

IMPACT D'UN CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE MANTEAU NEIGEUX ET L'HYDROLOGIE DES BASSINS VERSANTS DE MONTAGNE

Pierre Etchevers et Eric Martin

Météo-France, Centre National de Recherches Météorologiques, Centre d'Etudes de la Neige,
1441 rue de la piscine, 38406 Saint Martin d'Hères CEDEX.

E-mail : pierre.etcchevers@meteo.fr

RESUME

L'enneigement des massifs montagneux est très étroitement lié aux conditions météorologiques hivernales et leurs variations. Cette variabilité est bien visible sur certaines séries d'enneigement. Pour estimer l'impact des changements climatiques sur l'enneigement, la ressource en eau des bassins de montagne alpins et les débits des rivières associées, on a recours à une chaîne d'outils numériques, allant de l'analyse des conditions météorologiques en montagne à la simulation du manteau neigeux et des débits correspondants. Six scénarios climatiques ont été utilisés pour calculer un impact hydrologique sur différentes rivières de montagne du bassin versant du Rhône. On note un impact assez fort : diminution de la couverture de neige, avancement des hauts débits liés à la fonte, voire disparition du caractère nival de certaines rivières. Même si ces tendances se dessinent dans tous les scénarii, une incertitude importante demeure sur l'amplitude de ces évolutions en raison de la grande sensibilité du manteau neigeux à l'évolution des conditions atmosphériques.

ABSTRACT

The snow coverage of the mountainous regions is closely related to the winter meteorological conditions and their variations. This variability can be seen on some snow cover series. In order to estimate the impact of a climate change on the snow coverage and the water resources of the French alpine catchments and the associated river discharges, a chain of numerical tools is used to analyse the meteorological surface parameters and to simulate the snowpack and discharges evolution. Six climate scenarios have been applied to the whole Rhône basin. A notable impact can be seen: diminution of the snow coverage, modification of the spring high discharge and complete change of the river regime in some cases. Even if these general trends are common to all scenarios, the uncertainty on the change amplitude is still important because of the great sensibility of the snowpack to the atmospheric parameters evolution.

INTRODUCTION

L'enneigement des massifs français dépend évidemment du climat régnant sur notre pays, mais de manière finalement complexe. Pour un hiver donné, l'enneigement en terme de quantité et de durée dépend de la succession des épisodes météorologiques (perturbations, anticyclones, périodes chaudes ou froides). On ne peut pas le relier simplement à des paramètres moyens comme précipitation ou température moyenne. La complexité de cette relation justifie l'utilisation de modèles numériques assez sophistiqués pour l'évaluation de l'impact potentiel des changements climatiques sur l'enneigement, avec ses conséquences sur l'hydrologie. Après une discussion sur la variabilité de la neige saisonnière, l'article présente les différents outils numériques utilisés, puis les résultats

concernant l'enneigement alpin et pyrénéens et l'hydrologie des bassins versants de montagne situés dans les Alpes et le Jura français.

1) L'ENNEIGEMENT ACTUEL

Il y a peu de données longues d'enneigement en France, avec des représentativités assez faibles. En effet, dans une même zone montagneuse, les effets d'altitude et de versant ont aussi une influence primordiale sur l'existence et l'épaisseur du manteau neigeux. Il est donc difficile d'avoir une vision synthétique de l'enneigement du passé. L'étude détaillée d'un site donnée peut cependant nous fournir des renseignements intéressants. Au laboratoire du Col de Porte, le manteau neigeux est suivi par le Centre d'études de la neige depuis le début des années soixante. Ce site se trouve dans le massif de la Chartreuse à une altitude de 1320m. L'évolution de la hauteur moyenne de neige pendant la deuxième décennie de février (11-20 février) montre de façon très nette la grande variabilité de l'épaisseur du manteau neigeux (figure 1). Au titre des hivers peu enneigés, on retrouve l'hiver 1964 (un hiver qui est resté longtemps dans les mémoires comme un exemple d'hiver peu enneigé), et les hivers de la fin des années 80 et du début des années 90. On peut également remarquer que durant la dernière décennie la hauteur moyenne de neige a dépassé 1,5 m

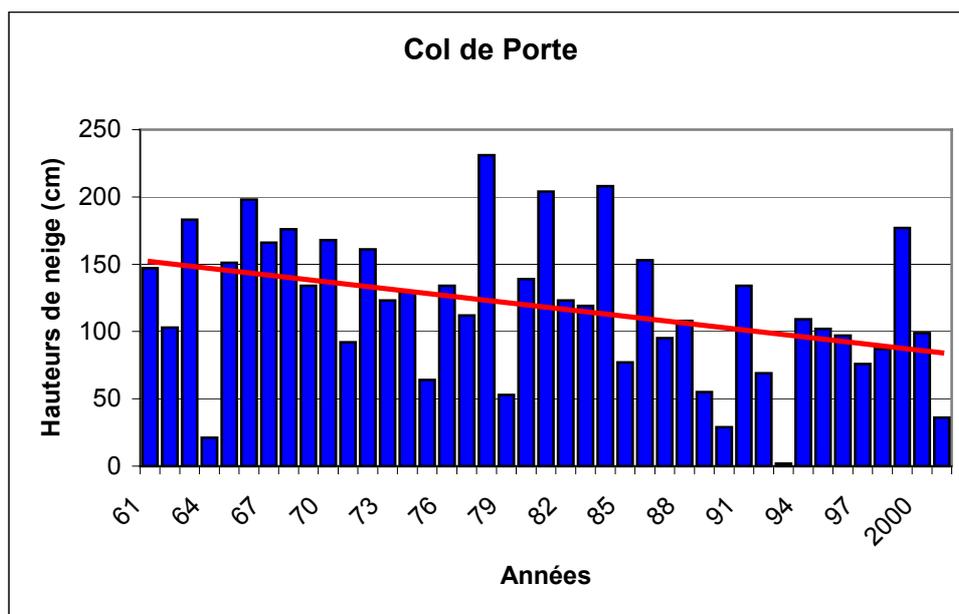


Figure 1 : évolution de la hauteur de neige moyenne au Col de Porte (pour la 2^{ème} décennie de février).

une fois, contre 3 ou 4 pour chacune des décennies précédentes. L'évolution du nombre de jours par an où il y a de la neige au sol montre également la forte variabilité de l'enneigement. On observe que la période milieu des années 70-milieu des années 80 correspond aux plus longues durées, ce qui explique, entre autres, le choc ressenti lorsque nous sommes passés aux années de « vaches maigres » à la fin des années 80. Il faut aussi remarquer que les valeurs les plus faibles se concentrent plutôt en fin de période. L'étude des durées de l'enneigement relativise l'enneigement de l'hiver 1998/1999, au dixième rang pour ce paramètre : si les cumuls de hauteur de neige durant le mois de février ont été exceptionnels dans les Alpes du nord, le reste de l'hiver est resté plutôt doux et sec.

Même s'il faut se garder de toute conclusion hâtive basée sur l'étude d'une seule série, finalement relativement courte, on peut cependant remarquer que la tendance sur quarante ans est à la baisse, à

cause de l'enneigement relativement plus faible de la dernière décennie, ce qui est très probablement à mettre en liaison avec le réchauffement du climat observé actuellement.

2) LES OUTILS DE MODELISATION

Les résultats de cet article ont été obtenus dans deux études consacrées à l'impact d'un changement climatique, l'une sur l'enneigement des Alpes [1], l'autre sur la ressource en eau des bassins de montagne situés dans le bassin du Rhône [2].

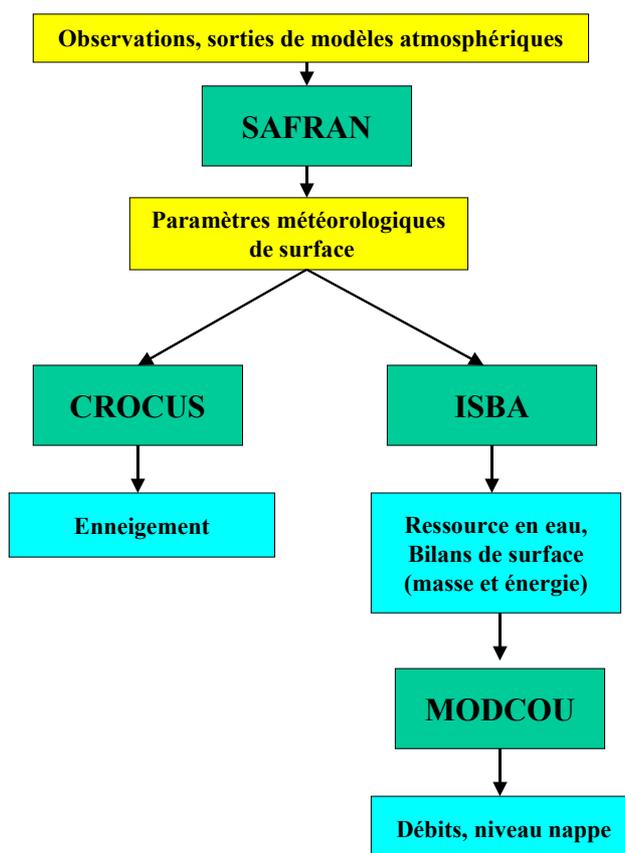


Figure 2 : principe des modèles utilisés.

La première étude utilise les outils SAFRAN et CROCUS (figure 2), chaîne de modèles numériques développés par le Centre d'études de la neige pour l'analyse et la prévision du risque d'avalanche [3]. Le modèle **Crocus** calcule l'évolution du manteau neigeux (épaisseur, stratigraphie ...) pour chaque massif tous les 300m d'altitude (de 900 à 3600 m), pour 6 orientations (N, E, SE, S, SO, O) et 3 pentes (0, 20°, 40°). C'est le système d'analyse **Safran** qui fournit les données météorologiques nécessaires. Pour conduire son analyse, ce dernier utilise l'ensemble des données météorologiques disponibles : données des postes nivométéorologiques, des stations météorologiques de montagne, des stations automatiques, ainsi que des sorties de modèles numériques. En dehors de la période hivernale, les postes du réseau nivométéorologiques sont complétés par des postes du réseau auxiliaire, qui fournissent quelques données très ponctuelles. La chaîne fonctionne en analyse (c'est-à-dire produit un diagnostic à un instant donné à partir de toutes les observations disponibles) mais

est aussi utilisé en mode « prévision », en utilisant cette fois les données fournies par les modèles de prévision numérique du temps. Cette chaîne a été validée avec succès par comparaison avec l'enneigement d'une cinquantaine de sites dans les Alpes et les Pyrénées [1].

La deuxième étude, consacrée à l'impact hydrologique d'un réchauffement climatique sur le bassin versant du Rhône, a été réalisée dans le cadre du projet GICC-Rhône. Les outils utilisés sont SAFRAN pour l'analyse des paramètres météorologiques, le modèle hydrologique MODCOU intégrant le schéma de surface ISBA et un module de neige simplifié inspiré de CROCUS. Ces outils ont été validés sur le bassin du Rhône [4], avant d'être utilisés dans un scénario climatique (projet GICC-Rhône, décrit en détail dans [2]). Les résultats spécifiques aux bassins de montagne font l'objet de la section 4.

3) IMPACT D'UN RECHAUFFEMENT SUR L'ENNEIGEMENT

L'énorme avantage de ces modèles dans le domaine de la climatologie nivale est la possibilité d'obtenir des données comparables (mêmes altitudes, expositions, pentes) d'une région à l'autre, ce qu'il n'est pas possible de faire avec les observations qui sont toujours influencées par les conditions locales. Les paramètres moyens, calculés sur une simulation des dix derniers hivers nous donnent des renseignements précieux sur l'enneigement actuel. Ainsi, la figure 3 représente pour les différents massifs des Alpes et des Pyrénées la durée moyenne de l'enneigement (en jours par an) à 1500m. Ces données supposent que l'on se situe en terrain plat et qu'il s'agit de neige évoluant naturellement. C'est un cas un peu théorique, mais il permet de comparer les différentes régions entre elles.

Les variations de la durée moyenne de l'enneigement est le reflet de la répartition des précipitations. La partie nord-ouest des Alpes (Préalpes du nord) est très arrosée. Les précipitations diminuent régulièrement au fur et à mesure que l'on se déplace vers le sud-est. Le Mercantour, à l'extrême sud-est constitue une exception car il est très arrosé, grâce aux dépressions méditerranéennes proches. La partie nord-ouest des Pyrénées est, elle aussi, très arrosée (d'une manière générale, le côté français est nettement plus arrosé que le côté espagnol). Les Pyrénées connaissent, à altitude égale des températures plus élevées que dans les Alpes. La durée moyenne de l'enneigement y est donc relativement faible (124 à 70 jours par an) et du même ordre que dans les Alpes du sud (140 à 100 jours par an). Dans les Alpes, l'enneigement est fort dans les Préalpes du nord (plus de 170 jours par an) et diminue lorsqu'on se déplace vers les massifs intérieurs et le sud-est. A haute altitude (au-dessus de 2500m), les conditions sont plus homogènes sur les deux massifs montagneux.

Un scénario simple (augmentation uniforme de la température de 1.8°C) a été retenu, l'étude a consisté dans la comparaison des résultats d'une simulation de référence (décennie 80) à ceux de la simulation avec augmentation de la température.

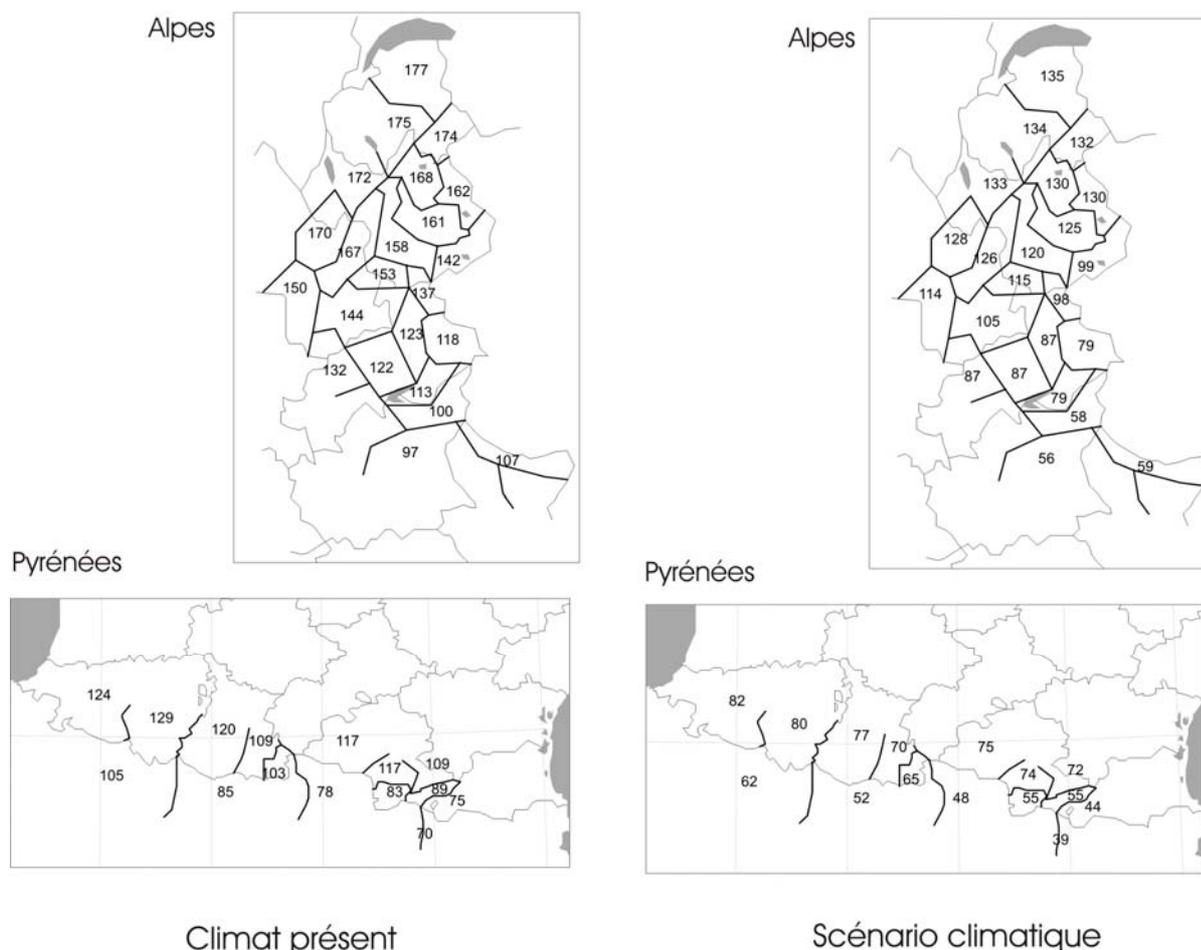


Figure 3 : Durée moyenne de l'enneigement à 1500 m (en jours par an), simulé par SAFRAN et CROCUS dans les Alpes et les Pyrénées. A gauche : situation actuelle, à droite : scénario climatique.

Pour une région donnée, l'impact dépend bien évidemment de l'altitude. A haute altitude (au-dessus de 2500m) pour fixer les idées, les conditions actuelles sont suffisamment froides pour que l'enneigement ne soit touché qu'à la marge : début un peu retardé, fonte légèrement plus rapide (une douzaine de jours en moins au total), et une petite diminution de la hauteur de neige. Evidemment, au-dessous, la période froide (c'est-à-dire la période pendant laquelle l'augmentation de 1,8°C n'a pas d'effet visible) se réduit, ... et disparaît vers 1800-2000m environ. L'impact devient alors très important. Par exemple, à 1500 m, c'est une diminution du nombre de jours avec neige au sol de l'ordre d'un mois qui se produirait, ce chiffre étant valable sur l'ensemble des massifs. On passerait alors de cinq à quatre mois d'enneigement par an dans les Alpes du nord, et de trois à deux mois dans les Alpes du sud ou les Pyrénées. Toujours à cette altitude, l'épaisseur de neige diminuerait fortement : une quarantaine de centimètres en moins dans les Alpes du Nord (pour une hauteur d'un mètre environ actuellement), une vingtaine en moins pour Alpes du sud et Pyrénées (actuellement environ trente à quarante centimètres). Il n'y a pas a priori de zones favorisées ou défavorisées. Si la baisse semble plus forte à 1500m dans le sud, il faut aussi tenir compte de l'altitude plus élevée des stations de sport d'hiver et des départs de courses dans ces régions pour estimer un impact.

Certains scénarios climatiques prévoient une augmentation des précipitations hivernales. Cette augmentation pourrait compenser de manière partielle le déficit de hauteur de neige à moyenne altitude, mais joue assez peu sur la durée de l'enneigement, plutôt gouvernée par la fonte (donc la température). Il serait donc possible d'avoir en hiver plus de neige à haute altitude qu'aujourd'hui, et moins à basse altitude.

4) IMPACT DES SCENARIOS CLIMATIQUES SUR L'HYDROLOGIE DES RIVIERES A CARACTERE NIVAL

Dans le cadre du projet GICC/Rhône, six scénarios « doublement de CO₂ » ont été utilisés pour évaluer l'impact d'un changement climatique sur l'hydrologie nivale de certains bassins à caractère nival. L'étude de plusieurs scénarios permet d'intégrer dans une certaine mesure les incertitudes liées à l'utilisation des modèles de circulation générale et au scénario climatique. Quatre modèles ont été utilisés (CNRM : Centre national de recherches météorologiques, HC : Hadley Centre, LMD : Laboratoire de météorologie dynamique, UR : Université de Reading) dont deux ont fourni des scénarios à basse (LR) et haute (HR) résolution. Des anomalies mensuelles ont été utilisées. Pour ce qui concerne la température, les anomalies obtenues sont assez voisines : le réchauffement est en général fort en décembre (2°C environ) et modéré de janvier à avril (de 1 à 2°C). L'anomalie mensuelle de précipitations est en général positive pendant les mois d'hiver, avec des valeurs comprises entre 0 et 25 % (de 20 à 50 % pour CNRM.HR). Etant donné l'augmentation de la température de l'air, l'augmentation des précipitations totales ne se traduit pas par une augmentation des précipitations neigeuses, comme le montre le tableau 1 pour les bassins de l'Isère et de la Haute Durance :

Bassin versant		CNRM.LR	LMD.LR	HC.LR	UR.LR	CNRM.HR	LMD.HR
Isère	PT	14	2	9	24	28	-5
	PS	-18	-22	-29	-17	-17	-39
Haute Durance	PT	14	2	9	24	24	-2
	PS	-11	-13	-20	-7	-4	-28

Tableau 1 : anomalies (relatives au climat actuel, en %) des précipitations totales (PT) et solides (PS) pour les mois de décembre, janvier, février et mars sur les bassins versants de l'Isère et de la Haute Durance.

L'évolution de l'enneigement ne montre pas de différence notable par rapport au scénario décrit dans la section précédente : impact important à basse et moyenne altitude, effet moins important à haute altitude en hiver. Sur l'ensemble du bassin versant, l'impact sur les régions de basse et moyenne altitude a un effet important sur la surface enneigée. La réduction est particulièrement marquée aux mois de janvier et février, où elle est comprise entre 6000 et 10000 km² suivant les scénarios (pour une valeur moyenne de 24000 km² pour le climat actuel, soit 29% du bassin versant du Rhône). L'utilisation de 6 scénarios climatiques différents permet une estimation indirecte de l'incertitude sur les résultats obtenus : l'enneigement est en effet très sensible à l'évolution de la température de l'air et des précipitations (quantité et forme –solide ou liquide-). Ainsi, la réduction de la durée d'enneigement est de 45 ± 15 jours à 1500 m et de 35 ± 10 jours à 3000 m. La hauteur de neige moyenne pendant l'hiver est réduite de 20 à 30 cm suivant l'altitude, avec une incertitude de ± 10 cm suivant le scénario considéré.

Pour le bassin versant de l'Isère, grand bassin versant des Alpes du nord, l'accumulation maximale neigeuse est réduite de 30 à 50 %, avec une disparition quasi-complète pendant les mois d'été. Le maximum est atteint un peu plus tôt (au mois de mars au lieu du mois d'avril, voir la figure 4). L'évolution mensuelle du manteau est identique pour la plupart des scénarios, sauf les plus extrêmes (LMD.HR et HC.LR). Le débit augmente en hiver, en liaison avec l'augmentation des précipitations et un décalage du pic de fonte de 1 mois. Ce dernier étant moins important, l'amplitude des débits printaniers est réduite pour la plupart des scénarii (de 0 à 15 %). La réduction la plus notable est celle

du mois de juillet (environ 50 %), sous l'effet conjugué de l'augmentation de l'évaporation et de la disparition totale de la neige (plus d'effet réservoir). A l'échelle annuelle, les débits augmentent légèrement pour les 3 scénarii où l'anomalie de précipitations est la plus forte et décroissent de 5 à 24 % pour les autres (tableau 2).

Bassin versant	CNRM.LR	LMD.LR	HC.LR	UR.LR	CNRM.HR	LMD.HR
Isère à St-Gervais	2	-7	-6	11	0	-24
Durance à la Clap.	2	-8	-6	7	-10	-20
Doubs à Courclavon	1	-9	-10	11	5	-22

Tableau 2 : évolution du débit annuel moyen par rapport au climat actuel (%).

L'impact du réchauffement sur le manteau neigeux du bassin de la Haute-Durance est identique à celui des rivières plus au nord, avec cependant une réduction moins forte en raison de l'altitude moyenne plus élevée. Le débit annuel décroît plus sensiblement que dans les Alpes du nord (de 0 à 20% suivant les scénarii). Les débits augmentent nettement en automne et en hiver et diminuent sensiblement en été. Les forts débits printaniers se produisent un mois plus tôt, leur amplitude restant inchangée pour certains scénarii et diminuant de 10 à 25 % pour d'autres.

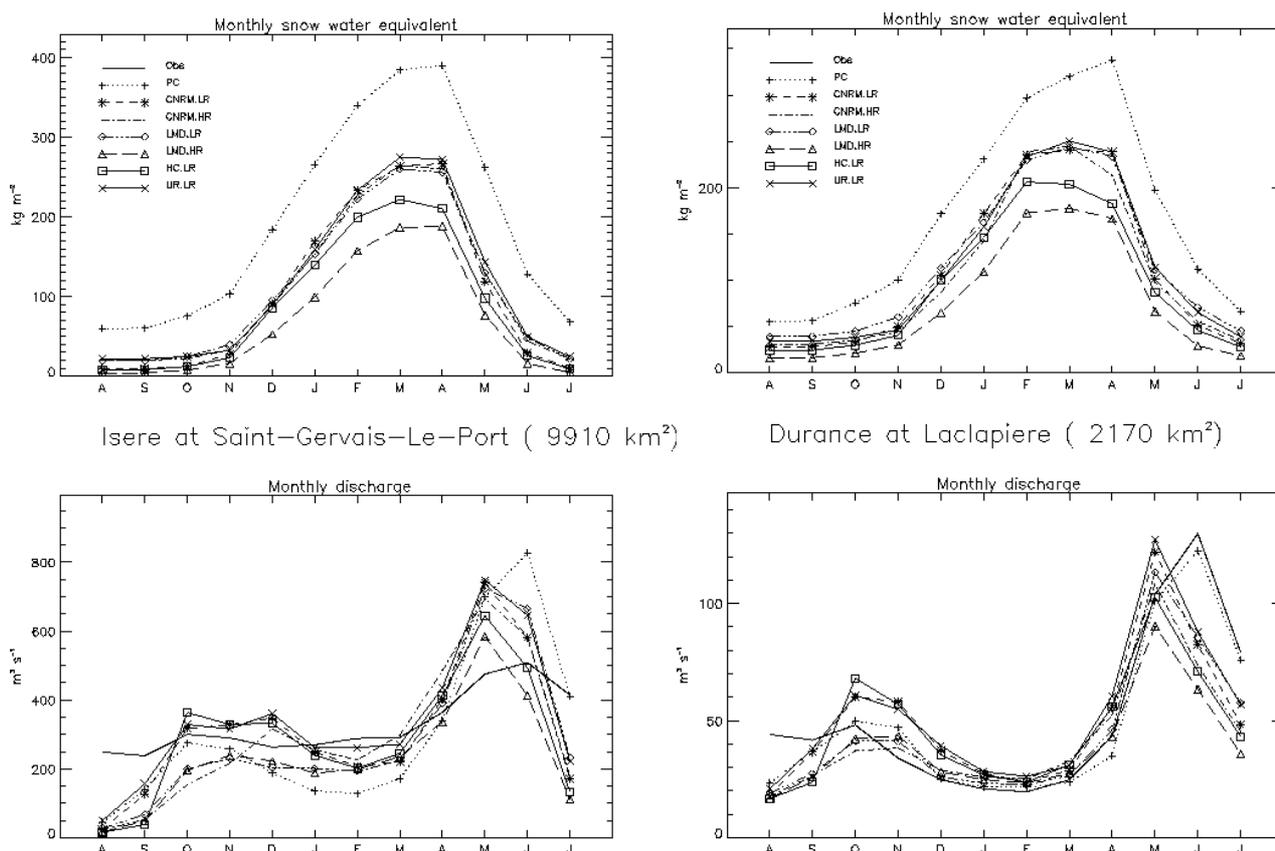


Figure 4 : évolution du manteau neigeux et débits moyens mensuels sur les bassins de l'Isère à St Gervais le Port et la Durance à la Clapière. Obs : observation (débits seulement), PC : climat actuel (résultats de la modélisation pour le climat actuel), le reste : six scénarios climatiques. A noter que pour le bassin de l'Isère, la simulation de référence est très éloignée de l'observation, en raison de la présence de nombreux barrages.

Enfin, pour le Doubs, le manteau neigeux moyen sur le bassin est fortement réduit (l'amplitude maximale décroît de 75 mm à moins de 30 mm). Le régime de la rivière perd son caractère pluvio-nival (maxima répartis uniformément entre décembre et mai sous l'effet des pluies hivernales et de la fonte du manteau neigeux) et est entièrement dominé par le régime des précipitations : forte augmentation des débits en décembre et janvier, diminution au printemps. Globalement, le débit annuel moyen augmente pour la moitié des scénarii (de 1 à 11 %), et diminue sinon (de 9 à 22 %).

CONCLUSION

Il paraît maintenant établi que le manteau neigeux serait très sensible à toute augmentation de température, cet effet pourrait être plus ou moins modifié par l'augmentation des précipitations hivernales. La simulation du manteau neigeux sur le bassin versant du Rhône fournit des résultats validés par comparaison avec les observations de hauteurs de neige et de débits. La diminution est forte à basse et moyenne altitude (réduction de 50 % du manteau neigeux, voire parfois disparition) et moins sensible en haute montagne (-20% pour l'accumulation maximale). Les surfaces enneigées pendant l'hiver diminuent en moyenne de 25 à 40 % suivant les scénarios. La fonte du manteau neigeux se produisant plus tôt et les précipitations neigeuses diminuant, les forts débits printaniers sont généralement réduits et ils apparaissent plus tôt (1 mois avant). Les débits hivernaux augmentent sensiblement (plus de pluies hivernales), alors que les débits estivaux sont réduits de 50 % (assèchement plus marqué des sols). Ces tendances générales sont reproduites par tous les scénarios, à des degrés divers. Deux familles principales se distinguent : 4 scénarios « modérés » et deux scénarios « extrêmes » (HC.LR et LMD.HR présentent une augmentation parmi les plus fortes de la température et une augmentation très faible des précipitations hivernales). Ainsi, la tendance vers une réduction de l'enneigement et l'atténuation du caractère nival des bassins versants étant désormais bien établie, les études à venir porteront sur une quantification plus précise de cette évolution.

REFERENCES

- [1] Martin E., Brun E., Durand Y. (1994) : "Sensitivity of the French Alps snow cover to the variation of climatic variables", *Annales Geophysicae*, 12, p 469-477.
- [2] Lebois E. (2001) : "Evaluation des possibles impacts des changements climatiques à la suite du projet GEWEX-Rhône, par application d'un modèle distribué », ce volume.
- [3] Durand Y., Giraud G., Brun E., Mérindol L., Martin E. (1999) "A computer-based system simulating snowpack structures as a tool for regional avalanche forecasting", *Journal of Glaciology*, Vol 45, N 151, 469-484.
- [4] Etchevers P., Golaz C., Habets F. (2001) : « Simulation of the water budget and the river flows of the Rhône basin from 1981 to 1994 », *Journal of Hydrology*, 244(2001) 60-85.