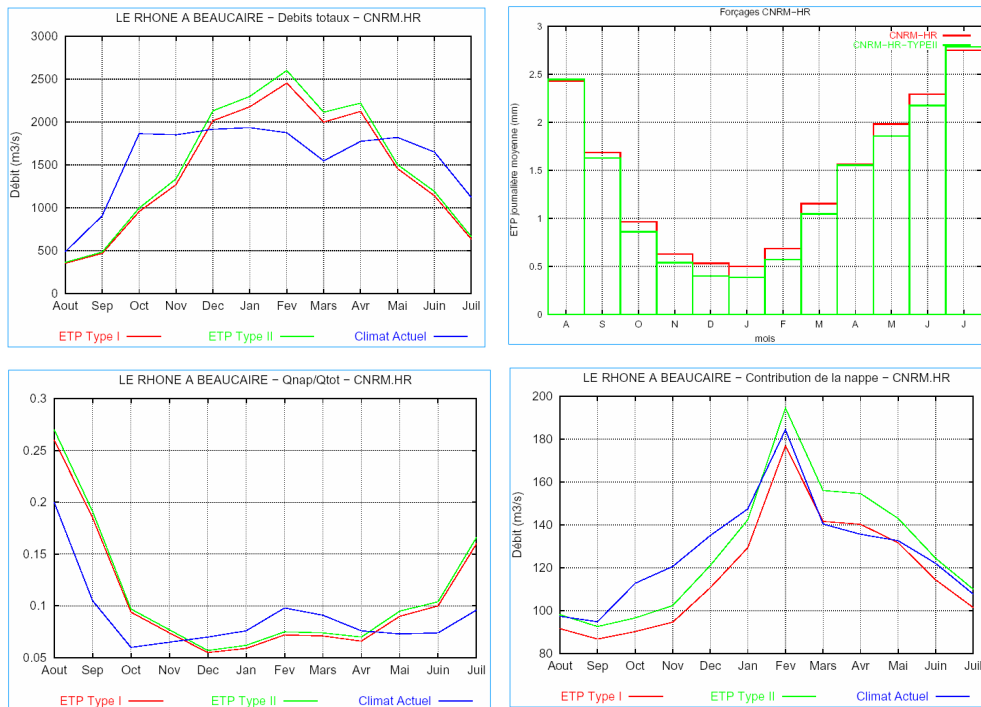


Figure 5.11 Contribution de la nappe à l'exutoire du bassin (Beaucaire) selon le scénario de haute résolution du CNRM avec ETP type I et ETP type II. Le premier graphe présente les moyennes mensuelles de débits totaux, le deuxième l'évapotranspiration potentielle moyenne mensuelle, puis les moyennes mensuelles du rapport du débit fourni par la nappe sur le débit total et finalement les moyennes mensuelles du débit de la nappe.

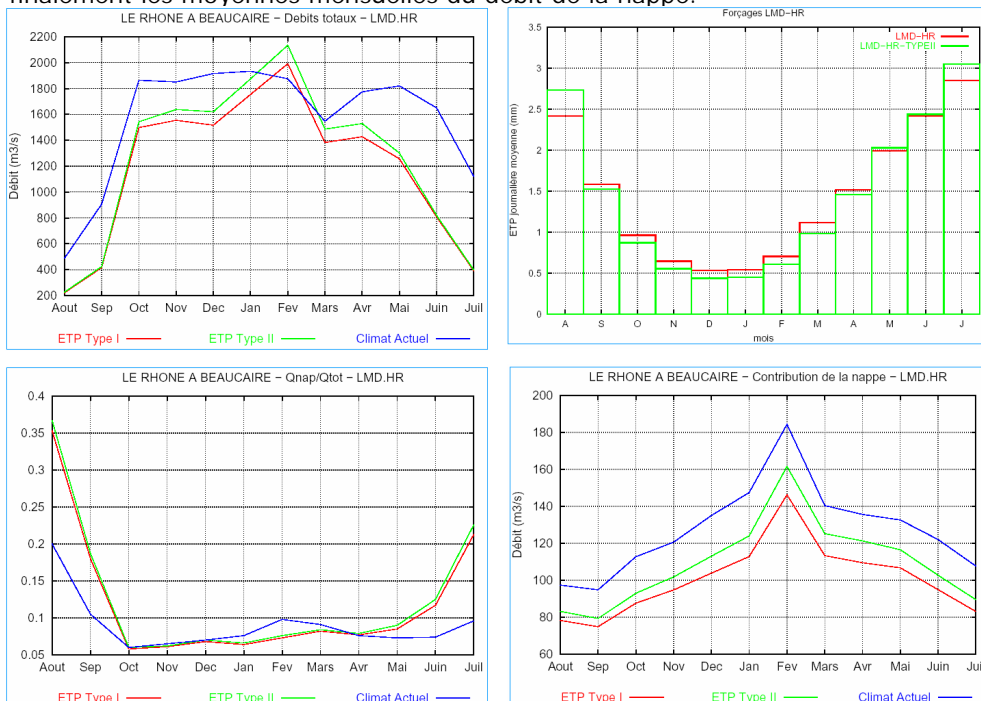


Figure 5.11 Contribution de la nappe à l'exutoire du bassin (Beaucaire) selon le scénario de haute résolution du LMD avec ETP type I et ETP type II. Le premier graphe présente les moyennes mensuelles de débits totaux, le deuxième l'évapotranspiration potentielle moyenne mensuelle, puis les moyennes mensuelles du rapport du débit fourni par la nappe sur le débit total et finalement les moyennes mensuelles du débit de la nappe.

Il est notable que pour tous les deux scénarios, l'ETP type II, donne un débit plus élevé par rapport à celui fourni par les forçages atmosphériques de l'ETP type I tant en débits totaux qu'en débits octroyés par la nappe souterraine. Par contre, on a observé une augmentation du débit estival bien que les moyennes mensuelles d'ETP en été soient plus élevées pour le type II que pour le type I. Ceci est une conséquence de l'accroissement du stock d'eau en saisons humides (hiver et printemps).

En ce qui concerne les deux stations de la Saône, on constate que le rapport entre le débit fourni par la nappe et le débit total (Q_{nappe}/Q_{total}) est toujours le même pour tous les deux scénarios et les deux différents forçages d'ETP. Or, quant au débit à Beaucaire, le scénario du CNRM prévoit une contribution de la nappe plus élevée avec le forçage de l'ETP type II qu'avec le forçage atmosphérique de l'ETP type I. Cependant, le scénario du LMD prévoit le même taux de contribution pour les deux différents types de forçage.

Il faudra noter qu'il y a d'ailleurs des différences de profils des débits (total et souterrain) entre les deux scénarios. Cette différence se marque surtout en la manière avec laquelle le débit augmente et diminue pendant les mois automnaux et printaniers respectivement. Avec scénario du LMD ce débit augmente plus graduellement que celui simulé par le scénario du CNRM. L'évolution du débit moyen mensuel paraît plus tempérée dans les scénarios du LMD.

Nous observons aussi que par rapport au climat actuel, la nappe contribue beaucoup moins avec le scénario LMD, tandis qu'en appliquant le scénario CNRM il dépend du cas. En général, nous pouvons constater que pendant les mois automnaux le débit de la nappe est abaissé avec l'application du scénario CNRM (pour tous les deux types d'ETP), or pendant l'hiver la simulation avec ETP type II octroie un débit de la nappe plus élevé que celui du climat actuel.

Par contre, ce qu'on peut aussi voir clairement, est le fait qu'avec les scénarios de CNRM et LMD pendant l'étiage le pourcentage de contribution de la nappe au débit total est assez élevé. Cela s'explique par le fait que le débit total sur les stations est plus abaissé pendant l'étiage par rapport à celui du climat actuel.

CONCLUSIONS

Ce travail est une contribution à la construction du modèle couplé des composantes continentale et atmosphérique du cycle de l'eau à l'échelle régionale, objectif des partenaires du projet GICC – Rhône.

Pendant ce travail on a constaté qu'une optimisation du calage du modèle hydrologique MODCOU est assez difficile à mettre en œuvre, comme étant un processus coûteux en temps de calcul, avec de résultats pas tout à fait satisfaisants. Par manque de temps nous n'avons pas pu pousser l'étude très loin et une amélioration est sûrement possible. Cependant il aura fallu de temps de simulation très important étant donnée la taille et la complexité du modèle. En effet, le bassin du Rhône est très grand et comprend plus qu'une centaine de stations hydrométriques.

Le doublement du taux de CO₂ actuel en 2050 est assez probable. Les modèles atmosphériques s'accordent à prédire une augmentation de température moyenne de 1 à 4°C accompagnée par une diminution des précipitations moyennes annuelles. Un tel changement climatique provoquera une modification du fonctionnement hydrodynamique du bassin du Rhône. En premier lieu, le stock d'eau du sol diminuera considérablement, les durées d'enneigement diminuent, la limite des neiges éternelles remonte, le débit des rivières s'affaiblira pendant les mois estivaux et l'étiage observé sera plus important.

Nous avons aussi constaté que selon les différents scénarios la contribution de la nappe aux stations hydrométriques change subtilement. La nappe joue un rôle très important sur le bassin de la Saône, or elle contribue encore de manière non négligeable à l'étiage à l'exutoire du Rhône. Selon les différents forçages atmosphériques nous avons constaté de différences subtiles mais pas du tout négligeables sur les débits simulés.

BIBLIOGRAPHIE

- Boone A., Noilhan J. et Etchevers P., (2000). *GICC – Rhône Climate Scenarios*. CNRM, Météo France.
- Champeaux, J. et Tamburini, A. (1996). Zonage climatique de la France à partir des séries de précipitations (1971 – 1990) du réseau climatique d'état. *La météorologie série 8* (14), 44 – 54.
- CNRS. <http://www.cnrs.fr/dossiers/dosclim/rechfran/4theme/cycledeleau/gewex.html>
- Collectif (1991). *Eaux de Rhône Méditerranée Corse*. Edition Agence RMC.
- Collectif (1996). *Corine Land Cover: Une base de données géographiques d'occupation du sol*. IFEN, Agence Européenne pour l'environnement.
- Collectif (2002). *Projet GICC – Rhône. Rapport final tranche I*. Cemagref.
- Girard, G., Ledoux, E. et Villeneuve, J. (1981). Le modèle couplé: simulation conjointe des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un système hydrologique. *Cahiers ORSTOM – section Hydrologie 18(4)*, 191 – 280.
- Golaz – Cavazzi, C. (1999). *Modélisation hydrologique à l'échelle régionale appliquée au bassin du Rhône: Comparaison de deux modes de calcul des bilans hydriques de surface et Etude de sensibilité à une perturbation des forçages climatiques*. Thèse, Ecole Nationale Supérieure des Mines d Paris.
- King, D., Le Bas, C., Jamagne, H. R. et Daroussin, J. (1995). Base de données géographique des sols de France à l'échelle du 1/1000000. Notice générale d'utilisation. Rapport technique, INRA. Service d'étude des sols et de la carte pédologique de France.
- Ledoux, E. (1980). *Modélisation intégrée des écoulements de surface et des écoulements souterrains sur un bassin hydrologique*. Thèse, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Ledoux, E., Girard, G. et De Marsily, G. (1989). *Unsaturated flow in hydrologic modelling – Theory and Practice*, Chap. Spatially distributed modelling: conceptual approach, coupling surface water and groundwater, p. 435 – 454. Kluwer Academic.
- Mudry, J. (1990) Les courbes flux chimique/débit et le fonctionnement des aquifères karstiques. *Journal of Hydrology 120*, 283 – 294.
- Petit, M. (1998). Rappels des principaux résultats du GIEC concernant l'effet de serre. *Impacts potentiels du changement climatique en France au XXI siècle – Rapport du Ministère du Territoire et de l'Environnement*, 12 – 14.
- Polcher, (1999). *Land Surface Processes and Climate Response*. European Union Final Report.

SGN (1996). *Carte géologique de la France au millionième – Sixième édition*. BRGM.

Sorooshian S. and Gupta H. V., and Bastidas L. A., (1998). *Calibration of Hydrologic Models Using Multi-Objectives and Visualization Techniques*. Department of Hydrology and Water Resources, University of Arizona, Tucson.

USGS (1999). *Mapping application center*. <http://www-nmd.usgs.gov/mac/isb>